

Б. Г. КУЗНЕЦОВ

**ЭТЮДЫ
ОБ ЭЙНШТЕЙНЕ**

Б. Г. КУЗНЕЦОВ ЭТЮДЫ ОБ ЭЙНШТЕЙНЕ

А К А Д Е М И Я Н А У К

С С С Р

БИБЛИОТЕКА

ПО ТЕОРИИ

ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Б. Г. КУЗНЕЦОВ

**ЭТЮДЫ
об ЭЙНШТЕЙНЕ**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА · 1965**

Мировоззрение Эйнштейна и теория относительности

1. Вводные замечания. 2. Исходные позиции.
3. Критерии выбора научной теории. 4. Генезис специальной теории относительности.
5. Четырехмерный мир. 6. Геометрия, физика и общая теория относительности.
7. Отношение Эйнштейна к квантовой механике. 8. Единая теория поля.

1

Работы Эйнштейна по теории относительности характеризуются большой законченностью: выработанные позже в течение многих лет формы изложения теории мало отличаются от первоначальных. К этому присоединяется удивительная прозрачность и точность языка, гармонирующая с рационалистическим духом, которым пронизано творчество Эйнштейна. Вместе с тем каждая работа Эйнштейна тесно связана с другими и раскрывает общую структуру теории. Одной из

основных особенностей теории относительности, одним из исходных принципов ее разработки было выведение соотношений теории из наиболее общих постулатов научной картины мира. Этому соответствует внутреннее единство научного наследства Эйнштейна. В исторической ретроспекции такое единство оказывается особенно явным. В своем автобиографическом очерке 1949 г. Эйнштейн говорил, что только ретроспективно он улавливал систематическое развитие своих идей¹. Как ни отчетливы логические связи, превращающие научные труды Эйнштейна в единый монолит, они оказываются еще более глубокими и многочисленными в свете итоговых, принадлежащих Эйнштейну ретроспективных оценок.

Но сейчас, через десять лет после смерти Эйнштейна, мы еще яснее ощущаем единство его научного творчества. Это связано с некоторой новой оценкой того стремления к единой теории поля, которое было главным содержанием духовной жизни ученого в течение последних тридцати лет его жизни.

Теория относительности была первой универсальной физической концепцией, которая с самого начала устами своего творца объявила о своем неокончательном характере. Теория относительности посягнула на такие фундамен-

¹ A. Einstein. Autobiographisches. В сб. «Albert Einstein: Philosopher — Scientist». Ed. by P. Schilp. Tudor Publishing Company. N. Y., 1951. См. перевод: Творческая биография. Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 72.

гальные принципы физики, которые не могли быть поколеблены без принципиального отказа от всяческих догматических абсолютов, в частности от представления об абсолютной законченности самой теории относительности.

В автобиографии 1949 г. Эйнштейн выдвинул одно критическое замечание в адрес теории относительности в том виде, в каком он ее сформулировал. Замечание это состоит в следующем. Теория относительности вводит некоторые постулаты, определяющие поведение масштабов и часов. «Это в известном смысле нелогично; собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать ее независимой от них. 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 для физических процессов»¹.

В течение тридцати лет Эйнштейн искал общую теорию, которая могла бы вывести соотношения теории относительности из еще более фундаментальных закономерностей. Эти поиски не увенчались успехом. Но сейчас в учении об элементарных частицах и квантовых полях намечаются некоторые еще неясные тен-

¹ А. Эйнштейн. Творческая автобиография. Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 92.

денции, которые позволяют точнее и глубже оценить эйнштейновские поиски единой теории поля, а следовательно, и весь путь развития и обобщения теории относительности. Годы, прошедшие после смерти Эйнштейна, были временем очень быстрого накопления новых сведений о микромире и о Вселенной и еще более быстрого появления новых, ожидающих решения проблем теоретической физики. Сейчас мы можем увидеть новые стороны специальной теории относительности в связи с развитием релятивистской квантовой теории, новые стороны общей теории относительности в связи с успехами и отчасти с нерешенными, но в некоторой степени определенными проблемами астрофизики и космологии, и новые аспекты набросков единой теории поля.

С этой точки зрения сейчас можно с большей, чем раньше, уверенностью определить и общую сквозную идею, проходившую через работы Эйнштейна по теории относительности.

2

Нернст говорил, что теория относительности Эйнштейна не столько физическая, сколько философская теория.

Такая характеристика в некоторой степени отражает «доатомный» период — время, когда атомная физика еще не принесла теории относительности Эйнштейна современных экспериментальных доказательств, несопоставимых по числу и значению с макроскопическими явде-

ниями, известными в начале столетия. В те годы объяснение результатов опыта Майкельсона и аналогичных экспериментальных данных, содержащееся в теории Эйнштейна, действительно производило наибольшее впечатление своей общностью и естественностью. Теперь мы знаем большое число экспериментов, исключающих возможность нерелятивистского объяснения.

Реплика Нернста отвечает тем не менее действительно большой роли гносеологических критериев в теории относительности Эйнштейна. Физика XX столетия гораздо теснее, чем это было в предшествующий период, связана с гносеологическими проблемами. Эта историческая черта современной науки стала особенно рельефной в середине столетия. В 1944 г. Эйнштейн писал: «Затруднения, которые физик испытывает сейчас в своей области, заставляют его соприкасаться с философскими проблемами в значительно большей степени, чем это приходилось делать физике прошлых поколений»¹.

Но и в начале столетия это соприкосновение стало более существенным для физики, чем раньше. Если Шиллер, обращаясь в свое время к естествоиспытателям и философам, мог сказать: «...Только на разных путях правду обрящете вы!», — то для науки и философии XX в. правильно, пожалуй, обратное.

Теория относительности положила начало новому периоду в отношениях между собственно физическими и гносеологическими пробле-

¹ A. Einstein. Ideas and Opinions. N. Y., 1954, p. 19.

мами. Она разъяснила отрицательные результаты поисков эфирного ветра не какой-либо специально выдвинутой гипотезой, а на основе радикального пересмотра понятий пространства и времени. Теория относительности не могла быть результатом чисто стихийного применения гносеологических принципов. Она опиралась на сознательную разработку этих принципов. Такая разработка иногда опережала собственно физические представления, иногда отставала от них. Поэтому гносеологические экскурсы Эйнштейна, связанные с теорией относительности, подчас оказываются ретроспективными, подчас предваряют некоторые работы по теории относительности. Для итоговой характеристики философского мировоззрения Эйнштейна особенно важны его гносеологические высказывания последних лет. Они позволяют глубже и точнее понять внутреннюю структуру теории относительности, какой она ретроспективно представлялась Эйнштейну. Заметим в скобках, что слово «ретроспективно» не следует понимать в слишком буквальном смысле: Эйнштейн часто рассматривал теорию относительности в свете некоторой новой, более общей идеи, которая далеко еще не стала однозначной физической теорией; таким образом, «ретроспективная» оценка была в то же время и «перспективной».

Гносеологические позиции Эйнштейна, выкристаллизовавшиеся в начале творческого пути, позволяют увидеть не только логическую структуру теории относительности, но и ее непосредственные идейные истоки, тот действительный путь, которым шел Эйнштейн к тео-

рии относительности. Но и здесь итоговые, позднейшие гносеологические экскурсы весьма существенны. Только оглядываясь назад, Эйнштейн мог сказать, что в его ранних идеях «работало» на теорию относительности и что оказалось чисто личным, не реализовавшимся, оставленным позади.

Из сказанного следует, что отдельные гносеологические экскурсы Эйнштейна могут быть оценены лишь на фоне некоторого общего, развивавшегося, но в основном появившегося уже в юные годы гносеологического кредо. Характеристика этого кредо позволит увидеть, какие гносеологические идеи были действительными источниками теории относительности.

Гносеологические позиции Эйнштейна в целом близки основным идеям рационализма XVIII в., идеям, которые так тесно переплетаются с исходными физическими принципами созданной тогда в своих основах классической картины мира. Речь идет о рационализме именно XVII в., о рационалистических идеях, которые еще не приобрели законченной и даже застывшей формы, свойственной следующему столетию. В этом смысле Спиноза был властителем дум Эйнштейна в большей степени, чем последующие корифеи рационалистической мысли нового времени. В XVII в. разум еще не предъявлял претензий на исчерпывающее отображение природы, претензий, получивших свое завершение в лапласовом образе существа, знающего положения и скорости всех частиц Вселенной. С другой стороны, в XVII в. разум не считал себя призванным к априорному конструированию законов, управляющих миром.

Для XVII в., и для Спинозы в особенности, характерно представление о мире, к истинным закономерностям которого разум приближается последовательно, не претендуя в каждом приближении на окончательное решение всех загадок бытия.

Такое представление не исключало определенной схемы бытия, определенного тезиса о характере основных закономерностей мира, которые разум последовательно постигает. Он приближается к действительным закономерностям бытия и раскрывает реальную гармонию мироздания, отыскивая под внешними явлениями процессы перемещения и взаимодействия дискретных частей вещества. Эти дискретные части, материальные тела, отличаются лишь формой, величиной и движением, и природа вещей может быть постигнута с помощью количественных определений.

Для рационализма XVII в. характерно существование некоторого идеала научного познания — картины мира, в которой нет ничего, кроме движущихся и взаимодействующих частей однородной материи. Такая картина не в полной мере совпадает с положительным содержанием научных знаний (подобное совпадение декларируется в XVIII в.), она остается идеалом. Классическая механика в XVIII в. стремилась приблизиться к этому идеалу, и его можно назвать *классическим идеалом* науки.

Галилей писал, что «экстенсивно» (по объему сведений) познание человека несопоставимо с бесконечной и неисчерпаемой абсолютной истиной, но «интенсивно» (по достоверности) «человеческий разум познает некоторые исти-

ны столь совершенно и с такой абсолютной достоверностью, какую имеет сама природа»¹. Это достоверное знание — математическое: математика раскрывает причинную обусловленность явлений, «а высшей степени достоверности не существует».

Таким образом, исчерпывающая картина причинных связей, математически постижимых и сводящихся к движениям и взаимодействиям тел, остается идеалом науки. Этот идеал отражает независимую от познания сущность явлений, и приближение к нему исключает субъективные представления, показывает все в большей степени объективную гармонию мира.

Подобную концепцию объективной гармонии мира Эйнштейн воспринял еще в юности. С отроческих лет он ощущал гармонию мироздания. В автобиографии 1949 г. Эйнштейн рассказывает о мыслях, захвативших его очень рано:

«Там, во вне, был этот большой мир, существующий независимо от нас, людей, и стоящий перед нами как огромная вечная загадка, доступная, однако, по крайней мере отчасти, нашему восприятию и нашему разуму. Изучение этого мира манило как освобождение, и я скоро убедился, что многие из тех, кого я научился ценить и уважать, нашли свою внутреннюю свободу и уверенность, отдавшись целиком этому занятию. Мысленный охват, в рамках доступных нам возможностей, этого внеличного мира представлялся мне, наполовину сознатель-

¹ Г. Г а л и л е й. Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой. Избранные труды. Том первый. М., Изд-во «Наука», 1964, стр. 201.

но, наполовину бессознательно, как высшая цель. Те, кто так думал, будь то мои современники или люди прошлого вместе с выработанными ими взглядами, были моими единственными и неизменными друзьями»¹.

В студенческие годы и позже в Берне, в период, непосредственно предшествовавший созданию теории относительности, Эйнштейн познакомился с идеями Спинозы, и тяга к объективному знанию приобрела форму определенных гносеологических воззрений. Далее Эйнштейн постепенно приближался к идее *инвариантного представления* физических процессов, т. е. представления, независимого от произвольного выбора системы отсчета.

Теория относительности была историческим этапом в развитии этого инвариантного представления. Наука последовательно вводит в физическую картину мира соотношения, которые не зависят от условий эксперимента и наблюдения. Такими последовательными переходами к инвариантному представлению были релятивистские концепции древности, средних веков, Возрождения и нового времени, начиная с античной идеи изотропного пространства. После того как греки отказались от плоской Земли, допустили существование антиподов и релятивировали понятия верха и низа, направления в пространстве оказались связанными с материальными телами; это было первым приближением к будущему «классическому идеалу». Далее гелиоцентрическая система Коперника покончила с привязанным к Земле центром ми-

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 72.

рождения и релятивировала картину движения небесных тел, представляющую перед взором земного наблюдателя. Вскоре концепция бесконечной, лишенной центра Вселенной связала траектории тел с телами отсчета и лишила их абсолютного характера.

Эти этапы освобождения науки от антропоцентризма были этапами инвариантного представления процессов природы. В архаических представлениях об антиподах, падающих с Земли «вниз», в позднейших птоломеевых картинах разрушительного вихря, который снес бы с Земли все предметы, если бы Земля двигалась,— во всех подобных построениях предполагается, что поведение тел зависит от их положения или движения по отношению к самому пространству. К началу XX столетия претензии некоторой системы отсчета на привилегированный абсолютный характер обосновывались различием в скорости света («истинная» скорость света отнесена к привилегированной системе) и силами инерции, возникающими при ускоренном движении относительно такой системы.

Противостоявшие подобным воззрениям концепции инвариантности по отношению к координатным преобразованиям, концепции однородности пространства и относительности движения, опирались на данные эксперимента и наблюдения. Но важной предпосылкой развития этих концепций была мысль о зависимости поведения каждого тела от его взаимодействий с другими телами.

Для Эйнштейна теория относительности была этапом развития идеи объективной гармонии бытия. Эта гармония выражается в универ-

сальной причинной связи процессов природы. Объективное ratio мира — причинная обусловленность его процессов. Эйнштейн мог повторить за Спинозой: «Causa sive ratio, ratio sive causa».

Причинная связь в природе имеет объективный характер. Подводя итог своим многочисленным беседам с Эйнштейном на философские и физические темы, А. Мошковский писал:

«Если Эйнштейн, как мы знаем, провозглашает истину единственной целью науки, то он, фактически, имеет в виду строго объективную истину, как она раскрывается в явлениях природы, действительную связь явлений и событий, не смущаясь тем, что рефлектирующая философия ставит и под этой последней объективностью знак вопроса. Великий естествоиспытатель и не может думать иначе; для него за покровом Майи таится не исчезающий фантом, а некоторое познаваемое ядро, которое выступает все явственнее и реальнее по мере того, как он постепенно снимает один покров за другим»¹.

Уже в юности у Эйнштейна появилась мысль о таком представлении «познаваемого ядра», которое выражает его независимость от путей познания. Эта мысль и привела в своем последовательном развитии к представлению об инвариантности величин, которые в классической физике считались зависящими от выбора системы отсчета, и о зависимости от выбора коор-

¹ А. Мошковский. Альберт Эйнштейн. Беседы с Эйнштейном о теории относительности и общей картине мира. М., 1922, стр. 142.

динатных систем тех величин, которые считались инвариантными.

Каждая конкретная теория, воплощающая принцип относительности в собственно физические соотношения, сопоставимые с экспериментом и в последнем счете выводимые из эксперимента, указывает, какие физические величины зависят от координатных преобразований и какие величины служат инвариантами этих преобразований. Соответственно определяется характер преобразований и ковариантных уравнений, с помощью которых описываются физические соотношения в данной конкретной теории. Классическая механика — это конкретная физическая теория, утверждающая инвариантность пространственных отрезков и временных интервалов и изменение скоростей при галилеевых преобразованиях. Специальная теория относительности говорит об инвариантности четырехмерного пространственно-временного интервала при лоренцовых преобразованиях и об изменении пространственных и временных масштабов. Общая теория относительности исходит из инвариантности четырехмерного интервала по отношению к более широкой группе преобразований.

Однако для всех конкретных модификаций принципа относительности общей предпосылкой служит идея объективной реальности, не зависящей от путей ее восприятия, регистрации и измерения.

Для Эйнштейна эта идея представлялась основой науки в целом. «Уверенность в существовании внешнего мира, независимого от познающего субъекта, лежит в основе всего учения о

природе», — писал Эйнштейн в статье «Влияние Максвелла на эволюцию понятия физической реальности»¹.

Объективно существующие в природе тела связаны в своем поведении объективной причинной связью. Эйнштейн исключает вмешательство нематериальных сил в ход физических процессов. Эту мысль, последовательно примененную в физических построениях Эйнштейна, нужно иметь в виду, чтобы понять истинный смысл слов «бог» и «религия», мелькающих в его статьях и письмах.

Чаще всего слово «бог» в устах Эйнштейна было обозначением (несколько юмористическим) материальной гармонии мироздания. Приведем замечание Эйнштейна о зависимости массы от энергии в одном из писем 1905 г.: «Свет уносит массу. Это соображение веселое и подкупающее. Но не смеется ли господь бог над этим и не водит ли он меня за нос, этого я не могу знать»². Когда друг юности Эйнштейна Морис Соловин протестовал против слова «религиозность» у Эйнштейна, последний разъяснил ему условность этого термина: «...дабы не подумали, что я, ослабленный годами, стал жертвой священников». Он говорил, что речь идет об ощущении внутренней гармонии бытия. Это ощущение противостоит позитивизму и догматическо-

¹ A. Einstein. Comment je vois le monde. Paris, 1934, p. 194.

² C. Seelig. Albert Einstein. Zürich, Europa Verlag, 1960, S. 126. К. Зелиг. Альберт Эйнштейн. М., 1964, стр. 65—66).

му представлению о мире¹. В статье «О смысле жизни» Эйнштейн писал, что в отличие от верующего «...ученый пронизан ощущением причинной обусловленности всего происходящего. Для него будущее не менее определено и обязательно, чем прошедшее. Мораль для него не имеет в себе ничего божественного, она — чисто человеческая проблема. Религиозность ученого состоит в восторженном преклонении перед гармонией законов природы... Это чувство — лейтмотив жизни и творческих усилий ученого в пределах, где он возвышается над рабством эгоистических желаний»².

Терминологическая уступка религии остается уступкой. Но когда речь идет о гносеологических истоках теории относительности, существенна не эта уступка, а убеждение Эйнштейна в объективной гармонии мира. Оно играло весьма значительную роль в подготовке великого открытия.

Гармония мира имеет каузальную природу. Поэтому она исключает существование каких-то исходных процессов, на которых обрывается цепь причин — следствий и которые не подлежат дальнейшему каузальному истолкованию. Гармония, по мнению Эйнштейна, охватывает *все* мироздание, и, раскрывая гармонию, управляющую миром, мы приближаемся к однозначной картине, где нет произвольных допущений. С этой идеей связана одна важная тенденция

¹ См. A. Einstein. *Lettres à Solovine*. Paris, 1956, p. 115.

² A. Einstein. *Comment je vois le monde*. Paris, 1934, p. 39.

в творчестве Эйнштейна и в эволюции принципа относительности.

Эйнштейн часто задумывался над природой универсальных констант физики. Их можно сделать безразмерными, заменив произвольные единицы массы, пространства и времени «естественными» единицами. Можно ли считать выраженные таким образом соотношения между массами различных тел расстояниями, длительностями различных процессов и т. д. чисто эмпирическими или же они должны быть объектом дальнейшего каузального анализа?

В автобиографии 1949 г. Эйнштейн пишет о безразмерных постоянных: «Относительно этих последних мне бы хотелось высказать одно предложение, которое нельзя обосновать пока ни на чем другом, кроме веры в простоту и понятность природы. Предложение это — следующее: таких произвольных постоянных не существует. Иначе говоря, природа устроена так, что ее законы в большой мере определяются уже чисто логическими требованиями настолько, что в выражения этих законов входят только постоянные, допускающие теоретическое определение (т. е. такие постоянные, что их численных значений нельзя менять, не разрушая теории)»¹.

В этой мысли выражается одна из самых основных тенденций науки нового времени. Уже Кеплер хотел найти рациональные основания отношений между орбитами планет солнечной системы. Но это было не под силу XVI—XVII столетиям. В дальнейшем наука

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 93.

всегда пыталась вывести наблюдаемые соотношения из общей, охватывающей всю природу единой схемы взаимодействий тел. Уже в начале столетия, в годы подготовки специальной теории относительности, Эйнштейн стремился в максимальной степени вывести наблюдаемые физические соотношения из общей гармонии бытия. Для Эйнштейна степень, в которой физической теории удастся выполнить такую задачу, измеряет «внутреннее совершенство» теории. Мы скоро столкнемся с этим критерием и увидим, какую решающую роль сыграл он в генезисе теории относительности.

Итак, гармония бытия состоит в универсальной причинной связи, охватывающей всю природу. Эта связь последовательно раскрывается перед исследователем. Мысль о приближении к объективной истине пронизывала мировоззрение Галилея и Спинозы, она была характерна для рационализма XVII в. и лишь впоследствии сменилась претензией разума на абсолютное и полное познание истины в последней инстанции. Для Эйнштейна, как и для корифеев рационалистической мысли XVII в., познаваемость мира — это отнюдь не тривиальное соответствие между априорными конструкциями разума и содержанием научных знаний. Догматическое мышление навязывает природе эти конструкции или объявляет окончательным решением загадок бытия исторически ограниченные эмпирические знания. Эйнштейн, напротив, видит в познании сложную проблему: мир неисчерпаем, сведения о нем ограничены, недостаточны, приблизительны, неокончательны; вместе с тем мир познаваем: сменяющие одна

другую картины мира все больше приближают человека к объективной истине. Таков смысл известной фразы Эйнштейна: «Самое непонятное в мире — это то, что он понятен».

Пора перейти к конкретной демонстрации той роли, которую сыграли изложенные гносеологические принципы в создании теории относительности. Но до этого следует остановиться на позиции Эйнштейна по отношению к некоторым направлениям философии нового и новейшего времени.

В юности Эйнштейн усердно штудировал Юма и впоследствии неоднократно говорил о влиянии Юма на свои гносеологические воззрения. Здесь нет нужды поднимать всю проблему отношения гносеологии Эйнштейна к гносеологии Юма, крайне важную для оценки мировоззрения Эйнштейна в целом. Нас интересует сейчас не общая оценка, а анализ тех гносеологических позиций, которые были непосредственными и исходными для генезиса теории относительности. С такой точки зрения нужно подчеркнуть глубокое различие между тем, что Эйнштейн вынес из юмовского «Опыта о познании», и тем, что было основным для гносеологии Юма.

Эйнштейн черпал у Юма (как и из других источников) недоверие к конкретным чувственным восприятиям исследователя, к эмпирической «очевидности», которая предстает перед исследователем при изучении природы. Такая «очевидность», говорит Эйнштейн, еще не определяет однозначным образом действительную причинную связь процессов природы. Но Юм выводил отсюда тезис, с которым Эйнштейн не

мог согласиться. Юм утверждал, будто познание не проникает в глубь объективной причинной связи процессов, что познание должно ограничить свои претензии миром явлений. Эйнштейн, напротив, говорил о недостаточности феноменологической регистрации восприятий, о необходимости и возможности познания объективной причины восприятий.

По отношению к Канту Эйнштейн высказывался определеннее. Критика кантианства в целом и представления об априорном характере пространства и времени в особенности была у Эйнштейна сознательной и крайне существенной предпосылкой его физических построений.

Мы приведем позже некоторые замечания Эйнштейна о философии Канта в связи с позицией Эйнштейна в вопросе о математике и физике, а пока ограничимся ссылкой на статью о философии Бертрانا Рассела, которую Эйнштейн написал для сборника, посвященного идеям английского философа¹. В указанной статье Эйнштейн ищет, в частности, исторические истоки позитивизма (он указывает на позитивистский характер некоторых понятий, введенных Расселом) и находит эти истоки в философии Юма и Канта. Эйнштейн пишет, что именно Юм «создал опасный для филосо-

¹ См. A. Einstein. Remarks on Bertrand Russel's Theory of Knowledge. Library of Living Philosophers. The Philosophy of Bertrand Russel. Ed. P. Schilp, Evanston, 1944. Далее статья Эйнштейна цитируется по сборнику: A. Einstein. Ideas and Opinions. N. Y., 1954, p. 18—24.

фии, появившийся после его критического анализа фатальный страх перед „метафизикой“, который стал болезнью современного философствования в духе эмпиризма; эта болезнь — двойник того раннего философствования, которое хотело пренебречь опытом и отделаться от всего, что дано чувственным восприятием.

Под этим «ранним философствованием» Эйнштейн понимает кантианское представление об априорности пространства, времени и причинности. Когда наука показала зависимость геометрических и других априорных, по мнению Канта, понятий, агностицизм перешел к другой, конвенционалистской версии: научные понятия — результат соглашения.

Позиция Эйнштейна направлена против ограничения познания миром явлений и против конвенционализма.

В той же статье Эйнштейн пишет, что для позитивистов-эмпириков все понятия, не выводимые непосредственно из наблюдений, должны быть изъяты как метафизические. Но это требование, если его твердо придерживаться, исключает в качестве «метафизической» любую мысль. Чтобы мышление «не деградировало в метафизику или в пустой разговор», нужно только, чтобы предложения, выводимые из данной системы понятий, были достаточно тесно связаны с чувственным опытом.

Отношение Эйнштейна к философии Маха можно охарактеризовать весьма определенным образом, если иметь в виду итоговые оценки. Это отношение было отрицательным. Если же рассматривать всю эволюцию взглядов Эйнштейна, вопрос становится более сложным:

первоначально Эйнштейн сочувствовал гносеологическим позициям Маха.

В автобиографии 1949 г. Эйнштейн говорит о критике ньютоновой концепции абсолютного пространства в «Механике» Маха и добавляет: «В мои молодые годы на меня произвела сильное впечатление также и гносеологическая установка Маха, которая сегодня представляется мне в существенных пунктах несостоятельной».

Эти изменения оценок существенны для биографии Эйнштейна, что же касается гносеологических позиций, с которых Эйнштейн подходил к новым физическим идеям, то здесь существенны итоговые оценки. Наиболее резкая из них была высказана в 1920 г. После доклада в Париже на заседании Французского философского общества на вопрос Мейерсона об отношении к Маху Эйнштейн ответил, что считает Маха «жалким философом»¹.

Эта оценка в устах Эйнштейна кажется неожиданной по резкости. Но по существу она повторялась много раз в менее резкой форме, но в еще более категорическом смысле. Самое же главное состоит в том, что антипозитивистская установка Эйнштейна связана со всеми его основными физическими идеями. Связь с теорией относительности будет рассмотрена дальше, а теперь следует упомянуть об отношении Эйнштейна к так называемому логическому позитивизму.

Некоторые махисты, разделявшие (в отличие от самого Маха) основные физические

¹ E. Meyerson. La déduction relativiste. Paris, 1925, p. 62.

принципы теории относительности, хотели несколько реформировать представления Маха об источниках научных понятий, с тем чтобы сгладить противоречие между этими представлениями и новой физикой. Центром логического позитивизма стал так называемый венский кружок (Филипп Франк, Шлик, Карнап, Нейрат и др.). Однако Эйнштейн относился отрицательно и к реформированному махизму венского кружка¹.

Эйнштейн много раз писал, что в физике должны фигурировать понятия, допускающие экспериментальную проверку. Теория относительности действительно изгнала из физики понятия, принципиально не допускающие экспериментальной проверки,— одновременность событий, координаты которых определены в движущихся одна относительно другой системах, движение относительно эфира и самое существование эфира как универсального тела отсчета. Но, как уже было только что сказано, принципиальная сопоставимость понятий, описывающих физическую реальность, с наблюдением не имела у Эйнштейна ничего общего с отождествлением наблюдений и реальности. Это видно из гносеологических экскурсов Эйнштейна и еще больше из действительного содержания теории относительности. Соответственно неоднократные заявления Эйнштейна о «свободной деятельности познания» не имели

¹ Он упомянул об этом за месяц до смерти в беседе с Бернардом Козном. См. В. Cohen. An interview with Einstein. Scientific American, July 1955, ч. 193, р. 69—73.

ничего общего с идеей априорного или же условного характера представлений о природе. Заявления о связи с экспериментом и заявления о «свободной деятельности познания» могут быть поняты только в связи между собой, только как неотделимые одна от другой стороны одной и той же концепции.

Когда Эйнштейн говорит, что человек может свободно конструировать гипотезы, слово «свободно» означает только одно: гипотезы свободны от феноменологической ограниченности. Никакой уступки априорным и конвенционалистским тенденциям тут нет. Речь идет, например, об открытии планеты Нептун, существование которой не вытекало феноменологически из наблюдений. Подобные факты истории науки служат для Эйнштейна опровержением всех форм субъективизма. В заключительной, принадлежащей Эйнштейну статье сборника «Эйнштейн, философ — ученый» подобные факты выдвигаются как аргументы против *esse — percipi* Беркли¹. Если познание приходит к выводам, не содержащимся в наблюдениях, и затем эти выводы подтверждаются наблюдениями, значит познание проникает за пределы явлений и находит их объективную причину.

Чтобы увидеть, как «работали» антипозитивистские идеи Эйнштейна при построении теории относительности, следует остановиться

¹ A. Einstein. Reply on the Criticism. Albert Einstein: Philosopher — Scientist. N. Y., 1951. См. русск. перевод: А. Эйнштейн. Ответ на критику. В сб. «Философские вопросы современной физики». М., 1959, стр. 227—228.

на тесно связанных с этими идеями критериях выбора физической теории, которые Эйнштейн сформировал в конце жизни, но которыми он руководствовался уже в годы создания теории относительности.

3

Если научные концепции, отражающие объективную истину, должны сопоставляться с наблюдениями, значит первым критерием при выборе научной концепции должно быть ее согласие с экспериментом.

«Но насколько очевидным кажется это требование само по себе, настолько тонким оказывается его применение. Дело в том, что часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений. Во всяком случае, в этом первом критерии речь идет о проверке теоретической основы на имеющемся опытным материале»¹.

Если научная концепция неизбежно выходит за феноменологические рамки, значит критерием при ее выборе должны быть естественность и минимальное по сравнению с другими теориями число произвольных допущений.

«Второй критерий можно кратко характеризовать как критерий „внутреннего совершен-

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 78.

ства“ теории, тогда как первый относится к ее „внешнему оправданию“. К „внутреннему совершенству“ теории я причисляю также и следующее: теория представляется нам более ценной тогда, когда она не является логически произвольным образом выбранной среди приблизительно равноценных и аналогично построенных теорий».

Неотделимость критериев «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства» один от другого вытекает из общей гносеологической установки Эйнштейна. В основе дела — представление о единстве мира, об универсальной каузальной связи, образующей объективное *ratio* мира, его гармонию. Научная концепция приближается к этой гармонии, согласуя свое содержание с наблюдениями и максимально избегая произвольных посылок.

Критерии «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства» были применены к классической картине мира именно в таком, по существу едином, смысле. Логическая структура теории относительности, неизбежный переход от специальной теории к общей, отношение новой идеи к классическому идеалу науки — все это можно увидеть, если учитывать единство «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства». Эйнштейн столкнулся с нарушением «внешнего оправдания» — результатами опыта Майкельсона и аналогичных опытов. Разрыв можно было устранить специально выдвинутыми для этого добавочными предположениями. Но такой путь противоречил «внутреннему совершенству» теории. Эйнштейн начал с основ научного мировоззре-

ния. Связь с исходными гносеологическими посылками оказалась поэтому совершенно явной.

Эйнштейн воспринял в рационалистической философии и в классической физике представление о мире, в котором поведение каждого тела определяется его взаимодействием с другими телами. Такое представление должно все в большей степени господствовать в науке — в этом состоит то, что Эйнштейн называл *программой Ньютона*. Поведение тел обусловлено их взаимодействиями с другими телами; в зависимости от положения тела и его скорости непрерывно меняется воздействие данного тела на другие, и в зависимости от положений и скоростей других тел меняются от точки к точке и от мгновения к мгновению их воздействия на данное тело. Подобные изменения описываются дифференциальными уравнениями. После Максвелла физика достигла необычайных успехов в применении дифференциальных уравнений при описании электромагнитного поля. Поэтому Эйнштейн назвал *программой Максвелла* общую мысль о полной зависимости поведения тел от закономерностей, описываемых дифференциальными уравнениями.

Таков был для Эйнштейна идеал научного познания, лежавший в основе классической физики. Эйнштейн был убежден, что наука, конструируя понятия, наиболее естественные, в наибольшей степени исключающие субъективный произвол и допускающие в принципе экспериментальную проверку, приближается к классическому идеалу. Но классическая наука отличается от классического идеала: она вклю-

чает противоречащие ему понятия, и устранение этих понятий позволяет достичь большого «внутреннего совершенства» и вместе с тем «внешнего оправдания».

Классическая механика как основа физики лишилась «внешнего оправдания» в результате развития электродинамики. Уже во времена господства классических представлений эфир (по выражению Планка, «дитя классической науки, зачатое во скорби») приходилось наделять свойствами, противоречащими опыту: иначе он не укладывался в механическую картину мира.

«С точки зрения первого критерия (проверка на опыте) включение волновой оптики в механическую картину мира должно было вызывать серьезные сомнения. Если считать, что свет должен рассматриваться как волновое движение в упругом теле (в эфире), то это тело должно быть всепроникающей средой. В силу поперечности световых волн среда эта должна быть в основном подобна твердому телу, однако она должна быть несжимаемой, чтобы продольные волны не существовали. Этот эфир должен был вести рядом с обычной материей призрачное существование, поскольку он как будто не оказывал никакого сопротивления движению «весомых» тел. Чтобы объяснить показатели преломления прозрачных тел, а также процессы испускания и поглощения света, пришлось бы принять путаные взаимодействия между двумя родами материи, это не только не было выполнено, но даже никто этого серьезно и не пробовал»¹.

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 79.

Энергичные попытки предпринимались в другом направлении. Хотели дать механическое истолкование максвелловым уравнениям электромагнитного поля. «Над этим и стали трудиться усерднейшим образом, но совершенно бесплодно, тогда как самые уравнения во все большей степени выявляли свою плодотворность. Люди привыкли оперировать этими полями, как самостоятельными реальностями, не вдаваясь в их механическую природу. Так, почти незаметно взгляд на механику как на основу физики был оставлен; это произошло потому, что приспособление механики к опытным фактам оказалось безнадежным»¹.

Но, несмотря на дискредитацию механических моделей эфира, последнему приписывалась скорость по отношению к погруженным в эфир телам. «Электрические и магнитные „силы поля“ рассматривались наравне со „смещениями“ как первичные величины, а пустое пространство считалось частным случаем диэлектрика.носителем поля считалась *материя* (вещество), а не *пространство*. А это подразумевало, что носитель поля обладает свойством иметь скорость, что, конечно, должно было быть справедливым и для „пустоты“ (эфир). Электродинамика движущихся тел Герца всецело основана на этой принципиальной установке»².

Если эфир обладает скоростью по отношению к телам и соответственно тела — по отно-

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 79—80.

² Там же, стр. 83.

шению к эфиру, то тем самым эфир входит в картину мира как тело отсчета. Однако здесь классическая картина мира натолкнулась на неизбежное противоречие с фактами. Критерий «внешнего оправдания» был исходным при отказе от понятия скорости тел, отнесенной к эфиру, и от самого существования эфира.

Но здесь еще раз подтверждается гносеологическая схема Эйнштейна. Из опыта и только из него еще не следовала однозначным образом новая теория: результаты опыта Майкельсона могли быть объяснены искусственно, специально выдвинутыми гипотезами. Однако подобные гипотезы противоречили критерию «внутреннего совершенства».

Путь к общей теории относительности был несколько иным. Здесь сразу же исходным критерием было «внутреннее совершенство». В этом отношении классическая физика во многом отступала от классического идеала. Первое отступление состоит в произвольном выделении инерциальных систем из числа прочих, как единственных, где справедливы законы Ньютона.

Здесь мы подходим к так называемому принципу Маха, игравшему значительную роль в развитии общей теории относительности.

Понятие абсолютного пространства было введено Ньютоном со ссылкой на центробежные силы и вообще силы инерции, возникающие в ускоренно движущихся материальных системах. Появление этих сил приписывается активному вмешательству пространства как такового в ход механических процессов. Такое вмешательство нарушает пропорциональность

силы и ускорения и выходит за пределы картины мира, в которой все объясняется взаимодействием тел.

«С точки зрения чисто геометрического описания, все „жесткие“ системы отсчета являются в логическом отношении равноправными. Однако уравнения механики (и уже первый закон Ньютона) справедливы лишь в некоторых из этих систем отсчета, а именно в „инерциальных“ системах, составляющих особый класс. При этом характер системы отсчета, как материального тела, оказывается несущественным. Необходимость брать именно инерциальную систему отсчета должна быть поэтому обусловлена чем-то лежащим вне тех предметов (масс, расстояний), о которых идет речь в теории. В качестве такого определяющего обстоятельства Ньютон ввел понятие „абсолютного пространства“ как некоего вездесущего активного участника всех механических процессов»¹.

Мах в своей «Механике» критиковал ньютоново понятие абсолютного пространства с позиций взаимодействия тел как единственной причины всего происходящего в природе. Эйнштейн назвал такую концепцию принципом Маха. Согласно этому принципу, силы инерции не отличаются от других сил в том смысле, что они являются результатом взаимодействия тел. Соответственно, силы инерции не свидетельствуют о каком-либо движении в абсолютном пространстве; они являются воздействиями со стороны других тел на данное тело.

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 80.

Вскоре мы увидим, какие соображения заставили Эйнштейна в конце концов не только усомниться в справедливости принципа Маха, но и отказаться от него. Но такой отказ был связан с дальнейшим отходом от классических позиций и не реабилитировал ньютоново абсолютное пространство.

Другим недостатком «внутреннего совершенства» механики Ньютона и классической физики в целом была независимость законов движения, с одной стороны, и выражений для сил взаимодействия (т. е. для законов поля), с другой.

Эйнштейн считал пороком классической физики тот факт, что форма потенциальной функции $1/r$, определяющей силы гравитационных и электрических взаимодействий, в сущности произвольна; она не вытекает из каких-либо предположений о структуре пространства. Эта функция — решение простейшего (инвариантного по отношению к вращениям) дифференциального уравнения $\Delta\varphi = 0$. Можно было бы думать поэтому, что функция $1/r$ определяется пространственной структурой и не является по своему виду произвольной. «Собственно говоря, это первый результат, который мог бы навести на мысль об отходе от теории дальнего действия.

Однако развитие в этом направлении, — начатое Фарадеем, Максвеллом и Герцем, — наступило лишь позднее, под давлением опытных фактов»¹.

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 81—82.

Приведенные констатации служат исходными логическими пунктами для последовательных звеньев развития теории относительности. Устранение указанных Эйнштейном недостатков классической физики приближает ее к классическому идеалу. Но вместе с тем эти последовательные звенья подготавливали выход за пределы классического идеала.

4

С исторической точки зрения специальная теория относительности была продолжением и завершением тенденции, о которой Эйнштейн говорил в приведенной выдержке из автобиографии 1949 г. Электрическому и магнитному полю приписывали механические свойства, его считали средой, которая, подобно погруженным в нее телам, может служить телом отсчета («носитель поля обладает свойством иметь скорость...» — характеризует этот взгляд Эйнштейн). Эйнштейн говорит далее, что бесплодность механических моделей эфира подготовила отказ от представления о ньютоновой механике как об основе физики. Действительно, эфир как механическая система — неподвижное тело, в котором распространяются упругие напряжения, — весьма естественным образом получает титул универсального тела отсчета и заменяет пустое абсолютное пространство Ньютона, не поколебав ньютоновой механики, включая классическое правило сложения скоростей. Предпосылкой отказа от признания всеобщ-

ности и точности этого правила и ньютоновой механики в целом было крушение механических концепций эфира. Когда последняя механическая функция эфира — роль универсального тела отсчета — была у него отобрана, теория поля эмансипировалась от ньютоновой механики. При этом эфир вообще исчез из научной картины мира — указанная функция, гарантировавшая связь теории электромагнитного поля с ньютоновой механикой, была действительно последним *raison d'être* концепции эфира.

Механическая концепция эфира позволяла очень близко подойти к релятивистским преобразованиям — соотношениям между координатами и временем, измеренными в двух системах отсчета, которые указывает теория относительности, т. е. к лоренцовым преобразованиям. Но она не позволяла приблизиться к подлинному физическому смыслу этих преобразований. В 1887 г. Фойгт написал статью о принципе Допплера, в которой свет определяется с домаксвелловых позиций, как механические колебания в упругой среде. Рассматривая волновые уравнения, описывающие такие колебания, Фойгт ставит вопрос о сохранении справедливости их при переходе от одной системы отсчета к другой, движущейся по отношению к первой. По существу это вопрос о *ковариантности* волновых уравнений относительно лоренцовых преобразований (в явной форме этого понятия у Фойгта нет).

Преобразования, найденные Фойгтом, удовлетворяют требованию ковариантности волновых уравнений. Близость этих преобразований к преобразованиям Лоренца отнюдь не была свя-

зана с близостью физических концепций и с каким-либо предвосхищением теории относительности. В 1887 г. Фойгт опубликовал работу о распространении света в движущихся средах¹, где обсуждаются результаты опыта Майкельсона, но в ней нет и речи о трансформационных свойствах волновых уравнений.

В начале нашего столетия механические концепции эфира уже были значительно подорваны развитием теории Максвелла. При этом наметились две тенденции, существенные для генезиса теории относительности.

Во-первых, внимание физиков и математиков концентрировалось на проблеме ковариантности уравнений Максвелла, и эту проблему начали связывать с результатами опыта Майкельсона.

Во-вторых, движению тел в эфире стали приписывать свойства, парадоксальные с классической точки зрения, противоречащие классическому представлению о движении тел, отнесенном к другим телам. Однако до Эйнштейна ковариантность уравнений Максвелла не связывали с фундаментальными свойствами движения, а неизменность скорости света при переходе от одной инерциальной системы к другой считали чисто феноменологической. Что же касается поведения тел, движущихся в эфире, то это поведение объясняли взаимодействием тел и эфира, рисовали гипотетическую динамическую схему такого взаимодействия и были далеки от чисто кинетической схемы взаимного движения тел, не совпадающей с классическим

¹ См. Voigt. Gött. Nachrichten, 8, 1887, S. 177.

правилом сложения скоростей. Речь идет о концепциях Лоренца и Пуанкаре, высказанных почти одновременно с теорией Эйнштейна.

В течение 90-х годов Лоренц неоднократно высказывал гипотезу продольного сокращения размеров движущихся тел. Наиболее полное и законченное изложение этой гипотезы было дано Лоренцом в 1904 г. в статье «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света»¹. Лоренц объясняет результаты опыта Майкельсона сокращением длины продольного плеча интерферометра. Соответствующее объяснение находят результаты и других опытов, показавших постоянство скорости света в движущихся системах. Неизменность скорости света во взаимно смещающихся инерциальных системах оказывается феноменологическим результатом двух компенсирующих друг друга эффектов движения интерферометра в эфире: замедления света относительно интерферометра и сокращения длины продольного плеча. Эфир как абсолютное тело отсчета сохраняется, но движение, отнесенное к этому телу отсчета, не может быть обнаружено. Такой чисто феноменологический релятивизм открывает дорогу математической разработке понятий, выражающих относительность движения. В этом направлении Пуанкаре продвинулся очень далеко. Присланная в июле 1905 г. в *Rendiconti del Circolo di Palermo* статья

¹ H. A. Lorentz. Proc. Acad. Sc. Amsterdam, 1904, 6, 809. См. перевод в сб. «Принцип относительности». М.—Л., 1935, стр. 16—48.

Пуанкаре «О динамике электрона»¹ содержит разработанную концепцию инвариантов четырехмерных координатных преобразований. Эта концепция опередила в некоторых отношениях не только математический аппарат статьи Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел», посланной в *Annalen der Physik* за три недели до того, как Пуанкаре послал свою статью в *Rendiconti*. Она опередила кое в чем даже работу Минковского. Но по собственно физическим представлениям Пуанкаре ушел недалеко от позиции Лоренца. Он сохранил эфир как абсолютное тело отсчета и рассматривал продольное сокращение масштабов как динамический эффект, как результат взаимодействия движущегося электрона с эфиром, вызывающего сокращение «истинных» продольных размеров покоящегося электрона.

Теория относительности Эйнштейна основана на субстанциальном понимании неизменности скорости света при переходе от одной инерциальной системы к другой. Ковариантность уравнений электродинамики по отношению к преобразованиям Лоренца выражает действительное отсутствие привилегированной системы отсчета и абсолютного тела отсчета — эфира. Последний не прячется от наблюдателя, а просто отсутствует. «Введение светоносного эфира,— пишет Эйнштейн,— окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится „абсолютно покоящееся пространство“»,

¹ H. Poincaré. *Rendiconti del Circolo Mat. di Palermo*. 1906, XXI, p. 129. См. перевод в сб. «Принцип относительности», стр. 51—129.

наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в которой протекают электромагнитные процессы не приписывается какой-нибудь вектор скорости»¹.

«Местное время» Лоренца получает теперь иной смысл. Каждое «местное время» равноправно с каждым другим «местным временем» так же, как длина отрезка в данной системе равноправна с длиной отрезка в иной инерциальной системе. Взаимный характер лоренцова сокращения масштабов и ускорения времени означает, что относительность движения (пока лишь прямолинейного и равномерного) имеет объективный, субстанциальный характер.

Эйнштейн отказывается рассматривать лоренцово сокращение как динамический эффект и выводит его за пределы электродинамики в более широкую область кинематических соотношений. Относительное движение тел и только оно одно объясняет различие пространственных масштабов и временных интервалов, измеренных в системах отсчета и привязанных к движущимся телам.

Такой взгляд превращает принцип относительности из электродинамического принципа в принцип механики. Это другая сторона распространения классического принципа относительности Галилея — Ньютона на оптические явления. Классический принцип становится универсальным, но теряет свою связь с преобразованиями Галилея; всеобщий характер теперь принадлежит преобразованиям, по отношению

¹ А. Einstein. Ann. Physik, 1905, 17, 891. См. перевод в сб. «Принцип относительности», стр. 134.

к которым ковариантны уравнения электродинамики. Эйнштейн выводит их ковариантность не из специфических динамических воздействий эфира на движущиеся в эфире тела, а из общих пространственно-временных соотношений.

С этим связана оценка той роли, которую сыграла электродинамика в подготовке теории относительности. Исходный конфликт между опытом и классической физикой созрел в электродинамике. Более того, всю историю классической электродинамики можно рассматривать как последовательное созревание такого конфликта. И тем не менее теория относительности была создана Эйнштейном отнюдь не на базе электродинамики.

В 1955 г. Эйнштейн написал Зелигу, готовившему его биографию, небольшую справку, в которой говорится:

«Если заглянуть в прошлое развития теории относительности, не будет сомнений в том, что в 1905 г. она созрела для своего появления. Лоренц уже знал, что уравнениям Максвелла соответствуют преобразования, названные потом его именем, а Пуанкаре углубил эту идею. Я был знаком с фундаментальной работой Лоренца, вышедшей в 1895 г., но позднейшей работы и связанного с ним исследования Пуанкаре не знал. В этом смысле моя работа была самостоятельной. Новое в ней состояло в следующем. Лоренцовы преобразования выводились здесь не из электродинамики, а из общих соображений...»¹

¹ C. Seelig. Albert Einstein. Zürich, Europa — Verlag, 1960, S. 116. К. Зелиг. Альберт Эйнштейн, М., 1964, стр. 60.

Электродинамика должна была найти место в единой каузальной схеме мироздания. Она не укладывалась в эту схему, и Эйнштейн пришел к новой схеме. Он пришел к последней не по пути частных перестроек, а через общий пересмотр классической схемы. Руководящим принципом общего (т. е. гарантирующего «внутреннее совершенство» теории) пересмотра было требование «внешнего оправдания», возможности экспериментальной проверки теории.

Эйнштейн в одном из писем Соловину разъяснял: «Помимо прочего, теорию относительности характеризует гносеологическая точка зрения. В физике нет понятия, применение которого было бы a priori необходимо или оправданно. Понятие завоевывает свое право на существование только своей ясной и однозначной связью с явлениями и соответственно с физическими опытами. В теории относительности понятия абсолютной одновременности, абсолютной скорости, абсолютного ускорения и т. д. отбрасываются, так как их однозначная связь невозможна. Каждому физическому понятию должно быть дано такое определение, в силу которого можно было бы в принципе решить, является ли оно в каждом конкретном случае соответствующим или не соответствующим действительности»¹.

Эйнштейн видел очень далеко идущую аналогию между логической структурой теории относительности и логической структурой термодинамики. В обоих случаях теория *систематически* (т. е. охватывая исходные принципы)

¹ A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine, p. 21.

строит выводы из физической бессодержательности некоторых традиционных понятий.

«Если бы неподвижный, заполняющий все пространство световой эфир действительно существовал, к нему можно было бы отнести движение, которое приобрело бы абсолютный смысл. Такое понятие могло быть основой механики. Попытки обнаружить подобное привилегированное движение в гипотетическом эфире были безуспешными. Тогда вернулись к проблеме движения в эфире, и теория относительности сделала это систематически. Она исходит из предположения об отсутствии привилегированных состояний движения в природе и анализирует выводы из этого предположения. Ее метод аналогичен методу термодинамики; последняя является не чем иным, как систематическим ответом на вопрос: какими должны быть законы природы, чтобы вечный двигатель оказался невозможным»¹.

5

В 1908 г. в работах Германа Минковского теория относительности была изложена в форме псевдоэвклидовых геометрических соотношений четырехмерного пространственно-временного мира. В такой форме специальная теория относительности получила дополнительные силы развития, облегчавшие систематическое построение релятивистской механики и электродинамики и последующий переход к более общей

¹ A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine, p. 19

теории, распространенной на ускоренные движения.

Герман Минковский ввел понятия «мировой точки», «мировой линии», «мира» и показал, что соотношения теории относительности могут быть представлены в виде геометрических соотношений, аналогичных евклидовым, если помимо координат x_1, x_2, x_3 (т. е. x, y, z) ввести четвертую координату $x_4 = ict$. При этом получается четырехмерная псевдоевклидова геометрия, отличающаяся от обычной евклидовой числом измерений и тем, что четвертая координата не является вещественной.

При всем значении этих понятий четырехмерное представление не изменило физического смысла теории относительности. Физическая идея четырехмерной геометрии — связь пространства и времени — содержалась по существу уже в первой статье Эйнштейна о теории относительности.

Речь идет не о тривиальной констатации: реальный мир существует в пространстве и времени. Это было известно и раньше. В теории относительности содержалось и другое утверждение. Из положения о постоянстве скорости света в различных, движущихся одна относительно другой системах следовало, что и чисто пространственному и чисто временному аспекту мира не соответствует реальный физический эквивалент. Несколько позже мы подробнее познакомимся со взглядами Эйнштейна на соотношение математики и физики. Но достаточно того, что мы уже знаем об исходных эпистемологических позициях Эйнштейна, чтобы увидеть основную идею четырехмерного мира в

первых его работах по теории относительности. Если нет мирового эфира как универсального тела отсчета, значит понятие абсолютной одновременности не может быть сопоставлено с результатами наблюдений. Исчезая из картины мира, эфир и отнесенное к эфиру движение унесли вместе с понятием абсолютной одновременности и представление о едином, охватывающем все пространство потока времени и представление об абсолютном пространстве.

В автобиографии 1949 г. Эйнштейн писал: «Весьма распространенной ошибкой является мнение, будто специальная теория относительности как бы открыла, или же вновь ввела, четырехмерность физического многообразия (континуума). Конечно, это не так. Четырехмерное многообразие пространства и времени лежит в основе также и классической механики. Только в четырехмерном континууме классической физики «сечения», соответствующие постоянному значению времени, обладают абсолютной (т. е. не зависящей от выбора системы отсчета) реальностью. Тем самым четырехмерный континуум естественно распадается на трехмерный и на одномерный (время), так что четырехмерное рассмотрение не навязывается как необходимое. Специальная же теория относительности, наоборот, создает формальную зависимость между тем, как должны входить в законы природы пространственные координаты, с одной стороны, и временная координата, с другой»¹.

Идея неразделимого в абсолютном смысле

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 91.

четырёхмерного мира уже содержалась в физических постулатах теории относительности. После Минковского эта идея получила добавочную эвристическую силу, потому что теперь уже не требовалось проверять лоренц-ковариантность физических уравнений, выражающих физические законы, выполняя операции, указанные формулами преобразований Лоренца. Ковариантность физических законов по отношению к этим преобразованиям демонстрируется математической формой закона.

Анализ действительного отношения созданного Минковским математического аппарата к основам теории относительности Эйнштейна позволяет уточнить и смысл этого аппарата, и смысл теории относительности. В свою очередь развитие математических идей Минковского позволяет все более отчетливым образом увидеть их отношение к содержанию первых работ Эйнштейна по теории относительности.

«То обстоятельство, — пишет Эйнштейн, — что нет объективного расщепления четырёхмерного континуума на трёхмерно-пространственный и одномерно-временной континуумы, имеет своим следствием, что законы природы получают свою логически удовлетворительнейшую форму лишь в том случае, когда их выражают как законы четырёхмерного пространственно-временного континуума. В этом заключается сущность того значительного методического успеха, которым теория относительности обязана Минковскому...»¹

¹ А. Эйнштейн. Математические основы теории относительности. Пг., 1923, стр. 35.

Эта характеристика подтверждается развитием теории инвариантов и групп преобразований после создания геометрии Минковского. Оно позволило Эмме Неттер проникнуть очень далеко в сущность законов сохранения. Известная теорема Неттер о связи инвариантности лагранжиана по отношению к определенной группе непрерывных преобразований с законами сохранения дает в весьма отчетливой форме увидеть связь законов сохранения импульса и энергии с однородностью пространства и времени.

Сохранение импульса связано с однородностью пространства, а сохранение энергии — с однородностью времени. Но теория относительности покончила с фикцией единого времени, охватывающего все пространство. Она покончила и с мыслью о чисто пространственной картине одновременных событий во всей Вселенной как о точном отображении реальности. Поэтому в картине мира, нарисованной Эйнштейном, однородным оказывается уже не пространство и время, взятые порознь, а четырехмерный пространственно-временной континуум. Соответственно и законы сохранения энергии и импульса сливаются в один закон. Импульс частицы задан тремя пространственными компонентами — трехмерным вектором. Энергию можно рассматривать как четвертую компоненту — проекцию на временную ось — некоторого четырехмерного вектора энергии-импульса. Его изменение от одной мировой точки к другой описывается четырехмерным тензором энергии-импульса. Законы сохранения импульса и энергии сливаются в единый закон сохранения.

В этом смысле теория относительности является новым этапом учения об однородности пространства и времени — стержневой идеей науки, начиная с XVII в. Представление Галилея об инерции и относительности инерционного движения, знаменовавшее начало классической науки, выражало мысль об однородности пространства. Принцип сохранения энергии, ставший в XIX в. центральной идеей науки, отвечал идее однородности времени. Теория относительности систематически развивает все выводы из постулата однородности пространства-времени.

В число этих выводов входит и еще один — соотношение между массой и энергией. В 1905 г., после того как статья «К электродинамике движущихся тел» была отправлена в «Annalen der Physik», Эйнштейн писал своему другу Габихту: «Принцип относительности в связи с уравнениями Максвелла требует, чтобы масса была пропорциональна содержащейся в теле энергии»¹.

Пропорциональность массы и энергии обладала «внешним оправданием», она подтверждалась всей суммой экспериментов, лежащих в основе классической электродинамики, и эта концепция характеризовалась «внутренним совершенством», неизбежно вытекающая из общих принципов. Вывод был сделан Эйнштейном в небольшой статье «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?», посланной в сентябре 1905 г. в Annalen der Physik.

¹ C. Seelig. Albert Einstein. Zürich, Europa Verlag, 1960, S. 126. К. Зелиг. Альберт Эйнштейн. М., 1964, стр. 65.

Вся сумма понятий и заключений, приводящих к признанию пропорциональности массы и энергии, образует релятивистскую динамику. Она имеет первостепенное значение для применения теории относительности, в особенности при решении задач атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц и, кроме того (а может быть, именно поэтому), для развития основ самой теории относительности.

В автобиографии 1949 г. Эйнштейн хотел сформулировать «те окончательные истины, которыми физика обязана специальной теории относительности». В этом итоговом определении важнее всего понятия импульса, энергии и эквивалентной ей массы. Из сохранения энергии вытекает характеристика теории относительности как по преимуществу *полевой* теории. Далее, объединение законов сохранения энергии и импульса, а также эквивалентность массы и энергии рассматриваются наряду с отрицанием абсолютной одновременности как краеугольные основания теории.

Смысл четырехмерного формализма, его связь с исходными позициями и содержанием первых работ Эйнштейна и роль понятия энергии в теории относительности видны в том новом изложении электродинамики, которое было дано в работах Эйнштейна.

Эйнштейн пользуется понятиями тензорного исчисления в четырехмерном псевдоевклидовом континууме. Он рассматривает антисимметричный четырехмерный тензор с шестью независимыми компонентами и с его помощью придает уравнениям Максвелла вид тензорных уравнений, ковариантных по отношению к преобразо-

ванпям Лоренца. Это не меняет физического смысла максвелловых уравнений: примененная к электродинамике теория относительности возвращает ей то, что получила от нее же. Но электродинамика приобретает более явное «внутреннее совершенство» — в смысле уменьшения числа исходных независимых допущений.

Четырехмерная запись уравнений классической электродинамики позволяет отчетливо увидеть относительность раздельного существования электрических и магнитных полей. В одной инерциальной системе поле представляется только электрическим, а в другой, движущейся относительно первой, оно обладает и магнитными компонентами. Поле, которое в одной системе является магнитным, приобретает также электрические компоненты в другой системе и действует на покоящийся в этой системе электрический заряд.

Далее ход мысли Эйнштейна показывает в очень прозрачной форме логическую природу четырехмерной записи и ее связь с критериями «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства».

Показав, что энергия единицы объема электромагнитного поля обладает свойствами четырехмерного тензора, Эйнштейн продолжает: «Этот факт был доказан непосредственно только для электромагнитного поля, но мы можем утверждать, что он имеет всеобщую применимость»¹.

¹ А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1955, стр. 46.

Тензор энергии описывает ее пространственное распределение. Заметим попутно, что Эйнштейн видит границы этой теории, вернее было бы сказать, видит, что за ее границами простирается область, требующая дальнейших обобщений. Если говорить об электромагнитном поле, то нам известны значения его напряженности, когда задано распределение зарядов и токов. Само это распределение и в первую очередь существование элементарных зарядов не находят объяснения в существующей теории. «Этот пробел в наших знаниях,— пишет Эйнштейн,— пытались восполнить, рассматривая заряженные частицы как некоторые сингулярности. На мой взгляд, однако, это означает отказ от действительного выяснения строения вещества. Мне кажется, что куда лучше сознаться в нашей нынешней несостоятельности, чем удовлетворяться кажущимся решением»¹.

Распределение энергии электромагнитного поля задается четырехмерным тензором $T_{\mu\nu}$, полное выражение которого известно для пространства вне заряженных частиц. Указанный тензор удовлетворяет соотношению

$$\frac{\partial T_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = 0.$$

Это соотношение вытекает из теории электромагнитного поля. «Вряд ли можно обойтись без предположения, что и во всех других случаях пространственное распределение энергии

¹ А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1955, стр. 46—47.

задается симметричным тензором», — пишет Эйнштейн.

