

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

530.12:531.18(018)

**МОЖНО ЛИ РАССМАТРИВАТЬ РЕЛЯТИВИСТСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ
МАСШТАБОВ ДЛИНЫ И ВРЕМЕНИ КАК РЕЗУЛЬТАТ ДЕЙСТВИЯ
НЕКОТОРЫХ СИЛ?***Е. Л. Фейнберг*

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| 1. Введение | 709 |
| 2. Уточнение постановки вопроса | 710 |
| 3. «Поиски динамических причин бессмысленны» | 714 |
| 4. «Динамическая трактовка возможна и даже желательна» | 715 |
| 5. Комментарий о сокращении масштабов и действия сил | 717 |
| 6. Ковариантность законов природы как «интегральный ограничительный принцип» | 720 |
| 7. Реальные процессы установления новой формы тела | 722 |
| 8. «Динамическая интерпретация» и общие принципы теории относительности | 726 |
| 9. Заключение | 728 |
| Цитированная литература | 730 |

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос, поставленный в заголовке этой статьи, может представлять, конечно, только методический интерес. Релятивистская кинематика и динамика образуют замкнутую систему, позволяющую решать любые правильно сформулированные физические задачи в рамках компетенции теории. Когда речь идет о равномерно движущихся телах или системах отсчета, то, вообще говоря, нет никакой необходимости обращаться к этому вопросу. Однако при рассмотрении *изменений* состояния движения, особенно когда оно сопряжено с физическими изменениями структуры или других характеристик внутреннего состояния тел, иногда возникают парадоксы (см. ниже, раздел 7), связанные именно с возможностью различных ответов на интересующий нас вопрос. И действительно, многие физики, успешно использующие теорию относительности и, казалось бы, хорошо знающие ее, отвечают на него диаметрально противоположно: одни говорят — да, можно; другие — нет, не только невозможно, но даже самые поиски положительного ответа противоречат теории относительности. Есть, правда, и весьма многочисленная третья группа, считающая, что вопрос не представляет интереса и не имеет никакого значения. Вероятно, поэтому в подавляющем большинстве книг по специальной теории относительности (мы будем говорить только о ней) он вообще не упоминается, а там, где его не обходят, обычно лишь декларируют ту или иную точку зрения.

При таком резком расхождении мнений, видимо, нелишне остановиться на этом вопросе подробнее, хотя излагаемое ниже, по существу, является тривиальным и может иметь лишь педагогическую ценность. Во всяком случае, речь здесь идет о фундаментальных вопросах теории и вряд ли стоит стыдливо избегать их обсуждения.

2. УТОЧНЕНИЕ ПОСТАНОВКИ ВОПРОСА

Прежде всего нужно четче сформулировать вопрос, о котором мы будем говорить.

Длина стержня есть понятие относительное, ее зависимость от движения системы отсчета есть выражение того факта, что длина определяется *соотношением* двух объектов — измеряемого тела и измеряющего комплекса масштабов и часов. Поэтому длина данного тела, полученная при использовании измеряющего комплекса, помещенного в некоторой инерциальной системе отсчета, столь же реальна, как и измеренная комплексом, покоящимся в другой инерциальной системе. Эта оговорка нужна потому, что иногда вопрос о динамической природе сокращения масштаба смешивается с вопросом о «реальности сокращения». Задают вопрос: «кажущийся это эффект или реальный»? Ответ, разумеется, может быть только один, — реальный, поскольку ничего более реального, чем свойства тел, наблюдаемые и изучаемые всеми возможными физическими методами, мы не знаем. Еще Лоренц (в 1912 г., когда он уже полностью принял и осознал точку зрения Эйнштейна) отвечал на этот вопрос так: «Не следует делать ошибку, полагая, что укорочение только кажущееся. Напротив, как *A*, так и *B* [два одинаковых масштаба, покоящиеся в разных системах. — *Е. Ф.*] можно действительно наблюдать... так же, как, например, расширение тела при нагревании» (¹, стр. 27—28; здесь и ниже, где цитируются иностранные тексты, перевод автора данной статьи).

Здесь, пожалуй, уместно сделать небольшое отступление и напомнить, что «кажется» как раз совсем другое. Например, согласно преобразованиям Лоренца, как мы знаем, движущийся вдоль одного из своих ребер куб сжимается в параллелепипед (а шар — в эллипсоид). Долгое время все думали, что это и будет видеть наблюдатель, мимо которого тело движется. В частности, что то же получится на фотографии. Весьма эффективно такое представление использовалось в популярной литературе, например, считалось, что пассажир поезда, движущегося с очень большой скоростью, будет видеть дома и людей на перроне сплюснутыми. Лишь более полувека спустя после создания теории относительности Террел ², а также и Пенроуз (для шара ³) рассмотрели вопрос непредвзято. Оказалось, что куб по-прежнему будет «казаться» (т. е. будет виден) кубом (а шар — шаром), но повернутым относительно своего истинного положения (точнее, это верно, если угол зрения, занимаемый телом, не велик). Между тем, *на самом деле* он не повернут, но сжат, т. е. во всех расчетах эффектов, производимых этим телом, нужно учитывать, что вещество его заполняет сжатый и не повернутый объем (параллелепипед, эллипсоид), перемещающийся равномерно без изменения формы. «Кажущееся» возникает от того, что для попадания света от разных точек тела в глаз (или на фотопластинку) требуется разное время. В частности, из-за этого наблюдатель будет видеть и ту сторону тела, которая не видна ему, если тело покоится. Простое релятивистское сокращение тела без поворота будет видно глазом (а также зарегистрировано фотоаппаратом), только если наблюдаемое тело — бесконечно тонкий стержень, движущийся вдоль своей оси, а наблюдение производится в момент, когда середина стержня проходит через перпендикуляр, опущенный из точки наблюдения на ось стержня.

(тогда время движения света от концов стержня до наблюдателя одинаково; конечно, положение середины стержня будет при этом регистрироваться с запаздыванием) *). Эффект этот имеет место и в классике, релятивистская кинематика лишь меняет его количественно. Он прекрасно разобран в обзоре ⁴.

Однако обычно рассматривают лишь мысленные эксперименты. Между тем, этот эффект давно и хорошо наблюдается в физике высоких энергий. Действительно, если два протона очень высокой энергии соударяются в системе центра инерции с лоренц-факторами $\gamma_c \gg 1$ и порождают много новых частиц, разлетающихся в среднем симметрично вперед — назад

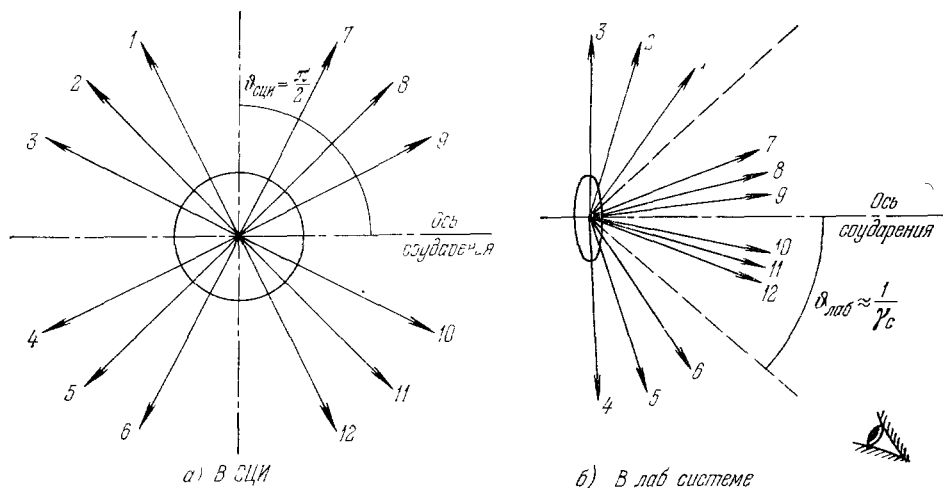


Рис. 1. Испускание мезонов в процессе генерации частиц при соударении адронов высокой энергии.

а) в системе центра инерции, б) в лабораторной системе. (Половина частиц лежит в пределах узкого конуса, $\varphi_{лаб} = 1/\gamma_c$, где γ_c — лоренц-фактор движения системы центра инерции в лабораторной системе.)

(рис. 1, а), то в лабораторной системе наблюдатель видит два направленных вперед конуса летящих частиц — «узкий» и «широкий» (разделяющий их угол $\varphi_{лаб} = 1/\gamma_c$), так что наблюдатель, смотрящий навстречу потоку частиц, видит также и частицы, испускаемые задней полусферой излучающей системы (рис. 1, б), т. е. видит как бы свечение задней поверхности объекта, не видимой в СЦИ, в которой излучающий объект покоится.

