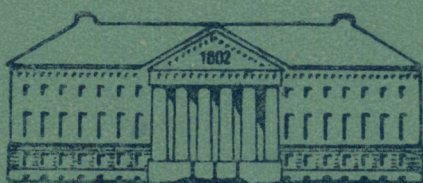


TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS
ALUSTATUD 1893. a. VIHİK 417 ВЫПУСК ОСНОВАНЫ в 1893 г.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ

III

Теория относительности и квантовая теория



ТАРТУ 1977

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED
УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS

ALUSTATUD 1893. a.

VIHİK 417 ВЫПУСК

ОСНОВАНЫ В 1893 г.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ

III

Теория относительности и квантовая теория

Тарту 1977

Редакционная коллегия:

П. Кард, В. Ривес, Ю. Лембра (отв. редактор)

От редакции

Настоящий выпуск «Методологических вопросов физики» посвящен 150-летию геометрии Лобачевского, 70-летию специальной и 60-летию общей теории относительности, 75-летию открытия кванта действия и 50-летию создания квантовой механики.

СИММЕТРИЯ ФИЗИЧЕСКОГО МИРА И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Х. П. Керес

Одним из основных понятий современной физики является понятие симметрии. Многие законы природы выражают присущие природе свойства симметрии. Теория относительности тоже есть учение о симметрии в природе.

Исчерпывающая математическая трактовка симметрии относится к теории групп. Но обнаружение симметрии возможно и более простыми методами — методами прямого физического опыта. Вообразим, например, куб, фотографируемый из разных точек окружающего пустого пространства. Вид фотографий будет, вообще говоря, в зависимости от местонахождения аппарата различен. Но можно найти такие точки, из которых получатся совершенно одинаковые фотографии. Находящиеся в этих точках наблюдатели видят куб одинаковым. Назовем их эквивалентными наблюдателями. В том, что эквивалентные наблюдатели существуют и закономерным образом расположены в пространстве, и обнаруживается симметрия куба.

По аналогичному принципу можно установить и исследовать симметрии физического мира. Представим себе наблюдателей-экспериментаторов, изучающих физические явления каждый в своей лаборатории. Эти лаборатории могут произвольным образом двигаться друг относительно друга. Основные физические закономерности формулируются в виде некоторого комплекса уравнений. Эти уравнения не получаются, вообще говоря, во всех лабораториях математически одинаковыми. Но математической формой уравнений определяется, в каком виде наблюдателю внешне представляется естественный ход физических событий. Следовательно, наблюдатели, у которых основные физические уравнения принимают одинаковую математическую форму, видят физические процессы протекающими одинаково. Это значит, что они видят физический мир одинаковым; они являются эквивалентными наблюдателями. Существование эквивалентных наблюдателей указывает на симметрию физического мира, а из взаимных отношений эквивалентных наблюдателей вытекает характер названной симметрии.

Эквивалентность в том или ином смысле между наблюдателями была замечена уже давно. Так, согласно законам механики Ньютона, существует бесконечное множество наблюдателей, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, у которых основные уравнения механики по форме одинаковы. Механическая структура мира представляется всем этим наблюдателям одинаковой. Но еще более глубоким, повлекшим за собой невиданные дотоле далеко идущие следствия, оказалось открытие Эйнштейна, опубликованное им в 1905 году. Опираясь на накопленные к тому времени экспериментальные данные, он пришел к выводу, что природа допускает существование таких эквивалентных наблюдателей, у которых одинаковую математически стандартную форму имеют не только основные уравнения механики, но и основные уравнения электродинамики. Эти наблюдатели, согласно представлениям того времени, должны были видеть природу одинаковой во всех отношениях. В этом проявилась совершенно новая симметрия физического мира, которая уже не согласовалась с классической картиной мира. Даже классические понятия времени и пространства не согласовались с этой новой симметрией.

Применяя в своей лаборатории надлежащим образом введенную систему времени, эквивалентный наблюдатель Эйнштейна находит, что всякий другой эквивалентный наблюдатель или покоится относительно его лаборатории, или движется равномерно и прямолинейно. Пространственно-временные системы, связанные с эквивалентными лабораториями, называются по примеру механики Ньютона инерциальными системами. В каждой из них выполняется ньютонов закон инерции и каждая из них поддается в принципе определению на основе инерционных свойств тел.

