

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
И ТЕХНИКИ

Б. Г. Кузнецов

ПРИНЦИП
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
В АНТИЧНОЙ,
КЛАССИЧЕСКОЙ
И КВАНТОВОЙ
ФИЗИКЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва · 1959

ГОС НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА ССОР

6176 $\frac{14}{59}$

51

1184

Ответственный редактор

А. Т. ГРИГОРЬЯН

1. ИЗОТРОПИЯ МИРА И ПОНЯТИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО И АБСОЛЮТНОГО ДВИЖЕНИЯ В АНТИЧНОЙ ДИНАМИКЕ

1. Понятия движения и места в древнегреческой динамике. 2. Прямолинейные естественные движения и естественные места в динамике и космологии Аристотеля. 3. Круговые движения в изотропном мире и их относительность. 4. Немеханическое определение времени.

Уже пятьдесят с лишним лет существует теория относительности Эйнштейна, но к ней и сейчас трудно подойти как к объекту исторического анализа и исторической оценки. По-видимому, для этого необходима если не физическая теория, то хотя бы представление о принципиальной возможности физической теории, для которой принцип относительности, открытый Эйнштейном в 1905 г. и обобщенный им в 1916 г., является частным, ограниченным, приблизительным. Сейчас подобное представление, еще не ставшее строгой физической теорией, уже может играть роль отправного пункта исторической оценки.

Новая, более общая концепция указала бы, по-видимому, границы не только специальной и общей теории Эйнштейна, но и принципа относительности в целом, начиная с классического

принципа Галилея — Ньютона и его истоков. Она создала бы некоторую отправную позицию для исторической оценки механической картины мира в самом общем смысле, включающем античные представления о движении себестождественного объекта, классические, релятивистские и — с известными ограничениями — квантово-механические идеи. Эта отправная позиция позволяет не только проследить историю различных концепций относительности, но и найти исторический угол зрения на принцип относительности в целом.

Мы снова употребили термин «принцип относительности в целом». Имеет ли он реальный исторический смысл, можно ли взять в одни скобки различные релятивистские теории, сменявшие, конкретизировавшие и уточнявшие одна другую на протяжении всей истории науки и сейчас применимые в различных областях в качестве законных аппроксимаций?

Сейчас в науке применяется классический принцип относительности Галилея — Ньютона в случае медленных движений, специальный принцип относительности Эйнштейна в случае быстрых движений в пренебрежимо малых гравитационных полях и общий принцип относительности при учете последних. Во всех случаях относительность движения означает необходимость тела отсчета для констатации перемещения материального тождественного себе тела. Эта необходимость вытекает из однородности пространства вдоль линии переноса.

Различие между релятивистскими концепциями — это различие между пространствами, ко-

торые предполагаются однородными: трехмерное евклидово пространство рассматривается как однородное в классической концепции относительного движения; четырехмерное псевдоевклидово пространство однородно в специальной теории относительности; четырехмерное риманово пространство однородно в общей теории относительности. Наконец, в некоторых попытках обобщения релятивистской квантовой теории фигурирует макроскопическая однородность четырехмерного пространства.

Речь идет о формальном определении относительности. Сам по себе никакой принцип относительности не дает еще физической теории, требуются дополнительные собственно физические допущения. Классический принцип становится физической теорией на основе закона инерции, специальный принцип — на основе закона постоянства скорости света, общий принцип — на основе эквивалентности тяготения и ускорения, идея макроскопической относительности становится если не физической теорией — до этого еще далеко, — то по крайней мере физической гипотезой на основе определенных представлений об элементарных трансмутациях.

После краткой характеристики современных релятивистских концепций мы можем с большим или меньшим успехом искать их исторические прообразы. Эти поиски могут вестись на различных путях. Историческим исходным пунктом релятивистских концепций нового времени было понятие инерции. До Галилея существовали зачаточные формы этого понятия.

Констатация таких зачаточных представлений об инерции продемонстрирует некоторые исторические истоки классического принципа относительности (а значит и его обобщения в теории Эйнштейна), причем такая констатация не зависит от последующего обобщения классического принципа и от современных представлений. Но можно пойти иным путем — сопоставить новейшие, наиболее развитые релятивистские концепции непосредственно с античной динамикой, с ее основными понятиями и тенденциями.

На этом пути нельзя обнаружить какую-либо близость между содержанием сопоставляемых концепций. Но здесь отчетливо видна логическая и историческая связь между вопросами античной динамики и ответами, которых пришлось ожидать два с половиной тысячелетия.

Поэтому сопоставление новейших релятивистских концепций с античной динамикой возможно только при преимущественном интересе к вопросам, т. е. к поискам и подходам античных мыслителей. Эту сторону античной науки оценил Ленин в своих заметках о «Метафизике» Аристотеля¹. Ленин считал не получившие ответа вопросы, поиски, подходы, наивные догадки и сомнения Аристотеля наиболее интересным содержанием «Метафизики». Последовательно применяя подобный критерий к понятиям аристотелевой динамики, мы можем оценить ее с точки зрения современных попыток обобщения релятивистской квантовой теории.

¹ См. В. И. Ленин. Соч., т. 38, стр. 365—372.

Вопросы и поиски, придающие столь живой, неустоявшийся и подчас противоречивый характер античной науке, связаны с ее позитивными идеями. Среди них в учении о микрокосмосе первое место принадлежит античной атомистике, появившейся в древней Греции уже в V в. до н. э. Для учения о макрокосмосе первостепенное значение приобрела высказанная позже идея сферической Земли. Она развивалась в рамках геоцентрической картины мира, но сама по себе, независимо от геоцентризма, была наиболее крупным вкладом античности в современное представление о мироздании. Помимо колоссального, непосредственного толчка, который получили все области знания, в особенности астрономия и география, картина сферической Земли была первым крупным результатом критической мысли, отвернувшейся от традиционных, освященных религией, космологических и космогонических легенд. Трудно переоценить значение этого результата для духовного развития человечества.

Античная наука вместе с тем посягнула на ту «очевидность», в которой находят себе поддержку традиционные воззрения. Представить себе не падающих с Земли антиподов было нелегко; для этого понадобилась такая смелость мысли, которая находит мало аналогий в последующем развитии науки. Переворот в мировоззрении, релятивировавший «верх» и «низ», лишивший пространство выделенного направления, создавший представление об изотропном пространстве, был прообразом всех последующих научных революций.

Но изотропное пространство не было однородным. Эквивалентность направлений сочеталась с неэквивалентностью точек пространства — в одну из этих точек был помещен естественный центр мироздания. Сразу же оговоримся, что в античной науке не было и не могло быть выраженных *explicite* понятий изотропного и неизотропного, однородного и неоднородного пространства. Под этими терминами подразумеваются современные эквиваленты античных идей. Сказанное выше означает лишь, что понятие изотропного пространства имеет античный прообраз в виде сферической Земли как центра Вселенной, а понятие однородного пространства, вообще говоря, не имеет геоцентрического прообраза. Вскоре нам придется несколько уточнить это утверждение, указав на некоторый ограниченный и условный античный прообраз однородного пространства.

Античная динамика носила на себе печать характерной для греческой науки широкой трактовки понятия движения. Подобную трактовку можно увидеть в аристотелевой динамике. Ее основные понятия охватывают все процессы изменения. Это широкое представление о движении, выходящее за рамки механического представления, всегда было и будет исходным пунктом каждой немеханической теории или интерпретации и обобщения такой теории. Древнегреческая мысль в своем детски наивном первом взгляде на мир и в первой гениальной догадке о его единстве, еще не зная о четких (впоследствии застывших и одеревеневших) перегородках между различными областями

явлений, распространяла понятие движения на все процессы изменения в природе. Отсюда == аристотелевские понятия пространственного движения (φωρά), субстанциального движения, т. е. возникновения (γένησις) и уничтожения (φθωρά) субстанции (οὐσία), количественного движения, т. е. роста (αὔξησις) и качественно-го движения (ἀλλοίωσις).

Указанные понятия связаны с логикой Аристотеля. Последняя была логической основой классической физики в такой же мере, в какой геометрия Эвклида была ее геометрической основой. Но для неклассической физики интересны не только введенные Аристотелем позитивные логические соотношения, но и логические поиски и затруднения, о которых писал Ленин¹ и которые в известной мере аналогичны поискам и затруднениям комментаторов Эвклида, навеянным постулатом о параллельных.

Позитивное содержание логики Аристотеля базируется на законах тождества, противоречия и исключенного третьего. Логике Аристотеля соответствует определенная онтологическая идея: лишь единичное является субстанцией (οὐσία). Это единичное либо существует, либо не существует, третьего не дано и поэтому мир единичных субстанций дискретен. Но субстанциальный субъект обладает непрерывно сменяющимися предикатами. Изменение этих предикатов не нарушает себестождественности субъекта, οὐσία не исчезает при их смене.

¹ См. В. И. Ленин. Соч., т. 38, стр. 366.

Такую смену Аристотель рассматривает как движение себестождественного объекта. Движение может быть ростом или уменьшением (объекта, т. е. количественным изменением $\alpha\upsilon\chi\eta\sigma\iota\varsigma$), качественным превращением ($\acute{\alpha}\lambda\lambda\omicron\iota\omega\sigma\iota\varsigma$), пространственным или местным движением ($\phi\omicron\rho\acute{\alpha}$). Эти три рода изменения предикатов объединяются понятием движения ($\kappa\acute{\iota}\nu\eta\sigma\iota\varsigma$). Они характеризуются непрерывным характером. Логические и физические идеи Аристотеля, в том числе идея нетривиальной (т. е. сохраняющейся при непрерывной смене предикатов) себестождественности объекта, основаны на противопоставлении указанных акцидентальных изменений субстанциальному изменению. Понятие $\phi\omicron\rho\acute{\alpha}$ имеет смысл, если гарантируется непрерывное существование перемещающейся субстанции $\omicron\upsilon\sigma\iota\alpha$. То же можно сказать о других видах движения: они предполагают непрерывное существование растущего, уменьшающегося или качественно изменяющегося объекта. Изменение субстанции, т. е. уничтожение или возникновение объекта, входит в понятие изменения ($\mu\epsilon\tau\alpha\beta\omicron\lambda\acute{\eta}$), но не входит в понятие движения ($\kappa\acute{\iota}\nu\eta\sigma\iota\varsigma$).

Но тут и вступает в игру примитивная подвижность понятий и неуверенность логических построений, то, что Ленин называл «наивной разноголосицей»¹. Аристотель колеблется, он то включает, то не включает субстанциальное изменение ($\gamma\acute{\epsilon}\nu\eta\sigma\iota\varsigma$ и $\phi\theta\omicron\rho\acute{\alpha}$) в понятие дви-

¹ См. В. И. Ленин. Соч., т. 38, стр. 366.

жения. Эти колебания означают неуверенность в принципиально непрерывном характере движения — ведь субстанциальное изменение дискретно. Они означают далее колебания между абсолютной и относительной концепцией движения — ведь движение, которое состоит из дискретных актов, тем самым обладает внутренней, абсолютной мерой.

Наиболее важный в теоретическом отношении результат, к которому приходит и отчасти пришла современная физика (квантовая теория поля), состоит в некотором предварительном ответе на вопрос, поставленный две с половиной тысячи лет назад: в каком отношении стоят к друг другу исчезновение и возникновение единичных объектов, с одной стороны, и движение себестождественных исчезающих объектов — с другой. Именно поэтому так актуальны сейчас колебания Аристотеля в вопросе о соотношении между местным движением и субстанциальными анигиляциями (φθορά) и порождениями (γένησις).

Эти колебания связаны с основными противоречиями физики Аристотеля. Наряду с миром дискретных единичных субстанций — себестождественных субъектов движения, Аристотель говорил о некотором общем субстрате этих единичных субстанций. Именно эти противоречия общего и отдельного были основными противоречиями логики и физики Аристотеля. Общий субстрат дискретных субстанций — материя (ὕλη), по-видимому, неуничтожаем. С такой точки зрения φθορά представляет собой скачкообразный переход к иной οὐσία, т. е., говоря современным физическим языком, — трансмута-

цию. Каждый процесс роста и качественного превращения приводит в конце концов к подобной трансмутации. Поэтому процессы изменения в природе конечны. Это можно сказать и о местном движении, если оно связано с какими-то качественными изменениями в поведении движущегося тела (позволяющими определить его движение абсолютным образом), например о движении тела к его естественному месту. Такое движение заканчивается, и тело в своем естественном месте качественно отличается от тела, находившегося в ином месте. Единственное движение, вовсе не затрагивающее качественных свойств объекта,— это бесконечное движение по кругу. Мы вскоре вернемся к этому понятию динамики Аристотеля — исходному понятию релятивистской концепции движения. Сейчас перейдем к понятию места в динамике Аристотеля.

В четвертой книге «Физики» дано определение места как поверхности тел, окружающих данный предмет. Однако это лишь первоначальное определение; вскоре Аристотель должен перейти к иному определению. Местное движение (*φορά*) означает, что в различные моменты времени телу принадлежат различные места. Если тело погружено в текущую воду, то соприкосновение тела со все новыми и новыми частями потока будет означать движение тела. Таким образом корабль, стоящий на якоре в реке, движется. Аристотель понимает не только условность, но и практическую неприменимость подобной концепции и ищет иного определения места и иного тела отсчета для констатации

движения корабля. Местом оказывается вскоре уже не вода, соприкасающаяся с кораблем, а река в целом. Аристотель говорит о различии места и сосуда. Место отличается от сосуда своей неподвижностью. По словам Симпликия, Теофраст и Эвдем включали в число исходных определений места его неподвижность. Симпликий, присоединяясь к этому мнению, говорит: «Местом корабля придется назвать всю реку, так как река в целом неподвижна»¹. Александр Афродисийский и Симпликий понимают в данном случае под рекой ее берега и русло. Таким образом античная динамика приходит к последовательным поискам неподвижного тела отсчета и под местом отныне подразумевается пространство, определяемое посредством некоторого неподвижного предела последовательного ряда тел отсчета.

Неопределенность, подвижность и пластичность понятий аристотелевой динамики, утраченные средневековыми комментаторами Аристотеля и придающие своеобразную прелесть построениям греческого мыслителя, выражаются, в частности, в переходах от одного понятия места (окружающая среда) ко второму понятию (место, определенное неподвижным телом отсчета). Нетрудно видеть, что второе понятие имеет метрический смысл, оно связано с понятием расстояния между данным телом и другим, изменяющегося при движении одного из них и неизменного при движении обоих тел.

¹ Simplicius, In Aristotelis Physicorum libris quatuor priores commentaria, l. IV, c. 4, ed. Diels, Berolini, 1882, p. 583.

Переход от первого определения места (поверхность смежных тел) ко второму определению (с помощью неподвижного тела отсчета) был исходным пунктом развития не только понятий относительного места и движения, но и сопряженных с ним понятий абсолютного места, абсолютного пространства и абсолютного движения. Место как поверхность смежных тел — вне антитезы абсолютного и относительного. Относительное место — это объект, который может быть параметризован тем или другим способом в зависимости от выбора начала отсчета (отсчет здесь не предполагает определенной метрики, неметрические понятия «ближе» и «дальше» требуют определенной точки отсчета). Абсолютное место параметризуется единственным образом; это возможно, если части пространства, отличаясь друг от друга, создают естественную основу однозначной параметризации, не зависящей от выбора начала отсчета.

У Аристотеля понятия места, определенного относительно неподвижного тела отсчета, и места, определенного абсолютным образом в неоднородном пространстве, могли оставаться догадками, уживающимися с понятием места как поверхности смежных тел. В эллинистической динамике, где метрические понятия приобрели по сравнению с древнегреческой наукой возросшее значение, понятия места, отнесенного к телу отсчета, и места, отнесенного к неоднородному пространству, получили сравнительно отчетливую форму. В связи с постепенным выделением понятия пространства, независимого от вещества, в эллинистической науке развива-

лись понятия неоднородного пространства, натянутого на систему естественных мест, и пространства однородного, не оказывающего воздействия на тела, движущиеся за пределами лунной сферы. Таким образом создавались идейные предпосылки учения об относительном и абсолютном движении.

2

Местные движения, имеющие начало и конец, это, во-первых, естественные прямолинейные движения, направленные к естественным местам тел, и, во-вторых, вынужденные движения, происходящие под действием некоторой внешней причины. Явная причина движения тел — воздействие других тел. Рассматривая эту причину вынужденных движений, античная механика приблизилась к позднему понятию взаимодействия. Взаимодействие тел будет причиной движения одного из них, если рассматривать второе как неподвижное. Аристотель пишет о необходимости приписать неподвижность такому телу в своем трактате «О движении животных»: «...Недостаточно, чтобы животное находило в себе самом неподвижную часть, надо, чтобы и вне себя оно находило нечто остающееся неподвижным. Здесь мы встречаемся с положением, заслуживающим внимания ученых. Это положение применимо не только к движению животных, но и к движению всякого рода тел и к толчкам, приводящим их в движение. Повсюду, где тело приводится в движение, необходимо существование чего-то неподвижного».

Аристотель отчетливо ограничивает область явлений, при анализе которых нужно пользоваться понятием неподвижной опоры. Такая опора необходима «...повсюду, где тело приводится в движение». Иначе говоря, она необходима для всех вынужденных движений.

Но движение тела, гарантированное взаимодействием с другим неподвижным телом, отнесено к этому последнему. Отсюда еще очень далеко до отнесения движения к самому пространству, т. е. до представления об абсолютной неподвижности, абсолютном движении и абсолютном месте. К такому представлению античная динамика приблизилась, рассматривая движения, причина которых была скрытой и оставляла место догадкам о зависимости движения от самого пространства. Речь идет о прямолинейных естественных движениях, направленных к естественным местам тел.

В динамике и космологии Аристотеля прямолинейные движения к естественным местам происходят в подлунном мире. Тела, состоящие из тяжелых стихий, движутся к Земле; тела, состоящие из легких стихий, — к лунной сфере.

В исторической ретроспекции учение Аристотеля о естественных прямолинейных движениях, направленных к Земле и к лунной сфере, может показаться первой неопределенной догадкой о зависимости траекторий движущихся тел от свойств пространства как такового. Вдоль траекторий тел, падающих на Землю, т. е. стремящихся к своим естественным местам, пространство динамически неоднородно, оно по-разному определяет поведение тел, находящихся в раз-

личных пунктах этого пространства. Таким образом движение тел приобретает некоторый абсолютный критерий, переход тела из одного пункта в другой означает не только изменение расстояния между данным телом и телом отсчета, но и изменение поведения тела, зависящего от самого пространства.

Но такая интерпретация прямолинейных естественных движений в динамике Аристотеля наталкивается на затруднения. Затруднения состоят не только в отсутствии у Аристотеля понятия абсолютного пространства, но и в отсутствии у него понятия пространства как такового. Тяжелые тела движутся к своему естественному месту — центру Вселенной. Но что собой представляет естественное место: определенную часть пространства или центральное тело — Землю?

Прямой ответ на этот вопрос, содержащийся в динамике и космологии Аристотеля, гласит, что центром мира служит не точка пространства, а протяженное материальное тело. Отсюда и вытекает учение о неподвижной Земле. Комментаторы Аристотеля — Александр Афродисийский, Фемистий, Дамаский и Симпликий — единодушно поддерживают Аристотеля, и эти стороны его космологии и динамики не вызывают у них сомнений и каких-либо дополнительных вопросов¹. Центр мира — естественное место тяжелых тел — это Земля. Естественное место легких тел — сфера Луны. Правда,

¹ Simplicius, Commentarius in quatuor libris Aristotelis de Coelo, I, II, s. 3, ed. Karsten, Trajecti ad Rhenum, 1865, p. 178.

эта сфера обращается вокруг Земли, но Аристотель рассматривает ее как неподвижную, так как лунная сфера вращается, совпадая сама с собой, движутся лишь части сферы, а сфера не меняет места.

Но если естественные места тел определяют через материальные тела, то проблема абсолютного критерия движения снова повисает в воздухе (почти в буквальном смысле). Естественное движение можно было бы считать абсолютным движением, если бы различное поведение тела в различных пунктах пространства делало бы излишним отнесение движения к другим телам. В эту сторону и направлялось развитие античной динамики.

С самого своего возникновения понятие абсолютного движения было связано с понятием естественного перехода тела из области пространства, в которой оно не может без принуждения оставаться неподвижным, в область, где тело достигает покоя, так как здесь его положение отвечает оптимальному распределению материи во Вселенной. Именно это понятие оптимального распределения материи лежало в основе построений комментаторов Аристотеля, стремившихся решить проблему места и местного движения конечной Вселенной в целом. В их попытках все явственнее проступала мысль о пространстве, отличающемся от материи, пространстве как таковом, причем динамически неоднородном, по-разному определяющем поведение тел. Понятие оптимального места предполагает такое разграничение тела и его пространственного положения. Комментаторы

Аристотеля относили естественные движения к некоторому оптимальному распределению тел в природе. Но само понятие оптимального распределения тел исходило из мысли о неравноценности различных частей пространства, из представления о неоднородности пространства, доходящего до приписывания пространству собственно физических свойств. Это не только логическая связь, но и историческая. Последовательная разработка динамики Аристотеля в трудах его комментаторов приводила к развитию идеи неоднородности пространства и к высказыванию этой идеи во все более явной форме.

В VI в. н. э. Дамаский (его учеником был Симпликий, изложивший содержание утраченного сейчас трактата Дамаския) говорил, что каждое тело обладает неотделимым от него атрибутом, который Дамаский называет положением ($\theta\acute{\epsilon}\sigma\iota\varsigma$). Указанное понятие может иметь двойкий смысл. Прежде всего под положением тела можно подразумевать расположение его частей. Во втором смысле оно означает положение тела в целом во Вселенной. Среди различных расположений частей тела одно является наиболее совершенным. Соответственно среди различных положений тела во Вселенной одно также является совершенным и его следует рассматривать как естественное положение тела. Кроме положения, тело обладает местом — чисто метрическим предикатом. Симпликий излагает эту мысль Дамаския следующим образом: «По-видимому, место служит мерой ($\mu\acute{\epsilon}\tau\rho\upsilon$) положения тела, также как время является

числом, измеряющим движение тела»¹. Если перевести понятие Дамаския на современный язык, то место соответствует координатам, хотя современная физика ассоциирует их как раз не с местом, а с положением тела. У Дамаския положение является качественным атрибутом тела. Как мы увидим, оно связано с понятиями естественного места и естественного движения.

Дамаский определяет место через положение, а положение относит к оптимальной конфигурации мира, чтобы получить возможность применить понятие местного движения ко Вселенной в целом. Вселенная Аристотеля конечна и ограничена сферой неподвижных звезд. За ней нет ни материальных тел, ни пустоты, так как под пустотой Аристотель понимает пространство, в котором может оказаться материальное тело. Следовательно, за пределами сферы неподвижных звезд понятие места как внутренней поверхности объемлющей среды теряет смысл. По словам Аристотеля, «Вселенная не находится где-то». Комментаторы Аристотеля могли сделать из этого вывод (некоторые из них делали его), что к Вселенной в целом неприменимо понятие местного движения. Дамаский хотел выйти из затруднения, связав место Вселенной в целом с естественным расположением ее частей. Когда каждая из составляющих Вселенную частей находится в своем естественном положении, Вселенная приобретает естественное расположение. Определение места, данное Да-

¹ *Simplicius, In Phys. 1. IV, corollarium de loco, p. 627. Diels.*

маскием, позволяет приписать Вселенной в целом естественное место, соответствующее оптимальному расположению ее частей. Естественное место тела неизменно, а наблюдаемые случайные места тел могут непрерывно изменяться. Когда изменяется положение, соответственно изменяется мера этого положения — место. Отсюда следует, что при этом тело испытывает местное движение. Все это может быть распространено на Вселенную в целом. Вселенная обладает единственным естественным расположением и многочисленными случайными расположениями. Переход от одного расположения к другому является в этом смысле местным движением, совокупностью местных движений тел, составляющих Вселенную.

По мнению Симпликия, положение тела может изменяться без того, чтобы другое тело находилось в покое. Таким образом, местное движение не предполагает неподвижности других тел. Однако без такой неподвижности невозможна метрическая определенность местного движения: «Небо продолжало бы вращаться и тогда, когда не существовало бы ни востока, ни запада, ни юга, но тогда мы не имели бы никакой возможности распознавать различные положения»¹.

В метрическом смысле, т. е. в смысле возможности определить количественным образом места тел, предпосылкой определенности движения отдельных тел служит неподвижность

¹ Simplicius, In Phys. I. IV, corollarium de loco, p. 634 Diels.

Вселенной. Но неподвижность Вселенной не имеет метрического смысла. Вселенная неподвижна, если материальные тела находятся на своих естественных местах и орбитах, и образуют оптимальную конфигурацию. Тогда пространственное положение тел не вынуждает их двигаться, покидать свои места и приводить Вселенную в целом в состояние местного движения. Такое динамически определенное положение Вселенной и служит отправным пунктом для констатации местного движения, связанного с отступлением от оптимальной, естественной конфигурации тел.

Вскоре мы увидим условность понятия «динамической определенности» места применительно к античной механике и космологии.

Существовали различные версии абсолютного пространства, натянутого на естественную конфигурацию Вселенной. В середине VII в. Филопон в комментариях к «Физике» Аристотеля был склонен считать силу, заставляющую тело двигаться к его естественному месту, не свойством пространства, а свойством тела. Он писал, что «...место не обладает силой, которая влечет тела к их естественным местам, и это сами тела стремятся сохранить подобающее им распределение»¹. Но появление этих сил само по себе указывает на неоднородность пространства, если только не связывать силы с взаимодействием тяжелых тел. Поэтому Филопон, не знавший, как и другие мыслители древности, о

¹ Joannes Philoponos, In Aristotelis Physicorum libros quinque posteriores commentaria, l. IV, cap. 1, ed. Vitelli, Berolini, 1888, p. 569.

подобном взаимодействии, был недалек от комментаторов, приписывавших динамическую функцию самому пространству.

Такую тенденцию мы встречаем у Сириана, который утверждает, будто «различные области пространства получают власть над телами», в результате чего одна область пространства становится естественным местом огня, а другая естественным местом земли¹.

Ученик Сириана Прокл называл пространство «телом, лишенным материи». В дальнейшем Прокл разъяснял, что он имеет в виду тело, состоящее из более тонкого вещества, чем другие. Наиболее тонкой субстанцией представляется свет. Свет и является местом тел, определяющим естественные движения тел. Прокл представляет себе сферу, состоящую из света, и другую сферу, состоящую из различных тел. Обе сферы занимают один и тот же объем. Первая сфера — сфера света — неподвижна. Вторая, совпадающая с ней по объему, вращается. Таким образом, свет оказывается телом отсчета для Вселенной, состоящей из материальных предметов. Концепция Сириана и Прокла представляет собой попытку примирить концепцию движущейся Вселенной с традиционным определением места при помощи неподвижных тел. Представление о свете как о некоторой среде, служащей абсолютным телом отсчета, может показаться сходным с позднейшими физическими концепциями вплоть до современных.

¹ Simplicius, In Phys., l. IV, corollarium de loco, p. 618 Diels.

Нужно иметь в виду, однако, что Прокл трактовал свет и систему естественных мест в неоплатоновском духе. Неоплатоновская концепция Сириана и Прокла (в некоторой мере и взгляды Дамаския, Симпликия и Филопона) включала тенденции, уводившие проблему в сторону от науки. С идеями Сириана и Прокла в последнем счете связаны не только физические концепции абсолютного пространства в науке XVII—XX вв., но и мистическая *anima mundi* Генри Мора.

Мы видим, что развитие идеи абсолютного пространства было связано со сближением местного движения (*φορά*) с другими известными античной науке формами движения. Тело переходит из одного места в другое. Такой переход состоял бы в смене соприкасающихся тел (первое определение места) либо в изменении расстояния от некоторого, рассматриваемого как неподвижное, тела отсчета, если бы при переходе не изменялось поведение тела, не появлялось или не исчезало некоторое свойство — побуждение к пребыванию в данном месте или побуждение к переходу в другое место.

Динамические эффекты позже, в механике Ньютона, также служили доказательством существования абсолютного движения и абсолютного пространства. Но у Ньютона динамические эффекты (центробежные силы) своим появлением свидетельствовали о кривизне траектории. У Аристотеля и его комментаторов динамические эффекты свидетельствовали об отходе тел от их естественных мест и естественных траекторий. Естественными траекториями считались

круговые траектории, на которых тело могло двигаться в изотропном пространстве, не покидая своего естественного места. Нарушением (либо восстановлением) гармоничного, оптимального миропорядка считали прямолинейные движения, вынужденные либо естественные.

Естественные прямолинейные движения, направленные к местам оптимальной локализации, были основой понятия абсолютного пространства. В эллинистических государствах, как и в древней Греции, исходным для динамики фактом было падение груза на поверхность Земли. Если не вводить понятия гравитационного взаимодействия Земли и находящихся на Земле тяжелых тел, то причиной падения можно считать динамическую неоднородность пространства. Изменение динамических свойств пространства вдоль радиальных, направленных к центру мира, траекторий дает абсолютный критерий для различения точек пространства вдоль этих траекторий.

3

В античной динамике и античной космологии в центре мира находится тело, на поверхности которого заканчиваются радиально сходящиеся траектории тяжелых тел. Изотропия мира выражается в сферической симметрии этих траекторий. Движение по окружности постоянного радиуса, описанной вокруг центра мира, ничего не меняет в конфигурации Вселенной в смысле отхода ее от оптимального, гармонического распределения материальных тел. Такое движение

не сопровождается поэтому появлением либо исчезновением каких-либо предикатов, не сводящихся к относительным расстояниям. Абсолютные различия существуют лишь на прямолинейных радиальных направлениях, где естественные места тел отличаются от других мест абсолютным образом. Из сферической симметрии мира следует, что каждое место на лунной орбите с одним и тем же правом может служить естественным местом легкого тела. Для тяжелых тел, находящихся на одном и том же расстоянии от Земли, нельзя найти какие-либо различия в поведении. Такое различие зависит от расстояния между телом и Землей.

Круговые движения, описываемые вокруг центра мира, не имеют ни естественного начала, ни естественного конца, они не дают никакого повода для сближения местного движения с качественными и субстанциальными изменениями. В физике Аристотеля это чисто относительное движение приписывается надлунному миру. В подлунном мире тела состоят из четырех элементов, меняют свой состав, меняют при движении динамические свойства, способны исчезать и возникать. Вообще — это мир качественных превращений и субстанциальных движений, и именно поэтому в подлунном мире пространственные движения тел, сопровождающиеся подобными изменениями, могут иметь абсолютные критерии. В надлунном мире тела состоят из эфира, последний лишен противоречивых свойств, не меняется и не обладает никакими внутренними, абсолютными изменяющимися предикатами. Тела надлунного мира движутся

таким образом, что мы не можем указать точек на траектории движущегося тела, где начинается либо заканчивается бытие или движение тела. Движение неизменных и вечных, полностью себетождественных тел относительно, оно состоит в изменении расстояния от произвольно выбранного на его траектории начала отсчета. Начало отсчета не может отличаться от других точек пространства. Если бы в динамике Аристотеля пространство противостояло материальной среде, мы могли бы сказать, что движение происходит в однородном пространстве. Такое «если бы» — вовсе не произвольная конструкция. Вопросы, поставленные динамикой Аристотеля, были исходным пунктом последующего разграничения геометрических и динамических закономерностей движения и понятий однородного, неоднородного, относительного и абсолютного пространства.

Круговые движения тел надлунного мира — это первоначальная концепция однородного пространства и, следовательно, первая собственно релятивистская концепция. В свою очередь и в том же условном смысле пространство, натянутое на естественные места тел, пространство, в котором тела подлунного мира совершают свои прямолинейные и ограниченные движения, — это первая концепция неоднородного, абсолютного пространства.

Конечно, такая характеристика имеет лишь ретроспективный смысл. В античной динамике, самой по себе, не было понятия неоднородности пространства. Но речь идет совсем о другом. Мы говорим о некоторых логических контро-

верзах, которые могли получить рациональное разрешение лишь в современной науке и в этом смысле являются истоками современных концепций. Констатация таких контроверз и их логической связи с современной наукой далека от какой-либо модернизации, потому что речь идет не о позитивных утверждениях, не об ответах античной динамики, а о ее вопросах, ее противоречиях, апориях и парадоксах. Когда Ленин в конспекте «Метафизики» сопоставлял логику Аристотеля с идеями XIX в., он не приписывал Аристотелю гегелевых понятий, а говорил, что логика Аристотеля «...есть запрос, искание, подход к логике Гегеля...»¹. Аналогичное отношение — между рядом поставленных Аристотелем физических проблем и их современными решениями.

В таком и только в таком смысле можно говорить о предвосхищении идеи однородного искривленного пространства в античной динамике. Тело движется в пространстве, не встречая абсолютных, естественных, привилегированных реперов, пока оно движется по кругу. Таким образом, однородное пространство — это искривленное пространство.

Впоследствии механика Ньютона произвела своеобразную инверсию: в ней однородное пространство — плоское, а криволинейное движение имеет абсолютный характер².

¹ В. И. Ленин. Соч., т. 38, стр. 366.

² Ср. А. Коурé. *Etudes galiléennes*, III. Galilée et la loi d'inertie, Paris, 1939, p. 154.

В древности существовали направления космологической мысли, враждебные господствующей геоцентрической концепции изотропного, но неоднородного мира. В новое время гелиоцентрические системы и картины однородной, лишенной центра Вселенной опирались на античные прообразы подобных воззрений. Существовали не только взгляды, предвосхитившие, в известной мере, мысль об однородности мира, принадлежащую XVII в. Существовали исторические истоки разграничения пространства и вещества, которое было предпосылкой любой концепции изотропного или неизотропного, однородного или неоднородного пространства.

Античная атомистика, создавшая картину пустого пространства, в котором движутся материальные, неделимые далее частицы, была исторической основой противопоставления геометрических свойств, присущих пространству, физическим свойствам, присущим веществу. Прежде всего, атомистика предполагала различие геометрической и физической делимости атомов. Но она не остановилась на таком различии как на окончательном тезисе. В историческом развитии атомистических воззрений древности коллизия физической неделимости вещества и геометрической делимости пространства получала самые различные решения. Среди них были попытки связать неделимость элементарных частей вещества с существованием неделимых частей пространства. Если атом нельзя не только физически раздробить на меньшие

части, но нельзя даже различить эти части геометрически, то обычная геометрия, допускающая бесконечное деление пространства, является макроскопической аппроксимацией дискретной геометрии (последнюю иногда называют неархимедовой, имея в виду аксиому измерения или аксиому Архимеда, вводящую в геометрию понятие непрерывности). Фигуры, накладываемые одна на другую, могут быть равны с точностью до неделимой ячейки пространства. Само понятие геометрической размерности также будет приближенным, точка нульмерна, прямая одномерна, плоскость двумерна с точностью до элементарной неделимой протяженности.

Нельзя думать, что у греков была неархимедова геометрия. У них не было ее, так же как не было неэвклидовой геометрии. Но величие Эвклида запечатлено не только в разработанной системе теорем, исходящих из пятого постулата, но и в той гениальной неуверенности, которая заставила его выделить пятый постулат из числа аксиом. У Эвклида непрерывность не была предметом сомнений, но в целом греческая наука допускала условность этого понятия.

Физики вспомнили о неэвклидовой геометрии при появлении теории относительности Эйнштейна. Сейчас пришла пора вспомнить не о дискретной геометрии древности — такой не было, но о диалектической гибкости первоначальных геометрических идей, допускавших сомнение в отношении непрерывности пространства.

Вопроса о дискретности времени мы здесь касаться не будем. Античная атомистика, быть

может, подходила к идее элементарных промежутков времени, в течение которых атом неподвижен, но не связывала движение атома с его уничтожением и порождением. Это другой, в целом более поздний круг идей. Он представляет существенный интерес с точки зрения современной трактовки дискретного четырехмерного пространства-времени и его относительности. Забегая вперед, отметим, что с этой точки зрения особенно интересна идея минимальной длительности с немеханическим мероопределением.