Это обобщение соотношения

$$\frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = 0$$

на любое распределение энергии вытекает из четырехмерной записи классической электродинамики. Четырехмерная запись уменьшает число независимых гипотез, лежащих в основе электродинамики. Иными словами, явная релятивистская форма классической электродинамики раскрывает ее связь с более общими и широкими принципами. Уравнения Максвелла и все, что из них однозначно вытекает, обладают достаточным «внешним оправданием». Но для Эйнштейна этого мало. Он хочет, чтобы теория, получившая такое оправдание, приближалась к «внутреннему совершенству», содержала минимум допущений, сделанных *ad hoc*, т. е. специально для объяснения данного наблюдения. Четырехмерная запись отвечает подобному критерию, она связывает понятие тензора энергии электромагнитного поля с общими пространственно-временными соотношениями, справедливыми не только для электромагнитного поля. Поэтому четырехмерная запись придает соотношениям, выросшим и получившим «внешнее оправдание» в электродинамике, более общий смысл.

Псевдоэвклидова четырехмерная геометрия не стала бы одним из мостов от специальной к общей теории относительности, если бы Эйнштейн не руководствовался в поисках дальнейшего обобщения определенным представлением о связи геометрии и физической картины мира.

Это представление, как и многие другие эпистемологические идеи Эйнштейна, было высказано в сравнительно законченной форме ретроспективно, после появления физической концепции.

Однако в неявной, но весьма существенной для появления физической концепции форме оно существовало и раньше.

Эволюция взглядов Эйнштейна на отношение геометрии (и математики в целом) к физике в некоторой мере повторяла историческую эволюцию подобных взглядов. Поэтому автобиографические экскурсы Эйнштейна здесь переплетаются с историческими. Первоначально, еще в гимназические годы, Эйнштейн, познакомившись с началами геометрии, был поражен иллюзорной, как он потом понял, возможностью чисто логического постижения мира.

«Хотя это выглядело так, будто путем чистого размышления можно получить достоверные сведения о наблюдаемых предметах, но такое „чудо“ было основано на ошибке. Все же тому, кто испытывает это „чудо“ в первый раз, кажется удивительным самый факт, что человек способен достигнуть такой степени надежности

и чистоты в отвлеченном мышлении, какую нам впервые показали греки в геометрии»¹.

Древние греки не только достигли этой удивительной надежности и точности геометрического постижения мира. Они не отделяли собственно геометрического, т. е. логического, познания от эмпирического. В этом отношении детство ученого напоминало детство науки. В той же автобиографии 1949 г. Эйнштейн пишет: «Предметы, с которыми имеет дело геометрия, не казались мне другой природы, чем «видимые» и «осязаемые», т. е. предметы, воспринимаемые органами чувств. Это примитивное понимание основано, конечно, на том, что бессознательно учитывалась связь между геометрическими понятиями и наблюдаемыми предметами (длина — твердый стержень и т. п.)»².

Наука в своем развитии прошла тот же путь, что и Эйнштейн в индивидуальном развитии. Характеристика античного взгляда на геометрию высказана в очень ясной форме в статье Эйнштейна «Неэвклидова геометрия и физика»³. В этой статье Эйнштейн говорит об античной геометрии, как о полуэмпирической науке. «Точкой было тело, от размеров которого отвлекались. Прямая определялась или с помощью точек, которые можно оптически совместить в направлении взгляда, или же с помощью натянутой нити. Мы имеем, таким образом, дело с понятиями, которые, как это и вообще имеет

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 74.

² Там же.

³ См. сб. «Эйнштейн и развитие физико-математической мысли». М., 1962, стр. 5—9.

место с понятиями, не взяты непосредственно из опыта или, другими словами, не обусловлены логически опытом, но все же находятся в прямом соотношении с объектами наших переживаний. Предложения относительно точек, прямых, равенства отрезков и углов были при таком состоянии знания в то же время и предложениями относительно известных переживаний, связанных с предметами природы».

Эта первоначальная наивная концепция постепенно сменялась иной, учитывающей различие между геометрическими понятиями и их физическими прообразами. С одной стороны, аксиоматизация геометрии питала эту новую концепцию и даже приводила к неправильному представлению об априорном характере геометрии. «Стремление извлечь всю геометрию из смутной сферы эмпирического, привело незаметным образом к ошибочному заключению, которое можно уподобить превращению чтимых героев древности в богов», — говорит Эйнштейн.

С другой стороны, в том же направлении действовало развитие физики.

«Согласно ставшему гораздо более тонким взгляду физики на природу твердых тел и света, в природе не существует таких объектов, которые бы по своим свойствам точно соответствовали основным понятиям евклидовой геометрии. Твердое тело не может считаться абсолютно неизменяемым, а луч света точно не воспроизводит ни прямую линию, ни вообще какой-либо образ одного измерения. По воззрениям современной науки, геометрия, отдельно взятая, не соответствует, строго говоря, вообще никаким опытам; она должна быть приложена к объяс-

нению их совместно с механикой, оптикой и т. п. Сверх того, геометрия должна предшествовать физике, поскольку законы последней не могут быть выражены без помощи геометрии. Поэтому геометрия и должна казаться наукою, логически предшествующей всякому опыту и всякой опытной науке».

Распад первоначального представления о геометрии как о полуэмпирической науке привел к априорной версии Канта и впоследствии к конвенционалистской версии Пуанкаре. Эйнштейн противопоставляет им иную концепцию, которую он связывает с именем Гельмгольца: в последнем счете, далеко не непосредственно-эмпирическим образом, понятия геометрии соответствуют реальным телам и «тем самым все предложения геометрии приобретают характер утверждений относительно реальных тел».

«С этой точки зрения вопрос о приложимости или неприложимости эвклидовой геометрии приобретает ясный смысл. Эвклидова геометрия, как и вообще геометрия, сохраняет характер математической науки, так как вывод ее теорем из аксиом остается по-прежнему чисто логической задачей; но в то же время она становится и физической наукой, так как ее аксиомы содержат в себе утверждение относительно объектов природы, справедливость которых может быть доказана только опытом».

Эйнштейн пишет, что без такой точки зрения «невозможно было бы практически подойти к теории относительности».

Это очень важное замечание, оно бросает яркий и неожиданный свет на истоки теории Эйнштейна. Нетрудно показать, что физическая

геометрия в современном смысле слова появилась вместе с общей теорией относительности. *Физическое* различие между эвклидовой и неэвклидовыми геометриями стало ощутимым в 1916 г. Нетрудно также показать, что мысль о физическом критерии при определении действительной геометрии мира существовала у Эйнштейна до 1916 г. и руководила им в поисках общей теории относительности. Но Эйнштейн пишет о теории относительности в целом, т. е. и о специальной теории.

Здесь следует вспомнить, что специальная теория относительности была отрицательным ответом на вопрос, имеет ли трехмерная геометрия реальный физический эквивалент. Вопрос этот теряет смысл при конвенционалистской версии в вопросе о происхождении геометрии. Он теряет основания и при эмпирико-феноменологической трактовке геометрии. Что же касается априорной версии, то она также исключает сомнения в реальности трехмерной эвклидовой геометрии. Если характеризующие пространство геометрические соотношения, включая число его измерений, являются априорными формами познания, то физическая картина мира не может не быть эквивалентом этих соотношений.

С этой точки зрения приобретает новый смысл одна черта биографии Эйнштейна. В юности, расставшись с наивной верой в чисто логическое постижение мира, он потерял интерес к математике. Возврат к математическим интересам был связан с новыми физическими представлениями, требовавшими обобщения, невозможного без нового математического аппарата. В начале 900-годов, когда Эйнштейн подходил

к теории относительности, его математические интересы были на спаде. Но здесь имелась одна *позитивная* сторона. Эйнштейн искал в математике ответа на вопрос об объективных свойствах мира. Это *еще* не позволяло найти математические понятия, выражающие новую физическую концепцию, но *уже* не привязывало мысль к физическим воззрениям, тесно связанным с традиционными геометрическими представлениями. Уже в 900-е годы отношение Эйнштейна к математике открывало перед ним путь к физическим идеям, таившим нетрадиционные математические обобщения.

Эту связь видел Гильберт, когда писал: «На улицах нашего математического Геттингена любой встречный мальчик знает о четырехмерной геометрии больше Эйнштейна. И все же не математикам, а Эйнштейну принадлежит то, что было здесь сделано»¹.

Гильберт объяснял это тем, что у Эйнштейна не было груза традиционных математических и философских представлений о пространстве. Эйнштейн был убежден, что геометрические понятия говорят в последнем счете о реальных процессах, причем именно *в последнем счете*, так что они могут выражать реальные свойства мира, противоречащие непосредственному наблюдению, и сами могут противоречить традиционной геометрии. Поэтому новая физическая концепция, исключавшая из картины мира реальные эквиваленты всем известной, обычной, трехмерной евклидовой геометрии, не получала

¹ См. Ph. Frank. Einstein, his life and times. N. Y., 1947, p. 206.

в сознании Эйнштейна тормозящих импульсов, связанных с геометрией.

Для специальной теории этого было достаточно. Для общей теории относительности требования были гораздо более сложными. Здесь новые математические понятия не могли следовать во втором эшелоне за новыми физическими идеями. Требовались одновременные и связанные друг с другом усилия математической и физической мысли. Утверждение о физической содержательности геометрии уже не могло оставаться определенной историко-научной и эпистемологической оценкой корней геометрии. Оно было теперь необходимым критерием самого конструирования математических понятий. В свою очередь возможность геометрического представления физических законов стала эвристическим правилом при их поисках. При появлении четырехмерной псевдоэвклидовой геометрии была найдена математическая форма физических законов, гарантирующая их ковариантность в отношении преобразований Лоренца. Теперь нужно было найти физические законы, ковариантные по отношению к более общей группе преобразований. Поиски этих законов должны были сопровождаться обобщением четырехмерной геометрии, освобождением от ограничений, вытекающих из ее псевдоэвклидова характера. Такое обобщение было необходимым условием перехода к общей теории относительности, т. е. распространения принципа относительности на ускоренные движения.

Исходными были отнюдь не простое желание распространить найденный инвариант преобразований Лоренца, быть может, обобщенный,

на более широкую группу и не соображения о логической недостаточности классической механики с ее неоправданным выделением инерциальных систем. Эти соображения и стремления были навеяны чисто физическими размышлениями. Специальная теория относительности выросла из уравнений Максвелла для электромагнитного поля. Можно ли найти в рамках такой теории место для поля тяготения?

В классической физике поле тяготения рассматривается как скалярное поле, и задача состоит в том, чтобы построить скалярную теорию, инвариантную по отношению к преобразованиям Лоренца. «Итак, естественной представляется следующая программа: полное физическое поле состоит из скалярного поля (тяготение) и векторного поля (электромагнитное поле), дальнейшие открытия могли бы заставить ввести еще более сложные поля, но пока об этом можно было бы не беспокоиться»¹.

Как только Эйнштейн наметил подобную программу, у него появились сомнения насчет ее выполнимости. Из специальной теории относительности следует, что инертная масса пропорциональна энергии, а из опытов Этвеша и других известно, что тяжелая масса равна инертной. Отсюда вытекает, что вес зависит от энергии системы. Но этот вывод не мог следовать из сформулированной выше программы. Эйнштейн пишет, что он не мог быть сделан *без натяжки*; иными словами, здесь нельзя было сочетать «внешнее оправдание» с «внутренним совершенством».

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 94.

«И вот мне пришло в голову: факт равенства инертной и весомой массы или, иначе, тот факт, что ускорение свободного падения не зависит от природы падающего вещества, допускает и иное выражение. Его можно выразить так: в поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нем вместо „инерциальной“ системы отсчета ввести систему, ускоренную относительно нее»¹.

Таким образом Эйнштейн пришел к принципу эквивалентности и к мысли об относительности движения с ускорением. Иначе говоря, требование инвариантности по отношению к лоренцовым преобразованиям оказалось слишком узким для физических законов; они должны быть инвариантны и по отношению к более общей группе, включающей нелинейные преобразования.

Подобная мысль была высказана Эйнштейном в 1908 г. Главным препятствием на пути, который вел от этой мысли к сформулированной в 1916 г. сравнительно завершенной общей теории относительности, были некоторые традиционные представления о метрике пространства и времени. «Почему понадобилось еще 7 лет,— говорит Эйнштейн,— чтобы построить общую теорию относительности? Главная причина заключается в следующем: не так легко освободиться от представления, что координаты имеют прямой метрический смысл»².

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 94.

² Там же, стр. 95.

Под непосредственным прямым метрическим смыслом координат Эйнштейн понимает традиционное представление: разность координат всегда равна некоторой длине, независимой от происходящих в данной области физических процессов. Какова будет судьба этого представления при последовательном и систематическом учете эквивалентности ускорения и тяготения?

Эйнштейн исходит из условий, рассматриваемых специальной теорией относительности и предлагает сделать шаг к обобщению указанной теории. Введем жесткую систему с трехмерной евклидовой метрикой, которая движется по отношению к инерциальной системе с некоторым постоянным ускорением в определенном направлении. В этой неинерциальной, равноускоренной системе уже существует статическое постоянное поле тяготения. Измерение времени в такой системе дает иной результат, чем в неподвижной системе, ход часов будет иным, чем в таком же образом устроенных часах в неподвижной системе. Следовательно, нелинейное преобразование координат лишает их прямого и непосредственного метрического смысла¹.

Здесь следует остановиться, чтобы подчеркнуть связь приведенного рассуждения с общей концепцией Эйнштейна относительно связи математики и физики. Мысль о зависимости метрики пространства от физических процессов высказывалась уже в XIX в. Лобачевский

¹ См. Успехи физических наук, 1956, 59. влн. 1, стр. 95.

писал о различных геометрических соотношениях — эвклидовых либо неэвклидовых, — соответствующих различным физическим силам. Риман в лекции «О гипотезах, лежащих в основании геометрии» говорил о метрике, зависящей от сил, действующих в пространстве. Эти мысли не означали создания физической геометрии. Она появилась вместе с общей теорией относительности. Но ее предпосылкой было представление о том, что геометрия описывает реальные физические процессы. Это представление стало новой физической теорией, когда выяснилось, что *различные* геометрические соотношения, вообще говоря неэвклидовы, описывают физическую реальность, что степени отклонения от эвклидовых соотношений (которое уже в конце XIX в. представили как кривизну пространства) соответствует метрическое поле, тождественное с полем тяготения. Предпосылкой физической геометрии было понятие четырехмерного «мира» и тот факт, что тяготение единообразно искривляет *все* мировые линии — и мировые линии обычных тел, и мировые линии света. Такое *единообразное* искривление мировых линий (доказанное для обычных тел за три века до общей теории относительности, а для света — через три года после ее появления) позволило отождествить тяготение с искривлением пространства-времени.

Развитие физики настоятельно требовало нового представления о метрике пространства. Но это представление не могло быть достигнуто без сознательного и решительного отказа от априорности времени, а также от конвен-

ционалистского обоснования геометрии. Мысли Эйнштейна о физике и геометрии не просто способствовали генезису общей теории относительности, но были его необходимой предпосылкой. Это не значит, впрочем, что они уже до 1916 г. достигли такой ясности, как в позднейших статьях¹. Здесь, как и во всем творчестве Эйнштейна, эпистемологические взгляды достигали ясности во взаимодействии с собственно физическими конструкциями.

Итак, Эйнштейн освободился от представления о непосредственном метрическом смысле координат. Отсюда вытекает равноценность координатных систем, переходящих одна в другую путем непрерывных преобразований. Вместе с тем отпадает выделение инерциальных систем, характерное для классической механики и специальной теории относительности.

Из равноценности всех систем отсчета, образованных одна из другой непрерывным преобразованием, Эйнштейн выводит эвристическое требование: законы природы должны выражаться уравнениями, ковариантными по отношению к группе непрерывных преобразо-

¹ Кроме упомянутой статьи «Неэвклидова геометрия и физика» укажем также: «Геометрия и опыт» (русский перевод, Пг., 1922); «Principles of Theoretical Physics» (A. Einstein. Ideas and Opinions, Crown Publishers. N. Y., 1960, p. 220—223); «On the Method of Theoretical Physics» (ibid., p. 270—276); «Physics and Reality» (ibid., p. 290—323); «The Fundamentals of Theoretical Physics» (ibid., p. 323—325); «The Problem of Space, Ether and the Field in Physics» (ibid., p. 276—285).

ваний координат, к группе, относительно которой группа Лоренца является подгруппой. Это требование, по словам Эйнштейна, не позволяет вывести основные уравнения физики. Оно должно быть дополнено другим: нужно взять наиболее простые из общековариантных систем уравнений и среди них искать уравнения поля, описывающие физические свойства пространства. Прежде чем найти искомые уравнения, требуется установить математическую природу величин — функций координат, выражающих структуру поля, иначе говоря, физические свойства пространства.

Эйнштейн рассказывал о том пути, по которому он шел, руководствуясь указанными критериями. Он не знал, какова структура поля, каковы переменные, выражающие физические свойства пространства в общем случае. Но ему были уже известны переменные, описывающие свойства пространства, свободного от поля, т. е. пространства, о котором идет речь в специальной теории относительности. Он исходил из инварианта лоренцовых преобразований

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2, \quad (1)$$

который является измеримой и в этом смысле, согласно эйнштейновскому определению, физически содержательной величиной. Написанному выражению можно придать более общую форму, пригодную для произвольной системы координат

$$ds^2 = \sum_{i, k=1}^4 g_{ik} dx_i dx_k. \quad (2)$$

Обобщение закономерностей, заключенных в этом соотношении, должно проходить через две ступени. Сначала вводится гравитационное поле. При этом метрика пространства-времени еще соответствует общей формуле (2), но представление (1) специальной теории относительности может сохраниться лишь для бесконечно малой области. Дальнейшая ступень обобщения вводит общее поле, включающее наряду с гравитационными и электромагнитные силы.

В 1916 г. Эйнштейн отказался от этой дальнейшей ступени обобщения.

«Попытка найти представление для полного поля и получить для него уравнения казалась мне в то время бесперспективной, и я на нее не отважился. Я предпочел установить для изображения всей физической реальности предварительные формальные рамки. Это было нужно для того, чтобы иметь возможность исследовать, хотя бы предварительно, пригодность основной идеи общей относительности»¹.

Такое исследование состояло в разработке нового закона тяготения. Этот закон выражается уравнением

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = - \kappa T_{ik},$$

где в левой части стоит риманов тензор кривизны и другая величина, характеризующая кривизну, а в правой части — тензор энергии-импульса. Последний описывает физическую реальность, которая не входит в определяемое

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 97.

уравнением гравитационное поле. В автобиографии 1949 г. Эйнштейн пишет об этой величине, что она «ключает в себя все то, что не может быть объединено в одной теории поля». Вообще в высказываниях Эйнштейна об общей теории относительности, относящихся к 30—50-м годам, повторяется одна и та же характеристика правой части уравнения тяготения, т. е. тензора энергии-импульса: это физически нерасшифрованная величина. После приведенных только что слов Эйнштейн пишет об уравнениях тяготения:

«Конечно, я ни одной минуты не сомневался в том, что такая формулировка есть только временный выход из положения, предпринятый с целью дать общему принципу относительности какое-то замкнутое выражение. Эта формулировка была ведь, по существу, не более чем теорией поля тяготения, несколько искусственно оторванного от единого поля еще неизвестной структуры»¹.

В работах Эйнштейна, написанных в 30—50-е годы, ударение ставится на незавершенность общей теории относительности как теории гравитационного поля. Это поле рассматривается в качестве того предельного случая, который только и позволяет достоверным и окончательным образом найти уравнения. Ценой нерасшифрованности правой части уравнений — тензора энергии — расшифровывается левая часть — метрическая структура пространства, связанная с гравитационным полем.

Эйнштейн говорит об особенностях уравне-

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 98.

ний гравитационного поля. Эти сложные уравнения с необходимостью вытекают из требования ковариантности относительно общей группы непрерывных координатных преобразований. Из требования ковариантности относительно группы Лоренца нельзя единственным образом вывести сложную систему величин — симметричный тензор g_{ik} , характеризующий тяготение. Лоренц-ковариантными будут и самые простые скалярные величины; исходя из лоренц-ковариантности можно было бы приписать гравитационному полю скалярный характер. Сохранить группу Лоренца и пользоваться для характеристики тяготения сложным выражением, каким является симметричный тензор, было бы непоследовательным. Поэтому логическая структура общей теории относительности, какой она представлялась Эйнштейну в автобиографии 1949 г. и в ряде выступлений 30—50-х годов по общим вопросам науки, отличается акцентировкой общей ковариантности законов природы, ковариантности выражающих их уравнений относительно общей группы непрерывных координатных преобразований. Это — исходный пункт анализа. Эйнштейн показывает, каким образом из этого требования выросли однозначно определенные уравнения гравитационного поля.

Такая ретроспективная оценка логической структуры общей теории относительности изложена в автобиографии 1949 г. В этом удивительном по глубине и внутренней логической стройности документе содержатся и другие весьма важные характеристики теории и ее отдельных выводов. Приведем замечания

Эйнштейна об уравнениях поля и уравнениях движения.

Наиболее простое уравнение, ковариантное относительно общей группы координатных преобразований, уже не будет линейным и однородным по переменным поля и их производным, как это имеет место в случае, например, максвелловых уравнений для пустого пространства. В линейной теории поля для однозначного определения движения тел под влиянием поля недостаточно уравнений поля: необходимы независимые от них уравнения движения. В нелинейной теории последние неявно содержатся в уравнениях поля.

К такому выводу, содержащемуся в статьях Эйнштейна и его учеников, можно добавить следующую выдержку из автобиографии 1949 г. В ней Эйнштейн хотел наглядно представить сущность проблемы. Одна неподвижная материальная точка (частица) характеризуется полем тяготения, которое конечно и регулярно всюду, кроме местоположения самой материальной точки. Интегрируя уравнения поля, вычислим поле двух неподвижных материальных точек. Оно будет иметь, помимо особенностей в местоположениях точек, особенности на соединяющей их линии.

«Но можно задать движение материальных точек так, чтобы определяемое ими поле тяготения вне материальных точек нигде не имело особенностей. Это будут как раз те движения, которые в первом приближении описываются законами Ньютона. Таким образом, можно сказать: массы движутся так, что уравнения поля допускают решения, не имеющие особен-

ностей в пространстве вне масс. Это свойство уравнений тяготения непосредственно связано с их нелинейностью, а она в свою очередь обусловлена более широкой группой преобразований»¹.

Далее мы встречаем очень важный переход к более общему кругу вопросов. Приведенное построение, говорит Эйнштейн, может встретить возражение. Если гравитационное поле обладает особенностями в тех местах, где находятся материальные точки, то почему их не может быть в остальном пространстве?

«Это возражение было бы оправдано в том случае, если бы уравнения тяготения могли рассматриваться как уравнения единого полного поля. При существующем же положении нам приходится говорить, что поле материальной частицы может рассматриваться как чистое поле тяготения с тем меньшим правом, чем ближе мы подходим к самой частице. Если бы мы имели уравнения для единого полного поля, то нужно было бы требовать, чтобы и самые частицы могли быть представлены, как решения полных уравнений поля, нигде не имеющие особенностей. И только тогда общая теория относительности стала бы замкнутой теорией»².

Таким образом, поиски единой теории поля совпадают с поисками объяснения природы частиц, выводящего их существование из уравнений единого поля. Мы вскоре вернемся к

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 99—100.

² Там же, стр. 100.

проблеме единой теории поля. До этого следует сказать несколько слов об отношении Эйнштейна к квантовой механике. Это отношение тесно связано с поисками единой теории поля.

7

Когда Эйнштейн говорил о неполноте квантовомеханического описания физической реальности, его выступления обычно рассматривали как критику квантовой механики с классических позиций. Можно было предположить, что у Эйнштейна критика квантовой механики ведется с позиций некоторой единой радикально неклассической теории. Но ничего конкретного, собственно физического, об этой единой теории не было сказано. Предложенные Эйнштейном математические конструкции не становились физически содержательными в том смысле, в каком понимал этот термин сам Эйнштейн. Конкретные физические возражения против квантовой механики были успешно отражены ее создателями в ряде дискуссий.

Теперь угол зрения на эйнштейновскую критику квантовой механики существенно изменился. Сейчас стало ясным, что Эйнштейн по существу критиковал квантовую механику не с позиций какой-либо классической по своему духу физической концепции. Во взглядах Эйнштейна на квантовую механику имела место некоторая эволюция, впрочем неявная. Он все время стремился к универсальному физическому принципу. Но с течением времени конкретизировалось содержание этого принципа. Критика квантовой механики все в большей степени

связывалась с мыслями о дальнейшем обобщении релятивизма, о переходе от «промежуточной» общей теории относительности к единой теории поля. Поэтому в высказываниях Эйнштейна о квантовой механике можно увидеть отражение эволюции самой теории относительности.

В своей книге об Эйнштейне Филипп Франк¹ рассказывает о споре, происходившем у него с Эйнштейном в 1932 г. Франк защищал не только основы квантовой механики, но и позитивистские выводы, которые были тогда значительно больше, чем сейчас, распространены среди физиков. Эйнштейн не жалел отрицательных эпитетов для подобных выводов и, в частности, говорил о них, как о вредной моде.

«Но ведь мода, о которой Вы говорите, изобретена Вами же в 1905 г.!» — сказал ему Франк, который сближал эйнштейновское требование физической содержательности и экспериментальной проверки понятий, игравшее существенную роль в генезисе теории относительности и сведение физической реальности к упорядоченным наблюдениям. «Хорошая шутка не должна повторяться», — ответил Эйнштейн. Он стал объяснять Франку, что теория относительности отличается представлением об объективном, независимом от наблюдения характере физических соотношений.

Критические выступления Эйнштейна все чаще направлялись не только на позитивист-

¹ Ph. Frank. Einstein, his life and times. Knopf. N. Y., 1947, p. 216.

скую интерпретацию квантовой механики, но и на ее собственно физическое содержание. При этом Эйнштейн не противопоставлял квантовой механике какую-либо классическую концепцию типа «скрытых параметров», позволяющих в одном опыте с неограниченной точностью определить сопряженные динамические переменные.

Напротив, с течением времени становилось ясным, что те стороны квантовой механики, которые были объектом критики со стороны Эйнштейна, связаны не столько с ограничением классических понятий, сколько с неполным отходом от них.

Квантовая механика утверждает, что сопряженные динамические переменные частицы (положение и импульс, время и энергия) не могут быть одновременно точно определены. Этой ценой достигается применимость к микромиру классических понятий положения, импульса и т. д. Такая применимость является позитивно-классическим постулатом квантовой механики. Квантовая механика отказывается от учета атомной структуры и неопределенности динамических переменных у так называемых классических объектов, причем существование таковых и соответственно физическая содержательность классических понятий являются предпосылкой квантовомеханических формулировок и обоснования квантовой механики¹.

Соответственно квантовая механика ограни-

¹ См. Л. Ландау и Е. Лифшиц. Квантовая механика. Перерелятивистская теория. 2-е изд. М., 1963, стр. 15—16.

чивает классическую причинность неопределенностью сопряженных динамических переменных у квантовых объектов. Переходы от одного состояния квантового объекта к другому носят прерывный характер, и при этом определена непрерывным образом лишь вероятность каждого состояния.

Для Эйнштейна этот принцип представлялся безупречным в смысле соответствия фактам, обладающим достаточным «внешним оправданием»; но «внутреннего совершенства» Эйнштейн здесь не видел. В 1938 г. в одном из писем Соловину, говоря о «вредном влиянии субъективно-позитивистских взглядов», Эйнштейн прибавляет:

«Понимание природы как объективной реальности считают устаревшим предрассудком, и квантовые теоретики из нужды делают добродетель»¹.

«Нужда» в данном случае состояла в необходимости применения классических понятий, классических динамических переменных при описании поведения частицы, в необходимости ограничения такого применения неопределенностью сопряженных переменных и учета непрерывного изменения лишь вероятности состояний частицы. А в чем состоит единый универсальный физический принцип, оправдывающий эту «нужду»? Официальная версия, на то более распространенная в окружавшей Эйнштейна среде, выводила «нужду» из неотделимости объекта от познания и из ограниченности причинного объяснения мира. В глазах Эйн-

¹ A. Einstein. Lettres à Solovine, p. 74.

штейна такая гносеологическая версия означала, что результат «нужды» объявляется выражением раз навсегда данных свойств познания — результатом «добродетели», причем подобные определения свойств познания Эйнштейн решительно отвергал всем своим творчеством и в особенности теорией относительности.

Можно ли вывести все то, что дает квантовая механика в смысле «внешнего оправдания», из более общего принципа, сохраняющего нестатистические закономерности, как исходные закономерности мира? Эйнштейну не удалось найти этот принцип в такой форме, в которой последний мог удовлетворить его. Творца теории относительности мог удовлетворить принцип, приводящий к выводам, допускающим экспериментальную проверку. В 1947 г. в одном из писем Максу Борну Эйнштейн следующим образом излагал свою позицию:

«В наших научных взглядах мы оказались антиподами. Ты веришь в играющего в кости бога, я — в полную закономерность в мире объективно сущего, что я пытаюсь уловить сугубо спекулятивным образом. Я надеюсь, что кто-нибудь найдет более реалистический путь и соответственно более осязаемый фундамент для подобного воззрения, нежели это удалось сделать мне. Большие первоначальные успехи теории квантов не могли меня заставить поверить в лежащую в основе игру в кости»¹.

«Сугубо спекулятивный образ» не давал даже логической гарантии истины. Для Эйн-

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 130—131.

штейна логический анализ приобретает смысл, если результаты анализа могут быть сопоставлены с наблюдением. Эйнштейн мог сослаться только на интуицию. В том же 1947 г. он писал Борну:

«Мою физическую позицию я не могу для тебя обосновать так, чтобы ты ее признал сколько-нибудь разумной. Конечно, я понимаю, что принципиально статистическая точка зрения, необходимость которой впервые ясно осознана была тобой, содержит значительную долю истины. Однако я не могу в нее серьезно верить потому, что эта теория несовместима с основным положением, что физика должна представлять действительность в пространстве и во времени без мистических дальнодействий. В чем я твердо убежден, так это в том, что в конце концов останутся на теории, в которой закономерно связанными вещами будут не вероятности, но факты, как это и считалось недавно само собой разумеющимся. В обоснование этого убеждения я могу привести не логические основания, а мой мизинец, как свидетель, т. е. авторитет, который не внушает доверия за пределами моей кожи»¹.

Постепенно подготавливалось «внешнее оправдание» теории, которая отказалась более радикальным образом от классических понятий, чем квантовая механика, созданная в 20-е годы. В конце 20-х годов появилась релятивистская квантовая теория. Она не столько синтезирует теорию относительности и квантовую механику,

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 131.

сколько вносит релятивистские, т. е. вытекающие из теории относительности, поправки в соотношения квантовой механики, решает частные задачи и далека от законченности и непоколебимости теории относительности и нерелятивистской квантовой механики.

Эйнштейн стоял в стороне от основного фарватера релятивистской квантовой теории 30—50-х годов. Ее господствующий стиль не совпадал с теми особенностями научного метода Эйнштейна, которые получили свое воплощение в теории относительности. Релятивистская квантовая физика накапливала все большее число наблюдений, выдвигала для их объяснения чисто рецептурные приемы, обходила фундаментальные трудности, добивалась удивительного совпадения вычисленных значений физических величин с экспериментом. Но она не могла найти единый отправной пункт для выведения и обоснования рецептурных приемов, для объединения разрозненных наблюдений и частных, несвязанных одна с другой концепций, для устранения противоречивых и подчас физически абсурдных выводов.

Творчеству Эйнштейна было присуще систематическое выведение следствий из небольшого числа исходных постулатов и эмпирических наблюдений. В конце 30-х годов, обсуждая открытие мезонов, Эйнштейн говорило путях общей теории элементарных частиц. По его мнению, вовсе не требовалось большого числа новых экспериментальных данных для построения такой теории. Уже существование электрона, понятие которого по существу чуждо континуальной электродинамике, дает основу

для построения общей теории элементарных частиц.

«Это, несомненно, гипербола, — говорит И. Е. Тамм, — но она очень характерна для Эйнштейна, и поучительно противопоставить ее широко распространенной точке зрения, что решению фундаментальных проблем науки необходимо должно предшествовать накопление огромного количества экспериментальных данных. В действительности пример как специальной, так, в особенности, общей теории относительности показывает, что решающую роль для построения фундаментально новой теории играет глубокий логический анализ узловых опытных фактов. Конечно, следствия из теории должны быть проверены затем на максимальном обширном опытном материале»¹.

Таким образом, отношение Эйнштейна к квантовой механике и расхождение между его научными интересами и общим потоком физической мысли в 30—50-е годы раскрывает некоторые характерные особенности логической структуры теории относительности.

8

Последняя из сравнительно полных оценок квантовой механики была сделана Эйнштейном в автобиографии 1949 г. Эта оценка является итоговой, причем она отчетливо показывает связь эйнштейновской критики с идеей

¹ И. Е. Тамм. А. Эйнштейн и современная физика. Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 8.

единого поля и исходные неклассические позиции критики.

«Мое мнение сводится к тому, — пишет Эйнштейн, — что если принять за основу некоторые понятия, заимствованные, главным образом, из классической механики, то современная квантовая теория может считаться наилучшей формулировкой реальных соотношений»¹.

Таким образом, квантовая теория будет наилучшим отображением реальности, если пользоваться *главным образом классическими понятиями*. Но, как мы сейчас увидим, Эйнштейн предполагает, что физика должна отказаться радикальнее, чем сейчас, от классических понятий. С такой точки зрения квантовая механика не может служить основой будущей теории. Эйнштейн говорит, что существенные черты квантовых явлений (неопределенность динамических переменных, скачкообразные изменения состояний, сочетание волновых и корпускулярных свойств), по мнению большинства физиков, не могут быть учтены при описании физической реальности непрерывными функциями координат, удовлетворяющими некоторым дифференциальным уравнениям. По мнению большинства, подобные уравнения не могут иметь решения, которые бы оставались регулярными, т. е. не имели бы особенностей во всем четырехмерном пространстве.

Такому, господствующему взгляду Эйнштейн противопоставляет иной, почерпнутый из опыта построения общей теории относительности. Этот опыт служит основой некоторого прогноза

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 102.

на будущее. Уравнения общей теории относительности, в отличие, например, от уравнений Максвелла для пустого пространства, являются *нелинейными*: «Истинные законы не могут быть линейными и не могут быть получены из линейных законов», — говорит Эйнштейн. Линейные законы приводят к принципу суперпозиции решений и не могут учитывать *взаимодействия* элементарных образований.

Общая теория относительности дает еще одно эвристическое правило. Сложные уравнения поля нельзя вывести непосредственно из эмпирических данных, не положив в основу анализа некоторые общие соображения о характере этих уравнений, предвосхищающие последующую эмпирическую проверку. В общей теории относительности вид уравнений соответствовал предварительной формальной схеме: переменные являются функциями четырех координат, и структура четырехмерного многообразия определяется симметричным тензором. К этим условиям прибавляется требование инвариантности по отношению к группе непрерывных координатных преобразований. Тогда уравнения гравитационного поля определяются практически однозначно.

Как можно подобным путем найти уравнения, описывающие единое поле? Его структура может выражаться некоторым обобщением симметричного тензора. Если при этом сохраняется та же группа непрерывных преобразований координат, то она уже не даст того жесткого определения уравнений поля, как в случае симметричного тензора. Поэтому мысль Эйнштейна первоначально была направлена на обобщение

преобразований, на переход к более широкой группе, включающей комплексные преобразования. Но эта попытка не была успешной. Эйнштейн хотел вслед за Калузой перейти от четырехмерного пространства-времени к многообразию большего числа измерений, но впоследствии отказался от этого пути и в конце концов остановился на другом решении. Он переходит от симметричного тензора g_{ik} к несимметричному, состоящему из симметричной и антисимметричной частей. Этот переход изложен в работах Эйнштейна по единой теории поля. К ним следует добавить некоторые замечания Эйнштейна, в которых выражена его оценка полученных результатов.

В 1942 г. Эйнштейн писал своему старому другу Гансу Мюзаму:

«Работаю я еще фанатичнее, чем раньше, и лелею надежду разрешить уже старую для меня проблему единого физического поля. Это напоминает воздушный корабль, на котором витаешь в небесах, но неясно представляешь себе, как опуститься на землю... Быть может, удастся дожить до лучшего времени и на мгновение увидеть нечто вроде обетованной земли...»¹.

Через два года Эйнштейн вновь писал Мюзаму:

«Быть может, мне суждено еще узнать, вправе ли я верить в свои уравнения. Это не более чем надежда, потому что каждый вариант

¹ Helle Zeit — dunkle Zeit. In Memoriam Albert Einstein. Hrsg. Carl Seelig. Zürich, Europa Verlag, 1956, S. 50—51.

связан с большими математическими трудностями. Я вам долго не писал, несмотря на муки совести и добрую волю, потому что математические мучения держат меня в безжалостных тисках»¹.

Неудовлетворенность Эйнштейна вытекала не столько из все возраставших собственно математических трудностей, сколько из сознания, что единая теория поля не может получить экспериментальной проверки. В 1950 г. в письме к Соловину Эйнштейн говорит:

«Единая теория поля теперь уже закончена. Но к ней трудно подойти метафизически, и, несмотря на весь затраченный труд, я не могу ее проверить каким-либо способом. Такое положение сохранится на долгие годы, тем более, что физики не воспринимают логических и философских аргументов»².

Но и для самого Эйнштейна возможность экспериментальной проверки теории была весьма существенным критерием для ее выбора.

Отсутствие эмпирической основы для единой теории поля было связано с характером развития физики в 30—50-е годы. В 1961 г. в статье «Замечания к эйнштейновскому наброску единой теории поля» Гейзенберг писал:

«Эта великолепная в своей основе попытка сначала, как будто, потерпела крах. В то самое время, когда Эйнштейн занимался проблемой единой теории поля, непрерывно открывались

¹ Helle Zeit — dunkle Zeit. In Memoriam Albert Einstein. S. 50—51.

² A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine, p. 75.

новые элементарные частицы, а с ними — сопоставленные им новые поля. Вследствие этого, для проведения эйнштейновской программы еще не существовало твердой эмпирической основы, и попытка Эйнштейна не привела к каким-либо убедительным результатам»¹.

Сейчас положение изменилось. Никто в настоящее время не станет возражать против принципиальной возможности единой теории элементарных частиц, как и против утверждения о том, что такая теория будет единой теорией полей, которым соответствуют частицы различных типов. Взаимодействие этих частиц и соответственно полей, превращения частиц, ультрарелятивистские эффекты становятся исходными понятиями научной картины мира. Но нас здесь интересуют выявившиеся в связи с таким преобразованием картины мира новые стороны теории относительности Эйнштейна, новый смысл его работ.

Первоначально теория относительности представлялась обобщением классической механики, очищением «классического идеала» от противоречащих ему понятий мгновенного дальнего действия (специальная теория) и выделения инерциальных систем (общая теория). В генезисе общей теории относительности существенную роль играл принцип Маха: все процессы объясняются движением частиц, которое в свою очередь объясняется их взаимодействием. Последовательное проведение поле-

¹ В сб. «Эйнштейн и развитие физико-математической мысли». М., 1962, стр. 63.

вой точки зрения вывело теорию относительности за пределы этого представления и заставило Эйнштейна лишить принцип Маха его универсального характера. В автобиографии 1949 г. Эйнштейн писал:

«По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля»¹.

Выход теории относительности за пределы принципа Маха и, более того, за пределы «классического идеала» был результатом как внутренней логики развития теории, так и развития квантовой физики, учения о квантованных полях и их взаимодействиях, т. е. линии, которая до определенного этапа шла параллельно «классической» теории относительности.

В заключение хотелось бы подчеркнуть еще раз, что мировоззрение Эйнштейна указывает путь к единой теории как синтезу релятивистских и квантовых идей.

Чтобы конкретнее иллюстрировать это, по-видимому, бесспорное, но крайне общее положение, нужно перейти к менее достоверным

¹ Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 80.

оценкам; в области прогнозов существует своеобразное соотношение дополнительности между достоверностью и конкретностью: чем определеннее прогноз, тем он менее достоверен по своему содержанию. Можно, например, предположить, что в микроскопических масштабах пространство-время дискретно. Такое предположение позволило бы устранить весьма тяжелые затруднения современной физики. Но его трудно согласовать с теорией относительности: в клетках дискретного пространства-времени трудно представить себе процессы, подчиненные релятивистской причинности, трудно говорить о событиях, связанных взаимодействиями, распространяющимися со скоростью, не превышающей скорости света. Между тем теория ультрамикроскопических процессов должна с переходом к большим масштабам приводить к релятивистской причинности, к соотношениям теории относительности Эйнштейна. И тут вспоминается замечание Эйнштейна, приведенное в начале этого очерка: теорию относительности нельзя считать завершенной, пока поведение масштабов и часов, т. е. метрика четырехмерного мира, не выведено из более общих закономерностей бытия. Весьма перспективными кажутся направления современной физической мысли, которые стремятся вывести релятивистскую причинность из дискретной структуры пространства-времени и, таким образом, получить картину мира, обладающую и «внешним оправданием» и «внутренним совершенством». Во всяком случае, нельзя согласиться со словами И. Е. Тамма:

«Никто не может, конечно, предсказать,

каким будет дальнейшее развитие физики, но одно, мне кажется, можно утверждать с несомненностью — идеи Эйнштейна, его анализ понятий пространства и времени и взаимосвязи пространственно-временных соотношений с находящейся в пространстве и времени материей могут претерпеть в дальнейшем глубокие изменения, но именно они несомненно послужат отправной точкой целой исторической эпохи дальнейшего развития физики»¹.

Эта эпоха более радикального, чем в первой половине столетия, отхода от классической физики модифицирует, быть может, идеи Эйнштейна (сохранив их полностью для определенных масштабов и областей), но она не сойдет с пути, на который теоретическая мысль встала после Эйнштейна: она не откажется от критериев «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства», она будет искать в природе ее объективную каузальную гармонию, она будет находить для математических понятий их реальные, физические эквиваленты, она не остановится ни на одном рубеже и будет продолжать поиски все более точного отображения действительности.

¹ И. Е. Тамм. Эйнштейн и современная физика. Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 10.

Заметки об Эпикуре и Лукреции, Галилее и Ариосто, Эйнштейне и Достоевском

1. Эпикур и Лукреций. 2. Галилей и Ариосто. 3. Эйнштейн и Достоевский. 4. Историко-культурные инварианты.

1

Если бы поэзия передавала науке свои умозаключения, она бы лишила науку достоверности; если бы наука отдавала поэзии свое позитивное содержание, свои выводы, поэзия теряла бы при этом свою проникающую силу, трансформирующую стиль интеллектуальной и эмоциональной жизни человечества. В действительности поэзия дает науке не элементы знания, а импульсы, зависящие не столько от представлений поэта о мире, сколько от особенностей его художест-

венного творчества. Непосредственный эффект влияния поэзии (она здесь представляет искусство в целом) на науку — не научные концепции, а подход ученого к миру, не содержание научной теории, а черты научного темперамента. Наука соответственно служит для поэзии не складом тем для дидактического изложения, а источником импульсов, причем таким источником служат не столько позитивные результаты, сколько стихия поисков, апорий, нерешенных проблем — драматическая и наиболее эмоциональная сторона науки. Такого рода взаимодействие не может быть явным; в нем существенную роль играет интуиция. Поэтому и анализ подобного взаимодействия не может претендовать на исчерпывающую однозначность.

Существует классический во многих смыслах пример связи между наукой и поэзией, который говорит на первый взгляд о другом.

Поэма Лукреция «О природе вещей» многим казалась, да и сейчас кажется, каноническим изложением позитивных концепций Эпикура. В свою очередь ее влияние на науку иллюстрируется множеством заимствований из текста поэмы, вышедших непосредственно или через опосредствующие звенья в содержание научных трактатов средневековья и Возрождения. Можно показать, однако, что поэма Лукреция была не столько рифмованным изложением результатов Эпикура, сколько поэтическим обобщением живых апорий античной атомистики. Можно также показать, что для наиболее близких по духу мыслителей поэма Лукреция была источником не сведений о природе, а импульсов для поисков новых сведений.

Остановимся сначала на идеях Эпикура, а потом перейдем к Лукрецию.

Идеал Эпикура — жизнь, свободная от страданий. Главная причина страданий — вера в богов. Счастье достигается освобождением от религии. Такому освобождению служит атомистическая система мира. Эпикур утверждал, что сам он достиг спокойной и радостной гармонии духа. Накануне смерти, уже чувствуя ее приближение, он начал письмо Идоменею словами: «В этот счастливый и, вместе с тем, последний день моей жизни пишу вам следующее...» Затем речь идет о болезни и тяжелых физических страданиях. «Но всему этому противоборствует душевная радость при воспоминании бывших у нас расстройств»¹.

Существует легенда о Демокрите, который ослепил себя, чтобы чувственные впечатления не мешали абстрактному мышлению. Маркс в своей юношеской диссертации о натурфилософии Демокрита и Эпикура говорит: «В то время, наконец, как Демокрит, отчаявшись в знаниях, ослепляет себя, Эпикур, чувствуя приближение смерти, входит в теплую ванну, требует чистого вина и рекомендует своим друзьям остаться верными философии»².

Демокрит разработал весьма цельную концепцию природы, пользуясь понятиями «бытия» — гомогенного вещества и «небытия» —

¹ Лукреций. О природе вещей, т. II. Фрагменты Эпикура. М., 1947, стр. 635.

² К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. I, М., 1926, стр. 36.

пустоты. Многокрасочность чувственного мира должна была стать феноменологическим занавесом, через который просвечивают движения частиц, отличающихся лишь величиной и формой. Вместе с тем Демокрит чувствовал затруднения и противоречия замкнутой системы мироздания. Как и другие мыслители древней Греции, Демокрит включал в свои натурфилософские построения то динамическое, обращенное в будущее ощущение незаконченности своей системы, то гениальное предвосхищение принципиально иных закономерностей, которое так характерно для подлинной, не высушенной последующей канонизацией античной мысли.

Для Эпикура антидогматическое предвосхищение границ данных закономерностей и возможности иных закономерностей было необходимой основой моральных выводов философии, т. е. главной цели его учения. Для Эпикура счастье человека невозможно без свободы. Но полная обусловленность движений частиц привела бы к естественнонаучному фатализму, т. е. к тому, что через две тысячи лет с лишним после Эпикура было отождествлено с «кисметом» восточных религий¹. Фаталистическая детерминированность природы кажется Эпикуру худшей модификацией традиционной религии. «В самом деле, — говорит Эпикур в письме к Менекию, — лучше было бы следовать мифу о богах, чем быть рабом физиков (естествоиспы-

¹ См. Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1941, стр. 175.

тателей), миф дает намек на надежду умиловления богов посредством почитания их, а судьба заключает в себе неумолимую необходимость»¹.

И вот на сцене появляются знаменитые *clinamen* — микроскопические спонтанные отклонения частиц от прямолинейных траекторий. Эта идея пробивает оболочку механического фатализма, и в образовавшуюся брешь входят понятия и образы, далекие от цельной и замкнутой механической картины мира. Далекие во времени. Тому, что отличало Эпикура от универсального механического понимания природы, предстояло в течение двух десятков веков дожидаться собственно физических эквивалентов.

Атомы Эпикура сталкиваются, и в краткие промежутки между столкновениями они обладают одной и той же постоянной скоростью. Такая концепция высказана в письме Эпикура Геродоту. Постоянная скорость имеет конечную, но очень большую величину. Эпикур приравнивает ее скорости мысли («...атом будет иметь движение с быстротой мысли...»). С подобной скоростью атомы движутся вниз под влиянием собственной тяжести и с той же скоростью — в стороны под влиянием толчков.

Таким образом, толчки изменяют не абсолютную скорость атомов, а только ее направление. Отсюда следует, что скорость атома в течение сравнительно большого интервала времени (т. е. на результирующей траектории) может

¹ Лукреций. О природе вещей, т. II, стр. 599.

иметь любое значение, в том числе нулевое, но всегда меньше, чем скорость на микроскопическом прямом отрезке между двумя соударениями и на составленной из таких отрезков пройденной атомом ломаной линии.

Движение атома на микроскопическом отрезке между соударениями или спонтанными отклонениями недоступно чувственному восприятию. Чувственным образом в принципе можно воспринять лишь результирующее смещение на сравнительно значительное, макроскопическое расстояние. Когда Эпикур говорил о фундаментальной скорости — постоянной скорости элементарных сдвигов (они были названы «кинемами»), как о скорости, равной скорости мысли, то речь шла не только и даже не столько о предполагаемой колоссальной скорости мыслительного процесса. Речь шла о предельной скорости, постигаемой мыслью и непостигаемой по своей величине непосредственным наблюдением.

Нам сейчас нетрудно понять, что результирующая макроскопическая скорость атома зависит от симметрии отдельных кинем. Если число кинем в одном направлении будет равно числу кинем в противоположном направлении, результирующая скорость окажется равной нулю. Если диссимметрия будет весьма значительной, результирующая скорость приблизится к максимальной скорости — скорости движения на микроскопических отрезках.

Поскольку отдельные кинемы, связанные со спонтанными отклонениями, носят случайный характер, речь должна идти о *вероятностях* тех или иных направлений. Если вероят-

ности кинем противоположного направления мало отличаются одна от другой, результирующий макроскопический сдвиг и результирующая макроскопическая скорость окажутся незначительными и, вообще говоря, они пропорциональны диссимметрии вероятностей. Подобного статистического представления о наблюдаемых движениях у Эпикура не было. Оно, быть может, сыграет некоторую роль в современных концепциях движения элементарных частиц. Но что важно для рассматриваемой здесь проблемы — это то, что Лукреций через два с лишним столетия после Эпикура, излагая и отчасти развивая идеи греческого мыслителя, сделал шаг в сторону подобной концепции макроскопического движения.

Об этом будет сказано немного позже, в связи с поэмой Лукреция. Возвращаясь к Эпикуру, следует подчеркнуть связь понятия кинем и постоянной максимальной скорости (*исотахию*) с концепцией дискретного пространства и времени.

Эпикур говорит о непрерывном времени, состоящем из недоступных восприятию интервалов, в течение которых происходят прямолинейные сдвиги атомов. Расстояния, проходимые атомами, соответственно делятся на дискретные элементы — расстояния, проходимые в течение минимальных интервалов времени. Но *наблюдаемое* время, так же как *наблюдаемое* пространство, непрерывно. Такая непрерывность зависит не только от того, что мы рассматриваем движение в течение сравнительно большого срока. Она возникает также в силу больших пространственных размеров

наблюдаемых тел. В макроскопическом, наблюдаемом мире мы видим тела, которые движутся в одном направлении, несмотря на беспорядочные движения составляющих эти тела атомов. «Даже в самый малый период непрерывного времени атомы в сложных телах несутся к одному месту». Иначе говоря, пока речь идет о чувственно-постигаемых пространственно-временных областях, случайные блуждания отдельных атомов остаются несущественными для наблюдаемой картины.

Какой своей стороной, благодаря каким особенностям концепция Эпикура кажется направленной в будущее?

Эпикур отнюдь не противопоставляет объективную картину дискретного движения субъективному впечатлению непрерывного движения тел с различными скоростями. Нет, обе эти картины имеют объективный характер, соответствуют объективной истине. «...Истинно только все то, что мы наблюдаем чувствами или воспринимаем умом путем постижения».

Из этой идеи, существенно опередившей механическое естествознание и близкой представлениям XIX—XX вв., следует существование объективного различия между закономерностями непрерывного и дискретного движения, а также существование объективной связи между теми и другими. Скорость и вообще течение непрерывного процесса связаны с течением дискретных процессов через понятия средних значений и вероятностей последних. Мы это знаем после Максвелла, Гиббса, Больцмана, после появления статистической физики и статистических теорий вообще. Было бы не-

правильно модернизировать взгляды Эпикура и приписывать ему статистико-вероятностную концепцию движения. Речь идет не о близости *ответов* Эпикура, т. е. его позитивных идей, к позитивным идеям современной науки. Речь идет о близости *вопросов* — противоречий, поисков, подходов, нерешенных проблем античной науки — к современным проблемам.

Именно эта обращенная в будущее, «вопросающая» сторона науки чаще и больше всего служит катализатором художественного творчества. Особенно в такие моменты, когда художественное творчество защищает свободу и разум человека от авторитарного принуждения.

В подобный исторический момент Лукреций изложил систему Эпикура в поэме «О природе вещей».

В I в. до н. э. римское общество пережило тяжелую полосу своей истории. Жестокая диктатура Суллы, кровавое подавление восстания Спартака, гражданская война, небывалое до того усиление правительственного произвола и с другой стороны, мистицизм, направленный против претензий разума. Религия и система мелочной религиозной регламентации воплощали обе эти тенденции. Общественная оппозиция тянулась к образцам свободной греческой мысли и хотела их видеть не только изложенными на родном языке, но и в художественной форме, адресованной не только уму, но и чувству.

И как всегда (или почти всегда), отражение коллизий сегодняшнего дня приводило к созданию бессмертных произведений, остаю-

щихся близкими людям всех последующих исторических эпох. Художественная литература отвечает на вопросы современников с такой широтой обобщения, что ее ответы сохраняют свое значение и тогда, когда о первоначальных вопросах давно забудут. А так как широта обобщения в какой-то мере пропорциональна общественному темпераменту художника (коэффициентом пропорциональности является его талант), то получается на первый взгляд противоречивое соотношение: злободневные интересы служат катализаторами подвигов гения, создающего вечные ценности. Для Лукреция, как и для многих других, характерна неявная связь запросов времени с содержанием творчества. В поэме «О природе вещей» нет прямых упоминаний об идейной атмосфере в Риме в I в. до н. э. Но нельзя сомневаться в том, что пропаганда эпикурейской натурфилософии была существенным элементом борьбы против авторитарного государства и мистических веяний. Только связи проходили очень глубоко: лишь в глубокой и по большей части неявной форме они вели к созданию вечных ценностей.

В начале своей поэмы Лукреций говорит об Эпикуре:

«В те времена, как у всех на глазах безобразно
влачила
Жизнь людей на земле под религии тягостным гнетом,
С областей неба главу являвшей, взирая оттуда
Ликом ужасным своим на смертных, поверженных
долу,
Эллин впервые один осмелился смертные взоры

Против нее обратись и отважился выступить против.
И ни молва о богах, ни молнии, ни рокотом грозным
Небо его запугать не могли, но, напротив, сильнее
Духа решимость его побуждали к тому, чтобы крепкий
Врат природы затвор он первый сломить устремился,
Силою духа живой одержал он победу, и вышел
Он далеко за пределы ограды огненной мира,
По безграничным пройдя своей мыслью и духом
пространствам»¹.

Трудно представить себе, чтобы картина религиозного гнета, как наихудшего несчастья человечества, была лишена в I в. до н. э. актуального подтекста. Но он остается подтекстом и, как полагается катализатору, не входит в результат процесса. Главное в этих начальных строках поэмы — пафос бесконечной природы. Для Лукреция границы мироздания («ограда огненная мира») играют роль границ науки. Ихто и сломал Эпикур. Природа бесконечна в пространстве и во времени. Пространство однородно, так же как и материя. Гомогенные, лишённые качественных различий атомы движутся в пустоте, не имеющей ни центра, ни границ. Время, в отличие от пространства, не имеет самостоятельного существования, одно мгновение отличается от другого новой пространственной конфигурацией тел. Кроме изменения этой конфигурации, в природе нет других процессов. Поэтому нет физического эквивалента времени самого по себе, физического процесса, протекающего только во времени. Иными словами, в

¹ Лукреций. О природе вещей, т. I, стр. 11.

природе нет процессов чисто качественных, происходящих в пространственной точке, не состоящих в пространственных смещениях.

Подобная чисто кинетическая картина движений изгоняет из природы мистические силы. Но Лукрецию, как и Эпикуру, мало такого освобождения человеческой мысли. Им нужно, чтобы сама картина мира не претендовала на догматическую законченность, не ограничивала функции разума простым восприятием и изложением окончательной истины. Именно эта антидогматическая сторона учения Эпикура вызывает у Лукреция особенный интерес и особенное сочувствие. Лукреций отказывается от абсолютной однозначности картины мира во всех ее деталях. Приводимые им объяснения явлений демонстрируют принципиальную возможность причинного истолкования природы, но последовательно развивающееся познание не может сразу отыскать однозначный механизм во всех случаях. В различных мирах бесконечной Вселенной могут действовать различные причины явлений.

Но неоднозначности причинных объяснений мало, чтобы спасти человека от власти догмата. Нужно, чтобы в самой природе сохранялась некоторая независимость явлений от чисто кинетической схемы толчков и космического падения атомов. Здесь на сцену и выходят *clinamen* — спонтанные отклонения атомов. Лукреция очень интересуется связью концепции *clinamen* с отказом от фатализма. Ограничение механической обусловленности в природе введено, чтобы человек

«...вынужден не был
Только сносить и терпеть и пред ней побежденный
склоняться,
Легкое служит к тому первичных начал отклоненье,
Но не в положенный срок и совсем не на месте
известном»¹.

Но *clinamen* вовсе не прагматическая идея. Она вытекает из несомненного объективного существования соударений атомов:

«Я бы желал, чтобы ты был осведомлен здесь точно
так же,
Что, уносясь, в пустоте, в направлении книзу отвесном,
Собственным весом, тела изначальные в некое время
В месте неведомом нам начинают слегка отклоняться,
Так что едва и назвать отклонением это возможно.
Если ж, как капли дождя, они вниз продолжали бы
падать,
Не отклоняясь ничуть на пути в пустоте необъятной,
То никаких бы ни встреч, ни толчков у начал не
рождались,
И ничего никогда породить не могла бы природа»².

У Лукреция встречается очень тонкая и интересная тенденция. Он видит связь между механическим фатализмом и догматическим ограничением научных понятий. Если все в природе предопределено с абсолютной точностью известной кинетической схемой, то нет смысла действовать: остается «только сносить и терпеть». Но в этом случае и в процессе позна-

¹ Лукреций. О природе вещей, т. I, стр. 89.

² Там же, стр. 85.

нпя нет смысла искать более сложные закономерности, можно ограничиться усвоением и применением для объяснения явлений уже известных понятий и схем.

Протест против фатализма сам по себе не может привести к познанию объективной истины, но он может толкнуть человека к познанию, сделать это познание настойчивым, не останавливающимся перед парадоксом, направленным на обнаружение принципиально новых закономерностей. Речь идет о стимулах познания. Содержание познанного не зависит от стимулов. Но от них зависит темперамент познания, скорость, с которой человеческий гений переходит от одной истины к другой, более точной истине. В этом смысле поэма Лукреция содержит нечто большее, чем атомистика Эпикура. Наряду с собственно научным обобщением той или иной концепции, т. е. перенесением ее на более общий класс понятий, соотношений и фактов, может существовать *поэтическое* обобщение научной теории. Подобно собственно научному обобщению, поэтическое обобщение отнюдь не тавтологично. Оно включает ряд идей, образов (в первую очередь именно образов) и понятий, которые, даже не раскрывая новых сторон действительности, служат стимулами для дальнейших поисков. Именно эту сторону, как мы вскоре увидим, ценил в античной поэзии Галилей. Поэтическое обобщение науки «работает» в этом смысле не столько на науку, сколько на историческое развитие науки, не на уровень знаний, а на производную по времени от уровня, на темп прироста, исторический градиент науки. В указанном отношении поэма Лукре-

ция оказала на науку трудно определимое, но несомненно огромное воздействие.