После этого отступления о том, что «кажется» при наблюдении разными методами и что имеет место в действительности, вернемся к основному интересующему нас вопросу. Он, как видим, относится отнюдь не к «реальности» эффекта, а к совсем другому: означают ли приведенные

*) Разумеется, если длина движущегося вдоль своей оси тонкого стержня регистрируется тем способом, который описан в первой же работе Эйнштейна и с тех пор фигурирует во всех изложениях теории относительности, то и будет наблюдаться обычное релятивистское сокращение длины. Для этого измерительная линейка должна быть уложена вдоль оси движения в непосредственной близости от нее (и соответственно должны быть размещены на ней часы), а положение концов движущегося стержня должно одновременно (по этим часам) отмечаться фотоаппаратом, глазами и т. п., помещенными в непосредственной близости от соответствующего конца стержня в момент регистрации. Эта процедура и будет подразумеваться в дальнейшем. Ее же, конечно, имеет в виду и Лоренц в процитированной фразе. Совершенно так же, при должной постановке измерений, мы можем наблюдать сжатие эллипсоида в шар, когда он приведен в движение, и т. п.

выше слова Лоренца, что укорочение масштаба при переходе в другую систему отсчета можно рассматривать как результат действия некоторых сил, некоторых физических факторов и свойств тел (упругости и т. п.), фигурирующих в уравнениях движения и в условиях равновесия частей тела, подобно тому, как расширение при нагревании происходит при подводе тепла в согласии с уравнениями теплопроводности и механики, а конечное состояние определяется равновесием некоторых сил? *Этот вопрос не имеет отношения к проблеме эфира и задается он уже в рамках теории относительности Эйнштейна.*

Уточним, что, собственно, поднимается под укорочением масштабов и замедлением часов.

Обычное рассуждение, которое использовал Эйнштейн в своей классической статье 1905 г., состоит в следующем: «Пусть в «покоящемся» пространстве» (до этого Эйнштейн разъясняет, что «покоящейся» называется просто одна выбранная нами система отсчета из числа тех, которые мы теперь называем инерциальными. — *Е. Ф.*) «даны две координатные системы... Пусть каждая система снабжена масштабом и некоторым числом часов и пусть оба масштаба и все часы в обеих системах в точности одинаковы. Пусть теперь началу координат одной из этих систем... сообщается постоянная скорость v в направлении возрастающих значений x другой покоящейся системы...; эта скорость передается также координатным осям, а также соответствующим масштабам и часам» (⁵, стр. 13). После этого начинается обычное сравнение измерений в двух системах. Тремя страницами раньше также говорится о том, что «стержню ...сообщается» (подчеркнуто мною. — *Е. Ф.*) «равномерное и параллельное оси x поступательное движение (со скоростью v)» (⁵, стр. 10). Так возникает первая из двух используемых формулировок вопроса — классическая, связанная с передачей стержней и часов из одной инерциальной системы в другую. Она является классической, как в том смысле, что используется в классических трудах по специальной теории относительности, так и потому, что не опирается на квантовые свойства вещества, а имеет более общее значение.

Итак, при этой *первой формулировке* сокращение длины, как утверждается, имеет следующий смысл ^{5, 6}. Пусть в некоторой инерциальной системе отсчета, ИСО₁, мы изготовили достаточное число совершенно одинаковых масштабов длины и часов и затем роздали их в разные инерциальные системы. Пусть часть из них мы передали в систему ИСО₂, движущуюся относительно первой со скоростью v . Уложив стержни в обеих системах вдоль направления скорости, разместив в разных точках стержней часы и синхронизовав их (в каждой ИСО) по известному способу, мы измеряем длину переданного в ИСО₂ стержня с помощью стержней и часов, оставшихся в ИСО₁. Оказывается, что эта длина стержня l_2 меньше, чем его же длина l_1 до передачи в ИСО₂, $l_2 = l_1 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$.

В таком случае естественно задать вопрос: не произошло ли это потому, что, передавая стержень, мы, ускоряя его, должны были воздействовать на него некоторыми силами и при этом неизбежно что-то изменили в его структуре? Мы могли, например, тянуть его за один конец, либо толкать другой конец. При этом по стержню пошли упругие волны, а когда приложенная сила была снята и когда все точки стержня достигли одной и той же скорости v (это два, вообще говоря, разных условия; см. раздел 7), то он мог иметь иную форму, чем до приложения силы. Важно, что в окончательное состояние равномерного движения с одной и той же скоростью v можно прийти бесконечным числом способов. Можно, например, зарядить стержень электрическим зарядом и на некоторое время включить электростатическое поле (при расчете, конечно, обязательно

нужно будет принять во внимание нарастание и последующее убывание включаемого и выключаемого поля во времени и пространстве) и т. д. При всех этих способах приведения стержня в движение его деформация может меняться, следуя самым различным режимам (в частности, можно приводить стержень и часы в движение бесконечно медленно; это, однако, не значит, что интегральный эффект исчезает).

Пытаясь так объяснить лоренцовское сокращение, мы сразу наталкиваемся на два смущающих пункта в этом рассуждении.

Во-первых, кажется крайне странным, что все возможные процессы и режимы деформации, если они оканчиваются равномерным движением с одной и той же скоростью v , приводят в конце концов к одинаковой результирующей деформации, — к лоренцову сокращению, зависящему только от v .

Во-вторых, ведь мы могли ускорять *не измеряемый* стержень, переводя его в ИСО₂, а всю *измеряющую* систему, расположенную в ИСО₁, придавая ей такую же скорость, но в обратном направлении. По теории относительности результат должен получиться — и, конечно, получается — тот же: происходит укорочение *измеряемого* стержня, хотя силы действовали не на стержень, а на систему измерительных приборов.

Однако это только сомнения, и против каждого из них можно найти соответствующие контрдоводы, которые будут приведены ниже.

Но существует и *другая формулировка*, которая обходит процедуру передачи тел, но зато использует по существу тождественность микрочастиц и, в частности, атомов одного и того же элемента, т. е. использует квантовые свойства.

Она избавляет нас от процедуры передачи тел. Здесь нет речи об ускорении тела, но сразу рассматриваются равновесные конфигурации двух одинаковых тел, покоящихся каждое в своей ИСО. Например, изготовим независимо в двух ИСО одинаковые стержни, «скажем, из стали»⁶, (стр. 211), причем «единственное, что будет трудно в первый момент, — это вопрос о том, как взять... те же самые эталоны длины» (там же). Однако мы можем преодолеть эту трудность⁶. Следует подчеркнуть: здесь мы (безмолвно) принимаем довольно естественное предположение, что «сталь» — одна и та же в двух системах. Если же договорить до конца, то по существу мы опираемся на квантовый принцип тождественности микрочастиц и одинаково построенных из них атомов (изотопов). Так, два атома кадмия, помещенные в разных ИСО, можно считать а priori тождественными. Между тем, сравнивая (приборами какой-либо одной ИСО) длины волн и частоты испускаемого ими излучения, мы обнаруживаем релятивистское изменение этих величин (см., например,⁷). Два подхода ведут к одинаковым результатам, и это, конечно, необходимо.

В самом деле, наблюдая некоторый стержень, пролетающий со скоростью v , мы можем не знать его истории *); он мог быть передан из ИСО₁ в ИСО₂, а мог быть и сразу изготовлен («из такого же материала») в ИСО₂. Результат не может зависеть от нашего знания или незнания.

Конечно, при такой второй формулировке справедливость формул преобразования теории относительности ставится в зависимость от квантового принципа тождественности микрочастиц. Это можно считать нежелательным, так как теорию относительности принято считать общезначимой, не связанной с частными положениями квантовой теории. Однако «одинаковость» материала стали и т. п. большинство физиков считает

*) Нужно, правда, быть уверенным, что его части находятся в стационарном состоянии, т. е. что если на него и действовали какие-либо внешние силы, то это было достаточно давно; см. раздел 7.

настолько элементарным и ясным фактом, что в этом трудно усмотреть слабый пункт *).

Однако и эта вторая формулировка отнюдь не исключает «силовой» интерпретации сокращения длины. Если мы передавали стержень, то мы можем полагать, что после прекращения действия внешних сил в нем остались некоторые напряжения, установилось новое равновесие внутренних сил, которое и определяет его новую форму. Следовательно, и в стержне, изготовленном сразу в ИСО₂, имеющем такую же, сокращенную (с точки зрения ИСО₁) форму, должно иметь место точно такое же равновесие сил без всякой его передачи. И это действительно так. Ничего не зная об истории пролетающего стержня, мы можем измерить действующие внутри него силы и убедиться, что они совсем иные, чем в покоящемся стержне. Например, напряженность электрического поля каждого движущегося заряда, входящего в состав стержня, иная, чем у того же заряда в покое. Более того, у него имеется магнитное поле, которого нет у покоящегося заряда, и его тоже можно измерить. Поэтому если два заряда движутся вместе, то между ними действуют иные силы, чем когда оба заряда покоятся. Поэтому и равновесная форма тела, составленного из заряженных частиц, должна измениться.

Конечно, и здесь возникает то же недоумение, что при передаче стержней: почему независимо от природы сил и вещества, от формы и положения тела новая равновесная форма отличается от формы этого же тела в покое одним и тем же лоренцовым сжатием, зависящим только от скорости движения v ? Однако снова это только сомнение, а универсальность сжатия, как следствия некоторых сил, в настоящее время может быть констатирована уже на примере по крайней мере двух типов полей — электромагнитного и поля сил упругости (см. ниже).