Эйнштейн назвал положение, утверждающее существование эквивалентных наблюдателей, принципом относительности. Дело в том, что, в силу симметрии физического мира, ряд физических понятий получает относительный характер. Относительное понятие приобретает смысл конкретного физического явления только для конкретно выбранного эквивалентного наблюдателя, но не для всех наблюдателей сразу. Относительное понятие относительно по отношению к наблюдателю. Пусть, например, мы хотим фиксировать место на шаровой поверхности по фотографии куба, находящегося в центре шара. Но фотография куба одинакова для всех эквивалентных наблюдателей в рассмотренном выше примере. Из этого вытекает, что место на поверхности шара определяется по фотографии куба однозначно только тогда, если мы укажем, какой именно наблюдатель получил эту фотографию. Без этого указания место определяется только с точностью до эквивалентного наблюдателя. Здесь мы имеем пример физического понятия, относительный характер которого обусловлен симметрией куба.

Из принципа относительности Эйнштейна вытекает, что покой и равномерное прямолинейное движение — относительные понятия, тогда как ускоренное движение (например, вращение) не является относительным понятием. В этом нет, собственно, ничего нового. Зато совершенно новым и неожиданным является вывод о том, что пространственное расстояние и промежуток времени между двумя событиями являются относительными понятиями. Утверждение, что данное событие произошло спустя три часа после другого, пространственно разобщенного события, лишено конкретного физического содержания до тех пор, пока мы вдобавок не укажем, какой эквивалентный наблюдатель произвел измерение. Какой-либо другой эквивалентный наблюдатель мог, измерив, получить другое значение той же величины. Названная величина — промежуток времени между данной парой событий — определена этими событиями с точностью до эквивалентного наблюдателя, но не более того.

Симметрия физического мира, лежащая в основе теории относительности Эйнштейна, не универсальна. Она имеет место в областях, где отсутствуют заметные силы тяготения. Последние, очевидно, нарушают симметрию мира. Однако Эйнштейн установил, что та симметрия, которая обнаруживается в механических и электродинамических явлениях, представляет собой частный случай более общей симметрии, обнаруживающейся в механических, электродинамических и гравитационных явлениях.

Закон инерции, справедливый во всякой инерциальной системе, утверждает: тело, свободное от действия внешних сил, покоится или движется равномерно и прямолинейно. Таково естественное состояние движения тел, нарушающееся только внешним воздействием и восстанавливающееся немедленно по прекращении внешнего воздействия. Более того: если мы, например, вращая камень на веревке, заставляем его двигаться по окружности (что не есть его естественное свободное движение), то ощущаем силу, с которой камень действует посредством веревки на нашу руку. Эта сила обусловлена присущим телу активным стремлением к восстановлению естественного состояния движения — т. е., иными словами, его инерцией. На этом основании реакция тела, с какой оно действует на источник внешнего воздействия, называется силой инерции.

Представим себе просторную лабораторию, к крыше которой привинчен крепкий крюк, а к крюку привязана натянутая веревка. Веревка может играть двойную роль. Лаборатория может находиться в пустом пространстве вдали от массивных тел, а к веревке приложена тяга, сообщающая лаборатории равномерное ускорение относительно окружающей инерциальной системы в направлении от пола к потолку. Тела, освобожденные в лаборатории от подвеса или опоры, принимая в силу инерции мгновенно свое естественное состояние (т. е. состояние неус-

коренного движения относительно инерциальной системы), падают в направлении пола лаборатории с одним и тем же ускорением. Это происходит оттого, что пол лаборатории движется по направлению к ним именно с этим — равным и противоположным — ускорением. Упав на пол, тела вновь вынуждаются вместе со всей лабораторией к ускоренному движению — естественное состояние движения их нарушается и они оказывают на пол давление, равное силе инерции.

Но лаборатория может и просто висеть на веревке над земной поверхностью. В этом случае все тела, освобожденные от подвеса или опоры, тоже падают в направлении к полу с одинаковым постоянным ускорением, и, упав, давят на пол. Причина этого явления заключается в тяжести тел, в отличие от предыдущего случая, где причиной была инерция. Но если ограничиться наблюдениями в пределах самой лаборатории, то сделать выбор между этими двумя причинами невозможно, так как картина явлений в обоих случаях совершенно одинакова. Для выяснения причины следует обратиться к внешним обстоятельствам, например, посмотреть, что происходит в окрестностях лаборатории. Однако можно представить себе и такие ситуации, в которых это тоже не ведет к цели.