Переход частицы из одной клетки дискретного пространства в другую клетку может рассматриваться как механическое перемещение себестождественного объекта, т. е. местное движение (φορά). Но это местное движение может быть результатом регенерации частицы, т. е. субстанциальных движений уничтожения (φθορά) и возникновения (γενσις). Чтобы возникновение и уничтожение данной частицы приводило к перемещению частицы, нужно, чтобы за уничтожением (т. е. превращением данной частицы в иную) следовало возникновение ее (т. е. превращение иной частицы в данную) в соседней (в смысле элементарного расстояния) пространственно-временной клетке. Такой концепции у Аристотеля не было и не могло быть. Но у Аристотеля были некоторые предпосылки немеханического мероопределения времени. Для Аристотеля время не существует без изменения¹, хотя и не совпадает с изменением. Аристо-

¹ Аристотель. Физика. Пер. В. П. Карлова, кн. IV, гл. II. М., 1936, стр. 77.

Тель называет время числом и предупреждает, что в данном случае под числом следует понимать сосчитанную либо сосчитываемую величину. Время как сосчитываемая величина соответствует изменению тела или его движению. Настоящее время, «теперь» соответствует себе-тождественному субстрату движения (субъекту меняющихся предикатов), но, подобно этому субстрату, «теперь» все время изменяется, оно всегда находится все в новом и новом времени. Если не будет движущегося тела, не будет и «теперь», а значит не будет и течения времени, которое переносит «теперь» из одного времени в другое. Эти построения Аристотеля широко известны. Следует подчеркнуть смысл понятия движения, измеряющего время. Аристотель не знал о количественном различии между временем, измеряемым местным, т. е. механическим, движением, и временем, измеряемым качественным и субстанциальным изменением. Но он знал, что время может измеряться не только местным движением. И в данном случае гибкость понятий динамики Аристотеля представляет наибольший интерес. Сейчас мы можем уже с некоторой определенностью говорить о соотношении времени, измеряемого определенным числом трансмутационных актов, и времени, измеряемого движением материальной точки в определенной координатной системе. Трансмутационное время имеет одинаковое течение во всей области, охватываемой трансмутационным актом. В этой области существование пространства в один и тот же момент времени (пользуясь аристотелевским выражением,—

существование «теперь») — имеет физический эквивалент. Трансмутационный акт начинается одновременно во всей области, занятой трансмутирующей частицей.

Такое представление об одновременности и независимом от времени пространстве, содержалось в зародыше в идее немеханического движения как основы мероопределения времени. Оно реализовалось лишь в наши дни. До этой реализации должны были пройти многие века догматизированного аристотелизма, затем два столетия, когда идеалом научного объяснения было сведение немеханических явлений к местному движению. В этот период представление о независимом от времени существовании пространства опиралось на идею бесконечной скорости распространения динамических взаимодействий. Благодаря этой идее и в картезианской и в ньютоновской физике могло фигурировать пространство как таковое, независимое от времени. В физике Декарта речь шла о передаче импульса с бесконечной скоростью от одного тела, участвующего в замкнутом вихревом движении, другому. В физике Ньютона силы распространялись прямолинейно на бесконечные расстояния. Эти ньютоновы силы — мгновенные, вневременные взаимодействия тел и были физическим каркасом ньютонова пространства, существующего независимо от времени.

II. ОДНОРОДНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И КЛАССИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. Гелиоцентризм и относительность. 2. Относительное и абсолютное движение в картезианской физике. 3. Учение Ньютона об относительном и абсолютном пространстве, времени и движении. 4. Принцип относительности у Гюйгенса и однородность времени.

1

Как ни велики позитивные итоги античной науки — изотропия пространства, атомистика, исходные принципы статики, — они не составляют в целом научной картины мира, которая в дальнейшем могла бы развиваться, видоизменяться и конкретизироваться, оставаясь верной в своей основе. Подобная картина мира была создана в XVII в. С тех пор развитие науки, изменяя представления о Вселенной, подтверждало вместе с тем такие принципы учения о природе, как прямолинейность и равномерность движения предоставленного самому себе тела, однородность пространства и времени, пропорциональность ускорения и силы, сохранение импульса, энергии и массы.

Эти принципы, внутренне связанные между собой, последовательно развивались, конкретизи-

зировались и обобщались, они подчас сливались один с другим, логическая структура и границы применения тех или иных принципов менялись, но никакие новые открытия не могли перевести их в разряд заблуждений.

Заметим, что позитивные итоги античной науки относились по преимуществу к статике. Динамика древних, за вычетом некоторых важных астрономических результатов, была фантастической, и ее положительное влияние на последующее развитие науки зависело главным образом от тех догадок о единстве мира и многообразии форм движения, к которым наука всегда будет возвращаться, чтобы черпать из древних источников силы для очередных изменений и обобщений своих понятий и законов. Позитивные построения античной динамики были мимо цели, с их помощью стремились объяснить не ускорение, а движение. В последнем счете соотношение между позитивными итогами античной статики и античной динамики объясняются характером производительных сил античного общества, в котором Парфенон совмещался с примитивными и неизменными орудиями рабского труда.

Генезис научной картины мира XVII в. был связан прежде всего с задачами прикладной динамики. Как ни сильно повлияла на науку и на условия ее развития техническая революция, начавшаяся в конце XV в., мировая торговля и географические открытия XV—XVI вв., строительство крепостей, гаваней и каналов, а также политические и культурные события XV—XVI вв., непосредственной исторической

основой нового естествознания и, прежде всего, классической механики было развитие энергетической базы мануфактуры XVI—XVII вв.

Прикладные динамические задачи привели к представлению об ускорении как объекте каузального анализа в механике, к представлению о прямолинейном и равномерном движении как процессе, не требующем ссылок на взаимодействие тел, в последнем счете к представлению о геометрическом характере закономерностей, определяющих движение тела, предоставленного самому себе. Эти представления были применены к солнечной системе, а затем ко Вселенной. Четкие понятия инерции и гравитационного ускорения появились только у Ньютона, но уже у Коперника движение, не вызывающее физических эффектов в движущейся системе, стало основой кинематической картины обращения Земли вокруг Солнца.

Понятие движения, не вызывающего физических эффектов в движущейся системе, противостояло аргументам в пользу геоцентризма, выдвинутым в древности и сохранившимся вплоть до XVII в. Наряду с основным аристотелевским аргументом (необходимость материального тела в центре вращающихся сфер) существовали дополнительные динамические аргументы. Вращение Земли и ее орбитальное движение вызвали бы ряд процессов на поверхности Земли. Птоломей перечислил подобные процессы. Вращение Земли заставило бы находящиеся на ее поверхности тела рассеяться («по крайней мере, — пишет Птоломей, — если бы их связь не поддерживалась некоторой си-

лой»). Свободно падающие тела двигались бы не перпендикулярно, а наклонно, они отставали бы от движущейся земной поверхности. Облака и вообще все находящиеся в воздухе тела неслись бы по той же причине на запад.

Коперник сравнительно легко справляется с первым аристотелевским аргументом. Он заменяет естественные движения, направленные к Земле как центру мира, естественными движениями, направленными к Земле как таковой, независимо от ее места в космосе. Тяжелые тела падают на Землю, потому что они стремятся к телу, в котором сосредоточен составляющий их элемент. Это было крупным шагом к выявлению однородности пространства. Если естественные движения направлены не к неподвижным частям пространства, а к движущимся телам, то пространство теряет неподвижное и абсолютное мероопределение, а естественное движение приближается по существу к относительному движению.

Ссылка Птолемея и его последователей на отсутствие явлений, демонстрирующих движение Земли, заставляет Коперника выдвигать сравнительно сложные контраргументы. Коперник распространяет на движение Земли понятие естественного движения¹.

Естественное движение Земли не может разрушить естественный порядок на Земле, унеся на запад облака и птиц, отклонив пути падающих тел и т. д. Каким бы словесным ни

¹ Copernic. De Revolutionibus. Paris, I, I, cap. VIII, 1934, p. 89.

казался такой ответ, он таит в себе весьма важную мысль. Естественное движение не вызывает нарушений естественного порядка в движущейся системе. Коперник рассматривает Землю и находящиеся на ней тела (в том числе не имеющие непосредственного контакта с Землей) как элементы системы, в которой царит некоторый естественный порядок, не нарушаемый общим движением системы. Этот «естественный порядок» впоследствии превратился в уравнения движения, ковариантные при переходе от одной галилеевой системы к другой. Такое превращение требовало понятия силы как причины ускорения и таким образом гораздо дальше выходило за пределы физики *impetus*'а, чем это могло быть сделано во времена Коперника. Но у Коперника появился новый критерий «естественности» движения. Коперник пишет:

«Если кто-либо сочтет Землю движущейся, то он, конечно, скажет, что ее движение — естественное, а не вынужденное. Все, что соответствует природе, производит противоположный эффект по сравнению с тем, что достигается вынужденно. Предметы, к которым приложена сила или вынуждающее воздействие, с необходимостью должны быть разрушены и не могут длительно существовать, в то время как созданные природой пребывают в согласии с ней и находятся в наилучшем расположении. Птоломей не имел оснований опасаться, что Земля и земные тела будут разрушены вращением, произведенным действием природы, весьма отличающимся от действий, вызванных искусством или промышленностью. Почему он не

боялся еще более быстрого движения мира, ведь небеса гораздо больше Земли?»¹.

Соображения Коперника, высказанные в приведенных строках, восходят к очень далеким античным прообразам. У Аристотеля естественные круговые движения в надлунном мире противостояли вынужденным и прямолинейным естественным движениям в подлунном мире как движения тел, не испытывающих субстанциальных и качественных изменений, т. е. тел, полностью тождественных себе. Именно поэтому движения этих тел, не вызывающие внутренних изменений, не обладающие внутренними критериями, являются прообразом относительных движений. Теперь движущееся тело заменено системой, а себестождественность тела, отсутствие субстанциальных и качественных изменений заменены сохранением естественного порядка в движущейся системе.

Прообраз коперниковского понятия очевиден. Укажем теперь на его позднейший эквивалент. Естественный порядок, сохранившийся в системе, движущейся «без вынуждающего воздействия», был расшифрован ньютоновой механикой как пропорциональность силы и ускорения в галилеевых системах.

Естественное движение Земли близко к понятию относительного движения, но не совпадает с ним. Для Коперника движения разделяются на кажущиеся и действительные, причем разделение это чисто кинематическое. Коперник далек от мысли о нарушении естественного

¹ Copernic. De Revolutionibus, 1, I, cap. VIII, p. 89.

порядка в системе как о критерии абсолютного характера движения. Чтобы не сомневаться в абсолютном характере движения Земли, достаточно кинематического критерия: Земля движется в ограниченной гелиоцентрической Вселенной, вокруг неподвижного Солнца. Поэтому у Коперника нет представления о принципиальной равноценности различных систем отсчета. Существует единственная привилегированная система, в которой Солнце неподвижно. Его движение — оптическая иллюзия, и относительность движения — это оптическая относительность. Коперник вспоминает стихи Вергилия «Гавань мы покидаем: назад отступают и город и земли...» — образ, служивший с древности иллюстрацией оптических иллюзий.

Мысль об изменении хода внутренних процессов в движущейся системе как о доказательстве ее абсолютного движения принадлежит XVII в. — в отчетливо выраженной форме Ньютону, в неявной — Галилею. Движение Земли не изменяет движений и динамических взаимодействий земных тел потому, что в небольших областях его можно рассматривать как движение без ускорения. Именно в отсутствии ускорений, а не в естественном характере движения причина того, что тела падают перпендикулярно к земной поверхности, облака не уносятся на запад и т. д.

Но Коперник далек от подобных взглядов. Он приписывает отсутствие внутренних эффектов движения системы естественному характеру движения. В сущности Коперник распространяет на Землю и находящиеся на Земле тела

аристотелевскую динамику естественных круговых движений. Это распространение наносит первый и, как вскоре окажется, роковой удар аристотелевскому разделению Вселенной на подлунный мир несовершенных прямолинейных движений и надлунный мир совершенных круговых естественных движений.

Теперь, когда естественные движения перешли из динамики Аристотеля в арсенал гелиоцентризма и оказались на Земле, мы можем яснее разглядеть исторический смысл этого понятия. Логический анализ сопоставляет близкие друг другу точки на различных витках спирали исторически развивающегося познания. Подобный анализ позволяет увидеть сходство между естественными круговыми движениями античной динамики и относительными инерционными движениями классической механики и специальной теории относительности. При этом логически можно прийти к понятию искривленного однородного пространства и увидеть некоторую аналогию со следующим витком познания. Но отсюда еще очень далеко до констатации исторической близости и преемственности античных круговых естественных движений и галилеевых круговых инерционных движений. Исторический анализ следует за спиралью познания и должен показать ее непрерывность. Коперниково понятие естественного движения Земли, непосредственно, исторически связанное с античным понятием круговых движений, также непосредственно, исторически связано с позднейшим понятием кругового инерционного движения динамики Галилея.

Поэтому оно доказывает существование непрерывной исторической преемственности между античными категориями и учением об относительности движения в механике нового времени.

Но преемственность здесь весьма своеобразная. Она далека от исторической преемственности идей нового времени, состоящей в последовательном уточнении предшествующих представлений. Здесь при переходе от античной динамики к классической нельзя говорить о преемственности позитивных идей. Историческая связь состоит в том, что старые вопросы вызывают новые ответы, старые понятия переносятся в новые области, приобретают диаметрально противоположную физическую, позитивную интерпретацию, круговые движения, отличавшие совершенный надлунный мир от несовершенной Земли, становятся движениями Земли и находящихся на ней предметов, естественные движения, служившие аргументом геоцентризма, теперь, изменив свой позитивный смысл, становятся аргументом в пользу гелиоцентризма.

Историческая преемственность осуществляется здесь революционным путем. Использование античного наследия требует радикального отказа от традиционной интерпретации динамических понятий. Именно это и сделал Коперник. Он «секуляризировал» атрибуты надлунного мира, свел их на Землю, разрушил традиционную грань между земной и небесной механикой и этим открыл дорогу будущему применению понятий земной механики к движению небесных тел. Впоследствии Галилей, увидев на Луне ландшафт, сходный с земным, присоединил к

этой физической стороне гелиоцентризма, наиболее опасной для идейных устоев феодального общества, дополнительные чрезвычайно наглядные аргументы.

После революционного переворота, произведенного Коперником, развитие науки пошло, как говорит Энгельс, пропорционально квадрату расстояния во времени от своего исходного пункта ¹. Каждый крупный шаг развития гелиоцентризма покрывал с позитивными физическими идеями античности.

Джордано Бруно, родившийся через пять лет после смерти Коперника, уже не связывал понятие движения системы, не оказывающего влияния на ее структуру, с понятиями античной динамики.

Бруно парирует аргументы, выдвинутые Аристотелем и Птоломеем против движения Земли. Он говорит, что ссылка на облака, которые унеслись бы на запад при движении Земли и т. п., упускает из вида главное: движение облаков, птиц, падающих предметов происходит на Земле и «все отношения прямолинейности и кривизны с необходимостью изменяются при ее движении» ². Заметим, что Бруно выражает мысль о независимости движений на Земле от движения Земли в виде противоположного на первый взгляд утверждения: движения, происходящие на Земле, зависят от

¹ См. Ф. Энгельс. Диалектика природы, М., 1955, стр. 5.

² Giordano Bruno. La Cena de la cenere, III. Opere Galiane, Lipsiae, 1830, p. 170.

ее движения. Первое утверждение означает, что взаимодействия, определяющие прямолинейность или кривизну траекторий движений, отнесенных к системе, не меняются, т. е. речь идет о том, что сейчас называют инвариантностью структуры движущейся системы. Второе утверждение означает, что все тела, входящие в систему, участвуют в ее движении, что движения отдельных тел в системе, отнесенные к другим системам, меняются в зависимости от движения данной системы и меняются так, что соотношения, определяющие прямолинейность, или криволинейность сохраняются. Речь идет, следовательно, о ковариантности законов движения тел при переходе от одной системы к другой. Оба утверждения равнозначны.

Бруно обращается к традиционному примеру — движению корабля. Движение корабля отнесено к берегам и кинематически представимо. Движения тел на корабле, отнесенные к берегу, меняются; мяч, брошенный от носа к корме, будет двигаться относительно берега медленнее, чем мяч, брошенный от кормы к носу. Но относительно корабля скорость будет одна и та же, так как из значений скорости, отнесенной к берегу, будет вычтена, а в другом случае к нему будет прибавлена скорость корабля. Движение корабля не влияет на частные движения на корабле, «...так как есть разница между движением корабля и движением вещей на корабле; и если бы дело обстояло иначе, движение корабля по морю не позволяло бы что-либо бросить с одного борта на другой по прямой линии, и нельзя было бы после прыжка попасть нога-

ми на то же место»¹. Подобных явлений на движущемся корабле не происходит и они не должны происходить на движущейся Земле, так как «все предметы, находящиеся на Земле, движутся вместе с Землей». Картина уносимых на запад облаков, птиц и падающих тел была бы с необходимостью связана с движением Земли, если бы источник движения этих тел находился вне Земли. Человек, бросивший камень с берега в движущийся корабль, попадет в точку, находящуюся несколько ближе (в зависимости от скорости корабля) к корме, чем точка, куда камень был направлен. Но человек, находящийся на корабле, не промахнется: брошенный им камень попадет в цель, траектория падающего камня останется прямой. Камень, брошенный вверх с корабля, вернется назад по той же вертикальной прямой.

Нетрудно увидеть различие между ответами Бруно и Коперника на аргументы сторонников геоцентризма².

У Бруно нет речи о естественном характере движения Земли и участии земных тел в этом движении в силу «естественного стремления». Античная традиция относила место и движение к упорядоченной Вселенной, к каркасу естественных мест ее частей. Для Бруно место и движение тела отнесено к системе, в движении которой участвует тело. Тем самым релятивируется понятие места и движения. Они потеряли указанную Аристотелем связь с соприкасающи-

¹ Giordano Bruno. La Cena de le ceneri, III. Opere Galiliane, Lipsiae, 1830.

² A. Koyré. Etudes galiléennes, III, p. 164.

мися телами (тела движутся относительно Земли и не находясь в контакте с ней) и, с другой стороны, не отнесены к упорядоченной, гетерогенной Вселенной.

Бруно релятивирует тяжесть; тела тяготеют не к определенным естественным местам, локализованным во Вселенной и делающим ее неоднородной. По словам Бруно, «тяжелое и легкое представляют собой только относительное различие, не относящееся к абсолютному различию мест в мире»¹.

Место тела — это не поверхность окружающих тел, а пространство. Пространство везде однородно. Таким образом исчезает динамический критерий абсолютного движения. Если тело падает на Землю, это не значит, что место Земли отличается от других мест Вселенной какими-либо абсолютными свойствами. Различия между местами Вселенной — различия расстояний от произвольно выбранной точки отсчета.

Во Вселенной Бруно нет и кинематических критериев абсолютного движения. Таким кинематическим критерием могли быть границы иерархии тел отсчета — Земля, находящаяся в центре конечной сферической Вселенной, и границы Вселенной. Но Вселенная Бруно бесконечна. Пространство, в котором она находится, не обладает никакими естественными отметками, в нем нет ни центра, ни границ, ни естественных мест, различающихся своим воздействием на тела.

Это пространство, геометризованное и од-

¹ G. B r u n o. *Acrotismus Camoerracensis*, art LXXX; *Opera latina*, v. I, 1, Napoli, 1879, p. 189.

нородное, не может объяснить падения тяжелых тел на Землю. Объяснение — правда феноменологическое — было дано Ньютоном, увидевшим в однородном и «плоском» пространстве гравитационные силы, заставляющие тела стремиться к центрам тяготения и искривляющие орбиты планет. Бруно далек от подобных взглядов, они появятся много позже. Поэтому Бруно пользуется традиционными объяснениями, говорит о стремлении тождественных элементов к воссоединению как о причине падения тел на Землю, звезды во Вселенной Бруно направляются по определенным траекториям душами звезд, и романтический анимизм уводит Бруно в сторону от основного фарватера науки.

Действительным началом новой динамики был «Диалог» Галилея, в котором в отчетливой форме высказана мысль о движении тела без поддерживающей это движение силы. Движение как неизменное состояние тела, движение по инерции, не сопровождается какими-либо изменениями внутренней структуры движущихся систем и поэтому, без указания на тело отсчета, понятие движения в однородном пространстве не может иметь какого-либо физического смысла. Когда в физических процессах участвуют лишь элементы движущихся систем, по ходу этих процессов нельзя судить, движется система или покоится. Если видимая неподвижность Земли подвергается сомнению, то это сомнение нельзя рассеять, ссылаясь на явления, происходящие на Земле.

Подобная дискредитация видимого движения небесных тел и явилась первой задачей

галилеева «Диалога». Она была решена в беседе второго дня. Логическая структура «Диалога» отчетливо видна, если учитывать центральный характер понятий относительного и абсолютного движения в труде Галилея. Галилей дискредитирует картину неподвижной Земли, показывая, что нельзя судить о ее движении или неподвижности, так как в системах, движущихся без ускорения, не существует доказательств абсолютного движения. Далее Галилей приписывает неподвижность центрам обращения небесных тел и, наконец, излагает теорию приливов, которые, по мнению Галилея, доказывают абсолютный характер движения Земли.

Историческая задача «Диалога» — уничтожение аристотелевского разграничения надлунного и подлунного миров. Отвечая на традиционные аргументы в защиту геоцентризма, Галилей уподобляет Землю кораблю, в каюте которого происходят движения, независимые от движения корабля¹. Таким образом Галилей приобщает предметы, находящиеся на Земле, к ее вращению и круговому орбитальному движению.

Движение Земли — это состояние, не вызывающее внутренних изменений в системе, включающей находящиеся на Земле тела. В этом смысле движение без ускорения не отличается от покоя. Различие между ними, как и различие между движениями с различными скоростями, относительно.

¹ Г. Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой. Пер. А. И. Долгова. М.—Л., 1948, стр. 146—147.

Мысль Галилея о покое и движении без ускорения как о состояниях, не требующих каких-либо физических агентов для своего сохранения, была одним из величайших взлетов науки. В лице Галилея наука внезапно отбросила многовековые размышления о причине движения, взглянула на движение как бы в первый раз, без груза традиционных теорий *impetus*'а и увидела, что движение без ускорения, подобно покою, не требует поддерживающего его физического процесса. Это открытие было отказом от античной традиции и вместе с тем триумфом унаследованной от древней Греции способности «первого взгляда» на мир.

Напомним страницы «Диалога», где Галилей устами Сальвиати доказывает сохранение первоначальной скорости шара, катящегося по горизонтальной гладкой поверхности¹. Логическая структура этого доказательства весьма существенна для исторического анализа принципа относительности и идеи однородности пространства. Сальвиати спрашивает, как будет двигаться шар по доске, наклоненной вниз, и по доске, по которой он поднимается. Симпличио отвечает, что в первом случае шар движется с положительным ускорением, а во втором случае постепенно теряет скорость.

После этого нетрудно доказать, что на гладкой доске без спуска и подъема шар сохранит первоначальную скорость.

Таким образом, доказательство инерции основано на трактовке равномерного движения

¹ «Диалог», стр. 118—119.

как нулевого ускорения. Инерционные движения образуют мир состояний — нулевых процессов. Подобное соотношение характерно для всей классической физики. В «Математических началах натуральной философии» первый закон — это нулевой случай второго закона. Только учение Эйнштейна о кривизне пространства — времени объединило общее, ненулевое понятие инерционного движения по геодезическим линиям с концепцией силового поля.

Из представления о покое и движении без ускорения как о состояниях вытекает представление о субстанциальной относительности, в отличие от ранее известной кажущейся «оптической» относительности¹. Упомянутый уже традиционный пример такой оптической относительности — образ берегов, которые с корабля кажутся движущимися, не противоречил абсолютному характеру движения, который гарантировался динамически (*impetus*) и кинематически (движение корабля отнесено к абсолютно неподвижной Земле). У Галилея корабль плывет из Венеции в Сирию, проходит мимо Корфу, Крита, Кипра и т. д. Для находящихся в трюме предметов движение из Венеции в Алеппо «...как бы не существует, оно не меняет их взаимных отношений...»².

Движение «как бы не существует» не потому, что оно кажется несуществующим наблюдателю, движущемуся с той же скоростью относительно абсолютного, действительно неподвижного универсального тела отсчета. Если

¹ А. К о у г é. *Etudes galiléennes*, II, p. 211.

² «Диалог», стр. 97.

придать мысли Галилея современную форму, то можно сказать, что абсолютным, сохраняющимся в любой системе отсчета, критерием движения системы может быть не изменение ее положения, а изменение ее структуры. Но структура не меняется при равномерном движении («оно не меняет взаимных отношений», входящих в систему тел), расстояния между телами и их взаимодействия — инварианты преобразования от неподвижной системы к движущейся без ускорения. Следовательно, движение «как бы не существует» в смысле отсутствия его внутренних эффектов в движущейся системе. Оно существует лишь в геометрическом смысле.

«Как бы не существующее» движение заставляет по-иному трактовать отношение между пространством как таковым с его геометрическими понятиями и миром физических закономерностей. Если при переходе системы из одной области пространства в другую не происходит никаких физических изменений в системе, это означает однородность пространства вдоль линий перехода. Однородное пространство не имеет абсолютной базы для различения одной точки от другой. Оно является относительным пространством, каждая его точка отличается от других лишь координатами в произвольно избранной системе отсчета.

В этом смысле пространство Галилея, в котором космические тела совершают свои равномерные движения,— это однородное относительное пространство.

Космическое инерционное движение, лежащее в основе небесной механики «Диалога»,—

равномерное круговое движение. Вся теория неравномерности движения планет, включая только что опубликованные открытия Кеплера, не принимается во внимание, пространство, о котором идет речь в «Диалоге», не оказывает воздействия на движущиеся тела, иными словами, остается однородным, пока тело движется по замкнутой круговой орбите. Таким образом, говоря современным языком, однородное пространство Галилея — это однородное искривленное пространство. Его кривизна не видна, пока рассматриваются небольшие расстояния. В «Беседах» Галилей говорит о бесконечном движении по горизонтальной плоскости¹. Можно подумать, что речь идет о прямолинейном инерционном движении, но вскоре оказывается, что движение тела, предоставленного самому себе, соответствует поверхности земного шара. В «Беседах» Галилей много раз говорит, что он не принимает во внимание конечные размеры радиуса Земли.

Криволинейность инерционных движений еще не означает, что Галилей выдвинул представление об однородном искривленном пространстве. Однородность и кривизна пространства — это понятия, выраженные *explicité* лишь в современной науке. Речь, как и раньше, идет не о существовании современных идей в XVII в., а о некоторых логических параллелях, соединяющих современные идеи с идеями прошлого. При сопоставлении галилеевской идеи круговых равномерных движений с идеей однород-

¹ Г. Г а л и л е й. Беседы и математические доказательства, М., 1934, стр. 417—418.

ности пространства, идея Галилея соответствует понятию однородного искривленного пространства.

Если у Галилея не было концепции однородного искривленного пространства (только ретроспективно можно найти в «Диалоге» идеи, логически связанные с этим понятием XX в.); то у него не могло быть и позитивной концепции однородного пространства вообще. Галилей не мог вывести направление движения тела, предоставленного самому себе, из свойств пространства как такового. Он не мог этого сделать в силу собственно физических оснований¹, и сверх того круговое инерционное движение не могло соответствовать эвклидову пространству, а о неэвклидовых пространствах узнали только два столетия спустя. Однородность пространства, геометрические свойства которого были известны в XVII в., могла соответствовать только прямолинейному инерционному движению.

После Галилея учение о движении распадается на две теории. В одной из них — учении о прямолинейном инерционном движении — не говорится о физических причинах движения. Тем самым определенную траекторию тела, предоставленного самому себе (теперь ее считают бесконечной прямой), рассматривают как геометрическое понятие, как свойство пространства. Теория ускоренного движения объясняет отступление от прямолинейного и равномерного движения наличием физического агента — динамическим взаимодействием тел.

¹ См. А. К о у г é. Etudes galiléennes, III, p. 229—236.

Картезианская физика последовательно устраняет из картины мира качественные и субстанциальные различия и изменения. Она геометризует материю и тем самым наделяет пространство физическими свойствами. Одним из основных затруднений становится критерий выделения тела из окружающего пространства. Учение Декарта о движении стремится преодолеть указанное затруднение.

Декарт отождествляет тело и место, которое это тело занимает в пространстве. Величина и форма тела — это внутреннее место, а положение тела среди других — внешнее. Внешнее место определяется однозначно, если окружающие тела рассматривать как неподвижные. По мнению Декарта, движение в собственном смысле не означает ничего другого, кроме смены тел, соприкасающихся с движущимся телом. Поэтому корабль, стоящий на якоре и омываемый текущей водой, с точки зрения Декарта, движется, а корабль, увлекаемый течением реки, — неподвижен. Эта точка зрения вытекает из необходимости определить границы тела по отношению к окружающему пространству при отсутствии каких-либо качественных различий между телами.

Наряду с подобным «движением в истинном смысле», Декарт пользуется другим понятием — «движения в обычном смысле». Это движение может относиться к любым телам, в том числе и отдаленным. «В обычном смысле» корабль движется относительно воды, относительно берегов, относительно любого тела. Декарт

все время подчеркивает условность такого понятия движения. Заметим, что подобное раздвоение понятия движения позволило Декарту развивать гелиоцентрические воззрения и вместе с тем не порывать открыто с церковной догмой. Земля, увлекаемая эфиром, неподвижна относительно эфира. Следовательно, движение в истинном смысле соответствует геоцентрическому воззрению. Вместе с тем она обращается вокруг Солнца и таким образом ее движение соответствует системе Коперника.

Движение «в обычном смысле», относимое к различным телам отсчета, дает основание для построения некоторой иерархии тел отсчета. Декарт пишет:

«Хотя каждое тело имеет лишь одно, свойственное ему движение, так как только известное число других тел соприкасается с ним и находится по отношению к нему в покое, однако оно может принимать участие в бесчисленных других движениях, поскольку оно составляет часть некоторых других тел, совершающих другие движения. Так, если мореплаватель, расхаживая по кораблю, носит в кармане часы, то колесики этих часов движутся так, как свойственно только им одним; но они, несомненно, причастны к движению расхаживающего мореплавателя, потому что составляют одну одновременно перемещающуюся с ним часть материи; несомненно, причастны они и к другому движению, поскольку относятся к плывущему по морю кораблю, а также и к третьему, а именно — к движению моря, поскольку они следуют его течению, и, наконец, к четвертому,

если предположить, что Земля вращается вокруг своей оси, так как с Землей они составляют одно тело. И хотя и справедливо, что в колесиках часов имеются все эти движения, однако, в виду затруднительности мыслить сразу столь многочисленные движения, а также ввиду того, что не все движения, которым могут быть причастны колесики, нам известны, для нас достаточно рассматривать в каждом теле только то движение, которое ему единственно свойственно и которое мы можем познать достоверным образом»¹.

Система различных тел отсчета позволяет складывать отдельные относительные движения и разлагать движение на его компоненты. Однако подобные построения при всем их научном и прикладном значении не заслоняют у Декарта главной задачи — поисков однозначно определенного движения. Переходя к «движению в истинном смысле», Декарт избавляется от бесконечного числа значений скорости тела, зависящей от избранной системы отсчета. Но при этом сохраняется двойственная неоднозначность: движение тела и движение окружающей среды кинематически эквивалентны. Сформулировав определение истинного движения, Декарт пишет:

«Ибо перемещение взаимно, и нельзя мыслить тело AB переходящим из соседства с телом CD , не подразумевая вместе с тем переход CD из соседства с AB и не имея в виду, что и для одного и для другого требуется одинаковое

¹ Декарт. Избр. произведения, М.—Л., 1950, стр. 481.

действие. Поэтому, если мы хотим приписать движению природу, которую можно было бы рассматривать в отдельности, безотносительно к другим вещам, то в случае перемещения двух смежных тел — одного в одну сторону, другого — в другую, в силу чего тела взаимно отделяются, — мы не затруднимся сказать, что в одном теле столько же движения, сколько в другом. Согласен, что тем самым мы весьма далеко отклоняемся от обычного способа выражения: находясь на Земле и полагая ее в состоянии покоя, мы, хотя и видим, что некоторые ее части, смежные с иными, более мелкими телами, перемещаются из этого соседства, не считаем, однако, чтобы сама она передвигалась»¹.

Далее Декарт хочет избавиться от неоднозначности движения и найти некоторое различие между системой отсчета, в которой данное тело покоится, и системой отсчета, в которой покоятся окружающие его тела. Для земной механики привилегированной системой оказывается система Земли. Основанием для этого служит необходимость приписать Земле различные движения, если считать различные тела, находящиеся на Земле, равноправными с ней при выборе тела отсчета. Поэтому необходимо приписывать неподвижность Земле².

В истории принципа относительности Декарту принадлежит чрезвычайно важная идея, которая собственно и позволила впоследствии перейти к понятиям абсолютного бесконечного «плоского» пространства и отнесенного к этому

¹ Там же, стр. 479—480.

² См. там же, стр. 480.

пространству абсолютного движения. Речь идет о прямолинейном инерционном движении. Декарт выводит принцип инерции из отождествления материи с пространством. Изменение скорости также невозможно само по себе, как самопроизвольное изменение объема и формы. «Первое правило заключается в следующем: каждая частица материи в отдельности продолжает находиться в одном и том же состоянии до тех пор, пока столкновение с другими частицами не вынуждает ее изменить это состояние. Иными словами, если частица имеет некоторую величину, она никогда не станет меньшей, пока ее не разделят другие частицы; если эта частица круглая или четырехугольная, она никогда не изменит этой фигуре, не будучи вынуждена к тому другими; если она остановилась на каком-нибудь месте, она никогда не двинется отсюда, пока другие ее не вытолкнут, и раз уж она начала двигаться, то будет продолжать это движение постоянно с равной силой до тех пор, пока другие ее не остановят или не замедлят ее движение»¹.

Для Декарта тела, которые не подвергаются внешним воздействиям, это тела, не вовлеченные в вихревое движение. У Галилея вращение и движение по криволинейной орбите могли быть инерционными. У Декарта тело вращается и движется по орбите под воздействием вихря, т. е. импульсов, полученных этим телом от других. Если тело не получает такого импульса и тем самым не включается в вихрь,

¹ См. Декарт. Избр. произведения, стр. 198.

оно предоставлено самому себе и движется прямолинейно. Следовательно, инерционное движение выключено из системы механического объяснения, оперирующего передачей импульса. Механическое объяснение имеет дело с изменениями скоростей.

«Предположив только что сказанное, мы избежим затруднения, в которое впадают ученые, когда хотят найти основание того, что камень продолжает некоторое время двигаться, не находясь уже более в руке того, кто его бросил. В этом случае скорее следует спросить, почему он не продолжает двигаться постоянно»¹.

В физике Декарта реальные движения, вызванные импульсами, могут рассматриваться как прямолинейные только в том случае, когда мы берем сравнительно небольшие области пространства. Для движения тела необходимо, чтобы перед ним двигалось тело, находящееся впереди, и чтобы этот ряд двигающихся друг друга тел замыкался, т. е. чтобы последнее тело в этом ряду занимало место первого. Соответственно прямолинейное движение характеризует стремление тел в данной точке его пути.

«...Хотя при движении тела его путь чаще всего представляется в форме кривой линии и что хотя невозможно произвести, как это было сказано, ни одного движения, которое не было бы в каком-либо виде круговым, тем не менее каждая из частиц тела по отдельности всегда стремится продолжать его по прямой линии. И таким образом их действие, то есть склонность,

¹ Там же, стр. 200.

которую они имеют к движению, отличается от их движения»¹.

Это — первый набросок инверсии Галилеева представления. У Галилея, следовавшего в этом отношении очень давней традиции, вопрос о причине движения относился к прямолинейному движению, что открывало дорогу концепции однородного искривленного пространства. Начиная с Декарта, вопрос о причине относится к криволинейному в целом движению, поддерживаемому серией образующих вихрь импульсов. Это открывает дорогу концепции однородного плоского пространства, т. е. классическому принципу относительности, получившему законченную форму в ньютоновых «Математических началах натуральной философии».