Если попытаться все же определить его и перечитать ссылки на Лукреция в средневековой и позднейшей научной литературе и отрывки, где запечатлелось влияние поэмы без ссылок на нее (таких отрывков было немало, в особенности во времена, когда имена Эпикура и Лукреция фактически были под запретом), то можно прийти к некоторым неожиданным выводам. Прежде всего, очень трудно разграничить воздействие того, что собственно принадлежит Лукрецию — новых, не имевшихся у Эпикура (или утерянных) образов, настроений и идей, — того, что было названо поэтическим *обобщением* эпикурейской натурфилософии, и того, что было у Эпикура и лишь изложено в поэме Лукреция, того, что можно назвать поэтическим *изложением* фрагментов греческого философа. Дело в том, что определенный психологический подтекст, определенные импульсы для научного творчества (они обладают помимо определенной интенсивности определенным направлением) сопутствуют не только новым образам, но и поэтическому изложению старых греческих фрагментов. Поэзия Лукреция конгениальна натурфилософии Эпикура не только своим содержанием, но и поэтическими средствами, поэтической формой. Шедевр римской поэзии не только чарует читателя звучностью и поразительной естественностью ритма. Классическая точность эпитетов, глубина и «многомерность» сравнений толкают мысль к тому идеалу ясности и определенности, который, например, в эпоху Ренессанса, был общим идеалом и механиков —

предшественников Галилея, и многих художественных и литературных школ.

Для Лукреция характерны и однозначная точность и в то же время красочность аналогий, с помощью которых он излагает концепцию Эпикура. Сочетание этих, казалось бы собственно литературных, качеств приводит к нетавтологичности изложения. Мы проиллюстрируем указанную связь лишь одним примером.

Из представления о постоянной величине скорости атомов (исотахия) вытекает следующее затруднение эпикурейской концепции. Атомы движутся с постоянной скоростью, видимые тела — с различными скоростями, в том числе с нулевой скоростью. Последний случай казался особенно трудным: атомы движутся, а видимое тело неподвижно. Абстрактно-логическое решение проблемы наталкивалось на отсутствие важных логических звеньев. Лукреций решает ее с помощью аналогии, которая поражает точностью, красочностью и «многомерностью»:

«Здесь не должно вызывать удивленья в тебе, что в то
время,

Как обретаются все в движении первоначала,
Их совокупность для нас пребывает в полнейшем
покое,

Если того не считать, что движется собственным телом,
Ибо лежит далеко за пределами нашего чувства
Вся природа начал. Поэтому, раз недоступны
Нашему зренью они, то от нас и движенья их скрыты.
Даже и то ведь, что мы способны увидеть, скрывает
Часто движенья свои на далеком от нас расстояньи:
Часто по склону холма густорунные овцы пасутся,
Медленно идя туда, куда их на пастбище тучном

дельных молекул) образуют макроскопически закономерные процессы.

Картина неподвижного или медленно движущегося стада и картина неподвижного поля боя были историческим antecedentом подобной классически-статистической концепции — статистической теории молекулярных систем. Но классической статистической механикой не ограничиваются позднейшие физические аналоги приведенных стихов Лукреция. Мы можем представить себе движение одной частицы как макроскопический результат случайных блужданий, происходящих всегда с одной и той же скоростью. Наблюдаемая макроскопическая скорость частицы может при этом принимать самые различные значения. Она зависит от симметрии вероятностей отдельных сдвигов, из которых складывается микроскопическая траектория частицы.

Мы еще вернемся к этой схеме. Здесь она должна только проиллюстрировать эвентуальную длительность ряда последующих исторических эквивалентов и модификаций тех идей, которые таятся в строках Лукреция.

Именно таятся. Мысль — и античная, и последующая, — сталкиваясь с образами поэмы Лукреция, извлекает из них то, что содержалось в потенции, а может быть, и не содержалось вовсе. Наука всегда находит больше того, что ищет и часто — больше того, чем содержалось в месте находки. В этом и состоит каталитическая функция проблем, вопросов, апорий, противоречий: ведь в результате реакции мы всегда получаем то, что не содержалось в катализаторе.

Идеи Эпикура оказывали каталитическое действие уже в древности. Приведем следующий пример, который нам пригодится и позже. В среде эпикурейцев зародилось представление о движении, как о ряде регенераций — исчезновений тела в одной клетке дискретного пространства-времени и возрождении его в соседней клетке.

Такое представление выводило атомистику за пределы механического представления: основным, элементарным понятием картины мира вместо непрерывного движения оказываются дискретные превращения частицы в одной клетке пространства в частицу, находящуюся в следующей клетке. Именно так может быть выражена современным языком мысль эпикурейцев, которую Александр Афродисийский излагал во II в. н. э.:

«Утверждая что и пространство, и движение, и время состоят из неделимых частиц, они утверждают также, что движущееся тело движется на всем протяжении пространства, состоящего из неделимых частей, а на каждой из входящих в него неделимых частей движения нет, а есть только результат движения».

Быть может, Александр Афродисийский через четыреста лет после Эпикура и через полтора века после Лукреция мог преувеличить определенность старой концепции. Но это и показывает, что концепция не только сохранилась, но и эволюционировала в сторону большей определенности.

У Лукреция уже была мысль о слиянии дискретных впечатлений от исчезающих и появляющихся образов в непрерывно движущийся образ:

«...Лишь первый исчез, как сейчас же в ином
положеньи
Новый родится за ним, а нам кажется,—двинулся
первый»¹.

Отметим теперь существенный для оценки поэмы Лукреция факт. Ее длительный, уходящий в века «каталитический» эффект тесно связан с характером поэтических средств Лукреция. По поводу сделанных только что сопоставлений можно было бы сказать, что речь идет об ассоциациях, возникших позже и не характерных для античной поэмы. Но возможность подобных ассоциаций вытекает из поэтики Лукреция.

Поэтика Лукреция раскрывает одну очень важную особенность в отношениях науки и поэзии и даже более общую особенность истории культуры. Она раскрывает существенность жанра для содержания, зависимость содержания от того, что называют формой, зависимость излагаемого от путей изложения, зависимость вина от формы мехов, взаимный характер зависимости между ними. Если бы Лукреций только изложил недошедшее до нас в целом произведение «О природе» или известные нам фрагменты Эпикура стихотворной речью, он бы не был поэтом. Но тем самым он не мог бы оказаться в своем творчестве конгениальным Эпикуру. Версификатор не может изложить ничего, кроме позитивных высказываний мыслителя, но ни один мыслитель не ограничивал

¹ Лукреций. О природе вещей, т. I, стр. 251.

свой вклад в культуру позитивными высказываниями; он сообщал культуре романтику первого взгляда на мир, романтику вопросов, поисков, отражение исследовательского темперамента. Все это может передать *поэтическая* (свойственная поэзии, отличающаяся от свойственных другим областям культуры) компоновка *поэтических* элементов. Она создает содержательное отличие поэтического произведения от исходной системы. Лессинг не считал Лукреция поэтом, потому что не видел содержательного эффекта его поэтики. «Размер и рифма,— писал Лессинг,— не превращают уложенную в них систему в поэзию»¹. Лессинг при поразительном по точности и тонкости понимании античной поэзии не мог уловить связанного с поэзией Лукреция отхода от системы Эпикура в сторону апорий и поисков; Лессинг был сыном времени, когда наука обращала внимание на позитивные системы. Нам легче увидеть, в чем состояло преобразование идей Эпикура, связанное с их *поэтическим* изложением.

Система Эпикура была системой логического выведения одних понятий из других, одних заключений из других. Она была системой силлогизмов. Силлогизмы, изложенные в стихотворной форме, были бы версификацией. Поэтическое отображение системы Эпикура превратило ее в систему образов. Эти образы чувственно-конкретные, почти такие же яркие, как реальные впечатления бытия, но упорядоченные и отчетливые, сплетаются в цепи и образуют образное, красочное представление о

¹ Lessings. Werke. V, Lpz. 1911, S. 459.

мире. При этом, как заметил один из наиболее тонких комментаторов Лукреция, теряется различие между наглядностью образа и логической доказательностью вывода².

Что отсюда следует? Во-первых, перенос центра тяжести из области моральных выводов в область описания природы. У Эпикура система природы представляет собой служебную конструкцию: она должна обосновать то настроение спокойной отрешенности от горя и страха смерти, которое Эпикур считал задачей своей философии. У Лукреция система природы, выведенная во всей ее многокрасочности из движения атомов, стала самостоятельной и, более того, основной частью поэмы.

Далее, система природы теряет свой законченный характер. Возьмем письмо Эпикура Геродоту с изложением основных принципов атомистической физики. В начале письма устанавливаются непротиворечивые исходные принципы и понятия — пространства, тел, движения, — с помощью которых логически конструируется картина мира. У Лукреция этого нет.

В основе лежат не какие-либо непротиворечивые логические понятия (эпикурова «каноника»), а зрительные образы. Поэтому и вся система приобретает незамкнутый характер. Следует подчеркнуть еще одно существенное отличие. Внимание Эпикура было приковано к логически построенной схеме движения ненаблюдаемых атомов. Мысль и воображение

² См. Я. М. Боровский. Поэтика доказательства у Лукреция. В кн.: Лукреций. О природе вещей, т. II, стр. 205.

Лукреция движутся по преимуществу в другой сфере — в сфере наглядных и, следовательно, макроскопических образов. Поэтому его особенно интересует связь невидимых процессов с видимыми, макроскопическими. Переходя от фрагментов Эпикура к поэме Лукреция, мы попадаем из мира атомов в мир, где эти атомы сгруппированы в камни, деревья, тела животных и человека, потоки воды, языки пламени, в красочный макроскопический мир.

2

Связь науки и поэзии напоминает связь электрического и магнитного полей. Статическое электрическое поле не возбуждает магнитного; последнее пропорционально производной электрической индукции по времени, т. е. скорости ее изменения; в свою очередь электрическое поле пропорционально скорости изменения магнитного потока. Наука как система позитивных представлений о мире имеет мало точек соприкосновения с поэзией. Напротив, наука как процесс, наука в ее развитии, наука как серия изменений в представлениях о мире, подобно переменному электрическому или магнитному полю, вызывает поле другого типа; развивающаяся наука вызывает поэтическую компоненту. В каждый момент в науке существуют элементы, зависящие от темпа ее развития и оказывающие преимущественное воздействие на возникновение эстетических ценностей. Это прежде всего научная интуиция. Чем быстрее развивается наука, чем в большей мере

эксперимент отстает от новых обобщений, или обобщение от эксперимента, или разработка нового логико-математического аппарата от обобщения и эксперимента, тем более заметную роль играет интуиция, заменяющая силлогизм ассоциациями, близостью образов и каталитическими воздействиями образа, настроения, эмоции на развитие другого ряда образов и ассоциаций.

Ни одна научная теория не достигла такой репутации, как классическая механика, в части однозначной строгости, исчерпывающей логической и экспериментальной законченности и полного изгнания интуитивных элементов. Тем не менее классическая механика давала импульсы поэзии и получала импульсы от последней. Потому что репутация была несколько преувеличенной. Интуитивные, связанные с образным мышлением, далеко не законченные построения легко найти у Ньютона, а у Галилея их даже не надо искать. К ним, к галилеевым построениям, мы и перейдем.

Концепция Галилея была направлена против эмпирической очевидности непосредственно наблюдаемого движения Солнца по небосводу. Она была направлена и против догматической «очевидности» геоцентризма. Последний был связан не только с канонизированными аргументами Аристотеля и Птолемея, но и с логической «очевидностью» перипатетической механики: движение без поддерживающей силы казалось алогичным, а без такого понятия нельзя было опровергнуть возражения против движения Земли.

Аристотелевская Вселенная была упорядоченной Вселенной. Основой гармонии мира была

схема неоднородного пространства с центром и границами. Центр мира, совпадающий с центром Земли, является естественным местом тяжелых тел, и к центру мира направлены естественные движения этих тел. Другие движения — насильственные, они прекращаются вместе с поддерживающими их физическими агентами. Такова статическая схема подлунного мира. Дальше, за пределами лунной сферы, вплоть до границ мирового пространства, движутся по круговым орбитам совершенные тела. Это — статическая гармония мироздания, она состоит прежде всего в неподвижной схеме естественных мест, на которые натянута абсолютное пространство.

Галилей выдвинул иную схему мировой гармонии, кинетической гармонии. Неизменное состояние Вселенной складывается из круговых движений небесных тел в однородном пространстве. О центре и границах этого пространства Галилей не говорил в сколько-нибудь определенной форме. Во всяком случае, не статическая схема естественных положений, а кинетическая схема равномерных движений планет вокруг Солнца, а также ускоренные, согласно единообразно действующему закону, движения тяжелых тел образуют объективное *ratio* мироздания. У Галилея не было решающих экспериментов для перехода к новой картине мира. Теория приливов, которую он считал наиболее убедительным доказательством суточного и орбитального движения Земли, была неправильной. Математический анализ появился позже на основе дальнейшего развития идей Галилея и его современников; поэтому концепция Гали-

лея не имела безупречного логико-математического аппарата. Вообще, классическая механика не приобрела у Галилея характера однозначной и строгой системы и в ней было много элементов интуиции, которые могли стать общим убеждением только при условии психологического перелома, появления новых интересов, нового отношения к природе, новых эмоций.

Л. Ольшки справедливо заметил, что произведения Галилея казались фрагментарными и бессистемными уже следующему поколению, в частности Декарту, потому что Галилей стремился к художественной, а не логической стройности¹. Каждое отступление — полемическое, автобиографическое, мемуарное — входило не только в цепь силлогизмов, но и в цепь психологических воздействий. Именно поэтому сочинения Галилея не стали образцом научной литературы, но стали образцом итальянской прозы и оказали первостепенное воздействие на стиль художественной литературы.

Отсюда — литературные симпатии Галилея. В его бумагах сохранились заметки об «Освобожденном Иерусалиме» Тассо с критикой архаических, по мнению Галилея, особенностей поэмы: обилия декоративных украшений, аллегорий, не связанных однозначно с содержанием, случайных эпитетов, создающих впечатление дисгармонии, прикрытой традиционными внешними приемами.

Галилею нравилась «макароническая» поэзия, пародии, стилизованные под крестьянский

¹ См. Л. Ольшки. История научной литературы на новых языках, т. III. М.—Л., 1933, стр. 85.

говор стихи Рущанте. В них никто не видел источника представлений о мире, но каждый чувствовал стихию «жизнерадостного свободо-мыслия», юмористической расправы с канонами, освобождения от чопорной власти традиций и авторитетов.

Что же касается классической поэзии, то Галилей требовал, чтобы в стихах греческих и римских поэтов не искали прямого или аллегорического объяснения явлений природы. Поэзия обладает не нормативно научной, а эстетической ценностью. Эта мысль повторяется у Галилея очень часто. Нельзя искать в стихах доказательств той или иной доктрины, их функция иная; они должны не формировать взгляды (источником последних служит эксперимент), а возбуждать в человеке стремления, образы, настроения, которые могут способствовать переходу к новым взглядам на мир.

Положительные художественно-литературные идеалы Галилея высказаны в «Postille ad Ariosto» — заметках на полях «Неистового Роланда». Характерно, что заметки относятся к метрике стихов (Галилей предлагает новые строки, лучше укладывающиеся в метрику), к лексике (замена банальных предикатов более выразительными) и к оценке отдельных песен «Неистового Роланда» с точки зрения общего замысла. Но в чем состоит общий замысел, определяющий однозначным образом лексику, жанровые особенности, характер образов, тон, в котором ведется рассказ о приключениях рыцарей и их дам? Сами рыцари и их подвиги не интересуют Галилея. Его интересует, как они описываются.

Это «как» и отличало поэзию Ариосто от средневековой поэзии, оно и было началом новой поэзии. Что касается содержания в тривиальном смысле, т. е. действующих лиц и их судеб, то «Неистовый Роланд» не отличается от средневековой поэзии. Каролингский эпос попал в Италию очень рано, и песни о легендарных битвах и турнирах рыцарей Карла Великого давно звучали к югу от Альп — сначала в Ломбардии, а потом и во всей Италии. В XV в. уже существовала традиция рыцарских поэм. Один из гуманистов второй половины XV в. Маттео Боярдо написал на феррарском наречии 69 песен «Влюбленного Роланда» — энциклопедию средневековой фантастики и героики. Берни перевел эту поэму на тосканское наречие, а Ариосто в 1503 г. принялся за продолжение эпопеи о Роланде. В поэме рассказывается о любви Роланда к красавице Анжелике и другого рыцаря, Рожера, к другой красавице — Брадаманте. Любовные переживания, ревность, отчаяние, преграды и их преодоление переплетены с перипетиями войны Карла Великого против сарацинов и с множеством фантастических приключений. Рассказ переходит от одного героя к другому; затем в повествование входит вставной эпизод; потом автор возвращается к покинутому герою, чтобы снова его бросить; на сцене непрерывно действуют волшебники, феи, духи, великаны, карлики, призраки, магические кольца, шлемы, мечи и прочий реквизит средневековой фантастики; герои превращаются из чего угодно во что угодно, переносятся в другие страны всеми способами, доступными воображению сред-

вековья; мечи стучат почти непрерывно, и рыцари — каждый идеал мужества и силы — почти непрерывно спасают идеальных красавиц из-под власти чудовищ.

Неужели это традиционное содержание заставило Ариосто в течение десятилетий оттачивать октавы своей поэмы, а Галилея продолжить его работу? Неужели средневековые идеалы определили ту однозначную функцию каждой песни, эпизода, образа, строки и слова, к которой стремился Ариосто и которая была важнейшим эстетическим требованием Галилея?

Разумеется, нет. Поэты и мыслители Возрождения не могли серьезно относиться к средневековой героике, романтике и фантастике. Уже Боярдо и Берни, по существу, смеялись над своими средневековыми героями и их средневековыми чувствами. О Боярдо и Берни давно было сказано: это Возрождение, которое смеется над средневековьем. У Ариосто смех приобрел звучание, свойственное гению, и это было началом новой поэзии. Смех стал мягче: Ариосто собственно не смеется, а улыбается. Время уже не требовало сатиры: средневековье не было живым и опасным противником, оно стало подопытным материалом, на котором можно было показать характерные позитивные особенности новой культуры, новой поэзии и, что важно подчеркнуть, новой науки. Ариосто далеко ушел от юмора Боярдо и Берни; его улыбка так относится к смеху предшественников, как улыбка Джоконды к сатирической живописи, как игривая шутка Моцарта к юмористически-пародийному звукоподража-

нию. Обаяние Ариосто — в мягкости его юмора, а главное — в позитивной демонстрации нового стиля мышления.

Читателя поражала, да и сейчас поражает, свободная и естественная гармония, которую автор так непринужденно вносит в хаос рыцарских приключений. Композиция поэмы всегда будет вызывать восторг. Ариосто распутывает самые запутанные клубки интриги, связывает нити, казавшиеся навсегда разорванными, вводит неожиданные реалистические детали, чтобы связать фантастические линии, и все это — с такой легкостью, которая была результатом многолетнего труда, а кажется легкостью экспромта. Мы еще встретимся с таким же стилем поисков гармонии в науке позднейшего периода, когда Галилей с чарующей естественностью находит порядок и связь в хаосе планетных движений.

Особенности композиции, жанра, образов, лексики можно было бы отнести к форме поэтики Ариосто, если бы Гёте в своем ответе Альбрехту фон Галлеру не высмеял филистерское представление о природе, созданной на манер ореха, и если бы все области науки не подтверждали сотни раз представление о содержательной форме. В данном случае, как и в некоторых других, действительное содержание поэтики, инвариантное при обобщении на другие области культуры, существенное для культурного прогресса в целом, заключалось не в приключениях и стремлениях героев, а в отношении автора к его героям.

Такое отношение действует не через нормативные требования, отнюдь не явным пере-

носом каких-либо принципов из поэзии в науку. Влияние Ариосто на Галилея было сильным именно потому, что оно не было явным. Основным и исходным принципом физических концепций Галилея был рационализм. Но рационализм чрезвычайно пластичный и — еще одно отличие от позднейшего периода — красочный. Такой рационализм не мог вырастать из абстрактно-философских концепций. Он мог найти питательную почву в литературно-рационалистических тенденциях Возрождения. Переход от Возрождения к XVII столетию был, в частности, переходом от одного господствующего жанра рационализма к другому жанру. От рационалистических тенденций в живописи и в поэзии к рационалистической науке и, наконец, к рационализму, как к более или менее последовательному и разработанному философскому направлению. Галилей не читал философов-рационалистов хотя бы потому, что их не было среди известных ему мыслителей предшествующего поколения и среди его сверстников и старших современников. Они появились среди учеников Галилея, и в целом рационализм XVII в. исторически и логически был обобщением идей Галилея. Но если бы внимание Галилея было привлечено к строкам какого-либо раннего провозвестника рационалистической мысли, достигшим характерной для будущего обобщенной и строгой формы, то эти строки вряд ли могли бы повлиять на стиль и содержание «Диалога» и «Бесед».

Среди предшественников Галилея были представители абстрактно-логической литературы, в значительной мере предвосхищавшей ра-

ционалистическую мысль XVII—XVIII вв. К ним относились механики XVI в., продолжавшие традицию номиналистов XIV—XV вв. Но Галилей, во многом следовавший этой традиции, изменил стиль научного мышления и ввел принципиально новые понятия, соединив понятия номиналистов и механиков XVI в. с *образами*, выросшими на новой исторической почве. Напомним, что чисто логические конструкции XIV—XVI вв. были заменены мысленными экспериментами, иногда переходившими в реальные эксперименты, а иногда излагавшимися как мысленные, но в чрезвычайно яркой, предметной, чувственной форме. Когда идея относительности движения, возникавшая как чисто логическая в науке Возрождения, была высказана в виде конкретной картины событий, происходящих в каюте весьма конкретного корабля в лагуне Венеции, когда сложение движений иллюстрировалось картиной адриатического прилива, строки Галилея не только воздействовали на стиль итальянской художественной прозы, сообщая ей в XVII в. однозначность, точность и изящество. Они вместе с тем демонстрировали зависимость новых научных конструкций и аргументов от итальянской поэзии XVI в.

3

Почему Эйнштейн говорил о Достоевском: «Он дает мне больше, чем любой мыслитель, больше чем Гаусс»? Что мог дать Достоевский создателю теории относительности?

Разумеется, не свои собственные философские, моральные и общественные идеи. Разумеется, не философские, моральные и общественные идеи, которые Достоевский вложил в сознание и в уста своих героев. Подобно Галилею, Эйнштейн черпал в художественной литературе не элементы научного мировоззрения, а импульсы для поисков. Влияние художественного творчества на научное творчество зависело в обоих случаях не от обобщения позитивных ответов, а от эстетического обобщения вопросов и апорий старой картины мира, от интенсивности художественного осознания противоречивости и бесконечной сложности мироздания. Подобное осознание превращает апории старой науки в импульсы для новой науки. Сила этих импульсов, их историческая ценность объясняются тем, что они вырастают из художественного, а не логического осознания, обладают не логическим, а психологическим эффектом.

Психологические корни и психологический эффект теории относительности связаны прежде всего с непреложной убедительной демонстрацией парадоксальности бытия. Теория относительности произвела сильное впечатление на широкие круги и изменила характер научного мышления эпохи потому, что она показала достоверность парадокса. Парадоксальной и в то же время совершенно достоверной представляется специальная теория относительности — идея неизменной в различных инерциальных системах скорости света. Парадоксальна общая теория относительности, приписавшая реальный физический смысл парадоксам

неэвклидовой геометрии. • Существенное значение для характера научного мышления в XX столетии имели попытки построения единой теории поля, рациональной схемы мировой гармонии, схемы, придающей физический смысл геометрическим соотношениям, еще более парадоксальным, еще более далеким от традиционных. Эти попытки Эйнштейна остались в позитивном плане безуспешными, ему не удалось получить выводы, допускающие однозначную экспериментальную проверку, и обобщенные геометрические схемы не обрели, таким образом, физической содержательности. Однако нерешенная задача построения единой теории поля была важным элементом наследства, полученного второй половиной XX столетия от его первой половины.

В науке долги являются ценной частью наследства. В проблеме отношения научного творчества к художественному они нас особенно интересуют. Научные замыслы, приведшие к позитивным результатам, быстро теряют субъективную окраску. Эйнштейн говорил, что ученый с трудом может рассказать о своем творчестве: собственные идеи кажутся ему простой записью объективных фактов. Идеи, не получившие однозначного и строгого воплощения, чаще сохраняют психологическую окраску.

Если бы когда-нибудь была написана история в наибольшей степени эмоционально окрашенных научных идей, то такая история почти полностью состояла бы из идей, обращенных каждый раз в будущее. Именно они и находятся в наиболее интенсивном взаимодействии с

идеями и методами художественного творчества.

Попытаемся провести некоторые параллели между научным творчеством Эйнштейна и художественным творчеством Достоевского.

Каждый роман, повесть, каждый отрывок Достоевского представляют собой полифоническую систему, множество голосов, которые не подавляются голосом автора¹. Может быть, этот полифонизм, эту множественность голосов, выражающую множественность идей и мировоззрений, следует ассоциировать с множественностью систем отсчета? Нет, это была бы не только весьма внешняя, но и по существу неправильная ассоциация. Она приближала бы нас к концепции «заимствования идей», концепции, вообще бесплодной при анализе связи художественного и научного творчества и особенно неправдоподобной, когда речь идет о Достоевском и Эйнштейне. Мы подойдем ближе к действительно вероятным связям, если обратим внимание на отмеченную уже характерную для Эйнштейна идею инвариантных физических соотношений. Системы отсчета равноправны, потому что существуют физические закономерности и соответственно физические соотношения, которые сохраняют свою справедливость при переходе из одной системы отсчета в другую, потому что не только законы механики (это знали Галилей и Ньютон), но и законы электродинамики сохраняют свою форму при переходе из одной

¹ См. М. Бахтин. Проблемы поэтики Достоевского. Изд. 2. М., «Советский писатель», 1963.

системы отсчета в другую, движущуюся равномерно и прямолинейно относительно первой. Это — инвариантные соотношения, инвариантные по отношению к преобразованию инерциальных систем отсчета.

В произведениях Достоевского мы встречаем свои «инварианты». Это отнюдь не идеи его героев. Достоевский переходит от идей Раскольникова к идеям Ставрогина, к идеям Ивана Карамазова. Инвариантом таких переходов служат некоторые психологические особенности героев Достоевского, не идеи, а отношение к идеям, не идеология, а психология. Инвариантами являются и способы, которыми раскрывается душевный мир героев, — то, что принадлежит не героям, а писателю, то, что можно назвать поэтикой Достоевского.

Для всех героев Достоевского характерна абсолютная поглощаемость идеями, какова бы она ни была. Вот идет беседа старца Зосимы с Иваном Карамазовым. Зосима видит, что его собеседник отрицает христианство, отрицает бессмертие души, отрицает бога. Но отрицает не окончательно, сомневаясь, мучась. И он говорит об Иване Карамазове: «...сердце высшее, способное такую мукой мучиться»¹. Алеша говорит о том же: «В нем мысль великая и неразрешенная. Он из тех, которым не надобно миллионов, а надобно мысль разрешить»².

Независимо от проблемы — религиозной,

¹ Ф. М. Достоевский. Собр. соч. в десяти томах, т. IX. М., Гослитиздат, 1958, стр. 92.

² Там же, стр. 105.

моральной, философской, независимо от исходных позиций, от уровня знаний, от среды, традиций, моральных принципов герои Достоевского одержимы такой страстью познания и решения, перед которой блекнет все, которая заставляет их совершать подвиги и подлости и превращает романы Достоевского в авантурные (а когда речь идет о преступлениях во имя того же познания — в детективные) романы. Произведения Достоевского полны действия, но в сущности это действие — эксперимент, по большей части страшный, жестокий эксперимент. Вот Раскольников рассказывает Соне о своем преступлении: «Мне другое надо было узнать, другое толкало меня под руки: мне надо было узнать тогда, и поскорей узнать, вошь ли я, как все, или человек? Смогу ли я переступить или не смогу. Осмелюсь ли нагнуться и взять или нет? Тварь ли я дрожащая или *право* имею...»¹

Раскольников не воспользовался ценностями убитой старухи. Он получил ответ — отрицательный ответ — на вопрос «смогу ли переступить», и это было концом. Таковы и другие. Они не убивают, они трудятся с невероятным, нечеловеческим упорством, они проявляют чудеса самопожертвования. Но всегда это нечто невероятное, нечеловеческое или слишком человеческое, почти всегда на краю гибели, безумия, преступления, иногда за этим краем. И всегда во имя познания, проверки, решения. И здесь, именно здесь, общие свойства героев, идущих на всё для познания, смыкаются с осо-

¹ Ф. М. Достоевский. Собр. соч. в десяти томах, т. V. М., Гослитиздат, 1957, стр. 438.

бенностями гения автора, выражают эти особенности. Это он, автор ставит своих героев в условия жестокого эксперимента, сжимает их жизнь в одно критическое мгновение, освобождает от всего личного, житейского, повседневного, от всех случайных с точки зрения познавательной задачи воздействий. И вот в экспериментальных условиях сверхвысокого вакуума, сверхвысокого напряжения, скорости, давления, в мгновения, отделяющие от самоубийства, убийства или сумасшествия в фантастических ситуациях, во сне, в бреду, люди, ставшие носителями самых общих моральных и космических проблем, раскрывают себя и вместе с собой — содержание искомых решений.

Достоевский писал об Эдгаре По: «Он почти всегда берет самую исключительную действительность, ставит своего героя в самое исключительное внешнее или психологичное положение, и с какою силою пронизательности, с какою поражающей верностью рассказывает он о состоянии души этого человека»¹. То, что Достоевский ценил у Эдгара По, было свойственно ему самому в колоссальной мере. Самые фантастические ситуации в рассказах По кажутся обыденными по сравнению с теми мгновениями, когда в наигрательнейшей камерке где-нибудь вблизи Обводного канала или в провинциальном трактире, под стук бильiardных шаров и хлопанье пивных пробок, мысль человека, стоящего на краю безумия, мучительно

¹ Ф. М. Достоевский. Полное собрание художественных произведений, т. XIII. М.—Л., Госиздат, 1930, стр. 523.

бьется над проблемами, охватывающими все мироздание, всю историю космоса, весь его смысл, всю его гармонию и дисгармонию, когда кажется, что в этой обстановке вот-вот будут решены самые коренные проблемы, и наиреальнейшая обстановка начинает просвечивать, и через нее становятся видными космические коллизии. Именно в этих коллизиях, в поисках истины, в жажде узнать, проверить, решить, — оправдание и смысл стремительных сюжетных поворотов, нечеловеческих мучений, самых неожиданных мечтаний больной души героя. И именно познавательная, экспериментальная задача сообщает романам Достоевского своеобразную мелодичность. Какими бы неожиданными, резкими и парадоксальными ни были повороты событий, поступки, реплики, каждый раз, когда поворот определился, поступок совершен, реплика брошена, у нас возникает ощущение их однозначной необходимости. Необходимости для решения задачи: моральной, философской, психологической. Мелодичность и достоверность самых резких диссонансов, самых фантастических ситуаций характерна для любого произведения Достоевского. Достоевский — художник *достоверного парадокса*.

Подчеркнем одну характерную черту «жесточкого экспериментирования» Достоевского. Герои Достоевского не стремятся к последовательному накоплению экспериментальных доказательств своих идей. Эксперимент Достоевского — это *experimentum crucis*. Когда Раскольников убивает старуху, когда Иван Карамазов уезжает в Чермашню, отдавая жизнь отца в руки Смердякова, перед нами в каждом

случае не один из экспериментов, а один единственный, решающий. Поэтому Достоевскому чужд классический роман с развитием личности, с эволюцией душевного мира героя. Все сконцентрировано в решающей сцене, и кажется, что на этой сцене прозвучит ответ на извечный моральный и философский вопрос.

Перечисленные особенности художественного творчества очень далеки от науки. Они далеки по содержанию проблем, по содержанию вопросов и ответов и, разумеется, по содержанию эксперимента. Но они близки по отношению мыслителя к эксперименту, по смелости, с которой он идет на самый крайний, жестокий, парадоксальный эксперимент, по темпераменту познания, по стремлению к *experimentum crucis*, по выталкиванию из сознания всего случайного, повседневного, не связанного с решением космической проблемы. Эта сторона дела и является общей для всех героев Достоевского при всем различии в содержании их идей. Здесь выражена не характеристика каждого героя, а их общая фамильная черта — особенность их автора. Если полифонизм характерен для идей, высказываемых в романах Достоевского, если голос автора не доминирует идеологически над голосами героев, то в части отношения к эксперименту и познанию, в части поглощения сознания и единственности эксперимента, творчество Достоевского не диалог, а монолог. Недаром его герои говорят одним языком, принадлежат все — и злодеи и праведники — к одному и тому же типу одержимых идей, одержимых проблемой. Отношение к «жесткому эксперименту» — инвариант перехода от одного героя

к другому. И это отношение остается инвариантом более общего преобразования — перехода от художественного творчества к научному. Разумеется, *mutatis mutandis*: ученый, поглощенный естественнонаучной проблемой, забывает о своем существовании, в то время как герой Достоевского себя забыть не может хотя бы потому, что он экспериментирует на себе. Но, отметив все «*mutandis*», мы начинаем видеть общее, инвариантное. Ограничимся пока следующим. Стягивание проблемы в программу *experimentum crucis* было весьма характерно для Эйнштейна. Когда Эйнштейн стремился сделать все выводы из результатов опыта Майкельсона — изменить представление о пространстве, времени, движении, он мало заботился о повторении опыта, о накоплении эмпирического материала, подтверждающего неизменность скорости света и вообще инвариантность электродинамических соотношений и движущихся инерциальных системах.

Здесь мы видим помимо сходства и глубокое различие между моральным экспериментом Достоевского и научным экспериментом. В первом неудача приводит к тяжелому кризису, чаще всего к гибели подопытного героя. Во втором случае всякий достоверный результат — победа ученого, приближающая его к объективной истине. Разочарования в науке (даже такие трагические, как у Лоренца, жалевшего, что он не умер до краха классических устоев физики) не могут приобретать остроту морально-психологических катастроф в романах Достоевского. Но они бывают очень острыми, тяжелыми, даже трагическими. Так же как сомне-

ния в достижимости научных идеалов, сомнения в своих силах, в способности решить поставленную проблему.

Идеалы ученого, проблемы, которые он перед собой ставит, контуры решений, которые он ищет, могут приближаться и по существу к идеалам художника. Отношение к эксперименту, единственность решающего эксперимента, одержимость экспериментом не единственные инварианты того преобразования, которое мы могли бы условно назвать «преобразованием от Достоевского к Эйнштейну». Чего ищет Достоевский в мироздании и в человеке? Творчество Достоевского — трагические поиски гармонии. Он видит, что гармония мира не может быть простой, по выражению Ивана Карамазова «эвклидовой». В разговоре с Алешей Иван Карамазов говорит об универсальной гармонии «неэвклидова бытия». Он говорит: «...я убежден как младенец, что страдания заживут и сгладятся, что весь обидный комизм человеческих противоречий исчезнет как жалкий мираж, как гнусненькое измышление малосильного и маленького, как атом человеческого эвклидовского ума, что, наконец, в мировом финале, в момент высшей гармонии, случится и явится нечто до того драгоценное, что хватит его на все сердца, на утоление всех негодований, на искупление всех злодейств людей, всей пролитой ими их крови»¹.

Можно, по-видимому, не останавливаться на прямом сближении «неэвклидова мира» До-

¹ Ф. М. Достоевский. Собр. соч. в десяти томах. Т. IX. М., Гослитиздат, 1958, стр. 295—296.

стоевского и неэвклидова мира общей теории относительности, каждому понятно, что «неэвклидов мир» — это весьма общий символ парадоксальной гармонии бытия. Может быть, физика перейдет от неэвклидовой (римановой) геометрии мира к еще более общей и более парадоксальной геометрии, может быть, она перейдет к принципиально негеометризуемым понятиям — все равно ей будет близок порыв к неограниченно парадоксальной гармонии бытия, прозвучавший не только в реплике Ивана Карамазова, но и во всем творчестве Достоевского в целом.

Теперь начинается расхождение. Иван Карамазов не приемлет неэвклидовой гармонии: «Пусть даже параллельные линии сойдутся и я это сам увижу: увижу и скажу, что сошлись, а все-таки не приму». Достоевский стремится уйти от сомнений, которые «совершенно несвойственны уму, созданному с понятием лишь о трех измерениях». Но он тянется к неэвклидовой гармонии, и жажда гармонии воздействует на читателя независимо от остановившегося на дороге мыслителя. Остановился мыслитель.

Художник идет дальше и увлекает за собой по бесконечной дороге последовательного усложнения картины мира, по дороге, где каждый новый поворот кажется парадоксальным и в общем смысле «неэвклидовым» по сравнению с предыдущим направлением.

Есть еще одна линия, сближающая Достоевского и Эйнштейна. Достоевский интересовался моральными, Эйнштейн — физическими вопросами. Первый из них был поглощен про-

блемами долженствования, второй — бытия. Но проблема должного решалась в творчестве Достоевского на основе проблемы сущего: основой для выбора поведения человека служит решение проблемы бытия, а еще чаще само поведение человека и его отношение к моральным ценностям («перешагну или не перешагну?») является орудием познания.

У Эйнштейна решение физических вопросов приводит к моральным проблемам. Как повлияют выводы науки на жизнь людей? В чем моральный долг ученого? Искушает ли прогресс науки гибель людей в Хиросиме? Каковы условия гармонии научного прогресса и безопасности и счастья людей? Подобные вопросы стали уделом современного ученого, иногда источником его трагедии, иногда источником интеллектуального и морального воскресения. Эйнштейн почувствовал настоятельность этих вопросов раньше других.

Творчество Достоевского — особенно «Братья Карамазовы» — интересовало Эйнштейна со стороны этических проблем. Он говорил об этом И. Г. Эренбургу в 1947 г. Эйнштейн видел в «Братьях Карамазовых» демонстрацию бесконечной сложности этических проблем. Но они должны решаться разумом. Этика Эйнштейна — рационалистическая этика.

Достоевский, опутанный очень густой и прочной сетью социальных и национальных предрассудков и антиинтеллектуалистических тенденций, *рвался* к рационалистической этике. Именно к рационалистической. Достоевский-мыслитель не мог и не стремился вырваться из сетей иррационального. Достоевский-

художник не мог вырваться из них до конца, но как он стремился вырваться!

Моральные решения вытекают из напряженной логической работы мысли и служат ее орудием. Как близок этот круг идей (и, в первую очередь, эмоций и образов — того, что кристаллизуется в художественном произведении) ученому, мыслям ученого о его моральном долге, о коллизии между жадной познания и иррациональным применением знаний.

Рационалистическая тенденция Достоевского выражается не столько в идеях автора и его героев, сколько в художественных средствах, в поэтике. Ведь самый язык Достоевского, язык мысли, безраздельно овладевшей человеком, мысли, вытеснившей все остальное из душевного мира, — такой язык уже сам по себе разрушает все антиинтеллектуалистические, иррациональные и, в частности, националистические построения Достоевского. Великий рационалист, наследник Декарта и Спинозы, апостол объективного *ratio* мироздания мог получить так много от Достоевского потому, что Достоевский, мыслитель-антирационалист, был художником-рационалистом.

Гармония, к которой рвался Достоевский, — рационалистическая гармония. Она не может быть воплощением веры, традиции, догмата и не может быть принята «умом, созданным с понятием лишь о трех измерениях». Но она может быть познана неэвклидовым умом. Для Достоевского-мыслителя неэвклидова гармония бытия была искушением, греховным искушением, отвлекающим от традиционной эвклидовой веры. Для Достоевского-художника она

была властительницей дум и становилась властительницей дум для каждого раскрывавшего «Братьев Карамазовых», «Преступление и наказание», «Идиота» и т. д. Ее власть не уничтожалась сознательной антирационалистической идеологией автора; эта власть действует независимо от тенденции, и именно поэтому она так велика.

У Эйнштейна на всех «языках» его творчества — в «модельных» конструкциях, в гносеологических экскурсах, в автобиографических набросках и в публицистике — звучит как доминирующая одна нота: мироздание подчинено объективному ratio, в нем царствует гармония. Это выражается в критерии «внутреннего совершенства» физической теории в конкретных физических концепциях. Мир не является хаосом, он подчинен единообразно действующим законам. Их единообразное действие выражается в инвариантности физических соотношений, в однородности пространства — «плоского», или искривленного. Высшим выражением такой гармонии была бы единая теория поля. И здесь Эйнштейн столкнулся с трудностями, которые ему не удалось преодолеть. Одновременно он увидел самые отталкивающие и разрушительные проявления общественной дисгармонии.

Можно представить себе, как важно и нужно было Эйнштейну проникающее излучение гениальной художественной апологии поисков космической и моральной гармонии. Это было излучение поистине колоссальной проникающей силы. Оно свободно проходило, в частности, сквозь границы жанров.

Мы встречаем упоминание о «Братьях Карамазовых» в письме Эйнштейна, посланном из Берлина в 1920 г. В письме говорится о пока еще первоначальных, но уже обещающих стать крайне мучительными поисках единой теории. Далее речь идет о националистической реакции в Германии — тогда еще нельзя было представить масштабы разрушительного хаоса, к которому она привела, но направление ее уже определилось. И вот между двумя констатациями тяжелых интеллектуальных и морально-политических тенденций, противоречащих идеалу гармонии, Эйнштейн говорит о «Братьях Карамазовых»¹.

Итак, Достоевский был для Эйнштейна источником импульсов, укреплявших и усиливавших его тягу к поискам научной и общественной гармонии, тягу в «надличное». Этот импульс не определял и не изменял направления интересов Эйнштейна, но увеличивал их скалярную меру. Направление было определено раньше, чем Эйнштейн познакомился с произведениями Достоевского. Но интеллектуальное и моральное воздействие творчества Достоевского на идейную жизнь нашего столетия проецировалось на направление, по которому шел Эйнштейн, очень мощной ускоряющей составляющей.

¹ См. C. Seelig. Albert Einstein. Zürich, 1960, S. 265. К. Зелиг. Альберт Эйнштейн, стр. 130.

История культуры не была бы историей, если бы не существовало какого-то тождественного себе субстрата, каких-то сквозных определений субъекта исторических преобразований. Понятие изменения теряет смысл без определения того, что изменяется. В истории культуры, начиная по крайней мере с древней Греции, можно увидеть некоторые общие определения и черты, которые модифицируются, но позволяют говорить об истории культуры как о непрерывном процессе и о самой культуре как о чем-то тождественном себе, несмотря на исторические изменения.

Общей закономерностью развития науки служит необратимый в целом (при частых, «микроскопических» с точки зрения всего исторического процесса, нарушениях необратимости) переход ко все более точному, адекватному отображению действительности. Существует ли подобная, необратимая эволюция в других областях культуры, например в искусстве? Не поднимая очень широких и общих философско-эстетических и историко-эстетических вопросов, можно ограничиться несколькими замечаниями, непосредственно связанными с сопоставлением творчества Эпикура и Лукреция, Ариосто и Галлилея, Эйнштейна и Достоевского.

Для эволюции науки характерно необратимое увеличение информации о каузальных связях в природе. Но отнюдь не суммирование частных каузальных констатаций, а связанная с их накоплением и особенно с повторными *experimentum crucis*, эволюция представления

о мировой каузальной гармонии. История науки, если говорить о физике — это история перехода от классической причинности к релятивистской, к квантовой, к квантово-релятивистской. При таком переходе наука не может пользоваться неизменными методами, не может не преобразовывать свой собственный арсенал. Наука в свое время перешла от аристотелевской концепции движения (движение требует действующей причины, такой причиной служит продолжающееся воздействие на тело или же пребывание тела вне его «естественного» места) к галилеевско-картезианской концепции (только ускорение требует действующей причины). Такое преобразование картины мира потребовало нового стиля научного мышления (исчисление бесконечно малых вместо старых чисто логических противопоставлений). Потом наука перешла к релятивистской причинности, и ей пришлось научиться мыслить неевклидовыми геометрическими категориями, придавая им реальный физический смысл. Переход к квантовой причинности потребовал новых парадоксальных утверждений. Науке никогда не удавалось наливать новое вино в старые меха.

Но и искусству это не удавалось. Вот перед нами античный идеал космической, общественной, моральной и интеллектуальной гармонии. В упорядоченном, подчиненном механической причинности, состоящем из атомов мире живут люди, которые понимают механику мира, не обнаруживают в нем темных, принципиально непостижимых пятен, поэтому не верят в богов, не боятся смерти и видят свое счастье во всестороннем развитии интеллектуальных и фи-

зических сил. Чтобы передать эту античную эпикурейскую гармонию, потребовались поэтические средства, которые в I в. до н. э. были новыми и знаменовали создание нового поэтического жанра.

Далее вырастает идеал гармонии, свойственный Возрождению. Это — пафос познания мира, гуманистическая утонченность, личность, противостоящая традиционной иерархии, «жизнерадостное свободомыслие». Ощущение такой гармонии передается поэзией Ариосто, иронически улыбающейся, глядя на прошлое, и утверждающей новое отношение к миру.

Последняя четверть XIX и начало XX столетия характеризуются ощущением близости и неизбежности радикальных перемен, представлением о гармонии, которая будет завершением революции и выражением революционных идей, характеризуются осознанием дисгармонии окружающего и поисками самых парадоксальных «неэвклидовых» (в том числе неэвклидовых без кавычек) путей к космической, и моральной гармонии.

Эйнштейновский критерий «внутреннего совершенства» физической теории и концепция дискретного пространства-времени

1. О физической содержательности идеи дискретного пространства.
2. Ультрарелятивистская и релятивистская причинность.
3. Логическая структура концепции дискретного пространства-времени.

1

С. Н. Бернштейн поставил в эпиграфе своего «Опыта аксиоматического обоснования теории вероятностей»¹ слова Лапласа (из «*Theorie analytique des probabilités*»): «Человеческий разум испытывает меньше трудностей, когда он продвигается вперед, чем тогда, когда он углубляется в самого себя». В какой-то мере «продвижение

¹ С. Н. Бернштейн. Собр. соч., т. IV. М., 1964, стр. 10.

вперед» и «углубление в самого себя» были связаны между собой на всем протяжении истории науки. Но сейчас такая связь стала несравненно более сильной и явной, чем раньше. Можно думать, что специфические трудности современной теории поля связаны с необходимостью для разума очень радикально углубиться в «самого себя», чтобы продвинуться вперед. Речь идет о продвижении по основному руслу современной теории поля, о поисках единой теории элементарных частиц и полей.

В 1949 г. в своем автобиографическом очерке Эйнштейн, как уже говорилось, выдвинул два критерия для выбора и для критики физической теории¹. Первый критерий он назвал критерием внешнего оправдания. Речь идет о проверке теории наблюдениями, о ее соответствии экспериментальным данным. Вторым критерием Эйнштейн назвал критерием внутреннего совершенства. В понятие «внутреннего совершенства» Эйнштейн включает естественность теории, логическую простоту посылок, определенность утверждений, отсутствие логического произвола при выборе данной теории среди равноценных и аналогично построенных теорий. Мы ограничимся только одной стороной дела — естественностью теории, ее однозначным выводением из максимально общих физических постулатов, отсутствием искусственных (т. е. введенных *ad hoc*, для данной, конкретной проблемы) допущений. Уже говори-

¹ См. «Мировоззрение Эйнштейна и теория относительности», стр. 28—31.

лось также, что это требование весьма характерно для генезиса теории относительности. Эйнштейн придал постоянству скорости света субстанциальный характер и связал его с новыми весьма общими представлениями о соотношении пространства и времени. Именно такое объяснение результатов оптических наблюдений Эйнштейн называл *систематическим*.

Быть может, аналогичным образом следует подойти и к современным апориям физики. С 40-х годов неоспоримые результаты физических экспериментов засвидетельствовали существование взаимодействия между частицей, например электроном, и вакуумом электромагнитного и электронно-позитронного полей. Если учитывать это взаимодействие, собственная энергия и соответственно масса электрона оказываются бесконечными. Чтобы избежать такого физически абсурдного вывода, было выдвинуто большое число конструкций, которые не претендовали на что-либо большее, чем на чисто рецептурную ценность, и часто сопровождалась ссылками на еще не созданную общую теорию, которая обоснует устранение бесконечных значений собственной энергии и массы. Многие попытки подобного обобщения релятивистской квантовой физики включают идею квантования пространства и времени. Речь идет о существовании минимальных пространственных расстояний и минимальных длительностей. Обычно минимальное расстояние ρ принимается по порядку величины равным 10^{-13} см, а в качестве минимального интервала времени τ берут время, необходимое свету, чтобы пройти расстояние ρ , т. е. интервал поряд-

ка 10^{-24} сек. Ряд соображений позволяет предположить еще меньшие элементарные размеры — например, порядка 10^{-17} см и 10^{-28} сек. Удалось в некоторой мере согласовать схему дискретного пространства с требованиями теории относительности¹, но в целом задача не решена и лоренц-инвариантная теория дискретного пространства не построена. Можно предположить, что полному решению задачи, т. е. систематическому (в том смысле, какое придавал этому слову Эйнштейн в уже упоминавшейся характеристике) построению лоренц-инвариантной теории дискретного пространства, способствовало бы некоторое уточнение критерия «внутреннего совершенства» при оценке идеи дискретного пространства и времени.

Обладает ли указанная идея «внутренним совершенством» в том смысле, в котором Эйнштейн применял этот критерий при построении теории относительности? Вопрос можно поставить и по-иному: какими чертами должна обладать концепция дискретного пространства-времени, чтобы ее можно было сблизить не с введенной ad hoc лоренцевой теорией сокращения, а с эйнштейновской теорией относительности?

Присмотримся ближе к роли критерия «внутреннего совершенства» в генезисе теории относительности.

Этот критерий противостоял феноменологическому пониманию относительности. Абсолют-

¹ H. Snyder. Phys. Rev., 1947, 71, 38.

ное движение инерциальных систем, эфирный ветер и самый эфир не прячутся от наблюдателя, а действительно не существуют, и при систематическом построении теории отказ от абсолютного движения в эфире и от эфира вытекают из постулируемых соотношений между пространством и временем. Пространство и время неразрывны, геометрия мира — четырехмерная геометрия. В эйнштейновской концепции геометрического и физического постижения реальности исходные геометрические определения не являются ни результатом соглашения, ни априорными формами. Они предвосхищают эксперимент и приобретают физический смысл, поскольку приводят при своем логико-математическом развитии к результатам, допускающим хотя бы в принципе опытную проверку. Таков постулат четырехмерного мира: он подлежит экспериментальной проверке и антиципирует сопоставление с наблюдением. В общей теории относительности уже не размерность, а та или иная метрика пространства оказывается физическим постулатом. Эвклидов или неэвклидов характер метрики связан с игнорированием или учетом гравитационных полей.

Попробуем аналогичным образом подойти к дискретности пространства и времени.

В специальной теории относительности физическая содержательность геометрии связана с ее четырехмерным характером. Физическая — именно релятивистская — содержательность дискретной геометрии может аналогичным образом выражаться в существовании четырехмерных недробимых элементов бытия. Мы увидим

сейчас, что и здесь четырехмерный характер геометрии антиципирует ее собственно физический, допускающий экспериментальную проверку смысл. В самом деле, что собственно означает дискретность четырехмерного пространственно-временного многообразия в отличие от дискретного пространства и дискретного времени? Она означает, что внутри минимальных четырехмерных ячеек пространство и время перестают быть динамическими переменными движущегося физического объекта. Мы можем представить себе минимальный отрезок (разделенным на части, даже на бесконечное число бесконечно малых частей. Но последние уже не могут быть пространственными определениями движущейся частицы, соответствующими последовательным, бесконечно малым временным интервалам. Соответственно и время, равное элементарному интервалу, может быть разделено на бесконечное число бесконечно малых интервалов, но последние не могут рассматриваться в качестве элементов четырехмерного процесса, т. е. движения частицы. Таким образом, предположение о дискретности пространства-времени равносильно предположению о невозможности *движения* внутри минимальных четырехмерных ячеек. Остается предположить, что себестоимость частицы, гарантируемая непрерывностью ее движения, представляет собой макроскопическую аппроксимацию, что непрерывное движение — это макроскопический результат трансмутаций.

Такое предположение является весьма радикальным по отношению к классической физике. Для последней элементарными процес-

сами служили движения тождественных себе тел. В этом смысле классическая физика идет от аристотелевого понятия местного движения, т. е. перемещения (φορᾶ). Во второй половине XIX в. была высказана мысль о несводимости картины мира к законам аристотелевого φορᾶ — перемещения. Сложные формы движения не сводятся к более простым. Но никто в прошлом веке не посягал на роль перемещения как неотделимого от несводимых к нему сложных форм движения их наиболее общего субстрата. Перемещения оставались элементарными составляющими процессов природы.

В первой трети XX в. элементарными процессами природы также считали движение тождественных себе частиц, обладающих, однако, помимо корпускулярных также и волновыми свойствами. Но с начала 30-х годов уже знали, что электромагнитное и электронно-позитронное поля при определенных энергиях не только искривляют мировые линии тождественных себе частиц, но и вызывают трансмутации — взаимные превращения элементарных частиц. Далее мезонные поля указали на весьма значительную роль подобных трансмутаций. В конце концов трансмутации — современные аналоги аристотелевых субстанциальных изменений: порождения (γέννησις) и уничтожения (φθορᾶ) стали иногда рассматривать как форму движения, более общую, чем перемещение. В 1949—1950 гг. Я. И. Френкель¹ высказал мысль о движении частицы как о серии регене-

¹ Доклады Академии наук СССР, 1949. 64, 4, 507; Успехи физических наук, 1950, 42, вып. 1, 69.

раций — превращений частицы данного типа в частицу иного типа и последующих возникновений из нее частицы такого же типа, что и исходная.

В конце 50-х годов была сделана попытка связать идею регенерации со схемой дискретного пространства-времени: частица регенерирует через время, равное $\tau \sim 10^{-24}$ сек на расстоянии $\rho \sim 10^{-13}$ см от исходного пункта. Подобная связь лишает дискретность априорного характера. Концепция дискретного пространства и времени не могла стать собственно физической схемой, пока она оставалась априорным положением о геометрической недробности элементарного расстояния и неразделимости элементарной длительности. Как уже говорилось, все дело в раздельной дискретности пространства и времени. Дискретное пространство и дискретное время — чисто геометрические конструкции. В геометрии известна аксиома Архимеда, равнозначная утверждению о бесконечной дробности пространства. Если отказаться от аксиомы Архимеда, мы получим неархимедову геометрию, но все же только геометрию. Сопоставим идею дискретности пространства с идеей его эвклидовости. Отказ от эвклидова постулата привел к созданию неэвклидовой геометрии, но только общая теория относительности придала физический смысл утверждению о неэвклидовых свойствах континуума. Неархимедова геометрия останется чисто априорной геометрической схемой без физической интерпретации, аналогичной той интерпретации, которую получила неэвкли-

дова геометрия в общей теории относительности.

Первым звеном подобной интерпретации и будет трактовка элементарных пространственно-временных клеток как областей элементарных регенераций. В таком случае релятивистское требование — скорость механического движения v не может быть больше, чем скорость света c , — имеет смысл только для пространственно-временных областей с пространственными размерами не меньше $\rho \sim 10^{-13}$ см и временными размерами не меньше $\tau \sim 10^{-24}$ сек (может быть, как уже сказано, на несколько порядков меньше, но при условии $\rho/\tau = c$).

А внутри этих пространственно-временных клеток? Возможно ли здесь движение со скоростью, превышающей скорость света? Восстанавливается ли здесь в правах ньютонова механика? Нет, в клетках пространства-времени вообще нет движения сигнала, т. е. перемещения тождественного себе физического объекта. Такому предположению соответствует только указанная выше физическая модель: частица регенерирует в соседней пространственно-временной клетке, т. е. частица превращается в частицу иного типа, а эта последняя — в частицу того же типа, что и исходная, в течение $\tau \sim 10^{-24}$ сек, и регенерировавшая частица возникает на расстоянии $\rho \sim 10^{-13}$ см от исходного положения.

Если отождествить регенерировавшую частицу с исходной, т. е. считать регенерацию движением частицы, то такое движение, очевидно, происходит со скоростью $\rho/\tau = c$, т. е. со

скоростью света. Согласно теории относительности, движения тождественных себе тел происходят либо со скоростью света (процессы на световом конусе), либо со скоростью меньшей, чем скорость света (процессы внутри светового конуса). Теория относительности утверждает, что два события A_1 и A_2 в точках x_1 и x_2 могут быть связаны, как причина и следствие, если между этими событиями прошло время, не меньшее, чем время, требующееся свету, чтобы пройти, из x_1 в x_2 . Иначе говоря, релятивистская причинность связывает события на световом конусе (время между событиями равно времени прохождения света) и внутри светового конуса (время между событиями больше времени прохождения света). Схема регенераций-сдвигов со скоростью $\rho/\tau = c$ означает дискретность пространства-времени на световом конусе.

2

Выделим «короткие» причинные связи, определяющие ход трансмутационных процессов — сдвигов на дискретной поверхности светового конуса, и введем для них понятие *ультрарелятивистской причинности*. Под *релятивистской причинностью* в собственном смысле будем понимать причинные связи, определяющие непрерывные движения тождественных себе тел. Для частиц с ненулевой массой покоя релятивистская причинность определяет события *внутри* светового конуса.

Схема дискретного пространства-времени на световом конусе должна быть исходным

пунктом обоснования релятивистской причинности, т. е. каузальной картины непрерывных движений со скоростями, меньшими, чем скорость света. Переход от дискретного пространства-времени на световом конусе и ультрарелятивистской причинности к непрерывному пространству-времени внутри светового конуса и к релятивистской причинности можно иллюстрировать следующей схемой.

Мир внутри светового конуса — это мир макроскопических движений частиц с неравной нулю собственной массой, иначе говоря, всех элементарных частиц за вычетом фотонов, нейтрино и антинейтрино, которые движутся не только микроскопически, но и макроскопически на световом конусе. Мы предполагаем, что частица с ненулевой массой покоя движется (в ультрамикроскопическом аспекте) на световом конусе; она совершает элементарные сдвиги-регенерации со скоростью $v/c = c$, т. е. со скоростью, равной скорости света. Но пространственные направления этих сдвигов различны, и в этом различии выражается ненулевая масса покоя частицы. Если вероятности регенерации частицы в противоположных направлениях везде одинаковы, то в результате большого числа случайных блужданий сдвиги в противоположных направлениях уравниваются и частица окажется вблизи исходного пункта. Если же в пространстве существует некоторая диссимметрия вероятностей, т. е. вероятность регенераций в одну сторону больше, чем вероятность регенераций в противоположную сторону, то частица будет обладать некоторой отличной от нуля макроско-

пической скоростью. Когда частица находится только в гравитационном поле, направление диссимметрии совпадает с геодезической линией; иные поля выражаются в несовпадении диссимметричного направления с геодезической. Макроскопическая мировая линия частицы с ненулевой массой покоя имеет, очевидно, непрерывный характер, а макроскопическая скорость v частицы с ненулевой массой не может совпадать с ультрамикроскопической скоростью: $v < c$.