Вообразим, что Земля неограниченно удаляется от висящей на веревке лаборатории и исчезает в конце концов в глубинах пространства. Так как тяжесть тел обусловлена притяжением Земли, а притяжение быстро убывает с расстоянием, то тела в лаборатории будут становиться все легче, пока, наконец, тяжесть их не исчезнет совершенно. Чтобы избежать этого результата, вообразим, что Земля, удаляясь, становится все массивнее, так что ее притяжение в пределах лаборатории не ослабевает. Тогда тяжесть тел будет оставаться неизменной вплоть до конечного предела, когда Земля стала бесконечно массивной в бесконечном удалении.

Итак, бесконечно удаленные бесконечно большие массы могут быть причиной конечного притяжения в данной точке. Но тогда наблюдатель, видя вокруг лаборатории только пустое пространство, не в состоянии решить, для чего нужна натянутая веревка, привязанная к крюку в крыше лаборатории. Он не может сказать, движется ли лаборатория ускоренно относительно какой-либо инерциальной системы под действием приложенной к веревке тяги, или веревка просто удерживает лабораторию в неподвижном состоянии, чтобы не дать ей падать в направлении бесконечно удаленных масс. Следовательно, невозможно различать проявления инерции и проявления тяжести. Но если явления неотличимы, то это означает в физике, что эти явления по своей физической сущности тождественны. Следовательно, силы инерции и силы тяжести в физическом смысле одно и то же. Существует единая гравитационная сила, а названий два.

Утверждение о тождественности сил инерции и сил тяготения называется принципом эквивалентности. Открытие единства инерции и тяготения Эйнштейн считал одним из важнейших результатов своей теории.

Вышеприведенное доказательство, конечно, недостаточно для полного обоснования принципа эквивалентности: существуют силы инерции, которые никак нельзя смешать с силой тяжести. Такова, например, сила Кориолиса, возникающая во вращающейся относительно инерциальной системы лаборатории и действующая определенным образом на движущиеся в ней тела. Выходит, по-видимому, что сила инерции в принципе все-таки отличается от силы тяготения, причем, однако, для части сил это отличие ненаблюдаемо. Но введение в физическую теорию ненаблюдаемых фактов является крупным недостатком теории. Поэтому следует предпочесть иной путь — сохранив принцип эквивалентности, попытаться выяснить, нельзя ли силу Кориолиса истолковать все-таки как гравитационную силу. Эйнштейн и выбрал этот путь.

Эйнштейн принимал в качестве одного из основных принципов в физике т. н. принцип близкодействия, согласно которому ни один физический объект не может действовать на другой объект на расстоянии; но всегда действие одного объекта на другой передается при участии некоторого промежуточного агента, в котором действие распространяется от точки к точке с конечной скоростью. Гравитационное взаимодействие тел не является исключением из этого принципа. Передающим взаимодействием агентом является здесь физическая реальность, называемая гравитационным полем. Массивные тела производят в гравитационном поле неоднородности и местные возмущения, а гравитационное поле, со своей стороны, направляет движения тел. В процессе взаимодействия гравитационного поля и материальных тел могут возникать разнообразные силы. Ничто не мешает отнести к роду этих сил и кориолисовы силы.

Из принципа эквивалентности вытекает, что любая произвольно выбранная лаборатория отличается в общем случае от лаборатории, покоящейся в инерциальной системе, только тем, что в ней обнаруживаются силы тяготения, отсутствующие в последней. Если записать основные физические уравнения в виде, учитывающем участие гравитационных сил в физических процессах, то эти уравнения будут иметь во всех возможных лабораториях одинаковую математическую форму. Это значит, что каждый наблюдатель видит физический мир одинаковым при условии, что он смотрит на него достаточно широким взглядом, т. е. не углубляется в детали, а ограничивается указанными основными уравнениями. Тогда все наблюдатели эквивалентны друг другу, откуда в свою очередь следует, что физический мир обладает максимальной симметрией. Эта симметрия лежит в основе общей теории относительности.

Состояние движения каждой отдельной лаборатории определяется, самое большее, с точностью до эквивалентного наблюдателя, если не указывается какой-либо другой наблюдатель, описывающий движение относительно своей лаборатории. В общей теории относительности эквивалентные наблюдатели движутся друг относительно друга произвольным образом. Следовательно, состояние движения каждой отдельной лаборатории, взятой самой по себе, совершенно неопределенно. Иными словами, в общей теории относительности любое механическое движение относительно.