Две рассмотренные формулировки различаются (в аспекте, который нас здесь интересует) тем, что в первом случае речь идет, так сказать, о «динамической» интерпретации релятивистского сокращения, а во второй — о «статической», но в обоих случаях об использовании не «кинематической» аргументации, а концепции реально действующих сил.

Прежде чем перейти к пояснениям физической допустимости подобной интерпретации, уместно привести высказывания различных авторов об этой проблеме.

3. «ПОИСКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИЧИН БЕССМЫСЛЕННЫ»

Вот наудачу цитаты из, вообще говоря, хороших популярных и из более серьезных книг разных авторов, явно знающих теорию относительности и умеющих ею пользоваться для практических расчетов. Некоторые из этих авторов являются известными учеными.

«Движущиеся тела сокращают свои размеры не вследствие каких-то изменений, происходящих с ними самими, а просто потому, что они движутся относительно измерительного прибора. Это эффект не динамический, а чисто геометрический, или, точнее, кинематический» (8, стр. 40); «Излишне говорить, что поиски динамических причин замедления времени так же бессмысленны, как и в случае лоренцева сокращения» (8, стр. 49).

*) Не исключена, конечно, чрезвычайно интересная ситуация: быть может, в мире, в котором вещество не подчиняется квантовым законам, нельзя удовлетворить принципу относительности. В самом деле, квантовая и релятивистская теории связаны очень тесно. Например, тождественность частиц, которая в нерелятивистской квантовой механике принимается как независимый постулат, в действительности должна быть следствием вторичного квантования в последовательной релятивистской квантовой теории поля.

«Для Лоренца и Фицджеральда сокращение было физическим изменением, обусловленным давлением эфирного ветра. Для Эйнштейна оно было связано только с процессом измерения» (9, стр. 56). Ясно, что если оно связано только с процессом измерения» (что в действительности думал Эйнштейн, мы скоро увидим), то отсюда можно заключить, что не только взаимодействие с эфиром, но и деформацию под действием ускоряющих сил при передаче масштаба автор отвергает.

«Если..., то можно прийти к неверному выводу, что с движущимися часами происходит нечто подобное материальному сокращению Фицджеральда — Лоренца» (10, стр. 111). Итак, никакого «материального» сокращения не происходит.

«Слово «сокращение» может внушить совершенно неправильное истолкование этого термина. Так, стержень при нагревании расширяется, а при охлаждении сжимается. Ничего подобного не происходит (с точки зрения теории Эйнштейна) ни с поездом, ни с платформой при их относительном движении» (10, стр. 128; ср. с приведенными выше на стр. 710 словами Лоренца).

«Кинематические эффекты не следует отрицать на том основании, что они происходят без участия реальных сил. Действительно, релятивистское сокращение масштабов не связано ни с какими силами» (11, стр. 176).

В некоторых книгах, переведенных с английского, изменение длины и замедление времени называется «кажущимся». Нужно, однако, иметь в виду, что английское *apparent* (кажущееся, видимое) не обязательно имеет тот же оттенок «фиктивного», как русское «кажущееся». Так, в книге¹² говорится: «Hence the apparent length of the rigid body... is reduced» (стр. 15), «A moving clock appears to go slow» (стр. 16) и т. д. Поскольку эти фразы далее никак не развиваются, то, по справедливости, мы не можем считать, что автор отрицает динамическую природу эффекта, хотя это и представляется правдоподобным.

К этому можно добавить, что автору настоящей статьи неоднократно приходилось слышать от весьма уважаемых им физиков-теоретиков такой же ответ на обсуждаемый нами вопрос: привлечение картины сил, осуществляющих сжатие стержня и изменение хода часов, не только невозможно, но и противоречит всему духу теории относительности *).

Нелишне подчеркнуть, что весь пафос борьбы авторов, стоящих на «антидинамической», «антисиловой» платформе, как правило, направлен против эфира, против веры в изменение стержней при переходе из абсолютного покоя в «истинное» инерциальное движение. В действительности же старый и давно устаревший вопрос об абсолютном движении отнюдь не связан с тем, что нас здесь интересует. Мы говорим о процессах, которые происходят в рамках обычного определения длины и процедуры измерения, в теории относительности, т. е. уже отказавшись от ньютоновского абсолютного пространства.

4. «ДИНАМИЧЕСКАЯ ТРАКТОВКА ВОЗМОЖНА И ДАЖЕ ЖЕЛАТЕЛЬНА»

Прелесть и мощь эйнштейновской трактовки, выраженной в его знаменитой первой статье⁵, произвели такое оглушающее впечатление, что многие читатели не увидели, не услышали некоторых интересных высказываний ряда, скажем прямо, довольно серьезных авторов.

Паули: «Весьма важно, что Эйнштейн сделал теорию независимой от специальных предположений о строении материи.

*) Почему-то споры, затрагивающие вопросы понимания основных положений теории относительности и квантовой механики, обычно носят особенно резкий характер. В них часто «переходят на личности», с взаимными обвинениями в неграмотности и т. п.

Следует ли на этом основании вообще отбросить стремление к атомистическому пониманию лоренцова сокращения? По нашему мнению, это не так. Сокращение масштаба является не простым, а напротив, крайне сложным процессом. Оно не имело бы места, если бы не только основные уравнения электронной теории, но и еще неизвестные законы, определяющие строение электрона, не были бы ковариантными относительно группы преобразований Лоренца. Мы должны постулировать это предположение (*Wir müssen eben postulieren dass dies der Fall ist*) и иметь в виду, что когда указанные законы станут известными, *теория будет в состоянии дать атомистическое объяснение поведению движущихся масштабов и часов*» (13, стр. 30; подчеркнуто мною. — Е. Ф.).

Но, может быть, это оговорка молодого автора, ведь Паули было 21 год, когда он написал свою замечательную книгу? Однако Эйнштейн горячо одобрил ее как «зрелую и тщательно продуманную работу»¹⁴. Трудно считать это одобрение результатом небрежности Эйнштейна, быть может не придавшего значения процитированному выше высказыванию Паули. Ведь в краткой и тоже высоко положительной рецензии на книгу Вейля он не преминул оговорить свое несогласие с точками зрения Вейля по поводу смысла закона сохранения энергии и по поводу соотношения между теоретической физикой и действительностью¹⁵.

Другой автор, Лауэ: «Упругие силы, обуславливающие форму тела, должны испытывать такое воздействие движения, чтобы они привели к сокращению» (16, стр. 62).

Третий, Мёллер: «Должно быть также возможно вывести запаздывание движущихся часов из фундаментальных законов механики, управляющих ходом часов. Но так же, как в случае лоренцова сокращения, эффект запаздывания более адекватно рассматривать как элементарный эффект, являющийся прямым следствием принципа относительности. Если за основу вычислений работы часов мы возьмем ньютоновскую механику, то никакого запаздывания при движении часов мы не получим, поскольку время в ньютоновских основных уравнениях является инвариантным параметром... Однако это как раз показывает, что уравнения Ньютона не достаточно точны в области, где $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ заметно отличается от единицы. Если же мы используем точные релятивистские уравнения механики для описания работы часов..., то эффект замедления должен получаться как следствие этих уравнений» (17, стр. 49—50; подчеркнуто мною — Е. Ф.). Таким образом, согласно Мёллеру, вопрос только в одном, — что считать более «элементарным» и адекватным, — замедление, как результат динамики приводимой в движение материальной системы (часы), или общекинематический вывод из принципа относительности. Он предпочитает второе, и это можно понять (см. ниже). Ну, а все-таки, что думал сам Эйнштейн?

«Собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы вывести из решения основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать независимой от них»¹⁸ *).

*) И дальше: «Обычный образ действия имеет, однако, свое оправдание, поскольку с самого начала ясна недостаточность принятых постулатов для обоснования теории масштабов и часов. Эти постулаты не настолько сильны, чтобы из них можно было вывести достаточно полные уравнения движения для физических процессов. Если вообще не отказываться от физического толкования координат (что само по себе было бы возможно), то лучше уж допустить такую непоследовательность, но с обязательством избавиться от нее на дальнейшей стадии развития теории [подчеркнуто мною. — Е. Ф.]. Однако этот грех нельзя узаконивать до такой степени, чтобы разрешать, например, пользоваться представлением о расстоянии как о физической сущности особого рода, существенно отличной от других физических величин (сводить физику к геометрии и т. п.)».

5. КОММЕНТАРИЙ О СОКРАЩЕНИИ МАСШТАБОВ
И ДЕЙСТВИИ СИЛ \ddagger

Теперь, приведя столь обильно цитаты, выражающие обе точки зрения, мы можем отказаться от плохо выдерживаемой позиции объективности и несколько подробнее прокомментировать, мотивировать точку зрения, согласно которой динамическое понимание сокращения масштабов возможно, а затем, в следующем параграфе, показать, как такой подход соотносится с более распространенным кинематическим подходом (который, как мы увидим, при постоянной скорости и неизменной структуре тел в определенном смысле можно считать даже более адекватным).