3

Динамическая картина мира, нарисованная (вернее, представленная в виде схематического чертежа) в «Математических началах натуральной философии», изменила смысл понятий относительного и абсолютного движения. Общей чертой античной концепции относительности и дальнейших релятивистских концепций вплоть до релятивистской квантовой механики было представление о себестождественном материальном теле, выделенном из окружающей среды и с течением времени меняющем свои координаты. Это представление ограничивалось образом абсолютно неподвижного начала координат, которое не нуждается в других телах отсчета и

¹ Декарт. Избр. произведения, стр. 202.

превращает связанную с ним систему отсчета в привилегированную систему. В античной науке относительность мест и движений выражалась в невозможности абсолютным образом определить вращение сферы неподвижных звезд, а следовательно, и все движения в надлунном мире. Абсолютный характер имели естественные движения в подлунном мире и вынужденные движения. Но античная механика, приближаясь к этим понятиям, относила абсолютное движение к материальным телам и к абсолютным местам, т. е. к неоднородному пространству с естественными различиями между точками.

Если мы можем обнаружить естественную гетерогенность пространства, естественные различия между точками на пути движущегося тела, то движение имеет естественные точки отсчета в самом пространстве и является абсолютным. В противном случае — это относительное движение.

В первой главе уже говорилось об условности таких определений, логически сопоставляющих позднейшие понятия их неявным прообразам. Неявный характер этих прообразов вытекает из отсутствия в античной механике пространства, отделившегося от материальных тел, пространства как такового. Это — позднейшее понятие. Поэтому в античной механике абсолютное движение — это отнюдь не движение, отнесенное к пространству как таковому, а движение, отнесенное к неподвижным телам и связанным с ними абсолютным местам. Отсутствие в античной механике пространства как такового показывает исходное отличие абсолютного

движения в классической механике от его античного прообраза.

Отделение понятия пространства и места от материальных тел подготавливалось в древности и в средние века, но достигло своего завершения лишь в механике Ньютона, где оно связано с представлением о силах.

Положившая начало новой динамике и вместе с тем всей новой науке мысль о движении как неизменном состоянии, не требующем *impetus*'а, была первым предварительным шагом на пути, который вел к учению о силах, пропорциональных ускорениям. Когда это учение было создано, потребовалось радикальное переосмысление понятий относительного и абсолютного движения. Что касается относительного движения — большая часть дела уже была сделана. Понятие абсолютного движения нужно было создавать заново. Обломки упорядоченной Вселенной схоластов не могли быть употреблены в дело. Единственной идеей, предвосхитившей, в известном смысле, учение Ньютона об абсолютном движении, была теория приливов Галилея, но она оказалась в целом неправильной¹.

В механике Ньютона понятия абсолютного движения и неоднородного пространства связаны между собой иначе, чем в античной механике. Здесь уже нет неоднородной Вселенной как абсолютного фона движения. Здесь рассматривается неоднородность части пространства, движущейся относительно пространства в целом, — неоднородность пространства, натянуто-

¹ Б. Г. Кузнецов. Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв. М., 1955, стр. 57—60.

го на движущуюся систему взаимодействующих материальных тел. Неоднородность выражается в том, что скорости тел, к которым силы не приложены, тем не менее меняются и вообще ускорения перестают быть пропорциональными приложенным силам и иногда зависят от положения тела в движущемся пространстве. Можно считать такие ускорения результатом фиктивных сил — сил инерции, появление которых служит признаком неизотропности и неоднородности движущегося пространства и абсолютно-го характера его движения.

Остановимся подробнее на указанной концепции абсолютного движения неоднородного пространства.

По определению Ньютона, «...а б с о л ю т н о е пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным. Относительное есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел, и которая в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное...»¹.

Абсолютное место тела — часть абсолютного пространства, занятая телом. Абсолютное движение — переход из одного абсолютного места в другое.

Это уже не кинематически представимое, неоднородное абсолютное пространство древности

¹ И. Н ь ю т о н. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. Изв. Николаевской морской академии, вып. IV. Пг., 1915, стр. 31.

и средних веков. Здесь нет естественных, выделенных из окружающего пространства мест, опорных пунктов, по отношению к которым легко геометрически и кинематически определить абсолютные места тел. Здесь фигурирует однородное, кинематически непредставимое пространство, лишенное естественной метрики и естественных начальных точек отсчета. Вплоть до конца XIX в. продолжались попытки придать этому пространству кинематическую наглядность, но они были логически противоречивыми и остались безрезультатными. Понятие абсолютного пространства не вошло бы в науку нового времени, если бы Ньютон не дал ему другого критерия, некинематического, не требующего абсолютно неподвижного тела отсчета, чисто локального.

Этот критерий применим уже не к отдельным телам, а к системе тел, в простейшем случае — к системе двух тел. Система обладает своим собственным относительным пространством. Последнее, по словам Ньютона, «определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел». Оно движется вместе с системой, в то время как абсолютное пространство остается неподвижным. Система обладает структурой, в простейшем случае — определенным расстоянием между двумя телами. Это расстояние и является исходным понятием ньютоновской концепции относительного движения и однородного пространства, а также концепции абсолютного движения. Его можно рассматривать как расстояние между двумя точками, как длину отрезка либо как пространственный интервал. Как мы увидим вскоре,

понятие расстояния между двумя материальными точками в механике Ньютона является эквивалентом инварианта трехмерной евклидовой геометрии.

После Галилея и Декарта к системе можно было приложить идею инерции и сформулировать принцип, согласно которому прямолинейное и равномерное движение не влияет на структуру системы и на изменение структуры.

У Ньютона этот принцип стал частным, отрицательным (вернее, нулевым) случаем позитивного закона: ускорение тел относительно системы является результатом сил, приложенных к входящим в систему телам. Переход к понятию абсолютного движения состоит в возможности ускорения тел относительно системы без реальных сил, приложенных к движущимся телам, за счет ускорения всей системы. Изменение структуры системы может быть приписано фиктивным силам инерции, т. е. неоднородности пространства, связанного с ускоренно движущейся системой.

Дело в том, что у Ньютона понятие инерции приобрело динамический смысл. Движение по инерции — это нулевой случай ускорения, и первый закон Ньютона — это нулевой случай второго закона — закона пропорциональности силы и ускорения. Самое главное состоит в том, что в механике Ньютона инерция может превратиться из нулевого понятия в динамически-позитивное. В системе, движущейся с ускорением, возникают силы инерции, позволяющие констатировать абсолютный характер движений. Ньютон высказывает эту мысль применительно к центробежным силам.

«Проявления, которыми различаются абсолютное и относительное движение, состоят в силах стремления удалиться от оси вращательного движения, ибо в чисто относительном вращательном движении эти силы равны нулю, в истинном же и абсолютном они больше или меньше, сообразно количеству движения»¹.

Вслед за этим Ньютон дает решающее доказательство абсолютного характера вращения — пример вращающегося сосуда с водой:

«Если на длинной нити подвесить сосуд и, вращая его, закрутить нить, пока она не станет совсем жесткой, затем наполнить сосуд водой, и, удержав сперва вместе с водой в покое, пустить, то под действием появляющейся силы сосуд начнет вращаться и это вращение будет поддерживаться достаточно долго раскручиванием нити. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем сосуд силою, постепенно действующей на воду, заставит и ее участвовать в своем вращении. По мере возрастания вращения вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его, принимая впалую форму поверхности (я сам это пробовал делать); при усиливающемся движении она все более и более будет подниматься по краям, пока не станет обращаться в одинаковое время с сосудом и придет по отношению к сосуду в относительный покой. Этот подъем воды указывает на стремление ее частиц удалиться от оси вращения и по этому стремле-

¹ «Начала», стр. 33.

нию обнаруживается и измеряется истинное и абсолютное вращательное движение воды, которое, как видно, во всем совершенно противоположно относительному движению. Вначале, когда относительное движение воды в сосуде было наибольшее, оно совершенно не вызывало стремления удалиться от оси — вода не стремилась к окружности и не повышалась у стенок сосуда, а ее поверхность оставалась плоской и истинное вращательное ее движение уменьшалось, повышение ее у стенок сосуда обнаруживало ее стремление удалиться от оси, и это стремление показывало ее постепенно возрастающее истинное вращательное движение, и когда оно стало наибольшим, то вода установилась в покое относительно сосуда. Таким образом, это стремление не зависит от движения воды относительно окружающего тела, следовательно, по таким движениям нельзя определить истинное вращательное движение тела. Истинное круговое движение какого-либо тела может быть лишь одно, в полном соответствии с силою стремления его от оси, относительных же движений в зависимости от того, к чему они относятся, тело может иметь бесчисленное множество; но независимо от этих отношений эти движения совершенно не сопровождаются истинными проявлениями, если только это тело не обладает, кроме этих относительных, и сказанным единственным истинным движением»¹.

Можно ли утверждать, что появление сил инерции (в данном случае—центробежных сил)

¹ «Начала», стр. 33—34.

свидетельствует о неоднородности пространства, связанного с вращающейся системой? Тела ведут себя по-разному в разных точках этого пространства. Но ведь различие зависит не от пространственного положения, а от сил инерции. Мы можем считать вращающееся пространство неоднородным, пока мы рассматриваем силы инерции как фиктивные, т. е. пока мы относим их к телам, участвующим во вращении системы. Если мы относим их к связям, т. е. к телам, не участвующим во вращении, но связанным с вращающимися телами, фиктивные силы становятся реальными. Следовательно, мы можем считать центробежные силы либо фиктивными силами в неоднородном пространстве, либо реальными силами в однородном пространстве. Тела, стремящиеся удалиться от центра вращения, находятся в фиктивном силовом поле, созданном вращением системы. Если рассматривать взаимодействие тел как нечто противостоящее пространству и свойствам пространства, определяющим поведение тел вне взаимодействия, то такое воздействие пространства, определяющее поведение тел, предоставленных самим себе, можно рассматривать как фиктивное поле.

С точки зрения фиктивности сил инерции, поведение тел, стремящихся удалиться от центра вращения, определяется не взаимодействием, не приложенными к ним реальными силами, а свойствами пространства, вращающегося и поэтому неоднородного. Однородное неподвижное плоское ньютоново пространство, определяющее прямолинейное движение тел, во вра-

щающемся пространстве играет роль силового поля.

Из подобного представления о вращении и об ускоренном движении вообще следует, что относительность свойственна лишь прямолинейному и равномерному движению системы. Этот принцип изложен Ньютоном в 5-м следствии из законов движения: «Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения»¹.

Вслед за этим Ньютон высказывает принцип кинематической неразличимости ускорения всех тел данной системы, вызванного однородным полем.

«Если несколько тел, движущихся как бы то ни было друг относительно друга, будет подвержено действию равных ускоряющих сил, направленных по параллельным между собой прямым, то эти тела будут продолжать двигаться друг относительно друга так же, как если бы сказанные силы на них не действовали»².

Таким полем является гравитационное поле в областях, где его можно считать однородным.

Мы видим, что в механике Ньютона появление сил инерции придает физический смысл движению (ускоренному) тела относительно пространства как такового и служит, таким образом, основанием для отделения пространства от тел. Теперь посмотрим, как в ньютоновой механике получает физический смысл понятие

¹ «Начала», стр. 45.

² Там же, стр. 46.

времени как такового, отделенного от конкретных процессов движения.

У Аристотеля поток времени был количественным, параметризированным («сосчитанная либо сосчитываемая величина») образом реального изменения физического тела. Переброска «теперь» во все новое и новое время соответствовала реальному изменению свойств тела — субстанциальных (исчезновение и возникновение), качественных, количественных или пространственных. В этом смысле аристотелевское время есть количественная мера движения в широком смысле.

Из подобного определения вытекает возможность приписать некоторой области пространства единое время. «Теперь» распространяется на всю эту область, если процесс изменения по самой своей сущности охватывает всю область. Такой процесс очень легко представить себе, если это процесс качественного или субстанциального изменения тела, заполняющего рассматриваемую пространственную область. Но для механики нового времени аристотелевские качественные и субстанциальные формы движения были неприемлемы. Какой же процесс изменения в данной пространственной области мог быть реальной основой единого для области течения времени?

Очевидно этот процесс должен состоять в изменении зависящих от времени пространственных величин, причем абсолютных (инвариантных при изменении системы отсчета) величин. Таковы расстояния между телами, образующими систему. Для механики Ньютона изменение

конфигурации системы (как сказали бы позже, ее движение в конфигурационном пространстве) является реальной основой потока времени, единого для пространства, занятого данной системой.

Очевидно, далее, что единое время для всей области, т. е. распространение понятия «теперь» на всю систему, возможно только при мгновенном действии одного тела на другое. В самом деле, единое «теперь» сменяется другим единым для системы «теперь», когда одна конфигурация системы сменяется другой. Но этот процесс будет единым по самой своей сущности, он будет охватывать всю систему по своему определению, каждое изменение конфигурации будет актом, происходящим во всей системе, если изменение расстояний между телами является результатом мгновенного взаимодействия тел. Уменьшение расстояния между двумя частицами будет единым процессом для системы, включающей эти две частицы, если переход от одного расстояния к другому представляется результатом мгновенного динамического взаимодействия частиц.

Заметим, что систему, в которой расстояния между телами изменяются периодически, можно называть *часами*. Этот термин сам по себе не ведет к каким-либо субъективным концепциям: совершенно очевидно, что если система может быть использована для измерения, то это не мешает существованию подобных систем за миллионы лет до первого измерения на Земле и за миллиарды лет до возникновения Земли.

Освобождение понятия времени от связи с

конкретной динамической системой было результатом развития картины динамических взаимодействий во Вселенной. Небесная механика последовательно включала все более широкие области Вселенной в пространство мгновенных дальнодействий. Отсюда выросло представление о едином времени в бесконечной Вселенной, о времени, независимом от конкретных «часов».

Таким образом время отделилось от часов и, следовательно, от реального пространственно-временного мира движущейся материи. Пространство тем самым также обрело самостоятельность.

Переход от движения материальных точек к движению систем заставляет и вместе с тем позволяет уточнить и обобщить понятие однородного пространства. До сих пор под однородностью пространства подразумевалось тождество поведения тела в различных точках, при отсутствии воздействий со стороны других тел. В качестве предиката, указывающего поведение материальной точки, мы брали ее ускорение и получали динамически однородное пространство. Теперь мы рассматриваем в качестве движущегося объектам систему материальных точек. Возьмем систему с определенными расстояниями между составляющими ее точками, например, твердое тело с обозначенными на нем двумя точками.

Если при движении твердого тела расстояние между точками не меняется, то пространство по пути движения тела метрически однородно.

Сопоставим поведение движущегося в однородном пространстве твердого тела с геометрическими соотношениями¹. Если пространство параметризовано системой координат, так что квадрат расстояния между точками равен сумме квадратов разностей их координат, и если это расстояние не меняется при любых смещениях и поворотах твердого тела, то пространство — евклидово, а система координат — декартова. Твердое тело остается твердым и расстояние между точками не меняется при смещениях твердого тела (метрическая однородность пространства) и при всех поворотах (метрическая изотропия пространства).

4

Ньютонова теория относительного и абсолютного движения доставила немало забот мыслителям XVII—XIX вв. Одних смущало отсутствие абсолютной системы отсчета и они пытались найти такую систему для инерционного движения. Подобные попытки не прекращались до конца XIX в. Другие физики не могли примириться с понятием абсолютного движения и с выделением криволинейных и вообще ускоренных движений из общей релятивистской картины. Из различных направлений релятивистской критики ньютонова критерия абсолютного движения мы остановимся на идеях Гюйгенса. Его перписка с Лейбницем в девяностые годы XVII в. позволяет проследить эволюцию взгля-

¹ А. Эйнштейн. Сущность теории относительности, М., 1955, стр. 9—14.

дов обоих мыслителей. Первоначально Гюйгенс, как и Лейбниц, считал вращение абсолютным, но впоследствии отказался от этого взгляда. Лейбниц также пришел к мысли об отсутствии различий между прямолинейным и криволинейным движением в смысле критерия их абсолютного характера. Гюйгенс и Лейбниц писали друг другу, что они располагают убедительными аргументами против ньютоновой концепции, видящей в центробежных силах доказательство абсолютного вращения. О взглядах Лейбница мы можем судить по некоторым трактатам и по переписке с английским богословом Кларком об относительности движения¹. Переписка эта началась через двадцать лет после аналогичной переписки с Гюйгенсом и была оборвана смертью Лейбница. Действительных физических аргументов у Лейбница не было, он указывал на общую противоречивость понятия абсолютного движения, высказывал весьма различные позитивные концепции и в общем склонялся к приписыванию абсолютного характера не движениям, а непротяженным сущностям — силам в духе своей монадологии.

Гюйгенс, напротив, пришел к определенной физической концепции, которая, как он думал, разбивает построение Ньютона и подчиняет ускорения принципу относительности. Эта концепция не была сообщена в письмах Лейбницу и оставалась неизвестной вплоть до нашего столетия, когда Кортвег нашел в Лейдене четыре рукописных листа с заметками Гюйгенса об от-

¹ Correspondence Leibniz — Clarke. Paris, 1957.

носительности вращений. Заметки были опубликованы Схоутоном в 1920 г. В указанных заметках и в некоторых других¹ Гюйгенс приходит к концепции относительного кругового движения.

Идея относительности всякого движения была одной из основных идей Гюйгенса. Гюйгенс отказывается приписывать как движение, так и покой бесконечному пустому пространству. Движение и покой тела, отнесенные к пространству, — бессодержательные понятия. Движение и покой не могут быть отнесены к пространству, так как части пространства не имеют определенных границ. Таким образом, относительность движения и относительность покоя вытекают из однородности пространства.

Гюйгенс приравнивает представление об абсолютном движении представлению об абсолютном направлении.

«Аналогичным образом, — пишет он, — многие люди понимают слова «вверх» и «вниз»; они не относят их ни к Земле, ни к какому-либо иному телу. Такое представление кажется им очевидным, а между тем оно ложно, так как понятия «вверх» и «вниз» относятся к центру Земли»².

Изотропность пространства в XVII в. сохраняла роль образца для релятивистских теорий, порывавших с непосредственной «очевидностью».

После изложенной общей релятивистской концепции движения Гюйгенс пишет:

¹ Huygens. Oeuvres complètes, XVI, p. 189—233.

² Huygens. Oeuvres complètes, XXI, p. 507.

«Круговое движение будет также относительным: толчки движутся по взаимно параллельным прямым, непрерывно меняя направление, но сохраняя расстояния вследствие связи»¹.

К этой мысли Гюйгенс приходит в заметках на упомянутых рукописных листах. На первом листе — заметки, в которых Гюйгенс еще придерживается взгляда на центробежную силу как на критерий абсолютного характера вращения. Второй и третий листы, написанные, вероятно, в 1692 г., содержат решение, о существовании которого Гюйгенс несколько позже сообщал Лейбницу. Четвертый лист — более поздний — объединяет построения, изложенные во втором и в третьем листах.

Гюйгенс прежде всего замечает, что относительное движение вовсе не сводится к изменению расстояний между телами. Такое определение достаточно для движения тел, между которыми нет связей. Если же тела механически связаны друг с другом, определение их относительного движения должно быть обобщено. Возьмем две диаметрально противоположные точки на окружности вращающегося диска. Они стремятся в противоположные стороны, но жесткая связь не дает возможности изменить расстояние между точками и последние движутся по окружности. Поэтому Гюйгенс в заметке на третьем листе пишет: «...тела покоятся одно относительно другого, если, будучи свободными, не связанными и не удерживаемыми вместе, они сохраняют взаимное положение».

¹ Huygens. *Œuvres complètes*, XXI, стр. 507.

Отсюда следует, что части движущегося круга движутся одна относительно другой и констатация движения (в новом, обобщенном смысле) не требует указания на внешнее тело отсчета или отнесения движения круга к абсолютному пространству. При движении круга не происходит ничего, кроме изменения отношений между его частями, эти части движутся (не меняя расстояний) одна относительно другой. Таким образом вращение — относительное движение.

Центробежные силы указывают лишь на такое относительное движение. «Долгое время, — пишет Гюйгенс в одной из заметок на четвертом листе, — я думал, что вращение обладает в виде центробежной силы критерием истинного движения. Прочие явления не зависят от того, вращается ли возле меня диск или я хожу вокруг неподвижного диска.

Но камень, положенный на окружность диска, будет отброшен, если диск вращается, и я поэтому некогда думал, что диск вращается безотносительно к другим телам. Однако это явление доказывает лишь относительное движение частей диска — их давление на окружность диска. Вращение, следовательно, является относительным движением частей, стремящихся в различные стороны, но сдерживаемых шнуром или связью».

Нетрудно увидеть, что по существу Гюйгенс вводит новую меру движения. То, что изменяется при движении диска, — это уже не зависящее от времени расстояние одного тела от другого или координаты точки в некоторой системе отсчета.

Соответственно мерой изменения служат уже не производные координат по времени, не составляющие скорости тела. Движение в смысле Гюйгенса выражается не в изменении координат и относительных расстояний, а в динамических эффектах. Движения частей диска, направленные в противоположные стороны, уравниваются силами связи, которые служат их мерой. Гюйгенс релятивирует силы, он относит их к связям и высказывает таким образом идею динамической относительности¹. Что же является мерой движения, не сводящегося к изменению координат и ответственного за появление сил инерции?

Гюйгенс не мог ответить на этот вопрос в сколько-нибудь отчетливой форме. Но сама постановка указанного вопроса была гениальным обобщением, она открывала дорогу новым понятиям механики, выводящим проблему относительного и абсолютного движения в область, где она приобретает иной смысл. Попробуем взглянуть на проблему вращения с современной точки зрения и выяснить, что же изменяется в мире, когда диск начинает вращаться.

Чтобы исключить вопрос о движении частей диска, который ведет назад от динамической относительности к кинематической, представим себе совершенно однородный диск. Его части не отличаются одна от другой по плотности. При вращении диска распределение масс в мире не меняется. На диске нет никакой отметки и ориентация диска в пространстве невозможна.

¹ См. H. Reichenbach. Die Bewegungslehre bei Newton, Leibniz und Huygens.

Это исходный пункт релятивистской критики ньютонова мысленного эксперимента с вращающимся ведром и всех аналогичных экспериментов, доказывающих абсолютный характер вращения. Общая теория относительности разъяснила парадокс абсолютного вращения. Вращение однородного диска ничего не меняет в распределении масс в мире, но оно меняет распределение тензора энергии-импульса¹.

У Гюйгенса не было ни понятия тензора, ни современного понятия энергии. Но для него характерно постоянное стремление к такому пониманию движения, из которого следует понятие энергии.

В подобном стремлении и в вытекавших из него поисках принцип относительности служил Гюйгенсу основным эвристическим средством. Он был исходным принципом мемуара «О центробежной силе»², а также теории упругого удара³.

В этой теории, изложенной в мемуаре «О движении тел под влиянием удара», Гюйгенс исходит из того, что соударения тел, принимающих участие в прямолинейном и равномерном движении системы, происходят так, как и при неподвижности системы. Теоремы о соударениях доказываются с помощью следующей картины. Лодка плывет у берега так близко, что человек,

¹ См. А. Эддингтон. Теория относительности. М.—Л., 1934, стр. 315—317.

² См. примечания К. К. Баумгарта к мемуару «О центробежной силе», в кн.: Х. Гюйгенс. Три мемуара по механике. М.—Л., 1951, стр. 373.

³ Там же, стр. 364.

стоящий в лодке может подать руку человеку, стоящему на берегу. Оба держат в руках нити с подвешенными на них шариками и, двигая руками, вызывают соударения шаров, причем скорость лодки прибавляется или вычитается из скорости шара относительно людей.

Как показал Паули¹, построение Гюйгенса означает, что с помощью принципа относительности, переходя к иной галилеевой системе, можно тем самым из сохранения лейбницево́й меры движения (сохранения энергии) получить сохранение декартовой меры (сохранение импульса). Если в некоторой системе, например в лодке, при ударах шаров сохраняется лейбницева мера, то для наблюдателя, не участвующего в движении системы, например для человека, стоящего на берегу, удары шаров демонстрируют сохранение декартовой меры.

В неподвижной системе соударения тел приводят к иным скоростям, причем сохраняется общая энергия тел — общая сумма произведений их масс на квадрат скоростей. Если в уравнении, выражающем сохранение энергии, заменить скорости относительно неподвижной системы отсчета скоростями относительно движущейся системы, т. е. прибавить к скоростям частиц скорость движущейся системы, то уравнение остается справедливым при условии сохранения импульса.

Интерпретированный таким образом ход мыс-

¹ В. Паули. Законы сохранения в теории относительности и в атомной физике. Сб. «Современные проблемы физико-химии и химической технологии», II. М., 1938, стр. 22.

ли Гюйгенса в мемуаре «О движении тел под влиянием удара» близок к современной интерпретации идеи, изложенной Гюйгенсом в заметках 1692 г. об относительности вращения. По существу речь идет о попытке «оттрансформировать» движение в смысле изменения координат (с мерой пропорциональной скорости изменения координат) и перейти к мере движения, соответствующей изменению не в пространстве, а во времени, т. е. к величине, инвариантной в отношении координатных преобразований. «Оттрансформировать» — значит ввести систему отсчета, в которой исчезают движения, не зависящие от взаимодействия рассматриваемых тел. В такой системе отсчета сохраняется лейбницева мера движения. Но если перейти к иной галилеевой системе (т. е. «оттрансформировать» неподвижность системы взаимодействующих тел), то выявляется условие сохранения картезианской меры движения — сохранение лейбницевой меры.

Когда Лагранж перешел от ньютоновых уравнений движения к уравнениям для некоторой функции с размерностью энергии, он, в сущности, выполнил программу, неявно содержащуюся в первых попытках эвристического применения принципа относительности. Вид функции Лагранжа должен быть совместим с принципом относительности¹. Одним из существенных аспектов истории законов сохранения является последовательное применение принципа относительности. То же можно сказать о

¹ Л. Ландау и Е. М. Лифшиц. Механика. М., 1958, стр. 13—36; А. С. Компанеев. Теоретическая физика. М., 1955, стр. 83—85.

понятии действия и законе стационарного действия. В этой книжке мы не рассматриваем применений принципа относительности и ограничимся поэтому лишь одним замечанием, относящимся не только к применению, но и к смыслу относительности.

После работ Гильберта и Неттер¹ мы знаем, что сохранение импульса связано с однородностью пространства, а сохранение энергии — с однородностью времени. Применение принципа относительности для получения инвариантной меры движения и генезис понятий энергии и ее сохранения позволил выявить однородность времени.

Дальнейшее развитие физики выявило также анизотропию времени. Второе начало термодинамики указывает на необратимость физических процессов, т. е. на существование выделенного направления во времени.

² E. Noether. Gött. Nachr., 235 (1918).

III. ОДНОРОДНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

1. Электродинамика и относительность. 2. Постоянство скорости света. 3. Четырехмерная псевдоевклидова геометрия. 4. Общая теория относительности и однородность искривленного пространства-времени.

1

Бак уже говорилось, в новое время прогресс естественнонаучных знаний не только изменяет, но и подтверждает созданную в XVII в. картину мироздания. Расхождения между теорией и экспериментом переходят в область «десятого знака после запятой». И тем не менее эти конфликты в области «десятого знака» приводят к таким революционным преобразованиям основных принципов науки, с которыми несопоставимы по глубине и решительности самые коренные перевороты предшествующей эпохи.

Быть может, в прошлом эти перевороты нуждались в меньшей смелости мысли, чем современные преобразования. Сейчас пересмотр принципиальных позиций в науке не требует, на первый взгляд, такой смелости, как раньше, он прямо вытекает из результатов эксперимента, из логики математического исследования

физических проблем, да и исторические прецеденты облегчают переход к новым взглядам. В самом деле, наука, релятивировавшая такие очевидные понятия, как «верх» и «низ», отказавшаяся от очевидной для своего времени неподвижности Земли, допустившая возможность движения без поддерживающей его силы, предположившая, что сумма углов треугольника не равна двум прямым углам, такая наука вряд ли остановится перед каким угодно решительным новым посягательством на «очевидные» представления. И все же, когда Эйнштейн в 1905 г. предположил, что свет с одной и той же скоростью проходит мимо предметов, которые он догоняет, и предметов, движущихся навстречу, это предположение показалось беспрецедентным по радикальности разрыва с «очевидным».

Столь смелые обобщения совершаются под влиянием мощных импульсов, идущих от практики и эксперимента. Речь идет не об отдельных экспериментальных работах и отдельных прикладных исследованиях. Большие обобщения требуют обычно, чтобы на новую ступень поднялись различные естественнонаучные дисциплины и математический аппарат естествознания, чтобы изменились условия развития науки, чтобы появились многочисленные связанные между собой истоки новой теории. Поэтому историческую основу больших революционных обобщений в физике следует искать не в отдельных эпизодах производственно-экономической, социальной и культурной жизни общества, а в событиях, преобразующих про-

изводственную и экспериментальную технику, изменяющих общественную функцию науки, приводящих прямо или косвенно к накоплению большой массы новых физических сведений и гипотез и к новым методам и понятиям математической мысли.

Основные принципы физики XIX в. были открыты, в последнем счете, в результате промышленной, социальной и культурной революции, произведенной паром. Исторической основой открытий, приведших в конце концов к теории относительности, была революция, произведенная электричеством. И в том и в другом случае не может быть и речи о линейной зависимости развития физики от развития производства. Темпы и формы научного прогресса зависят от всей предшествующей истории представлений о природе; существует внутренняя логика научного развития, наука и производство взаимодействуют друг с другом, и если производство — сложным и нелинейным образом — определяет вопросы, адресуемые природе, и возможности и сроки получения ответов, то само содержание этих ответов определяется объективными закономерностями космоса.

На рубеже XIX и XX столетий один из основных, адресованных природе вопросов относился к распространению света в движущихся средах. Он был поставлен в форме дилеммы: тела, движущиеся в эфире, либо увлекают его, либо оставляют неподвижным.

Проблема увлечения эфира была предметом занявших почти столетия экспериментальных и теоретических исследований,

сохранивших свое значение и сейчас. Решающие эксперименты, доказавшие отсутствие эфирного ветра, были произведены Майкельсоном в восьмидесятые годы. Но в начале девятисотых годов наука подошла к новой постановке старой проблемы. Проблема приобрела универсальный характер. С ней оказались связанными основы физической картины мира в целом. Электродинамика Максвелла за четверть века проделала замечательную эволюцию. В семидесятые годы Максвелл мог изложить теорию электромагнитного поля с помощью механических аналогий, ему понадобилась исключительная сила абстрактного мышления, чтобы увидеть условность этих аналогий, а широкие круги физиков усваивали новую теорию лишь в той мере, в какой она допускала хотя бы иллюзорные надежды на механическое объяснение явлений электричества, магнетизма и света. Теперь все это изменилось. Существование немеханической материальной субстанции было подтверждено опытами Герца, получившими с невиданной раньше быстротой практическое применение; почти непрерывная серия экспериментов и теоретических исследований привела к представлению об импульсе электромагнитных волн и электромагнитной массе, появилась широко распространенная надежда построить единую электромагнитную картину мира и включить в нее законы механики в качестве вторичных и частных законов.

В девяностые и девятисотые годы электродинамика, эмансипировавшаяся от механики уже в семидесятые годы, стала претендовать на

руководящую роль в физике. В свое время она появилась и развилась под влиянием смежных отраслей физики, получивших импульс от практики и распространявших свои понятия на отрасли, не имевшие тогда широкого практического применения. Теперь электродинамика уплачивала старые долги. Когда-то она искала в механических образах и понятиях объяснения электрических и магнитных явлений. Теперь все чаще пытались вывести основные механические понятия и закономерности из понятий и законов электродинамики.

Электродинамика не всегда платила полной монетой. Попытки создания электромагнитной теории массы не могли привести к однозначным результатам. Но был один вопрос, в котором электродинамика оказала существенную помощь классической механике.

В механике Ньютона движение было отнесено к абсолютному пустому пространству. Единое время, входящее в преобразования Галилея и инвариантное относительно этих преобразований, могло приобрести реальный смысл (процессы в отдаленных точках пространства могли быть синхронизированы) при наличии мгновенных динамических взаимодействий. Но идея абсолютного пространства вызывала, как мы видели, сомнения с самого своего появления; а основа абсолютного времени — идея мгновенного дальнего действия — противоречила экспериментальным данным. На помощь пришел эфир.

Лоренцов неподвижный эфир сделал концепцию абсолютного движения вполне рациональ-

ной. Все тела движется в относительном смысле, кроме бесконечного, неподвижного мирового эфира, представляющего собой абсолютное тело отсчета. Абсолютное время может быть установлено с помощью эфира, с помощью происходящего с постоянной скоростью распространения деформаций в эфире. Время отправления сигнала из первой точки и время получения сигнала во второй точке минус время движения сигнала — это одно и то же время.

Таким образом, с помощью лоренцовой электродинамики неподвижного эфира, картина мира, основанная на принципе относительности Галилея — Ньютона и понятиях абсолютного пространства и абсолютного времени, приблизилась к некоторой логической замкнутости.

Но логическая замкнутость это еще не физическая достоверность. Логически замкнутая теория, в которой выводы логически безупречно и однозначно вытекают из экспериментальных основ, может, даже если эти экспериментальные основы многократно проверены и подтверждены, оказаться аппроксимацией. После того как ньютоново абсолютное пространство было заменено лоренцовым эфиром, вся классическая концепция пространства, времени и движения в целом стала подсудной электродинамическому (или, что то же самое, оптическому) эксперименту. Если бы эксперимент подтвердил существование вытекающей из классического правила сложения скоростей разницы в скорости света в различных инерциальных системах, классическая картина не была бы поколеблена в своей основе.

Майкельсон при помощи прибора, регистрирующего различия в скорости света, зависящие от квадрата отношения скорости системы к скорости света, показал, что свет распространяется с одной и той же скоростью в различных инерциальных системах, т. е. что принцип Галилея — Ньютона не может быть распространен на электродинамические процессы. Майкельсон измерял скорость света вдоль движения прибора, увлекаемого Землей в ее суточном вращении, и скорость света в перпендикулярном направлении. Луч света, идущий вдоль параллели, должен был пройти через прибор с несколько уменьшенной скоростью по сравнению с перпендикулярным лучом, если бы движение прибора относительно эфира оказывало воздействие на скорость света в приборе. Оказалось, однако, что луч проходит фиксированное расстояние в трубке прибора в одно и то же время, независимо от ориентации трубки относительно движения Земли. Следовательно, движение прибора в эфире не меняет скорости света относительно прибора. Предположить, что прибор увлекает эфир, нельзя было, этому противоречили ранее сделанные эксперименты.

Результаты опыта Майкельсона стали известны уже в 1881 г. Но в начале девятисотых годов значение этого опыта вышло за пределы оптики и электродинамики. Его нужно было оценивать как *experimentum crucis* для классической картины мира в целом. Поэтому Лоренц,

Пуанкаре и Эйнштейн, почти одновременно выступившие с истолкованием опыта Майкельсона и аналогичных опытов, апеллировали к самым общим принципам.

Подобным принципом было общее продольное сокращение движущихся тел, о котором говорил Фитцджеральд, а затем Лоренц. Гипотеза сокращения изложена в наиболее систематичной и строгой форме в статье Лоренца «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света», опубликованной в 1904 г.¹ Гипотеза продольного сокращения была попыткой классического (основанного на понятии абсолютно го времени и абсолютно го тела отсчета) объяснения результатов Майкельсона. Лоренц предполагает, что электроны при движении в эфире сокращаются в своей протяженности вдоль движения, из шариков они превращаются в эллипсоиды с малыми осями, лежащими в направлении движения. Движение системы зарядов относительно эфира изменяет электрические взаимодействия между зарядами таким образом, что продольные расстояния между зарядами уменьшаются. Изменяются также силы, действующие между незаряженными частицами и между этими последними и заряженными частицами. Поэтому все тела, состоящие из указанных частиц, иначе говоря, все тела природы испытывают продольное сокращение. Сокращение продольных размеров прибора, из-

¹ Lorentz. Proc. Acad. Sc. Amsterdam. 6, 809 (1904). Русск. пер. см. «Принцип относительности». Сб. работ классиков релятивизма. Л., 1935, стр. 16—48.

меряющего скорость света, компенсирует «эфирный ветер», т. е. уменьшение скорости света, вызванное движением в направлении светового луча. Поэтому эфирный ветер не может быть обнаружен.