Утверждение об эквивалентности друг другу всех наблюдателей есть общий принцип относительности. Чтобы дать ему математическое выражение, необходимо записать основные уравнения физики в таком виде, чтобы они описывали протекание физических явлений при наличии общего гравитационного поля. Это чрезвычайно трудная задача, решение которой Эйнштейн смог дать только в виде, скрытом внутри решения более простой математической задачи. Эйнштейн записал основные уравнения физики в т. н. общековариантной форме. В этой форме уравнения, действительно, для всех наблюдателей математически одинаковы, но они настолько абстрактны, что всякая физическая определенность исчезает. Это значит, что на достаточно высоком уровне абстракции всякий физический процесс представляется любому наблюдателю протекающим одинаково. Следовательно, какую вселенную мы бы ни вообразили, она будет всегда одинаково симметрична. Но симметрия, свойственная всем мыслимым мирам, является, очевидно, физически пустым понятием, так же, как лишено смысла понятие симметрии, присущей одинаково всевозможным геометрическим фигурам. Такой симметрии просто не существует. Отсюда и получается, что те, кто отождествляли общий принцип относительности с принципом общековариантности уравнений, приходят к отрицанию общей теории относительности в ее первоначальном значении и понимают под этим названием теорию тяготения Эйнштейна.

Альберту Эйнштейну как физику была присуща редкостная интуиция. Его идеи коснулись самых фундаментальных основ физической картины мира. Но его математический язык был относительно прост. Современная математическая форма общей теории относительности представляет собой в значительной степени заслугу продолжателей и комментаторов, которые и подправили кое-что в теории, и ее в той или иной мере изменили. Поэтому кажется нелишним время от времени возобновлять в памяти первоначальные идеи Эйнштейна. Это и является задачей настоящей статьи.

Поступила в редакцию 3 мая 1976 г.

FÜSIKALISE MAAILMA SÜMMEETRIA JA RELATIIVSUS- TEOORIA

H. Keres

Resümee

Tänavu möödub 60 aastat üldrelatiivsusteooria sünnist. Sel puhul esitatakse alljärgnevas töös Albert Einsteini originaalideed, mis olid aluseks tema relatiivsusteooriale. Kuuekümne aasta jooksul on üldrelatiivsusteooriat tublisti ümber seatud ja vähemal või suuremal määral muudetud, kusjuures mitte alati pole toimitud vastuväitevabalt. Selgi põhjusel on Einsteini originaalideede aegajalt meenutamise kohane.

Alljärgnevas on relatiivsusteooriat käsitletud õpetusena füüsilise maailma ajalis-ruumilisest sümmeetriast. Eirelatiivsusteooria on õpetus sümmeetriast, mis ilmneb mehaanika ja elektrodünaamika nähtuste kompleksis, üldrelatiivsusteooria käsitleb mehaanika, elektrodünaamika ja gravitatsiooninähtuste ajalis-ruumilist sümmeetriat. See viimane sümmeetria jääb tabamatuks, kui üldrelatiivsuspriintiip samastatakse võrrandite üldkovariant-suse priintiibiga.

SYMMETRY OF THE PHYSICAL WORLD AND THE THEORY OF RELATIVITY

H. Keres

Summary

This year we mark the jubilee of the general theory of relativity. On this occasion the following paper deals with Albert Einstein's basic ideas of his theory of relativity. In the last sixty years Einstein's general relativity theory has been improved and reformed in several ways, and several variations of the theory have been suggested. This has not been always done free of objections. For this reason, too, it is appropriate to remind the general reading public of Einstein's original ideas from time to time.

In this paper the theory of relativity is considered as a theory of a certain symmetry of the physical world. The special theory of relativity deals with the symmetry associated with mechanical and electro-dynamical phenomena, while the general theory of relativity describes the space-time symmetry of mechanical, electro-dynamical and gravitational phenomena. The latter kind of symmetry remains undetected, if the principle of general relativity is identified with the principle of general covariance.

О ВЗАИМООТНОШЕНИЯХ МЕЖДУ ОБЩЕЙ ТЕОРИЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ НЕРЕЛЯТИВИСТСКИМИ ПРЕДЕЛАМИ

А. А. Коппель

0. Введение.