Когда в разделе 2 мы привели две формулировки физической реализации процесса сокращения длины, то были приведены и возможные возражения против «силовой» интерпретации. Одно из них является общим для обеих формулировок: как примирить с этой интерпретацией тот факт, что при любых режимах ускорения, при любых родах сил, вещества и т. д. окончательный результат универсален — результат зависит только от окончательной относительной скорости v ? Второе возражение относится только к процедуре передачи стержня: почему воздействие на стержни и часы *измеряющей* системы вызывает сокращение измеряемого стержня?

Сначала мы обсудим это второе возражение.

Читатель может заметить, что оно сформулировано здесь чуть-чуть иначе, чем в разделе 2, хотя и вполне эквивалентно. Этого изменения формулировки достаточно, чтобы сделать ответ почти тривиальным: ясно, что если под действием сил как-то изменяются измеряющие приборы, то результат измерения может измениться.

Пусть, например, вместо того, чтобы передавать *измеряемый* стержень из ИСО₁ в ИСО₂, движущуюся со скоростью v , мы передадим *измеряющие* стержень и часы из ИСО₁ в некоторую новую систему ИСО₃, движущуюся относительно ИСО₁ (и относительно оставшегося в ней измеряемого стержня длины l_1) с обратной скоростью $-v$. Очевидно, что с точки зрения ИСО₁, длина *измеряющего* стержня (как в первом варианте, когда мы передавали измеряемый стержень в ИСО₂) должна стать меньше в прежнем отношении, т. е. $l'_1 = l_1 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. Это, однако, отнюдь не значит, что оставшийся в ИСО₁ *измеряемый* стержень с точки зрения ИСО₃ станет длиннее *измеряющего* (что противоречило бы первому случаю и нарушило бы симметрию). В самом деле, нужно учесть еще, что стало с часами при передаче их в ИСО₃, ведь они также участвуют в измерении длины стержня, оставшегося в ИСО₁. Предположим, например, что, ускоряя (до скорости $-v$) измерительный стержень, мы тянули его за конец, первоначально находившийся в точке $x_1 = 0$. По стержню пойдут упругие волны, и до часов, находящихся в некоторой точке $x_1 \neq 0$, они дойдут через какое-то время, пропорциональное x_1 , и только тогда эти часы начнут ускоряться и могут начать менять свой ход. Поэтому время, t_3 , отсчитываемое по ним после завершения процесса ускорения, будет некоторой функцией не только от t_1 , но и от x_1 . Мы можем обеспечить соблюдение принципа относительности и независимость от режима ускорения, если эта функция линейна и коэффициенты зависят только от конечной скорости v :

$$t_3 = \alpha_1(v) x_1 + \alpha_2(v) t_1. \quad (1)$$

Аналогично, для точки стержня, первоначально располагавшейся в $x_1 \neq 0$ и начавшей процесс ускорения только тогда, когда до нее дошел фронт упругой волны, вообще говоря, будет

$$x_3 = \beta_1(v) x_1 + \beta_2(v) t_1. \quad (2)$$

Теперь требованию взаимности, требованию соблюдения принципа относительности (и вообще групповым свойствам) легко удовлетворить подбором соответствующих функций $\alpha_i(v)$ и $\beta_i(v)$, совершенно так же, как это сделал Эйнштейн и как излагается во всех курсах теории относительности.

Таким образом, указанное сомнение можно устранить *).

Можно, конечно, еще удивляться, почему при такой чудовищной асимметрии перехода в конечное состояние движения с одинаковой относительной скоростью получается симметричный результат. Но здесь следует вспомнить, что основная статья Эйнштейна⁵ начинается именно с этого вопроса: «взаимодействие между магнитом и проводником» теория Максвелла описывает асимметрично, а физический результат симметричен. «Наблюдаемое явление зависит здесь только от относительного движения проводника и магнита, в то время как согласно обычному представлению оба случая, в которых либо одно, либо другое из этих тел является движущимся, должны быть строго разграничены. В самом деле, если движется магнит, а проводник покоится, то вокруг магнита возникает электрическое поле... Если же магнит находится в покое, а движется проводник, то вокруг магнита не возникает никакого электрического поля; зато в проводнике возникает электродвижущая сила». Таким образом, физическому воздействию подвергаются разные тела, результат же одинаков и соответствует истинной симметрии, вскрываемой в теории относительности. Здесь важно обратить внимание на то, что Эйнштейн вовсе не считает «обычное» асимметричное представление *неправильным*, ошибочно описывающим явление в каком-либо из двух случаев. Оно правильно передает ход физических явлений в соответствии с уравнениями движения, не ведет к ошибочным выводам и допустимо, но не вскрывает всей глубины явления, оставляет непонятой тождественность результатов столь различно протекающих процессов.

Перейдем теперь к первому «возражению», общему для классической постановки вопроса о передаче стержней и часов и для независящей от передачи формулировки, опирающейся на тождественность микрочастиц и атомов: почему окончательный эффект не зависит ни от режима ускорения, ни от типа сил, ни от формы тела и свойств вещества, а только от окончательной относительной скорости v ? Рассмотрим поясняющий пример. Пример этот — всем хорошо известное лоренцевское решение уравнений Максвелла для поля точечного заряда. До всякой теории относительности Лоренц показал, что сферически симметричное кулоновское поле заряда при переходе заряда в состояние равномерного и прямолинейного движения становится эллипсоидальным. Несмотря на сопутствовавшую фразеологию, существо дела здесь никакого отношения к существованию эфира не имеет. Важно подчеркнуть два свойства найденного решения: 1) результат не зависит от метода и режима ускорения, ведущего к конечному состоянию равномерного и прямолинейного движения; 2) результат точно совпадает с тем, что получается из применения теории относительности, — из принципа ковариантности уравнений электродинамики относительно преобразований Лоренца, т. е., если угодно, из релятивистской кинематики.

Это оказалось возможным до создания теории относительности Эйнштейна потому, что за четыре десятилетия до того Максвелл совершил

*) Может возникнуть вопрос: почему приведенные в движение часы могут начать менять свой ход, например отставать? Ответ зависит от конкретного устройства часов. Например, для часов с грузом на пружине может сказаться возрастание массы с ростом скорости (¹⁹, стр. 26; не исключено, что на эту возможность указывал и кто-либо другой).

чудо — он открыл уравнения электродинамики, сразу инвариантные относительно преобразований Лоренца.

Лоренц из своего результата сделал вывод: если бы элементы тел удерживались в равновесии только электромагнитными силами, то они соответственно расположились бы в новых точках равновесия (например, на ставших эллипсоидальными эквипотенциальных поверхностях), и характерное сокращение Лоренца — Фицджеральда имело бы место для макроскопических тел в целом *).

Однако хорошо известно, что такое равновесие под действием одних электромагнитных сил невозможно (теорема Ирншоу в электростатике, неустойчивость структуры электрона самого по себе, падение электрона на ядро в неквантовой планетарной модели атома). Поэтому должны существовать еще какие-то причины, обеспечивающие равновесие. Но законы механики, теории упругости и т. п., их уравнения движения были тогда известны только в нерелятивистской (неверной при больших v) форме. Они не могли преобразоваться так же, как электромагнитные, и не могли вместе с ними обеспечить правильное лоренцово сокращение макроскопического тела в целом.

В вышеприведенной цитате Мёллер подчеркивает: если ход часов описывать правильными, релятивистскими уравнениями механики, то замедление хода часов должно получиться и при динамическом расчете правильным (т. е. так же, как Лоренц получил сжатие электрического поля).

Можно вообразить себе такую фантастическую ситуацию. Представим себе, что человечество было бы одновременно и очень глупым, и очень умным, что оно, с одной стороны, не создало ни в 1905 г., ни в последующие десятилетия теорию относительности с ее новым пониманием пространства и времени. Но, с другой стороны, исследуя все более и более быстрые движения, физики могли бы обнаружить неправильность законов Ньютона. Например, обнаружили бы, что, пользуясь законом Ньютона, приходится предполагать изменение массы со скоростью (это, впрочем, исторически действительно имело место), различие масс при продольном и поперечном ускорении и что вообще компоненты силы (измеряемой в системе, относительно которой тело движется) действуют «необычным» образом. Тогда, действуя чисто эмпирически, обобщая опыт, какой-нибудь новый Максвелл — Максвелл «№ 2» — в конце концов, сформулировал бы, если пользоваться современной терминологией, релятивистски правильное обобщение законов Ньютона, т. е. сделал бы то, что сделал Максвелл «№ 1» для электродинамики, также не имея представления ни о ковариантности уравнений, ни о принципе относительности (и даже будучи твердо убежденным в существовании эфира).