Лоренц объясняет сокращение размеров не кинематически, а динамически. Поэтому сокращение не противоречит существованию эфира как абсолютного тела отсчета. Более того, лоренцово сокращение имеет смысл только при наличии такого абсолютного тела, с которым связана привилегированная система координат. Сокращение продольных размеров абсолютно, размеры тел сокращаются по сравнению с размерами тех же тел, покоящихся относительно эфира, т. е. в привилегированной системе отсчета. Фатальное, противоречащее классическому правилу сложения скоростей, постоянство скорости света — феноменологический результат действительного уменьшения скорости света в приборе и компенсирующего сокращения продольных размеров прибора.

Теория абсолютного сокращения продольных размеров была последней попыткой сохранить старую концепцию движения перед лицом угрожавших ей экспериментов.

Исходным пунктом новой концепции движения было относительное сокращение, носившее взаимный характер для покоящейся и движущейся относительно нее систем, исключавшее привилегированные системы отсчета.

Лоренц подошел к понятию замедления течения времени в движущихся системах. Но и этот эффект имел абсолютный характер: время

в движущихся системах течет медленнее по сравнению с абсолютным временем в привилегированной системе, покоящейся относительно мирового эфира.

Статья Пуанкаре «О динамике электрона»¹, в которой высказаны многие важные идеи специальной теории относительности, в своем собственном физическом содержании примыкает к концепции Лоренца. Пуанкаре дополняет гипотезу продольного сокращения движущегося электрона предположением о внешнем давлении, деформирующем электрон. Но в части математического анализа проблемы Пуанкаре пошел очень далеко, в некоторых отношениях дальше Эйнштейна. Пуанкаре вводит понятия преобразований Лоренца, противопоставляет их преобразованиям Галилея и ставит вопрос о ковариантности физических уравнений относительно преобразований Лоренца. Преобразования Лоренца — это переход от одной инерциальной системы к другой инерциальной системе, движущейся относительно первой, переход, при котором расстояния и интервалы времени уже не остаются неизменными, а сокращаются. Пуанкаре показывает, что преобразования Лоренца образуют группу в четырехмерном многообразии, он умножает время на мнимую единицу и, таким образом, переходит к четырехмерному пространственно-временному континууму, в котором координата времени играет ту же роль, что и пространственные координаты, входя симметрично с ними в четырехмерные гео-

¹ Rendic. Palermo 21, 129 (1906), Русск., пер. см. «Принцип относительности», стр. 51—129.

метрические соотношения. Пуанкаре говорит о преобразованиях Лоренца как о поворотах в четырехмерном пространстве. Он записывает инварианты этих преобразований — четырехмерные пространственно-временные интервалы. Далее Пуанкаре, пользуясь четырехмерной записью, излагает основы релятивистской электродинамики.

Когда в итальянский математический журнал поступила статья Пуанкаре, в «Annalen der Physik» уже почти месяц находилась статья Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел». Она была напечатана в сентябре 1905 г.¹

В этой статье изложена физическая идея, которая не только изменила смысл понятий однородности и изотропии мира и относительности движения, но и наполнила эти понятия новым физическим содержанием. Идея постоянства скорости света, положенная Эйнштейном в основу специальной теории относительности, означает, что ковариантность электродинамических законов при лоренцовых преобразованиях — это не феноменологический результат двух нейтрализующих друг друга эффектов движения относительно абсолютно неподвижного эфира (замедления скорости света и сокращения продольных размеров прибора), как это было у Лоренца, а субстанциальная, собственно физическая закономерность. Скорость света не кажется, а действительно является одной и той же в движущихся одна относительно другой инерциальных системах. Дело не в том,

¹ Ann. d. Phys. 17, 891 (1905). Русск. перев. см. «Принцип относительности», стр. 133—174.

что скорость относительно эфира нельзя измерить, т. е., что она является метрически непредставимой величиной, хотя изложение теории относительности часто сбивается на подобную версию. Сущность специальной теории относительности состоит в утверждении, что скорость относительно эфира отсутствует в объективном, не зависящем ни от каких измерений, действительном мире. Поэтому эфир уходит из физической картины мира. Принцип относительности становится уже не простой констатацией невозможности зарегистрировать движение относительно эфира как абсолютного тела отсчета, а новой, более точной картиной мира.

Отсутствие эфира в новой картине мира означает выход принципа относительности за пределы электродинамики, превращение его в учение о пространстве и времени. Ведь эфир был основой абсолютного времени, абсолютной одновременности. Скорость движения относительно эфира позволяла связать единым временем тела, отдаленные одно от другого и движущиеся одно относительно другого. Поэтому Эйнштейн, отказавшись от эфира, вводит в своей статье понятия собственного времени и интервала собственного времени и связанное с ним новое определение одновременности.

Указанный интервал — инвариант лоренцовых преобразований. Инварианты преобразований, лежащих в основе теории, указывают на отличие этой теории по ее собственно физическому содержанию от других теорий. Релятивистская теория может быть сформулирована при помощи различных математических поня-

тий, величин и операций (так называемых «формализмов»). Но при переходе от одного формализма к другому сохраняется некоторое инвариантное и однозначное собственно физическое содержание. Изменение этого содержания означает переход к новой картине мира. Новому физическому содержанию соответствует новое деление физических величин на относительные и абсолютные. Соответственно устанавливаются преобразования, которые оставляют инвариантной физическую величину, признанную абсолютной в новой картине мира.

Следует подчеркнуть эту сторону дела при анализе теории Эйнштейна. Ее никак нельзя считать априорно-математической ни по логической структуре, ни по исторической последовательности открытий и обобщений. Общее понятие относительности движения, учение о многомерных пространствах и учение об инвариантах различных групп преобразований не могли сами по себе привести к новым физическим представлениям, образующим ядро теории относительности. Представления о метрических соотношениях четырехмерной геометрии, инвариантных в отношении преобразований Лоренца, рассматриваемых как повороты в четырехмерном пространстве, могли получить физический смысл только на основе не зависящей ни от этих представлений, ни от каких-либо математических понятий вообще, картины распространения света с постоянной скоростью относительно тел, движущихся одно по отношению к другому прямолинейно и равномерно. До Эйнштейна скорость света считалась относительной

величиной, зависящей от выбора координатной системы, к которой отнесено распространение света. Эйнштейн установил абсолютный характер этой величины, причем уже не как феноменологический результат компенсирующих друг друга изменений.

Из собственно физического представления о постоянстве скорости света Эйнштейн вывел инвариант преобразований Лоренца. Если скорость света неизменна, пространственные и временные масштабы меняются в каждой системе отсчета соответственно ее движению, так что не меняется интервал собственного времени. Эта величина определяется при помощи квадратичной формы: квадрат собственного времени равен квадрату времени, прошедшего между двумя событиями, минус квадрат пространственного расстояния между точками, в которых произошли эти события, деленного на скорость света. Если события произошли так быстро одно за другим, что луч света не мог за это время попасть из первой точки во вторую, квадрат интервала собственного времени будет отрицательной величиной, а самый интервал — мнимой (пространственно-подобный интервал). В этом случае событие во второй точке не могло находиться в причинной, физической связи с событием в первой точке. Если же время, прошедшее между событиями, больше чем время, необходимое лучу, чтобы пройти пространственное расстояние между точками, интервал собственного времени будет вещественной величиной (временнo-подобный интервал). Такой интервал соединяет события, которые могут

быть физически связаны друг с другом. В частности, можно представить себе систему, движущуюся с такой скоростью, что оба события происходят в ней в одной и той же пространственной точке, т. е. на одних и тех же расстояниях от координатных осей, связанных с этой системой. Нетрудно видеть, что часы, движущиеся вместе с системой, всегда будут отсчитывать интервалы собственного времени. Если система движется со скоростью света, интервал собственного времени равен нулю.

3

После того как принцип постоянства скорости света был установлен, теория геометрических соотношений четырехмерного континуума могла быть высказана в качестве физической теории. Эта теория была почти во всех своих существенных пунктах высказана Пуанкаре, а в 1907—1908 гг. ее изложил Герман Минковский в своих работах «Принцип относительности»¹, «Основные уравнения электромагнитных явлений в движущихся телах»² и «Пространство и время»³. Эти работы не содержали нового собственно физического принципа, физической предпосылкой идеей Минковского было постоянство скорости света. Минковский

¹ Доклад математическому обществу в Геттингене, напечатан в *Ann. d. Phys.* 47, 927 (1915).

² *Gött. Nachr.* 53 (1908).

³ Доклад на съезде естествоиспытателей и врачей в Кельне 21 сентября 1908 г. *Phys. Zs.* 10, 105 (1909). Русск. пер. см. «Принцип относительности», стр. 181—203.

показал, как изменяется понятие относительности при присоединении к нему нового физического начала, и как можно модифицировать и использовать соотношения евклидовой геометрии для разработки и развития теории Эйнштейна. Геометрические понятия, введенные Минковским, увеличили «свободный пробег» новой теории, зависящий в значительной мере от общности примененного математического аппарата.

Исходная идея Минковского — инвариантное геометрическое представление движения. Она соответствует исходной идее Эйнштейна — инвариантному, независимому от выбора координатных систем описанию физических процессов. Инвариантное геометрическое представление движения — четырехмерное. Если спроектировать четырехмерную кривую, изображающую движение частицы, на трехмерное пространство и изображать движение трехмерной кривой — траекторией с параметрами, указывающими время, то проекция и распределение параметров зависят от трехмерного пространственного сечения в четырехмерном пространственно-временном многообразии. Различные пространственные сечения, образующие различные углы с осью времени, соответствуют различным, движущимся с различной скоростью пространственным системам отсчета. Сама четырехмерная кривая не зависит от проекции и инвариантным образом изображает движение частицы.

Минковский сопоставляет событие (пребывание частицы в данном месте в данное время) точке с тремя пространственными координатами и четвертой координатой, измеряющей вре-

мя. Такие точки образуют четырехмерный пространственно-временной континуум, который Минковский назвал абсолютным миром. Точки этого мира, мировые точки, соответствуют событиям, а мировые линии — движениям частиц.

Уже Пуанкаре обратил внимание на аналогию между инвариантным четырехмерным евклидовым «расстоянием» (квадрат его равен сумме четырех квадратов проекций на оси) и инвариантом преобразований Лоренца, который можно взять в форме квадрата расстояния между точками минус квадрат времени между событиями произошедшими в этих точках, умноженный на квадрат скорости света. Если измерять время секундами, помноженными на скорость света и на мнимую единицу, то время войдет в выражение интервала как равноправная с другими составляющая четырехмерного отрезка, изображающего интервал.

Евклидова четырехмерная геометрия Минковского (поскольку одна координата в ней мнимая, она называется псевдоевклидовой) позволила представить наглядным образом (разумеется наглядность уже не означает возможности трехмерной модели) преобразования Лоренца и инварианты этих преобразований. Преобразования Лоренца изображаются поворотами в четырехмерном пространстве-времени (три поворота — пространственные и три — пространственно-временные повороты на мнимый угол — специальные преобразования Лоренца — переходы от одной инерциальной системы к другой).

В четырехмерном представлении временно-подобные интервалы заключены между мировыми линиями света, образующими световой конус; вне этого конуса — пространственно-подобные интервалы.

Поскольку четырехмерные повороты (преобразования Лоренца) сохраняют неизменным четырехмерное «расстояние» (интервал собственного времени), мы можем говорить об изотропности пространства-времени.

Законы классической физики ковариантны относительно линейных координатных преобразований, сохраняющих неизменной эвклидову трехмерную метрику. В этом выражается и изотропность пространства. Мы видели уже, как кинетическая однородность пространства аристотелевой динамики и космологии сменилась динамической однородностью — отсутствием динамических эффектов при галилеевых преобразованиях. Законы классической механики не изменяются при преобразованиях, сохраняющих эвклидову метрику пространства. Поэтому можно сказать, что классическая физика демонстрирует однородность и изотропность трехмерного эвклидова пространства.

Специальная теория относительности утверждает, что электродинамические процессы также демонстрируют однородность и изотропность эвклидова пространства. Уравнения электродинамики Максвелла — Лоренца не ковариантны по отношению к галилеевым преобразованиям, т. е. к переходу от одной инерциальной системы к другой при сохранении эвклидовой пространственной метрики, при неизмен-

ности пространственного расстояния между точками, выраженного через квадратичную форму разностей декартовых координат.

Но электродинамика, исходящая из определенного значения скорости света в пустоте, может прийти к постоянству этой скорости во всех инерциальных системах, если галилеевы преобразования будут заменены лоренцовыми. Как показал Минковский, лоренцовы преобразования — это повороты в четырехмерном мире, оставляющие инвариантным пространственно-временной интервал — четырехмерный аналог эвклидова трехмерного пространственного расстояния.

Следовательно, однородность пространства, выражающаяся в ковариантности законов природы при переходе к иной системе отсчета, оставляющем неизменной трехмерную эвклидову метрику, дополняется изотропностью пространства-времени, выражающейся в ковариантности законов природы относительно поворота четырехмерных координат.

Доказательством однородности пространства-времени служит установленная Эйнштейном релятивистская связь энергии и импульса. В теории относительности сохранение импульса (связанное с однородностью пространства) и сохранение энергии (связанное с однородностью времени) сливаются в общий закон сохранения энергии — импульса. Теория относительности не отказывается от однородности пространства и однородности времени, она отказывается вообще от пространственных соотношений, как таковых, и от временных соотношений, как таковых

не связанных друг с другом, обладающих самостоятельным физическим бытием.

«Нет абсолютного (независимого от пространства отсчета) соотношения в пространстве и нет абсолютного соотношения во времени, но есть абсолютное (независимое от пространства отсчета) соотношение в пространстве и времени...»¹.

Эйнштейн говорит далее, что неразделимость пространства и времени не означает их неразличимости².

Пространство и время неотделимы друг от друга, поскольку мы рассматриваем время как меру процесса, состоящего в изменении пространственных координат. Мы можем сказать и иначе: время и пространство неотделимы, пока мы рассматриваем сохранение энергии как свойство движения тел, сохраняющих свой импульс. Если бы мы рассматривали немеханический процесс, при котором сохраняется энергия, но к которому неприменимо понятие импульса, время обрело бы самостоятельное бытие.

4.

Специальный принцип относительности позволил обосновать универсальную относительность прямолинейного и равномерного движения.

Очередная задача заключалась в поисках инварианта более общей группы преобразований

¹ А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1955, стр. 30.

² Там же, стр. 31.

и в доказательстве относительности ускоренного движения. Эйнштейн посвятил этой проблеме долгие годы собственно физических размышлений, которые позже, в 1915—1916 гг., привели к физико-геометрическим концепциям неэвклидовой четырехмерной геометрии пространства-времени и однородности искривленного четырехмерного мира. И здесь, как и в генезисе специальной теории, физическая интуиция предшествовала поискам формализма и направляла эти поиски.

Размышляя о физической природе ускоренного движения, Эйнштейн пришел к мысли об эквивалентности ускорения и тяготения. В локальных (вообще говоря, бесконечно малых) областях, где гравитационное поле однородно, его нельзя отличить от направленного в противоположную сторону ускорения. Благодаря тождеству инертной и гравитационной массы, силы инерции, возникающие при ускорении системы, совпадают с соответствующими, вызывающими такое же ускорение гравитационными силами, действующими в неподвижной системе. Поэтому нельзя судить об ускорении системы по происходящим в ней явлениям; они могут объясняться и ускорением и тяготением. Если исходить из эквивалентности того и другого, тождество инертной и тяжелой массы получает рациональное объяснение.

Принцип эквивалентности ускорения и тяготения был выдвинут Эйнштейном в 1911 г. Но до общей теории относительности было еще далеко. Соответственно далеко было до новой более общей концепции однородности простран-

ства-времени. Принцип эквивалентности имеет локальный характер: нельзя считать эквивалентными неоднородное гравитационное поле, например, гравитационное поле Земли, и силы инерции; для этого нужно было бы представить себе лабораторию, удаляющуюся от Земли во все стороны. Генезис общей теории относительности состоял в распространении понятия относительности ускоренного движения на области, заполненные неоднородными гравитационными полями. Эта эволюция потребовала пяти лет, она закончилась в 1916 г., когда задача получила полное и строгое решение.

Но уже работа Эйнштейна, опубликованная в 1911 г., выдвинула новый физический принцип на смену принципу постоянства скорости света.

Мы видели, что каждая новая модификация принципа относительности была связана с некоторым конкретным, экспериментально установленным, собственно физическим принципом. Именно поэтому история принципа относительности и является не логическим развертыванием исходных понятий, а подлинной историей, связанной с экспериментом, экспериментальной техникой и ее промышленными и культурными предпосылками. Экспериментально установленные физические соотношения определяют, к какому именно объекту могут быть применены понятия однородности и относительности. Проверенное экспериментом и практикой сохранение скорости тела, предоставленного самому себе, — закон инерции — был основой представления об однородности пространства; открытый в результате развития оптики и электродинамики закон

постоянства скорости света был основой уточнения и обобщения принципа относительности и идеи однородности пространства. Он показал однородность четырехмерного континуума, подчиненного псевдоэвклидовой геометрии. Принцип эквивалентности означал, что понятия относительности и однородности должны модифицироваться на основе физического принципа, доказанного многочисленными экспериментами, вплоть до известных опытов Этвеша. Забегая вперед, нужно сказать, что в наши дни понятия относительности и однородности претерпят, по видимому, дальнейшую модификацию и обобщение на основе физических принципов квантовой теории поля.

Указанная связь модификации понятий относительности и однородности с собственно физическими принципами демонстрирует не только экспериментальные корни истории релятивизма, но и несводимость движущих сил этой истории к логике эксперимента. Общая теория относительности возникла через триста лет после экспериментального доказательства совпадения гравитационной и инертной массы и за три года до экспедиции Эддингтона, установившей отклонение света в гравитационном поле. Это отклонение было важной составной частью физических представлений, приведших к общей теории относительности. Сформулировав принцип эквивалентности, Эйнштейн логически вывел из него заключения, не содержащиеся в издавна известном, хотя и не объясненном совпадении гравитационной и инертной массы. Чтобы совпадение стало основой общей теории ковари-

антности физических законов, нужно было дополнить его другими физическими представлениями, гипотетическими и подлежащими последующей экспериментальной проверке.

Представим себе систему, в которой тела получили известное ускорение, причем, в силу совпадения гравитационной и инертной массы, нельзя определить, получила ли сама система ускорение, вызвавшее направленные в противоположную сторону силы инерции, или же система оказалась в гравитационном поле. Можно ли из подобной эквивалентности сделать вывод о физической неразличимости ускорений и гравитационных полей с постоянным потенциалом тяготения? Пусть рассматриваемую систему пересечет луч света. Если свет не испытывает воздействия поля тяготения, он сместится относительно ускоренно движущейся системы и не сместится относительно системы, покоящейся в гравитационном поле. Эквивалентность сохранится лишь в случае смещения света в гравитационном поле. Новое физическое содержание принципа относительности состоит в том, что ускорение и тяготение эквивалентны по своему воздействию не только на механические процессы, но и на все физические процессы. Если тяготение искривляет все физические прообразы прямой линии, теория тяготения может стать теорией геометрических свойств пространства.

Отклонение светового луча в поле тяготения означает, что скорость света зависит от тяготения. Абрагам¹ в 1912 г. заявил, что новая кон-

¹ Phys. Zs. 13, 1, 311 (1912).

щепция Эйнштейна представляет собой отказ от появившейся на семь лет раньше теории относительности. Ответ Эйнштейна ¹ содержит очень интересный анализ логической структуры специальной теории относительности — соотношения принципа относительности и принципа постоянства скорости света.

Для Эйнштейна принцип относительности — универсальный принцип, который принимает конкретную форму определенной релятивистской теории в сочетании с некоторым физическим принципом. Последний может с течением времени оказаться законным для некоторого круга явлений приближением к более общему и точному физическому представлению.

Конкретная релятивистская теория уступает место более общей и принцип относительности при этом не ограничивается, а напротив, приобретает более широкое значение. Специальная теория относительности основана на принципе относительности и постулате постоянства скорости света. Если постоянство скорости света при учете гравитационных полей существует лишь в областях с постоянным потенциалом тяготения, то это значит, что ограничивается постулат постоянства скорости света и специальная теория относительности, но не общий принцип. «Здесь, по моему мнению, — пишет Эйнштейн, — лежит граница применения не для принципа относительности, но для принципа постоянства скорости света и вместе с этим для нашей современной теории относительности».

¹ См. «Принцип относительности», стр. 371.

Далее Эйнштейн говорит о специальной теории относительности как о теории, законной в известных, весьма важных, предельных случаях. Он вспоминает об аналогичном соотношении между макроскопической термодинамикой и теорией броуновского движения. Эта аналогия проливает свет на идейные истоки теории относительности в классической физике. Оценка частной теории как закономерного приближения к более общей и точной теории, продемонстрированная термодинамикой и кинетической теорией газов, играла и играет существенную роль в развитии релятивистской физики.

В своем ответе Абрагаму Эйнштейн указывает пути дальнейших поисков общековариантной физической теории. Статическое поле тяготения, эквивалентное по своим действиям ускорению системы отсчета, рассматривается как тождественное такому ускорению. Но это не приводит к противоречиям лишь для бесконечно малых областей. Поэтому принцип эквивалентности только открывает путь к новой теории относительности, охватывающей ускорения. В заключение Эйнштейн говорит о трудности этого пути. - В двух статьях, написанных в 1913—1914 гг. Эйнштейном совместно с Марселем Гроссманом, и в ряде работ Эйнштейна 1915—1916 гг. постепенно вырисовывается круг идей, позволяющих перейти от локального принципа эквивалентности к общей теории относительности. Суть этих идей состоит в следующем. Представим себе идеальный мир с параллельными линиями однородного гравитационного поля. Реальный мир в каждой бесконечно малой области совпадает с

таким выпрямленным миром так же, как кривая совпадает в бесконечно малой области с прямой. Эйнштейн придал этой аналогии физический смысл. Он возвращается к четырехмерному «расстоянию» — инварианту лоренцовых преобразований — квадратичной форме пространственных (вещественных) и временных (мнимых) сдвигов с фундаментальным метрическим тензором, компоненты которого равны единице или нулю. Подобные значения компонент метрического тензора указывают на евклидовы геометрические соотношения. В области с однородным гравитационным полем мы встречаемся с инвариантом более общей группы преобразований — в квадратичную форму дифференциалов пространственных и временных координат входит теперь метрический тензор, компоненты которого уже не равны нулю либо единице. Таким образом, тяготение искривляет четырехмерный пространственно-временной мир. Второй шаг — переход к неоднородному гравитационному полю.

Инвариантом общей группы координатных преобразований (включаящей и ускорения системы отсчета) становится квадратичная дифференциальная форма, в которой компоненты фундаментального метрического тензора, вообще говоря, меняются от одной мировой точки к другой, т. е. являются функциями координат четырехмерного мира. Закон изменения метрического тензора сформулирован Эйнштейном с помощью понятий тензорного анализа. Некоторые из этих понятий уже имелись в работах Римана, Кристоффеля, Риччи и Леви-Чивита,

Другие были введены Эйнштейном, которому принадлежит и самый термин «тензор».

В 1916 г. Эйнштейн изложил в строгой и систематической форме свою новую общековариантную картину мира в «Основах общей теории относительности»¹.

Вскоре появился ряд работ, в которых тензорный анализ и учение о кривизне абстрактных пространств получили дальнейшее развитие. В частности, Герман Вейль в 1918 г. ввел понятия ковариантного дифференцирования, которое поможет нам подойти к понятию однородности искривленного пространства-времени. В последующих работах Эйнштейна и других ученых, излагавших общую теорию относительности, использована идея ковариантного дифференцирования. Напомним здесь физическую сущность этой идеи.

Вейль², вслед за Леви-Чивита,³ ввел понятие параллельного переноса вектора в искривленных пространствах. В «плоском» пространстве всегда можно ввести декартовы координаты и определить параллельный перенос как такой перенос, при котором не меняются компоненты вектора. Для искривленного пространства, в котором нельзя ввести декартовы координаты, понятие параллельного переноса обобщается. Здесь компоненты вектора изменяются. Изменение компонент зависит от самых компонент, от

¹ Ann. d. Phys. 49, 760 (1916). См. «Принцип относительности», стр. 231—305.

² H. Weyl. Raum — Zeit — Materie. Berlin, 1918, S. 97—101.

³ Levi-Civita. Rend. Pal. 42, 173 (1917).

расстояния переноса и от особых коэффициентов, так называемых коэффициентов Кристоффеля. Эти коэффициенты равны нулю в декартовых системах и могут быть обращены в нуль в евклидовом пространстве, где всегда может быть введена декартова система отсчета. В неевклидовом пространстве декартова система может быть введена только в бесконечно малых областях и соответственно только в этих областях коэффициенты Кристоффеля обращаются в нуль. Во всем неевклидовом пространстве коэффициенты Кристоффеля не исчезают и как бы измеряют неевклидовость пространства. С их помощью можно разграничить: 1) изменение вектора при переносе, связанное с действительным, не зависящим от системы отсчета значением физической величины, изображенной переносимым вектором, в иной точке пространства и 2) изменение вектора, вызванное криволинейностью координат. Если выразить результирующее изменение компоненты вектора через частную производную, то эта производная будет включать две части: одна относится к «физическому» изменению вектора, а вторая к изменению за счет криволинейности координат, и зависит от коэффициентов Кристоффеля. Производная, соответствующая «физическому» изменению вектора, очевидна равна разности обычной производной и величины, зависящей от коэффициентов Кристоффеля. Такая производная называется «ковариантной производной».

Если значение физической величины не меняется при параллельном переносе, то изме-

нение компонент вектора целиком зависит от криволинейности координат. В этом случае вектор движется по геодезической линии, которая определяется из условия, что ее направление не претерпевает изменений, связанных с изменением физической величины.

Аналогичным образом вводится понятие ковариантного дифференцирования тензора¹.

С помощью понятия ковариантного дифференцирования можно яснее показать логическую структуру общей теории относительности, несмотря на то, что исторически первое законченное изложение теории предшествовало появлению этого понятия. Эйнштейн по существу придал физический смысл не только «абсолютному» изменению физической величины, изображенной вектором или тензором, но и «координатному» изменению. Он отождествил искривление мира с гравитационным полем, коэффициенты Кристоффеля с напряжениями этого поля, а компоненты метрического тензора с гравитационными потенциалами. Таким образом, все силовые поля, кроме гравитационного, ответственны за «абсолютные» изменения при параллельном переносе, а гравитационное поле — за «координатное» изменение. Пространство при этом приобретает физические свойства,

¹ А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1955, стр. 66—69; Эддингтон. Теория относительности. М.—Л., 1934, стр. 109—129; Паули. Теория относительности. М.—Л., 1947, стр. 89—93; В. А. Фок. Теория пространства, времени и тяготения. М., 1955, стр. 181—190; Л. Ландау и Е. Лифшиц. Теория поля. М.—Л., 1941, стр. 202—207; П. Бергман. Введение в теорию относительности, М., 1947, стр. 216—234.

а гравитационное поле геометризирется, напряженность его означает меру «неэвклидовости» мира.

Нетрудно видеть, что все эти общеизвестные вещи, которые повторены здесь в самой беглой, несистематической и нестрогой форме, означают обобщение понятия однородности, расширение его на искривленный четырехмерный континуум и обобщение принципа относительности на ускоренные движения.

В самом деле, движение частицы в гравитационном поле не связано с какими-либо физическими процессами, субъектом которых является сама частица и которые нельзя представить в качестве геометрических свойств четырехмерного мира. На геодезической линии, по которой движется частица, нет точек, в которых возникали бы «абсолютные» физические изменения (измеряемые «абсолютной», ковариантной производной), так же как подобных точек нет на прямой мировой линии частицы, движущейся по инерции. Все точки на геодезической линии - в этом смысле равноправны, так же как равноправны точки на пути свободно движущейся частицы. В свое время понятие движения по инерции геометризировалось и закон инерции в своем позитивном смысле был отнесен к пространству (утверждение о сохранении скорости предоставленной самой себе частицы в сущности относится к пространству и состоит в констатации его однородности). Теперь геометризирется понятие движения в гравитационном поле. Общая теория относительности утверждает, что движение частицы в гравита-

ционном поле, так же как движение свободной частицы, определяется кратчайшей мировой линией, только не в эвклидовом, а в римановом (в широком смысле) пространстве.

Не является ли такое расширение понятия однородности произвольным?

Здесь мы можем сослаться на то, что подобное расширение соответствует всей предшествующей эволюции понятия, его общему, выявившемуся в этой эволюции, смыслу.

Стержневая идея развития науки — это идея независимости объектов познания от методов познания. Эта идея приобрела форму утверждения о возможности инвариантного представления физических объектов, демонстрирующего независимость их собственных свойств от выбора системы отсчета. Подобная независимость означает, что системы отсчета, придающие количественную определенность трехмерным, четырехмерным, а также другим многообразиям, равноправны, что в этих многообразиях нет выделенных точек — центров привилегированных координатных систем, и в этом смысле указанные многообразия однородны. Если учитывать связь понятия однородности с принципиальной возможностью инвариантного представления физических объектов, то понятие однородности может быть обобщено на многообразия, отличающиеся самыми различными геометрическими соотношениями. Однородность — общее свойство, которое может быть приписано тому или иному многообразию, в зависимости от экспериментально установленных, собственно физических, принципов. Физические эксперименты

указывают (или проверяют предварительные теоретические указания), какие именно соотношения (инварианты) сохраняются при тех или иных процессах (преобразованиях). Если указанные процессы могут быть предоставлены в виде смещений в некотором пространстве (в каком именно — зависит от существа рассматриваемого процесса), то это пространство однородно. Понятие однородности не может быть ограничено определенным многообразием; последовательное уточнение физических данных переносит представление об однородности с одного многообразия на другое.

Понятие однородности распространяется, таким образом, на неевклидово многомерное пространство, причем отступление от евклидовой метрики интерпретируется как гравитационное поле. К подобному представлению об однородности можно прийти, как показано выше, анализируя понятие ковариантного дифференцирования и разделения изменений физических величин на абсолютные и метрические изменения.

В основе такого пути (отнюдь не единственного) лежит разделение физической реальности на 1) пространство, свойства которого определяются гравитационным полем, и 2) вещество, которое наряду с гравитационным ускорением обладает негеометризуемыми свойствами.

Следовательно, общая теория относительности отказывается от старого представления, «...будто бы метрика пространства независима от протекающих в ней физических процессов и

будто реальное вступает в это метрическое пространство, как наниматель в готовую квартиру...»¹.

Мысль о зависимости геометрических свойств пространства от физических процессов была высказана уже в XIX в. Лобачевский в «Новых началах геометрии» предполагал, что «...некоторые силы в природе следуют одной, другие своей особой геометрии»².

Развивая это предположение, Лобачевский ссылается на молекулярные силы, которые, быть может, убывают с расстоянием по другому закону, чем силы тяготения. Закон тяготения связан с определенным отношением поверхности сферы к радиусу. В неевклидовой геометрии — иное по сравнению с евклидовой выражение для сферической поверхности и это соответствует иной зависимости сил от расстояний. Лобачевский настаивает на подобной гипотезе, она может быть заменена другими аргументами в пользу несомненной зависимости метрики от сил.

Риман в своей речи «О гипотезах, лежащих в основании геометрии» предполагал, что «...метрические отношения пространства в бесконечно малом не отвечают геометрическим допущениям...»³. Он ссылался на то обстоятельство, что эмпирические прообразы метрических отношений в пространстве — понятия твердого тела и светового луча — теряют определенность в бес-

¹ Г. Вейль. Комментарии к мемуару Римана. См. сб. «Об основаниях геометрии». М., 1956, стр. 341.

² Н. И. Лобачевский. Полн. собр. соч., т. 1. Казань, 1883, стр. 227.

³ См. сб. «Об основаниях геометрии», М., 1956, стр. 323.

конечно малых областях. Далее Риман выдвигает следующую дилемму. Пространство может быть дискретным. Тогда оно обладает абсолютной метрикой. Если же пространство непрерывно, то оно обладает относительной метрикой, зависящей от «сил связи».

«Отсюда следует, что или то реальное, что создает идею пространства, образует дискретное многообразие, или же нужно пытаться объяснить возникновение метрических отношений чем-то внешним — силами связи, действующими на это реальное»¹.

«Силы связи», определяющие относительную метрику, оказались силами тяготения. Но другие, негравитационные поля находятся в ином положении, их не удалось пока представить в виде геометрических свойств пространства². Для всех элементарных частиц пространство уже не служит «готовой квартирой», но и не сливается с ними (за исключением гипотетических гравитонов) в единое физическое многообразие.

Это раздельное существование пространства и находящихся в пространстве тел, состояние которых не зависит от положения в пространстве, служит общей основой всех релятивистских представлений.

Можно ли перейти к концепции, в которой пространство и вещество могут трактоваться с

¹ Там же, стр. 324.

² См. В. Паули. Теория относительности. М.—Л., 1947, стр. 226—298; П. Бергман. Введение в теорию относительности. М., 1947, стр. 325—371; А. Эддингтон. Теория относительности. М.—Л., 1934, стр. 370—447.

иных позиций? В следующей главе мы остановимся на такой возможности. Заметим предварительно следующее. В течение многих лет надеялись, что будет создана единая теория пространства и вещества. Их раздельное существование после появления общей теории относительности приобрело новую форму. Существуют две физические реальности: 1) гравитационное поле и 2) все остальные поля и элементарные частицы, которые можно рассматривать как кванты полей. Понятие ковариантного дифференцирования дает весьма отчетливое представление об «абсолютном» изменении физических величин под влиянием негравитационных полей и «координатном» изменении пространства под влиянием гравитационного поля, которое в силу принципа эквивалентности действует на все тела одинаковым образом и поэтому может быть представлено как изменение метрики. В результате развития квантовой теории полей и их взаимодействий оказалось, что существует иерархия взаимодействий, из которых самое слабое — гравитационное — может быть практически целиком сведено к изменению свойств пространства, а другие обладают этим «координатным» эффектом в убывающей и «абсолютным» эффектом — в возрастающей степени,

IV. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ И МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ ОДНОРОДНОСТЬ ДИСКРЕТНОГО ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

1. Релятивистская квантовая механика и квантовая электродинамика. 2. Взаимодействие электронно-позитронного поля с электромагнитным. 3. Нулевые флуктуации электронно-позитронного и электромагнитного полей и наблюдаемые эффекты взаимодействия электрона с нулевыми флуктуациями. 4. Новые лоренц-ковариантные теории в квантовой электродинамике. 5. Нелокальные и нелинейные концепции. 6. Мезоны. 7. Сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные взаимодействия. 8. Классификация элементарных частиц и изотопический спин (188). 9. Четность. 10. Единая спинорная теория материи. 11. Квантованное пространство-время. 12. Лоренц-ковариантность дискретного пространства-времени.

1

В этой книге не рассматриваются применения принципа относительности. Но релятивистская квантовая физика, несопоставимая с макроскопической физикой по числу, разнообразию и важности конкретных применений и доказательств теории относительности, представляет собой не только подобные применения и доказательства. Сейчас можно ретроспективно рассматривать тридцатилетний путь релятивистской квантовой механики и квантовой электро-

динамики как последовательную подготовку новой интерпретации принципа относительности. С такой точки зрения мы и взглянем на основные проблемы релятивистской квантовой теории.

В 1926 г. сразу же после создания волновой механики появились работы Оскара Клейна¹, В. А. Фока² и В. Гордона³, посвященные релятивистскому обобщению волнового уравнения.

Оскар Клейн пользовался схемой пятимерного абстрактного пространства, которое играет в его построениях чисто вспомогательную, формальную роль. Такую же роль пятимерное пространство играло в работе В. А. Фока.

В 1926 г. Шредингер и де Дондер⁴ вывели релятивистское волновое уравнение, не пользуясь пятимерным формализмом.

В 1928 г. Дирак⁵ пришел к своему знаменитому спинорному уравнению для электрона, положившему начало современной релятивистской квантовой механике. Это уравнение, как известно, может быть заменено четырьмя уравнениями, так что по существу волновая функция электрона в уравнении Дирака представляет собой четыре функции. Тот факт, что в релятивистском уравнении для электрона фигурируют четыре волновые функции пространственных координат и времени, получил истолкова-

¹ O. Klein. *Zs. f. Phys.* 37, 895 (1926).