Как явствует из литературы по методологическим вопросам физики, в проблеме о взаимоотношениях между современными («неклассическими») физическими теориями и их предельными формами — соответствующими классическими теориями, по-видимому, нет пока еще полной ясности. На это обстоятельство указывают, например, рассуждения Бунге в его книге [1]. Выходит, что неясным является даже вопрос, каким образом вообще нужно совершать переход от данной «неклассической» теории к соответствующей «классической»? Нет однозначного ответа на вопрос, существует ли всего лишь один «фактуально непустой» и физически разумный предельный случай или является переход всегда «многовалентным»? Еще не выяснены также многие аспекты и возможности взаимного «идейного» влияния между «новой» и «старой» теориями. С этими проблемами общего характера связаны и многие более специфичные вопросы. Иногда, например, с соответствием «новой» и «старой» теорий связывают и понятие «перехода в противоположность», даже понятие «взаимоисключения» (см., например, [2], [3]). Но имеет ли это всегда место? Как проявляются «переход в противоположность» и «взаимоисключение» при каждом конкретном переходе от определенной «неклассической» теории к «классической»? В ряде конкретных предельных переходов действительно обнаружена определенная несводимость «новой» теории к «старой» (см., например, [4], [5]). Связана ли эта «несводимость» с упомянутым «взаимоисключением»? Как вообще понять физически эту несводимость в каждом отдельном случае? Какая именно существенная черта физических теорий раскрывается в несводимости? На основе указанной «несводимости» сформулирован наряду с принципом соответствия также принцип «несоответствия», согласно которому при предельном

переходе от новой, достаточно фундаментальной теории к старой обязательно должен обнаруживаться определенный элемент принципиальной новизны, который не подчиняется принципу соответствия и поэтому образует центральное ядро новой теории, наиболее глубоко воплощающее в себе ее сущность [5]. Но в каком именно конкретном виде определенная теория не соответствует своему «естественному» и ожидаемому пределу, что именно представляет собой этот «элемент принципиальной новизны», обнаруживается ли он при всех без исключения предельных переходах? Эти вопросы уже обсуждались (см., например, [5]) для некоторых конкретных теорий (для квантовой теории, а также «специально-релятивистской» механики). Однако полный анализ с этой точки зрения современной системы физических теорий пока еще отсутствует.

Учитывая сказанное выше, в настоящей статье ставится конкретная задача более подробно обсудить некоторые аспекты взаимоотношений между общей теорией относительности (ОТО) и ее нерелятивистскими (НР) пределами. При этом, с одной стороны, мы исходим из результатов конкретного математического и физического анализа ОТО, а, с другой стороны, попытаемся проанализировать эти результаты с точки зрения перечисленных выше более общих методологических проблем.

Говоря более конкретно, в данной статье мы затронем три комплекса вопросов. В первом параграфе будем развивать доказанный уже ранее тезис, что на уровне современной системы физических теорий эйнштейнова теория гравитации (ЭТГ) и ньютонова теория гравитации (НТГ) могут рассматриваться как одно целое в том смысле, что и математический аппарат, и основные физические идеи являются в них едиными. Во втором параграфе покажем, что отмеченная цельная точка зрения является очень существенной для углубленного понимания физического содержания как самой ЭТГ, так и НТГ. В третьем параграфе обсудим некоторые следствия того факта, что НТГ фактически не исчерпывает НР предела ОТО. Покажем, что это обстоятельство может генерировать новые физические идеи, порождать интересные проблемы. Не исключено, что тем самым могут открыться новые пути к более глубокой расшифровке физического содержания ОТО.

1. О едином (цельном) подходе к ОТО и ее нерелятивистским пределам.

Будем теперь понимать ОТО и ЭТГ в несколько различном смысле. Как под «ОТО», так и под «ЭТГ» будем подразумевать современную теорию гравитации в общепринятом смысле (см., например, [6]), но при этом будем трактовать ЭТГ как обязательно релятивистскую теорию (параметр c всегда конечен),

тогда как ОТО будем понимать шире, — как теорию, включающую наряду с релятивистской теорией гравитации также ее возможные нерелятивистские пределы (причем параметр c может стремиться к бесконечности) *.