Пусть, далее, прошли бы еще годы, и исследуя множественную генерацию частиц при соударении адронов сверхвысокой энергии, кто-то решил бы описывать ее, как это сделал Ландау в 1953 г. (см. ниже), — как гидродинамический процесс, а подробное изучение процесса навело бы какого-нибудь Максвелла «№ 3» на мысль, что уравнения гидродинамики можно записать в виде

$$\frac{\partial T_i^k}{\partial x^k} = 0 \quad (i = 1, \dots, 4, x^4 = ct), \quad (3)$$

*) Поэтому исходящая из лоренцова решения аргументация справедлива и для формулировки без передачи стержня: как уже говорилось, можно измерить новые значения напряженности электрического поля и убедиться, что эта новая картина сил обеспечивает равновесие.

причем тензор энергии — импульса нужно считать равным

$$T_i^h = (\varepsilon + p) u^h u_i + p \delta_{ih} + \tau_i^h, \quad (4)$$

где u^h — то, что мы теперь называем 4-скоростью, ε — плотность энергии, p — давление, а τ_i^h — слагаемое, описывающее действие вязкости и теплопроводности (хорошо известное в настоящее время — см., например, ²⁰, — оно является сложной комбинацией 4-скоростей u^h , двух коэффициентов вязкости и коэффициента теплопроводности; в правую часть уравнения (3), вообще говоря, входит внешняя сила).

Пусть прошли бы еще десятилетия, и были открыты мезоны, мезонные силы, и в результате мучительных обширных исследований (особенно мучительных при незнании принципа ковариантности) какому-нибудь Максвеллу «№ 4» удалось написать правильные, релятивистски ковариантные (без осознания этого факта физиками) уравнения мезонного поля. Затем все то же могло бы повториться для слабых взаимодействий. В результате оказалось бы, что все эти поля приводят чудесным образом к одной и той же лоренцовой деформации при движении (например, жидкая капля из сферической становится, согласно правильной (формулы (3), (4)) гидродинамике, эллипсоидальной), к одинаковому сокращению линейных масштабов всех этих полей вдоль направления движения и к одинаковому замедлению связанных с этими полями временных процессов.

Все это было бы «силовым», «динамическим» описанием самых разнообразных полей и процессов, что не было бы неправильным, но уже их разрозненность неудовлетворительна, а одинаковость кинематических следствий для состояний равномерного движения совершенно непонятна.

Неизбежно, как бы долго этот процесс ни длился, в конце концов, осмысление этих общих свойств привело бы к открытию принципа ковариантности, к осознанию особых свойств пространства и времени, обнаруживаемых с помощью анализа процесса измерения. Гениальность Эйнштейна заключается в том, что ему было достаточно опыта электродинамики и уравнений Максвелла, чтобы проделать эту работу (впрочем, как известно, он сам говорил, что если бы не он, то кто-либо другой «без большого промедления» создал бы специальную теорию относительности *), человечество все же не так глупо, как предполагается в описанной — логически возможной — фантастической истории).

6. КОВАРИАНТНОСТЬ ЗАКОНОВ ПРИРОДЫ КАК «ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫЙ ПРИНЦИП»

В наше время мы хорошо знаем, почему для всех полей результат одинаков: для всех полей уравнения движения описывают процессы в пространстве — времени, мера которого определяется одним и тем же принятым нами процессом измерения длин и временных промежутков, и эти уравнения движения ковариантны относительно одной и той же группы Лоренца. Поэтому *те общие свойства материальных тел и процессов, для которых достаточно учитывать указанные свойства пространства — времени, получают отсюда не только проще, но и более адекватно*, чем из анализа динамического процесса преобразования (деформации) тел при передаче их в движущуюся систему отсчета (неважно, какого именно, — при передаче измеряемого тела в другую ИСО, либо при передаче измеряющих приборов в ИСО, движущуюся в обратном направлении

*) При этом он справедливо добавил: «Но по отношению к общей теории относительности дело обстоит иначе. Вряд ли она была бы известна теперь» (сказано четверть века спустя после ее опубликования).

с той же скоростью). Именно поэтому, например, Мёллер в вышеприведенной цитате *справедливо* считает подход, основанный на общем кинематическом принципе более адекватным, а вытекающее отсюда сокращение масштаба — более «элементарным» фактом.

Однако теория относительности ни в коем случае не заменяет и не подменяет уравнений движения, она только «контролирует» их. Эйнштейн неоднократно говорил об этом: «Общий принцип специальной теории относительности содержится в постулате: законы физики инвариантны относительно преобразований Лоренца... *Это есть ограничительный принцип..., который можно сравнить с лежащим в основе термодинамики ограничительным принципом несуществования вечного двигателя*» (18, стр. 279; подчеркнуто мною. — Е. Ф.). В другом месте он снова ставит его в один ряд с законом сохранения энергии и законом необувания энтропии. Поясним это примером.

Предположим, студенту задана (нерелятивистская) задача: найти высоту z_0 , до которой долетит камень массы m , если его бросить вверх (вдоль оси z) со скоростью v . Аккуратный, но не очень догадливый студент напишет дифференциальное уравнение движения Ньютона, решит его при начальных условиях $z = 0$, $\dot{z} = v$ при $t = 0$, найдет функцию $z(t)$ и из условия максимума для этой функции найдет z_0 . Он имеет право так поступать. Здесь все физически и математически правильно. Однако в этом нет никакой необходимости. Можно ведь, не решая уравнения, сразу написать, используя лишь закон сохранения энергии, что $gz_0 = mv^2/2$ (где g — ускорение силы тяжести), и не интересоваться функцией $z(t)$.

Эта задача может быть усложнена, скажем, если добавить ветер, дующий горизонтально. Решение дифференциального уравнения усложнится, будет вычислена двумерная траектория, но из закона сохранения энергии для вертикальной компоненты вместо этого вновь z_0 определяется сразу. А что, если считать, что в районе опыта расположен смерч со строго горизонтальными вихрями? Это еще более усложнит вычисление всей траектории (мы конечно, предполагаем, что студент так недогадлив, что не ограничится решением одного уравнения для $z(t)$, а вычислит всю трехмерную траекторию), но все это не нужно, — закон сохранения энергии дает по-прежнему нужный (ограниченный по содержанию) ответ сразу. То же будет, если бросать камень с горизонтально движущегося поезда, и т. д.

В этом примере подчеркнем два обстоятельства: 1) бесконечно многообразные траектории, получаемые при разных постановках задачи, все ведут к одинаковому ответу на интересующий нас вопрос, $z_0 = mv^2/2g$ (однако, конечно, есть и такие постановки задачи, которые нарушают его, например если присутствует вертикальная компонента скорости ветра); не важны здесь также ни химический состав, ни форма камня; 2) подлинная физическая причина, которая ограничивает высоту полета камня и определяет z_0 , это именно закон сохранения энергии. Поэтому опирающееся на него решение *не только проще — оно и адекватнее*. Оно, однако, *отнюдь не запрещает использования дифференциальных уравнений*, не делает его *физически* неправильным, нелепым. С помощью уравнений движения можно непрерывно проследить взлет тела до z_0 . Можно, вообще, получить много физических результатов, которые не могут быть получены из одного закона сохранения энергии. Эти результаты могут быть совершенно различны для разных постановок задачи, для разных режимов движения одной и той же высоты z_0 . Но для ответа на поставленный нами узкий вопрос (найти *только* z_0) это явно нецелесообразно. Более того, подробное решение затуманивает истинную физическую природу эффекта.

Нетрудно видеть, что приведенный пример совершенно аналогичен — пункт за пунктом — проблеме динамической природы сокращения масштабов и замедления часов.

Если нас интересует *только* соотношение длин тел или промежутков времени в двух разных ИСО, нет нужды проследживать все стадии динамической деформации масштабов при их передаче из одной ИСО в другую, как нет нужды и исследовать статическое равновесие сил в каждом данном теле сложной конфигурации (если мы пользуемся формулировкой без передачи стержня). В *этом вопросе*, весьма ограниченном по постановке, 1) режим ускорения безразличен, по достижении конечной постоянной скорости результат будет одинаков, 2) глубокая физическая причина, по существу, так же определяющая окончательный эффект, как закон сохранения энергии ограничивал высоту полета камня, — отсутствие избранной системы отсчета, существование пространственно-временного континуума, не распадающегося на независимые континуумы пространства и времени. Поэтому опирающееся на эти «кинематические» соображения решение не только проще, но и более адекватно.

Еще одно замечание. Закон сохранения энергии выводили ранее, как обобщение эксперимента, а в механике, — как интеграл движения. В настоящее время мы понимаем его как следствие однородности времени, проявляющейся в инвариантности лагранжевой функции относительно сдвига во времени. Подобно этому, хотя принцип относительности мог бы быть извлечен из системы ковариантных уравнений для всех полей, если бы эти уравнения были известны, он не просто выражает математическую ковариантность уравнений движения, но истолковывается как проявление свойств пространства — времени. Именно поэтому кинематический расчет справедливо считается «более элементарным», как говорит Мёллер. В то же время никто не мешает считать уравнения движения, вообще говоря, более фундаментальными, чем закон сохранения энергии (ведь он есть одно из частных следствий уравнений движения), и то же верно для теории относительности (ср. выше слова Эйнштейна о том, что «теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений»).

7. РЕАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ УСТАНОВЛЕНИЯ НОВОЙ ФОРМЫ ТЕЛА

Но тогда зачем все это усложнение, не проще ли забыть о возможности динамического рассмотрения, забыть о существовании самой этой проблемы? Думается, это все же было бы неправильно.