Подобный переход от ультрарелятивистской к релятивистской причинности устраняет априорный характер дискретной геометрии. Вернемся к аналогии с неевклидовой геометрией. Последняя потеряла априорный и формальный характер и стала физической геометрией, когда Эйнштейн нашел собственно физический переход от условий, при которых пространство-время обладает евклидовыми свойствами, к условиям, при которых оно обладает неевклидовыми свойствами. Это был переход от областей, где можно пренебречь гравитационными полями, к областям, в которых их необходимо учитывать.

Аналогичным образом дискретная геометрия становится физической геометрией, когда известны не только физические условия ее применимости, но также физический переход к условиям применимости континуальной геометрии.

В сущности, в общей теории относительности, описывающей, вообще говоря, переменные гравитационные поля, нашла физическое воплощение геометрия, если можно так выра-

зяться, «переменной аксиоматизации», геометрия, в которой отступление от аксиомы параллельных становится переменным и измеримым параметром. Соответственно дискретное пространство-время на световом конусе, переходящее в макроскопически непрерывное при скоростях, меньших скорости света, служит воплощением геометрии «переменной дискретности». Геометрия, описывающая подобный переход, строит модель *пространства переменной размерности*. Но здесь речь идет не о переходе от одной n -мерности к другой n -мерности (где $n > 0$) или от одной метрики к другой. Здесь речь идет о генезисе самого понятия n -мерности и самого понятия метрики, следовательно не о математических, а о так называемых *метаматематических* понятиях.

Речь идет о переходе от нульмерного пространства к ненульмерному. Схема элементарных регенераций применима и к непротяженным частицам, и, собственно, нет оснований возвращаться к идее протяженного шарика, занимающего на этот раз пространственно-временную клетку. Достаточно предположить, что непротяженная частица регенерирует на расстоянии ρ через интервал времени τ . В этом случае пространство регенерирующих частиц — точечное пространство, т. е. *нульмерное*. Отсюда вытекает ряд выводов, относящихся к логическим и математическим проблемам теории относительности.

Процесс *измерения* пространства, в отличие от *счета* дискретных точек, придает смысл понятию ненулевой размерности. Измерение

оперирует расстояниями между двумя точками x_1 и x_2 и исходит из существования расстояния — некоторой всегда положительной функции координат этих двух точек. Если бы пространство между точками x_1 и x_2 содержало только конечное число промежуточных точек, это число было бы *естественной* мерой расстояния и не требовалась какая-либо метрическая формула, определяющая расстояние как функцию координат, т. е.: какое-либо мероопределение пространства. При неисчислимом множестве промежуточных точек такая формула должна существовать, включая постоянные (как в специальной теории относительности) или переменные (как в общей теории относительности) параметры. Напомним, что уже Риман в своей лекции «О гипотезах, лежащих в основании геометрии» различал абсолютную метрику дискретного и относительную метрику непрерывного многообразия¹.

Можно показать, что аксиоматизация теории относительности должна исходить из инфинитезимальных понятий². Отсюда можно определить характер аксиоматизированной схемы перехода от ультрарелятивистской причинности на световом конусе к релятивистской причинности в непрерывном пространстве-времени. Речь идет о переходе от множества

¹ См. «Об основаниях геометрии». Сб. классических работ. М., 1956, стр. 323—324. Подробнее об этом — ниже, стр. 212—221.

² См. «Бесконечность и относительность», стр. 165—262.

дискретных регенераций на световом конусе к множеству положений частицы, непрерывно движущейся внутри светового конуса. Появление такого множества связано с понятиями измерения, метрики, инвариантности по отношению к непрерывным группам, т. е. с основными понятиями геометрии ненульмерных пространств. Самый же переход аксиоматизируется с помощью понятий более общих, чем исходные понятия измерения несчетных множеств.

3

Мы попытаемся сейчас показать, каковы эти понятия. Для этого отойдем от абстрактных связей между математическими и логическими категориями и коснемся одной историко-научной проблемы.

Физика Аристотеля была прообразом качественно-логических понятий. В XVII в. физика стала прообразом количественно-математических категорий. В аристотелевой космологии движение и покой тела объяснялись его пребыванием в «естественном» месте или же в ином месте пространства. Движения (помимо «совершенных», круговых обращений) соответствовали граничным условиям, они происходили из чего-то во что-то, причем «что-то» определялось не какими-либо координатами, а чисто качественным противопоставлением «естественных» и «неестественных» мест.

Переход от такой качественно-логической концепции движения к иной, содержащей в

зародыше классическое представление о неисчислимом множестве точек пребывания и скоростей в каждой точке, был высказан в удивительной по общности форме Кеплером.

«Там, где Аристотель видит между двумя вещами прямую противоположность, лишенную посредствующих звеньев, там я, философски рассматривая геометрию, нахожу опосредствованную противоположность, так что там, где у Аристотеля один термин: „иное“, у нас два термина: „более“ и „менее“»¹.

Кеплерова «опосредствованная противоположность» может означать, что между каждыми «двумя вещами» (в концепции движения — между каждыми двумя значениями координат частицы) имеется бесчисленное множество «посредствующих звеньев» (промежуточных значений). Термины «больше» и «меньше» могут приобрести при этом метрический смысл: достаточно сопоставить бесконечное множество положений частицы числовому ряду. Но это сопоставление будет *физически содержательным*, если известен закон движения, определяющий положение и скорость частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению. Подобное *дифференциальное представление движения* содержалось по существу в динамике Галилея и достигло законченной формы в аналитической механике.

Таков исторический переход от чисто логической концепции движения к количествен-

¹ J. Kepler. Opera omnia, T. I. Frankfurt, 1958, p. 423.

но-математической. В абстрактном виде этот переход оказывается переходом от конечного числа оценок логического суждения к бесконечному числу.

Концепция естественных мест была характерным примером суждений, допускавших применение логики с двумя оценками — «истинно» и «ложно», т. е. основанной на принципе исключенного третьего *бивалентной* логики. Суждение «тело находится в его естественном месте» могло быть либо истинным, либо ложным. Но этого мало: в динамике Аристотеля такое суждение и его оценка *полностью* определяли движение. Бивалентная логика полностью сохраняет свои позиции и в классической концепции Галилея — Ньютона — Лагранжа. Но теперь движение определено, если оценки «истинно» и «ложно» относятся к n суждениям: «в момент t_1 частица находится в точке x_1 ,» «в момент t_2 частица находится в точке x_2 ,»..., «в момент t_n частица находится в точке x_n ».

При этом на каждом конечном отрезке $n = \infty$. Число оценок каждого из этих суждений остается тем же, логика по-прежнему бивалентная, но число суждений становится бесконечным и приобретает мощность континуума. Все эти суждения объединены тождеством субъекта (речь идет об одной и той же тождественной себе частице), гарантированным непрерывностью *предикатного многообразия* x_1, x_2, \dots, x_n (себетождественность частицы гарантируется ее достоверным пребыванием во всех — их несчетное множество — точках траектории).

Выше уже упоминалось о связи понятий относительности и бесконечности. Сказанное относится к любому релятивистскому принципу — принципу относительности Галилея — Ньютона в той же мере, как и к принципу относительности Эйнштейна. Различие между указанными принципами выражается в еще одной характеристике предикатного многообразия помимо валентности и мощности. Возьмем самый простой пример — движение частиц по координатной оси X . Гарантирована ли себе-тождественность частицы непрерывностью ряда x_1, x_2, \dots, x_n ? С точки зрения теории Эйнштейна, тождественная себе частица не может выйти за пределы светового конуса и ее себе-тождественность гарантируется предикатным многообразием, состоящим наряду с пространственными положениями из моментов времени. Предикатное многообразие теории относительности Эйнштейна — это не многообразие пространственных точек и моментов времени. Это многообразие четырехмерных пространственно-временных точек — мировых точек. Обобщая эти категории, мы приходим к понятию *размерности предикатного многообразия*. Мировые линии, о которых говорит теория относительности Эйнштейна, представляют собой в логическом аспекте четырехмерные *бесконечно-би-валентные предикатные многообразия*.

Обратимся теперь к логическим основам квантовой механики. Они освещены в многочисленных работах 30—50-х годов¹. Мы здесь

¹ См., например: G. Birkhoff a. J. v. Neumann. Ann. Math., 1936, 37, 823; P. Février. Comptes

ограничимся кратким повторением и некоторым уточнением общего вывода о *бивалентно-тривалентном* характере логики, соответствующей нерелятивистской квантовой механике.

Тривалентная логика отказывается от принципа исключенного третьего и вводит, наряду с оценками «истинно» и «ложно», третью оценку. В квантовой механике такой оценкой служит «неопределенно». Речь пока идет о собственно логических суждениях, не связанных с измерением и с существованием измеримых, бесконечных предикатных многообразий. Последние по определению являются многообразиями нетождественных предикатов одного и того же тождественного себе субъекта. Нам придется, если не определить (это требует ненужных здесь довольно сложных построений), то хотя бы несколько приблизиться к определению понятия себестождественности. Воспользовавшись все той же физической интерпретацией логических суждений — картиной движущейся частицы, мы дадим представление о *тривиальной себестождественности* (частица тождественна себе в одной и той же точке, в один и тот же момент времени) и о *нетривиальной себестождественности* (частица остается тождественной себе на некоторой ненулевой траектории, в течение некоторого

Rend., 1937, 204, 481; A. Destouches. Essai sur l'unité de la physique théorique, t. I—III. Paris, 1943; H. Reichenbach. Philosophical foundation of Quantum Mechanics. Los Angeles, 1946; C.-F. Weizsäcker. Naturwiss., 1955, 20, 42; Б. Г. Кузнецов. Основы квантово-релятивистской логики. Сб. «Логические исследования». М., 1959, стр. 99—112.

времени, т. е. обладает различными пространственно-временными координатами). Нетривиальная себестоимость частицы гарантируется: 1) ее непрерывным *достоверным* существованием на траектории (т. е. «заполненностью» ее мировой линии) и 2) непрерывным *однозначным* действием закона, определяющего в каждой точке скорость частицы (т. е. определенной формой мировой линии). Позже мы остановимся на *дополнительности* этих гарантий.

В квантовой механике они перестают действовать совместно; в общем случае достоверное пребывание частицы в точке несовместимо с однозначным определением ее скорости. Принцип дополнительности Бора, принцип неопределенности Гейзенберга и принадлежащую Борну вероятностную интерпретацию волновой функции обычно рассматривают с их негативной и антиклассической стороны: квантовая механика отказывается от абсолютно точного определения классических величин, т. е. величин, характеризующих основные процессы классической картины мира. Но, как уже говорилось, квантовая механика имеет и позитивную сторону, причем «консервативную» (в прямом смысле *сохранения*) в отношении классических понятий: последние при известных условиях с известными ограничениями могут быть применены к микропроцессам. Более того, квантовая механика ценой этих условий и ограничений расширяет объем информации об импульсах, энергиях и пространственно-временных координатах частицы. Определенным и достоверным значением **в каждой точке и в каждый момент** обла-

дает в общем случае *вероятность* пребывания частицы. Определенное значение вероятности пребывания, оказавшись предикатом частицы, позволяет применить к утверждению «частица обладает этим предикатом» оценки «истинно» и «ложно» и гарантировать себестождественность частицы. Непрерывно изменяющаяся (описываемая волновым уравнением) вероятность пребывания гарантирует себестождественность частицы, потому что она может стать сколь угодно большой в каждой точке, сколько угодно приблизиться к достоверности за счет соответствующего возрастания неопределенности скорости. В свою очередь значение скорости частицы в каждой точке может быть определено с неограниченной степенью достоверности за счет неопределенности ее положения на траектории в данный момент.

Таким образом, мы получаем бесконечное множество предикатов тождественного себе субъекта. В этом смысле квантовая механика сохраняет (ценою вероятностного переосмысления — вместо определенного значения переменной берется определенная вероятность — и ценою неточности сопряженной динамической переменной) логическую схему перехода от бивалентных суждений о динамических переменных частицы к бесконечно-бивалентной схеме: частица обладает бесконечным множеством предикатов, образующих непрерывное предикатное многообразие.

Эволюция релятивистской квантовой механики, квантовой электродинамики и релятивистской квантовой теории в целом приводила ко все большему последовательному ограничению бес-

конечно-бивалентной схемы для некоторых процессов. Мысль Л. Д. Ландау и Р. Пайерлса¹ о невозможности точного определения одной переменной, развитая Бором и Л. Розенфельдом² и получившая форму *теории индивидуальных ошибок*, положила начало указанной тенденции. Впоследствии она сплелась с другими. В 30—40-е годы почти каждый крупный шаг в сторону обобщения теории поля в той или иной мере и в той или иной форме, прямо или косвенно, явно или неявно был связан с признанием более общей неопределенности динамических переменных, чем неопределенность *сопряженных* переменных, раскрытая Гейзенбергом и Бором в 1926—1927 гг. Упомянем о методе *S*-матрицы, который разрабатывал Гейзенберг³. Этот метод позволяет отказаться от прослеживания поведения частиц в очень малой пространственной области и в краткий интервал времени, когда происходит взаимодействие частиц. В конце 40-х годов ряд физиков пришел к мысли об ограниченной пригодности методов, прослеживающих движение частиц от точки к точке и от мгновения к мгновению. В теории квантованных полей такое представление о движении вступает в конфликт с картиной взаимодействия частиц и полей.

¹ Zs. f. Phys., 1931, 69, ...

² Kong. Danske Vidensk. Selsk., Math.-Phys. Medd., 1933, 12, N 8. См. также Л. Розенфельд. Квантовая механика. В сб. «Нильс Бор и развитие физики». М., 1958, стр. 96—128.

³ Zs. f. Phys., 1943, 120, 513, 637.

Перечисленные, а также многие другие тенденции физической мысли как бы пересекаются в одном пункте: они допускают существование пространственно-временных областей, где нельзя представить себе движение физического объекта из одной части такой области в другую часть. Это значит, что есть области, где появление частицы в одном пункте и ее исчезновение в другом пункте уже нельзя считать результатом бесконечно малых сдвигов, т. е. непрерывного движения. Такое появление мы начинаем рассматривать как элементарный процесс — регенерацию частицы после ее исчезновения в другом пункте.

Если минимальные расстояния и минимальные интервалы времени дают в частном случае скорость света, то мы приходим к уже известной нам схеме дискретного пространства-времени на световом конусе. Логически это значит, что суждение о принадлежности субъекту данного предиката (о принадлежности частице данных пространственно-временных координат) может иметь только одну оценку — «истинно». Если субъект не обладает этим предикатом — перед нами иной субъект, если он теряет указанный предикат — субъект исчезает. Здесь область *моновалентной* логики. Очевидно, моновалентные суждения не могут образовать непрерывного ряда, в котором одному и тому же субъекту приписывается бесконечное множество предикатов — непрерывное предикатное многообразие.

Отметим, что невозможность инфинизации моновалентной логики, невозможность бесконечно-моновалентной логики разъясняет ло-

гическую природу затруднений, стоящих перед релятивистской теорией дискретного пространства и времени.

Преодоление указанных затруднений требует перехода от тривиальной себетождественности субъекта к нетривиальной себетождественности. Нетривиально-себетождественный субъект может обладать различными предикатами, входящими в непрерывное многообразие. Относительно каждого из них возможен, вообще говоря, неопределенный ответ на вопрос, «обладает ли субъект данным предикатом (имеет ли движущаяся частица данные координаты)». Неопределенный ответ может при некоторых условиях (в квантовой механике — за счет неопределенности сопряженной переменной и за счет перехода от пребывания частицы к вероятности пребывания) приблизиться к определенному и тривалентная оценка — перейти в бивалентную. Таким образом, континуализация движения частицы, переход от ее регенераций на световом конусе к непрерывному движению со скоростью $v < c$ соответствует *логике переменной валентности*.

Мысль о дискретности пространства-времени на световом конусе интерпретирует указанные логические конструкции (вернее, логико-математические: ведь переход от дискретных трансмутационных актов к непрерывным движениям внутри светового конуса — это переход к физическим прообразам математического анализа). Указанная мысль отнюдь не претендует на роль однозначной физической концепции. Для современной теоретической физики характерны подобные попытки иллюстрировать смысл «внут-

ренного совершенства», попытки, не претендующие на роль однозначной физической теории, сопоставимой с наблюдениями и указывающей свой *experimentum crucis*, иными словами, на роль теории, сочетающей «внутреннее совершенство» с «внешним оправданием». Такие попытки так же характерны, как рецептурные приемы, достигшие высокой согласованности с наблюдениями, но не претендующие на «внутреннее совершенство». Отсутствие претензий с обеих сторон показывает, что синтез «внутреннего совершенства» и «внешнего оправдания» стал сознательной целью и аксиоматизирующей тенденции и деятельности теоретиков, следующих за экспериментом.

Если говорить об аксиоматизирующей тенденции, то тяготение к синтезу выражается не только в указанном отсутствии претензий, но и в стремлении положить в основу логических конструкций понятия, допускающие хотя бы в принципе физическое осмысление, т. е. получение выводов, сопоставимых с наблюдениями. Мне хотелось показать, что этот путь по своему направлению продолжает путь Эйнштейна. Для мировоззрения Эйнштейна чрезвычайно характерно стремление исключить феноменологические концепции, выдвинутые *ad hoc* и не дающие систематического объяснения фактов. Но для Эйнштейна не менее характерно стремление к физически содержательным исходным понятиям, «физикализация» исходных логико-математических понятий. У Эйнштейна можно найти также звено, «физикализирующее» априорно-геометрическую концепцию дискретности. Это звено — понятие трансмутации элементар-

ных частиц, содержащееся в релятивистском соотношении энергии и массы и ставшее явным, когда изучение все более высоких энергий указало физике не только на релятивистские поправки, необходимые при анализе энергий, сопоставимых с внутренней энергией частиц, но и на ультрарелятивистские эффекты, связанные с энергиями, равными полной энергии частиц.

Мы убеждаемся, что расширение однозначных представлений о микромире («продвижение разума вперед») очень тесно связано сейчас с пересмотром логической структуры физической теории («углублением разума в самого себя»). Все дело в том, что, «углубляясь в самого себя», т. е. отыскивая новые *логические* конструкции, разум современной физики требует, чтобы эти конструкции отличались физической содержательностью, т. е. приводили к заключениям, в принципе допускающим экспериментальную проверку.

Является ли физически содержательной концепция регенераций на световом конусе, переходящих в непрерывное движение внутри светового конуса? Нет, изложенная схема сама по себе еще не обладает физическим смыслом. Чтобы понятие регенерации и вообще трансмутации частиц получило какой-то смысл, нужно иметь возможность определить тип частицы, т. е. ее массу покоя, заряд, спин и т. д. Но все это — характеристики макроскопической, непрерывной мировой линии частицы. Поэтому требование физической содержательности заставляет современную физику искать такие общие (гарантирующие «внутреннее совершенство» тео-

рии) понятия, в которых сочетаются в качестве исходных (и *дополнительных!*) ультрамикроскопический образ дискретного пространства-времени и макроскопический образ частицы, обладающей непрерывной и определенной мировой линией¹.

¹ Проблема физической содержательности этих исходных, дополнительных одно по отношению к другому определений освещена в очерке «Относительность и дополнителность», стр. 305—381.

Бесконечность и относительность

1. Введение. 2. Античная атомистика и парадоксы бесконечности. 3. Абсолютное и относительное движение в конечной Вселенной Аристотеля. 4. Бесконечное, однородное и изотропное пространство и понятия абсолютного и относительного движения в классической механике. 5. Естественнонаучный закон и актуальная бесконечность. 6. Бесконечность и относительность в теории поля. 7. Бесконечность и мероопределение. 8. Бесконечность, инвариантность и сохранение. 9. Бесконечность четырехмерного мира. 10. Бесконечность, относительность и тяготение. 11. Бесконечность и неопределенность. 12. Вакуум, бесконечные значения энергии и релятивистская теория поля. 13. Неэрлангенская физика.

1

Никогда проблема бесконечности и относительности не была такой острой, как в середине нашего столетия. Применение теории относительности к микромиру, развитие релятивистской квантовой теории привели к физически абсурдным результатам — бесконечным значениям энергии и массы, а также заряда частиц. Указанное затруднение, по-видимому, будет преодолено лишь самой радикальной перестройкой оснований физики, быть может, — более решительным отказом от механического мировоз-

зрения, чем в теории относительности и в теории квант. На пороге этих новых обобщений наука, готовясь к скачку, как бы оглядывается назад, переосмысливает исторический путь, содержание и значение самых старых, привычных и, казалось бы, незыблемых понятий. Эта переоценка ценностей прошлого переплетается с попытками прогнозов. Современный ученый не может обойтись без явных или неявных проектировок будущего физики, без чего-то напоминающего гильбертовы задачи 1900 г. Ретроспективные оценки подчас зависят от прогнозов, в свою очередь новые взгляды на историческое прошлое иногда позволяют увидеть ранее ускользавшие от внимания связи между современными тенденциями науки.

В ретроспективных оценках история науки исходит из концепций, очень далеких от однозначной и достоверной формы. В этом отношении она следует примеру самой науки. Никогда еще в науке не было такого общего ожидания, близких, весьма радикальных и вместе с тем трудно определенных сдвигов. Но дело не ограничивается ожиданием. Наука — речь идет о теоретической физике — никогда еще в такой степени, как сейчас, не пользовалась конструкциями «в кредит», не применяла так часто рецептурные приемы в расчете на будущую теорию, которая даст этим приемам строгое и физически содержательное обоснование. Для современной науки характерна рабочая роль прогнозов. По-видимому, направление и темп дальнейшего развития физической теории перестали быть «функцией состояния»; они зависят не только от состояния теории в данный момент,

но и от известного обобщения ее развития, охватывающего ее прошлое и предвидимое в разумных пределах будущее.

Из этой характерной особенности современной науки вытекает, с одной стороны, неизбежность исторической ретроспекции не только с современных позиций, но и с гипотетических, неустановившихся, лишь предвидимых с некоторой вероятностью позиций и, с другой стороны, эвристическая роль исторических оценок.

Чем радикальнее намечающийся пересмотр основных физических идей, тем дальше в глубь веков идет связанная с таким пересмотром историческая ретроспекция. Сейчас она доходит до тех зачаточных форм научного мировоззрения, которые были созданы в древней Греции. При этом исторический анализ, естественно, охватывает не только и даже не столько позитивные решения античной науки, сколько ее противоречия и вопросы, которые могли получить ответ лишь в последующие века.

Может быть, ни одно понятие, возникшее в древности, не было источником столь глубоких противоречий, как понятие бесконечности. Понятия абсолютного и относительного движения не были сформулированы в древности с такой удивительной прозрачностью, как понятие бесконечности (с особенной четкостью были указаны противоречия, к которым ведет это понятие), но они уже существовали и толкали античную мысль к многочисленным неясным образам концепций следующих веков. Речь идет о понятиях, как бы предвосхитивших в своей первоначальной, гениально-наивной гибкости все последующее развитие науки. В этом смыс-

ле в древности существовала и связь между понятиями бесконечности и относительности.

Эйнштейну принадлежит ряд релятивистских обобщений, которым соответствуют те или иные концепции бесконечности и которые обладают известными античными прообразами. Первым из таких обобщений является принцип постоянства скорости света в равномерно и прямолинейно движущихся одна относительно другой системах отсчета.

Специальный принцип относительности Эйнштейна служит обобщением классического: не только механические, но и физические процессы распространения электромагнитных волн и всех вообще взаимодействий тел протекают в инерциальных системах единообразно. Из классической галилеево-ньютоновой относительности инерционного движения вытекает однородность трехмерного пространства, отсутствие особых пространственных точек, которые могли бы стать началом привилегированной трехмерной координатной системы. Из эйнштейновской относительности инерционного движения вытекает однородность четырехмерного псевдоэвклидова пространственно-временного континуума, отсутствие выделенного события, которое могло бы стать началом привилегированной четырехмерной системы отсчета, а равноправие движущихся одна относительно другой инерциальных трехмерных систем выражается при этом в изотропности четырехмерного континуума. Из классической относительности инерционного движения следует, что тело, предоставленное самому себе, двигаясь из некоторой точки, пройдет бесконечное расстояние. Каждый новый отрезок ничего

не меняет в ходе внутренних механических процессов в теле. Сумма пройденных телом единичных отрезков неограниченно возрастает, оставаясь в каждый момент конечной. При делении конечного пути на уменьшающиеся части число таких частей бесконечно растет, оставаясь в каждой момент конечным.

Классический принцип относительности Галилея — Ньютона означает, что однородность рассматриваемого пространства в целом (т. е. заданного множества пространственных точек) выражается в отсутствие динамических эффектов прямолинейного и равномерного движений. Специальный принцип относительности Эйнштейна утверждает, что однородность и изотропность четырехмерного континуума в целом (т. е. заданного бесконечного множества мировых точек) выражаются в отсутствие каких бы то ни было внутренних физических эффектов прямолинейного и равномерного движений. Таким образом, уже здесь бесконечность выступает не только как простая возможность дальнейшего увеличения конечной величины (по определению Аристотеля — потенциальная бесконечность), но и как некоторое предсуществующее, заданное множество, *негативно* определяющее своими общими, присущими всему множеству в целом свойствами поведение элементов множества.

Все это становится несравненно более ясным, когда мы переходим к бесконечным множествам, *позитивно* определяющим своими общими свойствами различия входящих в них элементов. С такими множествами мы встречаемся в общей теории относительности. В ней речь идет о дви-

женпи тела в гравитационном поле. Поведение движущегося тела на каждом отрезке его пути уже не является простым повторением его поведения на предыдущем отрезке. Оно определяется заданным распределением центров тяготения. Иными словами, поведение тела определяется интегральными закономерностями. Последние действуют непрерывно от точки к точке и от мгновения к мгновению, т. е. через дифференциальные закономерности движения тела. Такая картина соответствует понятию *актуальной бесконечности*.

В отсутствие поля интегральные свойства пространства — его однородность и бесконечность — гарантируют неизменность поведения частицы во всех точках. Позитивно определены различия в поведении частицы только в случае поля, не равного нулю. Очевидно, в первом случае, рассматривая свободное движение тела, мы делим пройденный им путь на различные отрезки, в пределе стягиваем эти отрезки в точки и говорим о скорости частицы в точке, антиципируя общий случай, имея в виду, что скорость в различных точках может быть различной и что точки пространства могут, вообще говоря, различаться по поведению находящихся в них частиц.

Теория Эйнштейна содержит выводы, относящиеся не только к инерционному движению тела, предоставленного самому себе, и к ускоренному движению тела в силовом поле, но и к иным процессам, выходящим за рамки механической картины мира (механической в самом широком смысле, включающей и классическую, и релятивистскую, и квантовую механику, озна-

чающей представление о перемещении тождественных себе частиц как об исходных и наиболее элементарных процессах природы). Когда энергия движения сравнима с энергией покоя и соответственно масса движения — с массой покоя, перед нами релятивистские эффекты. Когда энергия движения становится равной энергии покоя и они переходят одна в другую при аннигиляциях и порождениях частиц, перед нами *ультрарелятивистские* эффекты. Эффекты, связанные с подобными превращениями, стоят несколько особняком в релятивистской физике; однако в последнее время намечается, как мы видели, некоторая возможность — пока лишь принципиальная — связать трансмутации с релятивистской теорией движения тождественных себе частиц. Такому направлению физической мысли соответствует новое представление о бесконечных множествах, не укладывающееся в традиционные рамки актуальной и потенциальной бесконечности.

Эти беглые замечания помогут нам разобраться в перипетиях реального исторического развития и в реальных исторических связях релятивистских и инфинитезимальных идей.

2

«Великая пустота» — бесконечное пустое пространство Демокрита — была однородным пространством, в котором нет ни центра, ни границ, вообще нет каких-либо выделенных точек. Земля не может быть абсолютным телом

отсчета для движущихся тел: в пространстве рассеяно бесконечное число других миров, и каждый из них с равным правом служит телом отсчета. Может ли «великая пустота» служить космологическим эквивалентом понятия бесконечности как результата бесконечного сложения конечных величин? Да, движущиеся атомы могут неограниченно увеличивать пути, пройденные ими от какой-либо начальной точки, и в этом смысле космология Демокрита является прообразом потенциальной бесконечности как результата сложения пройденных телом конечных отрезков. Заметим только, что во Вселенной Демокрита нет каких-либо естественных, привилегированных, абсолютных начальных точек и естественной меры конечных отрезков проходимого телом пути. Атом нигде не наталкивается на абсолютную границу пространства, которая могла бы служить естественным началом отсчета. Связь между бесконечностью пространства и относительностью движения совершенно прозрачная. Но у Демокрита не было физических эквивалентов бесконечности как результата последовательного деления конечной величины на все меньшие части. Вещество состоит из далее неделимых атомов; что же касается бесконечной делимости пространства, времени и движения, то здесь характерное для античной науки отсутствие строгих дефиниций не позволяет сказать о взглядах Демокрита что-либо вполне определенное. Вряд ли можно с полной достоверностью утверждать, что у Демокрита существовало представление о дискретном пространстве и времени. Быть может, оно появилось

позднее, например у Эпикура. Во всяком случае, ни в древней Греции, ни в эллинистический период непрерывность и бесконечная делимость пространства и времени не защищались представителями античной атомистики и, более того, оспаривались, по крайней мере, некоторыми из них.

Здесь сказалась подвижность понятий, наивных и в то же время с гениальной глубиной улавливающих действительные соотношения реального мира, — то, что придает такую своеобразную прелесть и свежесть страницам античных работ, и то, что так радикально упорядочил, систематизировал и догматизировал всеиссушающий гений средневековой схоластики. Древнегреческая мысль смотрела на мир как бы в первый раз, без установившихся исходных понятий, без жесткой матрицы, определенным образом систематизирующей эмпирический материал. В пределах одного направления, одной школы, в пределах творчества одного мыслителя и иногда в одной и той же фразе мы встречаем зачаточные формы концепций, которым предстоит развиться в определенные, застывшие, противостоящие друг другу и исключаящие друг друга научные системы.

В этом живом переплетении идей мы встречаем исторические прообразы наиболее радикальных тенденций современной физики. Античная атомистика уже увидела — разумеется, в той же неустановившейся, наивной и вместе с тем гениально глубокой форме — возможность локальных процессов, не зависящих от «интегральных», общих, предсуществующих закономерностей.

Речь идет об уже известных нам идеях спонтанных отклонений, «исотахии» и движения, как результата локальных исчезновений и появлений частицы¹. Нас здесь не должно интересовать, кому именно из античных атомистов принадлежали подобные идеи, в какой форме и с какой степенью определенности они были высказаны. Эти крайне важные для истории науки вопросы не решают проблемы физических прообразов бесконечности в античной атомистике. При любом ответе на указанные вопросы остается несомненным, что античная атомистика, не допуская бесконечной делимости вещества, не постулировала также, а может быть не допускала, бесконечной делимости пространства, времени и движения. Бесконечность не появлялась при делении конечной величины на части даже как потенциальная, поскольку существовал предел такого деления. Вселенная Демокрита, Эпикура и Лукреция бесконечна только в одну сторону — в сторону увеличения масштабов, суммирования конечных величин. Этот односторонний характер бесконечности заставляет нас взять в кавычки слово «интегральная» по отношению к общей закономерности, управляющей «великой пустотой». По сравнению с бесконечной Вселенной конечные расстояния порядка размеров атомов могут рассматриваться как точки, но все же исторически сложившийся с XVII в. смысл слова «интегральный» требует, чтобы интегральная закономерность непрерывно действовала через дифференциальные закономерности от

¹ См. стр. 99—106.

одного бесконечно малого (в пределе — непротяженного) отрезка к другому. Поскольку в областях пространства и времени, в которых их можно считать непрерывными, поведение атомов, предоставленных самим себе, определяется общими свойствами бесконечной Вселенной, речь идет об актуальной бесконечности. Поведение атомов определено негативно, поэтому пространство Демокрита, Эпикура и Лукреция однородно, а положение и движение в этом пространстве относительно.

С течением времени практические задачи и все большее число теоретических построений приводили к представлению о непрерывном движении на конечных расстояниях. Таким образом, в науку входило понятие бесконечности как результата деления.

Такое понятие было навеяно, в частности, задачей определения площади криволинейных фигур. Если площадь прямолинейной фигуры равна сумме конечного числа площадей элементарных квадратов, треугольников и т. д., то для определения площади криволинейной фигуры приходится брать сумму бесконечно увеличивающегося числа бесконечно уменьшающихся площадей.

Подобных задач было достаточно, чтобы античная мысль пришла к ряду понятий, логически вытекавших из представления о бесконечном делении конечной величины, в частности к противоречивому в своей основе понятию законченного бесконечного деления — актуально бесконечного множества непротяженных элементарных величин, из которых состоит **конечная протяженная** величина.

Зенон воспользовался апориями — парадоксами, связанными с этим понятием, для отрицания субстанциальности движения. Но в историю науки вошли не столько метафизические выводы Зенона, сколько связанные с апориями вопросы, противоречия и подходы к проблеме непрерывности движения.

Остановимся на пяти наиболее известных апориях Зенона: 1) меры, 2) дихотомии, 3) Ахиллеса и черепахи, 4) стрелы и 5) стадиона.

Первая апория указывает на невозможность составить протяженную величину из непротяженных. Если элементы непротяженны, тогда и сумма этих элементов равна нулю. Если же элементы имеют ненулевую протяженность, то сумма бесконечного множества таких элементов будет бесконечной.

Зенон рассматривает актуально бесконечное множество элементов. Он констатирует, что подобное представление приводит к противоречию, и приходит к выводу, что субстанция не может быть множественной. Нас интересует не этот вывод, ответ, решение, нас интересует здесь, как и во всей древнегреческой науке, поиск, вопрос, нерешенное противоречие. С подобной точки зрения апория меры обращена в будущее, и для ее исторической оценки нужно взглянуть, как решалась проблема меры континуума в течение последующих веков и как она решается сейчас. В этом очерке будут даны лишь некоторые отрывочные наброски эволюции подобных решений.

Вторая апория Зенона — апория дихотомии. Слово это означает последовательное разделе-

ние величины на две равные части, затем каждой из них снова на две части и т. д. Речь идет о некотором конкретном механизме деления протяженной величины. Пределом такого деления служит актуально бесконечное число частей.

Движущееся тело, прежде чем пройти весь свой путь, должно пройти половину пути, до этого $\frac{1}{4}$, до этого $\frac{1}{8}$ и т. д. Сумма ряда таких дробей никогда не будет равна единице, и, следовательно, сумма частей пути, пройденных телом, никогда не станет равной всему пути. В этой апории речь идет не столько о том, что движение тела к цели не может закончиться, сколько о том, что оно не может начаться. Мы ищем первую элементарную часть пути и не находим ее. Чтобы показать невозможность достижения цели, более естественно было бы искать последний элемент пути, т. е. излагать апорию так: тело проходит сначала половину оставшегося пути, потом четверть его и т. д. В этом случае мы не нашли бы *последнего* элемента пути.

Недостижимость последней точки бесконечного множества доказывается третьей апорией. Ахиллес не догонит черепаху. Прежде чем догнать ее, быстроногий герой должен оказаться в точке, где черепаха находилась в начале состязания. Но пока Ахиллес достигнет этой точки, черепаха продвинется дальше. Ахиллесу снова предстоит предварительно добежать до точки, куда продвинулась черепаха. Но пока Ахиллес достигнет этой точки, черепаха продвинется еще дальше. Ахиллесу снова предстоит предварительно добежать до точки, где черепа-

ха находится в данный момент, но за это время черепаха снова продвинется на некоторое расстояние. Сколько бы раз ни повторялась подобная ситуация, расстояние между Ахиллесом и черепахой уменьшится, но никогда не достигнет нуля. Таким образом, невозможно достичь последнего элемента непрерывного пути.

Кроме отсутствия первого и последнего элементов пути, мы встречаемся еще с одной особенностью актуальной бесконечности. На всем пути состязания Ахиллеса с черепахой число элементарных отрезков, пройденных Ахиллесом, совпадает с числом отрезков, пройденных черепахой, так как каждому элементу пути Ахиллеса соответствует элемент пути черепахи. Но Ахиллес проходит больший путь, чем черепаха, ведь он начал свой бег из пункта, отстоящего дальше от места встречи, чем начальный пункт пути черепахи. Таким образом, неравные отрезки содержат равные числа элементов.

В четвертой апории — апории стрелы — движение отрицается в особенно непосредственной форме. Летящая стрела неподвижна, она занимает неизменное положение в каждый момент. Сумма таких моментов — время движения стрелы. В течение этого времени стрела неподвижна в каждый момент, т. е. неподвижна в течение всего времени своего полета.

Следующая апория — «стадион» — исходит из относительности скорости. Скорость относительно одного тела не совпадает со скоростью относительно другого тела, если эти тела отсчета движутся одно по отношению к другому.

На стадионе расположен ряд неподвижных масс A_1, A_2, A_3, A_4 . Параллельно расположен

ряд масс B_1, B_2, B_3, B_4 , движущихся направо, а также ряд масс C_1, C_2, C_3, C_4 , движущихся налево. Движение всех этих масс складывается из неделимых элементов. В течение одного неделимого элемента времени масса проходит неделимое расстояние. В ином случае, при возможности разделить это расстояние можно было бы соответственно разделить на части и элементарный интервал времени. Однако пройденное данным телом элементарное расстояние зависит от выбора тела отсчета: оно будет различным в зависимости от того, к какому ряду — неподвижным массам A или движущимся массам B — отнесено движение масс C . По отношению к движущимся навстречу массам B массы C пройдут вдвое большее расстояние, чем по отношению к неподвижным массам A . Если по отношению к массам A массы C прошли элементарное неделимое расстояние, то по отношению к массам B они в течение того же элементарного, т. е. неделимого элементарного, времени пройдут два элементарных расстояния. Но два элементарных расстояния — это уже делимое пространство, соответственно и временной интервал делится на две части — одну часть, когда пройдено первое элементарное расстояние, и другую часть, когда пройдено второе элементарное расстояние. Следовательно, интервал времени будет делим или неделим в зависимости от того, к какому ряду отнесено движение тела.

Актуально бесконечное число временных интервалов умножается на два, если движение тела отнесено к иному по сравнению с предыдущим ряду тел отсчета. При этом число эле-

ментарных интервалов остается равным самому себе.

Таким образом, апория «стадион» указывает еще на одну особенность актуальной бесконечности. Из аперии Ахиллеса и черепахи вытекает, что бесконечное число обладает парадоксальным свойством: если от числа элементов отрезка (пусть Ахиллеса) отнять некоторое второе число таких элементов (пусть Ахиллеса до исходного пункта движения черепахи), то число не изменится (разность — путь черепахи — состоит из того же числа элементов, что и путь Ахиллеса). Иными словами, $\alpha - \beta = \alpha$. Теперь из аперии «стадион» мы узнали, что $2\alpha = \alpha$.

Из указанных свойств актуальной бесконечности следует весьма существенный вывод. Мерой отрезка, состоящего из актуально бесконечного числа непротяженных точек, не может быть число точек (если не обобщить и не модифицировать существовавшего с древности понятия меры). Оно бесконечно в каждой части отрезка и не меняется, если отрезок разделить или отнять от него меньший отрезок. Мера отрезка не является суммой мер его элементарных частей. Поэтому меру отрезка, состоящего из бесконечного множества точек, устанавливают иначе — определяют положение концов отрезка относительно тел отсчета и затем сопоставляют числам, указывающим положение концов отрезка, некоторое положительное число, которое мы называем расстоянием между ними, или длиной отрезка. Такое определение меры отрезка называется относительным мероопределением. Если бы число частей отрезка не могло превысить любое конечное

число, мы могли бы считать число частей меры отрезка. Подобное мероопределение является абсолютным мероопределением, оно не требует тел отсчета.

Здесь и находится самый кардинальный пункт связи между бесконечностью и относительностью. Вместе с тем этот пункт является самым существенным для современного развития теории относительности. Мы уже упоминали о нем, а подробнее остановимся на нем позже, в связи с идеями Римана.

Сейчас относительность мероопределения и тот факт, что мера отрезка не совпадает с суммой актуально бесконечного множества его элементов, не кажутся парадоксальными. Но в древности метрические соотношения конечных величин переносили на бесконечные величины, не обобщая метрических понятий, не расширяя таких понятий, как число, не присваивая числу неизвестных ранее свойств, выражающихся в формулах $\alpha - \beta = \alpha$, $2\alpha = \alpha$ и т. д. В этом исходный пункт парадоксов движения.

3

Космология Аристотеля, в которой изотропная Вселенная была представлена чрезвычайно стройной конструкцией, отошла от идеи однородности и бесконечности пространства, фигурировавшей в космологии Демокрита. Понимание изотропности пространства, отсутствия абсолютного «верха» и «низа», возможности существования антиподов было куплено ценой от-

каза от однородности пространства; последнее приобрело центр — Землю с обращающимися вокруг нее небесными сферами, причем наиболее удаленная сфера служит границей конечного мирового пространства.

Мы увидим вскоре, что эта картина неоднородной, конечной, изотропной Вселенной тесно связана с аристотелевой трактовкой бесконечности и лежит в основе понятий абсолютного и относительного движения у Аристотеля.

Начнем с понятия бесконечности как результата сложения конечных величин. Вводя это понятие, Аристотель сразу же отбрасывает бесконечность пространства. Но время бесконечно. С указанным различием связаны понятия актуальной и потенциальной бесконечности. Аристотель отвергает возможность чувственно воспринимаемого бесконечного по размерам тела (актуально бесконечного тела), но допускает существование потенциальной бесконечности. Ее нельзя понимать в том смысле, в каком, например, статуя потенциально содержится в меди. Такой взгляд означал бы, что потенциальная бесконечность в конце концов превращается в актуальную. Потенциально бесконечное все время остается конечным и все время меняется, причем этот процесс изменения может продолжаться как угодно долго.

«Вообще говоря, бесконечное существует таким образом, что всегда берется иное и иное, и взятое всегда бывает конечным, но всегда разным и разным»¹.

¹ А р и с т о т е л ь. Физика, 206а. Перевод В. П. Карпова. М., 1936, стр. 52.

Актуальная бесконечность — это бесконечные размеры тела в тот момент, когда оно фигурирует как чувственно воспринимаемый объект. Иными словами, это бесконечное пространственное расстояние между пространственными точками, связанными в единый объект в некоторый момент времени. Это чисто пространственное одновременное многообразие. Таким одновременным многообразием бесконечных размеров реальное тело, по мнению Аристотеля, не может быть. Реальным эквивалентом бесконечности может быть бесконечное движение, процесс, происходящий в бесконечном времени и состоящий в бесконечном возрастании некоторой величины, все время остающейся конечной. Таким образом, реальным эквивалентом обладает понятие потенциальной бесконечности, протекающей во времени. Нет бесконечного «теперь», но есть бесконечная последовательность конечных «теперь».

Итак, аристотелевская концепция потенциальной бесконечности и отрицание актуальной бесконечности связаны с высказанным в «Физике» и в других трудах Аристотеля представлением о пространстве и времени и их связи. Актуальная бесконечность — это некоторая обладающая реальным физическим бытием величина, достигшая бесконечного значения в *данный момент*. Если выражение «данный момент» понимать буквально, то под актуально бесконечным объектом следует подразумевать мпр, существующий в течение мгновения, иначе говоря — пространственное многообразие. Аристотель, говоря об актуальной бесконечности, имеет обычно в виду бесконечное пространство, вернее бесконечную протяженность реального,

чувственно постигаемого тела. Отрицание актуальной бесконечности связано с физической идеей — отрицанием бесконечности мира в пространстве и бесконечности самого пространства. Напротив, потенциальная бесконечность развертывается во времени. Каждое конечное значение возрастающей величины связано с некоторым «теперь», и это значение, оставаясь конечным, меняется по мере того, как меняется «теперь».

Конечность пространства и существование центра Вселенной создают опору для системы абсолютных мест и понятия абсолютного движения. Вообще для Аристотеля характерно представление о движении, происходящем всегда из чего-то во что-то, направленном из естественного начала движения к естественному концу его. Эти «что-то» и определяют движение. Они могут быть связаны с качественными и субстанциальными изменениями. Как известно, Аристотель включал в понятие движения наряду с пространственным движением (φορῆ) количественное движение, т. е. рост (αὔξησις), и качественное изменение (ἀλλοιωσις). Для определения исторических прообразов тех современных концепций, где исходным понятием служат трансмутации элементарных частиц, существенно включение в понятие движения субстанциального движения, т. е. возникновения (γένησις) и уничтожения (φθορά).

Но независимо от качественных изменений, возникновения и уничтожения тела пространственное движение может иметь абсолютное начало отсчета, если тело движется к своему естественному месту. Естественное место тя-

желых тел, находящихся внутри ближайшей к Земле лунной сферы,— Земля. Когда тяжелое тело падает на Землю, оно стремится к своему естественному месту, где достигает абсолютного покоя. Таким образом, точки на радиальной прямой, вдоль которой тело движется к своему естественному месту, неравноправны, пространство вдоль этой прямой неоднородно, и движение имеет абсолютный характер.

Какое же *относительное* движение может иметь место в пространственно-ограниченной и бесконечной во времени Вселенной Аристотеля? Сказанное раньше позволяет задать тот же вопрос в иной форме: где во Вселенной Аристотеля можно найти прообразы однородного пространства и бесконечного движения?

В конечном пространстве бесконечным может быть, например, циклическое движение, а отсутствие выделенных точек на траектории движущегося тела заставляет думать о круговом движении. В космологии Аристотеля естественное круговое движение присуще неразрушаемым и неуничтожаемым телам надлунного мира. На круговых орбитах, окружающих Землю, точки равноправны и движение относительно. Если бы у Аристотеля было понятие пространства, противостоящее понятию вещества, то можно было бы сказать: концентрические сферы, окружающие центр Вселенной,— это исторический прообраз *однородного искривленного пространства*. Но, несмотря на отсутствие у Аристотеля *прямых* эквивалентов такого чисто современного понятия, оно позволяет нам увидеть внутреннюю, неявную, но несомненную логическую связь между ограниченной Вселенной

Аристотеля и аристотелевыми концепциями пространства, времени и бесконечности.

В искривленном пространстве с положительной кривизной любое расстояние между точками ограничено максимальным значением. На поверхности сферы движение не наталкивается на ограничивающую его последнюю точку, но две различные точки не могут находиться одна от другой на расстоянии, превышающем половину геодезической окружности. Конечные размеры Вселенной Аристотеля, конечная длина радиальных траекторий тяжелых тел и ограниченность расстояний на кривых поверхностях концентрических сфер мироздания исключают реальное существование сколь угодно больших пространственных расстояний. Вселенная и все составляющие ее тела не могут быть физическими прообразами бесконечности. Следовательно, бесконечность как *бесконечное бытие*, как нечто достигнутое и существующее в данный момент не может существовать. Но это не значит, что понятию бесконечности не соответствует реальный прообраз. *Движение* — именно круговое движение — может быть бесконечным, потому что время у Аристотеля, в отличие от пространства, однородно, не имеет начального и конечного моментов. Повторение одной и той же пространственной траектории в течение бесконечного времени позволяет измерять время, делить его на равные конечные части, которые бесконечно прибавляются к уже отсчитанному конечному числу конечных интервалов.

Обратимся теперь к бесконечности как результату деления конечной величины. В отличие от пространства Эпикура пространство Ари-

стотеля непрерывно и бесконечно делимо. Поэтому Аристотель мог сопоставить пространство потенциальной бесконечности. Но служит ли бесконечно делимое тело прообразом *актуальной* бесконечности? Может ли вообще существовать в природе актуально бесконечная величина? Чтобы ответить на вопрос, имелись ли в учении Аристотеля об абсолютном и относительном движении прообразы актуальной бесконечности как результата деления конечных величин, нужно предварительно остановиться на проблеме интегральных закономерностей в перипатетической космологии и физике.

В картине непрерывного вещества и непрерывного движения Аристотель фактически исключал закономерности, действующие от точки к точке и от мгновения к мгновению. Поэтому бесконечное деление конечной величины лишалось физического смысла. Движение тела по круговой орбите определяется (негативным образом, в смысле отсутствия каких-либо различий в поведении тела) однородностью пространства вдоль орбиты, равноправием точек. Но для Аристотеля в точке не только ничего не происходит, но и ничего не может произойти. Движение тела, падающего на Землю, определено неоднородностью пространства в радиальном направлении, существованием выделенных, естественных мест. Но определяющие (в данном случае позитивным образом) движение тела суммарные, общие закономерности остаются не расчлененными на закономерности, действующие от точки к точке. Для Аристотеля каждый процесс идет из «чего-то» во «что-то» и эти «что-то» разделены конечным отрезком: в точ-

ке («здесь») и в мгновении («теперь») ничто происходить не может. Понятия скорости в точке или мгновенной скорости, мгновенного ускорения и т. д. чужды динамике Аристотеля.

Из сказанного следует, что у Аристотеля не могло быть физических эквивалентов актуальной бесконечности не только как результата сложения, но и как результата деления конечных величин. Отсюда простое опровержение парадоксов Зенона: первой точки движения (апория стрелы) и его последней точки (апория Ахиллеса и черепахи) нет, потому что путь движущегося тела вообще не состоит из точек, а время движения из мгновений.

Уже в эллинистических государствах начался процесс преобразования научной картины мира, включавший возврат к идее бесконечного неискривленного пространства. В частности, этот возврат опирался на развитие геометрии. Постулаты Эвклида соответствуют бесконечному неискривленному однородному пространству Ньютона, а если говорить о прошлом — пространству Демокрита в большей степени, чем конечной и неоднородной Вселенной Аристотеля. В общем наука эволюционировала в сторону идеи однородного непрерывного пространства, но вместе с тем появлялись все новые концепции минимальных протяженных элементов пространства и времени.

4

Классическое ньютоново представление о пространстве исходит из его однородности. Однородность пространства — стержневая и исход-

ная физическая идея XVII в., последовательно развивавшаяся в трудах Коперника, Бруно, Галилея, Декарта и, наконец, Ньютона. Ее развитие разрушило аристотелев мир — изотропный, но неоднородный, с границами, центром и системой естественных мест.

Коперник заменил естественные движения, направленные к Земле как центру мирового пространства, естественными движениями, направленными к Земле как телу, движущемуся в пространстве. Далее в XVII в. отказались от неподвижного Солнца в центре мира и объявили Вселенную бесконечной. Тем самым мировое пространство стало однородным, а движение лишилось естественной системы отсчета.

Галилей дал первый исторический прообраз превращения позитивно-определенной закономерности в негативно-определенную, представления о переменной скорости в представление о постоянной скорости. Движение точки земной поверхности при вращении Земли или обращение Земли вокруг Солнца Галилей считает неизменным состоянием, т. е. движением по инерции. Таким образом, космическое движение по инерции криволинейно. Галилей отказывается объяснить круговую орбиту Земли притяжением ее к Солнцу. Можно проследить непрерывную линию развития этой идеи, идущую от естественных круговых движений Аристотеля. Криволинейное космическое инерционное движение, исключавшее при своем объяснении взаимодействие тел, остававшееся инерционным движением, не требующим *физических* причин, переносит вопрос в сферу свойств пространства как такового. Подобная геометризация, уподобление движения по замкнутой кривой движению

без физического агента, движению, заданному свойствами пространства, была основой релятивирования движения точки земной поверхности. Уже у Декарта движение по инерции рассматривается как прямолинейное, и, наконец, у Ньютона достигает относительного завершения картина бесконечного однородного и изотропного, всюду неискривленного пространства. В силу его однородности изменяется понятие абсолютного движения. Пока речь шла о неоднородном пространстве с центром и границами, абсолютное движение было *кинематическим* понятием: тело испытывает абсолютное движение, если изменяется расстояние между телом и абсолютно неподвижными границами и центром мирового пространства или естественным местом тела. В однородном пространстве критерий абсолютного движения иной — *динамический*: тело движется в абсолютном смысле, если в нем возникают силы инерции. Это *локальный* критерий; он порывает связь с той или иной абсолютной системой естественных мест; ньютонова теория абсолютного движения рассказывает о событиях, происходящих на бесконечно малых элементах пути движущейся частицы. Таково ускорение, которое может быть определено в общем случае лишь как мгновенный процесс в точке, как предел отношения приращений скорости и времени. Ускорение вызывает силы инерции, демонстрирующие абсолютный характер ускоренного движения. Силы инерции не возникают при отсутствии ускорений, прямолинейное и равномерное движение не дает локальных динамических эффектов; смысл такого

движения сводится к изменению расстояния между данным телом и произвольно выбранным телом отсчета, прямолинейное и равномерное движение является относительным.

Локальный критерий абсолютного движения тесно связан с идеей относительности. Если локальные эффекты нарушения единообразного хода событий (например, единообразной однозначной связи между взаимодействиями тел и силами — появление сил инерции), и только они, свидетельствуют об абсолютном характере процесса, то при отсутствии таких эффектов процесс нельзя считать абсолютным. Если ускоренное движение демонстрирует свой абсолютный характер появлением сил инерции, то при отсутствии сил инерции не остается никакого абсолютного критерия движения. Такое соотношение легко аксиоматизируется, т. е. приобретает вид формальной схемы, оставляющей возможность только экспериментального решения вопроса, подходит ли данный физический процесс под эту схему. Если внутренний эффект процесса (например, движения) зависит только от его изменения (ускорения), то мы не можем судить о самом процессе по внутренним эффектам. Уже в XVII—XVIII вв. была создана универсальная математическая схема, очень рельефно демонстрирующая такое соотношение. Неопределенный интеграл не может быть однозначно указан по производной: он включает произвольную аддитивную постоянную. Это наиболее абстрактная схема соотношения между абсолютным движением с локальным критерием и относительным движением. Зная ускорение — производную по времени от скоро-

сти, нельзя получить однозначную величину скорости; к ней может быть прибавлена произвольная постоянная скорость, т. е. может быть произведено произвольное преобразование от одной галилеевой инерциальной системы к другой, и это преобразование не отразится на ускорениях и их эффектах. Именно это и доказывалось на всех страницах галилеева «Диалога», где речь шла о движении по инерции. Если бы оказалось, что движение по инерции дает некоторый внутренний эффект (хотя бы не механический, а физический: например, изменилась бы скорость света в опыте Майкельсона), ничего нельзя было бы сказать о *положении* движущихся тел: преобразование от одной неподвижной системы координат к другой неподвижной системе (т. е. прибавление произвольного пространственного расстояния при интегрировании скорости по времени) не изменило бы эффектов движения.

Отсутствие внутренних эффектов движения по инерции означает однородность пространства, проявляющуюся в каждой его точке в единообразном действии некоторого закона. Однородность ньютонова пространства гарантируется не последовательным прибавлением все новых и новых конечных расстояний к пройденному пути без встречи с границами пространства и не безграничным делением пройденного пути на все меньшие конечные элементы, а естественнонаучным законом, сопоставляющим множество положений частицы множеству мгновений, независимостью вида функции, связывающей пространство со временем, от пространства как такового, зависимостью вида этой

функции только от взаимодействия тел. Мировое пространство всюду характеризуется однозначной зависимостью ускорения от сил или (негативное определение, нулевой случай той же зависимости) отсутствием ускорений при отсутствии сил. В этом и состоит актуальная бесконечность пространства как заданного определенным условием множества точек. Отсюда вытекает и классическая относительность движения инерциальной системы: в ней не нарушается определяющая пространство как актуальную бесконечность однозначная зависимость ускорений от взаимодействий. Нарушение такой однозначной зависимости каждый раз прорывает рамки классического релятивизма, свидетельствует об абсолютном ускорении системы.

Пространство Ньютона — это область определения функции, связывающей пространство со временем, а физические величины (в общем случае различные), характеризующие точки пространства, — составляющие скорости движущихся в пространстве частиц, производные координат по времени. Бесконечность множества точек, в которых определены скорости, состоит не в *возможности* неограниченного увеличения их числа, а во всеобщем характере закона, управляющего движением частицы. Это новое понятие актуальной бесконечности, отличающееся от античного понятия. Закон, указывающий вид функции, связывающей координаты и время, как бы воплощается в актуально бесконечном множестве точек, в которых действует один и тот же закон, определяющий ускорения тел по заданным взаимодействиям.

Существование такого множества — одна из основ ньютоновой механики. Важно отметить, что это множество трехмерно. Пространство как таковое представляет собой актуальную бесконечность пространственных точек, заданную уже в данный момент поведением частицы в каждой точке. Предпосылкой такого взгляда служит представление о мгновенной передаче взаимодействия. С утратой этого представления уже нельзя было говорить о множестве пространственных точек как о заданном в данный момент бесконечном множестве. Картина мира стала картиной четырехмерной актуальной бесконечности.

5

Понятие бесконечного множества, заданного определенным законом, разорвало связь актуальной бесконечности с противоречивым понятием исчисленного неисчислимого множества. Тем самым были преодолены (чтобы смениться новыми!) античные парадоксы движения.

Уже в XVII в. появилось представление о законе, однозначно связывающем бесконечные физические многообразия и выражающемся в функциональной зависимости физических величин с бесконечной областью определения функции. В XIX в. Гегель подошел к новому понятию бесконечности, а Энгельс выразил его рациональным образом.

Гегель высказал свое представление о бесконечности в редкой для его работ ясной форме. Он это сделал в связи с критикой антиномий

Капта. Антиномии Канта были антиномиями актуальной бесконечности и в сущности повторяли апории Зенона. Кант хотел использовать противоречия актуально бесконечного пространства и времени для доказательства априорного характера этих категорий. Он определяет пространство и время как актуально бесконечные и затем показывает противоречивость актуальной бесконечности, невозможность ее реального существования. Мы вспомним только одну из антиномий, относящуюся к бесконечности мира во времени.

«В самом деле, — пишет Кант, — если мы допустим, что мир не имеет начала во времени, то до всякого данного момента времени протекла вечность и, следовательно, протек бесконечный ряд следующих друг за другом состояний вещей в мире. Но бесконечность ряда именно в том и состоит, что он никогда не может быть закончен путем последовательного синтеза. Следовательно, бесконечный протекший ряд в мире невозможен, значит начало мира есть необходимое условие его существования, что и требовалось доказать»¹.

Разумеется, Кант получает лишь те противоречия, которые он вложил в первоначальное определение бесконечности. В антиномии времени бесконечность существования мира означает наличие бесконечного *числа* прошедших лет. Если, подобно древним, не расширять понятие числа при переходе к бесконечности, то это понятие требует начала отсчета, первого

¹ К а н т. Критика чистого разума. Перевод Н. О. Лосского. Пг., 1915, стр. 262.

члена, начального момента существования мира. Но понятие бесконечности исключает существование такого начального момента. Дело не изменилось бы, если бы мы рассматривали существование мира в будущем. Проблема осталась бы той же и при переходе к актуальной бесконечности множества непротяженных элементов времени: тогда выявилась бы принципиальная тождественность антиномий Канта и парадоксов Зенона. Все дело в несовместимости определений актуальной бесконечности как чего-то сосчитанного и в то же время как объекта, который, будучи бесконечным, не может быть сосчитан.