Что ЭТГ (релятивистскую теорию) и НТГ (НР теорию) можно рассматривать как составные части ОТО, это утверждение может вызвать на первый взгляд некоторое удивление, так как обычно ОТО и НТГ толкуются как глубоко различные в принципе теории. В ОТО мы пользуемся понятиями геометрии искривленного пространства-времени (П-В) и выдвигаем ряд новых физических принципов и идей (общий принцип относительности, принцип эквивалентности, принцип рассмотрения движения под действием гравитации как свободного в искривленном П-В и т. д.). А НТГ оперирует на первый взгляд совершенно иным математическим аппаратом и иными физическими понятиями, принципами, идеями. Поэтому общепринято рассматривать НТГ только в качестве предела ЭТГ (или ОТО), и притом такого, который образует в принципе совсем другую теорию. Однако такой подход не только не обязателен, но даже мало обоснован.

Выясняется, что с методологической точки зрения очень полезным и физически глубоко обоснованным оказывается рассмотрение основных положений, соотношений и формул ОТО в таких голономных системах отсчета, которые определяются конгруэнциями свободно падающих материальных частиц, или — что по существу равнозначно — в таких локальных реперах, которые связываются со свободно падающими материальными точками. Такой подход физически обосновывается тем, что свободное падение материальных тел в гравитационном поле (g -поле) является одним из самых характерных гравитационных явлений вообще, и притом это положение имеет место одинаковым образом как в релятивистском, так и НР случаях. Кроме того, согласно более глубокому пониманию принципа эквивалентности [7], [8], свободное падение и свободное инерциальное движение частиц и тел могут рассматриваться как явления одной природы, отличающиеся друг от друга только тем, что конкретная структура поля, обуславливающего движения, различна.

Идея изучения структуры ОТО именно с точки зрения свободно падающих систем отсчета предложена и многосторонне развита в работах Кереса [4], [9—13]. В несколько иной форме этот подход представлен и применен для анализа некоторых конкретных проблем ОТО также в работах автора данной статьи [14—17]. Свойства искривленного П-В и тем самым

* Это различие понятий мы не предлагаем как обязательное. Оно необходимо для целей нашего исследования. Для других целей могут быть полезны и иные подходы.

г-поля описываются нами в первую очередь базисными дифференциальными 1-формами $\hat{\omega}^{\alpha}$ специальной структуры, являющимися неголономными составляющими произвольного бесконечно малого мирового 4-вектора в локальном ортогональном репере Минковского, связанном со свободно падающей материальной точкой. Далее по уравнениям структуры риманова многообразия вычисляются как 1-формы связности $\hat{\omega}_{\alpha\beta}^{\gamma}$, так и

2-формы кривизны $\hat{\Omega}_{\alpha\beta}^{\gamma}$, подчиняющиеся также уравнениям Эйнштейна г-поля. Тем самым получается полное описание конкретных типов релятивистских г-полей и соответствующих им конкретных структур П-В. Согласно основным положениям ОТО характеристики этого П-В входят теперь и в уравнения для любых физических явлений, записанных в свободно падающих реперах.

Рассматривая в рамках ОТО физические явления в свободно падающих реперах, мы приходим к естественному предположению, что эти реперы составляют голономную систему отсчета, которую Керес назвал G-системой [11]. Это значит, что перчисленные выше дифференциальные формы, зависящие от голономных координат $\{t, x^s\}$, должны содержать параметр c (скорость света как релятивистский параметр) таким образом, что при $c \rightarrow \infty$ эти формы обязательно имеют конечные значения. В случае G-системы при $c \rightarrow \infty$ все общерелятивистские соотношения имеют конечный* и тем самым разумный вид. Таким образом, с одной стороны, в результате этого перехода мы получаем попросту определенный частный вид всех данных соотношений, причем сохраняется весь понятийный аппарат ОТО, ее идеи и язык. Очень существенным является тот факт, что мы пользуемся все время свободно падающими (движущимися) реперами, так что как в общем, так и в упомянутом частном случае при пространственно-временном описании физических явлений мы опираемся на одну и ту же физическую основу. Единым как для общего, так и для частного ($c \rightarrow \infty$) случаев является и голономное координатное время, т. наз. ньютоново (инерциальное) время t , совпадающее в общем случае с локальным (реперным) временем, а при $c \rightarrow \infty$ приобретающее абсолютное значение. С другой стороны, переход $c \rightarrow \infty$ можно, конечно, толковать также как переход к определенному пределу ОТО, а именно — к НР пределу. Как показывает подробный

* Отметим, что единственным исключением является член $\lim_{c \rightarrow \infty} (c^2 dt^2) = \lim_{c \rightarrow \infty} [(c\hat{\omega}^0)^2]$ в выражении ds^2 , данном в локальном репере Минковского.