Выяснение истинного соотношения между физическим процессом постепенного — по мере воздействия ускоряющих сил — изменения сжатия тел и замедления протекания процессов или между изменившимися условиями равновесия сил в движущемся теле — с одной стороны, и обеспечивающими соблюдение принципа относительности общими пространственно-временными закономерностями — с другой, само по себе желательно. В то же время, можно думать, что понимание этих вопросов должно иметь педагогическую ценность, поскольку связывает довольно отвлеченные понятия теории пространственно-временных измерений с весьма «земными» и «физически ощутимыми» явлениями деформации. Возможно, изложение теории относительности для впервые изучающих ее целесообразно начинать со сжатия кулоновского поля, как его получал Лоренц, подчеркивая независимость степени сжатия от частного характера процесса ускорения; затем вводить необходимость подобного же преобразования для всех других полей, постулируя ненаблюдаемость абсолютного движения (принцип относительности); соответственно требовать для ее

обеспечения взаимности сокращения тел, — вводит требование такого же сокращения измеряемой длины, когда действие сил испытывает (и приобретает ускорение) не измеряемый стержень, а измеряющий комплекс масштабов и часов. Лишь после того, как подобным образом качественно (не обязательно количественно) будет понята независимость результатов не только от режима ускорения, но и от выбора объекта действия силы, из сопоставления также с асимметрией толкования взаимодействия проводника и магнита (с которого начинал статью Эйнштейн) можно сформулировать общую проблему измерения и давать обычный вывод с поездами и платформами. Возможно, так будет понятнее, и мистический туман лоренцевского сокращения и замедления в некоторой мере рассеется (не будем таить греха — ведь при всеобщем распространении и использовании теории относительности очень многие «сначала не понимают, затем привывают»).

Но этого мало. Если мы встречаемся с реальными процессами взаимодействия тел и полей, ведущими к перераспределению скоростей тел и т. п., если, как это встречается все чаще и чаще, нас интересует протекание реального процесса ускорения тела до релятивистских скоростей, то без уравнений движения не обойтись. В этих случаях, помимо чисто расчетных проблем, мы нередко встречаемся с ситуацией, в которой без уяснения реальности динамического процесса возникает непонимание изучаемых процессов. И наоборот, в таких явлениях вскрывается реальность силовой природы сжатия и т. п.

Рассмотрим, например, процесс, который встречается в статистико-гидродинамической теории множественного рождения частиц при нуклонных соударениях высокой энергии. Здесь имеются в виду соударения, при которых в системе центра инерции лоренц-фактор нуклонов $\gamma_{\text{сци}} = 1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ измеряется цифрами порядка 100 и много больше. При такой энергии нуклон, имеющий в покое сферическую форму с характерным радиусом $R \sim 10^{-13}$ см, в СЦИ является тоненьким блином толщиной $d \sim R/\gamma_{\text{сци}}$. Ферми предположил, что при любом соударении таких блинов из-за сильного взаимодействия они полностью останавливаются и вся их энергия оказывается сконцентрированной в объеме с толщиной порядка d (рис. 2). В этот момент скорость всех точек системы равна нулю. Впоследствии процесс остановки был рассмотрен строго, в рамках гидродинамической модели²¹, как результат прохождения ударных волн, причем была использована релятивистская гидродинамика. Здесь также наступает момент, когда почти все вещество покоится (за исключением его малой части, начинающей истечение в пустоту с обоих концов системы). Следует подчеркнуть, что, учитывая симметрию задачи, мы можем представить себе столкнувшиеся частицы разделенными непроницаемой для вещества стенкой, так что вещество каждого нуклона находится в своем полупространстве и не смешивается с веществом другого нуклона.

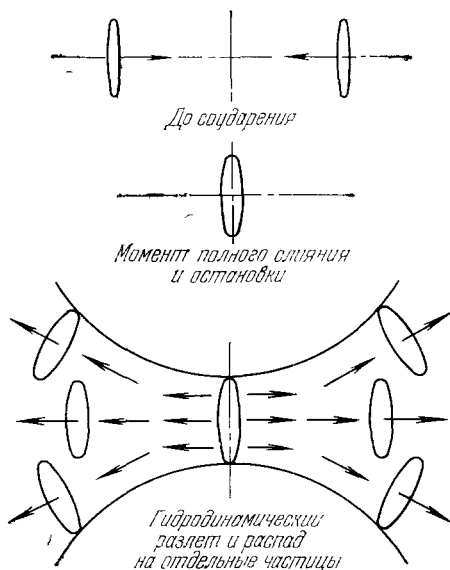


Рис. 2. Множественная генерация адронов при соударении нуклонов весьма высокой энергии по гидродинамической теории Ландау (картина в общей системе центра инерции).

По предположению Ферми, из-за высокой плотности энергии на этой стадии происходит генерация большого числа новых адронов, которые и уносят всю энергию. Однако, как заметил Померанчук, рожденные адроны должны, разлетаясь, взаимодействовать между собой. Соответственно этому Ландау построил изящную теорию расширения, охлаждения и, в конце, распада весьма плотной материи, рассматриваемой как сплошная среда. Эта теория использует уравнения релятивистской гидродинамики и термодинамики, причем расширение происходит, конечно, постепенно, ни в какой момент скорость не превышает скорости света ²¹.

К сожалению, до сих пор не известно, происходит ли в природе такой процесс полной остановки соударяющихся начальных адронов-блинов (все равно, хотя бы как «мысленный эксперимент» пример вполне строг). Нам важно другое. Если этот процесс имеет место, то после того, как начальная скорость была взаимно погашена, начальная форма двух нуклонов отнюдь не восстанавливается мгновенно, — протекает длительный, динамически рассчитываемый процесс.

Гидродинамическая теория Ландау существует 20 лет, разрабатывалась, обсуждалась и применялась во многих десятках работ. И все же, если спросить многих из тех физиков, кто пользуется ею, — почему же после остановки адроны не имеют форму шара, которую они должны иметь в покое — ведь они в этот момент покоятся, — ответы нередко будут уклончивы и невразумительны. Поэтому понимание роли динамики лоренцева сокращения масштабов и замедления часов имеет значение также и в повседневной практике физиков, когда нужно рассчитывать реальный переход системы к новому состоянию движения.

Недавно был рассмотрен другой красочный пример — изменение плотности зарядов (и изменение размеров всей системы) в тонком плоском слое заряженных частиц при нормальном падении на него электромагнитной волны ²². Здесь так же видно, что процесс установления окончательной постоянной скорости всех зарядов (и, соответственно, значения плотности, удовлетворяющего лоренцеву сжатию всей системы) требует динамического рассмотрения.

Иногда задаются вопросом: можно ли рассматривать неравномерное движение в рамках специальной теории относительности? Конечно, очень странный вопрос. Ведь именно для этого и существуют релятивистски правильные, ковариантные уравнения движения, позволяющие в принципе изучать любое движение, в том числе движение сложных систем. Другое дело, что пока длится ускорение, пока действуют внешние силы (а также в течение некоторого времени и после того, см. ниже), нельзя, вообще говоря, в каждый данный момент применять к телу в целом формулы преобразования длины и времени, справедливые для равномерного движения. Так, например, если ускоряемые часы в некоторый момент имеют скорость v , то отсчитываемый по ним промежуток времени $d\tau'$, вообще говоря, отнюдь не есть $d\tau_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, где $d\tau_0$ — соответствующий промежуток времени для покоящихся часов, показание часов отнюдь не дается лоренцевым преобразованием времени для данного v . Все зависит от конструкции часов и от режима ускорения. Ведь в этот период часы испытывают переменные напряжения, различные в разных элементах часов, и т. п. *). Совершенно так же и длина ускоряемого стержня,

*) Только при достаточно медленном ускорении $d\tau' = d\tau_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, и в таком случае τ' совпадает с так называемым «собственным временем». Но, «вообще говоря», ускорение оказывает влияние на ход часов. Только когда ускорение достаточно мало, это значит, кривизна мировой линии достаточно невелика, собственное время непосредственно имеет данное физическое значение. Где лежит граница, — зависит от

если, например, в данный момент скорость его центра тяжести есть v , не определяется лоренцевым сжатием для данного v — ведь по стержню идут упругие волны и т. п.

Более того, даже после того, как внешняя сила перестала действовать, требуется некоторое время, иногда очень значительное, для того чтобы внутреннее состояние тела стало равновесным и во всех отношениях соответствующим некоторой единой для всех частей тела постоянной скорости v .

Хорошим примером здесь может служить собственное электромагнитное поле быстро движущегося заряда, например электрона (рис. 3).