² В. А. Фок. *Zs. f. Phys.* 39, 222 (1926).

³ W. Gordon. *Zs. f. Phys.* 40, 117 (1926).

⁴ E. Schrödinger. *Ann. d. Phys.* 81, 109 (1926); T. de Donder *C. R.* 182, 1380 (1926); 183, 22 (1926); 183, 594 (1926).

⁵ P. Dirac. *Proc. Roy. Soc.* 117A, 610 (1928); 118A, 341 (1928).

ние прежде всего в теории спина, которая оказалась пробным камнем и важнейшей составной частью релятивистской квантовой механики. Еще в 1925 г. Уленбек и Гаудсмит¹ объяснили некоторые детали спектроскопических наблюдений (раздвоение спектральной линии) вращением электрона, создающим механический момент количества движения и магнитный момент. Впоследствии под спином стали понимать некоторый собственный момент количества движения, не связывая это понятие с наглядной моделью вращающегося протяженного шарика.

Из уравнения Дирака вытекало, что спин электрона в единицах $\hbar/2\pi$ равен половине. Впоследствии оказалось, что подобным же спином обладают протон, нейтрон и ряд других элементарных частиц. В отличие от них фотон обладает значением спина, равным единице. Как показал Паули², спин связан со статистикой. Системе элементарных частиц, обладающих спином, равным половине, соответствует волновая функция, антисимметричная по отношению к входящим в систему частицам: при перестановке двух частиц эта функция меняет свой знак на обратный. Такая система подчиняется принципу Паули (две тождественные частицы не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии) и статистике Ферми-Дирака. Частицы с полуцелым спином получили название «фермионов». Волновая функция системы

¹ Naturwiss. 13, 953 (1925).

² W. Pauli. Inst. H. Poincaré, Ann. 6, 137 (1936); Phys. Rev. 58, 716 (1940); Rev. Mod. Phys. 13, 203 (1941).

частиц с целым спином (например системы, состоящей из фотонов) не меняется вовсе при перестановке частиц, такие частицы подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна, и называются «бозонами».

Со спином частицы связаны и трансформационные свойства волновой функции, описывающей состояния частицы. Волновая функция может быть скаляром (т. е. не меняться при координатных преобразованиях), псевдоскаляром (менять знак при зеркальном отражении), вектором, псевдовектором (аксиальным вектором), тензором и т. д. Частицам с полуцелым спином (электрону, протону, нейтрону) соответствует спинорная волновая функция. Спинор — тензор половинного ранга, открытый в 1913 г. Э. Картаном и переоткрытый Ван дер Варденом в 1928 г. в связи с релятивистской квантовой теорией Дирака, — имеет в четырехмерном пространстве не четыре, как вектор (тензор первого ранга), и не 16, как обычный тензор (тензор второго ранга), а две составляющие. В уравнении Дирака волновая функция представляет собой так называемый биспинор — она имеет четыре компоненты, которые можно рассматривать как четыре функции.

Наряду с проблемой спина, релятивистская квантовая механика встретила с другой проблемой — отрицательными значениями энергии, которые получились, наряду с положительными значениями, при учете релятивистской зависимости энергии от импульса.

Релятивистским закономерностям соответствуют два ряда значений энергии — положитель-

ные значения и равные им по абсолютной величине отрицательные значения. Классическая частица, непрерывно изменяющая свою энергию, не может перейти из состояния с некоторой положительной энергией в состояние с отрицательной энергией. В квантовой механике, где электрон может совершать переходы с одного дискретного уровня энергии на другой, возможен скачок в состояние с отрицательной энергией.

Если допустимы состояния электрона с отрицательными энергиями, иными словами, если отсутствует наинизшее энергетическое состояние электрона, то электрон может бесконечно отдавать свою энергию, переходя в состояния со все меньшей энергией. Чтобы избежать подобного вывода, необходимо было отказаться от принятой в нерелятивистской квантовой механике интерпретации собственных значений оператора Гамильтона как значений энергии электрона и рассматривать его отрицательные собственные значения как значения энергии другой частицы, в которую превращается электрон. Тем самым превращение одной частицы в другую становится основным понятием теории микромира, наряду с состоянием одной и той же, тождественной себе частицы. Связь между этими двумя понятиями последовательно раскрывалась в развитии релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики в течение тридцатых — пятидесятих годов нашего столетия.

Наличие четырех компонент волновой функции, фигурирующей в уравнении Дирака, было

объяснено возможностью двух ориентаций спина и двусзначностью энергии. Первое объяснение — исторический пример триумфа теории, выводящей из весьма общих допущений необходимость фактов, уже найденных экспериментом и ожидавших теоретического истолкования. Второе объяснение — пример теоретического обобщения, опередившего эксперимент.

Дирак избежал физически абсурдного образа электрона с отрицательной энергией, движущегося с ускорением в сторону, противоположную действующей силе и т. д., с помощью принципа Паули, запрещающего двум электронам находиться в одном и том же состоянии. Этот принцип, управляющий движениями систем, состоящих из одинаковых частиц с полуцелым спином (фермионов), исключает переход электрона в состояние с отрицательной энергией, если это состояние занято другим электроном. Здесь мы подходим к обобщению, которое обязано не только и даже не столько характерному для Дирака стремлению к математической общности и изяществу теории, сколько собственно физической интуиции. Дирак предположил, что пустое пространство заполнено в действительности электронами, находящимися в состояниях с отрицательной энергией¹. Существование фона электронов с отрицательной энергией выявляется, когда в многообразии состояний с отрицательной энергией возникает «дырка». Это слово соответствовало некоторой стадии физической интерпретации релятивистского спи-

¹ P. Dirac. Proc. Roy. Soc. 126A, 360 (1930).

норного уравнения. «Дырка» позволяет электрону занять состояние с отрицательной энергией, излучив при этом два или три фотона. Соответственно, поглотив достаточную энергию, электрон, находившийся до того в состоянии с отрицательной энергией, может перейти в состояние с положительной энергией, образовав «дырку» в фоне состояний с отрицательной энергией.

Дирак обратил внимание на возможность симметричной теории, в которой «дырка» и электрон меняются местами и электрон можно рассматривать как «дырку» в многообразии состояний с положительной энергией. Далее Дирак изложил такую интерпретацию заполненных и незаполненных мест в многообразии состояний с отрицательной энергией, при которой незанятое состояние (т. е. состояние с отрицательной энергией, не занятое электроном) считается заполненным, а занятое состояние — незаполненным. Тогда волновая функция описывает не наличие, а отсутствие электрона. Но чем заполнено состояние, свободное от электрона?

В своей статье Дирак пишет: «Предположим, что почти все состояния с отрицательной энергией заполнены, причем в каждом состоянии, согласно принципу Паули, находится один электрон. Незаполненное состояние с отрицательной энергией проявляется как «нечто» с положительной энергией, так как для уничтожения этого состояния, т. е. для его заполнения, необходимо добавить к нему электрон с отрицательной энергией».

Следовательно «нечто», заполняющее состояние, которое мы рассматривали как незапол-

ненное электроном,— это частица с положительным зарядом. Дирак первоначально отождествил ее с протоном. Но в том же 1930 г. Оппенгеймер¹ показал, что подобная частица должна иметь массу, равную массе электрона. К подобному же выводу пришел и Герман Вейль во втором издании своей книги о применении теории групп в квантовой механике². Частицы с массой, равной массе электрона, и с положительным электрическим зарядом не были еще найдены, и Паули в подготовленном в это время обзоре волновой механики³ писал об отсутствии подобных частиц как о недостатке теории Дирака. Но когда книга Паули увидела свет, Андерсон⁴ уже обнаружил в космических лучах позитроны, предсказанные Дираком. Они были получены и в лабораториях при прохождении фотонов с большой энергией через вещество. Энергия фотона переходит в энергию родившейся электронно-позитронной пары. Аннигиляция этой пары дает два или три фотона.

В тридцатые годы теория позитронов приобрела форму теории электронно-позитронного поля, которое подвергается квантованию. Понятие волновой функции обобщается, она рассматривается как оператор поля. Операторы поля подчиняются перестановочным соотноше-

¹ J. Oppenheimer. Phys. Rev. 35, 939 (1930).

² H. Weyl. Gruppentheorie und Quantenmechanik, 2 ed. Leipzig, 1931.

³ Handbuch d. Physik, Bd. 24, 1, Berlin, 1933; Русск. пер.; В. Паули. Общие принципы волновой механики. М.—Л., 1948; См. С. Швебер, Г. Бете, Ф. Гофман. Мезоны и поля, т. I. Поля. М., 1957, стр. 55.

⁴ C. D. Anderson. Phys. Rev. 41, 405 (1932).

ниям; в установлении этих соотношений и состоит квантование поля, в данном случае — электронно-позитронного. Зависимость операторов от пространственных координат и времени указывается уравнением Дирака. Но волновые функции электронно-позитронного поля являются вместе с тем операторами в пространстве числа частиц, удовлетворяющими известным перестановочным соотношениям.

Тот факт, что релятивистское волновое уравнение Дирака нельзя трактовать как уравнение одной частицы, что не может быть последовательной и логически замкнутой релятивистской квантовой теории одного тела, весьма важен для развития принципа относительности. Эволюция релятивистской квантовой механики после 1928 г. — это переход от теории, относящейся к движению электрона во внешнем поле, к теории, в которой фигурирует переменное число электронов, в которой волновые функции являются операторами в пространстве чисел частиц, и которая в большей степени отказывается от классических аналогий. Все дело в том, что себестождественность микроскопического объекта нерелятивистской квантовой теории ограничена не только перестановочными соотношениями в пространстве импульсов, но и перестановочными соотношениями в пространстве чисел частиц. Второе ограничение — более радикальное, оно колеблет (не только ограничивает, но именно колеблет) основу основ классической (вообще говоря релятивистской) картины мира — представление об относительных смещениях неизменных себестождественных частиц.

По мере того как аннигиляции и порождения электронно-позитронных пар выходили на авансцену механики микромира, теория электронно-позитронного поля сближалась с теорией электромагнитного поля, которая в 1927 г. приобрела новую форму, стала теорией квантованного поля, квантовой электродинамикой.

Квантовая электродинамика появилась не много раньше релятивистской квантовой механики. Статья Дирака, излагавшая новую теорию электромагнитного излучения, была напечатана в 1927 г.¹ Исходным пунктом квантовой электродинамики Дирака было классическое уподобление координат непрерывного поля степеням свободы механической системы дискретных частиц и уподобление амплитуд либо потенциалов поля обобщенным координатам механической системы. Механическая система определяется положением частиц — их координатами, а также зависимостью этих координат от времени. Каждой частице, вернее каждой степени ее свободы (субъекту суждения в механике системы), мы приписываем то или иное значение обобщенной координаты, которое служит предикатом в таком суждении. В теории волнового поля субъектами суждения служат, соответственно, точки пространства, рассматриваемые в определенное время, точнее, координаты этих точек. Координат — бесконечное число, поэтому суммирование по степеням свободы заменяется интегрированием по непрерывно

¹ Proc. Roy. Soc. 114A, 243 (1927).

меняющимся координатам. Предикатами суждений служат амплитуды поля либо потенциалы поля. Переход от классической электродинамики к квантовой, найденный Дираком и получивший в последующих работах современную форму и название «вторичного квантования», состоит в замене параметров поля некоммутирующими, вообще говоря, операторами в пространстве чисел частиц.

Перестановочные соотношения нерелятивистской квантовой механики позволяют найти дискретные состояния с квантованными значениями координат и импульса частицы. Эта теория является логически замкнутой в смысле возможности, с помощью определенной логики, непротиворечивым образом связать друг с другом принципы теории и исходные констатации, относящиеся к определенному кругу явлений. Но логическая замкнутость не означает неизбежности теории и не снимает необходимости ее частичной или коренной перестройки при переходе к более широкому кругу явлений. Принцип неопределенности в нерелятивистской квантовой механике может быть отнесен к частице. Но при переходе к полю, т. е. при расширении круга рассматриваемых явлений, принцип неопределенности оказался бы несправедливым без известного обобщения и формулирования в явном виде условий и областей его применения. В рамках квантовой механики частицы принцип неопределенности не может быть поколеблен, но если принять во внимание электромагнитное поле и считать его континуальным, то в принципе можно было бы, как это показали Бор и

Розенфельд¹, измеряя создаваемое частицей поле, одновременно точно измерить ее координату и составляющую импульса.

Поэтому сам принцип неопределенности требует квантования поля. Мы считаем нерелятивистскую квантовую механику частицы логически замкнутой теорией, потому что указанное требование связано с выходом за пределы круга, в котором принцип неопределенности для частицы остается справедливым. Логическая замкнутость теории всегда имеет смысл для подобного круга и определяется необходимостью учета более широкого круга явлений для констатации противоречий теории.

Понятия логической замкнутости (весьма условной, зависящей от выбора логического аппарата, выбора, в свою очередь зависящего от физических принципов теории) и обобщения теории при переходе к новым рядам явлений позволяют взглянуть на генезис релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики с собственно исторической точки зрения. Исходный исторический факт — изучение (впоследствии применение) микропроцессов, при которых выделяются или поглощаются энергии, сравнимые с энергиями покоя частиц. Когда физика подошла к необходимости теоретического осмысления подобных процессов, уже существовала нерелятивистская механика электрона. Но нерелятивистской теории фотона не было.

¹ N. Bohr, L. Rosenfeld. Kgl. Dansk. Vidensk. Selsk Math.-fys. Medd. 12, № 8, (1933); см. С. Шв е б е р, Г. Б е т е, Ф. Г о ф м а н. Мезоны и поля. т. I. Поля. М., 1957, стр. 113.

Теория, в которой фигурирует движущийся, обладающий импульсом фотон, иными словами, механика фотона, могла быть только релятивистской механикой. Для электрона существует область явлений, полностью соответствующая нерелятивистской теории и позволяющая этой теории достичь известной завершенности, найти некоторый стройный математический формализм, найти адекватный — явный или неявный — логический аппарат и стать логически замкнутой теорией.

Нерелятивистской механики фотона не могло быть: фотон с его нулевой массой покоя, движущийся всегда со скоростью света, подчиняется релятивистским соотношениям и концепция фотонов, выводящая их существование, излучение и поглощение из закономерностей квантового поля, могла быть только релятивистской. Она развивалась на основе экспериментального изучения процессов с релятивистскими энергиями. Внушительная область применения соответствовала разработке весьма тонких и эффективных математических методов анализа таких процессов. Тем не менее, квантовая электродинамика как и релятивистская квантовая механика не приобрела того законченного и стройного вида, который характерен для нерелятивистской квантовой механики. Причина указанного обстоятельства и должна быть выяснена в историческом анализе развития релятивистской квантовой физики. Поиски этой причины, как будет показано дальше, существенны для исторической оценки принципа относительности в целом. Можно думать, что

теории квантованных электромагнитных, электронно-позитронных и мезонных полей не могут быть построены в качестве отдельных логически замкнутых теорий, что подобной теорией может стать лишь единая теория, исходящая из взаимодействия различных полей.

2

Взаимодействие электронно-позитронного поля с электромагнитным учитывается исходными понятиями релятивистской квантовой теории. Однако уже за десять лет до создания нерелятивистской квантовой механики физика не только столкнулась с явлениями, выходящими за рамки нерелятивистской теории микромира и указывающими, как это сейчас видно, на взаимодействие полей, но и нашла характерную физическую константу, фигурирующую в формулах, описывающих закономерности таких явлений. В 1916 г. Зоммерфельд¹ выделил в формуле тонкой структуры спектральных линий безразмерную величину, равную квадрату заряда электрона, деленному на произведение элементарного кванта действия и скорости света. Такая комбинация заряда электрона и основных физических величин, фигурирующих одна в квантовой теории, другая в теории относительности (так называемая «постоянная тонкой структуры»), равна единице, деленной на 137. Природа этого числа, причины, по которым оно входит в формулы, выражающие релятивист-

¹ А. Зоммерфельд. Строение атома и спектры. М., 1957.

ские закономерности микромира,— подобные вопросы вышли далеко за рамки проблемы атомных спектров. Сейчас постоянная тонкой структуры рассматривается как мера взаимодействия различных полей с электромагнитным полем — константа их связи. Интерпретация этой постоянной — важнейший путь выяснения роли, значения и возможных модификаций принципа относительности в учении о микромире.

В 1916 г. дело обстояло иначе. Электрон и фотон уже были известны, но их взаимодействия оставались малоизученными и общей теории взаимодействия электронов с излучением не существовало. Что же касается атома, то здесь имелась сравнительно завершенная (впрочем только для элементарных атомных структур) полуклассическая теория Нильса Бора. С ней и была связана первоначальная трактовка постоянной тонкой структуры.

Зоммерфельд рассматривал очень растянутые боровские орбиты, перигелий которых близок к ядру и на которых электроны вблизи перигелия приобретает очень большую скорость. При большей скорости начинает сказываться релятивистское изменение массы электрона. В случае таких условий число стационарных состояний электрона увеличивается и соответственно увеличивается число спектральных линий; каждая спектральная линия расщепляется. В выражение для энергии электрона, приводящей к увеличенному числу стационарных состояний, входит постоянная Зоммерфельда.

В теории атомов нерелятивистская квантовая

механика оперирует стационарными состояниями, которые обладают некоторой длительностью существования. Длительность возбужденных состояний ограничена взаимодействием атома с электромагнитным полем, возможностью излучения энергии. Если измерить продолжительность жизни в единицах, равных периоду обращения атомного электрона в основном состоянии, то продолжительность жизни, пропорциональная кубу числа 137, представляется огромной. Можно сказать, что электрон имеет вероятность, равную $1/137^3$, излучить фотон в течение одного оборота по орбите или, что то же самое, он совершит в среднем 137^3 оборотов, пока испустит фотон и перейдет на другую орбиту. Таким образом число 137 выступает здесь как величина, обратная мере взаимодействия электронов с электромагнитным полем. Энергия такого взаимодействия оказывается небольшой, именно поэтому электроны и атомы можно рассматривать в стационарных состояниях, как нечто не зависящее от окружающего электромагнитного поля.

Со времен Декарта труднейшим вопросом физики было разграничение вещества и окружающего пространства. Картезианская, чисто кинетическая физика не находила критерия для подобного разграничения; динамические концепции, наделяя вещество негеометрическими свойствами, приводили к тяжелым и сложным апориям. После того как Фарадей и Максвелл стали рассматривать пространство в качестве реальной физической среды — электромагнитного поля, а физика девятнадцатых — девятисотых

годов представила вещество в виде множества дискретных электрических зарядов, проблема приобрела иной характер; она состояла в разграничении электронов (и различных, вплоть до начала тридцатых годов — гипотетических, элементарных положительных зарядов), с одной стороны, и поля — с другой. В квантовой электродинамике проблема изменила свой характер (дискретному веществу противостоит дискретное поле) и вместе с тем приобрела количественный смысл: раздельное изучение двух форм материи — вещества и поля — возможно только благодаря небольшой величине некоторой константы, измеряющей взаимодействие электрона с полем. Но как бы ни был мал этот параметр, как бы маловероятны, редки и незначительны ни были процессы такого взаимодействия, их принципиальное значение чрезвычайно велико. Речь идет о судьбе основного образа классической физики, движущейся в пространстве себестождественной частицы. Этот образ приобретает условный характер, он соответствует действительности, пока взаимодействие электрона с излучением остается незначительным.

Оно остается незначительным лишь при определенных условиях. Все, что говорилось о продолжительности стационарного состояния и вероятности излучения, относилось только к атому водорода или к другому атому, где электрон обладает такой же энергией. Вообще же вероятность излучения фотона электроном (находящемся на K -оболочке атома) равна приблизительно произведению $1/137$ на квадрат

отношения скорости электрона к скорости света. В атоме водорода электрон движется вокруг ядра со скоростью в 137 раз меньшей скорости света. Поэтому вероятность эмиссии равна $1/137^3$. В атомах, где электроны обладают большей энергией и соответственно большей скоростью, положение иное. Например в атоме свинца, где заряд и скорость электрона на орбите в 82 раза больше, чем в атоме водорода, энергия связи электрона и протона превышает энергию связи в атоме водорода в $(82)^2$ раза. Здесь уже существенны релятивистские поправки и нельзя игнорировать взаимодействие электрона с излучением; следовательно, процесс подчинен закономерностям релятивистской квантовой механики (энергия и импульс электрона) и квантовой электродинамики (взаимодействие с электромагнитным полем).

Для исторического и логического анализа квантовой электродинамики можно, не углубляясь в физические гипотезы, связанные с интерпретацией постоянной Зоммерфельда и отвечающие на вопрос, почему она равна именно данному числу $1/137$, констатировать: это число достаточно мало, чтобы нерелятивистская квантовая механика непротиворечивым образом объясняла широкий круг явлений. Что же касается релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики, то незначительность числа $1/137$ позволяет до известного предела изучать независимо друг от друга электромагнитное и электронно-позитронное поля. Благодаря тому, что написанное только что число сравнительно мало, можно рассматривать

взаимодействие этих полей как возмущение и пользоваться математическим аппаратом теории возмущений — разложением в ряд по степеням числа $1/137$. Разумеется, если бы константа взаимодействия полей была большим числом (такой случай встретился, как мы увидим, в теории мезонных полей), подобный метод не мог бы найти применения. Но логически он неполноценен и в электродинамике. Теория электромагнитного поля и теория электронно-позитронного поля не могут стать логически замкнутыми теориями.

Эволюция квантовой электродинамики в сороковые и пятидесятые годы делала эту логическую неполноценность все более существенной. Теория возмущений, т. е. концепция независимости полей, справлялась со все новыми трудностями с помощью виртуозных математических приемов, она приобрела более законченный лоренц-ковариантный вид, но чем дальше, тем актуальнее становилась необходимость единой теории взаимодействующих полей.

Взаимодействие электромагнитного и электронно-позитронного полей выражается в ряде эффектов, теория которых могла бы быть названа теорией электронно-позитронно-фотонного поля. Эти эффекты прежде всего ограничивают точность определения переменных электромагнитного, т. е. фотонного, поля.

Теория индивидуальных ошибок, выдвинутая Фоком и Йорданом¹, Ландау и Пайерлсом², и

¹ Zs. f. Phys. 61, 206 (1930).

² Zs. f. Phys. 69, 56 (1931).

разработанная более подробно Н. Бором и Л. Розенфельдом¹, указывает границы точного определения переменных электромагнитного поля. В статье Л. Розенфельда «Квантовая электродинамика»² дан ретроспективный очерк развития этой концепции³. Розенфельд рассказывает, как в конце февраля 1931 г. Ландау и Пайерлс приехали в Копенгаген, чтобы показать Нильсу Бору свою статью о модификации неопределенности при переходе к релятивистской квантовой теории и точности определения переменных электромагнитного поля. Ландау и Пайерлс пришли к заключению об условности самого понятия электромагнитного поля. Если электромагнитное поле существует в данный момент в некоторой точке пространства, оно может быть измерено, по крайней мере в принципе. Но чтобы измерить компоненты поля, нужно определить импульс заряженной частицы. Определение импульса вызовет излучение, т. е. изменение поля, которое, следовательно, не может быть измерено с неограниченной точностью. Квантование поля исходит из возможности точного определения отдельной компоненты, оно предполагает лишь невозможность точного одновременного определения сопряженных переменных. Бор заметил по этому поводу, что определенные значения компонент поля в определен-

¹ Kong. Danske Vidensk. Selsk, Mat.-fys. Medd. 12, № 8 (1933).

² «Нильс Бор и развитие физики» под ред. В. Паули. М., 1958, стр. 96—128.

³ См. также Ferretti. Nuovo Cimento, 12, 558 (1954).

ных пространственно-временных точках следует понимать как условные величины — непосредственный физический смысл имеют лишь средние значения поля в конечных четырехмерных областях. Поэтому пробными телами по существу служат не точечные заряды, а некоторые определенные распределения зарядов и токов. Такие конечные по своей протяженности распределения могут оказывать на поле пренебрежимо малое воздействие, и в принципе, оперируя все более тяжелым пробным телом, все в меньшей мере смещающимся в рассматриваемой пространственно-временной области, можно как угодно точно определить среднее значение поля в данной области.

Квантовая электродинамика приписывает дискретную структуру полю. Источники поля и пробные тела фигурируют в электродинамике в виде неквантованных, классических объектов с континуальной структурой. Поэтому можно представить себе любые значения плотности заряда. Такова логическая схема квантовой электродинамики. Может существовать более сложная теория, рассматривающая взаимодействие дискретного, квантованного поля с дискретным, квантованным полем частиц — источников поля и пробных тел. Можно ли рассматривать квантовую электродинамику, игнорируя такую более сложную и общую теорию?

Бор ответил на этот вопрос утвердительно, исходя из общей идеи, которую он последовательно проводил в построении и интерпретации квантовой механики. Квантовая механика предполагает применение классических понятий к

квантовым объектам, основанное на взаимодействии квантовых объектов с классическими объектами, в отношении которых допустимо игнорировать их квантово-атомистическую структуру. В вопросе о точности определения компонент поля эта общая предпосылка квантовой механики приобретает отчетливо количественный смысл. Мы игнорируем более общую и сложную теорию взаимодействия дискретного электромагнитного поля с дискретным полем частиц, иначе говоря, игнорируем радиационные взаимодействия, потому что эти взаимодействия обладают небольшой вероятностью, малой интенсивностью и т. д. Но слова «потому что» означают здесь также «пока», «в той области», «в тех пределах», где радиационные поправки невелики, где постоянная Зоммерфельда $1/137$ не умножается на коэффициент одного порядка с числом 137, т. е. не приближается к единице, либо не заменяется при переходе к иным по своей природе полям, иной, большей по величине, константой связи между полями (мезонные поля).

По-видимому, в ультрамикроскопических областях процессы взаимодействия частиц характеризуются весьма глубокой неопределенностью, которая радикальнее ограничивает понятие себестождественной элементарной частицы, чем это делает принцип неопределенности сопряженных динамических переменных. Эта неопределенность ограничивает применение гамильтонова формализма для анализа рассеяния частиц. Гамильтонов формализм соответствует возможности перехода от одного значения переменной к другому бесконечно близкому значе-

нию. Но эта возможность ограничена. В ультрамикроскопических областях радиационные эффекты не позволяют рассматривать взаимодействия электронов друг с другом в течение бесконечно малых промежутков времени. Поэтому в начале сороковых годов Гейзенберг¹ пытался прийти к новому формализму — матрице рассеяния, которая должна была если не заменить гамильтоновы методы квантовой механики, то по крайней мере дополнить их.

Гейзенберг рассматривает рассеяние частиц и сравнивает волновую функцию частицы до рассеяния с волновой функцией рассеянной частицы. Матрица рассеяния — оператор, переводящий первую функцию во вторую. Если интервал, в котором происходило само рассеяние, охватывает пространственную область порядка 10^{-13} см и время порядка 10^{-24} сек, то состояние, которому соответствует начальная волновая функция, и состояние после рассеяния должны быть разделены большим по сравнению с этой элементарной длительностью промежутком времени.

Матрица рассеяния Гейзенберга противостоит не только неограниченной применимости гамильтонова формализма в квантовой механике. Она неизбежно наталкивает мысль теоретика на еще более широкие проблемы, непосредственно связанные с возможной новой интерпретацией принципа относительности. Если частица в момент взаимодействия исчезает из поля зрения исследователя, и этот факт отражает объективные особенности процессов, происхо-

¹ W. Heisenberg. Zs. f. Phys. 120, 513, 673 (1943).

дящих в минимальных областях и в минимальные сроки, то становится проблематичной ее себетожественность. Можно ли говорить, что частица после рассеяния — это та же частица, что и до рассеяния?

Утвердительный ответ предполагает игнорирование процессов, происходящих в пределах четырехмерной ячейки с линейными пространственными размерами порядка 10^{-13} см и длительностью порядка 10^{-24} сек. В таких областях мы не можем представить себе движение себетожественной частицы.

3

Проблема себетожественности элементарной частицы была поставлена в еще более острой форме в результате развития теории вакуума — пространства, в котором отсутствуют реальные, длительно существующие электроны (вакуум электронно-позитронного поля) и фотоны (вакуум электромагнитного поля).

Теория вакуума, начиная с дираковского электронного «фона» состояний с отрицательной энергией и нулевого электромагнитного поля с ненулевой энергией, развивалась в борьбе с фатальным затруднением — бесконечными значениями энергии и массы. Эту трудность преодолевали, углубляя связь между принципами квантовой механики и принципами релятивизма. Но когда в результате замечательных открытий конца сороковых годов была создана нейтрализовавшая расходимости релятивистски-инвариантная концепция вакуума, создатели этой концепции почувствовали, что трудность

не преодолена, а обойдена, что она говорит о необходимости более радикального преобразования теории.

Характер расходимостей в современной теории поля станет яснее при их сопоставлении с расходимостями в доквантовой и дорелятивистской теории электрона.

В теории Лоренца энергия электрического поля точечного заряда бесконечна. Поэтому Лоренц приписывал электрону конечный радиус.

Образ электрона, как протяженного абсолютно-твердого заряженного шарика, несовместим с основными выводами теории относительности: в пространстве, занятом электроном, пришлось бы допустить сверхсветовую скорость распространения динамических взаимодействий. Абсолютно твердая частица — это микроскопический аналог жестких стержней Декарта или других физических эквивалентов абсолютного времени и пространства.

Исходным пунктом появления бесконечных значений в классической и квантовой теории служит собственная энергия частицы, которую можно отождествить с электромагнитной энергией поля частицы. В классической теории — это так называемое продольное поле. Оно означает электрическое взаимодействие данной частицы с другими. Энергия частицы зависит не только от существования внешнего поля, т. е. поля других частиц, но и от собственного поля.

Энергия заряженной частицы, обязанная существованию ее собственного поля (продольного, означающего взаимодействие с другими

заряженными частицами), и представляет собой собственную продольную энергию частицы.

Собственное поле частиц препятствует ускорению электрона во внешнем поле и может поэтому рассматриваться как его дополнительная масса — продольная полевая масса. Подобно энергии, она приобретает бесконечное значение, если радиус электрона приравняется нулю.

В квантовой теории мы встречаем в качестве основных понятий, помимо продольной собственной энергии и массы электрона, его поперечную собственную энергию и массу. Эта поперечная энергия и поперечная масса обязаны своим существованием взаимодействию электрона с виртуальными фотонами, которые возникают и исчезают в очень короткие промежутки времени и существуют соответственно в очень малых пространственных областях.

В подобные промежутки времени и в подобных областях возможны специфически квантовые эффекты испускания фотонов с «заемной» энергией, т. е. виртуальных фотонов. Согласно соотношению неопределенностей, мы можем представить себе «заем» энергии (т. е. испускание фотона при отсутствии у электрона соответствующей энергии) на небольшой срок, именно такой срок, который, будучи умножен на полученную взаймы энергию, дает величину, не большую, чем квант действия. Подобные виртуальные фотоны могут нести значительную энергию (характеризоваться высокой частотой колебаний), если «срок займа», т. е. время существования такого виртуального фотона, соответственно мало. Если же время существова-

ния виртуального фотона велико, то, согласно соотношению неопределенностей, соответственно мала его энергия.

С этой точки зрения мы можем себе представить не только собственное продольное поле электрона, но и его собственное поперечное поле. Электрон испускает и поглощает фотоны не только при взаимодействии с другими излучающими и поглощающими электронами. Электрон испускает фотоны и тут же сам поглощает их. Он окружен облаком виртуальных фотонов. Поскольку виртуальные фотоны подобного «самодействия» могут иметь неограниченно малую продолжительность существования и соответственно неограниченно большую энергию, идея виртуальных фотонов ведет к бесконечной собственной поперечной энергии и массе электрона. Продольная энергия и продольная масса электрона в квантовой механике также бесконечна, и эта бесконечность аналогична классической бесконечности собственной энергии точечного электрона. К бесконечной собственной продольной энергии электрона, находящегося в статическом поле, прибавляется бесконечная собственная поперечная энергия электрона, обязанная своим существованием полю излучения.

Нулевое электромагнитное поле или вакуум электромагнитного поля соответствует нулевому значению вектор-потенциала, который мы рассматриваем в квантовой электродинамике как оператор в пространстве числа частиц. Если число частиц (в данном случае фотонов) равно нулю, то поле все же существует физически и вызывает определенные эффекты, так как

равное нулю число реальных фотонов не исключает их порождения и уничтожения — статистических флуктуаций нулевого поля. Взаимодействия с ними и сообщают электрону бесконечную поперечную собственную энергию. Она не могла бы достигать бесконечных значений, если бы электрон был протяженным. Тогда он не взаимодействовал бы с виртуальными фотонами выше определенной частоты и интеграл поперечной собственной энергии флуктуаций был бы обрезан на определенной предельной частоте.

Даже при отсутствии реальных электронов и позитронов вакуум электронно-позитронного поля обладает флуктуациями — виртуальными электронно-позитронными парами, аналогичными виртуальным фотонам нулевого электромагнитного поля. Они взаимодействуют с реальным электроном. Взаимодействие это объясняется главным образом невозможностью существования двух электронов в одном и том же квантовом состоянии, т. е. принципом Паули. В силу указанного принципа, действительный и виртуальный электроны стремятся быть на известном расстоянии друг от друга. Кроме того, имеет место электрическое взаимодействие между реальным электроном и виртуальными электронно-позитронными парами.

Электромагнитное поле, созданное реальным электроном, деформирует электронно-позитронное поле даже в том случае, когда оно не вызывает порождения пар. Оно нарушает нулевое в среднем распределение заряда в вакууме и дает бесконечно большую добавку к первоначаль-

ному заряду электрона. Следовательно, в теорию вводится не только бесконечная собственная масса электрона, но и бесконечный заряд. Таким образом, электромагнитное поле взаимодействует с электронно-позитронным вакуумом, поляризует его; поляризованный же электронно-позитронный вакуум влияет на электромагнитное поле и его взаимодействие с электроном. Эти сложные взаимодействия приводят к эффектам, которые в конце концов оказались доступными наблюдению и измерению.

При помощи релятивистского волнового уравнения Дирака можно вычислить зависящее от спина различие в положении уровней энергии электрона в атоме водорода, выражающееся в расщеплении спектральной линии. Но уже в тридцатые годы было замечено расхождение между положением наблюдаемых спектральных линий и положением их, вычисленным на основе теории Дирака. Во второй половине сороковых годов для проверки подобного расхождения были применены новые радиоспектроскопические методы. Речь идет о следующем.

Представим себе, что в спектре водорода спиновое расщепление дает две линии, соответствующие двум энергетическим уровням, различие между которыми приблизительно равно одной двухсоттысячной электронвольта. При переходе с одного уровня на другой поглощается квант со сравнительно небольшой частотой, соответствующей указанной небольшой энергии. Это уже не волны видимого света, а короткие радиоволны длиной около двадцати сантиметров. Измеряя частоту волн, вызывающих пере-

Ход от одной линии тонкой структуры водородного спектра к другой, можно с большой точностью определить различие между уровнями энергии, соответствующими указанным линиям. Этим способом Лэмб и Ризерфорд¹ в 1947 г. измерили аномальный сдвиг уровня энергии электрона в водородном атоме. Вскоре, в том же 1947 г., был обнаружен подобный сдвиг в атоме гелия². В 1947 г. был найден также дополнительный магнитный момент электрона³.

4

Перечисленные открытия радиационного смещения вызвали серию теоретических работ, означавших новый этап разработки релятивистской теории микромира и подготовивших неизбежную эволюцию самого понятия относительности пространства, времени и движения. Указанные результаты развития квантовой электродинамики в течение последних десяти — двенадцати лет видны довольно отчетливо. С одной стороны, никогда еще применение специального принципа относительности не приводило к такому поразительному по точности совпадению теоретических выводов с результатами эксперимента; с другой стороны, именно в связи с успехами теории возникла перспектива тако-

¹ W. E. Lamb, R. C. Retherford. Phys. Rev. 72, 241 (1947). Пер. в сб. «Сдвиг уровней атомных электронов». М., 1950, стр. 45.