Но наука нашла иной путь к понятию актуальной бесконечности мира и иное понимание актуальной бесконечности. Этот путь и это понимание были указаны в гегелевской критике антиномий Канта и в гегелевском понятии «истинной бесконечности».

Неограниченный переход ко все новым конечным величинам, простое прибавление тождественных объектов Гегель называл «дурной бесконечностью». Она противостоит конечным величинам как нечто совершенно изолированное от них, она не влияет на конечные величины, не взаимодействует с ними, не определяет их. Переходя от одного числа к другому в бесконечном ряде натуральных чисел 1, 2, 3, ..., мы рассматриваем бесконечность как нечто внешнее, абсолютно оторванное от каждого элемента этого ряда. Бесконечное время как такое представляет собой «дурную бесконечность», бесконечный переход от одного конечного «теперь» к новому конечному «теперь».

«Точно так же обстоит дело с пространством, бесконечность которого доставляет любящим назидания астрономам материал для многих бессодержательных и напыщенных декламаций»¹.

Это неожиданное нападение служит началом одного из тех ясных и остроумных отрывков, на которых читатель отдыхает от темных и тяжеловесных периодов «Науки логики». Гегель смеется над традиционным представлением о бесконечности, недоступной мышлению в силу своего величия. В «дурной бесконечности» перед нами «то постоянное выхождение количества и, в частности, числа за пределы самого себя, которое Кант называет страшным, но в котором страшна, пожалуй, лишь скука, вызываемая в нас никогда не прекращающимся поочередным полаганием границы и уничтожением ее, так что в конце концов не двигаешься с места»².

Истинная бесконечность отнюдь не находится за пределами конечного. Для ее определения мы должны отказаться от последовательного нагромождения колоссальных цифр, областей или сроков, поражающих ужасом воображение и мысль, по мнению большинства философов, и навевающих страшную скуку, по словам Гегеля. Истинная бесконечность не противостоит конечному как нечто изолированное, отдельное от него. Напротив, она-то и определяет истинный смысл конечного, его соотношение с дру-

¹ Гегель. Сочинения, т. I. М.—Л., 1929, стр. 161.

² Там же, стр. 180.

гим конечным объектом, его переход в иные объекты.

В таком определении *истинной бесконечности* уже содержится зерно нового понятия *актуальной бесконечности* и нового, более общего и широкого понятия *числа*.

В заметке по поводу доклада Негели «Границы естественнонаучного познания» Энгельс говорит, что познание конечных предметов требует представления о бесконечности³. Мы «констатируем конечное в бесконечном». Естественнонаучный закон констатирует, например, что при известных условиях хлор и вода соединяются со взрывом, «а раз мы это знаем, то мы знаем также, что это происходит *всегда* и *повсюду*, где имеются налицо вышеуказанные условия, и совершенно безразлично, произойдет ли это один раз или повторится миллионы раз и на скольких небесных телах»⁴. Всеобщность естественнонаучного закона означает, что он относится к бесконечному множеству случаев. Бесконечность этого множества — актуальная бесконечность, но, разумеется, здесь и речи нет о сосчитанной бесконечности. В естественнонаучном законе сопоставляются два множества: бесконечное множество некоторых механических, физических, химических и других условий (например, определенных распределений тяжелых масс) и множество величин, зависящих от этих условий (например, множество сил, действующих между тяжелыми массами).

³ См. Энгельс. Диалектика природы. М., 1941, стр. 186—187.

⁴ Там же, стр. 188.

Энгельс говорит, что естественнонаучный закон осуществляется *всегда* и *везде*, где налицо причины, вызывающие указанные законом следствия. Это «всегда и везде», независимость закона от изменения пространственных координат и времени, постоянство действия закона представляют собой пока еще качественное, исходное понятие для ряда фундаментальных количественных понятий — преобразования, инвариантности, относительности.

Если речь идет о количественном законе, мы можем представить его в виде кривой. Пусть перед нами кривая, изображающая движение частицы. Каждая точка кривой соответствует определенному «здесь» и «теперь». Закону движения частицы соответствует определенный вид кривой. Когда мы рассматриваем *вид* кривой, последняя фигурирует в качестве актуально бесконечного множества точек. Но это не просто повторение точек — «дурная бесконечность» Гегеля, это актуальная бесконечность, определяющая поведение тела в каждом «здесь» и «теперь». Перед нами синтез интегрального и дифференциального представления о движении. Такой синтез прорывает аристотелевскую нерасчлененную непрерывность движения, так как каждая точка кривой приобретает определенный физический эквивалент. Благодаря этому кривая становится множеством точек — актуально бесконечным множеством.

Из сказанного следует, что кривую можно рассматривать двояким образом. Частица проходит через точку, служащую ее местопребыванием в одно мгновение, затем через точку, слу-

жащую ее местопребыванием в другое мгновение, и т. д. Чем точнее мы хотим определить траекторию частицы, тем большее число точек мы должны зафиксировать в качестве пройденных мгновенных местопребываний частицы. Но число это остается все время конечным, и мы можем здесь говорить лишь о потенциальной бесконечности ряда конечных чисел. Можно рассматривать кривую как множество точек, заданное через *содержание* изображенного кривой закона. Например, кривая, по которой будет двигаться частица в заданном поле, определяется не как предел растущего числа регистраций последовательных положений частицы, а сразу, исходя из характера поля, т. е. из интегрального закона, связывающего множество местопребываний частицы с множеством моментов времени. Таким образом, кривая рассматривается в вариационных задачах. У Аристотеля актуально бесконечным называется чувственно воспринимаемое тело, бесконечное уже в момент восприятия. Траектория частицы, определенная по содержанию изображенного ею закона, не является телом, и в этом смысле задание траектории пока не разбивает собственно аристотелевского отрицания актуальной бесконечности. Но мы увидим в следующем разделе, что теория поля как физической реальности превращает траекторию частицы в нечто реальное, физически существующее и уже определенное начальными условиями и пространственным распределением значений напряженности поля до фактического движения частицы по определенной таким образом траектории.

Мы встречаем в математике второй поло-

вины XIX в. весьма фундаментальный аналог представления о естественнонаучном законе, однозначно связывающем элементы одного множества с элементами другого множества. Речь идет о теории Кантора. В своих работах, положивших начало новому периоду в развитии учения о множествах, Кантор говорит о мощности множеств. Множество задано не перечислением элементов, а по своему содержанию. Если каждому элементу множества может быть взаимно однозначным образом сопоставлен элемент другого множества, то эти множества равномощны. Кантор обобщает понятие числа и вводит числа, измеряющие мощность различных актуально бесконечных множеств. Так называемые трансфинитные кардинальные числа, измеряющие мощность бесконечных множеств, отличаются от обычных чисел. Трансфинитное число остается равным себе при прибавлении или вычитании из него какого-нибудь не равного нулю числа, например единицы, или при умножении на какое-нибудь не равное единице число, например на два. Иначе говоря, $\alpha - \beta = \alpha$ (т. е. часть равна целому) и $2\alpha = \alpha$. Мы видели, что эти свойства актуальной бесконечности прямо вытекают из апорий Зенона.

По-видимому, нет нужды подчеркивать связь актуальной бесконечности Кантора с истинной бесконечностью Гегеля. Истинная бесконечность Гегеля представляет собой логическую схему реальных закономерностей, связывающих многообразия физических свойств, а канторовская актуальная бесконечность — математическая схема таких законо-

мерностей. Гегелевская логическая схема истинной бесконечности и канторовская математическая схема актуальной бесконечности представляют собой различные аспекты пространственно-временного мира, в котором всеобщие законы связывают друг с другом конечные физические величины, поднимая их тем самым до ранга бесконечности, позволяют рассматривать их как элементы бесконечных множеств, как отдельные конечные объекты, подчиненные всеобщим законам, устанавливающим соотношения бесконечных многообразий. Актуальная бесконечность Кантора связана с истинной бесконечностью Гегеля, она представляет собой математический эквивалент этого понятия; ее физическим прообразом служит всеобщий естественнонаучный закон.

Даже самое беглое изложение связей между понятиями бесконечности и относительности позволяет думать, что и в данном случае крупное обобщение учения о бесконечности, каким является теория Кантора, имело существенное значение для развития представления об относительности движения. Здесь действительно имеется некоторая существенная связь, правда неявная и обнаруживаемая лишь ретроспективно в свете идей Эйнштейна.

Обобщение понятия числа сделало более ощутимым тот известный с древности факт, что в актуально бесконечном множестве число точек не может служить мерой множества. Поэтому мера в таком множестве определяется не непосредственным счетом, а мероопределением, отысканием длины отрезка по заданным разностям координат его концов. В древности этого,

разумеется, не знали, но апория «стадион» уже показывала связь относительности скорости с отсутствием естественной меры проходимого отрезка, если он состоит из актуально бесконечного числа элементов. Сейчас мы знаем, что метрика пространства связана с его бесконечностью или конечностью, что характер бесконечного пространства в этом смысле указывает на характер мероопределения. Все эти построения имеют дело с заданием общих, интегральных свойств бесконечных множеств, т. е. с актуальной бесконечностью, потерявшей связь с традиционным противоречивым образом сосчитанного, законченного бесконечного ряда.

Физика XIX в., со своей стороны, подошла к понятию бесконечного множества физических величин одной мощности с множеством точек пространства при однозначном соответствии элементов обоих множеств. Таким понятием является поле.

6

Пространство может быть позитивно определено как актуальная бесконечность при существовании в этом пространстве силового поля. Точки пространства становятся физически различными, поскольку в них материальная частица ведет себя различным образом. Но причина различий — не какая-либо неоднородность пространства, а взаимодействия тел, т. е. силовые поля. В этом смысле понятие поля сил (подчеркнем; поля *реальных* сил, это весьма существенно) освобождает пространство само по себе от ответственности за различия в поведении тел.

Поэтому физическим прообразом актуальной бесконечности служит, собственно, не поле скоростей или поле ускорений, вообще не множество, заданное законами движения, а силовое поле, множество значений напряженности поля.

Здесь, как уже говорилось, существенным этапом в развитии физической интерпретации актуальной бесконечности была идея реальности поля, выросшая в электродинамике. В концепциях Фарадея и Максвелла напряженность поля — это не только определенная сила, действующая на единичную магнитную массу или единичный заряд, *если* такие окажутся в данной точке. В указанных концепциях напряженность поля выступает как состояние среды, не зависящее от появления магнитной массы или электрического заряда.

Напомним то, что уже говорилось о двух эквивалентных, но принципиально различных методах, применяемых в классической аналитической механике для определения траектории движущейся материальной точки, методах, которым соответствуют два понятия бесконечно-го множества точек. Одна из них — множество точек, из которых *состоит* траектория. Другое — множество точек, через которые частица *проходит*. Дифференциальные уравнения движения частицы определяют траекторию частицы как множество точек (соответствующих предельным отношениям динамических переменных), через которые проходит частица. Если спросить, какой реальный физический процесс описан уравнением движения частицы при данных начальных условиях и при заданных полях, то ответ будет таков: уравнение описывает движущуюся

частицу, каждое произвольно взятое положение которой соответствует уравнению. Таких произвольно взятых фиксированных положений — всегда конечное число, но оно может беспрельдно увеличиваться. Траектория движущейся частицы может быть определена и иначе — сразу, в целом, интегральным образом. В *каждой* (не в любой, а в каждой!) точке этой траектории существует определенное значение напряженности поля (именно *существует* реально, физически существует как состояние поля-среды). Траектория как бы переходит при таком ее представлении из механики в теорию поля, становится понятием не механики частицы, а теории тяготения, электростатики, электродинамики и т. д. На траектории в момент, соответствующий начальному положению, частицу *уже ожидают* напряженности поля, определяющие ускорения, которые частица здесь получит. Распределение напряженности поля задано до движения частицы. Координаты частицы при этом являются сами по себе лишь абстрактными, только предварительно вычисленными величинами, которым пока ничто реальное не соответствует, а напряженности поля уже существуют как состояния среды. Поэтому именно теория поля как физической среды, представление о распределении реальных состояний среды — значений напряженности поля на траектории, позволяет рассматривать эту траекторию как нечто физически реальное *до* движения частицы.

Мы можем рассматривать бесконечное множество значений напряженности поля в точках кривой как нечто бесконечное и вместе с тем

существующее в данный момент, т. е. как актуально бесконечное. Выше, при изложении проблемы бесконечности в ньютоновой механике, уже было сказано, что распределение значений напряженности поля и, следовательно, ожидающих частицу воздействий можно считать бесконечным бытием, а не бесконечным движением, если поле распространяется с бесконечной скоростью, если мы можем говорить о некотором едином для бесконечного множества точек мгновенном распределении значений напряженности. Без этого пространственная кривая не может рассматриваться как мгновенное бесконечное множество точек, она не обладает одновременно-бесконечным бытием. Без этого, следовательно, мы не можем говорить об актуально бесконечной кривой, на которой реально распределены значения напряженности поля.

Поле, как это выяснилось для электромагнитного поля в результате работ Максвелла во второй половине XIX в., а для других полей — позже, распространяется с конечной скоростью. Но все дело в том, что скорость v движения частицы и скорость c распространения поля были несоизмеримы. По сравнению с v скорость c настолько велика, что ее можно было принять за бесконечную скорость. Это соотношение $v \ll c$ — основное соотношение, определяющее область применения механики мгновенных дальностей — позволяет ввести указанное выше определение кривой как актуальной бесконечности.

Все это относится к бесконечности как результату деления конечной величины. Такая

бесконечность поля на каждом отрезке силовой линии имеет непосредственное отношение к проблеме относительности. Она исключает естественную метрику вдоль силовых линий, заставляет вводить те методы мероопределения, которые лежат в основе понятия инварианта метрического пространства.

Теория поля реальных сил резко разграничивает закономерности движения под действием сил и закономерности свободного движения. Первые сводятся к взаимодействию тел, вторые — к свойствам самого пространства. Прямолинейное и равномерное движение не требует физического агента и если чем-либо объясняется, то только свойствами пространства — его однородностью. Реальное поле — взаимодействие тел — берет на себя всю вину лишь за ускорения. Но фиктивные силы не могут быть в пределах классической теории объяснены взаимодействием тел и должны быть отнесены за счет пространства. Именно так и поступил Ньютон при объяснении природы центробежных сил и сил инерции вообще. Появление центробежных сил во вращающемся ведре и вообще всякое нарушение пропорциональности между реальными силами (взаимодействиями тел) и ускорениями в движущейся с ускорением системе не может получить в механике Ньютона объяснения, если не сослаться на движение системы по отношению к пространству, — не к другим телам, а к самому пространству как таковому. Если представить себе, что пространство искривлено и тело не отклоняется от свойственных такому искривленному пространству геодезических линий, мы снова

приходим к однородному, но на этот раз искривленному пространству.

В течение XIX в. теория поля все ближе подходила к понятиям пространственной кривизны и движения по геодезическим линиям искривленного пространства. С другой стороны, в геометрии выросло учение о кривых поверхностях. Но о выяснении физической природы искривления пространства не было и речи. Электрические и магнитные поля можно рассматривать как искривления пространства только условно. В электрическом или магнитном поле отчетливо разграничивается движение заряда, обязанное взаимодействию с другим зарядом — источником поля, и свободное движение, обязанное формой своей траектории пространству как таковому — неискривленности последнего. Только в случае гравитационного поля, единообразно искривляющего траектории всех тел, можно отождествить действие поля с искривлением пространства как такового. Подобное отождествление лежит в основе общей теории относительности Эйнштейна, и о нем речь впереди. Сейчас отметим, что в конце XIX в. уже были сделаны попытки геометризации поля, т. е. представления сил как искривлений пространства.

Они преемственно связаны с развитием вариационных принципов механики. Вариационные принципы выражают интегральные закономерности, которым соответствуют дифференциальные законы, управляющие поведением тела от мгновения к мгновению и от точки к точке. Якоби и мыслители середины столетия сблизили интегральные закономерности движе-

ния частицы или системы в некотором поле с геометрическими законами, указывающими направление геодезических линий на поверхностях различной кривизны. Герц в «Принципах механики», продолжая эту линию в развитии вариационных принципов, вообще отказался от понятия силы и отождествил движение тела в силовом поле со свободным движением в пространстве определенной кривизны. Для Герца движение в силовом поле — это движение по кривой, которую можно считать геодезической, задав определенную кривизну пространства. Тем самым движение в силовом поле приравнивается движению по инерции, вернее, различие между ними сводится к различию между «плоским» и искривленным пространством.

Но этот путь в общем случае не может привести к устранению силового поля, к превращению его в чисто геометрическое понятие. Только в случае гравитационного поля, действующего единообразно на все тела, искривляющего в одной и той же мере траектории всех тел, можно говорить о воздействии источника поля на пространство, которое своей структурой объясняет вид траекторий движущихся тел. В случае гравитационного поля *непосредственным* прообразом актуальной бесконечности оказывается пространство (впрочем, четырехмерное), а в случае других полей *непосредственным* прообразом актуальной бесконечности служит не множество точек, а множество значений напряженности поля в этих точках. Точки получают опосредствованным образом физическую осязаемость и становятся элементами актуально бесконечного пространства.

Если движущееся тело следует геодезической линии пространства заданной постоянной кривизны, то интегральные условия определяют поведение тела в каждой точке негативным образом и, таким образом, позволяют считать данное пространство однородным, а движение в этом пространстве — относительным. Таково, согласно общей теории относительности, движение тела в гравитационном поле.

Итак, «заданное», «определенное интегральными закономерностями», «актуально бесконечное» пространство — это пространство, в котором поведение тела подчинено вариационным принципам или, конкретнее, принципу наименьшего действия. Теперь можно обойтись без указанных выше псевдонимов. При изложении старых концепций они были необходимы — эволюция научных понятий обычно и состоит в их освобождении от первоначальной сравнительно неопределенной формы.

Для интегральных (напомним об условности этого термина применительно ко времени, предшествующему созданию аналитической механики) определений, фигурировавших в научной картине мира со времен Аристотеля, характерно отсутствие представлений о конкретном механизме локальных «действующих причин», гарантирующих выполнение интегральных условий. Мы и сейчас еще не можем однозначно охарактеризовать зависимость локальных процессов от интегральных условий, выраженных в требовании наименьшего значения интеграла действия. В других случаях такая зависимость может быть описана точным и наглядным образом. Переход системы тел от

состояния с меньшей энтропией к состоянию с большей энтропией — это также интегральное условие, определяющее некоторое множество последовательных состояний системы. Нам известен механизм, гарантирующий выполнение этого условия в случае больших статистических ансамблей. Не исключено, что конкретный механизм, гарантирующий выполнение принципа наименьшего действия, также окажется стохастическим. В 1922 г. Эддингтон писал, что действие, быть может, является логарифмом вероятности¹. Правда, это относилось к одной конкретной теории того времени, и Эддингтон не придавал такому предположению более общего значения. Но сейчас стохастическая природа наименьшего действия стала гораздо менее парадоксальным предположением, и можно себе представить некоторое обобщенное понятие, охватывающее классическую функцию действия, понятие энтропии, фигурирующее в теории информации, и обычное термодинамическое понятие энтропии. Речь идет о логарифме вероятности данного состояния системы со знаком минус (действие) или плюс (энтропия). В таком случае принцип наименьшего действия оказывается принципом наибольшей вероятности данной мировой линии, а действие — мерой «невероятности», интегральной упорядоченности, соответствия локальных процессов интегральным условиям.

¹ См. А. Эддингтон. *Время, пространство, тяготение*. Одесса, 1923, стр. 177; см. также Б. Кузнецов. *Принципы классической физики*. М., 1958, стр. 75—76.

Но до таких представлений в XIX в. было еще очень далеко. Тут мы забежали далеко вперед. В XIX в. атомно-молекулярные представления могли воздействовать на развитие идеи бесконечности не каким-либо прямым расширением или ограничением ее физических прообразов, а очень косвенным и неявным путем.

7

Теперь, когда мы знаем о тождественности гравитационного и метрического полей в общей теории относительности, история учения о силовых полях в XIX в. кажется нам подготовкой того глубокого синтеза геометрии и физики, который был дан Эйнштейном в 1916 г. И действительно, связь между геометрическими соотношениями на поверхностях той или иной кривизны с вариационными принципами механики и физики была одной из исторических предпосылок общей теории относительности. Навстречу этой тенденции шла другая — развитие неэвклидовой геометрии. Последняя разрушила представление об априорном характере геометрии. Эйнштейн с присущей ему ясностью исторической ретроспекции говорил о том, как геометрия и физика, потеряв характерную для древности первоначальную связь, привели к представлению об априорности геометрических идей. Неэвклидова геометрия в известном смысле вернула научную мысль к античному представлению о физическом характере и эмпирическом происхож-

дении геометрических понятий. Лобачевский пришел к убеждению о непротиворечивости как эвклидовой, так и новой, неэвклидовой геометрии. В чем же состоит критерий для определения геометрических свойств действительного мира? Лобачевский высказал мысль о различных геометрических свойствах мира, в одних случаях эвклидовых, в других — неэвклидовых, в зависимости от того, какова природа полей, действующих в рассматриваемых областях пространства. Далее Риман, выдвинув непротиворечивую сферически-эллиптическую геометрию, приводящую к идее конечности пространства, связал проблему бесконечности пространства (как результата сложения конечных величин) с локальными геометрическими соотношениями. Такая связь была очень эффектной демонстрацией нового смысла понятия бесконечности, появившегося в отчетливой форме в XIX в. Локальные геометрические соотношения, позволяющие судить о бесконечности или конечности пространства в целом, состоят в кривизне и метрике пространства. Риман применил к многообразиям любого числа измерений идеи Гаусса, относившиеся к кривизне двумерных пространств. При этом оказалось, что метрика пространства не определяется аксиомами геометрии, и Риман предложил, что она зависит от силовых полей.

С точки зрения связи между бесконечностью и относительностью особенно важна мысль Римана о возможных границах относительного мероопределения и об абсолютной метрике в дискретном пространстве.

Остановимся несколько подробнее на содержании известной лекции Римана «О гипотезах, лежащих в основании геометрии», прочитанной в 1854 г. в Геттингене¹.

Риман ставит вопрос о количественных различиях между величинами. «С количественной точки зрения сравнение осуществляется в случае дискретных многообразий посредством счета, в случае непрерывных — посредством измерения»². Это поразительно ясное и глубокое разграничение *счета* и *измерения*, уже само по себе вводит нас в центр фундаментальных проблем бесконечности и относительности, в частности исторических проблем. Счет — это метод оценки многообразий, приводящий к абсолютным результатам. Измерение имеет дело с непрерывными величинами, т. е. с бесконечными множествами. Всякое измерение — это измерение бесконечно делимого отрезка другим бесконечно делимым отрезком. Оно происходит с помощью переноса отрезка, принятого за единицу. Аналогичным образом происходит измерение и других непрерывных многообразий. «Измерение заключается в последовательном прикладывании сравниваемых величин, поэтому возможность измерения обусловлена наличием некоторого способа переносить одну величину, принятую за единицу масштаба, по другой величине»³. Перенос не дол-

¹ Б. Р и м а н. Избр. произведения. М.—Л., 1948, стр. 279—293; сб. «Об основаниях геометрии». М., 1956, стр. 309—325.

² Сб. «Об основаниях геометрии», стр. 311.

³ Там же.

жен изменять размеры величины, принятой за единицу. Иначе говоря, величины независимы от положения. Длина линии независима от пространственного места линии, и каждая линия может быть измерена каждой другой линией.

Подобное требование выражается в существовании квадратичной формы, определяющей длину отрезка через приращения координат. Меропределение в каждой точке пространства связано с его кривизной в этой точке. Если пространство обладает положительной кривизной (например, поверхность сферы), оно будет конечным. Пространство нулевой либо отрицательной кривизны бесконечно.

Риман вводит очень тонкое и вместе с тем весьма отчетливое разграничение внутренних свойств пространства, выражающихся в мероопределении, в метрических соотношениях, и внешних отношений протяженности, характеризующих положение фигур в пространстве: «...мы начали с того, что отделили отношения протяженности (или отношения взаимного расположения) от метрических соотношений, и пришли к заключению, что при одних и тех же отношениях протяженности мыслимы различные метрические отношения, затем установили системы простых метрических отношений, которыми полностью определяется метрика пространства и необходимым следствием которых являются все теоремы геометрии»¹.

Если мы установили положение данной фигуры относительно других фигур и задали ко-

¹ Сб. «Об основаниях геометрии». М., 1956, стр. 321—322.

ординаты точек данной фигуры по отношению к некоторой системе отсчета, это еще не значит, что однозначно заданы расстояния между точками фигуры. Они зависят от мероопределения, которое может меняться при одних и тех же внешних отношениях протяженности, т. е. при тех же координатах точек, из которых состоит рассматриваемая фигура. Представим себе, что фигура все дальше отходит от начала координатной системы. Такой отход — он может быть неограниченным — означает прибавление к конечным координатам новых конечных отрезков. Возможность без конца повторять такое прибавление Риман называет *неограниченностью*.

Теперь рассмотрим кривизну пространства в данной точке. Если кривизна равна нулю, то мероопределение выражается простой квадратичной формой, а пространство, кривизна которого определяет метрические свойства в данной точке, оказывается *бесконечным*. Если же кривизна больше нуля, то пространство, соответствующее радиусу кривизны, оказывается конечным, как бы ни была мала кривизна, как бы ни был велик ее радиус.

«При распространении пространственных построений в направлении неизмеримо большего следует различать свойства неограниченности и бесконечности: первое из них есть свойство протяженности, второе — метрическое свойство»¹.

Поразительно, до чего близко Риман, вероятно не знавший о гегелевской «истинной бес-

¹ Сб. «Об основаниях геометрии», стр. 322.

конечности», подходит к этому понятию. Бесконечность как метрическое свойство — это бесконечность, определяющая свойства своих конечных элементов, это бесконечность, входящая в определение каждой части рассматриваемого пространства. Это актуальная бесконечность.

Относительные положения частиц, образующие дискретное множество, могут быть зарегистрированы с абсолютной точностью; в принципе мы можем произвести столько же измерений, сколько степеней свободы у рассматриваемых частиц. Но число экспериментов, регистрирующих метрические отношения, всегда меньше числа точек, в которых мы допускаем существование определенной кривизны и определенного мероопределения. Поэтому эксперимент дает принципиально неточную картину метрических отношений.

Разграничив отношения протяженности и простые метрические отношения, «необходимым следствием которых являются все теоремы геометрии», Риман продолжает:

«Остается еще выяснить, обеспечиваются ли опытной проверкой эти простые отношения, и если обеспечиваются, то в какой степени и в каком объеме? Между отношениями протяженности и метрическими отношениями с этой точки зрения имеются существенные различия: именно, поскольку для отношений протяженности возможно лишь дискретное множество различных случаев, результаты опытной проверки не могут не быть вполне точными (хотя, с другой стороны, не могут быть вполне достоверными), тогда как для метри-

ческих отношений множество возможных случаев непрерывно, и потому результаты опытной проверки — неизбежно неточные, какова бы ни была вероятность того, что они приближенно точны»¹.

Далее Риман говорит о бесконечно малых областях пространства. В очень малых областях мы можем встретиться с геометрическими соотношениями, которые отличаются от геометрических соотношений в больших областях. Мы продвигаемся в глубь причинных связей в природе, и понятие бесконечно малого выражает это неограниченное продвижение.

«От той точности, с которой нам удается проследить явления в бесконечно малом, существенно зависит наше знание причинных связей. Успехи в познании механизма внешнего мира, достигнутые на протяжении последних столетий, обусловлены почти исключительно благодаря точности того построения, которое стало возможно в результате открытия анализа бесконечно малых и применения основных простых понятий, которые были введены Архимедом, Галилеем и Ньютоном и которыми пользуется современная физика»².

Риман говорит, что астрономические данные свидетельствуют о неискривленности мирового пространства или, по крайней мере, о ничтожности областей, доступных телескопу, по сравнению со сферой искривленного пространства. Если даже кривизна пространства не равна нулю, то мы можем предположить, что про-

¹ Сб. «Об основаниях геометрии», стр. 322.

² Там же, стр. 323.

странство остается неискривленным в целом, несмотря на искривления в малых областях: «...в таком случае в каждой точке мера кривизны может по трем направлениям иметь какие угодно значения, лишь бы в целом кривизна доступных измерению частей пространства заметно не отличалась от нуля»³.

В бесконечно малом физические прообразы постоянных метрических отношений, демонстрирующие отсутствие кривизны (прямолинейное распространение света) и инвариантность расстояний — неизменность формы и размеров тел от их положения в пространстве (существование твердых тел), теряют свою определенность. Поэтому у нас нет уверенности в сохранении метрических соотношений при неограниченном уменьшении пространственных областей.

При переходе в бесконечно малые области может оказаться, что расстояния после определенной величины далее недробимы. Риман считал подобную недробимость, если она существует, проявлением свойства реальной субстанции, которая заполняет пространство и служит основой пространственных представлений.

Если существует последняя неделимая пространственная ячейка, то число промежуточных ячеек между двумя данными ячейками будет естественным расстоянием между ними.

«Вопрос о том, справедливы ли допущения геометрии в бесконечно малом, тесно связан с вопросом о внутренней причине возникновения метрических отношений в пространстве.

³ Там же.

Этот вопрос, конечно, также относится к области учения о пространстве, и при рассмотрении его следует принять во внимание сделанное выше замечание о том, что в случае дискретного многообразия принцип метрических отношений содержится уже в самом понятии этого многообразия, тогда как в случае непрерывного многообразия его следует искать где-то в другом месте. Отсюда следует, что или то реальное, что создает идею пространства, образует дискретное многообразие, или нужно же пытаться объяснить возникновение метрических отношений чем-то внешним — силами связи, действующими на это реальное»¹.

Что может служить реальной основой дискретности пространства, какие физические процессы устраняют возможность измерения пространства в масштабах, меньших некоторой минимальной области?

Риман не дал ответа на подобный вопрос, он ждал его от новых фактов, которые не могут быть объяснены в рамках классических концепций.

«Решение этих вопросов, — говорит Риман, — можно надеяться найти лишь в том случае, если, исходя из ныне существующей и проверенной опытом концепции, основа которой положена Ньютоном, станем постепенно ее совершенствовать, руководясь фактами, которые ею объяснены быть не могут; такие же исследования, как произведенные в настоящей работе, именно имеющие исходным пунктом общие понятия, служат лишь для того, чтобы движе-

¹ Сб. «Об основаниях геометрии», стр. 323—324.

нию вперед и успехам в познании связи вещей не препятствовали ограниченность понятий и укоренившиеся предрассудки.

Здесь мы стоим на пороге области, принадлежащей науке — физике, и переступить его не дает нам повода сегодняшний день»¹.

Сейчас, сто с лишним лет после речи Римана, у нас есть некоторые основания для физических гипотез дискретного пространства и времени. Чтобы подойти к этим гипотезам и к их отношению к проблеме бесконечности и относительности, нужно предварительно остановиться еще на некоторых тенденциях физико-математической мысли XIX в.

8

Пространство произвольного числа измерений с определенной кривизной и соответствующей метрикой представляет собой в общем случае множество, заданное позитивным образом, с ненулевыми различиями между точками. Физическим эквивалентом этого геометрического образа является силовое поле, по-разному, вообще говоря, определяющее поведение тел в различных точках пространства. До общей теории относительности Эйнштейна геометрическая концепция Римана не могла соединиться с концепцией однородного, негативно заданного пространства, в котором движение имеет относительный смысл.

¹ Там же, стр. 324.

Подобная концепция лежала в основе знаменитой Эрлангенской программы Феликса Клейна («Сравнительное обозрение новейших геометрических исследований»), представленной сенату Эрлангенского университета и философскому факультету этого университета при вступлении молодого ученого в состав факультета в 1872 г.¹

Клейн определил ряд многообразий — пространств (по существу любой размерности) — и соответствующих геометрий, указав инварианты преобразований, образующих ту или иную непрерывную группу. Понятие инварианта алгебраической формы было введено за двадцать лет до этого Сильвестром. Клейн положил указанное понятие в основу классификации пространств и геометрий. Он исходил прежде всего из проективной геометрии, определив ее как учение о свойствах фигур, инвариантных при некоторых преобразованиях, образующих группу. Аналогичным образом всякая группа непрерывных преобразований определяет самостоятельную геометрию. В элементарной геометрии объектом изучения служат свойства, инвариантные относительно преобразований образующих группу движений. Каждая группа преобразований определяет самостоятельную геометрию, для которой она служит фундаментальной группой. В такой самостоятельной геометрии преобразуемые фундаментальной груп-

¹ Ф. Клейн. Сравнительное обозрение новейших геометрических исследований («Эрлангенская программа»). В сб. «Об основаниях геометрии». М., 1956, стр. 399—424.

пой переменные рассматриваются как величины, определяющие точку пространства, а инварианты группы — как геометрические объекты. Таким образом, группа преобразований определяет геометрию и соответствующее ей пространство; говорят о метрическом, аффинном, конформном, проективном и т. д. пространствах. Такие «эрлангенские», или клейновские, пространства однородны, причем их однородность не означает ничего иного, кроме инвариантности геометрических объектов при переходе от одних значений, преобразуемых фундаментальной группой переменных (т. е. от одной точки пространства), к другим значениям этих переменных (к другой точке пространства). Эти значения, определяющие точки клейновского пространства, представляют собой обобщение координат эвклидова пространства, фундаментальные группы — обобщение группы движений в эвклидовом пространстве, инвариантные геометрические объекты — обобщение расстояний между точками движущейся фигуры, определенных теоремой Пифагора. Отсюда видно, что клейновский характер геометрии представляет собой обобщение известной из элементарной геометрии и классической физики инвариантности внутренних соотношений движущейся системы при ее движении, т. е. относительности движения в однородном пространстве. Соотношения каждой клейновой, эрлангенской, геометрии определяют неизменность геометрических объектов при переходе из одной точки соответствующего пространства в другую. Иными словами, эти соотношения определяют **негативным** образом различия между точками про-

странства, проявляющиеся в состоянии геометрических объектов. Таких различий нет, и преобразование состоит только в изменении преобразуемых фундаментальной группой переменных (например, в изменении координат движущегося тела в некоторой трехмерной евклидовой системе отсчета при неизменности внутренних геометрических соотношений в теле), т. е. имеет лишь относительный смысл. Инвариантность относительно фундаментальной группы — более общее название относительности. Сопоставив изменение известных физических переменных группе преобразований, обнаружив неизменность определенных величин при указанном изменении и сопоставив эти величины инвариантам некоторой клейновской геометрии, мы приходим к той или иной релятивистской теории. Если речь идет о преобразовании от одной инерциальной системы к другой, а инвариантным оказывается расстояние между точками, — перед нами классический принцип относительности Галилея — Ньютона. Если наблюдения приводят к инвариантности четырехмерного интервала по отношению к лоренцовым преобразованиям, мы получаем специальный принцип относительности. Инвариантность четырехмерного интервала с переменной метрикой по отношению к общей группе преобразований — геометрическая форма общего принципа относительности Эйнштейна. Но во всех случаях речь идет об однородности некоторого пространства, т. е. о негативном задании бесконечного множества.

Исходные идеи Римана иные. Риман, не обобщая, как это было сделано двадцать лет

спустя, понятие геометрического объекта, исследовал длину отрезка. Но эта длина, вообще говоря, не инвариантна.

Задача, решенная Эйнштейном в 1916 г., состояла в таком представлении риманова пространства, при котором оно оказывается однородным пространством, т. е. негативно заданным бесконечным множеством. После того как задача была решена, появилось новое обобщение, позволяющее для всякого непрерывного пространства вывести локальные закономерности из заданных интегральных условий пространства в целом. Речь идет об упоминавшейся уже теореме Эммы Нетер.

В 1918 г. Э. Нетер¹ доказала, что для каждого непрерывного преобразования координат, при котором вариация действия равна нулю, существует инвариантная по отношению к этому преобразованию комбинация функций поля и их производных. Инвариантности такой комбинации соответствует закон сохранения. Инвариантности лагранжиана по отношению к группе пространственных смещений, т. е. переносов начала координат, соответствует закон сохранения импульса. Инвариантности лагранжиана по отношению к сдвигам во времени соответствует сохранение энергии. Аналогичным образом из инвариантности лагранжиана по отношению к поворотам координатной системы, т. е. из изотропности пространства, следует сохранение момента количества движения, а из инвариантности по отношению к поворотам в пространственно-временных плоскостях — обобщенный

¹ E. Noether. Gött. Nachrichten, 1918, S. 235.

закон сохранения центра тяжести. Таким образом, из однородности и изотропности пространства и времени вытекают фундаментальные законы сохранения.

Нетер обобщила в своей работе идею инварианта, определяющего характер заданного пространства, и соответственно идею однородности последнего и исходные идеи вариационных методов механики и физики. Далее она связала созданную таким образом единую концепцию с законами сохранения, выражающимися в нулевой дивергенции той или иной физической величины.

Преобразования, оставляющие ковариантной данную комбинацию функций поля и их производных, превращают вариацию действия в нуль. Это и значит, что сохранение физической величины в каждой точке (заданное в виде дифференциального закона нулевой дивергенции) соответствует интегральным условиям, выраженным в вариационных принципах механики и физики. Мировая линия частицы, характеризующаяся наименьшим значением действия, определяется заданным полем, заданным распределением его источников. Совместимо ли такое представление с клейновским представлением об однородности пространства? Клейн легко мог объявить однородность (инвариантность некоторого интеграла при сдвигах) определяющим свойством пространства. Пространства, о которых Клейн говорил в 1872 г., не отвечают сами по себе за ускорения тел и не меняют своих геометрических свойств под влиянием полей. Но можно ли совместить понятие однородности пространства с представлением

о пространстве как физическом многообразии? Можно ли рассматривать искривление пути частицы как искривление пространства и вместе с тем приписывать пространству однородность, считать вслед за Клейном, что свойства пространства определяются инвариантностью некоторого интеграла относительно смещений в данном пространстве? Такая возможность означала бы синтез идей Клейна и идей Римана. С точки зрения Клейна, движение тела определяется свойствами пространства только в отсутствие полей — ускорения не имеют геометрической природы. Отсюда можно вывести относительность движения в отсутствие полей. С точки зрения Римана (она, очевидно, соответствует позитивному определению пространства как актуально бесконечного множества), пространство является физическим многообразием, его геометрические свойства — кривизна и метрика — зависят от взаимодействия тел («сил связи») и само оно своей кривизной определяет движения тел. С точки зрения Нетер, движение в однородном пространстве определено его свойствами и в случае ненулевых полей и ускорений однородные пространства Клейна определяют своей структурой поведение тел во всех случаях.

Такой синтез идей Клейна и Римана мог быть достигнут только на основе новых собственно физических представлений о единообразном искривлении всех мировых линий в поле тяготения, т. е. на основе общей теории относительности Эйнштейна. Мы перейдем к ней после краткого анализа понятия бесконечности в специальной теории относительности.

Теория относительности Эйнштейна — результат крушения большой серии попыток сохранения в научной картине мира самостоятельного раздельного существования пространства и времени. Основой такого самостоятельного существования была мгновенная передача взаимодействий. Она превращала пространство в бесконечное множество, заданное в данный момент. Это слово «заданное» (позволяющее приравнять пространство актуальной бесконечности) означает: вопреки Аристотелю, нечто реальное происходит «теперь», — существует реальный физический эквивалент трехмерной геометрии.

Когда в результате развития электродинамики появилось представление о конечной скорости распространения взаимодействий, физически содержательный образ «мгновенного» пространства еще можно было спасти. Можно синхронизировать, т. е. отождествить во времени события в различных точках, рассматривая сигналы (например, световые лучи), пришедшие в две точки (осветившие два экрана) из источника, находящегося на равных расстояниях от этих точек. Можно даже синхронизировать события, т. е. отождествить два мгновения, в отдаленных точках при движении системы «источник света и два экрана» относительно эфира, т. е. при движении, вызывающем отставание сигнала в одном направлении и опережение — в другом. Основой такой синхронизации служит понятие скорости движущихся тел относительно бесконечного, неподвижного

эфира, заменившего пустое пространство Ньютона с мгновенным дальнодействием. Покоящийся эфир — это бесконечное тело, существующее уже «сейчас» (причем слово «сейчас» имеет смысл по отношению ко всему бесконечному телу), это физический прообраз трехмерной актуальной бесконечности.

Таким образом, мы можем теперь уточнить применительно к проблеме бесконечности и относительности смысл слов «самостоятельное существование», которыми выражалось отношение пространства ко времени в классической физике. Самостоятельным существованием обладает многообразие (многообразие пространственных положений, многообразие моментов), задание свойств которого само по себе, без задания свойств другого многообразия, определяет поведение тела. Ньютоново пространство, заданное в данный момент, т. е. «мгновенное» пространство, определяет своей однородностью поведение предоставленного самому себе тела — сохранение импульса. Ньютоново время, заданное само по себе, без указания на ту или иную структуру пространства, определяет сохранение энергии.

Теория относительности Эйнштейна устранила из картины мира не только лоренцов эфир, но тем самым и заданное в данный момент пространство, т. е. отказала трехмерной геометрии в существовании непосредственного физического эквивалента. Движение относительно эфира — бессодержательное понятие, поскольку не только механические, но и все физические процессы протекают единообразно во всех системах, движущихся одна относи-

тельно другой без ускорения. Если устраняется понятие скорости тела по отношению к эфиру, то тем самым исчезает возможность синхронизации событий, не зависимой от движения систем, в которых определено время, когда произошли эти события. Исчезает представление о едином, не зависимом от движения пространственных систем отсчета потоке времени, состоящем из последовательных мгновений, тождественных себе во всем бесконечном пространстве. Свойства бесконечного пространства, заданные для данного мгновения, не могут определить ход физических процессов.

Мы имеем в виду негативное определение хода физических процессов заданными общими свойствами пространства, т. е. единообразие процессов, в котором выражается однородность пространства. В теории относительности Эйнштейна ход физических процессов определяется, так же как в классической концепции относительности движения по инерции, негативным образом: определяющие этот ход свойства многообразия состоят в его однородности и изотропности, а определенность физических процессов состоит в их единообразии. Но, в отличие от классического принципа относительности, в теории Эйнштейна единообразными оказываются не только механические процессы в различных смещающихся одна относительно другой инерциальных системах, но и распространение света. Постоянство скорости света в таких системах означает изменение пространственных и временных масштабов при переходе от одной системы к другой, и инвариантом такого преобразования оказывается четырех-

мерный интервал. Указанное преобразование выражается в повороте четырехмерных координатных осей в пространственно-временных плоскостях. Инвариантом таких поворотов является квадратичная форма четырех координатных разностей с постоянными эвклидовыми значениями компонент метрического тензора.

Однородность и изотропность четырехмерного пространственно-временного континуума специальной теории относительности выражается в эвклидовом (если учесть особый характер единиц, измеряющих время, — псевдоэвклидовом) характере геометрических закономерностей этого континуума. Дальше мы увидим, что соответствие между однородностью и эвклидовостью пространства не является взаимно однозначным — понятие однородности может быть обобщено на неэвклидовы многообразия. Во всяком случае, закономерности, постулированные и выведенные Эйнштейном в 1905—1906 гг. и получившие форму геометрических соотношений у Минковского в 1908 г., связаны с однородностью четырехмерного псевдоэвклидова бесконечного пространственно-временного мира. Скорость света в пустоте постоянна, т. е. мировые линии света не только остаются прямыми, но и обладают одним и тем же постоянным углом по отношению к оси времени и образуют таким образом световой конус. Мировые линии тел с ненулевой массой покоя могут иметь различный угол по отношению к оси времени (тела могут двигаться с различной скоростью), но они остаются прямыми (скорость каждого тела не меняется). Эти закономерности определяют поведение тел от одной мировой

точки к другой, — определяют чисто негативно, гарантируют отсутствие различий между мировыми точками по поведению тел и отсутствие различий в геометрических свойствах четырехмерного многообразия. Именно негативность определения, отсутствие различий в поведении тел в мировых точках, постоянство скоростей предоставленных самим себе тел, прямые мировые линии, неизменная эвклидова метрика во всем бесконечном пространстве и приводят к релятивистской трактовке движения.

Но в действительности тела никогда не бывают предоставлены самим себе. Именно поэтому специальный принцип относительности, как и всякая физическая интерпретация негативно определенной актуальной бесконечности, должен рассматриваться как идеализированный, предельный случай очень малых силовых полей и соответственно ускорений. Негативно определенная актуальная бесконечность — частный, нулевой случай позитивно определенной актуальной бесконечности. Закон инерции никогда не приобрел бы универсального значения, если бы он не был частным случаем закона ускорения, если бы движение по инерции не было компонентой реальных, ускоренных движений, если бы инерция не вызывала реальных эффектов в ускорении движущихся тел (ведь силы инерции фиктивны только в смысле фиктивного воздействия других тел на данное, но они вполне реальны по воздействию данного тела на связи системы). Однако в мире ускоренных движений закон инерции уже не определяет исчерпывающим образом поведение тел

в различных точках пространства. Остается ли относительным движение, определяемое более общими законами, учитывающими существование неравных нулю силовых полей? На этот вопрос ответила общая теория относительности. Она по-иному поставила и проблему физических эквивалентов бесконечности.

10

Мы рассмотрим проблему бесконечности в общей теории относительности, имея в виду бесконечность как результат деления конечных величин. В конце параграфа будет затронута проблема бесконечности как результата сложения конечных величин.

В однородном пространстве в отсутствие силового поля тело движется таким образом, что скорость его в одной точке не отличается от скорости в другой точке. Бесконечное множество таких точек задано негативным образом. С этим связана относительность движения. О скорости тела можно судить только по изменению координат в некоторой системе отсчета. В силовом поле скорости тела в различных точках, вообще говоря, различны и переход от одной скорости к другой определяется абсолютным образом, так как он вызывает динамические эффекты — появление сил инерции — в самом теле. Таким образом, позитивно заданная актуальная бесконечность — актуально бесконечное множество различных точек пространства, в котором действует силовое поле, — выходит за рамки специального принципа отно-

сительности, так же как она выходила за рамки классического принципа относительности Галилея — Ньютона.

Общая теория относительности указала возможность «оттрансформировать» динамические эффекты ускорения, представить ускоренное движение как неизменное состояние тела подобно движению без ускорения, приравнять бесконечное множество мировых точек, различных по состоянию находящихся в них тел, бесконечному множеству мировых точек с единообразным состоянием тел и рассматривать однородность пространства-времени в качестве определяющей все эти состояния интегральной закономерности.

Первым звеном цепи, приведшей Эйнштейна к подобному результату, был принцип эквивалентности — констатация совпадения динамических эффектов ускорения с эффектами гравитационного поля. Вводя некоторое поле тяготения, мы можем объяснить ускорения, которые мы до этого приписывали ускорению самой системы. Таким образом, можно устранить эффекты, отличающие ускоренную систему от инерциальной, и считать их равноправными: и в той и в другой физические процессы протекают единообразно и соответственно выражаются уравнениями, ковариантными при переходе от инерциальной системы к системе, движущейся с ускорением.

Тяготение изменяет ход всех процессов, искривляет все мировые линии, включая мировые линии света. Если свет обладает гравитационной массой, значит в поле тяготения все прообразы прямой — и траектории движущих-

ся тел, и световые лучи, и все вообще сигналы, распространяющиеся при отсутствии тяготения по прямой.— становятся физическими прообразами кривой линии. Если так, естественной становится мысль о гравитационном поле как искривлении пространства-времени в целом.

Здесь решающий пункт перехода от позитивно заданной актуальной бесконечности пространства-времени к негативно заданному бесконечному множеству мировых точек. В неискривленном пространстве-времени, т. е. в рамках специальной теории относительности, однородность четырехмерного континуума выражалась в том, что мировые линии были прямыми. В искривленном пространстве его однородность выражается в том, что мировые линии совпадают с геодезическими,— это понятие является естественным обобщением понятия прямой. При движении тела вдоль геодезической линии пространства мы относим кривизну его траектории за счет кривизны пространства. Это и значит, что в *данном* пространстве с *заданной* кривизной состояние тела, движущегося по геодезической, не меняется. Мировые точки, расположенные на геодезической четырехмерного мира, не имеют различий в смысле поведения находящихся в них тел. Каждый отрезок мировой линии, совпадающей с геодезической данного пространства, представляет собой актуальное бесконечное множество мировых точек, в которых поведение тел определяется *негативным* образом — *однородностью* пространства вдоль указанной мировой линии.

Эйнштейн отождествил потенциалы гравитационного поля со значениями составляющих

фундаментального метрического тензора, а напряженности поля — с коэффициентами Кристоффеля, составленными из производных метрического тензора. Под гравитационным полем следует понимать не то, что происходит в пространстве, а то, что происходит с пространством. Такая геометризация поля особенно отчетливо видна в понятии ковариантной производной. Обычная производная вектора, описывающая его поведение при переносе, указывает на изменение, зависящее от того, что происходит в пространстве, и на изменение, которое может зависеть от того, что происходит с пространством, — от искривления и соответствующего изменения метрики. Если вычесть вторую, зависящую от метрики часть общей производной, то разность — ковариантная производная — будет соответствовать процессу, происходящему в пространстве и не зависящему от пространства. Действие гравитационного поля на тела исключается из числа таких процессов. Под влиянием гравитационного поля тело движется по геодезической, на которой ковариантная производная равна нулю. При этом изменяется положение тела на геодезической мировой линии относительно события, принятого за начало четырехмерной системы координат, но не изменяется состояние тела — ковариантная производная, характеризующая это состояние векторов, остается равной нулю.

Мы можем сопоставить подобное положение с движением по окружающим Землю концентрическим сферам и с радиальным движением к Земле как центру мира в космологии Аристотеля. Вернее было бы говорить о сопостав-

лении с проблемами, вытекающими из космологии Аристотеля. На «совершенной» круговой орбите движение тела объясняется не какой-либо неоднородностью пространства, как при радикальном движении, а, наоборот, — его однородностью. Кривизна орбиты — результат не неоднородности пространства, а его кривизны. Это первоначальное, чисто качественное и связанное с фантастической схемой Вселенной представление содержит уже в зародыше прообразы последующего развития понятий однородности и кривизны. Сейчас мы располагаем достоверной количественной теорией, в которой однородность пространства куплена ценой его кривизны, обобщения понятия прямой. На геодезических пространство однородно.

Понятие однородности бесконечного (в том числе абстрактного) пространства может быть сопоставлено с понятием негативно определенной актуальной бесконечности. Разумеется, только конкретные, установленные экспериментом свойства множества значений физической величины позволяют представить эти значения в качестве характеристик неизменного состояния при движении в каком-то пространстве, перейти к негативно определению такого пространства как актуальной бесконечности, найти инвариант фундаментальной для данного пространства группы преобразований и т. д. — геометризовать поле, под влиянием которого происходит указанное движение. Таким множеством, как это выяснилось в XVII в., является упорядоченное множество положений тела, т. е. значений его координат, если эти значения линейно зависят от времени. В подоб-

ном случае изменение координат не является изменением состояния тела; движение последнего не позволяет найти какие-либо различия между состояниями тела; о движении можно судить только по изменению координат, трактовать его только в относительном смысле и определять актуально бесконечное множество точек пространства негативным образом, как множество, предопределяющее своей однородностью сохранение состояния предоставленного себе тела. В специальной теории относительности на основе эксперимента в понятие неизменного состояния тела вошла неизменная скорость распространения света в теле, не зависящая от его движения без ускорений. Негативно определенным актуально бесконечным множеством оказалось множество четырехмерных мировых точек на прямых мировых линиях псевдоэвклидова пространственно-временного континуума. В общей теории относительности также на основе эксперимента (старого, показавшего пропорциональность массы и веса, и нового, предсказанного теорией и показавшего отклонение луча в поле тяготения) подобным же множеством оказалось множество мировых точек на геодезических неэвклидова континуума.

Переход от однородных прямых к однородным, вообще говоря кривым, геодезическим линиям позволил заменить формулу: «предоставленное себе тело движется по геодезической эвклидова пространства (т. е. по прямой)» формулой: «тело, как свободно движущееся, так и находящееся под действием поля тяготения, движется по геодезической, вообще говоря, рн-

манова пространства (частным случаем которого является евклидово пространство)». Такое обобщение позволяет перейти к обобщенному понятию однородности: однородным мы называем пространство, точки которого при переходе тела из одной в другую оставляют равной нулю ковариантную производную векторов, описывающих поведение движущегося тела. Заданное таким образом множество точек является негативно определенным бесконечным множеством.

Возможно ли такое определение в случае других полей, можно ли сделать равной нулю ковариантную производную (обобщив это понятие, вводя зависимость вектора от других, помимо кривизны, геометрических свойств пространства-времени) в случае негравитационных полей? Это — чисто физический вопрос. С понятием бесконечности связана определенная схема относительности — понятия специальной метрики, инварианта некоторой группы преобразований и т. д. Такая релятивистская схема может быть выведена из понятия негативно определенной актуальной бесконечности. Но подходит ли множество значений некоторой конкретной физической величины (в данном случае — поле) под указанную схему, зависит от того, можно ли «оттрансформировать» поле. Гравитационное поле можно «оттрансформировать» в силу свойственного ему равенства тяжелой массы (гравитационного заряда) и инертной массы. В отношении других полей этого не удалось сделать. Подчеркнем только, что в попытках Вейля, Эйнштейна и других речь шла о конструировании такого абстракт-

ного пространства, в котором эффекты поля объясняются структурой самого пространства и при определенных условиях поведение тел в различных точках можно представить единообразным (негативное определение актуально бесконечного множества точек) и не нарушающим однородности пространства и относительности движения.

Вернемся к гравитационным полям и «официальной» общей теории относительности. Все сказанное относится к пространствам Римана, т. е. к пространствам постоянной положительной кривизны и, в частном случае эвклидова пространства, — нулевой кривизны. Переходя к проблеме физических эквивалентов бесконечности как результата сложения конечных величин, нужно включить в поле зрения и гиперболическое пространство Лобачевского. Если «Вселенная как целое» обладает постоянной кривизной, то она может иметь положительную кривизну и быть конечной либо нулевую или отрицательную кривизну и быть бесконечной. Возьмем модель Вселенной с положительной кривизной, т. е. конечное сферическое пространство. Нас не должна здесь смущать неоднозначность релятивистской космологии — возможность иных моделей. Для развития представления о бесконечности существенны, как уже говорилось, не только реализованные и закрепленные концепции. Самая возможность конечного пространства дала толчок математическим обобщениям. Они пошли по линии полного отрицания правомерности понятия актуальной бесконечности, которое, впрочем, уже давно было не в чести у математиков. Некото-

рому возврату к античным прообразам конечной сферической Вселенной соответствовал возврат к аристотелеву неприятию бесконечности. Возврат этот очень условен — Вселенная Аристотеля была не только конечной, но и ограниченной. Вселенная Эйнштейна — неограниченна. Релятивистская космология Эйнштейна отказывается от бесконечности пространства, приписывая последнему кривизну. Такое предположение не колеблет постулата неограниченности пространства. Напомним риманово разграничение понятий неограниченности и бесконечности.

«При распространении пространственных построений в направлении неизмеримо большего следует различать свойства неограниченности и бесконечности: первое из них есть свойство протяженности, второе — метрическое свойство. То, что пространство есть неограниченное трижды протяженное многообразие, является допущением, принимаемым в любой концепции внешнего мира; в полном согласии с этим допущением область внешних восприятий постоянно расширяется, производятся геометрические построения в поисках тех или иных объектов, и допущение неограниченности ни разу не было опровергнуто. Поэтому неограниченности пространства свойственна гораздо большая эмпирическая достоверность, чем какому бы то ни было другому продукту внешнего восприятия. Но отсюда никоим образом не следует бесконечность пространства; напротив, если допустим независимость тел от места их нахождения, т. е. припишем пространству постоянную меру кривизны, то придется допустить конечность пространства, как бы мала

ни была мера кривизны, лишь бы она была положительной. Если бы мы продолжили кратчайшие линии, начальные направления которых лежат в некотором плоскостном элементе, то получили бы неограниченную поверхность с постоянной положительной мерой кривизны, т. е. такую поверхность, которая в плоском трижды протяженном многообразии приняла бы вид сферы и, следовательно, является конечной»¹.

Подобное разграничение поможет нам найти античные прообразы современных понятий. В отличие от других построений Римана это разграничение не находит применений в наиболее актуальных вопросах физики, быть может, пока не находит. Мы сейчас уже не можем сказать, как Риман: «Для объяснения природы вопросы о неизмеримо большом — вопросы праздные»². Но пока для поисков выхода из противоречий современной картины мира вопросы о том, что происходит в неизмеримо малых областях пространства и времени, гораздо серьезнее. Для исторической же ретроспекции приведенные строки весьма важны.

Речь идет об аристотелевых понятиях естественных движений в подлунном и надлунном мире. Движение в подлунном мире — абсолютное движение, отнесенное к границам и центру ограниченной Вселенной, не находит аналога в пространстве положительной кривизны Римана — Эйнштейна. Пространство это не ограничено, а конечно. В космологии Аристотеля,

¹ Сб. «Об основаниях геометрии», стр. 322—323.

² Там же, стр. 323.

двигаясь от Земли по неизменному направлению к периферии Вселенной, тело наталкивается на границу пространства; существование такой границы выражается во внешних отношениях протяженности. Аристотелева концепция подлунного мира не знала зависимости мероопределения от конечности пространства и даже не предвосхищала его своими нерешенными вопросами.

Другое дело — относительное круговое движение небесных тел в надлунном мире. Эти тела движутся по неизменным направлениям, если в качестве пространства рассматривать каждый раз двумерное пространство — поверхность небесной сферы. Такое пространство — двумерный аналог риманова трехмерного пространства постоянной положительной кривизны. Разумеется, в последнем нет никакого центра и никаких границ, так же как нет центра и границ в однородном двумерном пространстве каждой аристотелевой сферы.

В конечной Вселенной не может быть пространственного расстояния больше определенной величины, так же как на двумерной поверхности сферы расстояние между двумя точками, откладываемое по окружности большого круга, проходящей через эти точки, не может превышать длину этой окружности. В такой Вселенной исчезает физический пространственный прообраз бесконечности как результата сложения конечных величин. Пространственно-временной образ сохраняется — время не искривлено и четырехмерные мировые линии могут быть бесконечны, так же как бесконечна, например, спираль, опоясывающая цилиндр.

В картине эволюции принципа относительности нерелятивистская квантовая механика представляется некоторым предварительным частным аспектом более широкой, релятивистской квантовой теории. Развитие квантовой механики в 1925—1926 гг. и последующее развитие нерелятивистских квантовых идей служит с этой точки зрения как бы предысторией начавшегося в самом конце 20-х годов развития релятивистской теории электрона, квантовой электродинамики и намечающейся сейчас общей теории квантованных полей и элементарных частиц. Такая точка зрения совершенно естественна в истории релятивизма. Но, по-видимому, она имеет смысл и в истории квантовых идей.

В наше время основные принципы нерелятивистской квантовой механики приобретают новое освещение и раскрывают свой действительный смысл при переходе в релятивистский мир высоких энергий, при которых изменение массы становится существенным для движения частицы, и при переходе в ультрарелятивистский мир еще более высоких энергий, достаточных для превращения данной частицы в иную.