Однако отбрасывание этого члена можно естественным образом толковать как переход от 4-мерного локального ортогонального репера СТО к локальному декартовому реперу как его НР 3-мерному аналогу (см. также [16]).

анализ [4], [11], в этой «НР физике», получаемой теперь нами при $c \rightarrow \infty$ на общерелятивистском языке, содержатся в частном (NB!) случае все соотношения и формулы НТГ, которые можно теперь толковать с точки зрения ОТО. Отметим, что в пределе $c \rightarrow \infty$ сохраняется и кривизна П-В, а также понятия геодезической линии, геодезического отклонения и т. д. (далее см. § 2).

Изложенный подход ко всевозможным НР пределам ОТО имеет на наш взгляд определенную методологическую ценность. В символической записи этот подход можно выразить соотношениями

$$M_{\text{НТГ}} \subset M_{\text{НРТГ}} \subset M_{\text{ОТО}} \quad (1)$$

причем

$$M_{\text{НРТГ}} = \lim_{c \rightarrow \infty} M_{\text{ОТО}} \quad (2)$$

и

$$M_{\text{НРТГ}} \setminus M_{\text{НТГ}} \neq \emptyset. \quad (3)$$

Здесь M означает множество формул и соотношений, свойственных НТГ, НРТГ (общей нерелятивистской теории гравитации) и ОТО соответственно, знак \setminus означает разность двух множеств, а знак \emptyset — пустое множество. Таким образом получается единый (цельный) подход к ОТО и ее НР пределам, а также к понятию П-В как на релятивистском, так и на НР уровнях. При этом следует иметь в виду, что получение соотношения (2) предполагает, строго говоря, выбор определенной системы отсчета (G -системы!). Как показывает специальный анализ, в общем случае переход $c \rightarrow \infty$ может привести и к неразумному результату. Следует, конечно, также иметь в виду, что приведенные соотношения отнюдь не исключают той возможности, что после перехода $c \rightarrow \infty$ некоторые понятия и величины могут стать несущественными (нулевыми), а также приобрести специфический оттенок (подробнее см. § 2). Более того, выясняется, что наряду с общими чертами НРТГ и ЭТГ имеют и определенную взаимоисключающую специфику, почему мы и различаем ЭТГ и ОТО. Таким образом, соотношение

$$M_{\text{НРТГ}} \subset M_{\text{ЭТГ}} \quad (4)$$

нужно все-таки считать неверным, тогда как на основе нашего подхода можно записать

$$M_{\text{НРТГ}} \cup M_{\text{ЭТГ}} \subset M_{\text{ОТО}}, \quad (5)$$

а из этого соотношения и следует (1).

Для сравнения отметим, что, как известно, специальную теорию относительности СТО можно также рассматривать как составную часть ОТО, получаемую как частный (NB!) случай при исчезновении кривизны П-В. При этом опять может быть

сохранен весь аппарат ОТО. И опять рассматриваемый предел, в данном случае т. наз. «неискривленный» (НК) предел ОТО по существу шире чем «ожидаемый», так как НК П-В характерно и для однородного г-поля, и для инерциального поля в неинерциальных системах отсчета, и только в частном случае для инерциальных систем, рассматриваемых в СТО. Таким образом, в символической записи имеют также место соотношения

$$M_{\text{СТО}} \subset M_{\text{НК}} \subset M_{\text{ОТО}}, \quad (6)$$

причем

$$M_{\text{НК}} = \lim_{\kappa \rightarrow 0} M_{\text{ОТО}}, \quad (7)$$

$$M_{\text{НК}} \setminus M_{\text{СТО}} \neq \emptyset, \quad (8)$$

а κ — т. наз. параметр кривизны, при нулевом значении которого исчезают все компоненты тензора Римана—Кристоффеля. Отметим, что в данном случае имеет место также соотношение

$$M_{\text{НК}} \subset M_{\text{ЭГГ}} \quad (9)$$

так как инерционные поля, а тем более однородные г-поля могут рассматриваться попросту как частные случаи более общих г-полей. НК предел по сравнению с НР пределом представляет собой предел совершенно другого типа. Поэтому является по меньшей мере странным утверждение Бунге о том, будто переход ОТО в СТО обнаруживает существование многих НР (?) пределов ОТО (см. [1], с. 261). Переход к НР пределу действительно многовалентен, но этот факт, как мы уже отметили и еще будем обсуждать детально ниже, имеет совершенно другой смысл.