² J. E. Mack; N. Anstern. Phys. Rev. 72, 972 (1947).

³ J. E. Nafe, E. B. Nelson, J. J. Rabi. Phys. Rev. 71, 914 (1947).

го синтеза идей относительности и квантовых идей, который невозможен без новой интерпретации не только вторых, но и первых.

Рабочим методом, принесшим квантовой электродинамике возможность обойти трудности с бесконечной массой и дать теорию, совпадающую в своих выводах с наблюдением, был метод перенормировки массы. В 1947 г. Крамерс¹, в связи с проблемами классической электродинамики, обратил внимание на возможность свести эффект вышеуказанной собственной энергии частицы к соответствующему изменению ее массы, которая (как отдельная величина) не должна фигурировать в теории, а в качестве части суммарной наблюдаемой массы может рассматриваться как произвольное слагаемое. После того как Вейскопф, Швингер, а также Оппенгеймер, высказали мысль о взаимодействии электрона с излучением как о причине сдвига энергетических уровней, Бете² показал, что этот сдвиг может не быть бесконечным; если перенормировать массу. Методы устранения расходимостей, основанные на перенормировке массы, разработанные Бете в рамках нерелятивистской теории, были обобщены с учетом релятивистских случаев. При этом Бете и другие физики, создавшие современные методы регуляризации, исходили из следующих

¹ H. A. Kramers. Rapports du 8^{me} Conseil Solvay 1948. Bruselles, 1950, p. 241; С. Швeбep, Г. Бeтe, Ф. Гофман. Мезоны и поля, т. I. Поля. М., 1957, стр. 309.

² H. A. B e t h e. Phys. Rev. 72, 339 (1947). Пер. в сб. «Сдвиг уровней атомных электронов». М., 1950, стр. 82.

соображений. В опыте нам дана суммарная масса частицы. Предположим, что перед нами свободный электрон. Можно предположить, что в его массу уже включена добавочная электромагнитная масса, обязанная своим существованием взаимодействию электрона с нулевыми колебаниями фотонного и электронно-позитронного полей. Такое предположение и означает перенормировку массы электрона. К перенормированной таким образом массе свободного электрона не нужно прибавлять расходящуюся дополнительную массу, соответствующую энергии взаимодействия, которая в случае свободного электрона приравнивается нулю. В случае электрона в атоме, т. е. электрона в кулоновом поле, дополнительная энергия уже не может быть отброшена. Разность между энергией взаимодействия с вакуумом связанного электрона и энергией взаимодействия с вакуумом свободного электрона равна радиационному смещению уровня энергии электрона в атоме. Аналогично, дополнительный заряд электрона, возникающий вследствие взаимодействия с нулевыми полями, считается входящим в основной заряд и поэтому не учитывается.

Все это можно изложить качественным образом, при помощи картины виртуального излучения и поглощения. Электромагнитная масса свободного электрона пропорциональна энергии поля, создаваемого самим электроном — облака виртуальных фотонов, испускаемых за счет «займа» энергии и поглощаемых в интервалы времени, указываемые соотношением неопределенности. Прибавление такой энергии к энергии

свободного электрона мы может считать появлением электромагнитной массы. Мы включаем ее в наблюдаемую эмпирическую массу электрона, допуская возможность теории, из которой получается конечное значение электромагнитной массы. При отсутствии подобной теории приходится брать наблюдаемую массу как предельную эмпирическую константу и не делить ее на «затравочную» и электромагнитную части.

Теперь возьмем связанный электрон. Здесь полевая масса не может быть отброшена; она зависит от внешнего поля. Испускание и поглощение виртуальных фотонов может существенно измениться, если электрон движется с ускорением во внешнем поле, например в поле протона (атом водорода). Электромагнитная масса связанного электрона может быть бесконечной, но ее изменение под влиянием этого внешнего поля остается конечным. Дело в том, что виртуальные фотоны большой энергии существуют, согласно соотношению неопределенности, короткое время и это препятствует внешнему полю оказать воздействие на их излучение и поглощение — в короткое время не может существенным образом сказаться ускорение электрона. Фотоны малых энергий испытывают воздействие внешнего поля. Электромагнитная масса, пропорциональная собственной энергии связанного электрона, может быть бесконечной, потому что испускаемые и поглощаемые им фотоны при нулевой протяженности электрона могут иметь какие угодно высокие частоты и, соответственно,

энергии. Но чем больше энергия фотонов, тем в меньшей степени их излучение и поглощение зависят от внешнего поля. Поэтому изменяемая внешним полем часть бесконечной электромагнитной массы электрона остается конечной. Остальная полевая масса, не зависящая от внешнего поля и равная отброшенной полевой массе свободного электрона, не принимается во внимание. Следовательно, взаимодействие с вакуумом, зависящее от внешнего поля и образующее некоторую добавку к энергии связанного электрона, представляет собой конечную разность бесконечных энергий взаимодействий связанного и свободного электронов с нулевыми полями.

Подобная качественная расшифровка исходных идей перенормировки массы и заряда соответствует не только первоначальной нерелятивистской и упрощенной теории Бете, но и позднейшим, более сложным релятивистским концепциям. Некоторые из них, не выходя за рамки релятивистской квантовой механики, внесли в нее принципиально новые идеи. Среди последних центральное место занимает идея сверхмноговременного формализма. Она основана на новой трактовке времени. Последнее, несмотря на ковариантный по существу характер квантовой теории поля, выделено по сравнению с пространством при решении ее уравнений. Поэтому ковариантность теории требует дополнительного выявления, иногда довольно сложного. Сверхмноговременный формализм позволяет излагать теорию поля последовательно ковариантным образом. Речь идет

лишь о новой формулировке, так как квантовая теория поля — релятивистская теория и в этом смысле новый формализм непосредственно, сам по себе, не означает перехода к принципиально новой физической концепции. Но в истории науки новый математический аппарат, не означающий сам по себе перехода к иным физическим идеям, часто приводит к ним, позволяя увидеть новые опосредствования, логические связи и физические закономерности. ...

«Недорелятивизм» формального аппарата квантовой теории поля неоднократно отмечался в сороковые годы. Квантовая теория требует, чтобы сопряженные, определяющие поле величины подчинялись перестановочным соотношениям, в которых эти величины относятся к различным пространственным точкам и к одному тому же времени. Но понятие одного времени в различных пространственных точках, т. е. понятие одновременности, имеет смысл только в определенной системе отсчета и не является релятивистски инвариантным, т. е. не сохраняет свой смысл при переходе от одной лоренцевой системы к другой.

Перестановочные соотношения можно представить в виде соотношений на пространственной гиперплоскости — пространственном сечении четырехмерного мира, соответствующем некоторому постоянному для всех пространственных точек значению времени или, вообще, на пространственно-подобной гиперповерхности. Чтобы перейти к релятивистски инвариантному представлению, нужно приписать каждой точке поля локальное время; тогда плос-

кое пространственное сечение заменится гипер-поверхностью произвольного вида, и соотношения на такой поверхности будут ковариантными в отношении лоренцовых преобразований. Идея такой произвольной поверхности в четырехмерном мире была высказана Вейссом еще в тридцатые годы¹. В 1946 г. с помощью подобного представления Томонага² разработал релятивистски-инвариантную формулировку квантовой теории волновых полей. В 1948 г., после открытия радиационного сдвига и первых успехов метода перенормировки, Дирак³ и Швингер⁴ продолжили разработку сверхмноговременного формализма. Концепция эта является обобщением многовременного формализма Дирака — Фока — Подольского⁵, введенного в самом начале тридцатых годов. Дирак, Фок и Подольский приписывают особое время каждой частице и, кроме того, общее время — всему полю, с которым взаимодействуют частицы. Томонага вводит для каждой точки поля локальное время и рассматривает

¹ P. Weiss. Proc. Roy. Soc. 156A, 192 (1936); 169A, 102 (1938); 169A, 119 (1938).

² S. Tomonaga. Progr. of Theor. Phys., I, № 2, 27 (1946). Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954, стр. 1.

³ P. Dirac. Phys. Rev. 73, 1092 (1948).

⁴ I. Schwinger. Phys. Rev. 74, 1439 (1948). Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики», стр. 12.

⁵ P. Dirac, V. Fock, B. Podolsky. Sow. Phys. 2, 468 (1932). Русск. пер. В. А. Фок. Работы по квантовой теории поля. Л., 1957, стр. 70.

пространственную гиперповерхность, для которой он вводит требование, чтобы эта гиперповерхность была пространственно-подобной: никакие две точки на этой поверхности не могут быть связаны световым сигналом.

Дальнейшее развитие идеи Томонага содержалось в упомянутой работе Швингера. Показав, вслед за Томонага, что замена гиперплоскости пространственно-подобной гиперповерхностью позволяет придать ковариантный вид каноническим перестановочным соотношениям, Швингер рассматривает с этой новой позиции шредингеровское и гейзенберговское представление квантовой механики. В шредингеровском представлении вектор состояния изображает состояние в данный момент. Состояние системы в иной момент изображается другим вектором. Изменение состояния и соответственно изображающего его вектора зависит от постоянных операторов, которые указывают закон изменения вектора состояния в зависимости от времени. Сам оператор не зависит от времени. Такое представление обладает важным принципиальным недостатком. Оно не является ковариантным. В гейзенберговском представлении вектор состояния не меняется со временем, он описывает состояние системы в пространстве и во времени, т. е. всю историю системы. Гейзенберговское представление ковариантно, но оно обладает существенным неудобством. Правила коммутации, относящиеся к точкам, разделенным временно-подобным интервалом, могут быть установлены лишь решением уравнений движения.

Таким образом здесь кинематическую проблему трудно отделить от динамической.

В электродинамике, при установлении коммутации переменных поля, существенным преимуществом обладает шредингеровское представление, позволяющее отчетливо разграничить кинематическую и динамическую стороны дела. Но для электродинамики существенно и преимущество гейзенберговского представления — его ковариантность. Поэтому Швингер выбирает новое, комбинированное представление, ковариантное и в то же время позволяющее найти перестановочные соотношения для переменных поля в любых мировых точках. Такое представление Швингер назвал представлением взаимодействия. Оно было введено еще в 1934 г. Штюкельбергом¹ и по существу им пользовался Томонага². Представление взаимодействия основано на отделении свойств свободных и взаимодействующих полей. Основные свойства полей, которые присущи им в отсутствие взаимодействия, противостоят изменениям этих свойств при взаимодействии. Для свободных полей можно найти перестановочные соотношения переменных в любых точках пространства-времени. Что же касается взаимодействующих полей, то нужно взять уравнения движения для переменных в гейзенберговском представлении (т. е. пользуясь независимым от времени вектором состояния) и преобразовать их в уравнения свободных полей,

¹ E. Stückelberg, Ann. d. Phys. 21, 367 (1934).

² S. Tomonaga, Prog. of Theor. Phys. 1, № 2, 27 (1946).

описание которых дается переменным вектором состояния. Таким образом, связь между полями описывается при помощи вектора, зависящего от времени, со всеми преимуществами такого представления, и, вместе с тем, она описывается последовательно ковариантным образом. Швингер с помощью сверхмноговременного формализма выполнил эту программу:

Одновременно Фейнман выдвинул свою программу преобразования квантовой механики, оказавшуюся важным этапом исторической подготовки новой интерпретации принципа относительности. Фейнман дал новую трактовку нерелятивистской квантовой механики¹, релятивистское обобщение такой трактовки, приведшее к новой теории позитронов², и общую пространственно-временную трактовку квантовой электродинамики³.

Первым вариантом новой трактовки нерелятивистской квантовой механики была диссертация Фейнмана «Принцип наименьшего действия в квантовой механике» (1942), положенная впоследствии в основу упомянутой только что статьи 1948 г. Фейнман рассматривал квантовый аналог принципа Гамильтона. Эта

¹ R. Feynman. *Rev. Mod. Phys.* 20, 367 (1948). Русск. пер. в сб. «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955, стр. 167—207.

² R. Feynman. *Phys. Rev.* 76, 749 (1949). Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954, стр. 138—160.

³ R. Feynman. *Phys. Rev.* 76, 769 (1949). Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954, стр. 161—204.

проблема была подсказана некоторыми замечаниями Дирака¹. Если связать амплитуду вероятности не с пребыванием частицы в данный момент в определенной пространственной точке, а с ее движением, то появляется возможность вероятностной трактовки мировых линий и представления о наименьшем действии как о наибольшей вероятности действительной траектории частицы. Именно в этом сейчас наиболее интересная сторона идеи Фейнмана.

Фейнман рассматривает интеграл по времени от функции Лагранжа, взятый вдоль некоторой траектории, и ищет квантовое обобщение определенного таким образом классического действия. Для квантовой механики исходным является принцип суперпозиции амплитуд вероятности. Согласно этому принципу, вероятность некоторого события, осуществимого множеством способов, равна квадрату абсолютной величины суммы комплексных слагаемых, из которых каждое отвечает одному из способов. Пусть событием является не пребывание частицы в некоторой мировой точке, а движение частицы через некоторую область пространства — времени. Идеальное измерение может обнаружить в ней траекторию частицы, и квантовая механика с помощью принципа суперпозиции амплитуд вероятности позволяет найти вероятность положительного ответа. Вероятность обнаружения траектории внутри заданной области равна квадрату абсо-

¹ П. Дирак. Основы квантовой механики. М.—Л., 1937, стр. 132—135; Phys. Zs. Sowjetunion 3, 64 (1933).

лютой величины суммы комплексных слагаемых, из которых каждое отвечает одной из траекторий, проходящих через указанную область. Фейнман предполагает далее, что вклад каждой траектории определяется экспоненциальной функцией, показатель которой равен (с точностью до мнимой единицы) классической функции действия для данной траектории, выраженной в единицах, равных кванту действия. Сумма подобных вкладов от траекторий, идущих из прошлого в некоторую мировую точку, равна волновой функции, удовлетворяющей уравнению Шредингера.

Релятивистское обобщение подобной концепции было нелегким делом. Релятивистская квантовая механика не сводится к определению вероятностей пребывания частицы в мировой точке и ее прохождения через мировую область. Она иначе интерпретирует волновую функцию, рассматривая порождения и аннигиляции электронно-позитронных пар. Как связать эти понятия с понятием мировой линии себестождественной частицы?

Исходная идея Фейнмана — сохранение симметрии между прошлым и будущим. Частице, движущейся из прошлого в будущее, соответствует античастица, движущаяся из будущего в прошлое. Электрон, движущийся в сторону возрастания времени, может быть порожден вместе с позитроном, движущимся во времени попятно, т. е. проходящим в обратном порядке точки, пройденные в данном поле электроном. Если следить за зарядом частицы, принимая его абсолютную величину

за предикат, гарантирующий соботождественность частицы, то позитрон можно отождествить с электроном и рассматривать мировые линии электрона и позитрона как одну мировую линию. Эта точка зрения на позитрон, высказанная Штюкельбергом в 1942 г.¹ и самим Фейнманом в 1948 г.², получила последовательное развитие в статье о теории позитрона и далее в статье о пространственно-временной трактовке квантовой электродинамики. Во второй из них обсуждается не только движение электронов и позитронов в заданном внешнем поле, но и взаимодействия этих частиц, что и является проблемой электродинамики.

Непосредственно после появления работы Фейнмана (впрочем это относится и к другим работам, преобразовавшим в конце сороковых годов квантовую электродинамику,— к работам Томонага, Швингера, Дайсона и др.) была оценена возможность упрощенной записи и менее громоздкого вычисления матричных элементов сложных электродинамических процессов. Вместе с тем новая теория оценивалась с точки зрения устранения расходимостей. С течением времени эти стороны дела стали казаться менее важными, чем это представлялось вначале. Устранение расходимостей, как выяснилось, не требовало отказа от обычных методов квантовой электродинамики (их можно было обойти и без такого отказа), а для радикального решения проблемы новые ме-

¹ E. Stückelberg. *Helv. Phys. Acta* 15, 23 (1942).

² R. Feynman. *Phys. Rev.* 74, 939 (1948).

тоды были недостаточны. Тем самым на первый план выдвинулись физические идеи, скрытые или лишь частично раскрывавшиеся в новом формализме. С этой точки зрения могут быть сейчас оценены методы упрощения формул, содержащиеся в рассматриваемой сейчас работе Фейнмана. Фейнман пишет в ней, что упрощение обязано отказу от излишнего разделения тесно связанных процессов. О каких процессах идет речь? В первой статье, содержащей новую теорию позитронов, объединены мировые линии электронов и позитронов, рассматриваемых как электроны, попятно движущиеся во времени. Тем самым процессы, связанные с порождением электронно-позитронных пар, были формально объединены с процессами движения электронов. Теперь Фейнман объединяет и другие процессы — собственно квантово-электродинамические. Но значение такого объединения с ретроспективно-исторической точки зрения выходит за рамки упрощения формул. Речь идет по существу о таком пересмотре формализма, который неизбежно выдвигает на первый план и позволяет увидеть специфические закономерности и специфические соотношения, свойственные виртуальным процессам и отличающие эти процессы от действительных. Отметим попутно, что ретроспективная оценка и, следовательно, историческая трактовка появившейся десять лет назад теории возможна сейчас лишь с гипотетических и неоднозначных позиций. Такая оценка, теряя в однозначности, выигрывает в эвристической ценности.

В работе Фейнмана по-новому трактуются взаимодействия электронов на близких расстояниях. Для взаимодействия зарядов, находящихся на сравнительно больших расстояниях, пользуются понятием поля, позволяющим разделить, например, излучение фотонов и их поглощение. В случае столкновений частиц или их взаимодействий на близких расстояниях не следует разделять эти процессы и можно рассматривать обмен квантами между частицами как некоторый нерасчлененный процесс непосредственного взаимодействия. Можно сказать, что понятие поля, опосредствующего взаимодействие электронов, применимо к реальным фотонам, а понятие непосредственного взаимодействия — к виртуальным.

Гамильтонов формализм соответствует полевой концепции взаимодействия. Он позволяет найти будущее состояние движения частиц, если известно настоящее. Понятие состояния в данный момент не является лоренц-ковариантным. Отказавшись от этого понятия и, следовательно, от гамильтонова формализма, можно непосредственно и явным образом объединить принципы теории относительности и квантовой механики.

Таковы исходные идеи фейнмановской, пространственно-временной трактовки квантовой электродинамики. Так же как в случае сверхмноговременного формализма и представления взаимодействия, новые методы не претендуют на роль абсолютно необходимых методов. Инвариантная однозначная физическая основа различных математических методов только начина-

ет вырисовываться и пока видны лишь ее неопределенные контуры. Их определению способствует выяснение эквивалентности новых формальных методов.

В 1929 г. Дайсон показал эквивалентность метода Томонага и Швингера и метода Фейнмана сначала для движения одного электрона в заданном внешнем поле¹, а затем и для общего случая², когда эти методы уже не тождественны по существу, а дополняют друг друга. На основе ковариантной трактовки квантовой электродинамики, к которой пришли Томонага, Швингер и Фейнман, Дайсон решает задачи рассеяния, в котором участвуют электроны, позитроны и фотоны. Процессы рассеяния, приводящие к аннигиляции и порождению указанных частиц, описываются матрицей рассеяния. Элементы последней вычисляются на основе теории возмущений. Расходимости устраняются перенормировкой массы и заряда.

Переходя к физическому смыслу эквивалентных методов, Дайсон сопоставляет гамильтонов формализм и матрицу Гейзенберга двум картинам мира. Первая получается в том случае, когда точность измерений ограничена только предельной скоростью света и постоянной Планка — элементарным квантом действия. Теория

¹ F. Dyson. Phys. Rev. 75, 486 (1949). Русск. пер. в сб. «Сдвиг уровней атомных электронов». М., 1950, стр. 94—122.

² F. Dyson. Phys. Rev. 75, № 11, 1736 (1949). Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954, стр. 205—238.

индивидуальных ошибок показывает возможности и пределы точности измерений в таких границах. Они позволяют с бесконечной точностью определить в каждой точке поле, не возмущенное взаимодействием с другими полями. Но именно эта бесконечная точность задания положения частицы служит причиной появления бесконечных значений при измерении энергии взаимодействия. Подобной картине соответствует гамильтонов формализм. Другая картина мира ограничивает точность измерений не только указанными выше константами, но также постоянной тонкой структурой и массой. В ней точность задания положения частицы ограничена, так же как ограничена возможность измерения напряженности поля, не возмущенного взаимодействием с другими полями. Можно думать, что будущая теория не будет выводить конечные значения из бесконечных, как это делается сейчас. Напротив, она представит неограниченную точность определения координат (и бесконечные значения энергии взаимодействия) как предельную картину, выводимую при определенных допущениях из картины, в которой фигурируют только конечные значения. Подобная перспектива появления физической теории, в которой неограниченная точность измерений координат будет вторичным, а система конечных значений первичным понятием, имеет весьма существенное значение для определения современных тенденций релятивизма.

Под современными тенденциями релятивизма здесь следует понимать не только и даже не

столько возможные применения принципа относительности, сколько тенденции, ведущие к модификации самого принципа. С этой точки зрения сейчас важны не только ответы и решения, которые дала квантовая электродинамика в связи с проблемами вакуума, но и вопросы, которые она поставила и которые, по-видимому, неразрешимы без пересмотра принципа относительности. Мы перейдем сейчас к подобным вопросам и к некоторым попыткам их решения. Указанные попытки продемонстрировали коренной характер современных затруднений теории поля, не преодолев эти затруднения.

5

Связь бесконечных значений энергии и массы с коллизией релятивизма и квантовой дискретности становится особенно рельефной, если конкретизировать будущую теорию, о которой писал Дайсон, в виде представления об элементарной длине, которая дает естественную основу для введения в теорию некоторого «обрывающего фактора». Этот фактор соответствует тому или иному распределению заряда в элементарном объеме, т. е. «форме» электрона. Поэтому его называют «формфактором». Наличие формфактора или элементарной длины¹ позволяет устранить расходимости, но не допускает непосредственного релятивистского обобщения: для элементарного объема, заполненного неделимой абсолютно твердой частицей, нужно было бы

¹ D. Wataghin. Zs. f. Phys. 88, 92 (1934).

признать возможной мгновенную передачу сигнала.

Попыткой примирить концепцию протяженных частиц с принципом относительности является теория деформируемого формфактора, выдвинутая М. А. Марковым¹, который ввел понятие динамически деформируемого формфактора, зависящего от внешних сил и соответствующего поэтому негомогенной частице, напоминающей (при всей условности подобного и вообще любого макроскопического образа) не твердый шарик, а деформируемое облако. В области, занятой такой частицей, свет распространяется со скоростью, не превышающей скорости света. Подобное примирение концепции протяженной частицы с принципом относительности приводит к некоторым соображениям, касающимся массы элементарных частиц. Если формфактор изменяется под влиянием сил, то для него могут быть написаны уравнения движения и введено новое поле, фигурирующее в таких уравнениях. Новым полем могут служить другие поля, взаимодействующие с данным. С этой точки зрения можно рассматривать «затравочную» массу частицы, например протона, как результат взаимодействия со всеми полями, а добавочную массу (электромагнитную массу протона) как результат взаимодействия с данным полем, в рассматриваемом примере — с электромагнитным полем, ответственным за

¹ М. Марков. ЖЭТФ, 10, 1311 (1940); 25, 527 (1953); УНФ 51, вып. 3, 317 (1955); Nuovo Cimento, Suppl. 4, 760 (1956); М. А. Марков. Гипероны и К-мезоны. М., 1958, стр. 190—194.

электромагнитную массу протона. Заряд протона, не зависящий от его взаимодействия с электромагнитным полем, зависит от других полей, обладающих электрическим зарядом. Такое зарядовое облако, быть может, определяет форм-фактор, обрывающий взаимодействие протона с электромагнитным полем.

М. А. Марков предположил, что быть может удастся ограничить требование лоренц-ковариантности масштабами, превышающими некоторую минимальную область, внутри которой атомизм заряда препятствует точности определения координат. В указанной области нельзя определить скорость сигнала и, таким образом, нельзя обнаружить нарушение лоренц-ковариантности.

Развивая эту идею, М. А. Марков попытался обобщить понятие координаты¹. Обобщение состоит в отказе от условий, обеспечивающих сколь угодно точное измерение положения частицы в пространстве и во времени. Подобные условия (наличие сколь угодно малых твердых масштабов, часов, отсчитывающих сколь угодно малые промежутки времени, и непрерывность траектории на сколь угодно малых участках) не вытекают однозначно из эксперимента. Если указанные условия нарушены, можно говорить о точном значении координаты, как о статистическом центре, связывая точное значение с точкой симметрии отклонений, образующих «внутреннее статистическое пространство частицы».

¹ М. А. Марков. Гипероны и К-мезоны. М., 1958, стр. 194—205.

Последнее является не метрическим, а аффинным.

Подобная схема аффинного пространства со статистической метрикой позволяет сохранить субстанциальную относительность пространства в микромире ценой некоторого феноменологического ограничения принципа относительности. Если нельзя измерить скорость сигнала из-за атомизма заряда, то принцип относительности, продолжая царствовать, перестает управлять в микрообластях, так как эксперимент не может проверить, выполняются ли здесь релятивистские предписания. В концепции деформируемого формфактора принцип относительности управляет процессами в минимальных областях, но его действие компенсируется деформациями структуры этих областей. Но, быть может, следует вообще изъять минимальные пространственно-временные области из подчинения принципу относительности?

Наряду и иногда в связи с концепциями нелокального поля, в качестве обобщения современной теории поля выдвигаются нелинейные концепции. Первая нелинейная теория поля была выдвинута в 1912 г. Густавом Ми¹. В этой теории обобщенные максвелловы уравнения приводят к существованию внутри электронов сил, уравновешивающих кулоновское отталкивание частей электрона, а вне электрона они незаметны и не приводят к отклонению от обычных электродинамических соотношений. Уравновешивающие силы — также электрические по сво-

¹ G. Mie. Ann. d. Phys. 37, 511 (1912); 39, 1 (1912); 40, 1 (1913).

ей природе — появились в теории вместе с нелинейным обобщением уравнений Максвелла. Но в уравнениях Ми фигурировали не только производные потенциалов, но и сами потенциалы и теория не была калибровочно-ковариантной. Кроме того, теория Ми исходила из физических предпосылок, которые теперь кажутся архаичными: ведь в то время не знали ни о волновых свойствах электрона, ни о его спине и магнитном моменте. Поэтому попытка представить структуру и характер силовых взаимодействий внутри электрона не могла быть успешной. Но теория Ми сыграла положительную роль, явившись образцом единой теории, в которой свойства частиц выводятся из свойств поля. При этом они являются не сингулярными точками (в этом случае уравнения поля не были бы применимы в точках и не могли бы определить движение точечной частицы), а малыми объемами, в которых сосредоточена энергия и заряд поля и которые подчинены уравнениям поля — уравнения их движения выводятся из уравнений поля.

Калибровочно-ковариантная и лоренц-ковариантная нелинейная теория поля была сформулирована в 1934 г. Борном и Инфельдом¹.

Борн заменил выражение для функции Лагранжа в классической электродинамике другим выражением, включающим некоторую постоянную («максимальное поле»). Новое выражение

¹ M. Born, Proc. Roy. Soc. 143A, 410 (1934); M. Born, L. Infeld, Proc. Roy. Soc. 144A, 425 (1934); M. Born, Ann. Inst. Poincaré 7, 155 (1937).

функции Лагранжа, как показали Борн и Инфельд, представляет собой простейшее выражение, удовлетворяющее требованию лоренц-ковариантности. Из новых нелинейных уравнений поля следует, что в случае точечного заряда кулоново поле не обращается в бесконечность, а равно «максимальному полю». Соответственно исчезают бесконечные значения энергии и массы, связанные с продольным полем, но остаются бесконечные значения поперечной энергии и массы.

Нелинейная концепция Борна и Инфельда позволила конкретнее представить нелинейные эффекты, связанные с нарушением принципа суперпозиции, присущего линейным полям. В частности можно было предсказать рассеяние света на свете. Релятивистская квантовая механика позволила физически интерпретировать подобный нелинейный эффект с помощью представления об элементарных трансмутациях. Если два фотона при столкновении порождают электронно-позитронную пару, которая при аннигиляции дает новую пару фотонов, то процесс сводится к столкновению двух фотонов (двух электромагнитных волн), приводящему к появлению иных фотонов (иных волн), т. е. к рассеянию света на свете.

Нелинейные соотношения теории поля могут соответствовать превращению частиц в пары иных частиц и затем регенерации первоначальных частиц. Поэтому мысль о нелинейных эффектах как исходных процессах ведет к представлению об исходных, элементарных трансмутациях, из которых складывается вторичная,

основанная на идентификации регенерируемых частиц, картина движения.

Нелинейные концепции ведут также к представлению о протяженных элементарных пространственно-временных ячейках, в которых происходят исходные трансмутации. Нелинейные эффекты состоят в превращении фотонов в электроны и позитроны и этих последних — снова в фотоны, а также в других, аналогичных названным, трансмутационных процессах. Поэтому в нелинейных обобщениях электродинамики и вообще в нелинейных теориях поля, фигурирует некоторая постоянная, содержащая комптоновскую длину электрона, или аналогичная константа, играющая роль меры «самодействия», действия поля на себя. К этому понятию мы вскоре вернемся.

6

Наиболее важной экспериментальной основой перехода к новым принципам квантовой теории поля было открытие мезонов и мезонных или ядерных полей. Оно приобрело первостепенное значение благодаря большому сдвигу в физической картине мира, сдвигу, тесно связанному с развитием техники и культуры, с тем, что называют началом атомной эры. В центре науки оказалась проблема неэлектрических сил, действующих между нуклонами. Эти неэлектрические силы переносятся мезонами (π -мезонами или пионами), которые играют внутри ядра такую же роль, как фотоны в областях, где действуют электромагнитные поля.

Каждый прорыв науки в новую область со специфическими полями и квантами полей не только требует обобщения старых теорий с тем, чтобы они могли охватить новые закономерности, но и приводит к разделению старых понятий и величин на сопоставимые с новыми и не сопоставимые с ними.

Изучение электромагнитных полей привело к новой релятивистской теории. В ее уравнения входит величина, служащая мерой приближения механического движения к распространению электромагнитного поля, мерой подчинения механических закономерностей более общим закономерностям. Эта величина — отношение механической скорости к скорости света — имеет предел, равный единице, позволяющий оценивать «степень релятивизма» в каждой механической задаче. Для механики тел с ненулевой массой покоя механика фотонов (в которой «степень релятивизма» равна единице) служит релятивистским образцом, а механическая скорость, отнесенная к скорости света, — коэффициентом, измеряющим приближение к образцу. Процессы на световом конусе являются в этом смысле «релятивистски-показательными» для процессов внутри светового конуса.

Можно увидеть некоторую аналогию между «степенью релятивизма» в макроскопической теории и степенью квантово-релятивистского обобщения в теории микромира. Для квантовой электродинамики эта степень невелика, она измеряется постоянной Зоммерфельда. В случае взаимодействия электромагнитного поля с электронно-позитронным при очень больших энер-

гиях квантово-релятивистское обобщение становится весьма существенным, и это создает трудности при применении метода возмущений. Для квантовой электродинамики существует некоторая «квантово-релятивистская показательная область», где значение квантово-релятивистского обобщения так велико, что метод возмущений должен уступить место новым методам. Такова теория ядерных или мезонных полей.

Идея переноса ядерных сил частицами с ненулевой массой покоя была высказана в 1934 г. И. Таммом и Д. Иваненко¹. В следующем году Юкава² выдвинул свою теорию ядерных сил. Ход мысли Юкавы можно изложить, пользуясь следующими качественными понятиями. Ядерные силы действуют на расстояниях порядка 10^{-13} см и быстро ослабевают при переходе к большим расстояниям. Полю, действующему на столь небольших расстояниях, должны соответствовать частицы ненулевой массы и можно рассчитать, какой именно массы. Этот вывод, который был высказан в виде количественной теории, соответствует картине излучения и поглощения виртуальных частиц. В электродинамике виртуальное («в кредит») излучение и поглощение объясняет на основе принципа неопределенности зависимость энергии фотонов и соответственно частоты излучения от расстояния между частицами, обменивающимися вир-

¹ И. Тамм, Д. Иваненко. Nature 133, 381 (1934).

² H. Yukawa. Proc. Phys. Mat. Soc. Japan 17, 48 (1935).

туальными фотонами. Частицы, расположенные далеко одна от другой, могут обмениваться лишь длинноволновыми фотонами с малой энергией. Количественная трактовка этих закономерностей приводит к объяснению обратной пропорциональности силы и квадрата расстояния. Если вместо фотонов фигурируют другие частицы излучения, т. е. вместо электромагнитного поля мы имеем поле иной природы, закон взаимодействия может измениться. Пусть кванты излучения — частицы с ненулевой массой покоя и соответственно с энергией покоя, равной массе, помноженной на квадрат скорости света. Тогда энергия, переносимая частицами поля, не может быть меньше указанной величины и соответственно (согласно принципу неопределенности) взаимодействие может осуществляться в течение времени, не превышающего определенной длительности, или, что то же самое (если эту длительность помножить на скорость света), взаимодействие может происходить лишь в пределах определенного пространства. Пространство это зависит от энергии покоя, следовательно, от массы покоя квантов поля. Предположив, что ядерные силы действуют на расстоянии порядка 10^{-13} см, можно вычислить массу частицы, переносящей ядерные силы. Она более чем в сто раз превышает массу электрона. Следовательно, кроме электрона и почти в две тысячи раз более тяжелых нуклонов должны существовать частицы со средней массой, переносящие ядерные силы.

Эти частицы были названы мезонами. Открытие мезонов было результатом наблюдения кос-

мических лучей и применения все более тонких экспериментальных методов регистрации частиц, входящих в состав этих лучей¹. В 1936—1938 гг. Андерсон и Неддермейер² открыли в космическом излучении частицы с массой, равной 210 массам электрона, и с продолжительностью жизни около двух миллионных долей секунды. Эти частицы, получившие впоследствии название μ -мезонов или мюонов, были отождествлены с «тяжелыми квантами» Юкавы. Исследование мюонов привело к ряду наблюдений и обобщений, сыгравших большую роль в развитии теории элементарных частиц и релятивистской квантовой физики в целом. Были изучены процессы распада мюонов, весьма близкие к процессам β -распада нуклонов и приведшие впоследствии к очень сложным контраверзам. Гелл-Манн и Розенбаум в обзоре, посвященном элементарным частицам³, назвали существование мюона «изысканным коварством природы», подкинувшей людям частицу, свойства которой смешали все карты и не укладывались в рамки существовавших схем. Но это было позже и к этому мы еще вернемся. Сейчас отметим другую особенность мюона, весьма важную для истории релятивизма.

¹ См. C. F. Powell. Mesons. Rep. Progr. in Physics 13, 350 (1950). Русск. пер. УФН 45, 15 (1951); Н. Биргер и И. Розенталь. УФН 45, 104 (1951); см. также обзор В. Л. Гинзбурга в сб. «Мезон». М.—Л., 1948; Д. В. Скобельцын. УФН 41, 331 (1950).

² C. Anderson, S. Neddermeier. Phys. Rev. 51, 884 (1937).

³ M. Gell-Mann, E. Rosenbaum. Scientific American. 197, 72 (1957). Русск. пер. УФН 64, вып. 2, 391 (1958).

Тот факт, что мюоны попадают на земную поверхность, необъясним с дорелятивистских позиций. Образовавшись в верхних слоях атмосферы и двигаясь затем даже со скоростью света, мюон мог бы в течение двух микросекунд пройти около шестисот метров. Лоренцово удлинение времени жизни мюона в системе, относительно которой он движется (при энергии порядка 100 000 Мэв время жизни мюона возрастает в тысячу раз), или (в системе, относительно которой мюон покоится) сокращение пространственного расстояния — толщины атмосферы объясняет попадание мюонов на поверхность Земли.