Квантовая механика, созданная в 1925—1926 гг., исходит из наличия корпускулярных и волновых свойств у частицы. Такое соединение исключает возможность одновременного неограниченно точного определения сопряженных переменных: координат точки и компонент импульса частицы в этой точке, а также другой пары сопряженных переменных — времени и энергии, измеренной в это время. Чем точнее

определены координаты, тем менее точно определен импульс, и наоборот. Таково же соотношение неопределенностей между временем и энергией. Произведение неопределенностей сопряженных переменных (координаты и компоненты импульса или времени и энергии) имеет размерность действия и равно элементарному кванту действия — постоянной Планка. Этот принцип неопределенности иллюстрируется обычно мысленными экспериментами, например, диафрагмой, через отверстие которой проходит частица: чем уже отверстие, тем точнее можно определить координаты частицы при ее прохождении, но при этом волновые свойства частицы сильнее проявляются в дифракции и изменении импульса; импульс может быть измерен подвижной диафрагмой за счет соответствующего уменьшения точности определения координат в силу сдвига диафрагмы. Напомнив эти соотношения, обратим внимание на само понятие *определенности* результатов измерения координат, времени, импульса и энергии. При попытке уяснения этого понятия на сцене снова появляются бесконечные множества и характеризующие их интегральные закономерности.

В пространстве, в котором задано некоторое (в частном случае нулевое) поле, определено позитивным образом (в частном случае негативным) поведение частицы — ее импульс — в бесконечном множестве точек. Во времени, в котором задано это поле, также определено поведение частицы — ее энергия — в бесконечном множестве моментов. Эти два определения могут быть соединены; тогда речь будет идти об акту-

ально бесконечном множестве мировых точек. Квантовая механика в собственном смысле не покушается на существование такой мировой линии как актуально бесконечного множества мировых точек.

Но кроме заданного в пространстве-времени *поведения* частицы существует еще проблема *пробывания* частицы в каждой мировой точке на некоторой мировой линии. Проблемой в прямом смысле это пребывание становится в квантовой механике. В классической теории закон движения однозначным образом выводит из заданного поля и начальных условий пребывание частицы в каждой точке мировой линии, определенной требованием наименьшего действия, т. е. интегральной закономерностью. В квантовой механике закон движения частицы задан в виде волнового уравнения для волновой функции, определяющей лишь вероятность нахождения частицы в данной мировой точке (измеряющей квадратом своего модуля вероятность нахождения).

Мы можем судить о том, что частица находится в данной мировой точке, если она взаимодействует в этой точке (т. е. в данном месте и в данный момент) с некоторым телом, которое не изменяет своего положения в результате взаимодействия. Роль такого тела играет, например, неподвижная диафрагма с неограниченно сужаемым отверстием. Мы можем далее судить о поведении частицы по взаимодействию с телом, позволяющим зарегистрировать энергию и импульс частицы.

Теперь рассмотрим множество таких регистраций. Они вовсе не определены заранее. Идея реальности поля приводит, как мы видели, к

разграничению двух понятий: 1) поля, существующего независимо от наличия пробных тел и определенного интегральным законом, и 2) пробного тела, в отношении которого может быть произведена проверка: соответствует ли его поведение напряженности поля в данной мировой точке. Классическая теория исходит из того, что каждая проверка неизбежно дает точное совпадение значений динамических переменных со значениями, определяемыми интегральной закономерностью. В данном случае слово «определяемые» и означает, что измерения поведения (импульса и энергии) частицы дадут в каждой мировой точке результаты, в точности совпадающие с результатами, предсказанными решением вариационной задачи. Число подобных проверок всегда остается конечным, но оно может неограниченно возрастать. Речь идет, очевидно, о потенциальной бесконечности проверок и соответственно результатов. Классическая презумпция — совпадение этих результатов, элементов конечного, но неограниченно растущего, потенциально бесконечного множества с предвычисленными значениями динамических переменных, образующими актуально бесконечное множество.

Принцип неопределенности Гейзенберга не отказывается от подобной презумпции. Но она не допускает бесконечного множества таких проверок, при которых определяются состояния, характеризующиеся сопряженными динамическими переменными: координатами и импульсом или временем и энергией. Этой ценой квантовая механика получает возможность сохранить классическую презумпцию для каждой из сопряженных переменных в отдельности.

Если точность измерения одной сопряженной переменной не стремится к нулю, точность измерения другой переменной не может неограниченно возрастать. Например, в интервале значений координат частицы в пределах размеров диафрагмы нельзя производить все более точные измерения, последовательно переходя к более узким отверстиям, если не отказаться от измерения импульса. Значит ли это, что траектория частицы перестает быть актуально бесконечным множеством точек, определенных интегральными закономерностями? Нет, траектория частицы и в этом случае может рассматриваться как актуально бесконечное множество точек, но при этом требуется некоторое обобщение понятия определения элементов множества его интегральной структурой. До сих пор речь шла о непосредственном определении мировой линии (т. е. положения каждой мировой точки в некоторой четырехмерной системе отсчета) и поведения частицы в каждой мировой точке. Это один тип определения, позволяющий рассматривать поле, а вслед за ним и пространство-время, в котором задано поле, как актуальную бесконечность. Но может быть и другой тип определения положения мировых точек и поведения частиц. Интегральные закономерности определяют непосредственно лишь вероятность пребывания частицы в мировой точке и вероятность определенного поведения ее в этой точке. Вероятность определяется для точки и служит отличием одной точки от другой. Поэтому определение вероятности (например, определение ее через квадрат модуля амплитуды волновой функ-

ции) для положений частицы в пространстве-времени и ее энергии и импульса не заставляет нас отказаться от представления о поле и пространстве-времени как об актуально бесконечных множествах.

В свое время принцип неопределенности казался апорией квантовой физики. Теперь к апориям (причем во многом напоминающим зеноновы апории) ведет собственно не неопределенность динамических переменных, а, напротив, возможность получить сколь угодно точное значение каждой переменной за счет соответствующей неточности переменной, сопряженной с данной. Эта возможность применить указанную выше классическую презумпцию точного определения к каждой отдельно взятой переменной — «недонеопределенность» нерелятивистской квантовой механики, постулат непрерывного поля, постулат классического объекта, не претерпевающего изменений при взаимодействии с частицей, — ведет к апориям бесконечной энергии.

Представим себе фазовое пространство, в котором координатами служат пространственные координаты частицы и составляющие импульса. Фазовое пространство состоит из ячеек, объем которых равен кубу элементарного кванта действия — постоянной Планка. Принцип неопределенности состоит в утверждении, что объем фазовой ячейки не меняется (дискретность действия), а ее величина в одном измерении может уменьшаться неограниченно за счет соответствующего увеличения другой величины. В фазовом пространстве такого рода бесконечность как результат деления в одном измерении связана с бесконечностью как резуль-

татом сложения в другом измерении. Но бесконечно большое расстояние Δx так же парадоксально, как и бесконечный импульс Δp_x . В пространстве tE предположение о точном определении времени ведет к бесконечной энергии, а предположение о точном определении энергии — к возможности бесконечного времени, протекающего при измерении энергии. Этот последний вывод содержится в сущности в апории Зенона, где невозможность достижения цели стрелой означала, что стреле понадобится бесконечное время, чтобы пройти бесконечное число точек. Аристотель легко опроверг эту мысль Зенона (другие стороны апории потребовали для опровержения иных аргументов), сославшись на то, что при делении пространственной траектории s соответственно делится время t , чтобы пройти бесконечное число точек, тело имеет бесконечное число мгновений в пределах конечного временного интервала. Аристотель, таким образом, сослался на однотипность бесконечности пространства и времени. В фазовом пространстве бесконечность сопряженных переменных разнотипна: бесконечно малому Δt соответствует бесконечно большая ΔE и наоборот. Заметим, что бесконечно большое значение энергии $\Delta E = \infty$ соответствует понятию актуальной бесконечности, бесконечности в старом противоречивом смысле сосчитанного неисчислимого множества, так же как бесконечно большое значение Δt ; ведь внутри этого интервала ничто не определено. Это как раз и есть интервал неопределенности, так что здесь неприменимо рациональное понимание актуальной бесконечности.

Квантовая механика пользуется классическими понятиями и классической презумпцией бесконечного ряда все более точных измерений, потому что она в известной мере игнорирует взаимодействие дискретного поля частиц с дискретным электромагнитным полем, т. е. радиационные, ультрарелятивистские эффекты. В электродинамике такое игнорирование было законным для большой области явлений в силу малости постоянной Зоммерфельда и соответственной незначительности радиационных поправок. Но в других, а именно мезонных, полях переход и большая величина константы связи между полями не допускают такого игнорирования. Оно перестает быть допустимым и в электродинамике в случае очень высоких энергий.

Когда мы начинаем учитывать ультрарелятивистские эффекты, перед нами возникает новый образ пустого пространства, в котором движется частица. Этот образ был исходным для представления об относительном движении. Двигаясь в пустоте, тело проходит на каждом конечном отрезке своего пути бесконечное число бесконечно близких положений, которые отличаются одно от другого только расстояниями от произвольной начальной точки отсчета. Изменение положения сводится к изменению этих расстояний. Таково движение частицы, предоставленной самой себе. Когда частица движется в гравитационном поле, можно отождествить это поле с кривизной пространства, и тогда в данном (с заданной кривизной) пространстве

частица движется как бы в пустоте, без взаимодействий с другими телами, не меняя своего поведения и создавая возможность лишь негативного определения актуально бесконечного множества точек — пространства, в котором движется частица. Интегральное определение такого пространства гарантирует движение частицы, соответствующее кратчайшей мировой линии, которую можно найти вариационными методами.

Пространство, в котором тело не взаимодействует с другими телами, называется вакуумом силового поля.

В свое время слово «вакуум» употреблялось как равнозначное словам «пустое пространство». Теперь смысл этого слова изменился. В вакууме имеется множество флюктуаций поля, т. е. излучений и поглощений квантов, не нарушающих нулевого в среднем значения поля в макроскопических областях. Таким образом, негативное определение актуально бесконечного множества (поле равно нулю, частица представлена самой себе, она движется по геодезической) оказывается макроскопически усредненным результатом динамических процессов, приводящих к ненулевым значениям напряженности поля в микроскопических областях пространства-времени.

В случае электрона, находящегося в вакууме электромагнитного поля, эти процессы вносят свой вклад в собственную электромагнитную энергию электрона, причем учет этого вклада приводит к бесконечному значению энергии. Мы можем представить такой физически абсурдный вывод следующей качественной схе-

мой. Вакуум электромагнитного поля — это пространство, в котором вектор-потенциал поля равен нулю. В квантовой электродинамике такое значение вектор-потенциала рассматривается как нулевое число фотонов. Нулевое поле при отсутствии реальных фотонов существует в виде статистических флуктуаций — порождения и уничтожения виртуальных фотонов. Электрон взаимодействует с излучаемыми и затем поглощаемыми им виртуальными фотонами, энергия которых может быть сколь угодно большой, если время, прошедшее между излучением и последующим поглощением виртуального фотона (и соответственно пройденное им расстояние), может быть сколь угодно малым. Возможность эта вытекает из соотношения неопределенностей, причем указанные процессы, происходящие на световом конусе и связанные с ультрарелятивистскими энергиями, позволяют отчетливее увидеть физический смысл самого соотношения неопределенностей. Теперь уже явным образом речь идет о совершенно объективных и полностью детерминированных отклонениях от интегральной закономерности в ультрамикроскопических пространственно-временных областях. Речь идет о том, что в указанных областях интегральное, вариационное задание бесконечного множества мировых точек не гарантирует определенного течения событий и определенного значения динамической переменной в очень малых четырехмерных областях. До известного предела такая гарантия — основная презумпция классической физики — сохранялась для отдельной динамической переменной за счет неопределенности сопряжен-

ной с ней другой переменной. Но при учете ультрарелятивистских эффектов положение меняется. Классическая презумпция не сохраняется даже для отдельной динамической переменной.

В конце 40-х и в начале 50-х годов появилось большое число работ, в которых методы исключения бесконечных значений собственной энергии и заряда частицы связывались с более последовательной релятивистской формулировкой квантовой электродинамики¹. Ретроспективный обзор этих работ показывает, как рецептурные приемы устранения бесконечных значений приводили к проблемам радикальной перестройки современной физической картины мира, перестройки, включающей переход к новой концепции бесконечности мира.

Например, в электродинамике Фейнмана² вместо дифференциальных уравнений гамильтоновского типа используются фактически их решения. Подобный прием дает некоторые рецептурные результаты, которые, впрочем, могли быть получены и иными путями. Но в чем состоит принципиальное значение отказа от гамильтоновых уравнений и новых методов квантовой электродинамики? Гамильтонов формализм соответствует дифференциальному представлению поведения электромагнитного поля от мгновения к мгновению. В случае «реаль-

¹ См. сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954.

² R. F e y n m a n. Phys. Rev., 1949, 76, 748, 749. См. перевод в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики», стр. 138—160, 161—204.

ных» фотонов, когда источник поля и поглощающее его тело разделены сравнительно большим расстоянием и промежутком времени и могут быть разграничены, применение гамильтоновых уравнений не приводит к затруднениям. Но в случае виртуальных фотонов не так легко разграничивать излучение и поглощение поля, и соответственно гамильтонов формализм приводит к существенным трудностям. Идея Фейнмана очень близка к гейзенберговой идее, положенной в основу матрицы рассеяния: в области, где происходит столкновение частиц, мировые точки не следуют одна за другой в определенном порядке, процесс рассеяния рассматривается как целое. Тем самым устраняется «недорелятивизм» гамильтоновых уравнений: в них состояние системы определяется для каждого последующего момента по ее состоянию в настоящий момент, причем выделение момента времени является инвариантной операцией относительно лоренцовых преобразований, в отличие от решений гамильтоновых уравнений, которые инвариантны при указанных преобразованиях. В электродинамике Фейнмана для ультрамикроскопических областей исчезает физический эквивалент деления времени и пространства на последовательные мгновения и точки, так же как это исчезало в любых областях при чисто интегральной аристотелевой трактовке движения. Аналогичным образом и другие концепции в новейшей теории квантованных полей уже не исходят из существования бесконечно малых областей пространства и времени, в которых сохраняется однозначная последовательность мировых точек.

Существование таких областей и является классической презумпцией, ограниченной неопределенностью сопряженных переменных, но отнюдь не ликвидированной в квантовой механике.

В 1949 г. в статье « S -матрица в квантовой электродинамике»¹ Дайсон писал о двух уровнях абстрактного анализа квантованных полей. Первый — более абстрактный — соответствует гамильтонову формализму. Он основан на игнорировании атомной структуры тела, при помощи которого измеряются переменные данного поля. Точность измерений ограничивается лишь двумя постоянными — скоростью света и квантом действия. Иными словами, классическая презумпция определенности динамических переменных в каждой точке и в каждое мгновение ограничена соотношениями неопределенности, а возможность определения физических величин в данное мгновение в конечных пространственных областях ограничена релятивистскими соотношениями.

Другая концепция ближе к действительности, точнее, связана с меньшим уровнем абстракции. В ней учитывается атомистическая структура тел, при помощи которых измеряются переменные данного поля, и точность измерения ограничена не только конечной скоростью света и дискретностью действия, но также постоянной тонкой структуры и еще одной постоянной — значением массы электрона. Эти

¹ F. Dyson. Phys. Rev., 1949, 75, 1736. См. перевод в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики», стр. 205—238.

постоянные характеризуют взаимодействия различных полей, ограничивающие точность определения каждой переменной данного поля.

13

Ультрарелятивистские процессы взаимодействия полей могут сказываться лишь на значении собственной массы и заряда частицы и не сказываются на ее поведении в макроскопических областях, т. е. не нарушают макроскопического нулевого значения поля. Подобные ультрарелятивистские эффекты в вакууме не вытекают из интегральной характеристики пространства (нулевое значение поля, т. е. отсутствие взаимодействия данной частицы с другими) и не изменяют такой характеристики и всего, что из нее следует,—негативного определения пространства-времени как актуально бесконечного множества равноправных мировых точек и относительности движения тела, предоставленного самому себе.

Но ультрарелятивистские эффекты могут не сказываться и на любом другом, ненулевом значении поля. Заданное в некоторой области поле будет макроскопически усредненным и независимым от локальных флуктуаций. В случае гравитационного поля интегральные условия в пространстве могут быть заданы в виде его кривизны, и таким образом для гравитационного поля могут быть сохранены связанные друг с другом понятия негативного определения, ковариантности и относительности. В пространстве, в котором задано гравитацион-

ное поле, движение тела определяется наименьшим значением некоторого интеграла.

Таким образом, перед нами возникают образы двух миров. Один из них — эрлангенский мир, в котором интегральные условия пространства определяют ход локальных процессов и, в частности, поведение частицы в каждой мировой точке. В этом мире царствуют все закономерности, о которых шла речь при изложении классических и релятивистских концепций.

Другой мир — неэрлангенский. В нем локальные процессы не зависят от интегральных условий и законы, управляющие локальными процессами, не могут быть выражены в виде интегральных законов. Ультрарелятивистские эффекты происходят в областях, где бесконечность как результат деления конечной величины теряет физический смысл, где нарушается классическая презумпция определения событий в последовательные мгновения и в последовательных точках интегральными условиями. Здесь нет метрики, выражающей длину отрезка через разности координат его концов; такая метрика уступает место естественной метрике, а измерение уступает место счету. Здесь теряет свой смысл понятие инварианта координатных преобразований, и та или иная геометрия Клейна не может описать особенности физических процессов. Здесь сохранение определенной физической величины уже не связано взаимно однозначным образом с инвариантностью соответствующего интеграла и не может быть выражено в виде нулевой дивергенции этой величины.

Ультрарелятивистские эффекты оказываются вне эрлангенской физики потому, что они состоят в качественных переходах частицы одного типа (кванта одного поля) в частицу другого типа (в квант другого поля). Их античным прообразом служит не аристотелево «местное движение», т. е. перемещение (φορά), а, скорее, «субстанциальное движение», т. е. исчезновение (φθορά) и возникновение (γενεσις) тела. Немного позже мы внесем необходимые исправления в эту характеристику прообразов современного представления о трансмутациях элементарных частиц. Сейчас остановимся на связи между неэрлангенским миром ультрарелятивистских эффектов, воздействующих на собственную массу и заряд частицы, и эрлангенским миром, где частицы движутся с той или иной скоростью, неограниченной (механика Ньютона) или ограниченной (механика Эйнштейна), безусловно определенной в каждой точке (классическая механика) или определенной за счет неопределенности координат (квантовая механика). Какова связь между этими мирами? Если закономерности неэрлангенской физики нельзя вывести из макроскопических закономерностей, то, быть может, удастся вывести макроскопические закономерности из неэрлангенских закономерностей ультрамикроскопического мира?

Здесь мы вступаем в область совершенно гипотетических построений, которые очень далеки от однозначного качественного объяснения фактов и тем более от строгой количественной теории, но могут иллюстрировать в некоторой мере характер тенденций, наметившихся в теории элементарных частиц, и помочь историче-

ской ретроспекции. Каковы бы ни были исторические прообразы, каковы бы ни были конкретные формы идеи квантованного пространства-времени, медленно пробивающей себе дорогу в современной физике, во всяком случае мы можем считать логически мыслимым представление об элементарных сдвигах-регенерациях с постоянной скоростью, равной скорости света. Эти сдвиги образуют ультрамикроскопическую траекторию частицы. Макроскопическая траектория — результат большого числа подобных элементарных сдвигов. Макроскопическая траектория частицы с ненулевой собственной массой отличается от ультрамикроскопической траектории, и ее макроскопическая скорость меньше ультрамикроскопической скорости.

Мы приходим к негативному определению актуально бесконечного множества мировых точек. Но бесконечность этого множества условная. Она сохраняется только в макроскопическом аспекте. В ультрамикроскопическом представлении она исчезает. Множество мировых *точек* бесконечно, множество пространственно-временных *клеток* в конечной пространственно-временной области конечно. Бесконечность появляется при представлении пространственно-временных клеток в виде точек, т. е. при переходе от ультрамикроскопической траектории частицы к макроскопической.

Уже в 20-е годы квантовые идеи дали толчок попыткам радикального отказа от понятия бесконечности в математике. Гильберт говорил, что квантовая теория ведет к атомистическим представлениям о пространстве, а теория Эйнштейна — к представлению о конечной Все-

ленной¹. Это решение радикально устраняет и бесконечность и ее противоречия, следовательно, и парадоксы Зенона. По поводу апории дихотомии Гильберт и Бернайс пишут, что пространственно-временное представление движения не обязательно применимо к областям, которые в настоящее время не могут быть наблюдаемы².

Вывод, относящийся к апориям Зенона, очевиден: если нет бесконечности, то нет и ее противоречий. Но вывод об ограниченной делимости пространства, о непрерывном пространстве как о приближенном представлении, разумеется, совсем не очевиден. Мы подчеркнем здесь одну сторону дела, важную для историка науки. Из квантовой теории вовсе не следует однозначным образом существование атомистической структуры пространства и времени, существование далее неделимых конечных пространственных расстояний и интервалов времени. Гильберт экстраполировал наметившиеся в физике тенденции и исходил в своих математических построениях из вероятной, но еще не построенной физической концепции. Это важный и, по-видимому, весьма плодотворный метод. Развитие квантовой механики и квантовой электродинамики сделало вероятным существование элементарных пространственно-временных клеток. Но сейчас можно пойти дальше и исходить, если не в математической теории, то в ре-

¹ Д. Гильберт. Основания геометрии. М.—Л., 1948, стр. 342—343.

² D. Hilbert u. P. Bernays. Grundlagen der Mathematik. Berlin, 1934, S. 15—16.

троспективных исторических оценках, из новых тенденций релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики. Если уже стать на путь Гильберта и оценивать понятие актуальной бесконечности с точки зрения еще не построенных в однозначной форме физических теорий, то, пожалуй, имеет смысл учитывать при этом дальнейшие тенденции, *выводящие* соотношения теории относительности из картины дискретных клеток пространства-времени. Тогда актуальная бесконечность пространства и времени вновь входит в картину мира, правда, на сей раз как приближенное представление, справедливое для областей, больших по сравнению с элементарными пространственно-временными клетками. Первая версия актуальной бесконечности как сосчитанной бесконечности принадлежит истории; вторая версия — понятие актуальной бесконечности, реализующейся в бесконечных множествах, обладающих определенной мощностью и соответствующих бесконечным многообразиям физических свойств, связанных функциональной зависимостью, — сохраняется в качестве приближенного представления. Третья версия — актуальная бесконечность как результат статистической континуализации конечных множеств, бесконечность, появляющаяся при переходе от *счета* конечного многообразия дискретных объектов к *измерению* бесконечного макроскопически непрерывного многообразия.

Эйнштейн и Бор

1. О математическом и логическом «безумии» современной физики.
2. Эйнштейн.
3. Бор.
4. Конфликт.
5. Синтез.

1

Нильсу Бору принадлежит замечание, очень точно и глубоко характеризующее науку нашего столетия. Это замечание было сделано в связи с единой спинорной теорией Гейзенберга. «Концепция Гейзенберга,— говорил Бор,— несомненно, безумная концепция. Но достаточно ли она безумна, чтобы быть правильной?..»

Приведенная фраза проникает в самое существо современной ситуации в теории поля и вместе с тем в существо науки XX в., когда

парадоксальность стала существенным критерием достоверности. Очень парадоксальное и вместе с тем чрезвычайно убедительное и точное замечание Бора и само служит характерным примером этой парадоксальной достоверности — оно не могло быть сделано ни в одну из прошлых эпох.

В конце XIX в. многие физики говорили, что картина мира в основном завершена, остается уточнение деталей. Пафос научного познания состоял тогда у большинства в объяснении нового явления или нового ряда явлений с неизменных позиций, в свете неизменных фундаментальных принципов.

Не следует преувеличивать и абсолютизировать эту характерную для XIX в. глубоко викторианскую черту. Прошое столетие далеко ушло от XVIII, а ведь даже и тогда критика подчас направлялась на общие устои науки. В XIX в. уже знали, что закономерности сложных форм движения (например, статистические закономерности термодинамики) не сводятся к законам ньютоновой механики. Но никто из физиков XIX в. не сомневался в точности законов Ньютона и только в начале нашего столетия их начали рассматривать как приближенное представление о движении тел. В XX в. речь шла не только и даже не столько о новых кинематических схемах. Такие новые схемы, выглядевшие на первых порах крайне парадоксальными, появлялись уже в древности. Трудно полностью оценить революционный характер античной идеи изотропности пространства — представления об антиподах, не падающих с «нижней» поверхности Земли. Такой же па-

радоксальной казалась гелиоцентрическая система. Но в XX в. «безумие» состояло в другом. Напомним, что предшествующее столетие пришло к мысли о непротиворечивости парадоксальных геометрий, в которых сумма углов треугольника может быть больше или меньше двух прямых углов, где два перпендикуляра к прямой сходятся в одной точке или, наоборот, расходятся все дальше один от другого. Появилась даже мысль о реальных эквивалентах неевклидовых геометрий, но эта мысль не вызвала существенного эффекта в физике, она лишь помогла новым идеям развиваться в самой геометрии, подобно виртуальным квантам, излучаемым частицей и поглощаемым.

XX столетие начало с того, что превратило в экспериментально проверенные, непреложные и однозначные физические теории самые парадоксальные представления сначала многомерной, а затем неевклидовой геометрии. Это была совершенно новая мысль о достоверности геометрического парадокса. Речь шла о реальной, физической, независимой от деятельности познающего духа, объективной достоверности; поэтому указанная мысль была несовместима с какой бы то ни было формой априоризма или конвенционализма. Речь шла о парадоксальной достоверности не только явлений, но и общей схемы бытия — объективного *ratio* мира, и такая мысль была несовместима с «чистым описанием» физических процессов.

Идея физической достоверности *математического* «безумия» связана с именем Эйнштейна. Идея физической достоверности *логического* «безумия» связана с именем Бора.

Именно логическая парадоксальность свойственна боровскому принципу дополнительности. Можно довольно далеко провести аналогию между отношением принципа дополнительности к логике и отношением принципа относительности к геометрии. В XIX в. уже существовали попытки построения логики, отказывающейся от постулата исключенного третьего. Этим схемам иногда придавали онтологический смысл, связывали их с физическими образами, но последние, как и физические образы неевклидовой геометрии в XIX в., напоминают виртуальные фотоны, поглощаемые излучившей их частицей, — их эффект сказался только в самой логике. Критика классической логики давно расшатала уверенность в абсолютном характере принципа исключенного третьего, но отсюда было еще далеко до однозначной *физической* теории.

Начиная со второй четверти нашего столетия положение изменилось. Концепции Бора и других основателей квантовой механики связали неопределенность и дополнительность сопряженных динамических переменных движущейся частицы с экспериментально проверенными, достоверными физическими выводами. Абсолютная реальность, абсолютная достоверность, несомненная физическая содержательность логического парадокса так же характерна для квантовой механики, как для теории относительности характерна достоверность и физическая содержательность парадоксальных геометрических соотношений. Парадоксальность самого бытия, парадоксальный характер упорядочивающего Вселенную объективного *ratio* —

вот что поразило широкий круг людей, ознакомившихся с идеями Эйнштейна и Бора, а иногда лишь интуитивно угадавших скрывавшийся в них поворот в характере научного мышления.

Как известно, наряду с функциями, указывающими зависимость их числовых значений от значений аргумента, в математике рассматриваются операторы, превращающие уже не одно значение функции в другое, а один *вид* функции в другой вид. Крупные физические открытия всегда в какой-то мере играли аналогичную роль. Они не только увеличивали число известных людям закономерностей природы, но изменяли также методы науки, стиль научного мышления, характер пути, ведущего от частных наблюдений к общим законам. В обобщениях Эйнштейна и Бора «операторный» эффект гораздо сильнее, чем в теориях прошлого. В руках Эйнштейна и Бора физика изменила не только содержание результатов научной мысли. Она радикально изменила логическую структуру и математический аппарат. Более того, изменилось, стало принципиально иным отношение физики к логике и математике. Физика неизбежно должна включать в свои рамки геометрические аксиомы и логические принципы в качестве физических констатаций. Вместе с тем она может представить соотношения и связи физических объектов в масштабах Вселенной в целом и становится, таким образом, общей концепцией мироздания. Наряду с беспрецедентным проникновением собственно физических понятий и методов во все области науки, преобразующее воздействие физики XX столетия на

науку и культуру определяется новыми математическими и логическими принципами, которые получили в физике онтологический смысл.

Поэтому имя Эйнштейна будет всегда символом не только гигантского приращения сведений о Вселенной, но и гигантского преобразования вида функции, связывающей результаты научных обобщений с их исходными данными. Речь идет о преобразовании и наделении физическим содержанием математических понятий. Имя Бора также будет символом преобразования вида функции, связывающей выводы науки с наблюдениями, но здесь уже речь идет о преобразовании логики научных умозаключений.

По-видимому, выяснение отношения между указанными «операторами», преобразовавшими научную мысль XX столетия, должно опираться на анализ отношений между количественно-математическими понятиями, вырастающими из измерения физических величин, и собственно логическими понятиями. С этой точки зрения мы и взглянем на некоторые исходные идеи Эйнштейна и Бора, на конфликт между указанными идеями и на их последующий синтез.

2

Теория относительности Эйнштейна была результатом систематического построения такой универсальной концепции пространства и времени, из которой естественно, без каких-либо сделанных *ad hoc* допущений выводится

отсутствие эфирного ветра¹. Исходный факт — постоянство скорости света — казался «чудом», т. е. чем-то парадоксальным. Но, как писал Эйнштейн, «целью всякой мыслительной деятельности служит превращение „чуда“ в нечто постижимое»². Результат опыта Майкельсона потерял свой парадоксальный характер в рамках парадоксальной теории. При этом *кинематический* парадокс — физический объект движется с одной и той же скоростью по отношению к смещающимся одна относительно другой системам — теряет свою парадоксальность, становясь естественным выводом из парадоксальной *метрической* констатации: трехмерные, чисто пространственные расстояния и временные интервалы меняются при координатных преобразованиях, а инвариантами преобразования оказываются четырехмерные интервалы.

Общая теория относительности была дальнейшим обобщением и «парадоксализацией» геометрии: метрические свойства пространства-времени отступают от эвклидовых соотношений, гравитационные поля вводят в картину мира переменную метрику и соответственно *переменную геометрическую аксиоматику*.

Тот факт, что исходные понятия теории относительности связаны с метрикой и измерением, не может казаться неожиданным. Само понятие относительности неотделимо от метрических соотношений, от мероопределения, от измеримых физических величин, которые явля-

¹ См. стр. 40—44.

² A. Einstein. Conceptions scientifiques, morales et sociales. Paris, 1952, p. 209.

ются инвариантами тех или иных групп преобразований. В зависимости от того, какие именно физические величины служат инвариантами преобразований и какова геометрическая размерность и структура соответствующих однородных многообразий, мы отличаем один от другого классический принцип относительности (инвариант — трехмерное состояние), специальный принцип относительности (инвариант — четырехмерный интервал с эвклидовой метрикой), общий принцип относительности (инвариант — интервал в четырехмерном римановом пространстве). Но во всех случаях понятие относительности имеет смысл, если речь идет об инвариантных функциях координат того или иного по размерности и кривизне пространства. В пространстве, состоящем из дискретных точек, т. е. в нульмерном пространстве, метрика становится абсолютной, она определяется не измерением, а счетом. Абсолютной будет метрика и в дискретном пространстве ненулевой размерности. Напротив, во всех случаях, когда между двумя точками пространства находится бесчисленное множество промежуточных точек, число точек уже не может служить мерой расстояния между точками, и такой мерой служит функция координат точек, вид которой характеризует метрику данного пространства. Именно в этой особенности бесконечных множеств таится источник исторической и логической связи между понятиями бесконечности и относительности¹.

¹ См. предыдущий очерк «Бесконечность и относительность», стр. 212—221.

Когда перед нами мировая линия частицы, то бесконечное множество мировых точек в каждом четырехмерном интервале имеет физический смысл, если в каждой пространственной точке в соответствующий, определенный видом мировой линии момент времени с полной достоверностью может быть обнаружена частица. Поэтому относительность не только не колеблет логики с оценками «истинно» и «ложно», основанной на принципе исключенного третьего, но, наоборот, предполагает подобные оценки суждений о принадлежности частице определенных координат. Но число таких суждений бесконечно.

Предикаты, приписываемые субъекту, образуют бесконечное множество, *непрерывное предикатное многообразие*.

Истинная траектория частицы соответствует бесконечному множеству ответов «да» на вопрос о пребывании частицы в каждой точке траектории. Иной траектории, полученной при вариации истинной, соответствует бесконечное множество ответов «нет». Если мы не можем определить, проходит ли частица через некоторую точку, у нас остается выход: вопрос о пребывании точки заменяется вопросом об определенной *вероятности* пребывания. О подобном переходе от оценки «неопределенно» к оценке «определенная вероятность» речь пойдет немного позже. Во всяком случае, метрические соотношения требуют непрерывного многообразия предикатов, достоверно приписываемых тождественной себе частице.

Чтобы отличить логическую структуру принципа относительности Эйнштейна от ло-

гической структуры классической механики, нужно заметить, что в последней частица могла быть тождественной самой себе, когда ее движение характеризовалось бесконечным многообразием *различных* пространственных предикатов, время пребывания частицы в различных точках могло быть одним и тем же; классическая механика допускала бесконечную скорость движения. В теории относительности частица может быть тождественна сама себе, если каждому непрерывному многообразию ее пространственных координат соответствует невырожденное непрерывное многообразие моментов времени. Логика теории относительности Эйнштейна оперирует *четырёхмерным непрерывным предикатным многообразием*¹.

Перейдем от теории относительности к некоторым связанным с ней сторонам мировоззрения Эйнштейна. Речь идет о его взглядах на математику и логику. Эйнштейн говорил, что геометрия может переходить в зависимости от физических условий от одной системы исходных понятий к другой. Но она остается логической наукой, так как выводит следствия из постулатов строго логически. При этом Эйнштейн не сомневался в неизменности логических правил, с помощью которых геометрия переходит от одной теоремы к другой. Меняются исходные геометрические утверждения (о размерности и кривизне данного пространства) и соответственно меняются выводы. Но

¹ См. стр. 161—162.

логические правила сохраняются. Логика не подвергается «физикализации», которую претерпела геометрия.

3

Для Бора, как и для Эйнштейна, характерно *систематическое* построение физической теории, т. е. выведение ее из возможно более общих допущений. Парадоксальные, с точки зрения классической электродинамики, факты устойчивости атомов и дискретности спектров были первоначально объяснены двумя постулатами: двигаясь по «разрешенной» орбите, электрон не излучает; излучение обязано переходу электрона на другую орбиту. Эти постулаты сняли печать парадоксальности с наблюдаемой устойчивости атомов и дискретности спектров; печать парадоксальности перешла на боровские постулаты. Но это было только начало «бегства от чуда» в атомной физике. Парадоксальные постулаты Бора вскоре стали естественным следствием квантовой механики.

Во второй половине 20-х годов устойчивости классической физики были расшатаны и феноменологическая трактовка неопределенности уже не могла иметь успеха. Были попытки спасти классические устойчивости, ограничив неопределенность сопряженных переменных феноменологическими рамками. Речь идет об идее «скрытых параметров»: мы не можем точно определить значения координат и составляющих импульса, времени и энергии, потому что нам неизвест-

ны дополнительные параметры, определяющие достоверным образом указанные физические величины. Можно увидеть некоторую аналогию между идеей скрытых параметров и лоренцовой концепцией абсолютного сокращения. Лоренцова концепция ограничивала феноменологическими рамками постоянство скорости света в различных инерциальных системах: свет в эксперименте Майкельсона меняет скорость, но мы не можем зарегистрировать изменение, поскольку оно компенсируется сокращением продольного плеча интерферометра и вообще продольным сокращением масштабов по сравнению с абсолютными масштабами. Аналогичным образом существуют точные значения координат и составляющих импульсов, но они по тем или иным причинам не могут быть обнаружены.

Объективный характер парадоксальных утверждений квантовой механики пытались обойти и иными путями. Некоторые физики склонялись к более или менее последовательному отрицанию объективного субстрата наблюдаемых и измеряемых процессов. Сейчас вряд ли возможен сколько-нибудь серьезный рецидив критики квантовой механики с классических позиций, как и рецидив ее феноменологической трактовки. Принцип дополненности представляется объективной констатацией и, подобно теории относительности, указывает на объективную парадоксальность бытия.

Только в теории относительности физически содержательной стала парадоксальная, многомерная и затем неевклидова геометрия,

а в квантовой механике — парадоксальная логика.

Что касается математического аппарата, то Бор сравнительно мало интересовался его «парадоксализацией». Методы матриц, операторов, собственных функций, гильбертово пространство и т. д. не меняли смысла исходных постулатов квантовой механики и в сущности не нужны для понимания *физической сущности* этих постулатов. Общую теорию относительности нельзя понять без метрических категорий, основы квантовой механики могут быть поняты при неметрическом противопоставлении процессов измерения сопряженных переменных. Может быть, именно поэтому в работах Бора по квантовой механике так мало сколько-нибудь сложных математических конструкций. Но дело не в этом. Противопоставляя в известной мере физико-геометрическую тенденцию Эйнштейна и физико-логическую тенденцию Бора, мы можем охарактеризовать с некоторой новой стороны важный для мировоззрения Бора *переход от понятия неопределенности к понятию дополненности*.

Принцип дополненности *непосредственно* не применяется в физике. Для квантовомеханических расчетов достаточно принципа неопределенности в форме соотношений, написанных Гейзенбергом. Эти соотношения имеют метрический смысл, речь идет об измерении координат, импульсов, времени и энергии. Соотношение неопределенности указывает на условия, делающие возможным сколь угодно точное определение значений переменной, получение непрерывного многообразия таких значе-

ний и всех связанных с подобным многообразием метрических понятий.

Напротив, принцип дополнительности делает акцент на неметрической ситуации — существовании двух нетождественных систем: квантового объекта и, иного по логическому характеру его анализа, классического объекта. Каждый из этих объектов в силу контролируемого взаимодействия позволяет сколь угодно точно определить одну из сопряженных переменных и в то же время своим неконтролируемым взаимодействием препятствует определению сопряженной переменной. Если можно провести некоторую границу между принципом неопределенности и принципом дополнительности, то по одну сторону останется измерение величин, а по другую — логическое противопоставление измеряющих схем.

Принцип относительности при его аксиоматизации приближается к геометрическим схемам инвариантности по отношению к той или иной группе преобразований и к метрическим понятиям. Принцип неопределенности при своей аксиоматизации (а именно в этом значении боровской дополнительности) приближается к логическому противопоставлению. Таково в сущности и противопоставление квантового и классического объектов. Мы делим серию связанных друг с другом физических процессов на две части: одна из них рассматривается в микроскопическом аспекте (мы здесь учитываем влияние взаимодействий на значения переменных), в другой части мы отказываемся от такого учета. Тот предикат кван-

тового объекта, который получает количественную оценку при взаимодействии с классическим объектом, может быть определен с неограниченной точностью. Другой предикат (сопряженная переменная) может быть определен с неограниченной точностью при взаимодействии с *другим* классическим объектом. Но различие между классическими объектами, с одной стороны, и квантовыми объектами, с другой,— это логическое различие.

Итак, аксиоматизация неопределенности у Бора сохраняет единство и неизменность математических понятий и метрических соотношений при определении переменных, но не сохраняет единства логических норм.

4

Эйнштейн считал выдвинутую Бором модель атома гениальным взлетом физической интуиции. Модель Бора была построена на основе отрывочных и, как казалось тогда, разрозненных фактов.

«Это было так,— вспоминал впоследствии Эйнштейн,— точно из-под ног ушла земля, и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для хи-

мии. Это кажется мне чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли»¹.

Слово «музыкальность» может многое объяснить. Из эпистемологических взглядов Эйнштейна вытекала его оценка роли интуиции в поисках научной теории, адекватной действительности. Эйнштейн, как мы видели, не придавал логическим схемам самим по себе онтологической ценности. Результаты логического анализа приобретают физический смысл при сопоставлении с наблюдениями, но уже на исходных стадиях логического анализа интуиция подсказывает, какая система понятий найдет наиболее близкий путь к вычислению величин, допускающих эмпирическую проверку, к эксперименту и к количественно-математическому сопоставлению с наблюдениями и измерением.

Исходная физическая интуиция, как ее понимал Эйнштейн, близка к тому моменту музыкального творчества, о котором говорил наиболее любимый Эйнштейном и наиболее конгениальный ему по духу композитор — Моцарт. Он упоминал о моменте, «когда в одно мгновение слышишь всю, еще не написанную симфонию». Исходная интуиция Эйнштейна предвосхищала симфонию вычислений и экспериментов. Такой была и гениальная интуиция, оправдавшаяся впоследствии в целой симфонии спектральных наблюдений и расчетов атомной физики.

Но в конце 20-х годов выявилось и различие между характером физической интуиции

¹ А. Эйнштейн. Творческая автобиография. Успехи физических наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 87.

Эйнштейна и «наивысшей музыкальностью в области мысли», как называл Эйнштейн интуицию Бора. Принцип дополнительности в этом отношении отличается от принципа относительности. Если вслед за Эйнштейном сравнивать характер физического мышления с музыкальным творчеством, то для Эйнштейна наиболее близким будет лейбницева формула — «музыка — наслаждение души, которая вычисляет, сама не зная того». Интуиция Эйнштейна была предвосхищением допускающих элементарную эмпирическую проверку вычислений, причем вычислений, которые, в отличие от известных Лейбницу и классической науке, в целом производятся по тем или иным правилам в зависимости от физических условий. Интуиция Бора (неявно — уже при разработке модели атома и явно — в работах по квантовой механике) предвосхищала не только вычисления, но все конструкции разума, нарушающие старые логические правила физических умозаключений.

В 1927 г. начался растянувшийся почти на три десятилетия спор между Эйнштейном и Бором об основах квантовой механики. В конце 40-х годов позиции того и другого были высказаны в итоговых очерках, помещенных в сборнике статей о мировоззрении Эйнштейна¹. Существует обширная литература, посвя-

¹ The Library of living philosophers. Albert Einstein. Philosopher-Scientist. Ed. by Paul Arthur Schilp. ed. 2. Tudor Publishing Company. N. Y., 1951; N. Bohr. Discussion with Einstein on Epistemological

щенная дискуссии Эйнштейна с Бором и другими представителями господствующего направления в квантовой механике. Мы ограничимся лишь несколькими замечаниями.

Напомним приведенное в первом очерке этой книги замечание Эйнштейна о квантовой механике. Эйнштейн писал о сторонниках господствующего вероятностно-статистического понимания квантовой механики: «...они из нужды делают добродетель»¹. Нужда состоит в существовании множества экспериментальных доказательств волновой природы частиц и корпускулярной природы волновых полей, т. е. противоречия, которое может быть разрешено квантовомеханическими соотношениями. Квантовая механика подтверждается всей суммой подобных доказательств, и в этом смысле без нее нельзя обойтись. «Нужда» указывает на «внешнее оправдание» квантовой механики. Но следует ли отсюда «добродетель», можно ли удовлетвориться квантовой механикой с точки зрения «внутреннего совершенства» теории?

С этим связан вопрос о причинности. Если квантовая механика в той форме, какую она получила в 1925—1927 гг., не только соответ-

Problems in Atomic Physics, p. 199—241 (русск. перевод в кн.: Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., ИЛ, 1961, стр. 51—93); A. Einstein. Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume, p. 663—688 (русск. перевод в кн. «Философские вопросы современной физики». М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 223—248).

¹ См. стр. 75,

ствуует фактам, но и обладает достаточным «внутренним совершенством», достаточной «добродетелью», то представление о статистических закономерностях микромира может претендовать на роль наиболее общего принципа, из которого, естественно, вытекают соотношения квантовой механики. Иначе говоря, «бог играет в кости». Это характерная для Эйнштейна форма тезиса: «основные законы бытия — статистические законы». Таковую мысль Эйнштейн приписывал своим оппонентам¹.

Сам он держался иной концепции — «бог не играет в кости».

Эйнштейн видел, что его позиция не имеет, как он писал, «осязаемого фундамента», не обладает «внешним оправданием». Тем не менее Эйнштейн продолжал искать решения проблемы на путях единой теории поля.

Здесь важно подчеркнуть следующее. Эйнштейн разрабатывал проблемы единой теории поля не в корпускулярно-квантовом разрезе, т. е. как теорию перехода частиц одного типа в частицы другого типа, образования частиц различных масс и т. д. Он разрабатывал единую теорию в континуально-геометрическом разрезе, как учение о свойствах пространственно-временного континуума, причем — о его метрических свойствах. Иными словами, Эйнштейн анализировал изменение геометрических свойств континуума, переход от одной метрики к другой, от одной аксиоматизированной системы метрических понятий к другой, он создавал все новые геометрические парадок-

¹ См. стр. 76—77,

сальные конструкции и не покушался на общую логическую базу всех этих конструкций.

Теперь нам известно, что такой путь не мог привести к единой теории поля. Нам теперь известно также, что вопрос о единой теории лежал все же в основном фарватере физики. Отметим только, что континуально-геометрическая трактовка пространства-времени привела к теории относительности, но не могла вывести относительность из более общих допущений. В статье «Замечания к эйнштейновскому наброску единой теории поля» Гейзенберг говорил, что поведение масштабов и часов принимается в теории относительности как данное и не выводится из каких-либо более общих допущений. Между тем масштабы и часы «построены, вообще говоря, из многих элементарных частиц, на них сложным образом воздействуют различные силовые поля, и поэтому непонятно, почему именно их поведение должно описываться особенно простым законом»¹.

Эйнштейн видел необходимость выведения релятивистских пространственно-временных соотношений из более общих характеристик, учитывающих дискретность вещества. В первом очерке этой книги приводилась итоговая характеристика теории относительности, где Эйнштейн считает необходимым вывести поведение масштабов и часов из их корпускулярной структуры². Но основной фарватер творчества Эйнштейна был направлен к континуально-геомет-

¹ В сб. «Эйнштейн и развитие физико-математической мысли», М., 1962, стр. 65.

² См. стр. 7.

рической единой теории и к поискам исходных нестатистических законов бытия.

Попытки построения единой теории поля не могли вывести теорию относительности из более общих постулатов и не обнаружили нестатистических закономерностей бытия, которые оказались бы более общими, чем статистико-вероятностные закономерности квантовой механики. Но критика Эйнштейна способствовала эволюции квантовой механики. В 1961 г. в Москве, в Институте физических проблем Бор говорил: «Ответы на многие вопросы, в свое время вызывавшие ожесточенные дискуссии, в наши дни известны каждому начинающему. А мне хочется сегодня, когда Эйнштейна уже нет с нами, сказать, как много сделал для квантовой физики этот человек с его вечным, неукротимым стремлением к совершенству, к архитектурной стройности, к классической законченности теорий, к единой системе, на основе которой можно было бы развивать всю физическую картину. В каждом новом шаге физики, который, казалось бы, однозначно следовал из предыдущего, он отыскивал противоречия, и противоречия эти становились импульсом, толкавшим физику вперед. На каждом новом этапе Эйнштейн бросал вызов науке, и не будь этих вызовов, развитие квантовой физики надолго бы затянулось».

Бор говорит о «неукротимом стремлении к совершенству». Это и есть то «внутреннее совершенство», которое выдвигал Эйнштейн в качестве критерия выбора физической теории. Поиски «единой системы, на основе которой можно было бы развивать всю физическую

картину», не могли поколебать квантовую механику. Бор находил все новые и новые контраргументы, парировал критические замечания Эйнштейна, разъяснял все глубже и точнее смысл принципов неопределенности и дополнительности и показывал, что в пределах своей применимости квантовая механика дает полное описание поведения физических объектов. Что же касается пределов применимости квантовой механики, то они были обнаружены позже, когда наметились контуры концепции, еще более радикально отступающей от классической картины мира. Эта концепция покушается на: 1) сколь угодно точное определение отдельной динамической переменной за счет неопределенности сопряженной переменной, 2) образ «классического объекта» с заведомо точными динамическими переменными. Указанная концепция покушается и на релятивистские соотношения. Слово «покушается» в данном случае не имеет агрессивного смысла. Еще Герц говорил, что, оставаясь в пределах данной картины мира, мы не можем дать ей рациональное объяснение — нельзя от Понтия отсылать к Пилату. Релятивистская концепция не может дать обоснования исходных постулатов относительности. Квантовая механика не может дать обоснования своих исходных постулатов. Может быть, их даст более общая теория, которую назовут квантово-релятивистской не только потому, что она присоединяет релятивистские критерии к квантовым, а потому, что из нее вытекают те и другие.

Чтобы закончить беглые замечания о споре между Эйнштейном и Бором и перейти к проб-

леме синтеза их идей, нужно еще остановиться на истоках той удивительной лояльности, с которой велся спор. Речь идет даже не о лояльности, а о чем-то большем: Эйнштейн и Бор остро переживали угрозу их исходным идеям, таившуюся в аргументах противника, и радовались каждому найденному контраргументу. Но и Эйнштейн, и Бор видели друг у друга не только угрожающие их позициям аргументы, но и импульсы для развития и уточнения своих позиций. Конечно, это связано с личными чертами Эйнштейна и Бора, но не только с ними. Для обоих мыслителей характерно очень глубокое понимание недостаточности, ограниченности и неокончательного характера каждой физической концепции. Более того, и у Эйнштейна, и у Бора существовало некоторое интуитивное предвосхищение возможного синтеза противоречивых идей.

Речь идет не только о близости позиций Эйнштейна и Бора, но также о постоянном излучении каждой из противостоящих друг другу концепций образов и идей, которые становились для другой концепции исходным пунктом уточнения и обобщения. Только сейчас и только в самой неоднозначной форме мы можем сказать, куда толкало физику подобное взаимодействие идей Эйнштейна и Бора.

Сейчас видно, что конфликт между Эйнштейном и Бором отражал не столько психологические или биографические различия, сколько длительную разобщенность исходных постулатов теории относительности, с одной стороны, и квантовой механики — с другой. Такого рода конфликты могут быть сняты только са-

мой наукой при переходе ее на такую ступень, где разобщенные постулаты оказываются выводами из более общего постулата. Во второй половине столетия, когда теоретическая физика все решительнее стремится перейти от релятивистских поправок, вносимых в квантовомеханические соотношения, к систематическому (в смысле, о котором говорил Эйнштейн, т. е. обладающему «внутренним совершенством») синтезу релятивистских и квантовых идей, яснее видны и сущность конфликта, и действительная конгениальность, и пути синтеза идей Эйнштейна и Бора.

5

Реплики Эйнштейна, по существу, касались не только той грани, которая отделяет квантовую механику от классических (в общем случае релятивистских) представлений. Они касались и той грани, которая отделяет квантовую механику, созданную в 1924—1927 гг., от более радикальной неклассической позиции. Именно поэтому указанные реплики и толкали квантовую механику не назад, а вперед к дальнейшему обобщению и уточнению. Квантовая механика зиждется на некоторых допущениях, без которых она переходит в более общую теорию. Бор менее, чем кто-либо другой, был склонен абсолютизировать допущения, лежащие в основе квантовой механики. Поэтому его мысль так резонировала на реплики Эйнштейна. В результате споров все отчетливее вырисовывалось основное допущение квантовой механики. Эйн-

штейн указывал на те стороны квантовой механики, которые, как ему казалось, были лишены «внутреннего совершенства». Бор в своих возражениях все точнее формулировал квантовомеханические соотношения как вывод из наиболее общего (для квантовой механики), единого постулата. В чем же состоит этот постулат? О нем сейчас можно сказать гораздо конкретнее и точнее, чем в начале дискуссии между Эйнштейном и Бором.

Конкретнее и точнее можно сейчас охарактеризовать и основной постулат, лежащий в основе теории относительности.

Этот исходный постулат становился осязаемым и явным в значительной, скорее даже в основной, степени в результате развития квантовой механики. Эйнштейну в полемике с Бором не нужно было защищать основные идеи своей теории. Принципы теории относительности не были предметом дискуссии. Эйнштейну не приходилось защищаться. Он мог занимать в споре чисто наступательную позицию. И это было трагедией Эйнштейна, потому что, по существу, ему нечего было защищать. Единая концепция поля не приобрела такой формы, которая позволила бы ей соперничать с идеями Бора. Но реплики Бора и развитие квантовой механики в целом находили живой отклик в сознании Эйнштейна, потому что они наталкивали его мысль на грань, действительно отделяющую теорию относительности от более общей концепции. И здесь, как и в квантовой механике, грань была логической. Между теорией относительности, сформулированной в начале столетия, и попытками построения

единой теории поля нет логической графы, здесь только переход от одной геометрической аксиоматики к другой, аналогичный переходу от специальной теории относительности к общей. Геометрия Эйнштейна, положенная в основу единой теории поля (несимметричный метрический тензор), — более общая, чем риманова геометрия общей теории относительности, так же как и геометрия Вейля (градиентно-инвариантная), геометрия Калузы (пятимерная) и т. д. Но в приведенных строках автобиографического очерка 1949 г., когда Эйнштейн говорил о зависимости поведения масштабов и часов от атомной структуры, речь шла о другом. Эйнштейн писал, как мы помним, что разделение мира на 1) поля и материальные точки и 2) независимые от своей дискретной структуры масштабы и часы *нелогично*.

Итак, в качестве исходного постулата теории относительности мы встречаемся с существованием макроскопических пространственно-временных объектов с гарантированным и независимым от их микроструктуры поведением.

Независимые от своей микроструктуры тела пространственного и временного *отсчета* логически близки к «классическим объектам» квантовой механики, т. е. к телам *взаимодействия*. Для релятивистской физики достаточно постулата независимых тел отсчета, для квантовой физики необходим постулат тел взаимодействия, которые испытывают воздействия частицы и регистрируют ее импульс либо положение (энергию либо время), но реагируют на это воздействие чисто классическим образом. Су-

ществование таких тел позволяет применить к микромиру классические понятия.

Допустим на минуту, что частица *не встречается* с телами, отсчитывающими гарантированно однозначным образом ее пространственно-временные координаты. Тогда теряет физический смысл понятие мировой точки частицы.

Допустим, что частица *не взаимодействует* с классическим объектом. Тогда теряет смысл и *пребывание* частицы в мировой точке (пространственно-временная дислокация частицы) и направление мировой линии (скорость частицы).

Мир, который не состоит из непрерывных пространственно-временных линий, и мир, в котором даже ценой неопределенности сопряженной динамической переменной не может быть определена данная переменная, предстал перед физикой при изучении ультрарелятивистских эффектов и вакуума. Но в первой половине столетия эти области и, быть может, лежащая в них, пока не найденная разгадка единой природы элементарных частиц еще не находились в центре внимания. Эйнштейн хотел проникнуть сюда ценой обобщения геометрии непрерывных пространственно-временных линий. Это не удалось. Но из указанных попыток выросло представление о необходимости более радикальных методов, которые ставят под сомнение непрерывность пространственно-временных линий и тождественность движущейся частицы самой себе. Бор в дискуссии с Эйнштейном доказывал логическую безупречность стройного здания, выросшего на фундаменте квантовой механики. Оба они: и Эйнштейн, и Бор — демонстрировали тот стиль

творчества, который Бор характеризовал, говоря об Эйнштейне: «вечное, неукротимое стремление к совершенству, к архитектурной стройности, к классической законченности теорий, к единой системе, на основе которой можно было бы развивать всю физическую картину».

В 30—40-е годы большинство физиков было убеждено, что всякие попытки Эйнштейна построить единую теорию поля уведут физику в сторону от ее основного пути. Теперь мы иначе смотрим на эти попытки. Мы видим связь их с основной линией творчества Эйнштейна, с обобщением геометрии непрерывных мировых линий. Мы видим и позитивный итог попыток — сама неудача кажется нам позитивным итогом.

Следует подчеркнуть один факт истории физики первой половины нашего столетия, ускользающий обычно от внимания. Путь, которым шел Эйнштейн, путь последовательного обобщения геометрии пространственно-временного континуума, не привел к единой теории поля. Но и линия Бора, исходящая из дополнительной определенности сопряженных переменных, не привела к такой теории. Более того, постулат классического объекта с гарантированными классическими переменными, позволяющими сколь угодно точно определить одну из переменных частицы за счет неопределенности другой переменной,— этот постулат не дает возможности непротиворечивым образом описать ультрарелятивистские эффекты. Аналогия с безуспешностью попыток Эйнштейна — весьма условная. Затруднения квантовой теории поля сочетались с поразительными

успехами рецептурных приемов перенормировки, с небывалым совпадением теоретически вычисленных величин с данными эксперимента. Речь идет о работах большинства теоретиков, о работах целого поколения, и здесь можно найти мало общего с ситуацией в Принстоне. Но для нас важна одна общая черта. В обоих случаях развитие теории наталкивалось на грань, отделяющую данную теорию не от чего-то исключаящего ее, а от обобщения, позволяющего вывести данную теорию из более фундаментальных допущений. В обоих случаях грань, на которую наталкивалась теория, таила большое «внутреннее совершенство» этой теории.

На первый взгляд геометрическая «принстонская» попытка единой теории поля страдала не столько недостатком «внутреннего совершенства», сколько недостатком «внешнего оправдания». Но здесь мы сталкиваемся с условностью разграничения этих критериев. Единые теории поля, выдвинутые Вейлем, Эйнштейном и другими мыслителями, основанные на обобщении геометрии пространственно-временного континуума, исходили из общих допущений, но, по существу, не из физических. Глубоко физическая интуиция Эйнштейна, всегда искавшего среди исходных понятий такие понятия, которые приводят к экспериментально проверяемым выводам, не удовлетворялась чисто геометрическими допущениями. В общей теории относительности кривизна пространства была физическим допущением, она отождествлялась с гравитационным полем. Это отождествление могло быть обосновано

физическими аргументами (принцип эквивалентности) и впоследствии прямыми наблюдениями (искривление лучей света в гравитационном поле Солнца и др.).

В случае единой теории поля исходные *физические* допущения должны были таить какую-то, хотя бы интуитивно угадываемую, связь с фактическими, экспериментально обнаруживаемыми *взаимодействиями различных полей*. Но эта грань — переход от одного поля к взаимодействию различных полей — ограничивала и квантовую механику, созданную в 1924—1927 гг.

Исходное допущение теории относительности — независимый от дискретной структуры четырехмерный объект отсчета и исходное допущение квантовой механики — классический объект взаимодействия оказались недостаточно общими при подходе к *одной и той же* грани.

Фронт физики в целом подошел к этой грани в середине нашего столетия. Для его первой половины характерно раздельное развитие теории относительности и квантовой механики. Этому не противоречит развитие релятивистской квантовой физики — она решала лишь частные задачи. В 50-е и в 60-е годы теория относительности и квантовая механика не слились еще в единую и стройную концепцию, но уже вырисовываются контуры такой концепции — линия, отделяющая ее от известных нам. Эта линия еще зыбкая и в значительной мере пунктирная. Мы можем сказать только одно: в таких-то и таких-то пунктах новая концепция, вероятно, будет отличаться от существую-

ющих такими-то и такими-то чертами. Вероятно, она поставит в центр внимания не отдельные поля, а взаимодействие различных полей. Вероятно, она радикальнее отойдет от классических понятий, чем это сделали физические теории первой половины столетия. Вероятно, она в какой-то мере откажется от гамильтонова формализма... Прибавим еще одно «вероятно»: новая концепция будет опираться на некоторый синтез собственно логических и метрических понятий.