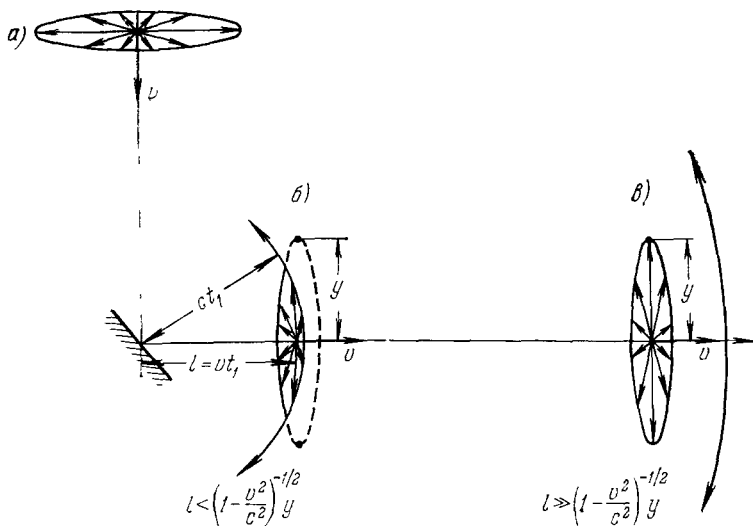


Рис. 3. Собственное поле равномерно движущегося электрона весьма высокой энергии при бесконечно долгом равномерном движении (а), вскоре после резкого изменения скорости (б) и после достаточно долгого периода восстановления нормального, равновесного поля (в).

При равномерном движении, когда внутреннее состояние системы вполне стационарно, поле должно быть эллипсоидом с отношением полуосей для любой эквипотенциальной поверхности $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. Но если такой электрон испытал резкое ускорение, например, рассеялся на большой угол, то еще долго, двигаясь уже с постоянной скоростью v , он не будет обладать подобным полем. Как легко показать из выражения для полей Лиенара — Вихерта (да и просто из конечности скорости распространения поля в системе покоя электрона), электрон еще долго может быть «голым» (точнее, «полуголым»), поле появляется лишь постепенно. На расстоянии y от оси движения поле у электрона появляется лишь, когда он пройдет путь $l \sim y/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. В частности, на расстоянии порядка комptonовской длины, $y \approx 4 \cdot 10^{-11}$ см, у электрона с энергией 10^{16} эв (встречается в космических лучах) поле появляется лишь, когда он (двигаясь уже равномерно!) пройдет путь около 1 см (это справедливо и в квантово-элек-

свойств часов. Все же, определяемое формулой... [$d\tau' = d\tau_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$]. — E. Ф.] собственное время является полезным математическим понятием (46, стр. 76; быть может, лучше сказать: оно выражает практически полезную предельную и идеализированную величину, которая в очень многих случаях является очень хорошим приближением к действительно наблюдаемому показанию часов).

тродинамическом случае, но там появление поля происходит статистически-скачкообразно, с вероятностью порядка единицы по прохождении того же пути l). А на расстоянии 1 см оно появится у электрона энергии 10^{11} эв, только когда он пройдет 2 км. Этот эффект проявляется в конкретных (хорошо наблюдаемых и изученных) явлениях потому, что «голый» электрон взаимодействует с другими частицами на своем пути иначе, чем нормальный, «одетый». Например, его тормозное излучение при новом взаимодействии резко отлично от нормального для электрона той же скорости, но имевшего после своего ускорения достаточно времени, чтобы «одеться» — прийти в равновесное стационарное состояние со своим полем (весь вопрос подробно рассмотрен в ²³).

В связи с этим уместно вернуться к вопросу о соотношении между показаниями реальных часов и «собственным временем» ~~$\Delta\tau = \Delta\tau_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$~~ для равномерного движения. Согласно только что сказанному, они совпадают, только если ускорение предельно мало или если после резкого ускорения прошло достаточно много времени для того, чтобы внутренняя структура часов пришла в равновесие. Эйнштейн, приводя формулу преобразования времени, писал: «Сразу видно, что этот результат получается и тогда, когда часы движутся из A в B по любой ломаной линии» (⁵, стр. 19; впоследствии это утверждение было распространено и на любую ломаную мировую линию, когда v различно на различных отрезках). Строго говоря, это утверждение нуждается в уточнении. После каждого излома, в течение времени $\Delta\tau' = \Delta\tau_0 / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ (ср. рис. 3), где $\Delta\tau_0$ — время в собственной системе, необходимое для того, чтобы часы «успокоились» после ускорения (после излома мировой линии), обычную формулу преобразования времени для постоянного v применять нельзя. Поэтому если время движения по прямолинейным отрезкам сравнимо с $\Delta\tau'$, то формула, полученная суммированием по этим отрезкам, $\tau' = \sum \tau_0^{(i)} / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, где $\tau_0^{(i)}$ — собственное время движения по i -му отрезку, совершенно неверна для физической системы с подобным временем «успокоения» $\Delta\tau'$. В равной мере это относится и к распространению тех же соображений на кривую мировую линию.

В парадоксе близнецов, например в простейшем случае двух равномерных движений «туда» и «обратно», приходится пренебрегать сдвигами во времени, возникающими в периоды начального ускорения, поворота и окончательного замедления. Вычислить их в общем случае нельзя, так как они зависят от устройства часов (близнецов) и режима ускорения. Однако ими можно пренебречь, потому что они конечны, а отрезки равномерного движения можно сделать произвольно длинными. Как мы видим, кроме того, нужно пренебрегать и сдвигами времени *после* каждого из трех ускорений, когда, двигаясь уже в целом равномерно, система «успокаивается». Критерий пренебрежимости этими сдвигами очевиден: собственное время, затрачиваемое на «успокоение» системы, $\Delta\tau_0$, должно быть много меньше собственного времени, затрачиваемого на равномерное движение τ_0 (в примере рис. 3, если для результата работы «часов» существенно поле электрона на расстоянии порядка y от оси движения, $\Delta\tau_0 \sim y/c$).

3. «ДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ» И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Опыт дискуссий показывает, что «силовая» интерпретация встречает возражения главным образом из-за ассоциации с неоднократными попытками основать на ней борьбу против теории относительности. Мы видим, что в действительности такое противопоставление неправильно. Описание

релятивистского сокращения масштабов и замедления часов, как реального процесса, связанного с движением (в частности, с перераспределением) реальных, независимо измеримых сил, физически правильно и вполне согласуется с общими принципами и конкретными формулами теории относительности. Однако и до открытия Эйнштейном общих принципов, и после предпринимались попытки ограничиться конкретными динамическими или статическими расчетами. В давние времена это была борьба за эфир и за абсолютное пространство.

На новой основе одну из наиболее развернутых попыток в сравнительно недавнее время предпринял Л. Яноши. В большой статье²⁴ он подробно показал на ряде примеров, как оба релятивистских эффекта возникают из конкретных (физически правильных) моделей процессов. Например, он показал, что одноэлектронный атом представляет собой часы, ход которых из-за роста массы с ростом скорости меняется, если атом привести в движение. Эти примеры сами по себе, несомненно, представляют педагогическую ценность. Однако вывод Л. Яноши — известный скептицизм по адресу теории относительности — вряд ли обоснован. Он считает, например, что для каждого вновь открываемого вида сил необходимо снова и снова убеждаться в справедливости лоренцевых преобразований. Что наличие динамической интерпретации тех релятивистских эффектов, которые мы уже умеем рассчитывать, может сделать теорию относительности, как общую теорию, ненужной. Таким образом, здесь, по существу, вновь динамическая интерпретация противопоставляется теории относительности. При этом автор отнюдь не заявляет ни о неправильности этой теории, ни о ее ненужности а priori, но лишь держит ее под постоянным подозрением *).

Нет сомнения, никто не решится утверждать, что теория относительности останется на все времена неизменной. Могут появиться требующие изменений новые экспериментальные факты. Однако, если это и произойдет, то потому, что теория заменится более всеобъемлющей и останется предельным случаем этого более общего теоретического построения (как частная теория относительности заменилась общей). Но самое главное — это то, что динамическое объяснение так называемых кинематических эффектов ничем не ослабляет принципы теории относительности, никоим образом не выходит за рамки этой теории, а составляет ее органический элемент и, более того, как мы видели, по мнению самого Эйнштейна, — необходимо. Рассмотрение конкретных примеров, предпринятое Л. Яноши, может служить еще одним свидетельством того, что ясное понимание места и роли динамического подхода помогает избавиться от мучительных сомнений.

И. Е. Тамм писал^(25, стр. 184):

«Постулаты теории относительности, подобно закону сохранения энергии, позволяют указать ряд точных характеристик физических явлений и в тех случаях, когда нам неизвестны точные законы их взаимодействия элементов данного тела..., или в тех случаях, когда точное вычисление результатов действия известных сил... практически невыполнимо по своей сложности. Конечно, очень многие физические вопросы не могут быть решены только на основании общих закономерностей, а требуют детального анализа».

Требование постоянно, снова и снова проверять справедливость выводов теории относительности нельзя отклонить никакими доводами

*) В дореформенном русском суде, помимо приговоров «оправдать» и «признать виновным», существовала и формула: «оправдать, но оставить под подозрением» (она была, в частности, применена к Сухово-Кобылину).