Эксперименты второй половины сороковых годов показали, что мюоны не могут быть отождествлены с «тяжелыми квантами» Юкавы. Их взаимодействие с нуклонами на много порядков слабее, чем требовалось для переноса ядерных сил. В это время были высказаны гипотезы, допускавшие существование двух и более типов мезонов. В 1947 г. Латтес, Оккиалини и Пауэлл¹ открыли π -мезоны (они и дали обоим типам мезонов их современные названия), вступающие в сильное взаимодействие с нуклонами и, несомненно, идентичные «тяжелым квантам» Юкавы. π -мезоны (пионы — по терминологии Ферми) могут иметь положительный, отрицательный и нулевой заряд. Масса положительного и отрицательного π -мезона равна примерно 273, а масса нейтрального π -мезона — 264 электронным массам.

¹ C. Lattes, G. Occhialini, C. Powell. «Nature» 160, 453, 486 (1947).

Как уже сказано раньше, значение теории мезонного поля для теории квантовых полей и элементарных частиц в целом состоит прежде всего в том, что мы встречаемся здесь с более сильным, по сравнению с электромагнитным, взаимодействием с нуклонами.

Пользуясь уже встречавшимся образом, можно сказать, что облако виртуальных мезонов, излучаемых в поглощаемых нуклоном, гораздо гуще, чем облако виртуальных фотонов вокруг электрона. Параметр, играющий в мезодинамике роль, аналогичную роли постоянной тонкой структуры ($1/137$), больше единицы. Поэтому разложение по степеням этого параметра уже не имеет смысла и методы теории возмущений не применимы в мезодинамике. Здесь нашел применение другой метод, так называемый метод Тамма — Данкова. Он аналогичен методу, предложенному в 1934 г. В. А. Фоком¹ для решения некоторых задач квантовой электродинамики. И. Е. Тамм² в 1945 г. сформулировал этот метод, а пять лет спустя его развил Данков³. Метод Тамма — Данкова состоит в разложении строгого уравнения поля по числу частиц, переносящих взаимодействие, и обрывании полученной бесконечной системы уравнений на определенном числе частиц. Метод этот нашел применение в современной мезодинамике⁴.

Мезодинамика, точнее, теория π -мезонных полей, представляет собой своеобразное «*stapento*

¹ В. Фок. *Sov. Phys.* 6, 425 (1934).

² И. Тамм. *Journ. of Phys.* 9, 445 (1945).

³ S. Dancoff. *Phys. Rev.* 78, 382 (1950).

⁴ В. Силин, В. Файнберг. *УФН* 56, 569 (1955).

погі» для методов теории возмущений в целом, она подчеркивает условно-рецептурный характер этих методов в электродинамике и толкает мысль теоретика к переходу от точечного взаимодействия в сторону некоторого размазанного взаимодействия конечного радиуса. Затруднения мезодинамики бросают тень на всю теорию квантованных полей и элементарных частиц.

7

Одной из центральных задач общей теории квантованных полей и элементарных частиц является изучение взаимодействий, а также свойств или внутренних степеней свободы элементарных частиц, связанных с их взаимодействием.

В настоящее время известны четыре типа взаимодействий: 1) сильные, 2) электромагнитные, 3) слабые и 4) гравитационные. Они характерны для определенных полей и определенных элементарных частиц. Каждый тип взаимодействия характеризуется некоторой константой связи; об одной из них — постоянной тонкой структуры — речь уже шла раньше.

Сильные взаимодействия характеризуются константой связи, по порядку величины равной единице. Примером сильного взаимодействия является взаимодействие нуклонов — виртуальное порождение π -мезона нуклоном и поглощение его.

Электромагнитные взаимодействия мы встречаем в электронно-позитронно-фотонном поле. Постоянная Зоммерфельда ($1/137$) так мала, что

это поле в большом числе случаев может рассматриваться как два независимых поля — электронно-позитронное и электромагнитное (фотонное).

Слабое взаимодействие отличается некоторыми особенностями, открытыми в последние годы. Пока мы ограничимся примером слабого взаимодействия, известным уже давно, задолго до того, как было введено понятие слабого взаимодействия. Этот пример — β -распад, т. е. процесс, при котором нуклон излучает электрон и нейтрино. Подобное излучение может рассматриваться как электронно-нейтринное поле, а виртуальное излучение и поглощение электрона и нейтрино — как взаимодействие нуклона с электронно-нейтринным полем.

В известном смысле путь, приведший Ферми к идее электронно-нейтринного поля, противоположен пути Юкавы. В 1905 г. Эйнштейн, выдвинув концепцию фотонов, положил начало корпускулярным представлениям о полях. Юкава, исходя из существования поля (ядерного), искал частицы, которые могли бы играть для этого поля роль, аналогичную роли фотона для электромагнитного поля. Ферми имел уже определенные частицы, возникающие при β -распаде, — электроны и нейтрино. Он нашел поле, которое соответствует этим частицам, как своим квантам. Это — поле Ферми. Взаимодействие нуклона с полем Ферми (электронно-нейтринных полей) — слабое взаимодействие. Таковы же взаимодействия гиперонов и мезонов с полями, ответственными за тот или иной распад этих частиц. Слабые взаимодействия характе-

ризуются константой связи, приблизительно в 10^{-13} раз меньшей, чем константа связи нуклонов с мезонным полем, т. е. константа связи ядерного взаимодействия.

Кроме перечисленных, существует ультраслабое, гравитационное взаимодействие, которое характеризуется безразмерной константой порядка 10^{-38} .

Картина виртуальных излучений и поглощений позволяет дать весьма наглядную интерпретацию констант связи. Выше уже говорилось, что взаимодействие заряженной частицы с электромагнитным полем можно рассматривать как порождение и последующее поглощение виртуальных фотонов, а взаимодействие нуклона с π -мезонным полем (сильное взаимодействие) — как существование облака виртуальных мезонов, окружающих нуклон. Остановимся на этом примере. Протон, рассматриваемый в течение некоторого времени, большого по сравнению с длительностью излучения и поглощения виртуального π -мезона, представляет собой смесь двух состояний. Одно состояние — это собственно протон, второе состояние — это диссоциированный протон, т. е. нейтрон плюс положительный π -мезон. Промежутки времени, когда протон находится в диссоциированном состоянии, занимают некоторую часть (около двадцати пяти процентов) общего времени. Очевидно, доля времени, когда протон находится в диссоциированном состоянии, является мерой ядерного взаимодействия. Она соответствует константе связи протона с мезонным полем. Аналогичным образом каждую константу связи

можно считать «коэффициентом инобытия» частицы. Виртуальное инобытие может быть настолько редким и незначительным, что существование себестождественной частицы можно отделить от ее «инобытия». Если виртуальные диссоциации достаточно часты, подобное отделение становится невозможным или по крайней мере затруднительным. Немного позже мы остановимся на проблеме максимального «инобытия» — максимального взаимодействия полей, а сейчас перейдем к ультраслабому, гравитационному взаимодействию.

Чтобы учитывать в теории микромира гравитационные поля, нужно обобщить волновое уравнение частицы таким образом, чтобы оно соответствовало не только специальному принципу относительности (было лоренц-ковариантным), но и общему принципу относительности, т. е. чтобы оно было общековариантным. Общековариантные квантовые концепции появились сразу же после опубликования работ Дирака, положивших начало релятивистской квантовой механике и квантовой электродинамике. Общая теория относительности пользуется геометрическим образом параллельного переноса четырехмерного вектора. Общековариантная форма дираковского спинорного уравнения может быть получена, если применить понятие параллельного переноса к спинору. Эта идея легла в основу геометризации теории Дирака¹.

¹ В. Фок, Д. Иваненко. *S. R.* 188, 1470 (1929); *V. Fock. Zs. f. Phys.* 54, 798 (1929); *ЖРФХО*, ч. физ. 62, 133 (1930); *H. Weyl. Zs. f. Phys.* 56, 330 (1920); *Naturwiss.* 19, 49 (1931); *E. Schrödinger. Berl. Ber.* 105

В настоящее время квантовая теория тяготения пришла к некоторым результатам, существенным для теории полей и их взаимодействий.

Квантовая теория тяготения должна, очевидно, исходить из соотношения неопределенности для сопряженных переменных гравитационного поля, рассматривая компоненты метрического тензора и тензора кривизны как волновые функции, подобно напряженности электромагнитного поля¹. Для сильного гравитационного поля мы не можем сопоставить каждой парциальной волне частицу — квант поля. Но для слабого гравитационного поля эта задача разрешима². Кванты слабого гравитационного поля — гравитоны позволяют применить к теории тяготения ряд понятий, разработанных в электродинамике, мезодинамике и теории электронно-нейтринного поля. Специфически квантовыми процессами в теории тяготения являются гипотетические превращения гравитонов в другие частицы и обратные трансмутации, которые при энергиях, примерно в 10^{21} раз превышающих собственную энергию частицы, могут быть равновероятны с известными сейчас трансмутациями³.

(1932); I. Schouten. Journ. Math. Phys. 10, 239, 272 (1931); V. Bargman. Berl. Ber. 346 (1932); G. McVittie. Month. Not, 92, 868 (1932); L. Infeld, B. van der Warden. Berl. Ber. 380 (1933); Levi-Civita. Berl. Ber. 240 (1933).

¹ М. Осборн. Phys. Rev. 75, 1579 (1949); А. Соколов, Д. Иваненко. Квантовая теория поля. М.—Л., 1952, стр. 656.

² Там же, стр. 657—675.

³ А. Соколов, Д. Иваненко. Квантовая теория поля. М.—Л., 1952, стр. 675—679.

Существуют попытки связать общековариантную формулировку квантовой механики с отказом от некоторых положений последней. Вижье¹ считает причиной расходимостей в электродинамике линейный характер теории и представление о непротяженной частице. Он рассматривает частицу как сингулярность поля, опираясь при этом на результаты Эйнштейна, Инфельда, Громмера и других — на вывод уравнений движения из уравнений гравитационного поля.

Общековариантная квантовая концепция может оказаться необходимой основой обобщения существующей теории, несмотря на незначительность гравитационных взаимодействий в микромире. Чтобы построить такую концепцию и применить ее к квантовой электродинамике, необходимо, быть может, обобщить принцип эквивалентности, относящийся лишь к тяготению, таким образом, чтобы он был справедлив для электромагнитного поля и мезонных полей. Такую программу выдвинул в 1955 г. Оскар Клейн².

Однако общая теория относительности стоит, как это показал Вигнер³, в ином отношении

¹ I. P. Vigièr. C. R. 235, 1107 (1952); 235, 1372 (1952); «La physique quantique restera-t-elle indéterministe?». Paris, 1953, p. 89—111. Русск. пер. «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955, стр. 145—166.

² См. сб. «Нильс Бор и развитие физики». М., 1958, стр. 129—156.

³ Wigner. Rev. of Mod. Phys. 29, 255 (1957). Русск. пер. УФН 65, вып. 2, 257 (1958).

к квантовой физике, чем специальная теория. Современная квантовая физика оперирует понятиями положения и импульса, имеющими определенный смысл в специальной теории относительности. Поэтому вопрос о лоренц-ковариантности квантовой теории, т. е. вопрос об ее соответствии специальному принципу относительности, может быть поставлен как логически непротиворечивый вопрос.

Возможность непротиворечивой постановки вопроса еще не предопределяет положительного ответа. Быть может, требование лоренц-ковариантности заставит далее модифицировать квантовую теорию, быть может оно окажется невыполнимым без изменения смысла самого принципа относительности. Как бы то ни было, вопрос о согласовании квантовой механики со специальной теорией относительности не может быть отведен «с порога», без разбора обеих теорий по существу.

Общая теория относительности придает новый смысл понятиям положения и импульса частицы, не известный ни специальной теории, ни квантовой механике. В названных теориях можно было говорить об относительной (в данной системе) неподвижности частицы, т. е. об определенном положении частицы в определенной системе отсчета. В общей теории понятие относительной неподвижности частицы по отношению к другой, т. е. понятие неизменного расстояния между частицами, теряет, вообще говоря, свой прямой смысл. Гравитационное поле меняет пространственную метрику и ставит ее в зависимость от времени. Значит, тела не могут

быть неподвижны по отношению друг к другу ни в одной системе отсчета.

Понятие неподвижности (определенного положения в системе отсчета) теряет смысл, так же как понятие определенной скорости и, соответственно, импульса. Координатная система общей теории относительности — моллюскообразная система. Она имеет физический смысл, если совпадает с сеткой событий, т. е. если узел гауссовой координатной сети обозначает мировое событие — пребывание частицы в определенном пространственном пункте в определенный момент времени. В общей теории относительности фраза «частица находится в данном пункте» не имеет прямого геометрического смысла ни в одной системе отсчета. Поэтому для частицы в гравитационном поле (обязывающем рассматривать вопрос с точки зрения общей теории относительности) «пребывание» частицы означает ее столкновение с другой частицей. Столкновение это локализовано в соответствии с энергией частиц — для частиц с высокой энергией место столкновения может быть установлено с большой точностью. Поэтому плотность координатной сети пространственно-временных узлов пропорциональна плотности энергии, густоте мировых линий в рассматриваемой четырехмерной области.

Вигнер показывает, что расстояния между узлами координатной сетки могут быть установлены с еще большими ограничениями, чем положения этих узлов. Он предполагает, что расстояния устанавливаются при помощи часов, движущихся по параллельным мировым

линиям. Это дает прямой способ измерения временно-подобных интервалов и косвенный — для измерения пространственно-подобных. Световые сигналы определяют «поперечные» интервалы, а отсчитываемые часами периоды — «продольные» интервалы (на одной и той же мировой линии). Но часы — существенно макроскопические приборы. Точность их показаний для микроскопических областей ограничена дискретностью действия. Световые сигналы могли бы переносить от часов к часам бесконечно малые импульсы, которые воздействовали на бесконечно легкие часы, если бы дискретность действия не вводила в игру неопределенность сопряженных динамических переменных. Квантовые ограничения, вытекающие из соотношений неопределенности, делают невозможными бесконечно малые импульсы, действующие на часы. Часы должны обладать минимальной массой, чтобы определять с заданной точностью интервалы времени. Из указанных пределов точности вытекает, что точность определения кривизны пространства ограничена и кривизна не может быть установлена в точке. Кривизна мира определена лишь в среднем для конечных пространственно-временных областей.

К этому можно прибавить следующие соображения. Кривизна мира является результатом универсального взаимодействия вещества во всех его видах с гравитационным полем. Кривизна мировых линий — единственный эффект указанного взаимодействия, трансмутационные эффекты обладают ничтожной вероятностью, если сравнивать гравитационное взаимодействие

с другими взаимодействиями. Именно поэтому гравитационное поле может быть представлено в виде изменения геометрических свойств пространства с точностью до весьма маловероятных квантово-трансмутационных эффектов.

В конце концов именно порядок величины свойственной гравитационному взаимодействию константы связи, ничтожная плотность облака гравитонов, окружающего частицу вещества, ничтожная мера гравитационного «инобытия» частиц определяют и геометрический характер и универсальность гравитационного взаимодействия и совпадение гравитационной массы с инертной массой тел.

Порядок величины константы связи, свойственной другим взаимодействиям, определяет их отличие от гравитационного взаимодействия.

«Негеометризуемость» электромагнитного поля (даже при переходе к неримановым, но архимедовым геометриям) определяется большой величиной постоянной тонкой структуры ($1/137$) по сравнению с соответствующей константой гравитационного поля. При движении электрона в атоме водорода картина может свестись к искривлению пространства вокруг протона, но эта картина будет прерываться негеометрическими процессами излучения.

Малая величина константы связи указывает на большую меру себестоимости движущегося объекта, на отсутствие внутренних изменений (аристотелевских $\phi\theta\rho\acute{\alpha}$ и $\gamma\acute{\epsilon}\nu\eta\sigma\iota\varsigma$) при движении, имеющем поэтому характер перемещения ($\phi\theta\rho\acute{\alpha}$) и поддающемся чисто геометрическому представлению.

Мы вернемся к этому вопросу после того, как рассмотрим внутренние свойства элементарных частиц, изменения которых становятся все более существенными при переходе от гравитационных взаимодействий ко все более интенсивным.

8

Механическая (в самом общем смысле) картина мира оперирует акцидентальными пространственно-временными предикатами частиц и их систем; в этой картине системы обладают инвариантными (структурными) пространственно-временными свойствами, а составляющие их частицы — пространственными координатами, зависящими от избранной системы отсчета. Себетождественность частиц гарантируется предельными понятиями механической теории. Когда данная конкретная механическая картина сменяется другой более общей и точной, предельные, эмпирические, не выводимые из других, гарантирующие себетождественность свойства физических объектов оказываются результатом движения или расположения других объектов. Классический пример — переход от атомистики XIX в. к новой атомистической картине вещества. Атомистика XIX в. знала несколько десятков различных типов атомов. Последние различались атомным весом и множеством других химических и физических свойств. Менделеев нашел закономерности сочетания этих свойств, прежде всего периодическую зависимость валентности и прочих химических свойств, от атомного веса. Указанная

зависимость оказалась настолько отчетливой, что Менделеев мог рассматривать нарушения периодичности не как аргумент, ставящий ее под сомнение, а как свидетельство недостаточной точности исходных наблюдений либо приближенного характера первоначально найденного вида периодической закономерности.

Современная ситуация напоминает шестидесятые годы — время создания таблицы Менделеева. Уже намечаются эмпирические закономерности, связывающие одни свойства элементарных частиц с другими свойствами и позволяющие ввести естественную систематику частиц. Можно думать, что на этот раз систематика не будет отделена от своей каузальной расшифровки столь большим интервалом. Но не это обстоятельство ограничивает аналогию. Расшифровка периодичности состояла в квантово-механическом представлении об атомах как системах электронов и ядер. Расшифровка строящейся сейчас естественной классификации элементарных частиц выйдет за рамки механических концепций радикальнее, чем при квантовой расшифровке таблицы элементов. Расшифровкой менделеевской периодичности служит квантово-механическая картина атома; механическая картина, ограниченная перестановочными соотношениями, приводящими к дискретным значениям энергии электронов, к дискретной структуре их атомных орбит. Поэтому любая условная, абстрактная геометрическая схема, изображающая зависимость химических и физических свойств атомов, может быть сведена (с отмеченными ограничениями)

к пространственно-временной схеме. Абстрактная геометрическая схема внутренних свойств элементарных частиц не может быть сведена к пространственно-временной схеме, т. е. к конфигурации мировых линий. Напротив, свойства пространства-времени выражающиеся в разрешенных конфигурациях мировых линий, зависят, по-видимому, от внутренних, трансмутационных процессов.

В этом существенное отличие систематики элементарных частиц от систематики химических элементов, созданной задолго до того, как стали известны превращения элементов.

Могут ли трансмутационные процессы и внутренние, меняющиеся при трансмутациях свойства, получить ту или иную (релятивистскую или нерелятивистскую) механическую интерпретацию? Можно ли представить себе, что масса, спин, заряд, четность и т. д. являются результатом определенного или неопределенного, быстрого или медленного движения себестождественных физических объектов — субчастиц, входящих в состав элементарных частиц?

У нас нет аргументов, которые бы позволили начисто отвергнуть такую возможность. Но наша задача и не состоит в обсуждении этого вопроса. Историкю нужно проследить, какая концепция последовательно пробивала себе дорогу в развитии квантовой теории поля и учения об элементарных частицах. До сих пор основной тенденцией был все более радикальный отказ от механической трактовки внутренних свойств и трансмутаций элементарных частиц. Нело-

кальные теории поля и представления о конечных размерах элементарных частиц позволили бы, казалось, заполнить элементарные объемы механическими смещениями. Однако смещение в объеме, занятом элементарной частицей, было бы сверхсветовым сигналом, т. е. противоречило бы лоренц-ковариантности теории. Все, что мы узнавали об элементарных частицах (об их внутренних свойствах), делало вероятной другую картину — картину качественных процессов в клетках пространства-времени, — к которой понятие относительности просто неприменимо.

В подобной схеме конфигурации мировых линий являются аппроксимацией (быть может статистической) ультрамикроскопического представления и теория относительности становится макроскопически приближенной теорией микроскопически дискретного пространства-времени.

С этой точки зрения расширение сведений о внутренних свойствах элементарных частиц имеет существенное значение для исторической эволюции принципа относительности.

Мы остановимся на серии открытий, начавшихся примерно в 1950 г. Эти открытия привели к развитию теории изотопического спина, к понятию странных частиц и странности и к новому представлению о симметрии элементарных частиц.

К концу сороковых годов была сформулирована некоторая, как казалось, стабильная схема элементарных частиц. Эту схему Гелл-Манн и Розенбаум назвали «теорией строения веще-

ства из двенадцати частиц»¹. Сюда входят прежде всего ветераны таблицы частиц — электроны, протоны, нейтроны и фотоны. Их было достаточно, чтобы ввести в качестве отличительных признаков частиц массу покоя (ее нет у фотона, масса электрона в 1836,1 раза меньше массы протона и в 1838,6 раза меньше массы нейтрона), заряд (нулевой у фотона и нейтрона), статистику (Ферми и Бозе) и связанный с ней спин (половинный у «фермионов», т. е. электронов, протонов и нейтронов, и равный единице у «бозона» — фотона).

С предсказанием и открытием позитрона возникло понятие античастицы (для протона и нейтрона они были открыты только в 1955—1956 гг., но предсказали существование антипротона и антинейтрона значительно раньше). В связи с разработкой теории β -распада Паули и Ферми пришли к мысли о нейтрино и антинейтрино. Наконец, разработка проблемы ядерных сил привела к предсказанию и открытию пиона — положительного, отрицательного и нейтрального. Таким образом, пяти частицам — электрону, протону, нейтрону, положительному пиону и нейтрино — соответствуют античастицы с противоположным зарядом или (у нейтрона и нейтрино) с противоположным знаком магнитного момента. Фотон и нейтральный пион не имеют античастиц, если не считать, что они сами являются своими античастицами. Перечисленные двенадцать частиц делятся по

¹ M. Gell-Mann, E. Rosenbaum. *Scientific American*, 197, 72 (1957). Русск. пер. УФН 64, вып. 2, 391 (1958).

их массам на четыре подгруппы: тяжелые частицы или барионы (нуклоны и антинуклоны), средние частицы или мезоны, легкие частицы или лептоны (электрон, позитрон, нейтрино и антинейтрино), фотоны¹. Структурные части вещества являются фермионами, а кванты полей (фотоны и пионы) обладают целочисленным (единичным и нулевым) спином и представляют собой бозоны. Связь между тремя группами устанавливается в трех основных процессах, которые можно назвать «процессом Юкавы», «процессом Дирака» и «процессом Ферми». Процесс Юкавы — это сильное взаимодействие тяжелых частиц (нуклонов) с мезонами. Он состоит в испускании и поглощении пионов и происходит с большой скоростью, примерно в течение 10^{-23} сек. Процесс Дирака — электромагнитное взаимодействие, связывающее лептоны (электроны и позитроны) с фотонами. Он происходит приблизительно в 10^{-21} сек. Процесс Ферми — слабое взаимодействие, связывающее тяжелые частицы с легкими (электронами и нейтрино). Он занимает значительно больше времени. Указанные процессы отличаются обратимостью — распад исходной частицы сменяется возможным образованием ее из продуктов распада. Далее, испусканию частицы соответствует поглощение античастицы. Эти общие свойства трансмутаций позволяют по одному процессу находить другие. Например, исходный процесс Ферми — превращение

¹ М. Гелл-Манн. Доклад на конференции по элементарным частицам в Пизе в 1955 г. «Проблемы современной физики». № 11, 28 (1956).

нейтрона в протон с испусканием электрона и антинейтрино — наталкивает на представление об обратном процессе — поглощение электрона и антинейтрино протоном и превращении последнего в нейтрон. Эта реакция при замене поглощения электрона испусканием позитрона дает новый процесс: протон, превращаясь в нейтрон, поглощает антинейтрино и испускает позитрон. Подобным образом, используя переходы от одного процесса к другому, обратному, и замену частицы античастицей (зарядовое сопряжение), можно найти большое число различных сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий и вычислить вероятности процессов и среднее время жизни частиц.

Пятидесятые годы пополнили таблицу элементарных частиц большим числом новых типов, свойства которых не укладывались в изложенную только что схему. Это были тяжелые мезоны с массой, значительно большей, чем масса пионов, и равной приблизительно 966 массам электрона. В серию новых частиц входили также гипероны — частицы с массой, превышающей массу нуклонов. Тяжелые мезоны и гипероны обладают большим временем жизни. Они образуются при сильных взаимодействиях и, казалось бы, должны и распадаться с быстротой, свойственной сильным взаимодействиям. Но они живут в сто триллионов раз дольше. Это странное обстоятельство объяснили тем, что новые частицы (их и назвали «странными») появляются только попарно — не менее чем по две частицы сразу. Такое совместное рождение наталкивало на мысль о некотором законе со-

хранения, воспрещающем появление странных частиц поодиночке.

К такому закону пришли путем обобщения и распространения на странные частицы понятия изотопического спина¹. Это понятие было введено Гейзенбергом для нуклонов. Смысл его следующий. Спин электрона может быть ориентирован вдоль магнитного поля в том же направлении, что и поле, либо в обратном направлении. Если нет магнитного поля, ориентации спина отдельного электрона равнозначны. Мы можем считать спин электрона величиной, принимающей два значения в присутствии магнитного поля, «дублетом» по отношению к магнитному полю. Аналогичное положение существует у протона и нейтрона. Силы ядерного взаимодействия между нуклонами одни и те же, независимо от того, какие именно нуклоны участвуют во взаимодействии. Это свойство называется зарядовой независимостью; оно приводит к неразличимости протона и нейтрона в отсутствие электромагнитного поля и позволяет считать их «дублетом». Переменную, принимающую два значения (одно значение соответствует протону, другое — нейтрону), Гейзенберг назвал изотопическим спином, чтобы подчеркнуть, что две частицы обладают одними и теми же свойствами и могут считаться состояниями

¹ M. Gell-Mann. Phys. Rev. 92, 833 (1953); M. Gell-Mann, A. Pais. Proc. Glasgow Conf. (1954); M. Gell-Mann. Proc. Pisa Conf. (1955). Русск. пер. «Проблемы совр. физ.» 11, 28 (1956); K. Nishijima. Progr. Theor. Phys. 12, 107 (1954); 13, 285 (1955); Fortschr. d. Phys. 4, 519 (1956).

одной частицы, и чтобы отметить некоторую аналогию с переменной, принимающей два значения в теории спина. Подобно спину изотопический спин нуклона имеет две компоненты: плюс и минус половина. Физическая аналогия между спином и изотопическим спином отсутствует, изотопический спин выражает лишь зарядовую независимость ядерного взаимодействия нуклонов и позволяет обозначить их различие, регистрируемое в присутствии электромагнитного поля.

Впоследствии понятие изотопического спина было применено к пионам: положительный, отрицательный и нейтральный пионы были бы неразличимы, если бы существовали только ядерные взаимодействия, а по отношению к электромагнитному полю они образуют «триplet». Понятие изотопического спина, выражающего зарядовую независимость при сильных взаимодействиях и предполагающее сохранение изотопического спина, было сформулировано Гейзенбергом.

Гелл-Манн и Нишиджима, распространив понятие изотопического спина на странные частицы, пришли к новому понятию — странности — дополнительной характеристике тяжелых мезонов и гиперонов. Странность сохраняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях. Закон ее сохранения объясняет совместное рождение странных частиц. Последние рождаются при взаимных столкновениях обычных частиц с нулевой странностью. Закон сохранения странности требует, чтобы возникшие странные частицы обладали также в сумме ну-

левой странностью, а это возможно, если сразу рождаются частицы с различными компенсирующими одна другую странностями. Понятие странности и ее сохранения объясняет большую вероятность совместного рождения и тот факт, что распад странных частиц обусловлен слабым взаимодействием и не может быть результатом сильных и электромагнитных взаимодействий.

9

Перейдем теперь к характерному свойству элементарных частиц и их взаимодействий — так называемой четности. Речь идет о симметрии частиц по отношению к правой и левой стороне и их поведению при меняющем местами правую и левую сторону зеркальном отражении. Подобная инверсия означает изменение знаков координат. Функция, зависящая от пространственных координат, взятых в четных степенях, не меняется при инверсии, — квадрат или другая четная степень числа имеет один и тот же положительный знак независимо от знака числа. Поэтому функция, не меняющая знака при инверсии, называется четной функцией, или функцией с положительной четностью. Нечетная степень числа, например куб, меняет знак вместе с числом. Поэтому функция, меняющая знак при инверсии, называется нечетной, или функцией с отрицательной четностью. Сохранение четности означает, что волновая функция частицы сохраняет при рассматриваемом физическом процессе положительную либо отрицательную четность.

При зеркальном отражении предмет может оказаться тождественным своему изображению (подобно шару, совпадающему с изображением в зеркале). Тогда его называют зеркально-симметричным. Он может при этом оказаться не тождественным изображению (подобно винту, который, будучи отражен в зеркале, превращается из винта с правой резьбой в винт с левой резьбой). Тогда предмет называется зеркально-асимметричным.

Сохраняется ли зеркальная симметрия (положительная четность) либо зеркальная асимметрия (отрицательная четность) при взаимодействии элементарных частиц? При сильных и электромагнитных взаимодействиях сохранение четности доказано с большой точностью. Проблема сохранения четности при слабых взаимодействиях требовала дополнительных экспериментов, которые были произведены в 1957 г.

Радиоактивный изотоп кобальта (кобальт-60) превращается в никель-60, испуская электроны и нейтрино. Сохраняется ли четность при подобном β -распаде ядер кобальта или нет — это можно при некоторых условиях проверить, сравнивая излучение электронов в одну сторону с их излучением в другую сторону по отношению к спине ядра. Представим себе, что нам удалось ориентировать все ядра кобальта, так что они вращаются в одном направлении. В зеркальном отражении, т. е. при пространственной инверсии, ориентация спина ядер не меняется, а направление движения излучаемого электрона меняется на обратное. Если процесс и его от-

ражение равноценны, то вылет электронов в одну сторону и их вылет в противоположную сторону будут одинаково вероятными и симметрия двух потоков будет доказательством сохранения четности при β -распаде.

Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нин¹ усомнились в положительном результате опыта, несмотря на казалось бы абсолютную непоколебимость зеркальной симметрии природы. Эксперименты, которые провела Ву Цзянь-сюнь совместно с Амблером, Хайуордом, Хоппсом и Хадсоном², подтвердили предположение Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нина.

Это предположение вытекало из экспериментальных данных, относившихся к области, на первый взгляд очень далекой от β -распада, к области слабых взаимодействий, ответственных за распад тяжелых мезонов. Обобщающая мысль Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нина выдвинула на первый план характер взаимодействия и сблизила под этим углом зрения процессы, казавшиеся далекими друг от друга. Эта сторона дела нас и интересует в первую очередь.

В 1956 г., когда Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нин пришли к идее несохранения четности, физиков занимала одна проблема, выдвинутая экспериментами с тяжелыми мезонами. Два

¹ T. D. Lee, C. N. Yang. Phys. Rev. 104, 254 (1956); Русск. пер. в сб. «Новые свойства симметрии элементарных частиц», М., 1957, стр. 13.

² C. S. Wu, E. Ambler, R. Hayward, D. Hopres, R. Hudson. Phys. Rev. 105, 1413 (1957). Русск. пер. в сб. «Новые свойства симметрии элементарных частиц», стр. 69.

типа K -мезонов, отличавшихся своим распадом (один тяжелый мезон распадался на три, другой на два π -мезона), как оказалось, обладают одной и той же массой. Можно было предположить, что они идентичны, что это одна и та же частица, распадающаяся двояким образом. Но какова же четность такой частицы? Четность π -мезона — отрицательная. Если четность при распаде сохраняется, то частица должна иметь ту же четность, что и продукты распада. Но в одном случае продукты распада имеют положительную, а в другом — отрицательную четность. Частица не может обладать и той и другой четностью. Следовательно, из идентификации обоих типов распадающихся тяжелых мезонов неизбежно следует вывод о несохранении четности при распаде. Распад указанных тяжелых мезонов на π -мезоны вызван слабым взаимодействием. Ли Цзун-дао и Янг Чженьнин предположили, что все слабые взаимодействия отличаются несохранением четности, и предложили проверить такую гипотезу экспериментом с β -распадом ориентированных ядер.

Еще до того, как стали известны результаты Ву Цзянь-сюнь и других, показавшие несохранение четности при β -распаде, появился ряд работ, содержащих теоретический анализ проблемы несохранения четности при слабых взаимодействиях. Л. Д. Ландау¹ в 1957 г. высказал идею, представляющую первостепенный интерес для нашей темы — истории принципа относительности и его современной трактовки. Не-

¹ Л. Ландау. ЖЭТФ 32, 405 (1957).

сколько позже, независимо от Ландау, сходные идеи были высказаны Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нином¹, которые уже в первой работе (1956) писали о внутренней асимметрии частиц по отношению к правой и левой сторонам пространства, а также Саламом².

Речь идет о принципе, который Ландау назвал принципом комбинированной четности. Согласно этому принципу, зеркальное отражение физического процесса изображает тот же процесс, с заменившими одна другую правой и левой сторонами и с заменой всех частиц их античастицами. Следовательно, существование отличающихся по поведению правовинтовых и левовинтовых частиц связывается с «зарядовой асимметрией», с существованием частиц и античастиц.

Разумеется, под зарядом здесь подразумевается тот параметр, который меняется при зарядовом сопряжении, т. е. при переходе от частицы к античастице: электрический заряд в случае электрона и позитрона, а также протона и антипротона, магнитный момент в случае нейтрона и антинейтрона. Пространственная инверсия здесь сопровождается перезарядкой — превращением электрона в позитрон, протона в антипротон и т. д. Четность в старом смысле сохраняется только для абсолютно нейтральных

¹ T. D. Lee, C. N. Yang. Phys. Rev. 105, 1671 (1957). Русск. пер. в сб. «Новые свойства симметрии элементарных частиц», стр. 46.

² A. Salam. Nuovo Cimento 5, 299 (1957). Русск. пер. в сб. «Новые свойства симметрии элементарных частиц», стр. 27.

частиц, которые не имеют античастиц или, что то же самое, служат сами себе античастицами (например, фотон). Для частиц, обладающих зарядом, существует, таким образом, лишь комбинированная четность: частица меняет пространственную ориентировку, превращается из правовинтовой в левовинтовую и вместе с тем меняет заряд, превращается в античастицу.

Такое предположение позволяет объяснить результаты Ву Цзянь-сюнь и других — они не противоречат сохранению комбинированной четности. Комбинированная «пространственно-зарядовая» симметрия не нарушается.

Согласно гипотезе комбинированной четности, основную роль в нарушении чисто пространственной, зеркальной симметрии (при сохранении зеркально-зарядовой симметрии) при β -распаде играют нейтрино и антинейтрино. Они рассматриваются как частицы, аналогичные винтам с правой и левой резьбой. По замечанию Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нина¹, нейтрино следовало бы назвать «скрюоном» от английского «screw» — винт. Спин нейтрино и его импульс определяют спиральность — направление резьбы винта. Нейтрино (чаще всего под нейтрино подразумевают частицы, излучаемые при положительном β -распаде, т. е. спутников позитронов, а под антинейтрино — спутников электронов) обладают левовинтовой спи-

¹ T. D. Lee, C. N. Yang. Phys. Rev. 105, 1671 (1957). Русск. пер. в сб. «Новые свойства симметрии элементарных частиц», стр. 46.

ральностью — спин и направление движения образуют левый винт. Антинейтрино, согласно принципу пространственно-зарядовой симметрии, является правым винтом. Таким образом и нейтрино и антинейтрино всегда поляризованы так, что спин параллелен импульсу одного из них и антипараллелен импульсу другого. Эта гипотеза «продольных нейтрино» приводит к очень рельефной констатации нетождественности нейтрино и антинейтрино. Она приводит также к строгому доказательству нулевой массы покоя нейтрино. Если бы эта масса не была равна нулю, нейтрино могло обладать скоростью, меньшей, чем скорость света. В обгоняющей нейтрино координатной системе направление движения этой частицы образовало бы со спином не левый, а правый винт, следовательно, наличие правовинтового либо левовинтового движения оказалось бы не внутренним, инвариантным свойством частицы, а свойством, меняющимся при переходе от одной системы координат к другой.