Какими бы неясными ни были контуры физики второй половины столетия, мы можем не сомневаться в радикальном характере начавшейся уже сейчас переоценки ценностей. Переоценка охватывает и суждения о прошлом. Попытки последовательно релятивистской реформулировки теории квантованных полей (не столько позитивными решениями, сколько поднятыми проблемами) заставляют отказаться от старого противопоставления фарватера, в котором двигалась мысль Эйнштейна, и фарватера физических идей Бора.

Фейнман однажды пояснил свою концепцию движения позитрона аналогией с зигзагом одной и той же дороги, открывшимся взору летчика, в то время как внизу казалось, что через местность проходят различные дороги, не связанные одна с другой. В истории науки подобная ситуация встречается часто. Наука всегда поднимается вверх, к бесконечно высоким вершинам абсолютной истины, и при таком подъеме дороги, казавшиеся внизу противоположными, иногда предстают в качестве элементов единого пути.

Современная точка зрения на дороги, которыми шли Эйнштейн и Бор, учитывает такие физические процессы и соответственно такие величины, а также качественные модели, которые раньше были неизвестны, либо по другим причинам не становились исходным пунктом ретроспективных оценок.

Теория индивидуальных ошибок в какой-то мере ограничивает основную посылку квантовой механики: дискретное поле, т. е. совокупность некоторых частиц, взаимодействует с объектом, по отношению к которому мы отказываемся от учета его дискретности. Такая точка зрения законна, пока более сложные взаимодействия (описание которых требует учета дискретности взаимодействующих объектов) остаются незначительным придатком к основным процессам. Но когда мы встречаемся с большой по величине константой связи (мезонные поля) или же с очень большими энергиями взаимодействующих квантованных полей, тогда требуются принципиально иные схемы. Одной из них служит S -матрица Гейзенберга — оператор, переводящий волновую функцию частицы *зadолго* до рассеяния в волновую функцию рассеянной частицы, соответствующую времени *много позже* рассеяния. Слова «зadолго» и «много позже» означают интервалы времени, весьма большие по сравнению с временем рассеяния. Частица как бы исчезает или прячется от взора исследователя в момент рассеяния. Что же с ней происходит, *исчезает* она или *прячется*, соответствует ли формализму S -матрицы реальное прекращение непрерывного процесса изменения координат

частицы, проходящей на каждом отрезке через бесконечное множество положений? Иначе говоря, соответствует ли отказу от гамильтонова формализма, прослеживающего поведение частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению, *принципиальная* невозможность применения континуального представления о движении?

S -матрица соответствует более точному отображению действительных процессов. Мы уже упоминали ¹ статью Дайсона « S -матрица в квантовой электродинамике», где дана схема двух последовательных этапов изучения микропроцессов. Теперь рассмотрим ее с несколько иной стороны.

Первый этап — описание картины, открывшейся «идеальному» наблюдателю, который пользуется приборами, заведомо не обладающими атомной структурой, т. е. классическими объектами. У этого наблюдателя точность измерений ограничена фундаментальными постоянными — скоростью света и квантом действия. Этот наблюдатель, пользуясь взаимодействиями полей, изучает спектры, бомбардирует атомные системы и в результате измеряет напряженность отдельного данного поля, не возмущенного взаимодействием.

Второй наблюдатель (Дайсон называет его «реальным») не может игнорировать атомную структуру своих приборов, и перед ним раскрывается картина взаимодействия дискретных систем — квантованных полей. Производимые им измерения ограничены помимо скорости

¹ См. стр. 256.

света и кванта действия и другими величинами, константами связи полей и значениями масс взаимодействующих частиц. «Реальный» наблюдатель не может определить напряженность невозмущенного поля и не может ни при каких условиях проследить движение частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению.

Второй («реальный») наблюдатель Дайсона должен учитывать условность основного допущения квантовой механики — существование чисто классического объекта, позволяющего определить с неограниченной точностью некоторую переменную ценой неопределенности другой, сопряженной переменной. Но, учитывая взаимодействие полей *полностью*, т. е. не исключая одно из полей из квантово-атомистической картины, второй наблюдатель не сможет уже без дополнительных условий пользоваться и допущением Эйнштейна, допущением четырехмерного объекта отсчета, допущением существования масштабов и часов, поведение которых не зависит от их микроструктуры. Иными словами, второй наблюдатель Дайсона переходит за ту грань, которая отделяет квантовый мир Бора (с классическими объектами взаимодействия) и релятивистский мир Эйнштейна (с независимыми объектами отсчета) от более точной и конкретной картины.

Переход к более детальному учету взаимодействий исключает детализацию движения в пространстве и времени. Вопрос состоит в следующем: можно ли считать невозможность пространственно-временной детализации принципиальной, ограничивают ли взаимодействия полей представление о непрерывном движе-

нии частицы, прерывают ли взаимодействия полей движение частицы?

Представление об ультрарелятивистских эффектах трансмутации частиц, об ее аннигиляциях и регенерациях, не позволяющих проследить движение частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению, высказывалось не раз. Оно, как мы видели, позволяет наполнить физическим содержанием концепцию дискретного пространства и времени¹. Сама по себе эта концепция дискретной геометрии не имела бы физического смысла, как не имела его неевклидова геометрия до того, как Эйнштейн отождествил гравитационные поля с изменением метрических свойств пространства-времени (хотя сама мысль о возможности физических преобразований дискретной, как и неевклидовой, геометрии высказывалась раньше). Невозможность проследить движение частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению (независимо от дополнительности сопряженных переменных) имеет, по-видимому, столь же принципиальный характер, как невозможность регистрации движения относительно эфира и невозможность точного определения координат при точном определении импульса. Если такую невозможность вывести из наиболее общих постулатов, причем *физических* постулатов, то теория поля избавляется от бесконечных значений собственной энергии частицы: виртуальный квант, который не только не может быть наблюдаем

¹ См. очерк «Эйнштейновский критерий „внутреннего совершенства“ физической теории и концепция дискретного пространства-времени», стр. 138—164.

на сколь угодно малом отрезке, но и, действительно, не может отойти от частицы на расстояние, меньше минимального, и на время, меньше минимального, такой квант внесет ограниченный вклад в собственную энергию частицы. Сейчас еще нет физически содержательной теории дискретного пространства-времени, которая, устраняя бесконечные значения энергии, не только согласовывалась бы с соотношениями теории относительности, но и позволяла бы вывести эти соотношения из более общих. Но мы можем говорить о принципиальной разрешимости такой задачи.

Ее решение, если оно будет достигнуто, будет началом новой картины мира. Каждая новая физическая картина мира характеризуется некоторым обобщением понятия причинности. Классическая картина мира была связана с классическим детерминизмом Галилея, Ньютона, Лагранжа и Лапласа. Старое, чисто логическое и качественное представление о причинности было дополнено новым. Основой причинной связи физических процессов стали считать точную количественную определенность динамических переменных движущейся частицы, зависящих от начальных условий и поля. Это представление, получившее законченную форму в классической аналитической механике, было дифференциальным представлением: движение частицы считали в принципе возможным проследить от точки к точке и от мгновения к мгновению. Такое представление о движении и является первым физическим эквивалентом понятия непрерывного предикатного многообразия и основой превращения ана-

лиза бесконечно малых в рабочий аппарат физики, которая до XVII в. была по своим методам не математической, а логической дисциплиной. Дифференциальное представление движения было законченным, стройным и крайне плодотворным количественным воплощением детерминизма. Для громадной области явлений оно осталось непоколебимым.

Но для движения, характеризующегося высокой энергией, понадобилось некоторое обобщение детерминизма Ньютона, Лагранжа и Лапласа: поиски причинной связи воплощаются теперь в анализ четырехмерного невырождающегося непрерывного предикатного многообразия. Причинные связи должны проходить внутри и на поверхности светового конуса, т. е. взаимодействия тел — причина их ускорений — распространяются со скоростью, не превышающей скорости света. В этом состоит требование релятивистской причинности.

Квантовая причинность — это дальнейшее обобщение механической причинности. Она расширяет объем сведений о причинных связях в природе, определяя с помощью волновых уравнений вероятность состояний микроскопических объектов и вводя условия дополненности определения сопряженных динамических переменных.

В середине нашего столетия на авансцену выдвинулись процессы трансмутации элементарных частиц и взаимодействий полей различного типа, заставляющих, вообще говоря, релятивировать и эйнштейновские тела отсчета, и боровские тела взаимодействия. Соответ-

ственно появляется понятие *ультрарелятивистской причинности*, которой подчинен мир ультрарелятивистских эффектов.

Но задача современной науки состоит не в констатации такой ультрарелятивистской границы релятивистской и квантовой причинности, а в *выведении* их из ультрарелятивистской причинности. Решение такой задачи, по видимому, релятивирует оба ответа — и ответ Бора, и ответ Эйнштейна. Релятивирует и различие между указанными ответами.

Приведенная условная схема дискретных трансмутаций на световом конусе позволяет иллюстрировать подобное предположение. Статистические закономерности определяют *направление* элементарных сдвигов на световом конусе и именно они приводят к несовпадению ультрамикроскопической скорости, равной c , с результирующей макроскопической скоростью $v < c$, т. е. к релятивистским соотношениям внутри светового конуса. Макроскопическая траектория определена внешним полем статистически. Здесь «бог играет в кости». Но исходные акты трансмутации исключают самый вопрос об определении вероятности динамических переменных или непосредственном и в каждом случае точном их определении. Здесь понятия траектории частицы и, более того, существования тождественной себе частицы уже неприменимы. Они становятся применимыми к областям порядка 10^{-13} см (или на несколько порядков меньше) только тогда, когда уже определены макроскопические понятия, относящиеся к существованию и движению тождественной себе частицы. В число

этих понятий входят понятия динамических переменных, определяемых в общем случае статистически, через их вероятность. Что же касается исходных трансмутаций, то здесь мы еще не видим тождественной себе частицы и не можем пользоваться относящимися к ней понятиями.

В мире, где частицы трансмутируют, но не «существуют» в классическом смысле себестождественности, теряет физический смысл непрерывность пространства и времени как динамических переменных движущейся тождественной себе частицы. Такое представление о пространстве и времени неприменимо в ультрамикроскопических областях. Указанные области отделены от сравнительно «больших» барьером неприменимости континуальных понятий, отказом от понятия себестождественной частицы, к которой отнесены понятия динамических переменных. И вместе с тем, как мы вскоре увидим, мы не можем ничего сказать об ультрамикроскопических областях без континуальных понятий. Тем не менее трансмутационные взаимодействия вышли за рамки постулатов классического тела отсчета и классического тела взаимодействия.

Но все дело в том, что современная физика стремится не столько установить указанный барьер, сколько найти в нем проходы, вывести из трансмутационных закономерностей закономерности существования и движения тождественных себе частиц. Это и значит, что в современной физике концепции относительности и дополненности получают то, к чему их в течение долгих лет вели и объективная

логика фактов, и усилия создателей указанных концепций. Они обретают некоторый общий исходный принцип, они перестают быть предельными и поэтому лишены физического обоснования постулатами. Речь идет о физической аксиоматизации принципов относительности и дополнительности. Именно о физической аксиоматизации: не о каких-либо геометрических допущениях, а о физических процессах, из которых в макроскопическом аспекте вырастает существование и непрерывное движение тождественных себе частиц. К последним применимы понятия динамических переменных, определяемых с помощью классических тел отсчета и классических тел взаимодействия.

Но дело здесь сложнее, чем простая макроскопическая аппроксимация, преобразующая ультрамикроскопические трансмутации в непрерывные движения тождественных себе частиц. Само понятие трансмутации бессодержательно без понятия непрерывной мировой линии тождественной себе частицы. Поэтому трансмутации и регенерации не могут стать исходным представлением научной картины мира и не могут заменить в этой роли традиционный образ движущихся тождественных себе частиц. Понятие трансмутации как исходное понятие (предшествующее понятию движения тождественной себе частицы, независимое от этого классического понятия) не имеет физического содержания. Частицы определенного типа (без такого понятия трансмутация вообще не имеет никакого смысла) характеризуются некоторой определенной формой

мировой линии, по которой можно отнести частицу к тому или иному типу, приписать ей ту или иную массу, заряд, характер распада и т. д. Трансмутация имеет смысл, если она определяется как переход от одной эвентуальной мировой линии к другой. С другой стороны, форма мировой линии не имеет физического содержания, если каждой мировой точке не присваивается помимо четырех координат дополнительный предикат: указание на какой-то субстанциальный процесс. В следующем очерке¹ будут подробно рассмотрены выводы из предположения, что таким процессом служит вариация мировой линии, переход от одной эвентуальной мировой линии к другой. Тогда само понятие исходного образа картины мира изменяется: классический образ движения тождественной себе частицы не уступает своей роли образу трансмутирующей частицы, эти образы один без другого бессодержательны, они являются дополнительными. Дополненный другим, каждый образ обретает физический смысл: трансмутация становится изменением эвентуальной мировой линии, мировая линия заполняется виртуальными физическими процессами и перестает быть чисто геометрической четырехмерной абстракцией, не подлежащей экспериментальной проверке.

Подобное более общее понимание дополненности, при всей его неоднозначности и недостаточности для физической теории, позволяет изменить угол зрения на концепции,

¹ См. очерк «Относительность и дополненность», стр. 305—381.

возникшие в начале столетия, изменить их историческую трактовку. В моменты быстрого и радикального пересмотра физических представлений историку приходится постоянно сталкиваться с влиянием такого пересмотра на ретроспективные оценки. Физика переживает сейчас время, когда смысл новых тенденций еще далеко не выяснен. Поэтому и ретроспективные оценки идей Эйнштейна и Бора остаются неоднозначными. Вряд ли такое обстоятельство смутит историка физики XX в.; оно свидетельствует о бессмертии идей, которые стали объектом исторического анализа. Эти идеи будут раскрывать свои новые стороны, новые логические и исторические связи, но наиболее глубокий их смысл оказывается исторически инвариантным. Поиски инвариантов делают историю наукой. Понятие развития теряет смысл без понятия инвариантного, тождественного себе субстрата исторических изменений. Такой субстрат и является — чем дальше, тем больше, — объектом анализа современной истории науки, которая во все более явной форме становится историей необратимого, бесконечного приближения разума к объективной истине, историей последовательного накопления исторически инвариантных ценностей.

Относительность и дополнительность

1. Критерий физической содержательности.
2. Принцип Бора и его обобщение.
3. Математические аспекты дополнительности.
4. Понятия энтропии и негэнтропии.
5. Локальные и макроскопические процессы.
6. Релятивистская дополнительность.
7. Однородность Метагалактики и ее ультрамикроскопический эффект.

1

Как нам уже известно ¹, специальная теория относительности придала физическую содержательность числу измерений абстрактного пространства. Переход от раздельно обладающих физическими эквивалентами трехмерного пространственного и одномерного временного многообразий к четырехмерному многообразию определяется переходом от скоростей, несопоставимых со скоро-

¹ См стр. 44—48.

стью света, к скоростям, сопоставимым с последней. В общей теории относительности физический смысл обретает не только размерность пространства, но и аксиоматика геометрических соотношений; пространство теряет евклидовый характер, становится неевклидовым при наличии гравитационного поля и в меру напряженности этого поля.

Выше говорилось также, что общая теория относительности не была в глазах Эйнштейна полным воплощением «внутреннего совершенства»¹. С точки зрения Эйнштейна, структура пространства должна быть описана таким образом, чтобы учитывалось не только гравитационное поле, но и все поля, т. е. она должна соответствовать единому полю. В течение тридцати с лишним лет Эйнштейн искал решения этой проблемы на путях дальнейшего обобщения геометрии. Сейчас мы склонны допустить, что решение может быть найдено на другом пути. Помимо переходов от одной геометрии к другой, от евклидовой к римановой, от римановой к более общим геометрическим соотношениям, где Эйнштейн надеялся найти адекватное геометрическое описание единого поля, существует переход к геометрии в целом от более общих представлений. Иными словами, переход к геометрическим соотношениям от более общих представлений о пространстве, где еще нет понятия невырожденной размерности, понятия непрерывности пространства, понятия мероопределения. Переход, где эти понятия возникают из более общих. Быть может, более общие, *мета-*

¹ См. стр. 68—71.

геометрические, или метаматематические, понятия могут получить физический смысл аналогично физически содержательной трактовке геометрических понятий в теории Эйнштейна. Такое предположение — в русле эйнштейновской концепции «внутреннего совершенства». Физическая теория повышает ранг «внутреннего совершенства» (в этом — одна из стержневых линий необратимого прогресса науки), выводя свои заключения из все более общих принципов и соответственно придавая физический смысл все более общим понятиям геометрической размерности (специальная теория относительности), геометрической аксиоматики (общая теория) и далее, быть может, метагеометрическим понятиям.

Такая перспектива связана с развитием квантовой физики, с выведением ее заключений из все более общих понятий и физически содержательным — антиципирующим эксперимент — переосмыслением этих понятий. Здесь можно провести ряд аналогий с развитием теории относительности.

Нарисованная после открытий Резерфорда картина обращающихся вокруг ядра электронов была парадоксальной в рамках классической концепции. Устойчивость атомов не находила объяснения. В 1915 г. она получила (по крайней мере для атома водорода) объяснение с помощью постулатов Бора. ореол парадоксальности был перенесен в сторону более общих допущений. Постулаты Бора казались выдвинутыми *ad hoc*, они обладали внушительным «внешним оправданием», но сами по себе казались искусственными. В 20-е годы квантовая

механика позволила вывести постулаты Бора из более общих допущений. Она приобрела систематический в эйнштейновском смысле характер благодаря соотношению неопределенностей Гейзенберга, связанному с этим соотношением аппарату некоммутативной алгебры и борновской вероятностной трактовке волновой функции.

В 1927—1928 гг. Нильс Бор связал само соотношение неопределенностей с более общим принципом, который в сущности не был метрическим, не содержал количественных определений и говорил не об измерении динамических переменных и количественных границах точного измерения, а о *возможности* измерения. Это — принцип дополнительности. Когда Нернст говорил, что теория относительности Эйнштейна это уже не физическая, а более общая теория, он мог с тем же основанием повторить такую характеристику по адресу принципа дополнительности. Но и принцип Эйнштейна и принцип Бора — физические принципы, только физика здесь охватывает более общие, приобретающие физический смысл понятия. В первом случае это понятия геометрической размерности и геометрической аксиоматики. Во втором случае речь идет о принципиальной возможности измерений и рассматриваются более общие логико-математические или метаматематические понятия, с помощью которых формулируются условия возможности измерений динамических переменных. Мы вскоре вернемся к борновскому принципу дополнительности и к качественно-логическим предпосылкам количественных соотношений квантовой механики.

Сейчас перейдем к роли «внутреннего совершенства» в наши дни, в период, когда физика без Эйнштейна и без Бора ищет пути синтеза их идей.

В этот период в центре внимания физической мысли оказались процессы, принципиально отличающиеся от тех процессов, которые считались основными, первичными, элементарными в продолжение двух с лишним тысяч лет развития научных представлений о природе. С времен Демокрита такими процессами считались движения тождественных себе частиц вещества и взаимодействия таких частиц. Элементарными представлениями классической картины мира были, во-первых, движение частицы в некотором заданном поле (механика) и пространственное распространение поля при заданном распределении его источников (теория тяготения, электродинамика и т. д. — вообще, физика в более узком смысле). В нелинейной концепции эти представления в какой-то мере сливаются. В квантовой теории распространение данного волнового поля рассматривается как движение частиц данного типа. Движение квантов поля — частиц данного типа — определяется в процессе взаимодействия с макроскопическими объектами, причем квантовая детализация, учет корпускулярно-волновой природы частиц имеет место только по отношению к данному полю, к данным частицам, а не к полю, с которым рассматриваемое поле взаимодействует.

Теперь, в 60-е годы, физике приходится в несопоставимой с прошлым мере учитывать совсем иные процессы. Это процессы та-

кого взаимодействия полей, при котором обе взаимодействующие стороны рассматриваются в качестве квантованных объектов, при которых мы не можем проследивать движение частицы от мгновения к мгновению и от точки к точке даже в тех несколько суженных пределах, которые ставит такому представлению квантовая механика. Здесь теряет непосредственный смысл образ частицы, тождественной себе в нетривиальном смысле, т. е. частицы, которую можно идентифицировать не только в данный момент и в данной точке, но и в различные моменты, в различных точках.

Таковы вакуумные процессы. Чтобы применить к представлению о вакуумных процессах эйнштейновский критерий физической содержательности понятий, этот критерий нужно несколько обобщить.

Когда речь идет о движении тождественной себе частицы, то предполагается возможным сопоставить теоретически выведенные сведения о состоянии движения частицы с регистрацией ее пребывания и скорости в принципиально неограниченном и даже несчетном числе точек. Квантовая механика ограничивает это представление, но не меняет его: речь идет все же о регистрации положения и скорости тождественной себе частицы. Вакуумные процессы не могут быть непосредственно описаны с помощью пространственно-временных понятий, антиципирующих подобную регистрацию. О существовании вакуумных процессов можно судить по изменению энергии и массы, а также заряда находящейся в вакууме «реальной» (т. е. нетривиально-себетожествен-

ной) частицы. Сами же вакуумные процессы не могут быть обнаружены экспериментом и в этом смысле не обладают титулом «реальности». Здесь будет уместно сказать несколько слов об этом понятии.

Разумеется, реальное существование физического объекта не связано с экспериментом, физический объект существует независимо от эксперимента. Но существование физического объекта связано с принципиальной возможностью эксперимента, что является простым повторением тезиса о принципиальной экспериментальной познаваемости всего физически существующего, в отличие от чисто формальных, логических и математических построений, не обладающих физическим существованием. Почему же мы ставим в кавычки слово «реальность», когда речь идет о «реальных» и виртуальных частицах? Ведь виртуальные частицы действительно не могут быть непосредственно зарегистрированы и виртуальные процессы не могут быть объектом непосредственного эксперимента.

Однако, отказывая виртуальным процессам в реальном существовании, мы без них не можем присвоить этот предикат и «реальным» частицам. Несколько позже об этом будет сказано подробнее. Пока обратим внимание на различие между движущейся, тождественной себе, «реальной» частицей и мировой линией, т. е. непрерывным множеством пространственно-временных точек. Такое множество *само по себе* может образовать лишь воображаемую мировую линию, или возможную, или произвольно конструируемую для сопоставления

с другими (как это делается в вариационных задачах). Чтобы приписать мировой линии предикат существования, т. е. не только геометрическую (соответствие заданным условиям), но и *экзистенциальную* истинность, нужно, чтобы в каждой мировой точке происходило некоторое событие, причем событие, несводимое к переходу из одной мировой точки в другую. Экспериментировать с незаполненными мировыми линиями так же невозможно, как и с виртуальными процессами. Мы попытаемся развить некоторые заключения из предположения: виртуальные процессы заполняют мировую линию тождественной себе частицы, они и являются теми несводимыми к пространственно-временным сдвигам событиями, которые позволяют отличить движущуюся, тождественную себе, «реальную» частицу от незаполненной, чисто геометрической мировой линии, придать последней предикат существования, экзистенциальную истинность. Невозможность экспериментальной регистрации виртуального процесса объясняется именно тем, что он находится вне пространственно-временного представления, образует как бы ультрамикроскопические поры в пространственно-временном континууме.

Эйнштейновская физическая содержательность понятий означала, что из них могут быть сделаны экспериментально проверяемые выводы о тех или иных пространственно-временных соотношениях, о тех или иных состояниях движения тождественных себе частиц. Уже применительно к квантовой механике этот критерий физической содержательности

понятий (и связанный с ним, высказанный в полемике с Бором критерий полного описания реальности) нуждался в некотором обобщении. Сейчас требуется еще более радикальное обобщение. Подчеркнем только: обобщение *эйнштейновского* критерия, развитие *эйнштейновской* мысли о принципиальной возможности экспериментальной проверки выводов, сделанных из физически содержательной логической или математической конструкции.

Таким обобщением, может быть, окажется мысль о дополнительности пространственно-временного описания и констатации несводимых к пространственно-временным соотношениям ультрамикроскопических процессов в «порах» пространства-времени.

На подобную мысль наталкивает современная ситуация. Как только что говорилось, о вакуумных процессах можно судить по энергии, массе и заряду «реальной» частицы. И именно здесь современную физику поджидало очень тяжелое затруднение: энергия, масса и заряд частицы при учете ее взаимодействия с вакуумом оказываются бесконечными. Примененные для исключения бесконечных значений рецептурные приемы обладают беспрецедентным «внешним оправданием»: теоретически выведенные величины совпадают с результатами эксперимента до такого знака после запятой, который никогда еще не встречался в физике при аналогичных сопоставлениях. Но «внутреннее совершенство» отсутствует в этих методах устранения бесконечностей и отсутствует с беспрецедентной явственностью. Методы устранения расходимостей не

могут быть выведены из широкой и общей концепции, из фундаментальных, связанных со всей суммой знаний о природе исходных допущений.

Только что говорилось о необходимости обобщения эйнштейновского критерия физической содержательности при анализе вакуумных процессов. Традиционное понимание такого критерия приводит к попытке однотипным образом описать исходные вакуумные процессы и элементарные экспериментальные констатации. Элементарные экспериментальные констатации — это регистрация движения, пребывания частиц в образующих непрерывную мировую линию мировых точках. Если применять представление о непрерывной мировой линии к вакуумным процессам, мы получаем физически бессмысленные бесконечные значения массы и заряда.

Уже в 40-е годы физика по существу стала на путь отказа от однотипного с такими экспериментальными регистрациями представления о вакуумных процессах. Для небольших, ультрамикроскопических, пространственно-временных областей отказывались от пространственно-временных представлений, от представления о непрерывных мировых линиях тождественных себе частиц. В ряде по существу эквивалентных друг другу попыток переформулировки или обобщения квантовой электродинамики, гамильтонов формализм, анализ движения от точки к точке и от мгновения к мгновению заменяли другими методами и представлениями.

Каков смысл подобного отказа? Прячется

ли непрерывное движение от наблюдателя или оно не существует в очень малых пространственно-временных областях? Можно думать, что неприемлемость континуально-кинетического представления о вакуумных процессах свидетельствует не о феноменологическом, а о субстанциальном отсутствии непрерывных мировых линий в ультрамикроскопических областях.

Такое предположение эквивалентно гипотезе дискретного пространства-времени. Оно должно быть дополнено схемой перехода от процессов, к которым неприменимо представление о непрерывном движении, к континуальным процессам, к движениям тождественных себе частиц, объясняющим все макроскопические процессы самым достоверным образом.

Такой переход в какой-то мере гарантируется уже несколько раз упоминавшимся в этой книге объединением гипотезы дискретного пространства-времени с гипотезой регенерации движущейся частицы. В самом деле, как может частица оказаться в иной пространственно-временной клетке, если в пространственно-временных клетках нельзя представить себе движения, если эти клетки являются минимальными, неделимыми на меньшие пространственно-временные интервалы, если мы отказываемся от образа частицы, пребывавшей в первой половине временного интервала в первой части пространственного расстояния, а во второй половине временного интервала — во второй части указанного расстояния? Естественной представляется мысль об аннигиляции частицы данного типа и ее регенерации в

соседней пространственно-временной клетке. Идентификация частицы, представление о частице после регенерации как тождественной с исходной, открывает серию интуитивных ассоциаций, ведущих к эмпирически доказанной макроскопической картине непрерывных движений тождественных себе частиц и придающих физическую содержательность исходным трансмутационным представлениям. Позже мы сделаем несколько шагов от первоначальных интуитивных ассоциаций к более систематическим. Эти шаги потребуют анализа и некоторого обобщения принципа дополнительности. Сейчас мы остановимся на переходе от трансмутаций в дискретных клетках пространства-времени к непрерывному движению, оставаясь в рамках предварительных интуитивных и полуинтуитивных представлений.

Как читатель помнит, минимальное расстояние обозначалось через ρ и минимальный интервал времени ρ/c через τ . Если отождествить частицу, возникшую в данной пространственно-временной клетке, с частицей, аннигилировавшей в соседней клетке, то подобная регенерация по своему результату эквивалентна сдвигу тождественной себе частицы на минимальное расстояние ρ в течение времени τ со скоростью $\rho/\tau = c$, т. е. со скоростью света¹. Таким образом, регенерации эквивалентны мировым линиям на световом конусе, составленным из минимальных четырехмерных интервалов. Обозначим эту ультрамикроскопическую мировую линию через M , а ее пространствен-

¹ См. стр. 145—147.

ную проекцию, т. е. ультрамикроскопическую траекторию частицы, через M . Элементарные сдвиги в пространстве могут быть направлены в различные стороны, и M , вообще говоря, будет ломаной линией. Макроскопическую мировую линию обозначим через Λ , а макроскопическую траекторию — результат большого, статистически репрезентативного числа элементарных сдвигов — через L . Скорость на L , т. е. макроскопическая скорость v , будет меньше ультрамикроскопической скорости $\rho/\tau = c$ у всех частиц с ненулевой массой покоя. Таким образом, мировая линия Λ частицы с ненулевой массой проходит внутри светового конуса, не может быть разделена на элементарные сдвиги и не обладает абсолютной естественной метрикой. Нетрудно видеть, что существование непрерывной мировой линии, характеризующей частицу данного типа, служит основой идентификации частицы на ультрамикроскопической траектории, отождествления частицы после регенерации с исходной.

Переход от дискретных трансформаций в точках, разделенных элементарным расстоянием ρ , к непрерывному движению может оказаться весьма фундаментальным понятием. Если бы он приобрел «внешнее оправдание» и стал элементом сколько-нибудь однозначной физической теории, это позволило бы приписать физическую содержательность не только переменной размерности пространства (при переходе от $v \ll c$ к $v \leq c$) и не только переменной аксиоматике, определяющей тип метрики (при переходе от пренебрежимых гравитационных полей к существенным), но и самому

возникновению размерности и метрики. Множество дискретных трансмутаций в отделенных друг от друга точках соответствует нульмерному пространству. Пространство, состоящее из мировых точек, образующих непрерывные мировые линии,— четырехмерное пространство. Переход от дискретных трансмутаций к непрерывному движению происходит в $(0 \rightarrow 4)$ -мерном пространстве и соответствует физическому обоснованию релятивистских соотношений. Действительно, из представления о минимальном расстоянии ρ и минимальном времени $\tau = \rho/c$, отделяющем первичные трансмутации, следует существование c как предела скорости тождественного себе физического объекта. Представим себе, что в данной области пространства вероятности регенерации частицы одинаковы во всех направлениях. Тогда после большого числа направленных в различные стороны сдвигов частица окажется вблизи исходного пункта. Представим себе теперь, что существует некоторое пространственное направление, где сдвиги в положительном направлении вероятнее, чем в противоположном. Это направление пространственной диссимметрии регенераций будет направлением макроскопической траектории L , а длина этой траектории за единицу времени, т. е. макроскопическая скорость v , будет обратно пропорциональна пространственному разбросу элементарных сдвигов и прямо пропорциональна диссимметрии вероятностей. При любом конечном импульсе частица с ненулевой массой покоя останется внутри светового конуса, ее скорость будет меньше скорости света.

Что же касается частицы с нулевой массой покоя, то ее макроскопическая мировая линия всегда, во всех системах отсчета, будет лежать на световом конусе. В частности, мировая линия фотона, в чем и состоит инвариантность скорости света по отношению к координатным преобразованиям, т. е. исходная посылка теории относительности. Мы здесь рассматриваем направление силового поля как направление диссимметрии. Пространственное направление линии диссимметрии будет различным в различных системах отсчета; оно меняется при поворотах четырехмерных осей в плоскостях X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 . При мнимых поворотах — в плоскостях X_1X_4 , X_2X_4 , X_3X_4 — меняется скорость v частицы и ее можно «оттрансформировать», сделать нулевой, введя такую систему отсчета, где макроскопическая мировая линия частицы будет параллельна временной оси X_4 . В подобной системе мы не обнаружим макроскопического эффекта диссимметрии и результатом случайных блужданий частицы будет ее макроскопическая неподвижность. Но можно ли оттрансформировать случайные блуждания?

Вопрос о трансформационных свойствах дискретного пространства-времени, которое расшифровывается в виде регенераций-сдвигов, — это центральный вопрос при выведении макроскопических, в общем случае релятивистских, соотношений из ультрамикроскопической, трансмутационной, ультрарелятивистской картины. Главная трудность (об этом подробнее будет сказано несколько позже) состоит в том, что исходные ультрамикроскопические понятия имеют смысл только при каком-то предвосхи-

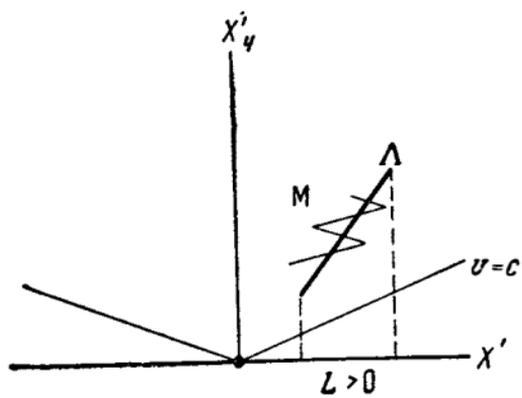
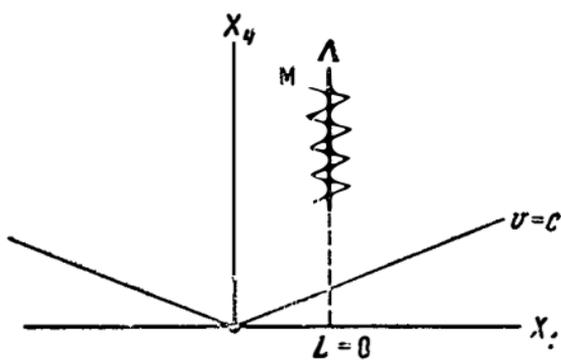
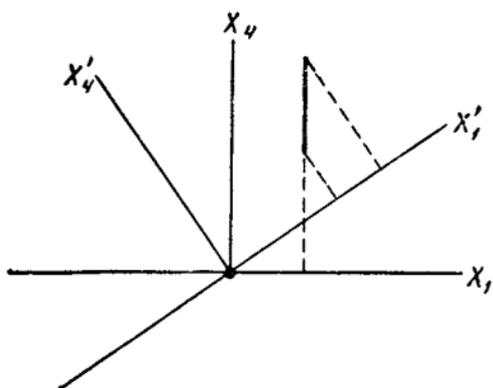
щении макроскопических понятий. Возьмем, например, эпитет «случайные», отнесенный к сдвигам ρ . Эти сдвиги могут считаться случайными только при существовании, хотя бы эвентуальном, какого-то неслучайного, макроскопически определенного и макроскопически регистрируемого направления, в предположении макроскопической системы отсчета. Само понятие «сдвиг» лишено смысла без образа хотя бы эвентуальных макроскопических направлений. Пока у нас только отрицательное определение ρ и τ : мы не можем говорить о меньших расстояниях и временных интервалах, как о характеристиках движущейся частицы. Чтобы перейти к трансформационным свойствам, в частности к инвариантности случайных блужданий, нам нужно совершить некоторый логический скачок от чисто трансмутационных представлений, где нет места понятиям инвариантности и координатных преобразований, к «эрлангенскому» миру, где существуют макроскопические координатные оси, где существуют преобразования той или иной общности, охарактеризованные впервые с очень большой систематичностью в эрлангенской программе Клейна. Поэтому непосредственно нельзя придавать сдвигам ρ трансформационные свойства, нельзя вводить макроскопическую систему, которая следует за этими сдвигами и позволяет их «оттрансформировать». Но переходит ли что-нибудь из этой неэрлангенской картины в мир эрлангенских понятий?

Предположим, что логический скачок совершен, что регенерации-сдвиги имеют эрлангенское бытие и можно поставить вопрос об их

макроскопическом эффекте и его инвариантности по отношению к преобразованиям координат.

Возьмем простейший, крайне идеализированный случай: случайные блуждания происходят попеременно то в положительном (ρ), то в отрицательном ($-\rho$) направлении вдоль оси X , которая в случае четырехмерных координат обозначается как ось X_1 . Тогда мировая линия Λ , если взять пространство X_1X_4 , будет направлена параллельно временной оси X_4 , т. е. частица будет в данной системе макроскопически неподвижна. Потом повернем систему так, чтобы оси X_1 и X_4 заняли положения X'_1 и X'_4 , иначе говоря, перейдем к системе, которая движется без ускорения относительно первой. Эти оси, границы светового конуса $v = c$ и мировые линии Λ и M изображены на чертеже, помещенном на стр. 322. (На нижних фигурах чертежа, где показаны отрезки M , система X_1X_4 изображена без поворота осей и вынесена направо для ясности схемы.)

При указанном лоренцовом преобразовании $X_1X_4 \rightarrow X'_1X'_4$ макроскопическая траектория $L = 0$ переходит в $L > 0$, а макроскопическая скорость $v = 0$ переходит в $v > 0$. Обратный переход означает «оттрансформирование» макроскопической траектории L и макроскопической скорости v . Что же касается сдвигов ρ , то они теперь будут обладать несимметричной вероятностью: $p(\rho) > p(-\rho)$. На чертеже диссимметрия обозначена чередованием двух сдвигов ρ и одного сдвига $-\rho$. Абсолютная скорость сдвигов $\rho/\tau = c$ не изменилась. Но какая макроскопическая величина соответствует этой неиз-



менности и превращает последнюю в макроскопическую инвариантность? Это — распространение диссимметрии. Как бы ни менялась при преобразованиях сама диссимметрия, скорость ее распространения не меняется. Она не зависит от диссимметрии; четырехмерный вектор распространения диссимметрии не обладает пространственным разбросом, и скорость распространения диссимметрии одна и та же в макроскопическом и микроскопических аспектах.

Тот факт, что вектор распространения диссимметрии лежит на световом конусе, т. е. что диссимметрия распространяется со скоростью света в каждом микроскопическом интервале, следует из связи между диссимметрией и ультрамикроскопической траекторией M , лежащей на световом конусе. Диссимметрия реализуется последовательно на каждом элементе M , на каждом отрезке ρ : она состоит в том, что вероятность *каждого* ρ , совпадающего по направлению с L , больше, чем вероятность ρ противоположного направления. Не на каждом отрезке ρ соотношение вероятностей реализуется, но на каждом из них оно неизменно. Везде первая вероятность максимальная, вторая минимальная. «Игра в кости» разыгрывается на каждом элементарном отрезке ρ , т. е. на световом корпусе. Диссимметрия распространяется на световом конусе.

Второе утверждение — диссимметрия распространяется все время параллельно L , т. е. без пространственного разброса, — вытекает из отношения диссимметрии к L . Диссимметрия состоит в соотношении: $p(\rho_L)$ — это максималь-

ная, а $p(\rho_{-L})$ — минимальная вероятность регенерации-сдвига. Диссимметрию можно изобразить в пространстве как параллельный L вектор со скалярной величиной $p(\rho_L) - p(\rho_{-L})$. Траектория распространения диссимметрии совпадает с линией диссимметрии вероятностей регенерации во всех ультрамикроскопических отрезках. Иначе говоря, ультрамикроскопический пространственный разброс здесь отсутствует, макроскопическая скорость распространения диссимметрии та же, что и микроскопическая, диссимметрия распространяется и макроскопически с инвариантной скоростью, равной ρ/τ .

Такой вывод связан с вероятностной природой разброса. Последний объясняется тем, что диссимметрия управляет движением частицы лишь статистически. Но если события вероятны, то сама их вероятность определена однозначно и распространяется без статистического разброса. Из этого соотношения и вытекает возможность связать релятивистские закономерности с ультрамикроскопической картиной. Позже мы вернемся к этой возможности, познакомившись с некоторыми необходимыми для более ясного изложения логическими понятиями. Сейчас отметим только, что релятивистские соотношения (инвариантность скорости распространения диссимметризирующего поля) выводятся из квантового по существу постулата: «Событие вероятно — вероятность его достоверна». Нет смысла оговаривать условный, предварительный, неоднозначный характер мысли о таком выведении. Это ясно и вскоре станет еще яснее: мы вернемся к вопросу о физической содержа-

тельности и экзистенциальной истинности понятия элементарных сдвигов-регенераций.

Но при всей проблематичности приведенной схемы она позволяет сделать некоторый не столь уже проблематичный вывод, относящийся к исторической оценке принципа относительности и принципа дополнительности. Для их исторической оценки существенна уже принципиальная возможность выведения идей Эйнштейна из обобщенных идей Бора. Ведь история науки последовательно переходит ко все более общим концепциям, по отношению к которым предыдущие оказываются частными выводами. В этом смысле ретроспективный анализ всегда меняет первоначальное впечатление: ведь когда теория появляется, она кажется выводом из наблюдений и фактов, только потом она приобретает большее «внутреннее совершенство», выводится из позднейшей более общей теории.

Теория относительности первоначально представлялась логическим выводом из некоторых исходных допущений о поведении масштабов и часов. Эйнштейн говорил о необходимости выведения этих допущений из более общих посылок. Такие посылки тесно связаны с квантостатистическими соотношениями. Как ни проблематичен характер этой связи, отрицать ее принципиальную возможность нельзя. Мы можем даже иллюстрировать такую возможность той или иной условной схемой. Отсюда следует, что идеи Эйнштейна и идеи Бора не противостоят друг другу как две возможные, исключаящие одна другую дороги на распутье. Они представляют собой части одной дороги, на которой каждая новая теория служит обоб-

щением, содержащим старую и позволяющим придать старой теории большее «внутреннее совершенство».

Вернемся к инвариантной скорости распространения диссимметризирующего поля. Из вывода о таком распространении следует только инвариантность макроскопической скорости псевдокванта силового поля. Но далее можно было бы вывести и инвариантность скорости реального кванта, т. е. скорости распространения *колебаний* диссимметрии. Нужно только отметить, что слово «вывести» не может иметь здесь классического, т. е. математического, смысла. Ведь речь идет не о логическом *развитии* исходных «эрлангенских» понятий геометрии (преобразования, инварианты, метрика), а о логическом *генезисе* этих понятий. Вернее, речь идет о физических эквивалентах такого генезиса. Мы исходим из «неэрлангенских» понятий. Имеют ли они физический смысл, есть ли у них физические эквиваленты? К этому вопросу и нужно перейти, вернее, возвратиться, поскольку в начале очерка уже шла речь о физической содержательности и экзистенциальной истинности ультрамикроскопической картины.

Высказанные только что соображения о возможной трансмутационной подоснове существования и движения тождественных себе частиц были бы в какой-то мере правдоподобными и физически содержательными, если бы физически содержательным был основной и исходный образ схемы, если бы мы могли приписать физический смысл понятию элементарной трансмутации, понятию аннигиляции и регенерации частицы, не обладающей еще макроскопич-

ческой (по сравнению с элементарными ячейками) мировой линией. Такая возможность кажется весьма сомнительной. Что собственно означают фразы: «частица данного типа аннигилирует», «частица данного типа превращается в частицу иного типа», «частица иного типа превращается в частицу того же типа, что и исходная»? Частица одного типа отличается от частицы другого типа массой, зарядом и другими свойствами, проявляющимися в характере мировых линий при заданных условиях, а также распадом, т. е. характером мировых линий, возникших при распаде частицы. Пока частица не обладает мировой линией, пока мировая точка, в которой она находится, не входит в определенную мировую линию, отнесение частицы к тому или иному типу и понятие трансмутации не имеют никакого смысла. Понятие трансмутации, изменения массы, заряда и т. д. имеет смысл только по отношению к «реальным», т. е. нетривиально себестождественным, частицам, обладающим большими по сравнению с элементарными интервалами τ сроками жизни. Определения, лежащие в основе отнесения частицы к тому или иному типу, имеют интегральный, а не локальный характер, и чисто локальное понятие частицы определенного типа и соответственно чисто локальное определение трансмутации не имеют смысла.

Но и чисто интегральное определение типа частицы не имеет физического смысла. Это очень древняя апория, достигшая особенно явной и острой формы в физике Декарта. Геометризация физики, отождествление вещества с пространством сделали невозможным физи-

ческую индивидуализацию тела, выделение его из окружающего мира и лишили смысла понятие движения тела. Лейбниц отмечал эту ахиллесову пяту картезианской физики. С развитием атомистических представлений проблема различения тела и занимаемого им места стала проблемой различения частицы, с одной стороны, и пространственно-временной точки — с другой. Уже говорилось выше, что мы и сейчас не можем отличить четырехмерную мировую линию как чисто геометрическое понятие от физического понятия реального движения частицы, если не припишем частице какого-то иного бытия, помимо пребывания в мировой точке, какого-то иного предиката, помимо четырех координат, какого-то иного изменения помимо перехода в следующую мировую точку. Это «некартезианское» бытие частицы могло бы состоять в ее взаимодействии с другими частицами, вызывающими трансмутацию данной частицы. Но тут мы снова из Сциллы чисто интегрального представления попадаем в Харибду чисто локального представления: представление о трансмутации бессодержательно, пока мы не вводим интегрального определения мировой линии и интегрального, принадлежащего «реальной» частице определения ее типа.

Все дело в том, что в квантово-релятивистской области ультрамикроскопических расстояний и интервалов времени теряет смысл весьма фундаментальное классическое понятие, удержавшееся в релятивистской и в квантовой физике, но не проходящее в теорию, синтезирующую релятивистские и квантовые идеи. В классической физике и, с некоторыми условиями, в

квантовой физике элементарными процессами — «кирпичами мироздания» — считались движения тождественных себе частиц. После того как появилось квантово-релятивистское по своему характеру представление о трансмутациях, возникла мысль об элементарных трансмутациях, как об исходной реальности, как о «кирпичах мироздания», из которых складываются макроскопические процессы движения тождественных себе тел. Но в действительности из современной физики вытекает более радикальный вывод: представление об «элементарных» процессах, существующих независимо от «неэлементарных», должно быть в общем случае оставлено, природа не состоит из «кирпичей», адекватное описание природы должно с самого начала оперировать локальными и интегральными характеристиками, которые теряют физический смысл взятые изолированно. Локальное «некартезианское» бытие частицы состоит в трансмутациях, обладающих физическим смыслом в качестве локальных изменений *эвентуальных* мировых линий (изменений не только формы этих линий, но также изменений коэффициентов, связывающих определения мировой линии между собой и с интенсивностью взаимодействий, т. е. изменений массы покоя, заряда, спина и т. д.). В свою очередь мировая линия обладает экзистенциальным смыслом, т. е. принципиальной возможностью сопоставления с экспериментом, когда она рассматривается не только как последовательность четырехмерных положений, но и как последовательность локальных событий, в которых участвуют виртуальные частицы.

Д. Розенфельд в одном весьма ясном и глубоком очерке принципа дополнительности излагает следующую забавную историю, заимствованную из датской литературы. Один добросовестный лицензиат, задумав написать научный труд, занялся подготовкой перьев. Но перья могут затачиваться наилучшим образом, если выбрать самые лучшие камни для такого затачивания. И лицензиат погрузился в минералогию. Через много лет в его комнате оказалась коллекция минералов, и он стремился получить исчерпывающее решение вопроса об оптимальном материале для точки перьев. Он не мог остановиться в охватившем его неумеренном рвении и стремлении к абсолютной строгости и точности при подготовке труда и труд не был начат. В этом мире, чтобы перейти от логической схемы к делу, всегда приходится какое-то звено объявлять далее неанализируемым. В последнем счете это объясняется воздействием «перехода к делу» на форму логической схемы, тем обстоятельством, что логическая схема не может быть содержательной без некоторых заданных, не подвергающихся анализу понятий, что эти понятия воздействуют на схему и их нелинейная связь со схемой останавливает простое подведение под схему новых и новых случаев. В квантовой механике квантово-атомистический анализ, учет дискретности поля и континуально-волновой природы частиц должен остановиться перед телами, которые мы считаем неквантовыми, к которым подходим, закрывая глаза на корпускулярно-волновой дуа-

лизм и дискретность действия, иначе говоря, перед телами, которые мы вводим в игру как заведомо классические. Именно поэтому квантовая механика не имеет смысла без тех классических понятий, которые она ограничивает в смысле их применимости и физической представимости, без понятий импульса, скорости, положения в пространстве и т. д. Эти понятия входят в квантовый мир вместе с заведомо классическими телами, с которыми взаимодействуют квантовые объекты.

Но, по-видимому, каждое физическое воплощение логической схемы требует аналогичных «классических тел». В сущности мораль рассказа о незадачливом лицензиате совпадает с одним замечанием Эйнштейна в письме Морису Соловину. Отмечая, что тела, с помощью которых измеряют предметы, влияют на эти предметы, Эйнштейн заключает: «Если не грешить против разума, нельзя вообще ни к чему прийти»¹.

Эта фраза чрезвычайно знаменательна. Великий рационалист, преемник Декарта и Спинозы, декларирует необходимость греховного отступления от рационалистических схем. Все дело в том, что Эйнштейн был именно преемником, а не эпигоном рационалистов XVII в.; он унаследовал от них не только (и даже не столько!) позитивные ответы, но и живое сомнение в абсолютной применимости этих ответов, сомнение, отличающее великих мыслителей от их эпигонов, Фауста от Вагнера, творцов от адептов традиционной «очевидности». Живой, экс-

¹ A. Einstein. Lettres à Solovine, p. 129.

периментирующий, ищущий физической содержательности разум сталкивается с нелинейными закономерностями природы. Детализируя картину мира, расчлняя природу, он должен с первых шагов оперировать нерасчлененными образами, иначе определения деталей окажутся физически бессодержательными.

Боровское макроскопическое тело взаимодействия, тело, позволяющее идентифицировать движущуюся частицу по непрерывно изменяющимся значениям ее динамических переменных (например, диафрагма с отверстием, позволяющая с той или иной степенью точности зарегистрировать координаты электрона), — это и есть тот камень лицензиата, где необходимо прекратить анализ (в данном случае квантовый анализ, учет корпускулярно-волновой природы частиц, составляющих «прибор»). Без таких последних звеньев квантового анализа, без классических, т. е. освобожденных от квантовой детализации объектов, из картины мира исчезают частицы, тождественные себе, отнесенные к определенным типам (и поэтому принципиально наблюдаемые: частицу как таковую, частицу, не обладающую определенным типом взаимодействия с другими частицами, определенной мировой линией — вообще не обладающую нетривиальной себетождественностью, также трудно наблюдать, как, например, «животное, как таковое», не относимое ни к какому конкретному типу). Как уже говорилось, без интегральных представлений о типах мировых линий и соответственно без представлений о типах частиц самый конкретный образ частицы в данной пространственно-временной клетке

оказывается самым абстрактным и теряющим физический смысл.

Существует, однако, весьма существенная связь между: 1) определением формы мировой линии (т. е. интегральной характеристикой движущейся частицы), отнесенным к данной мировой точке, взятым в локальном представлении, иначе говоря, значением импульса и энергии частицы, и 2) чисто локальной характеристикой частицы — ее пространственно-временными координатами. Они связаны неконтролируемым воздействием одного определения на другое, одной характеристики на другую. В такой констатации — основа негативной стороны принципа дополнительности, невозможности в одном эксперименте точно определить сопряженные динамические переменные. Но, как уже не раз говорилось в этой книге, принцип дополнительности имеет позитивную сторону. Прежде всего он позволяет переосмыслить гарантию нетривиальной себестоимости частицы — непрерывное и закономерное изменение ее динамических переменных, которая существовала в классической физике, и этой ценой ввести такую гарантию в микромир. Переосмысление заключается в замене переменной ее вероятностью, которая изменяется непрерывно в точном соответствии с законом. Сохраняется ли при таком переосмыслении эйнштейновский критерий физической содержательности понятий? Не противоречит ли этому скачок — в понятии фигурирует точное значение вероятности, а в эксперименте измеряется значение самой переменной? Эйнштейновский критерий сохраняется потому, что мы

в принципе можем экспериментально проверить значение переменной с любой точностью и получить непрерывный ряд экспериментально проверенных значений самой переменной, а не только ее вероятностей. Мы это можем сделать за счет сопряженной переменной. Можем, впрочем, только в нерелятивистской квантовой механике. В релятивистской квантовой теории исчезает, вообще говоря, возможность точного измерения значений даже одной переменной. Мы постараемся показать, что и здесь возможность оперировать образами нетривиально-себеждественных частиц вытекает из принципа дополнительности. Но для этого требуется изложить принцип дополнительности в более общей форме, отказавшись от специфического для нерелятивистской квантовой механики противопоставления сопряженных динамических переменных. Такое обобщение оказывается нетавтологическим; оно позволяет увидеть некоторые новые аспекты релятивистской теории элементарных частиц. Но при этом уже несколько модифицируется (и усиливается!) требование физической содержательности понятий и «внутреннего совершенства» теории.

Если для теории относительности основой экспериментальной проверки выводов из исходных постулатов служит существование макроскопических тел отсчета, а для квантовой механики — макроскопических тел взаимодействия, то для теории вакуумных процессов «физикализатором» — телом взаимодействия, позволяющим зарегистрировать поведение виртуальных частиц, служит одна реальная, нетривиально-себеждественная частица, т. е.

частица, движущаяся в относительно макроскопических, больших по сравнению с элементарными клетками областях и обладающая определенной мировой линией, определенной зависимостью мировой линии от поля (заряд, масса, спин и т. д.). Конечно, в реальном приборе, в реальном эксперименте, например в опыте Лэмба — Ризерфорда, фигурирует множество таких частиц, но в принципе здесь достаточно одной «реальной» частицы. Эта частица «физикализирует», т. е. превращает, воздействия внешних виртуальных частиц в принципиально наблюдаемые процессы.

Обратимся теперь к другой стороне дела. Какие абстрактные понятия обрели бы в трансмутационной картине физический эквивалент, если бы эта картина могла претендовать на некоторую хотя бы проблематичную однозначность? Здесь, с одной стороны, фигурируют дискретные события — элементарные трансмутации, а с другой — непрерывные движения тождественных себе частиц. Вторые служат физическим эквивалентом непрерывных многообразий, упорядоченных множеств бесконечно малых элементов, непрерывных линий. Иными словами, — геометрических понятий. А первые? Какие понятия обретают физический смысл в образе дискретных трансмутационных актов?

Выше уже говорилось о нульмерном пространстве, которое соответствует картине элементарных трансмутаций и тривиально себестождественных частиц (частица тождественна себе лишь в данной точке в данный момент) и которое переходит в четырехмерное пространство с его трехмерными, двумерными и одно-

мерными подпространствами. Нульмерное пространство — это квазигеометрическая форма множества, которое превращается в подлинно геометрическое в традиционном смысле, соответствующее той или иной геометрии эрлангенской программы Клейна. Неэрлангенское, выходящее за рамки топологии — самой широкой эрлангенской геометрии, множество дискретных, виртуальных, тривиально-себетождественных частиц можно было бы назвать объектом неэрлангенской физики, если бы это множество могло быть в какой-то мере наблюдаемым. Но наблюдаемым оно становится при появлении реальных частиц с непрерывными мировыми линиями, при переходе нульмерного пространства в четырехмерное. Такой топологический переход и обретает физический смысл в процессе возникновения «реальных» частиц. Он относится, собственно, не к математике, а к логико-математической области, к метаматематике. По-видимому, физическое обобщение принципа дополнительности, распространение его на квантово-релятивистские и релятивистские соотношения связано с физической трактовкой некоего метаматематического алгоритма, описывающего принцип дополнительности в самом общем виде.

3

В теоретико-множественном аспекте дополнительность выражается в операторной природе двух определений:

- 1) определения принадлежности элемента a_i

множеству A , состоящему из элементов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, и 2) определения закона перехода от α_i к α_k , т. е. определения множества A . Соотношение $\alpha_i \in A$ является оператором, когда мы имеем в виду физическую содержательность, или, пользуясь введенным выше выражением, — *экзистенциальную истинность* этого соотношения. Представим себе, что A — мировая линия частицы. Утверждение, что мировая точка α_i лежит на A , не имеет физического смысла, не ведет к экспериментально проверяемым выводам. Таким смыслом будет обладать утверждение о действительном пребывании частицы в этой мировой точке. Но объектом экспериментальной проверки могут быть лишь свойства мировой линии, и пребывание частицы в α_i имеет физический смысл, если оно *изменяет* эвентуальную мировую линию A в указанной мировой точке и соответственно вид функции, описывающей форму этой мировой линии. Требование физической содержательности заставляет приписать соотношению $\alpha_i \in A$ операторную природу.

В свою очередь мировая линия A имеет физический смысл, если она не просто состоит из мировых точек α_i , но состоит из *заполненных* мировых точек. Каждая экспериментальная проверка закона, характеризующего A , делает проблематичной пребывание частицы на ней, т. е. делает проблематичным физическую содержательность $\alpha \in A$. Речь по существу идет о том, что каждое определение локализации на кривой A сопоставляется оператору вариации, оператору перехода к другой эвентуальной кривой A' . В свою очередь определение формы

кривой A сопоставляется оператору сдвига или приращения функции. Подобная дифференциально-вариационная дополнительность является естественным обобщением идеи нелинейных функций и идеи операторного представления координаты и ее производной в квантовой механике. Она расширяет физическую интерпретацию понятий вариационного исчисления. В классической физике вариация считалась чисто мысленной операцией и не имела физического эквивалента. Сейчас мы рассматриваем виртуальные процессы как физический прообраз вариации. Указанный прообраз является физическим только в той мере, в какой он характеризуется эвентуальной кривой, к которой направлена вариация. Эвентуальная кривая может быть мировой линией нетривиально-тождественной себе частицы, если она является непрерывной и определенной. Операторный эффект проверки утверждения $\alpha_i \in A$ может иметь физический смысл только при непрерывном действии нарушаемого вариацией закона, определяющего множество A . Отсюда следует, что вариации носят локальный характер и в макроскопических масштабах не разрушают множества. По отношению к подобным локальным событиям каждое множество A является *статистическим множеством*.

Метаматематический алгоритм, с помощью которого можно обобщить понятие дополнительности, основан на операторном представлении о логическом суждении, приписывающем субъекту α_i предикат x_i . Такое приписывание рассматривается как операция, изменяющая другие логические суждения. Тем самым логи-

ческим суждениям придается физический смысл, они сопоставляются с экспериментом и антиципируют эксперимент. Исторически такой алгоритм связан с развитием релятивистской и квантово-релятивистской логики. Относятся ли к релятивистской и квантово-релятивистской логике замечания Бора о ненужности логики, которую разрабатывали, чтобы придать логически стройный характер *нерелятивистской* квантовой механике?

В статье «Квантовая физика и философия» Нильс Бор считает неправильными такие выражения, как «наблюдение возмущает явление» или «измерение создает физические атрибуты объектов», выражения, которые кажутся противоречащими обычной логике и служат поводом для обобщения последней — перехода от бивалентной логики с оценками «истинно» и «ложно» к поливалентной логике, например тривалентной, с третьей оценкой: «неопределенно». Если «явление» — это нечто допускающее в принципе информацию, а «измерение» — это сравнение с эталоном, то обобщение логики ненужно: утверждения квантовой механики о явлениях и измерениях не противоречат обычной логике и не требуют ее поливалентного обобщения¹.