кроме того, что теория относительности в этом отношении ничем не выделена из ряда других фундаментальных теорий. Действительно, с такой же обоснованностью (или необоснованностью) можно настаивать на постановке специальных опытов по проверке закона сохранения энергии, закона возрастания энтропии и т. п. Чисто логически возможность нарушения подобных законов в принципе всегда существует. Однако правильность динамической интерпретации кинематических формул теории относительности здесь ничего не прибавляет.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно поставить еще один вопрос. Если все так просто, и «силовое», в частности, динамическое, истолкование справедливо, — почему же у Эйнштейна, Паули, Лауэ, Мёллера и других авторитетов так редко встречаются высказывания по этому поводу, а в других трудах крупных физиков и того нет? Вероятно, дело в том, что для всех них вопрос этот вытекало из предшествующей истории вопроса, из трудов Лоренца, Пуанкаре и др. Проблема для Эйнштейна была в другом: каков тот общий принцип, который обеспечивает универсальность сокращения масштабов и замедления часов *независимо* от их физических свойств, от рода участвующих полей, от режима ускорения, и притом принцип, который согласуется с ненаблюдаемостью абсолютного движения. Этот принцип — ковариантность уравнений движения относительно преобразования Лоренца и неразложимость пространства — времени на независимые пространство и время — принцип относительности, в сочетании с независимостью скорости света от скорости источника. Его и нашел Эйнштейн, проанализировав процесс измерения, дав определение понятий длины и промежутка времени и обнаружив относительность одновременности. В открытии и формулировке нового «ограничительного принципа», ставшего в один ряд с принципом сохранения энергии и другими принципами того же ранга, и состоит заслуга Эйнштейна, благодаря которой теория относительности носит его имя. Именно это его открытие так поразило физиков, что все они при изложении теории относительности прежде всего передают эту сторону работы Эйнштейна, вопрос же о динамическом истолковании релятивистских эффектов представляется им не заслуживающим особого внимания.

Резюмируя, можно сказать следующее. На вопрос:

можно ли рассматривать релятивистское сокращение масштабов и замедление времени как результат динамического процесса (либо свести их к изменяющему с ростом скорости свой характер равновесию сил), мы отвечаем:

можно, но если нас интересует только состояние равномерного относительного движения тела и системы отсчета, — не нужно. Не нужно потому, что релятивистский кинематический подход не только проще и прямее ведет к цели, но он и адекватнее: сведение к действию сил, к атомарной структуре и уравнениям движения может заслонить универсальный характер эффекта и его обусловленность свойствами пространства — времени, которые вскрывает принцип относительности.

Однако следует помнить, что *такая интерпретация эффекта возможна, причем она необходима* в тех процессах, в которых имеет место *переход от одного состояния равномерного движения к другому*, особенно

*) Не стал же Ландау в своей статье по гидродинамической теории объяснять, почему в начальный момент гидродинамического расширения мы имеем тонкий лепесток на рис. 2, б, а не два шара.

если этот переход сопровождается изменениями внутренней структуры и других свойств тела. Здесь необходимо использовать уравнения движения, конкретные свойства вещества и т. п. В свете этой более общей ситуации сокращение масштаба и замедление часов при равномерном движении предстает как частный случай, для которого достаточно использовать кинематику теории относительности, подобно тому, как достаточно использовать закон сохранения энергии для определения высоты, достигаемой брошенным камнем.

Это положение можно проиллюстрировать также и следующим примером.

Когда утверждалась концепция близкодействия электрических зарядов через посредство электромагнитного поля, в противовес дальнедействию, то нельзя было сделать выбор между двумя концепциями, оставаясь только в рамках электростатики. Этот выбор можно было сделать только из рассмотрения более общего случая. Обычно приводилось такое рассуждение: пошлем радиосигнал, разрушим передатчик и затем построим в другом месте приемную станцию прежде, чем до этого места дойдет сигнал. Ясно, что в период, когда не было ни передатчика, ни приемника, энергии была запасена в поле. Нечто подобное мы имеем и в той релятивистской проблеме, которую мы рассматриваем: реальность сил, обуславливающих сжатие масштабов и замедление часов, раскрывается лишь в процессах установления сжатого состояния (или замедленного течения процессов). Об этих силах мы можем не думать и ничего не знать, если нас интересует только интегральный эффект — различие длин и промежутков времени, определяемых по отношению к различным инерциальным системам отсчета. Здесь достаточно использовать общий «ограничительный» принцип, стоящий в одном ряду с законом сохранения энергии и законом неубывания энтропии.

Мы видим, что даже простой вопрос: что считать более фундаментальным, более «элементарным» (Мёллер) — релятивистское сокращение длины или ковариантные уравнения движения, — не допускает однозначного ответа.

В случае закона сохранения энергии для консервативной системы мы, с одной стороны, можем считать уравнения движения более фундаментальными, чем закон сохранения. В самом деле, он ведь лишь одно из следствий уравнений движения, один его интеграл и потому гораздо беднее по содержанию. Достаточно ввести переменное во времени внешнее поле, и он теряет силу. Придется пользоваться уравнениями движения. Но, с другой стороны, он обладает столь большой общностью и, более того, выражает столь фундаментальное свойство времени — его однородность (инвариантность лагранжиана относительно смещения во времени), что есть достаточно основания считать его более фундаментальным, чем уравнения движения, которые обязаны ему удовлетворять.

Совершенно так же релятивистски ковариантные уравнения движения, законы динамики гораздо шире, чем одно предельное свойство всех систем — сокращение длины и замедление времени при равномерном движении. Если же появится малейшая неравномерность движения часов, то их показание, строго говоря, перестает соответствовать релятивистскому замедлению при данной — мгновенной — их скорости. Это показание будет зависеть от конструкции часов и от режима ускорения. Показание часов можно будет рассчитать (хотя бы в принципе) только из уравнений движения. Поэтому можно считать, что эти уравнения более фундаментальны, чем лоренцевы формулы для замедления времени и сокращения длины, дающие лишь предельное значение эффекта при достаточно долго длящемся совершенно равномерном движении. Но, с другой

стороны, в этих формулах выражается столь общее свойство пространства и времени — неразложимость пространственно-временного континуума на независимые континуумы пространства и времени, что имеются основания и для того, чтобы именно их считать более фундаментальными.

Физический институт им. П. Н. Лебедева,
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. A. Lorentz, *Die Relativitätstheorie für gleichförmige Translationen*, Lpz., Akad. Verlagsgesellschaft, 1929.
2. J. Terrel, *Phys. Rev.* **116**, 1041 (1959).
3. R. Penrose, *Proc. Camb. Phil. Soc.* **55**, 137 (1959).
4. В. Вайскопф, *УФН* **84**, 183 (1964).
5. А. Эйнштейн, К электродинамике движущихся тел, *Собрание трудов*, т. I, М., «Наука», 1965, стр. 7.
6. Л. И. Мандельштам, *Лекции по теории относительности*, *Собрание трудов*, т. 5., М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.
7. Я. А. Смородинский, В. А. Угаров, в кн. *Эйнштейновский сборник*. 1972, М., «Наука», 1974, стр. 237.
8. А. И. Жукон, *Введение в теорию относительности*, М., Физматгиз, 1961.
9. В. Гарднер, *Теория относительности для миллионов*, М., Атомиздат, 1965.
10. В. Курганов, *Введение в теорию относительности*, пер. с франц., М., «Мир», 1968.
11. Н. Мицкевич, *послесловие в книге* ¹⁰.
12. W. H. McCrea, *Relativity Physics*, L., Methuen, 1935.
13. В. Паули, *Теория относительности*, М., Гостехиздат, 1947.
14. А. Эйнштейн, *Собрание трудов*, т. IV, М., «Наука», 1967, стр. 46.
15. А. Эйнштейн, *ibid.*, стр. 42.
16. M. von Laue, *Die Relativitätstheorie*, Bd. 1, 1921.
17. C. Möller, *The Theory of Relativity*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1955.
18. А. Эйнштейн, *Автобиографические заметки (Autobiographisches)*, *Собрание трудов*, т. IV, М., «Наука», 1967, стр. 280.
19. Ю. Соколовский, *Теория относительности в элементарном изложении*, Харьков, 1960.
20. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Механика сплошных сред*, М., Гостехиздат, 1953.
21. С. З. Беленький, Л. Д. Ландау, *УФН* **56**, 309 (1955).
22. С. И. Сыроватский, К вопросу о запаздывании релятивистского сокращения движущихся тел (доклад на семинаре в ФИАНе, ноябрь 1974 г.), *УФН* (1976).
23. Е. Л. Фейнберг, *ЖЭТФ* **50**, 202 (1966) (квантовоэлектродинамическое рассмотрение); в кн. *Проблемы теоретической физики (сборник статей памяти И. Е. Тамма)*, М., «Наука», 1972; *Труды Сухумской школы молодых ученых (сентябрь 1972 г.)*, Дубна, ОИЯИ, 1972, стр. 56; *Препринт ФИАН СССР № 166*, Москва, 1972 (классический случай и приложение к собственному мезонному полю адронов высокой энергии).
24. Л. Яноши, *УФН* **62**, 149 (1957).
25. И. Е. Тамм, *ibid.*, стр. 183.