Изложенная концепция возлагает ответственность за несохранение четности на частицы. Она приписывает им внутреннюю асимметрию — правовинтовую либо левовинтовую. Чем же объяснить в таком случае различие между слабыми взаимодействиями, не сохраняющими четность, и сильными взаимодействиями, при которых четность, насколько это известно, сохраняется? В поисках ответа на указанный вопрос И. С. Шапиро¹ пришел к мысли о неориен-

¹ И. Шапиро. УФН 61, вып. 3, 313 (1957).

тируемости или односторонности пространства в областях, значительно меньших, чем длина, характерная для ядерных и электромагнитных взаимодействий.

В окружающем нас макроскопическом пространстве преобразования пространства само в себя, оставляющие на месте одну точку, разделяются на вращения и инверсии. Можно представить себе, что к очень малым областям понятия правой и левой стороны не имеют применения, и указанные преобразования не различимы одно от другого. Если эти области во много раз меньше длины, характерной для ядерных и электромагнитных взаимодействий (10^{-13} см), и в этих областях происходят процессы, вызванные слабым взаимодействием, то нарушения четности получают простое объяснение. К слабым взаимодействиям тогда неприменимо понятие зеркальной симметрии, а к сильным и электромагнитным — применимо. Константа с размерностью длины, соответствующая электрон-нейтринному полю, ответственному за β -распад, в тысячу раз меньше константы порядка 10^{-13} см. На подобных расстояниях пространство неориентируемо, на расстояниях порядка 10^{-13} см и больше оно обладает макроскопической (по отношению к 10^{-16} — 10^{-17} см) зеркальной симметрией.

М. А. Марков¹, исходя из своей концепции нелокализованных состояний, высказал мысль о связи несохранения зеркальной симметрии про-

¹ М. А. Марков. Гипероны и К-мезоны. М., 1958, стр. 301—302.

странства с нарушением его точной метричности, т. е. с существованием «внутреннего статистического пространства».

Является ли несохранение четности исключительным свойством слабого взаимодействия? Сейчас еще нельзя ответить на подобный вопрос. Быть может, при известных условиях несохранение четности имеет место при всех взаимодействиях. Однако для слабого взаимодействия этот эффект обладает наибольшей интенсивностью. Мы здесь сталкиваемся с характерной особенностью современного представления о взаимодействиях. Их отличают друг от друга не по наличию, а по интенсивности характерного предиката. При классификации взаимодействий приходится отказаться от альтернативной постановки вопроса, сохраняется или не сохраняется четность (вообще, имеет или не имеет места характерный эффект), и перейти к количественному вопросу: в какой мере данный эффект существует для рассматриваемого взаимодействия. С этой точки зрения классификация взаимодействий принимает вид иерархии. Подобная мысль приводит, далее, к представлению о различных взаимодействиях как о количественно определенных (характеризуемых ослаблением или усилением некоторых эффектов) модификациях единого взаимодействия.

10

Соответственно, связь свойств, лежащих в основе классификации элементарных частиц, с их поведением при различных взаимодейст-

Виях наталкивает на мысль о единой теории, выводящей свойства различных типов частиц из единого взаимодействия, принимающего различные формы. Задача, по-видимому, весьма сложная, недопускающая сейчас сколько-нибудь быстрого решения. Сложность ее — в многоплановости; единая теория частиц и полей должна вывести из единой посылки значения масс и зарядов большого числа различных типов частиц, объяснить существование изотопических семейств, теоретически получить характерные особенности различных по тензорной размерности полей и определить константы связи для различных взаимодействий.

Попытки сведения многообразия частиц к единой частице никогда надолго не исчезали из научной литературы. В сороковые-пятидесятые годы одной из наиболее известных попыток установления реальной связи между различными элементарными частицами явилась теория слияния, выдвинутая де Бройлем¹. Де Бройль предполагает, что действительно элементарными частицами могут быть лишь частицы со спином, равным половине, — электроны, позитроны, нейтрино. Волновые функции других частиц нужно представить в виде произведений волновых функций указанных элементарных частиц. Фотон с этой точки зрения состоит из двух нейтрино.

В ряде концепций и другие частицы рассматриваются как результат слияния: π -мезоны со-

¹ L. de Broglie. Théorie générale de particules à spin (méthode de fusion). Paris, 1943.

ставляются из нуклонов и антинуклонов (Ферми и Янг), вводится представление о нуклонах и тяжелых мезонах (Гольдхабер), о нуклонах и гиперонах (Саката, Маки, М. А. Марков) как об исходных, элементарных частицах. Мысль М. А. Марков о гиперонах как о «возбужденных состояниях» нуклонов¹ связана с концепцией «внутреннего статистического пространства», с представлением об аффинных областях, окружающих точки метрического пространства.

Из частиц со спином равным половине можно построить частицы со спином, равным нулю, единице и т. д. Поэтому в основу единых теорий элементарных частиц кладется дираковское уравнение для частицы со спином, равным половине.

Из этого уравнения, надлежащим образом модифицированного, стремились получить спектр масс и других основных свойств элементарных частиц и таким образом прийти к указанной концепции частиц как возбужденных состояний универсального спинорного поля. Но возбужденные состояния могут быть результатом взаимодействия поля с другими полями. Если рассматриваемое поле — единственное, его возбужденные состояния могут быть результатом «самодействия» — взаимодействия поля с самим собой. Такое взаимодействие означает, что уравнение, описывающее универсальное спинорное поле, должно быть нелинейным.

¹ М. А. Марков. Гипероны и К-мезоны. М., 1958, стр. 205—213.

В 1938 г. Д. Д. Иваненко¹ предложил нелинейное спинорное уравнение, в котором к уравнению Дирака добавлен простейший нелинейный член в виде куба волновой функции с коэффициентом, соответствующим интенсивности «самодействия» спинорного поля.

Теория нелинейного спинорного поля, обещающая в принципе найти спектр масс элементарных частиц, близких к эмпирическим, разработана в 1953—1958 гг. Гейзенбергом².

Гейзенберг исходит из двух затруднений полевой теории элементарных частиц. Первое состоит в появлении расходящихся выражений при объединении теории относительности с квантовой теорией, т. е. при применении правил квантования к лоренц-ковариантным дифференциальным уравнениям и при учете взаимодействий между полями. Второе затруднение — эмпирический характер значений масс, зарядов и других характеристик элементарных частиц и отсутствие критерия, позволяющего признать данную частицу элементарной.

Отсюда вытекают требования к теории единого поля материи: 1) операторы поля должны относиться не к определенной частице, а к материи в целом; 2) частицы должны соответствовать собственным решениям уравнения поля;

¹ Д. Иваненко. *Sov. Phys.* 13, 141 (1938); А. С. Соловьев, Д. Иваненко. *Квантовая теория поля*. М.—Л., 1952, стр. 581—583.

² W. Heisenberg. *Gött. Nachr.* 111 (1953); *Zs. f. Naturforsch.* 9a, 292 (1954); *Rev. Mod. Phys.* 29, 2, 69 (1957); Heisenberg, Kortel, Mitter. *Zs. f. Naturforsch.* 10a, 425 (1955); W. Heisenberg, R. Ascoli. *Zs. f. Naturforsch.* 12a, 577 (1957).

3) уравнения должны учитывать взаимодействия, т. е. быть нелинейными, масса частиц должна быть следствием взаимодействия, и понятие «голой частицы» не должно иметь смысла; 4) рождение и распад частиц вычисляются с помощью отбора, вытекающего из симметрии уравнений; 5) при удовлетворении правил отбора и требования инвариантности эвристическим принципом служит простота уравнений.

Наблюдаемые частицы имеют очень большое время жизни по сравнению с естественной длительностью 10^{-22} — 10^{-23} сек, что указывает на сложность задачи и требует предварительного исследования упрощенной модели. Такой модели соответствует нелинейное уравнение для спинорной волновой функции, отвечающее сформулированным требованиям. Оно отличается от уравнения Дирака с нелинейным членом, измеряющим самодействие, отсутствием члена, зависящего от массы частицы. Вычеркнув этот член, Гейзенберг тем самым превращает массу из эмпирически данной величины в величину, которую предстоит найти, решая уравнение поля. Массы частиц получаются из уравнения, в котором наряду с постоянной Планки и со скоростью света фигурирует еще одна мировая константа — минимальная длина — мера «самодействия» мирового спинора. Квантование уравнения дает ряд возбужденных состояний этого спинора, которым соответствует спектр масс различных частиц. Для квантования уравнения Гейзенберг находит модифицированные перестановочные соотношения.

Полученный Гейзенбергом спектр масс некоторых частиц согласуется с эмпирическими значениями. Гейзенберг нашел теоретически и значение постоянной тонкой структуры, равное $1/267$ и, таким образом, совпадающее по порядку величины с эмпирическим значением $1/137$. Более точного совпадения нельзя было ожидать, поскольку рассматривается упрощенная модель.

Существенным для вопроса о себестоимости элементарных объектов является уже упомянутое отрицание «голых частиц», т. е. частиц, существующих независимо от их взаимодействия с полями. Отношение собственных значений массы определяется видом нелинейного члена в уравнении мирового спинора. Если бы взаимодействия не было, не было бы и масс частиц и самих частиц. Таким образом, исходным элементом картины мира является не частица, идентифицированная неизменным значением собственной массы, а возбуждение единой субстанции, вызванное ее «самодействием».

Возбуждения мирового спинора имеют определенную пространственную меру: в выражение, соответствующее интенсивности «самодействия», входит элементарная длина. Эта константа не определяет отношений масс частиц, она является постоянным коэффициентом, на который умножаются все собственные значения массы, зависящие от вида нелинейного члена в мировом спинорном уравнении. Можно представить себе, что частицы с различной массой занимают один и тот же пространственный объем, обладают одной и той же для различных частиц протяженностью.

Как можно примирить концепцию квантованного пространства или же концепцию протяженных частиц с принципом относительности? В единой спинорной теории материи эти две концепции почти полностью сливаются. Частицы обязаны существованием своей массы, существованием внутренних степеней свободы, следовательно, своим индивидуальным бытием, нелинейным эффектам — возбуждениям единой субстанции; пространство заполнено этой субстанцией, оно имеет физическое бытие, в нём происходят ультрамикроскопические нелинейные эффекты и эти нелинейные эффекты квантуют пространство и создают вместе с тем дискретную структуру вещества.

II

Идея неделимых частей пространства и времени уходит своими корнями в глубь веков: она неоднократно высказывалась в древности и в средние века.

Из аналогичных концепций нового времени мы упомянем мысль Стоннея¹ о минимальных пространственных расстояниях (10^{-35} см) и минимальных длительностях ($3 \cdot 10^{-45}$ сек). Пятьдесят лет спустя, уже в связи с проблемами квантовой теории, В. А. Амбарцумян и Д. Д. Иваненко² предположили, что координаты могут принимать лишь целочисленные значения, будучи выражены в элементарной

¹ G. Stoney. Phil. Mag. 5, 301 (1881).

² В. Амбарцумян, Д. Иваненко. Zs. f. Phys. 64, 563 (1930).

единице — минимальной длине. Они говорили также о возможности элементарных четырехмерных пространственно-временных объемов. Вскоре после этого появилась статья Гейзенберга¹, в которой была высказана мысль о минимальных пространственных расстояниях. Гейзенберг писал, что новая постоянная — элементарная длина будет основой ограничения квантовой механики, подобно тому как постоянная Планка ограничивает классическую механику. Мысль о логической и исторической ограниченности квантовой механики сейчас приобрела широкое признание. Вместе с тем становится все более вероятным, что квантование пространства и времени ограничивает не специфические постулаты квантовой механики, а общую основу всякой механики — классической, релятивистской и квантовой, общее для всех механических концепций представление о себе-тождественности элементарной частицы.

В тридцатые годы проблему квантованного пространства рассматривали Марх², Зильберштейн³ и другие физики. В 1947 г. Снайдер⁴ попытался получить лоренц-ковариантную теорию квантованного пространства. По существу это значит представить дискретное пространство в качестве однородного. Можно рассматривать координаты как операторы со спектром

¹ W. Heisenberg. *Zs. f. Phys.* 65, 4 (1930).

² A. March. *Zs. f. Phys.* 104, 93 (1936); 104, 161 (1936); 105, 620 (1937); 106, 49 (1937); 106, 291 (1937).

³ L. Silberstein. *Discrete Space-Time*. Univ. of Toronto, 1936.

⁴ H. Snyder. *Phys. Rev.* 71, 38 (1947).

целочисленных собственных значений, действующие на функцию от пяти вещественных переменных. Такой формализм позволяет построить теорию, качественный смысл которой состоит в существовании искривленного пространства импульсов и максимального импульса. Близкую к этому концепцию развивал в 1938 г. Борн¹. Из принципа неопределенности вытекает, что наличие минимального значения координаты равнозначно существованию максимального импульса. Согласно Борну, максимальный импульс можно представить как некоторую постоянную кривизну пространства импульсов. Если вместе с минимальной длиной т. е. с квантованием пространства, ввести произвольную метрику в искривленном пространстве импульсов, то можно прийти к теории, инвариантной по отношению к пространственным и пространственно-временным вращениям. Существуют и другие попытки обоснования изотропии квантованного пространства². Но теории, инвариантной по отношению к произвольным трансляциям, до сих пор нет. Были попытки построения теории, в которой фигурирует инвариантный четырехмерный объем, причем подобная схема была использована для вычисления спектра масс частиц с полуцелым спином³.

Неудача многократных попыток построения лоренц-ковариантной модели квантованного

¹ M. Born. Proc. Roy. Soc. A165, 291 (1938).

² A. Schild. Phys. Rev. 73, № 4, 414 (1948).

³ B. Darling. Phys. Rev. 80, 460 (1950).

пространства наводит на мысль о фундаментальном характере противоречия между дискретностью и относительностью пространства. Разумеется, исторические аргументы в пользу фундаментальной несовместимости дискретности и относительности не заменяют строгого, собственно физического доказательства несовместимости. Но может быть исторический анализ в данном случае прокладывает дорогу строгому доказательству, которое часто следует за интуитивным или полуинтуитивным представлением или за выводом из исторического анализа ранее выдвинутых теорий. Более чем десятилетняя история безуспешных попыток релятивистской теории дискретного пространства не доказывает невозможности такой теории, но заставляет подумать, какие следствия вытекали бы из принципиальной несовместимости дискретности и релятивизма. Подчеркнем еще раз, что речь идет не о собственно физических концепциях, а лишь о поисках точки зрения, с которой принцип относительности мог бы фигурировать в качестве объекта ретроспективной исторической оценки. Для этого достаточно констатировать принципиальную возможность ограничения релятивистских соотношений макроскопически непрерывным пространством.

Вернемся к самому понятию дискретного пространства. О чем собственно идет речь, о какой дискретности и о каком пространстве? Многовековое развитие этих понятий отшлифовало их и мы теперь можем отчетливо разграничить физическую и собственно-математическую сторону дела. Чисто математическая дискретность про-

странства предполагает существование протяженности, которую мы не можем представить себе разделенной на части. Разумеется, мы можем ввести подобное ограничение в математическую задачу. Более того, мы можем вывести это ограничение из некоторых логических постулатов, пользуясь дискретной логикой¹. Но объективным основанием для подобного математического ограничения делимости всегда будет определенная физическая интерпретация. Если речь идет о трехмерном геометрическом пространстве, то само по себе оно не может быть объективно дискретным, дискретность его вытекает из дискретности физического пространства. Невозможность математического разбиения трехмерного объема не будет произвольным допущением, если она связана с отсутствием реальных физических процессов, позволяющих отличить одну часть вещества, заполняющего этот объем, от другой части. Вместе с тем этот объем признается протяженным и для этого может существовать объективное основание, если внутри объема происходит физический процесс, по самому своему определению требующий пространственной протяженности.

Примером процесса, позволяющего разграничить две части трехмерного объема, служит пребывание частицы в одной части объема и затем, в другое время, пребывание этой частицы в другой части объема. Это два события, две мировые точки. Процесс, который протекает в

¹ См. Б. Г. Кузнецов. Об основах квантово-релятивистской логики. Сб. «Логические исследования». М., 1959, стр. 99—112.

некотором объеме, но не разделяет последний на части, это процесс, изменяющий параметры, несводимые к координатам. Если в объеме, равном одному кубическому сантиметру, происходит адиабатический процесс повышения температуры и мы не можем либо отказываемся принимать во внимание положения молекул и рассматриваем температуру с чисто термодинамической стороны, то подобный процесс, гарантирующий протяженность объема, позволяющий выделить этот объем, не дает возможности разделить данный объем — кубический сантиметр — на части. Если принимать во внимание температуру, все время усредняемую по всему объему, то нельзя указать физический эквивалент деления рассматриваемого объема на части. В подобном примере ясен условный характер пространства, лишенного физических эквивалентов геометрической делимости. Мы закрываем глаза на процессы теплопередачи внутри рассматриваемого объема и на кинетическую картину движущихся в рассматриваемом объеме молекул. Движения молекул сразу же делают рассматриваемый объем делимым на части, связывают положения частиц со временем и вводят внутрь этого объема весь арсенал релятивистских понятий; мы уже не можем рассматривать термодинамическое состояние во всем объеме в данный момент, т. е. не можем говорить о состоянии протяженного физического объекта как об одновременном.

Представим себе, что перед нами изменение состояний объекта, которому мы по ряду соображений (хотя бы потому, что иное предполо-

жение ведет к физически бессмысленным бесконечным значениям энергии) приписываем определенные пространственные размеры, что эти размеры мы принимаем равными по порядку величины 10^{-13} см и что эти состояния мы принципиально не можем свести к перемещениям внутри указанного объема. Пусть, например, объектом служит единая материя Гейзенберга, описываемая нелинейным спинорным уравнением, а ее состояния — это бозе-состояния, ферми-состояния, вообще конкретные элементарные частицы с различными значениями спина, массы и заряда. Представим себе, далее, элементарную длительность порядка 10^{-24} сек. Смена состояний — это процесс, который позволяет отличить начало элементарной длительности от ее конца, наступающего через $\sim 10^{-24}$ сек, и одну сторону элементарной ячейки от другой, отстоящей от нее на $\sim 10^{-13}$ см. Эти отличия можно зарегистрировать без релятивистской связи между пространством и временем. Изменение состояния, например, переход из ферми-состояния в бозе-состояние (аннигиляция электрона) — это пространственный процесс, охватывающий одновременно область порядка 10^{-13} см и позволяющий говорить о независимом от координатных систем течении времени, ограниченном длительностью порядка 10^{-24} сек.

Элементарные пространственные ячейки имеют правую и левую стороны, но не имеют правой и левой частей. Определенный знак спина указывает на пространственную ориентированность частицы, но внутри занятого ею объема

уже нет никаких опорных физических объектов для разделения пространства на части. Это значит, что внутри элементарной ячейки пространство может быть бесконечно делимо, но делимости этой не соответствует какой-либо реальный физический процесс; мы можем представить себе расстояние меньше 10^{-13} см и время меньше 10^{-24} сек, но этим масштабам не будут соответствовать физически отличающиеся одна от другой области или временные интервалы.

Заметим попутно, что в этом случае физические константы с размерностью длины порядка величины, характерного для слабого взаимодействия (10^{-17} см) и для гравитационного взаимодействия (10^{-38} см), должны рассматриваться как условные величины, а не как характеристики реальных областей, в которых происходят указанные взаимодействия.

Можно думать, что дискретным является не пространство, как нейтральный фон физических процессов, и не время, как таковое,— они непрерывны, а единый пространственно-временной мир. Он включает поры, в которых пространство и время теряют свою релятивистскую связь и становятся независимыми.

12

Таким образом, релятивизм ограничен в ультрамикроскопическом мире. Но тем самым еще не снимается проблема макроскопической лоренц-ковариантной теории дискретного пространства-времени. Она теперь требует выведения релятивистских соотношений из существова-

ния и размеров элементарных четырехмерных ячеек. Быть может для такого вывода будет использовано понятие регенерации, т. е. аннигиляции и последующего порождения частицы этого же рода ¹.

Следует предположить, что это понятие может быть связано с картиной дискретного пространства-времени, т. е. что частица регенерирует в соседней четырехмерной ячейке. Тогда перемещение частицы можно представить себе как серию регенераций. Пользуясь терминами Аристотеля, исходными процессами являются движение в смысле $\phi\theta\rho\acute{\alpha}$ и $\gamma\acute{\epsilon}\nu\eta\sigma\iota\varsigma$, т. е. аннигиляции и появления конкретных частиц или $\alpha\lambda\lambda\omicron\upsilon\omega\sigma\iota\varsigma$ — «единой материи» в четырехмерных ячейках. Результатом подобных процессов является $\phi\theta\rho\acute{\alpha}$ — перемещение макроскопически себестождественной частицы.

Регенерация частицы характеризуется некоторой вероятностью; цепочка регенераций, соответствующая в макроскопическом представлении мировой линии себестождественной частицы, также обладает вероятностью, которая зависит от числа регенераций. Чем это число больше, тем меньше вероятность мировой линии. Когда число регенераций растет в арифметической прогрессии, вероятность мировой линии уменьшается в геометрической прогрессии. Число регенераций является логарифмом вероятности мировой линии. Можно думать, что оно равно действию, деленному на постоянную Планка.

¹ Я. Френкель. ДАН СССР 64, 4, 507 (1949); УФН 42, вып. 1, 69 (1950).

Таким образом, наименьшее действие соответствует наибольшей вероятности мировой линии.

Указанное число будет, вообще говоря, различным и будет обладать различными трансформационными свойствами, в зависимости от того, будем ли мы рассматривать все случайные блуждания частицы, вызванные ее регенерациями, или примем во внимание лишь макроскопическое смещение частицы. Это разделение весьма существенно и на нем нужно остановиться подробнее. Назовем пространственную траекторию, образованную всеми случайными блужданиями частицы, микроскопической траекторией M . Она состоит из направленных, вообще говоря, в различные стороны элементарных смещений порядка 10^{-13} см. Если вероятность регенераций частицы распределена в пространстве симметрично, частица после большого числа случайных блужданий окажется вблизи исходного пункта. Симметричное пространственное распределение вероятностей приводит, таким образом, к макроскопическому покою частицы. Если распределение вероятностей регенерации асимметрично, частица в результате большого числа случайных блужданий сместится в направлении большей вероятности. Пространственной асимметрии вероятностей пропорционален импульс частицы, с которым совпадает по направлению макроскопическая траектория L . При постоянной асимметрии вероятностей происходит свободное макроскопическое движение частицы, а переменная асимметрия равносильна силовому полю. Скорость частицы на микроскопиче-

ской траектории M очевидно равна скорости света — каждому элементарному пространственному смещению соответствует элементарная длительность 10^{-24} сек, т. е. время, необходимое свету, чтобы пройти элементарное расстояние 10^{-13} см. Скорость частицы на макроскопической траектории L представляется с этой точки зрения меньшей, она зависит от меры пространственной асимметрии вероятностей и от собственной массы (в случае нулевой массы макроскопическая и микроскопическая траектория совпадают).

Каждой из траекторий — микроскопической M и макроскопической L — соответствуют мировые линии M' и L' . Микроскопическая мировая линия M' состоит из элементарных четырехмерных смещений — случайных переходов из одной клетки пространства-времени в другую. Число таких переходов на M' совпадает с числом случайных пространственных смещений на микроскопической пространственной траектории M . Поэтому отрезок микроскопической траектории M лоренц-ковариантен. Длина его пропорциональна действию Гамильтона.

Между макроскопической траекторией L и макроскопической мировой линией L' нет такого инвариантного соответствия, макроскопическая траектория L не имеет абсолютного меропределения, и длина отрезка макроскопической траектории не обладает лоренц-ковариантностью. Эта длина пропорциональна действию Лагранжа.

Остановимся на этом несколько подробнее. Возьмем микроскопическую пространственную

траекторию M . Каждый элементарный пространственный сдвиг себестождественной частицы (иными словами, каждая регенерация частицы в соседней клетке) происходит в течение элементарной длительности и, следовательно, число пространственных «шагов» равно числу элементарных четырехмерных пространственно-временных переходов. Иное соотношение — между макроскопической пространственной траекторией L и макроскопической мировой линией L' . Представим себе для упрощения картины, что одни пространственные «шаги» направлены вдоль макроскопической траектории L , а другие — перпендикулярно к последней. Первые (продольные) «шаги» приводят к движению частицы по ее макроскопической траектории, а вторые (поперечные), передвигая частицу по оси времени, т. е. перенося ее по макроскопической мировой линии L' , не дают смещения по пространственной макроскопической траектории L . Пространственное смещение по макроскопической траектории не определяется числом дискретных четырехмерных «шагов», оно имеет относительные размеры, зависящие от системы отсчета.

Из сказанного видно, что дискретное пространство-время в микроскопическом аспекте отличается инвариантностью и четырехмерных интервалов и пространственных и временных масштабов. Согласно принципу относительности Галилея — Ньютона, при переходе от одной инерциальной системы к другой изменяется четырехмерный интервал и не изменяются пространственные и временные масштабы. Соглас-

но принципу относительности Эйнштейна последние изменяются, а четырехмерный интервал неизменен. В микроскопическом аспекте и пространство-время и пространство и время порознь обладают абсолютным мероопределением.

Однородность пространства, известная с XVII в. в специфической форме принципа инерции, и обобщение этого принципа на искривленное пространство должны быть ограничены макроскопическими масштабами. Само понятие частицы, свободной от взаимодействий, «голой частицы», которая движется по колеям однородного плоского (в отсутствие гравитационных полей) или искривленного (в гравитационном поле) пространства, сменяется для областей порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек понятием частицы, для которой аннигиляции и регенерации служат исходной формой движения.

Единая спинорная теория материи и представление о четырехмерных ячейках, внутри которых пространство и время теряют релятивистскую связь, наталкивают на мысль о некотором исходном ультрасильном взаимодействии, ответственном за первичные трансмутации, прекращающие существование частицы через 10^{-24} сек после ее появления. Другие взаимодействия представляют собой как бы разреженные варианты этого исходного взаимодействия.

Переходя от гравитационного взаимодействия к сильному (ядерному) и ультрасильному, можно увидеть, как последовательно возрастает значение корпускулярного аспекта взаимодействия. Для гравитационного взаимодействия корпускулярный аспект; как уже сказано раньше,

несущественен вовсе; теорию тяготения, за вычетом крайне редких эффектов, можно сформулировать без учета дискретности гравитационного поля — существования гравитонов. Для слабых и, далее, электромагнитных взаимодействий корпускулярный аспект существенен и для ультрасильного он является единственным. Ультрасильное взаимодействие — чисто корпускулярный процесс. При указанном только что переходе соответственно уменьшается значение структуры самого пространства. Гравитационные поля, охватывающие космические области, так далеки по своей реальной пространственной характеристике от микроструктуры пространства-времени, что трансмутации в ячейках пространства-времени не играют для них никакой роли. Картина гравитационных взаимодействий — это чисто релятивистская картина движений себетождественных объектов (с точностью до гравитационных трансмутаций). Для слабого взаимодействия характерно не искривление пространства, а его несимметричность. Но эта несимметричность, по предположению Ландау и других, связана с зарядовым сопряжением, для которого характерен корпускулярный аспект. Для сильного и тем более ультрасильного взаимодействия геометрическая интерпретация не имела бы смысла. Принцип относительности, играющий роль универсального физического принципа в случае гравитационных полей, здесь теряет свой универсальный характер.

Сказанное может быть сформулировано с помощью понятия однородности пространства. Гравитационное взаимодействие геометризиру-

ется в предположении однородности искривленного пространства-времени, слабое взаимодействие — однородности плоского, но зеркально-несимметричного пространства, ультрасильное взаимодействие — неоднородности пространства-времени.

Таким образом, вырастающая из обобщения релятивистской квантовой теории единая теория элементарных частиц и взаимодействий — это теория лишь макроскопически однородного пространства-времени.

В предыдущих главах прослежена историческая связь понятий относительности и однородности. Движение в силовом поле, движение тела, взаимодействующего с другими телами, было с большим или меньшим успехом представлено в виде свободного перемещения, аналогичного движению тела, предоставленного самому себе в однородном пространстве классической механики. Подобное устранение взаимодействий из картины мира и геометризация последней требовали последовательного перехода ко все более общим а р х и м е д о в ы м (постулирующим непрерывность пространства) геометриям. Медленные движения в отсутствие взаимодействий релятивируются в эвклидовом пространстве, быстрые — в четырехмерном псевдоэвклидовом. Гравитационные взаимодействия могут быть представлены в виде геометрических свойств риманова пространства. Слабые взаимодействия (а в некоторых случаях, быть может, и другие) создают поля, которые если и геометризуются, то только в зеркально-несимметричном пространстве. Для геометризации

электромагнитного взаимодействия предлагались различные неримановы геометрии.

Современная теория взаимодействий, по-видимому, позволит увидеть причину безрезультатности геометризации полей, превышающих по своей интенсивности гравитационные поля. Эта теория устанавливает границу геометризации, более фундаментальную и общую, чем только что указанные границы, связанные с различными архимедовыми геометриями. Речь идет о трансмутациях, вероятность которых для гравитонов при известных нам условиях чрезвычайно мала, а в случае негравитационных полей растет соответственно значениям константы связи. Учет трансмутаций, при допущении конечных размеров частиц, потребует, быть может, перехода к неархимедовой геометрии.

* * *

Из сказанного следует, что последовательная квантовая точка зрения на пространство-время, не только ограничивающая понятия себестождественности и непрерывности неопределенностью сопряженных механических переменных, но и выводящая механические переменные из исходных немеханических ультрамикроскопических понятий, такая точка зрения не может быть соединена с принципом относительности в единую теорию в обычном смысле этого понятия. Современная наука склоняется к римановой антитезе: либо дискретное пространство с абсолютной метрикой, либо непрерывное пространство с метрикой, зависящей

от силовых полей. Теперь, когда мы проследили эволюцию принципа относительности, можно глубже и конкретнее понять указанную антитезу.

Мы приведем уже упоминавшиеся заключительные строки лекции Римана «О гипотезах, лежащих в основании геометрии», которые представляют исключительный интерес для историка, так как бросают свет на трудную и сложную проблему предвосхищения новых физических идей в результате математического обобщения старых. Риман говорит:

«Вопрос о том, справедливы ли допущения геометрии в бесконечном малом, тесно связан с вопросом о внутренней причине возникновения метрических отношений в пространстве. 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 же нужно пытаться объяснить возникновение метрических отношений чем-то внешним — силами связи, действующими на это реальное.

Решение этих вопросов 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 произведенное в настоящей работе, именно, имеющие исходным пунктом общие понятия, служат лишь для того, чтобы движению вперед и успехам в познании связи вещей не препятствовали ограниченности понятий и укоренившиеся предрассудки.

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

Сегодняшний день, сто лет спустя после «сегодняшнего дня», упомянутого Риманом, дает возможность «переступить порог» и указать физические эквиваленты непрерывного и дискретного пространства. Физический эквивалент непрерывного пространства — это подчиненные релятивистским соотношениям механические (в самом широком смысле) перемещения себестождественных материальных точек. Физический эквивалент дискретного пространства — это трансмутации в клетках пространства-времени.

Коллизия релятивистских соотношений непрерывного и квантовых закономерностей дискретного пространства носит принципиальный

¹ «Об основаниях геометрии». Сборник классических работ. М., 1956, стр. 323—324. Смысл этих строк раскрыт в комментариях Вейля (там же, стр. 340—341), а также в заключительных замечаниях И. Е. Тамма в его выступлении на заседании Отделения физико-математических наук АН СССР, посвященном пятидесятилетию теории относительности («Эйнштейн и современная физика». Сборник статей. М., 1956, стр. 91—92).

характер. Может быть никто не ощущал эту коллизию так резко, как Эйнштейн, писавший в феврале 1954 г. де Бройлю: «Я должно быть похож на страуса, который все время прячет голову в песок относительности, чтобы не смотреть в лицо гадким квантам». Но сейчас видна не только коллизия относительности и квантования, но и их объединение. Это объединение основано не на подчинении одного принципа другому, а на некоторой общей схеме, указывающей релятивистским и квантовым соотношениям определенную роль, зависящую от масштабов пространства и характерных для этих масштабов взаимодействий.

Риман говорил, что метрические отношения либо абсолютным образом определяются дискретной структурой пространства, вытекающей из природы действующих в нем физических агентов («...то реальное, что создает идею пространства...») либо зависят от «сил связи, действующих на это реальное». Мы расшифровываем эту дилемму, разграничивая заполняющую пространство дискретную материю и силы, возникающие из взаимодействия дискретных частей материи. Но сейчас мы склонны рассматривать основу абсолютной метрики — дискретность заполняющей пространство и время материи, приводящую к дискретности пространства-времени, как результат «самодействия» единой материи, т. е. объяснить абсолютную метрику «силами связи», но силами, действующими на расстояниях, равных элементарной длине в течение элементарной длительности. «Силы связи», определяющие переменную метрику простран-

ства, это гравитационные силы, вызванные гравитационными взаимодействиями. Между «силами связи», определяющими абсолютную метрику, т. е. ультрасильным взаимодействием, и «силами связи», определяющими переменную метрику пространства-времени и выражающимися практически только в изменении этой метрики, находятся промежуточные типы взаимодействия, которые в той или иной пропорции (соответственно характерной константе связи) определяют абсолютную метрику (трансмутационные эффекты в клетках пространства и времени) и относительную метрику (воздействие на мировые линии себестождественных частиц). Единая теория взаимодействий, контуры которой вырисовываются в современной физике, может привести таким образом к синтезу ультрамикроскопической абсолютной метрики и макроскопических релятивистских соотношений.

Таковы тенденции современной теории квантованных полей, которые делают принцип относительности объектом исторической ретроспекции.

СОДЕРЖАНИЕ

- I. Изотропия мира и понятия относительного и абсолютного движения в античной динамике** 3
1. Понятия движения и места в древнегреческой динамике (3).— 2. Прямолинейные естественные движения и естественные места в динамике и космологии Аристотеля (15).— 3. Круговые движения в изотропном мире и их относительность (25).— 4. Немеханическое определение времени (29)
- II. Однородность пространства и классический принцип относительности** 34
1. Гелиоцентризм и относительность (34).— 2. Относительное и абсолютное движение в картезианской физике (54).— 3. Учение Ньютона об относительном и абсолютном пространстве, времени и движении (60).— 4. Принцип относительности у Гюйгенса и однородность времени (73)
- III. Однородность пространства-времени и теория относительности Эйнштейна** 83
1. Электродинамика и относительность (83).— 2. Постоянство скорости света (89).— 3. Четырехмерная псевдоевклидова геометрия (97).— 4. Общая теория относительности и однородность искривленного пространства-времени (102)
- IV. Принцип относительности в квантовой физике и макроскопическая однородность дискретного пространства-времени.** 119
1. Релятивистская квантовая механика и квантовая электродинамика (119).— 2. Взаимодействие электронно-позитронного поля с электромагнитным (132).— 3. Нулевые флуктуации электронно-позитронного и электромагнитного полей и наблюдаемые эффекты взаимодействия электрона с нулевыми флуктуациями (142).— 4. Новые лоренц-ковариантные теории в квантовой электродинамике (148).— 5. Нелокальные и нелинейные концепции (165).— 6. Мезоны (171).

— 7. Сильные электромагнитные, слабые и гравитационные взаимодействия (178). — 8. Классификация элементарных частиц и изотопической спин (188). — 9. Четность (197). — 10. Единая спинорная теория материи (205). — 11. Квантованное пространство-время (211). — 12. Лоренц-ковариантность дискретного пространства-времени (218)

Борис Григорьевич Кузнецов

**Принцип относительности в античной, классической
и квантовой физике**

*

*Утверждено к печати Институтом истории естествознания
и техники Академии наук СССР*

*

Редактор Издательства *С. И. Ларин*
Технический редактор *Г. Н. Шевченко*

РИСО АН СССР № 51—93В Сдано в набор I/IV 1959 г.
Подписано к печати 22/VI 1959 г. Формат 70×92^{1/32}. 7,25 печ. л.
8,48 Усл. печ. л. Уч.-издат. л. 7,9 Тираж 7000 экз. Т-07073
Изд. № 3868 Тип. зак. № 1573

Цена 5 руб. 50 коп.

Издательство Академии наук СССР.
Москва, Б-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография Издательства Академии наук СССР
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

5
118

ИЗДАТЕЛЬСТВО
АКАДЕМИИ НАУК
СССР