Мысль Бора проникает в самое существо вопроса. Квантовая механика вовсе не описывает коллизии: «явление — наблюдение» или «физический атрибут — измерение». «Явление» — это нечто по самой своей природе до-

¹ См. Н. Бор. Квантовая физика и философия. «Успехи физических наук», 1959, 67, вып. 1.

пускающее экспериментальное наблюдение и бивалентное решение вопроса о существовании некоторого физического объекта. Тривалентная логика ненужна и для трактовки «физического атрибута»: последний имеет смысл при наличии макроскопического эталона. Соотношения между «физическими атрибутами» подчинены бивалентной логике. Позитивно-классическая сторона квантовой механики именно и состоит в указании условий применения к микромиру бивалентных суждений о классических динамических переменных. Но с точки зрения *принципа существования* возможность наблюдения, непрерывность мировой линии, наличие макрообъекта — уже не постулаты, а выводы из более общих допущений. Соответственно бивалентный логический алгоритм выводится из более общего, и квантово-релятивистские концепции выходят за пределы бивалентного алгоритма. Это не переход к другой, например тривалентной, логике. Это — алгоритм *возникновения* бивалентных оценок из других, это — алгоритм *переменной валентности*.

Логика переменной валентности вводится совсем не потому, что квантовые понятия «явления» и «измерения» якобы противоречат обычной логике и обычному словопотреблению. Она необходима потому, что два полюса дополнительности — локальные (дискретные трансмутации) и интегральные определения (непрерывные мировые линии) — принадлежат к различным по валентности логическим формам. Для нерелятивистской квантовой механики это несущественно, потому что ее постулатом служит существование макроскопиче-

ских тел, открывающих дорогу в микромир классическим понятиям ценой их неопределенности. В более общей квантово-релятивистской теории нужно проследить, как возникает понятие непрерывной мировой линии, как возникает возможность игнорировать квантовую структуру поля, взаимодействующего с данным и т. д. Анализ такого возникновения требует явного логического алгоритма. Чтобы подойти к нему вспомним уже встречавшееся понятие непрерывного предикатного многообразия¹.

Но собственно куда, в какую область вводится это понятие? Является ли логика непрерывных предикатных многообразий логикой? Ведь здесь по существу возникает представление об измерении, о размерности, причем о размерности, не равной нулю, не вырожденной; здесь мы имеем дело с непрерывным пространством, в котором может быть определена та или иная метрика. Переход от логики с конечным числом оценок к логике с бесконечным числом оценок — это переход от логики к математике, это генезис понятия континуума; непрерывные предикатные многообразия служат последним понятием логики и первым понятием математики. Это — логико-математическое понятие.

Почему же в развитии классической физики ни логические, ни даже логико-математические понятия никогда не формулировались и не модифицировались, почему физика никогда не ощущала потребности в такой формулировке и модификации и соответственно не искала их физического смысла? Эйнштейн сделал большой

¹ См. стр. 154—155.

шаг в сторону физического осмысления математических аксиом и математических понятий, более общих, чем те, которые получили физический смысл в классической науке. Но аксиома параллельных и ее обобщение относились к определению и изменению метрики, а не к обоснованию самого понятия метрики; речь шла о структуре континуума, а не об условиях существования континуума (о таком обосновании и о таких условиях говорил Риман, но он отказывался обсуждать их физический смысл). В своей автобиографии Эйнштейн говорил, что «связи понятий и предложений между собой — логического характера, задача логического мышления сводится исключительно к установлению соотношений между понятиями и предложениями по твердым правилам, которыми занимается логика»¹. Понятия и предложения — в том числе математические: кривизна, метрика и т. д. — имеют физические истоки и меняются в зависимости от тех или иных выполненных или предполагаемых экспериментов. Но связи между предложениями и понятиями имеют логическую природу и подчиняются «твердым правилам».

Нельзя думать, что Эйнштейн не думал об изменении этих правил. Его замечание о «грехах против разума» — это начало (только начало и даже «виртуальное» начало) иного ряда идей. Эйнштейн не закрывает дверей в новую область. Но и не пользуется этой дверью, не переходит в новую область.

В область понятий, которые по существу

¹ Успехи физич. наук, 1956, 59, вып. 1, стр. 75.

выросли из идей Эйнштейна. Теория относительности как теория макроскопических процессов рассматривает движение тел, обладающих энергией, сопоставимой с их массой покоя, умноженной на квадрат скорости света. Это — область релятивистских соотношений. В области микроскопических процессов появляются иные соотношения; здесь встречаются частицы, обладающие энергиями одного порядка с массой покоя, умноженной на квадрат скорости света, и превращения частиц с ненулевой массой покоя в частицы, обладающие лишь массой движения, и обратно. Подобные переходы знает квантовая электродинамика, но они при малых энергиях редки соответственно малой величине постоянной Зоммерфельда. Это — область квантово-релятивистских соотношений. Наконец, в ультрамикроскопической области переходы частиц с массой покоя в частицы, лишенные массы покоя, и обратно становятся основными процессами, и соответственно основное значение приобретают *ультрарелятивистские* соотношения. Если бы представление об элементарных трансмутациях имело некоторое физическое «внешнее оправдание», нам бы пришлось считать ультрарелятивистские соотношения исходными.

Впрочем, «исходными» только в условном смысле как некоторые соотношения, способные обрести физическую содержательность, физический смысл в качестве дополнительных к релятивистским, которым подчинены движения нетривиально себестождественных частиц. Такой же несамостоятельной, виртуальной, дополнительной по отношению к другому полюсу является логическая схема ультрарелятивистского

мира. В логическом аспекте существование тривиально-себетождественной частицы, тождественной себе в данной пространственно-временной ячейке и превращающейся в иную в соседней ячейке, означает, что мы можем приписать субъекту (частице) только один и никакой другой предикат (положение). Отметим — это важно для дальнейшего, — что уже скорость нельзя приписать тривиально себетождественной частице. Скорость — локальное отображение мировой линии, ее направления, ее формы. Всего этого у тривиально-себетождественной частицы нет, как нет и других определений, дополнительных к локализации (ускорения, массы, заряда, спина и т. д.). Что же касается положения, то тривиально себетождественной частице может быть приписан только один предикат — одно значение каждой из координат. Когда закон движения не определен, нетривиально себетождественная, реальная частица может находиться в любой мировой точке, отделенной от начальной временноподобным интервалом. Закон движения частицы, определяя мировую линию, выбирает из этих возможных мировых точек действительные и каждый раз отвечает на вопрос, находится ли в данной точке частица. Ответ не является тривиальным, поскольку существование частицы (субъекта) не связано однозначно с ее мгновенным положением. Тривиально тождественная себе частица не может находиться в иной пространственно-временной клетке, и поэтому на аналогичный вопрос о ее положении ответ будет тривиальным: для данной точки всегда «да», для других — всегда «нет». Оценка этих утверждений всегда будет

одна и та же: «истинно». Мы встречаемся здесь с моновалентной логикой¹.

Моновалентная логика — это логика, не переходящая в математику: никакого непрерывного предикатного многообразия нельзя составить из предикатов, которые принадлежат не тождественному себе в нетривиальном смысле субъекту, а различным, нетождественным субъектам. Моновалентная логика не может иметь физического смысла без бесконечно-поливалентной, так же как нульмерное пространство без четырехмерного и вообще n -мерного ($n > 0$) пространства, как ультрарелятивистские соотношения без релятивистских, как виртуальные процессы без «реальных», как трансмутации в дискретных клетках без непрерывных мировых линий. Все это различные аспекты одной и той же фундаментальной дополнительности локальных и интегральных характеристик, указывающих на *существование* физического объекта.

Чтобы видеть, как локальные характеристики соединяются с интегральными, нельзя обойтись без метаматематического, логико-математического алгоритма. Подобные процессы нельзя описывать только с помощью чисто математического (континуально-математического) алгоритма, в частности с помощью гамильтонова формализма и всех методов, означающих прослеживание движения частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению. Ведь речь идет о возникновении континуальных понятий и методов, и здесь необходим *дискретно-контину-*

¹ См. стр. 160.

нуальный алгоритм, алгоритм перехода от дискретных понятий к континуальным, алгоритм, соответствующий переходу к математике от более общих понятий; короче — логико-математический алгоритм.

У нас уже есть первое звено такого алгоритма — понятие непрерывных предикатных многообразий. Чтобы дать более четкое представление об этом понятии и пойти дальше, понадобятся некоторые символы математической логики. Мы будем обозначать предикаты буквой x ; если же речь идет о различных предикатах, то также буквами y , z и t . Такими же буквами обозначаются суждения о принадлежности субъекту α предиката x или соответственно другого предиката. Подобное суждение можно также высказать в форме: «Субъект α входит в множество X субъектов, обладающих предикатом x ($\alpha \in X$)». Тожественный себе в нетривиальном смысле субъект обозначим через A ; субъект, рассматриваемый локально, когда его нетривиальная себестождественность под вопросом, обозначим через α . При обозначении предикатов буквами с индексами, буквы без индексов будут обозначать предикатные многообразия.

Из элементарных высказываний x и y можно составить сложные высказывания, пользуясь логическими операциями. Здесь нам понадобится только одна из них — *конъюнкция*, обозначаемая через $x \wedge y$. Знак \wedge примерно соответствует союзу «и». Конъюнкция $x \wedge y$ истинна в том и только в том случае, когда x и y истинны. Логические оценки обозначаются буквами R («истинно») и F («ложно»). В трива-

лентной логике, о которой здесь будет идти речь, к ним добавляется третья оценка W («неопределенно»).

Из множества суждений x_i возьмем суждения о принадлежности субъекту α предиката x_i с оценкой «истинно» $x_i = R$ и отбросим все $x_k = F$. Тогда мы получаем конъюнкцию

$$\alpha_1 \in X_1 \wedge \alpha_2 \in X_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n \in X_n,$$

или, обозначая, как и раньше, суждение $\alpha_i \in X_i$ через x_i :

$$x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n.$$

Если предикат x_i — координаты точки, а α_i находящаяся в этой точке частица, то конъюнкция представляет собой логическое обобщение *заполненной* мировой линии частицы.

Такая конъюнкция при некоторых условиях позволяет идентифицировать α , признать все α_i тождественными. Тождественными в не тривиальном смысле. Идентификация требует от многообразия двух условий. Во-первых, непрерывности и, во-вторых, постоянного закона, указывающего на переход от x_i к x_k . Эти условия имеют смысл, если предикаты x_i являются интенсивностями, т. е. к ним применимы понятия «больше» и «меньше», и, более того, если можно ввести для каждого двух предикатов x_i и x_k предикат $r(x_i, x_k)$, обладающий известными свойствами: $r(x_i, x_k) = r(x_k, x_i)$ и т. д., т. е. *расстояние*. Поскольку предикатное многообразие x_1, x_2, \dots, x_n непрерыв-

но, $n = \infty$ и $r(x_i, x_k)$ может быть бесконечно малой величиной, мы не видим в предикатном многообразии естественной метрики и вводим мероопределение — совокупность операций, с помощью которых, зная x_i и x_k , можно определить $r(x_i, x_k)$.

Разумеется, с переходом от конечного многообразия к бесконечному ($n = \infty$) мы, если и не переходим в область математики, то, во всяком случае, антиципируем математические понятия, придаем логике математическую содержательность. Вскоре мы увидим, как, при каких условиях она приобретает такую содержательность.

Себестоимость субъекта α гарантируется, как сказано, сохранением некоторого предиката. Таким тождественным неизменным предикатом может быть отношение приращения Δx_i предиката x_i к приращению Δy_i предиката y_i из другого непрерывного предикатного многообразия y . Если $\Delta x_i/\Delta y_i$ не равно $\Delta x_k/\Delta y_k$, то мы переходим к приращениям приращений $\Delta^2 x_i$ и $\Delta^2 y_i$, к их отношениям и т. д. вплоть до некоторого $\Delta^n x_i/\Delta^n y_i$; затем рассматриваем отношения между отношениями $\Delta^n x_i/\Delta^n y_i$ и приращениями $\Delta^n z_i$ третьего многообразия. В физике этому соответствует переход от меняющейся скорости к неизменному ускорению, массе и т. д., т. е. *определенная форма мировой линии*. Определяющий ее закон может быть выражен как закон сохранения некоторого предиката, гарантирующего определенность формы мировой линии.

Физическое грехопадение логики, приобретение логическими понятиями физического

смысла, антиципация эмпирической проверки начинаются с постулата дополнительной, свойственной метрической логике предикатных многообразий. Предикатное многообразие x_1, x_2, \dots, x_n превращается в конъюнкцию $\alpha_1 \in X_1 \wedge \alpha_2 \in X_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n \in X_n$, если каждый предикат x_i действительно принадлежит субъекту α_i . Если у нас нет независимого от $\alpha_i \in X_i$ определения α_i , то это суждение становится тривиальным, тавтологическим и неспособным приобрести физический смысл, стать объектом физической проверки. Определение α_i как субъекта нетривиального суждения $\alpha_i \in X_i$ состоит в констатации: α_i входит в множество нетривиально тождественных α_i , образующих субъект A , который характеризуется определенным поведением, определенным набором предикатов x_i , образующих непрерывное и подчиненное некоторому закону предикатное многообразие. Значит, определение α антиципирует определение A . Но и само определение A имеет смысл, если перед нами не простое предикатное многообразие x_1, x_2, \dots, x_n , а конъюнкция суждений $\alpha_1 \in X_1 \wedge \alpha_2 \in X_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n \in X_n$. Отсюда и вытекает фундаментальная дополнительность, которая выражается в двух основных формах. Во-первых, она выражается в локальной дополнительности, связанной с воздействием определения A на определение α_i . Во-вторых, она выражается в интегральной дополнительности, связанной с воздействием определения α_i на определение A . Первую мы обозначим как $(A \rightarrow \alpha)$ -дополнительность, вторую — как $(\alpha \rightarrow A)$ -дополнительность. Впоследствии мы укажем основания,

позволяющие назвать первую дополнительную квантовой, а вторую — релятивистской.

Возьмем конъюнкцию суждений о принадлежности субъектам $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ предикатов x_1, x_2, \dots, x_n , образующих непрерывное многообразие.

Присвоим определенную оценку конъюнкции в целом и каждому из ее элементов. Критерием для отбора предикатов x_i было интегральное определение многообразия x , закон, выражающийся в неизменности некоторого предикатного отношения. Закон этот определяет форму конъюнкции. Подойдем к ней с двумя вопросами: с вопросом о чисто логической справедливости конъюнкции и с вопросом о ее существовании, т. е. с экзистенциальной оценкой. Конъюнкция будет истинной, если истинны все без исключения суждения x_i . Но будет ли она существовать? Для этого необходимо экзистенциальное «подтверждение» оценки суждения x_i . «Суждение x_i справедливо». Это — первая оценка. Затем мы рассматриваем эту оценку как суждение и спрашиваем: «справедливо ли суждение „суждение x_i — справедливо“?» Если ответ положителен, то, во-первых, справедливо суждение x_i : $x_i = R$, и, во-вторых, справедливо суждение, состоящее в признании $x_i = R$ справедливым: $(x_i = R) = R$. Две эти оценки вместе имеют, как мы вскоре увидим, экзистенциальный смысл, если они совместны.

Аналогичную вторую оценку можно дать и всей конъюнкции. По определению этой логической формулы конъюнкция справедлива, если справедливы все суждения x_i . Но мы за-

даем второй вопрос: истинно ли суждение

$$x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n = R$$

об истинности конъюнкции? При утвердительном ответе получаем:

$$(x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n = R) = R.$$

В бивалентной логике оценка суждения $x = R$ совпадает с оценкой суждения x : если $x = R$, то $(x = R) = R$; если $x = F$, то $(x = R) = F$. В тривалентной логике с оценками R , F и W такие оценки не совпадают: если $x = W$, то $(x = R) = F$. Назовем *метасуждением* суждение об истинности суждения x_i , т. е. об истинности суждения «субъект α_i обладает предикатом x_i ». Какова оценка метасуждения? Вторая оценка (оценка оценки) относится к содержательности суждения x_i , т. е. к вопросу: являются ли предикаты x_i предикатами существующих субъектов α_i ? Наличие такого субъекта, т. е. содержательность $\alpha_i \in X_i$, само является предикатом. Здесь мы позволим себе отойти от абстрактно-логического рассуждения и проиллюстрировать вводимые понятия. Когда мы указываем координаты точки, они могут быть предикатом, входящим в предикатное многообразие (в данном случае — пространство); но здесь еще нет речи о субъекте, о частице, обладающей данными координатами. Суждения о принадлежности предиката *субъекту*, т. е. констатации положения *частицы*, здесь еще нет. Физически-экзистенциальное суждение придает физический смысл определению положения: определяется положение не точки, а частицы. Частица может быть отнесена к

тому или иному типу, если антиципируется ее мировая линия. Скорость означает направление мировой линии, далее определяется кривизна мировой линии, т. е. ускорение частицы и отношение кривизны к полю, т. е. заряд и масса частицы. Таким образом, экзистенциальная истинность утверждения $x_i = R$, иначе говоря, утверждение $(x_i = R) = R$ само является предикатом субъекта α_i — антиципацией конъюнкции (ее роль в приведенном примере играла заполненная мировая линия). Мы назовем такой предикат *метапредикатом* по отношению к x_i и будем обозначать его через \dot{x}_i . Это как бы локальное отображение всей конъюнкции $\alpha_i \in X_1 \wedge \alpha_2 \in X_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n \in X_n$, гарантия того, что α_i подчинен определенному закону перехода от x_i к x_k , что α_i обладает не только локальным бытием, но и эвентуальным поведением.

Теперь для нас ясна связь понятий метасуждения и метапредиката с принципом существования. Первый предикат — это чисто локальное определение, это пространственно-временная локализация. Принцип существования требует, чтобы первый предикат был дополнен антиципацией интегрального определения. Именно в этом, в такой антиципации состоит метапредикат. В свою очередь он сам по себе не удовлетворяет принципу существования: указание на определенную форму мировой линии не гарантирует существования «реальной» частицы на этой линии. Экзистенциальное суждение должно приписывать субъекту и предикат, и метапредикат. Но этого мало. Необходимо указание на некоторый субстанциальный процесс, связы-

вающий предикат и метапредикат. Он определяется их дополнительностью.

Чем строже мы подходим к определению x_i , тем с меньшей определенностью мы рисуем эвентуальную конъюнкцию, указывающую на дальнейшее поведение субъекта α . Иначе говоря, чем определеннее оценка суждения, приписывающего субъекту предикат x_i , тем неопределеннее оценка суждения, приписывающая субъекту предикат $x_i \equiv (x_i = R)$. Если обозначить, как мы это уже делали, суждения теми же символами, что и приписываемые предикаты, то мы получаем формулу

$$\dot{x}_i \equiv (x_i = R) = W.$$

Для оценки $x_i = W$ мы получаем соответственно:

$$\dot{x} \equiv (x_i = W) = R.$$

Это и есть логический принцип дополнительности.

До сих пор логический анализ оставался тавтологическим, дело сводилось к логическим псевдонимам физических соотношений. Непрерывное предикатное многообразие — это логический эквивалент непрерывной мировой линии, предикат x_i — это мировая точка частицы, метапредикат \dot{x}_i — это энергия и импульс частицы, т. е. локальная характеристика формы мировой линии. Локальное определение — координаты частицы — не образует экзистенциального утверждения о пребывании в x_i реальной частицы; такое пребывание определяется дополнительной характеристикой, определенной формой эвентуальной мировой линии, позволяющей отнести

частицу к тому или иному типу. Локальное отображение мировой линии — скорость частицы, которая в данном случае физически расшифровывает понятие метапредиката. В соотношениях $x_i \equiv (x_i = R) = W$ и $x_i = (x_i = W) = R$ нет ничего, что не содержалось бы в боровской формулировке принципа дополнительности. Интерпретируя таким образом логические понятия, мы возвращаем физике только то, что взяли у нее. Смысл логического обобщения физических понятий состоит в возможном их распространении на иные физические понятия и выявлении скрытых связей между понятиями. По-видимому, для перечисленных понятий такое распространение не исключено.

До сих пор речь шла о воздействии интегрального определения на локальное, об $(A \rightarrow \alpha)$ -представлении. Локальное отображение эвентуальной мировой линии — импульс частицы (или же энергия) — находится в отношении дополнительности к чисто локальному определению, к положению частицы в пространстве (или же ко времени). Без дополнительного определения локальное определение не имеет физического смысла, но эти дополнительные определения не могут быть даны в бивалентной форме при взаимодействии частицы с одним и тем же макроскопическим телом.

Перейдем теперь к $(\alpha \rightarrow A)$ -представлению, т. е. к воздействию ультрамикроскопических, локальных процессов на макроскопические. Подойдем к этой проблеме со стороны логико-математических понятий.

Первое логико-математическое понятие — это переход от дискретных предикатных много-

образий к непрерывным. Для подобного перехода требуется критерий выбора предикатов, определенный закон перехода от x_i к x_k . Этот закон выражается отношением $\Delta^n x_i / \Delta^n y_i$ или же

$$\frac{\Delta^n x_i / \Delta^n y_i}{\Delta^n z_i},$$

которое сохраняется при переходе от x_i к x_k . Напомним об интерпретации этого отношения: оно может быть скоростью, ускорением, отношением ускорения к полю, т. е. массой; во всяком случае, это — определение поведения частицы, ее эвентуальной мировой линии. Форма конъюнкции ничего не говорит о ее существовании. Она говорит о возможности событий, о пространственно-временной последовательности событий, но не о самих событиях. Если мы хотим антиципировать физическую содержательность логики, необходимо к указанному определению конъюнкции присоединить другое определение, непосредственно зависящее от заполненности конъюнкции локальными событиями. Эти события создают новое свойство конъюнкции: ее существование. Они изменяют отношения $\Delta^n z_i / \Delta^n t_i$ в других конъюнкциях B . Подобное изменение не позволяет определить воздействие конъюнкции B на конъюнкцию A . Поэтому между A -свойствами конъюнкции, независимыми от локальных свойств, и $(\alpha \rightarrow A)$ -свойствами существует отношение дополнительности.

Свойства конъюнкции, зависящие от локальных определений, т. е. $(\alpha \rightarrow A)$ -свойства, придают конъюнкции экзистенциальную истинность. В первом случае мы получали из отдельного

предиката x_i суждение $a \in X_i$. Теперь мы из предикатного многообразия x , т. е. x_1, x_2, \dots, x_n , получаем конъюнкцию $a_1 \in X_1 \wedge a_2 \in X_2 \wedge \dots \wedge a_n \in X_n$. В случае многообразия мы знали только закон перехода от x_i к x_k и логическая истинность конъюнкции гарантировала, что все x_i подчиняются этому закону. Но физический закон подобен государственному, который не может быть проверен по своей экзистенциальной содержательности без людей, подчиняющихся закону или нарушающих его. Заметим, кстати, что экзистенциальная содержательность государственного закона превращает его из совокупности норм поведения в совокупность реальных поступков людей. Вообще, экзистенциальная истинность логической конъюнкции превращает ее из совокупности логических норм в совокупность событий, подчиненных этим нормам.

4

Вернемся к боровскому определению явления: «что-то такое, о чем возможно однозначным образом информировать». Теперь договоримся о смысле слова «информировать». Будем рассматривать только такую информацию, которая содержит сведения о действительных физических процессах. Тогда количественным определениям информации сопоставляются количественные определения физических *явлений*, процессов, о которых можно что-либо рассказать однозначным образом, т. е. проверив рассказ экспериментом.

Можно было бы отказаться от совершенно условного термина «эксперимент». Он, разумеется, никого не вводит в заблуждение, и никто не связывает с ним образ экспериментатора и познавательного процесса. Речь идет о физическом процессе, который происходит независимо от познания, но характеризуется *принципиальной* возможностью обнаружения. Подобной возможностью характеризуется движение частицы по мировой линии. Оно отличается от принципиально необнаруживаемой мировой линии как таковой заполненностью линии, которая проявляется во взаимодействии частиц, воздействии одной *заполненной* мировой линии на другую *заполненную* мировую линию. Тот факт, что подобное воздействие позволяет зарегистрировать движение частицы, нисколько не умаляет независимости воздействия от регистрации. Переход от абстрактной мировой линии к мировой линии, заполненной *событиями*, — это переход к учету взаимодействий, вызывающих локальные вариации мировых линий. Когда мы вводим в теорию информации критерий физической содержательности, мы фактически говорим о вполне объективных явлениях. Сосредоточив внимание на *исходных* явлениях, мы исключаем из их числа такие явления, как 1) непрерывное движение тождественной себе частицы и 2) трансмутация частицы, *если их взять одно отдельно от другого*. Первое физически непредставимо, потому что без локальных *событий* движение сводится к последовательности мировых точек, которые сами по себе, без взаимодействий, без виртуальных изменений мировой линии, без *заполнения* мировой линии, не могут быть объек-

том эксперимента, а следовательно, *однозначной* информации. Второе физически непредставимо и неконтролируемо без эвентуальных мировых линий, придающих смысл понятию типа элементарных частиц и, следовательно, понятию изменения типа, понятию трансмутации частицы. Отсюда вытекает предположение о «единице» физически содержательной информации как о процессе, который требует сразу же и локального (виртуальная вариация), и интегрального (эвентуальная мировая линия) определения.

Попытаемся, исходя из высказанного только что предположения, рассмотреть в качестве физически содержательных два связанных одно с другим понятия теории информации: *энтропию* и *негэнтропию*.

Напомним в самой краткой форме смысл понятия энтропии в теории информации.

Будем рассматривать n событий A_1, A_2, \dots, A_n , из которых одно и только одно наступает при каждом испытании. Примером может служить выпадение 1, 2, 3, 4, 5 или 6 при каждом бросании игральной кости. Пусть заданы вероятности p_1, p_2, \dots, p_n событий (в данном примере равные, но вообще для группы событий неравные). Тем самым задана *конечная схема* событий. Она отличается той или иной неопределенностью, небольшой в случае $p_1=0,99, p_2=0,01$ и максимальной для событий A_1, A_2 , если $p_1=0,5, p_2=0,5$. Мерой неопределенности служит взятая со знаком минус сумма вероятностей, умноженных на их логарифмы. Она является максимальной при равных вероятностях n событий и минимальной, если одна p_i равна единице, а остальные нулю, т. е. при полной определенности

результата. Такому обобщенному понятию энтропии противостоит понятие негэнтропии — неравномерности вероятностей событий. В учении о теплоте негэнтропия характеризует количественно определенные температурные перепады. Вообще в физике негэнтропия выражает способность данной системы производить энергию движения тождественного себе тела или же превращаться в вакуум тепловых, электрических и тому подобных перепадов в результате необратимых процессов. Вообще говоря, при отсутствии макроскопических процессов и нарушающих вакуум перепадов последний является наиболее вероятным состоянием рассматриваемого множества микроскопических объектов. Негэнтропия — мера «невероятности», т. е. мера воздействия макроскопических условий на множество микроскопических объектов. Она равна мере преодоленной равномерности распределения микропроцессов, т. е. равна энтропии, взятой со знаком минус.

Негэнтропия зависит от макроскопических условий, нарушающих вакуум макроскопических процессов, вызывающих в чисто микроскопической среде макропроцессы. Но негэнтропия определяет только ту или иную вероятность определенного макроскопического процесса. Самый же процесс, превращающий негэнтропию в информацию, состоит в некоторых локальных событиях. Он соответствует переходу от предикатного многообразия x_1, x_2, \dots, x_n и конъюнкции $\alpha_1 \in X_1 \wedge \alpha_2 \in X_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n \in X_n$. Взглянув с некоторой новой стороны на указанный переход, мы можем перейти к его физической интерпретации.

Чисто локальные определения относятся к процессам, которые не могут быть макроскопически зарегистрированы. Мы можем назвать их *ультрамикроскопическими* потому, что они в принципе не могут быть обнаружены никаким «микроскопом» непосредственно, без превращения в макроскопические процессы. Заметим, что в теории элементарных частиц мы рассматриваем даже движение отдельной частицы как нечто макроскопическое, как статистический ансамбль ультрамикроскопических процессов.

Пространство, в котором происходят лишь ультрамикроскопические процессы, мы именуем вакуумом. Объектом эксперимента может быть лишь результат таких процессов, и пока нет тела, которое придает физический, экспериментально-регистрируемый характер ультрамикроскопическим процессам, мы можем считать пространство, где они происходят, пустым. Физические объекты, которые участвуют в ультрамикроскопических процессах, — это *виртуальные* объекты, их существование определяется возможным образованием нетривиально тождественных «реальных» объектов.

Понятие «реальности» частицы тесно связано с понятием реальной кривой в вариационных задачах механики. «Реальная» частица обладает реальной в вариационном смысле непрерывной мировой линией. Напротив, виртуальные частицы обладают лишь эвентуальными мировыми линиями. Процессы, в которых участвуют виртуальные частицы, не могут иметь физического смысла без физически представи-

мого определения таких эвентуальных линий. Представим себе возникновение частиц в двух мировых точках, соединенных пространственно-подобным интервалом. Мы можем отнести эти точки к одному и тому же типу, имея в виду эвентуальные мировые линии, характерные для этого типа частиц. Мы можем даже говорить в данном случае о виртуальном смещении по пространственноподобному интервалу, т. е. со сверхсветовой скоростью. Но такое смещение не является реальным, противоречит принципу существования, потому что движение со сверхсветовой скоростью исключено для тождественной себе частицы; реальные же возникновения однотипных частиц, соединенных пространственноподобным интервалом при переходе к макроскопическим мировым линиям тождественных себе частиц оказываются на различных мировых линиях, не могут рассматриваться как состояния тождественного себе физического объекта; мы не можем здесь говорить о действительном смещении.

Теперь можно несколько конкретнее выразить смысл понятий «физическая содержательность» и «экзистенциальная истинность» без упоминания о возможном эксперименте с помощью чисто объективных понятий. Физическая содержательность локального определения означает, что определяемый микроскопический объект входит в ансамбль, образующий *макроскопический* объект, обладающий определенной мировой линией, проходящей на световом конусе или внутри последнего, т. е. в области временноподобных интервалов.

С другой стороны, физическая содержа-

тельность макроскопического определения означает, что определяемый процесс состоит из ультрамикроскопических процессов, не сводимых к *приращению* мировой линии, означающих в каждом случае *вариацию* мировой линии.

Но каждый переход из области ультрамикроскопических процессов в область макроскопических процессов вводит в определение известную неопределенность, известную вероятность, которая лишь статистически приближается к достоверности. Это первый результат дополнительности локальных и интегральных определений.

Противопоставление макроскопических и локальных процессов имеет смысл, если первые подчиняются одним законам, а вторые — другим. Связь между макроскопическими и локальными закономерностями состоит в том, что макроскопические закономерности накладываются на локальные процессы, изменяя их вероятности, изменяя математические ожидания их результатов, нарушая равномерное макроскопическое распределение локальных процессов. Воспользуемся биологической аналогией. Индивидуальные вариации наследственности влияют на индивидуальные судьбы организмов, но «макроскопическое» наблюдение, имеющее дело с филогенетическими процессами, не может их зарегистрировать, и они сами по себе не имеют биологического смысла. *Биологический* эксперимент, демонстрирующий «макроскопическое» воздействие среды на филогенез, не улавливает индивидуальных вариаций. Воздействие среды состоит в изменении вероятностей наследования тех или иных

вариаций, нарушает их «энтропию», создает «негэнтропию», увеличивает в статистическом ансамбле, в филогенезе число «определенных» вариаций, соответствующих эвентуальной филогенетической эволюции. Когда задана определенная среда обитания вида, индивидуальные вариации становятся несимметричными: одни соответствуют макроскопическому закону и макроскопически суммируются, другие рассеиваются. Каждый макроскопический закон определяет некоторую диссимметрию в распределении микроскопических вариаций. Одни становятся более вероятными (или их результаты приобретают большую вероятность повторения), другие соответственно становятся менее вероятными. Какие вариации более вероятны и какова интенсивность диссимметрии, это зависит от диссимметризирующего поля, роль которого в биологии выполняет внешняя среда.

Каждый раз, когда мы определяем локальный процесс, ссылаясь на определение макроскопического объекта, в игру вступает вероятность. Для частицы, трансмутирующей в пространственно-временной клетке, определение типа (без которого теряет смысл понятие трансмутации) связано с определением эвентуальной мировой линии, которое начинается с определения скорости и состоит далее в определении ускорения, коэффициента, связывающего ускорение с полем, и т. д. Но форма мировой линии определяет лишь вероятность своего локального отображения — той или иной скорости. Таким образом, дополнительность локального и интегрального определений приводит к статистическому характеру локальных определений.

Как ответить с такой точки зрения на вопрос, поставленный когда-то Эйнштейном: «Играет ли бог в кости»?

На первый взгляд из универсального статистического характера локальных определений следует утвердительный ответ: «Да бог играет в кости». Но квантово-релятивистский бог играет в такие кости, где обозначения на границах могут отличаться одно от другого только в предвидении достоверного (не зависящего от случайных выпадений) результата игры. Представим себе некоторое выбрасывание костей, произведенное эйнштейновским ироническим псевдонимом исходных закономерностей бытия. Кости должны выпасть так, чтобы получилось высказывание: «В данной клетке регенерировала частица данного типа». Но «данный тип» определяется рядом выбрасываний, рядом локальных событий, образующих тождественную себе частицу с достоверно определенной мировой линией, с достоверно определенной скоростью, или ускорением, или коэффициентом, связывающим ускорение с полем, т. е. массой, или коэффициентом, связывающим наблюдаемую массу со скоростью (массой покоя). Такой ряд образует обладающее физическим смыслом экспериментально проверяемое высказывание о «реальной» частице. Это похоже на игру, где участники квалифицируют каждое выпадение костей, учитывая эвентуальный результат длительной игры.

Учет эвентуального макроскопического результата необходим для содержательности понятия регенерации и для отождествления регенерировавшей частицы с исходной. Представим

себе, что частица испытывает трансмутацию, т. е. в данной мировой точке, или в данной пространственно-временной клетке, происходит переход на другую мировую линию, на мировую линию другой формы. Это значит, что исходная мировая линия теряет физический смысл, а мировая линия другой формы обретает такой смысл, становится эвентуальной мировой линией частицы. Затем мировая линия исходной формы вновь приобретает физический смысл. Произошла регенерация частицы.

Мы можем сказать, что исходная частица аннигилировала, излучив квант некоторого поля, способного в свою очередь аннигилировать и снова породить частицу исходного типа. Каковы условия идентификации новой частицы со старой? Если пункты их локализации в пространстве и времени соединены пространственноподобным интервалом, т. е. частица возникла во втором пункте раньше, чем свет может дойти из первого пункта, у нас теряется основание для идентификации: через второй пункт можно привести сколько угодно мировых линий, не тождественных с исходной. То же самое, если расстояние между пунктами меньше расстояния, проходимого светом за время, прошедшее между аннигиляцией и порождением. В этом случае также не гарантируется единственность новой мировой линии. Множество частиц может пересечь мировую линию данной тождественной себе частицы на расстоянии, равном ρ , через промежуток времени, больший или меньший, чем $\tau = \rho/c$. Критерий «единственности продолжения» ми-

ровой линии тождественной себе частицы за-
ставляет приписать дискретным расстояниям
 ρ и дискретным интервалам времени τ отно-
шение $\rho/\tau=c$. Иными словами, дискретным
является пространство-время на световом ко-
нусе.

Подчеркнем, что такой вывод, как и прирав-
нивание регенерации сдвигу тождественной
себе частицы, как и применение понятий ми-
ровой линии, интервала, светового конуса к
ультрамикроскопическому миру, вытекает из
введения эвентуальной мировой линии в ис-
ходное понятие трансмутации.

6

Квантовая дополнительность — это допол-
нительность локальных и интегральных опре-
делений в $(A \rightarrow \alpha)$ -представлении. Релятивист-
ская дополнительность — это дополнительность
локальных и интегральных определений в
 $(\alpha \rightarrow A)$ -представлении. В первом случае мы
рассматриваем отображение интегральной ха-
рактеристики (формы мировой линии) в ло-
кальном поведении частицы, получаем скорость,
импульсы, энергию, сопоставляем эти предика-
ты (метапредикаты!) с пространственно-вре-
менной локализацией частицы и обнаруживаем
соотношение дополнительной — квантовой до-
полнительности. Во втором случае мы рассмат-
риваем макроскопическое отображение микро-
событий, сопоставляем его с макроскопической
формой мировой линии и обнаруживаем реляти-
вистскую дополнительность.

Вернемся к исходному постулату специальной теории относительности — неизменности скорости света во всех галилеевых системах. Мы видели выше (стр. 321—324), что, в отличие от макроскопической скорости частиц, скорость распространения диссимметрии — взаимодействующего с частицами поля — остается инвариантной при лоренцовых преобразованиях. Сейчас видна связь этого утверждения с фундаментальной дополнительностью ультрамикроскопических и макроскопических свойств в рамках $(\alpha \rightarrow A)$ -представления. Локальные процессы — трансмутации-смещения — могут иметь физический смысл только при дополнительной характеристике эвентуальных мировых линий частицы. Характеристика мировой линии обретает физический смысл при дополнительном учете локальных событий. Ультрамикроскопические скорости $\rho/\tau = c$ элементарных смещений дают зависящую от системы отсчета макроскопическую скорость v , пропорциональную M/L , на макроскопической траектории L , совпадающей по направлению с линией диссимметрии вероятностей регенераций. Но из того факта, что в пространстве распространяется диссимметрия *вероятностей*, вытекает инвариантность скорости распространения поля.

Вспомним, как поворот координатных осей $X_1X_4 \rightarrow X'_1X'_4$ приводил к иному значению макроскопической скорости v . В $(\alpha \rightarrow A)$ -представлении это изменение скорости означает, что меняется заполнение макроскопической траектории L проекциями сдвигов ρ , совпадающих по направлению с L . Слово «заполнение» может означать здесь либо частоту сдвигов ρ , совпадаю-

щих по направлению с положительным направлением L , либо, что то же самое, величину (взятую со знаком минус) среднего угла между ρ и L . В обоих случаях речь идет о мере реализации соотношения вероятностей: $p(\rho_L) > p(\rho_{-L})$. Эта мера изменяется в зависимости от того, в какой системе X_1X_4 определяется направление L . Соотношение вероятностей, естественно, не зависит от выбора системы, но от такого выбора зависит макроскопическая реализация указанного микроскопического соотношения.

Возьмем конъюнкцию суждений о совпадении по направлению элементарных сдвигов с линией диссимметрии L :

$$(\rho_1 = \rho_L) \wedge (\rho_2 = \rho_L) \wedge \dots \wedge (\rho_n = \rho_L) = W.$$

Метасуждениями в данном случае будут констатации диссимметрии, гарантирующие существование линии L . Эти метасуждения образуют конъюнкцию с оценкой R (согласно логическому принципу дополнительности):

$$[p(\rho_L)_1 > p(\rho_{-L})_1] \wedge [p(\rho_L)_2 > p(\rho_{-L})_2] \wedge \dots \wedge [p(\rho_L)_n > p(\rho_{-L})_n] = R.$$

Такие оценки двух конъюнкций означают, что для каждого элемента M не гарантируется совпадение по направлению с L , что существует разброс, что $v < c$. Если мы переменим оценку первой конъюнкции на R , а второй на W , получится описание движения частицы, которая имеет на всех интервалах неизменную скорость $v = c$, поскольку все элементы микроскопической траектории совпадают с L , поскольку нет разброса и соответственно сдвигов-регенераций. Такая

перестановка оценок означает, что мы рассматриваем в качестве движущейся частицы саму диссимметрию $p(\rho_L) > p(\rho_{-L})$. Это — псевдоквант диссимметрии, псевдоквант силового поля, действующего на частицу с ненулевой массой покоя. Его скорость всегда равна скорости света. В случае колебаний диссимметрии движущийся без разброса физический объект характеризуется уже не просто диссимметрией, а определенной частотой ее колебаний и приобретает уже не псевдокорпускулярные, а корпускулярные свойства. Однако, если в их число не входит масса покоя, скорость распространения колебаний диссимметрии остается максимальной и не зависящей от системы отсчета.

Теперь перейдем к зависимости массы от скорости. Для этого нужно вернуться к понятию энтропии и связать с энтропией некоторую количественную меру симметрии регенераций.

Если частица имеет равные шансы регенерации во всех пространственных направлениях, то энтропия максимальна. Подобная симметрия сдвигов регенерации имеет некоторую характерную для данного типа частиц количественную меру — интенсивность симметрии. Она возникает в пространстве с телами отсчета и с определенной метрикой, иначе мы не могли бы ориентировать возможные направления регенераций-сдвигов, не могли бы различать их, не могли бы ответить на вопрос и даже поставить вопрос: каково направление наибольшей вероятности регенерации частицы? Когда система отсчета и метрика определены, мы можем поставить указанный вопрос. Пусть ответ будет состоять

В констатации симметрии направлений: частица регенерирует и сдвигается во все стороны пространства с одной и той же вероятностью. Разумеется, такая симметрия вероятностей относительна, она сохраняется лишь для определенной системы отсчета. Вероятность тут фигурирует как вектор. Если сопоставить скалярной вероятности регенерации модуль вектора, то он не будет меняться при переходе от одного направления к другому; мы получаем сферически симметричный вектор вероятности. Чтобы перейти к зависимости модуля вектора от его направления, чтобы перейти от максимальной энтропии, от симметрии вероятностей регенерации, к меньшей энтропии, нужно определенное воздействие извне, определенное внешнее поле, нарушающее симметрию. Эта интенсивность симметрии, превращающая ее из геометрического понятия в физическое, делающая симметрию экспериментально измеримой величиной, пропорциональна числу элементарных физических событий, т. е. числу регенераций-сдвигов, не отличающихся по вероятности, может быть ассоциирована с взаимодействием частицы с *однородной* Вселенной. Такая мысль не вытекает однозначно из современного состояния общей теории относительности; она может рассматриваться как условная иллюстрация, поясняющая понятия симметрии случайных блужданий и диссимметризирующего поля. Нарушения симметрии пропорциональны нарушениям однородности, скоплениям, средоточиям, уплотнениям физических процессов, которые измеряются также числом элементарных событий. Немного дальше мы увидим, что сов-

ременные космологические представления не исключают существования однородной Вселенной, на которую можно возложить ответственность за определенную по интенсивности симметрию регенераций, и существования локальных неоднородностей, ответственных за диссимметризирующие поля, за пространственную диссимметрию регенераций.

Определенная интенсивность взаимодействия частицы с однородной Вселенной, интенсивность симметрии — это масса покоя, характеризующая данный тип частиц. Она пропорциональна интенсивности нарушающего симметрию фактора, интенсивности, необходимой для уничтожения данной энтропии, данного множества симметричных по вероятности сдвигов-регенераций, для их превращения в несимметричные по вероятности сдвиги-регенерации. Интенсивность диссимметрии, иначе говоря негэнтропии, пропорциональна интенсивности преодоленной симметрии, иначе говоря энтропии.

Что будет происходить с массой при увеличении скорости? Это нетрудно увидеть, если придавать понятиям энтропии и негэнтропии тот же, что и раньше, физический смысл.

Скорость v — макроскопическая величина, усредненная по непрерывной траектории по большому числу регенераций. Она характеризует движение реальной частицы. Иными словами, каждое значение скорости v означает какую-то интенсивность преодоленной энтропии, какую-то величину негэнтропии, какую-то меру приближения M к L . Приближение M к L , измеряемое скоростью v (мы берем значения, усредненные по какому-то большому

отрезку $l \gg \rho$), — это мера негэнтропии, т. е. мера преодоленной энтропии, — словом, мера массы, которой обладает частица. Чем больше скорость v , чем ближе M к L , чем больше негэнтропия и преодоленная энтропия, тем больше масса частицы. Поскольку исходная энтропия пропорциональна массе покоя, энтропия, зависящая от скорости — релятивистская масса частицы, является линейной функцией массы покоя. В случае совпадения M с L , т. е. движения частицы с макроскопической скоростью c при $m_0 > 0$, мы получаем $m = \infty$, поскольку в этом случае речь идет о полной негэнтропии, полном исчезновении энтропии при ненулевом значении исходной энтропии. Из этих условий могут быть выведены релятивистские соотношения для массы и связанные с ними другие релятивистские соотношения, а также размерности динамических переменных (импульса, энергии, действия и т. д.). Но здесь нас интересует другое: неопределенность локальных процессов переходит в некоторое макроскопическое, экспериментально регистрируемое и измеримое соотношение, когда мы ее рассматриваем как энтропию, связанную с негэнтропией и принимающую значения от нуля до бесконечности. Это и значит учитывать микроструктуру мировой линии при макроскопическом анализе последней. Масса как мера преодоленной энтропии, возрастающая вместе с негэнтропией, т. е. со скоростью, это и есть макроскопический предикат мировой линии, зависящий от микроструктуры, от ультрамикроскопических процессов.

Совсем иная дополнительность характера для космических областей, где мы вместо минимальных расстояний встречаемся с максимальными, сохраняющими физический смысл расстояниями.

Здесь речь идет о гравитационных взаимодействиях. Заданное гравитационное поле в первом приближении зависит от массы некоторого крупного средоточия материи, нарушающего однородность и непрерывность в космосе. Такие поля мы будем называть локальными гравитационными полями. Они могут быть полями (если мы имеем в виду только космические тела) планет, звезд, галактик и скоплений галактик.

Одним из постулатов современной космологии остается обобщенный принцип Коперника: во Вселенной нет центра, из любой точки космоса наблюдателю открывается одна и та же картина. Но этот принцип противоречит локальным наблюдениям: ведь, например, солнечная система обладает центром, и в масштабах звездных систем, галактик и даже скоплений галактик Вселенная отнюдь не однородна и не изотропна. Поэтому мы переходим к более протяженным областям, так, чтобы локальные неоднородности и анизотропии сгладились. При этом дискретная картина мира сменяется континуальной картиной космологического субстрата с постоянной плотностью. Космологический постулат и состоит в утверждении, что с возрастанием масштабов наблюдаемые средние величины стремятся к одним и

тем же значениям независимо от положения наблюдателя. Мы можем указать качественным образом нижний предел однородной и континуальной системы: она должна быть настолько велика, чтобы самые большие из наблюдаемых неоднородностей (порядка расстояний между скоплениями галактик) представлялись пренебрежимо малыми. Но существует ли верхний предел этой системы?

Для положительного ответа есть некоторые существенные основания — парадоксы бесконечной Вселенной. Существуют ли *локальные* аргументы в пользу конечной Вселенной (мы отождествляем ее с конечной по объему Метагалактикой)?

Под локальными эффектами мы будем понимать такие особенности ультрамикроскопической картины движения, которые объясняются именно однородностью и изотропией Метагалактики. Это не кинетические особенности, не те или иные особенности формы мировых линий. Все эти особенности, т. е. A -свойства мировых линий, обязаны не однородности и изотропии окружающей системы a , напротив, неоднородности и анизотропии. Иное дело ($\alpha \rightarrow A$)-свойства. Представим себе, что существование однородной и изотропной Метагалактики проявляется в изотропии вероятностей и в разбросе элементарных регенераций-сдвигов. Припишем Метагалактике роль источника поля, создающего энтропию ρ -смещений, вызывающего симметрию вероятности этих смещений как некоторую *измеримую* характеристику частицы. Когда речь шла о симметрии элементарных сдвигов, противостоящей диссимметризирующе-

му эффекту локального поля, уже тогда напрашивалась мысль о поле, которое противостоит диссимметризации и вызывает пространственный разброс ρ -смещений.

Если это поле не отличается от гравитационного по характеру действия на частицу, значит, его источником является некоторая однородная среда, которая действует независимо от положения частицы и сообщает ей «импульс», имеющий одну и ту же вероятность во всех направлениях. Слово «импульс» поставлено в кавычки, потому что с этим словом связано *макроскопическое* смещение в определенном направлении.

Такой средой с указанной условной точки зрения является Метагалактика. Космологический принцип как раз и выражается («выражается» в смысле принципиальной возможности наблюдения локального эффекта) в том, что в любом направлении пробной частице противостоит одна и та же толща вещества, и эта толща одна и та же, где бы ни находилась частица.

Таким образом, допустимой кажется мысль о метагалактическом поле как поле, ответственном за симметрию, разброс, ультрамикроскопическую траекторию M , энтропию, массу, и о локальных полях, ориентирующих частицу в определенном направлении и создающих макроскопическую траекторию L .

* * *

В заключение остановимся вкратце, но несколько систематичнее, чем раньше, на значении понятия *себеждественности* для затронутых в этом очерке проблем.

Реальное существование частицы — ее отличие от мировых точек — означает, что частица тождественна самой себе. Тривиальная тождественность частицы самой себе — ее себетождественность в данное мгновение и в данной пространственной точке — не имеет физического смысла, не отличает частицу от мировой точки: без учета направления и формы мировой линии частицы нельзя говорить о каких-либо ее предикатах, помимо пространственно-временных координат. Реальное существование себетождественной частицы определяется дополнительно ее локализацией и определением мировой линии. Поэтому тривиальная себетождественность частицы лишена физического смысла без *нетривиальной* себетождественности, т. е. тождественности ее самой себе при изменении пространственно-временных координат, иначе говоря при движении. Если движущаяся частица тождественна себе (а только в этом случае понятие движения имеет смысл), то мировая линия, очевидно, гарантирует, что, обнаружив частицу в одной точке на ее траектории, а затем в другой, мы не встретили иную, не тождественную данной частицу. Исключение иной частицы обеспечивается условием: частицы тождественны, если они находятся в мировых точках, лежащих на определенной, единственной мировой линии, соответствующей определенной скорости. Себетождественность частицы гарантируется определенным значением скорости. Поскольку существование и себетождественность частицы не зависят от выбора системы координат, указанная фундаментальная скорость — скорость

себетожественной частицы — инвариантна при переходе от одной системы координат к другой.

Это требование сильнее, чем требование теории относительности (скорость себетожественной частицы должна быть равна *или меньше* фундаментальной инвариантной скорости). Оно является не релятивистским, а ультрарелятивистским. Мы перейдем от него к релятивистскому требованию $v < c$ и к наблюдаемым различным и зависящим от системы отсчета скоростям v , если предположим, что движение со скоростью v — макроскопическая аппроксимация движений с фундаментальной инвариантной скоростью, направленных в различные стороны. Таким образом, возникает представление об ультрамикроскопическом пространственном разбросе и ультрамикроскопической, ультрарелятивистской траектории M , отличающейся от релятивистской траектории L . Соответственно релятивистское требование $v \leq c$ оказывается связанным с исходной ультрарелятивистской картиной постоянных по скорости элементарных смещений.

Вторая задача — связать с этой картиной инвариантность макроскопической скорости распространения поля. Если представить силовое поле как пространственную диссимметрию *вероятностей* элементарных сдвигов, то зависимой от системы отсчета оказывается *реализация* диссимметрии. Сама диссимметрия, сохраняющаяся независимо от реализации на всех элементарных отрезках, распространяется без пространственного разброса. Поэтому макроскопическая траектория и макроскопическая скорость распространения диссимметрии со-

впадают с ультрамикроскопической траекторией и ультрамикроскопической скоростью. Величина указанной скорости определяется тем, что диссимметрия — это соотношение вероятностей сдвигов, обладающих постоянной и инвариантной скоростью, гарантирующей себестоимость движущейся частицы.

Отсутствие пространственного разброса при распространении поля вытекает из его вероятностной природы: если движение частицы в определенном направлении вероятно, то сама вероятность достоверна. Такое соотношение выражается формулой $(x = W) = R$. Она представляет собой другую сторону формулы $(x = R) = W$, выражающей негативный смысл принципа дополнительности, — квантовомеханическое ограничение однозначной достоверности динамической переменной. Позитивный смысл принципа дополнительности состоит в переходе от динамической переменной к ее вероятности и в однозначном определении последней (определении, гарантирующем себестоимость частицы с неопределенными в общем случае динамическими переменными). Отсюда и вытекает определенное, без пространственного разброса направление распространения диссимметрии, которую мы рассматриваем как вероятность совпадения направления движения частицы с положительным направлением поля, превышающую вероятность его совпадения с отрицательным направлением поля.

Мы рассматриваем теперь релятивистские, а не ультрарелятивистские соотношения, не тождественную, неизменную скорость на траектории M , а различную, вообще говоря, скорость

v на траектории L . Чтобы гарантировать при этом себестоимость частицы, мы учитываем ее неизменный предикат — коэффициент, связывающий диссимметрию вероятностей сдвигов с мерой фактической реализации этой диссимметрии, с приближением M к L , т. е. с ускорением. Этот неизменный коэффициент — масса покоя частицы — зависит от исходной *интенсивности* симметрии вероятностей сдвигов частицы. Указанная интенсивность, быть может, связана с метagalактическим полем, оказывающим в силу однородности, изотропности и конечности Метагалактики одно и то же конечное воздействие на частицу во всех направлениях и придающим симметрии случайных блужданий определенную для каждого типа частиц интенсивность, которая должна быть преодолена диссимметризирующим локальным полем.

Именной указатель

- Ариосто Л. 88, 114—116
135, 137
Аристотель 111, 152, 153,
154, 165, 169, 181—189,
200, 210, 228, 236, 237,
241—243, 250
Архимед 145, 218
Александр Афродисийский
106
- Бахтин М. М. 122
Бернайс П. 261
Берни Ф. 116
Бернштейн С. Н. 138
Биркгоф Г. 156
Больцман Л. 95
Бор Н. 157, 159, 263, 264,
266, 267, 268, 273, 275,
277, 279, 280, 283—287,
289, 290, 293, 294, 296,
301, 304, 307—309, 313, 325,
339, 377
Борн М. 76, 77, 157
Боярдо М. 115, 116
Бруно Дж. 189
- Вагнер Р. 331
Вейль Г. 239, 288, 291
- Вейцекер К.-Ф. 156
Габиخت К. 49
Галлер А. 117
Галилей Г. 12, 13, 21, 41,
42, 49, 88, 101, 102, 111,
112—114, 116—119, 135,
153—155, 169, 189, 218,
224, 234, 298
Гаусс К.-Ф. 119, 213
Гегель Г.-В. 194, 196, 197,
199, 201, 202
Гейзенберг В. 83, 157, 159,
247, 263, 275, 282, 294,
308
Гельмгольд Г. 57
Геродот 92, 109
Герц Г. 32, 35, 209, 284
Гете В. 117
Гиббс Дж. 95
Гильберт Д. 59, 260, 261
- Декарт Р. 112, 132, 189,
190, 260, 261, 327
Демокрит 90, 91, 171, 172,
174, 175, 181, 183, 309
Детуш А. 156
Дайсон Ф. 256, 295, 296
Дирак П. 376
Допплер Хр. 37

- Достоевский Ф. М. 88, 119, 121—132, 134, 135, 137
 Зелиг К. 18, 42, 43, 49, 82, 134
 Зенон 176, 188, 195, 196, 201, 250, 260, 261
 Зоммерфельд А. 251, 343

 Иордан П. 376

 Кант И. 23, 24, 57, 194—197
 Клейн Ф. 222, 226, 258, 320, 336
 Кантор Г. 201, 202
 Карл Великий 114, 115
 Карнап Р. 26
 Кеплер И. 20, 153
 Коперник Н. 14
 Козн Б. 26
 Кристоффель Э.-Б. 236
 Кузнецов Б. Г. 156, 211

 Ландуа Л. Д. 74, 159
 Лангранж Ж.-Л. 155, 298, 299
 Лаплас П.-С. 138, 298, 299
 Лэмб В. 335
 Лейбниц Г.-В. 279, 328
 Лессинг Г.-Э. 107, 108
 Лифшиц Е. М. 74
 Лобачевский Н. И. 63, 212, 213, 240
 Лоренц Г.-А. 38, 42, 47, 51, 60, 61, 66, 69, 128, 274
 Лукреций 88—90, 92, 94, 96—103, 105—109, 135, 174, 175

 Маркс К. 90
 Майкельсон А. 9, 29, 33, 38, 39, 128, 192, 269, 274
 Максвелл Д.-К. 18, 30, 35, 38, 42, 49, 51, 53, 61, 81, 95, 204, 206
 Мах Э. 24—26, 33—35, 84, 85
 Мейерсон Э. 25
 Менекий 91
 Минковский Г. 40, 44, 45, 47, 48, 231
 Моцарт В.-А. 116, 278
 Мошковский А. 16
 Мюзам Г. 82

 Негели К.-В. 198
 Нейман И. 156
 Нейрат К. 26
 Нернст В. 8, 9, 308
 Неттер Э. 48, 225, 226
 Ньютон И. 30, 33—36, 41, 70, 111, 154, 155, 169, 188, 189, 192, 193, 207, 218, 220, 224, 229, 234, 259, 298, 299

 Ольшки Л. 112, 113

 Пайерлс Р. 159
 Пилат 284
 Пифагор 223
 Планк М. 31, 245, 249
 По Э. 125
 Птоломей 111
 Пуанкаре А. 39, 40, 42, 57

 Рассел Б. 23
 Риман Б. 64, 151, 181, 213—216, 218, 220, 221, 224, 227, 240, 242, 342
 Резерфорд Э. 307
 Рейхенбах Г. 156
 Ризерфорд Р. 335
 Розенфельд Л. 159, 330
 Руццанте 113

- Сильвестр Дж. 222
Снайдер 141
Соловин М. 18, 43, 44, 75,
83, 331
Спартак 96
Спиноза Б. 11, 12, 14, 16,
21, 132
Сулла 96
- Тамм И. Е. 79, 86, 87
Тассо Т. 113
- Френкель Я. И. 114
Фарадей М. 35, 204
Феврие П. 156
- Фейнман Р.-Ф. 254, 255,
293
Фойгт В. 37, 38
Франк Ф. 26, 73
- Шиллер Ф. 9
Шлик М. 26
- Эддингтон А. 211, 376
Эпикур 88, 99, 101, 102,
105—109, 135, 173—175,
186
Энгельс Ф. 194, 198
Эренбург И. Г. 131
- Юм Д. 22, 23

Содержание

Мировоззрение Эйнштейна и теория относительности	5
Заметки об Эпикуре и Лукреции, Галилее и Ариосто, Эйнштейне и Достоевском	88
Эйнштейновский критерий «внутреннего совершенства» физической теории и концепция дискретного пространства времени	138
Бесконечность и относительность	165
Эйнштейн и Бор	263
Относительность и дополнительность	305
Именной указатель	380

Борис Григорьевич Кузнецов

ЭТЮДЫ ОБ ЭЙНШТЕЙНЕ

*Утверждено к печати
Редколлегией серии
«Библиотека
по теории относительности»*

Редактор издательства *С. И. Ларин*
Художник *Л. Г. Ларский*
Технический редактор *А. П. Ефимова*

Сдано в набор 5/III 1965 г.
Подписано к печати 14/VI 1965 г.
Формат 70×90¹/₃₂. Печ. л. 12(24) Усл. л. 14,04
Уч.-изд. л. 13,4. Тираж 40000. Т—08059.
Изд. № 3198/65. Тип. зак. № 2143.
Темплан 1965 г. № 150

Цена 1 р. 14 к.

Издательство «Наука»
Москва, К-62. Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука»
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

1878



THE UNIVERSITY OF CHICAGO