В свете анализа взаимоотношений между ОТО и ее НР и НК пределами мы получаем также более ясное представление о том, переходит ли более общая теория в свою «противоположность» или нет, и о том, «взаимоисключают» ли исходная и предельные теории друг друга или нет. Например, в случае НК предела ОТО трудно видеть некую «противоположность» или некое «взаимоисключение». Ведь проявление некоторых новых свойств метрического П-В (например, однородности и изотропности) в НК пределе как на более конкретном уровне не противоречит отсутствию этих свойств, если рассматривать П-В на более абстрактном уровне, т. е. в ОТО; еще менее можно усмотреть здесь взаимоисключение. В случае НР предела ОТО предельные характерные свойства П-В, имеющие неметрический (сингулярный) характер и отсутствующие в ЭГГ (подробнее см. § 2), все-таки могут дать повод трактовать этот предел как «взаимоисключение» исходной теории. Во всяком случае, на наш взгляд, «переход в противоположность» или «взаимоисключение» могут быть обусловлены только общим характером определенного предела по сравнению с исходной

теорией и вопрос, является ли данный предельный переход многовалентным или нет, вряд ли имеет при этом определяющее значение.

Еще одно замечание кажется уместным в связи с утверждением Бунге относительно существования «третьего», но, по его мнению, «фактуально пустого» предела ОТО, в качестве которого рассматривается по существу случай вакуумных уравнений г-поля ОТО (см. [1], с. 261). Остается неясным, в каком смысле мы здесь вообще имеем предел теории, так как определение г-поля в пустоте вне областей нахождения источников поля составляет попросту некоторую специальную задачу ОТО, изучаемую для самых разнообразных типов г-полей. Более того — как показывает практика исследований по ОТО, даже изучение вакуумных решений Эйнштейна «для себя», т. е. без рассмотрения ассоциированных с ними внутренних решений, довольно содержательно как с математической, так и физической точки зрения. При этом возникают, например, интересные проблемы т. наз. физических сингулярностей и т. д. Аналогично, изучение полей чистого излучения в электродинамике Максвелла или вакуумных г-полей в НТГ не рассматриваются ведь как задачи неких «предельных теорий», а менее всего «фактуально пустых».

2. Эвристическое значение цельного подхода к ОТО и ее нерелятивистским пределам.

Как уже отмечено, рассмотрение как ОТО, так и НРТГ (в том числе НТГ) с точки зрения свободно падающих реперов дает нам подходящий способ сопоставления этих теорий, основывающийся именно на физических, а не формальных соображениях. Отсюда открывается дополнительная возможность более глубокого понимания как содержания самой ОТО, так и подлинного смысла ее НР пределов. При этом главный интерес представляет для нас, конечно, ньютонов предел ОТО.

Прежде всего отметим, что «общерелятивистский» язык позволяет нам преодолеть неполноту т. наз. Галилей-инвариантного представления НТГ. Дело в том, что обычно НТГ рассматривается в жестких, т. наз. «абсолютных» галилеевых системах отсчета с декартовыми координатами. Но по локальным измерениям такие абсолютные системы ненаблюдаемы и их можно отличить от более широкого класса систем отсчета лишь с помощью наложения определенных предельных условий в пространственной бесконечности (см., например, [6], с. 295; [4], [12]). Рассматривая НТГ как составную часть ОТО, вполне естественно пользоваться в предельном евклидовом 3-пространстве фактически любыми пространственными координатными системами, в том числе нежесткими. Аналогично общему случаю релятивистских г-полей можно и в НТГ выделить в ка-

честве преимущественных из множества общих нежестких систем отсчета т. наз. обобщенные инерциальные системы, определяемые через конгруэнцию свободно падающих материальных точек. Такой подход, развиваемый в работах [9—12], выдвигает особенно ярко единые структурные черты теорий Ньютона и Эйнштейна, позволяет сохранять принципы эквивалентности и общей относительности также в НР случае и т. д.

Общерелятивистский подход показывает, что, наряду с 3-мерной точкой зрения, в НР пределе целесообразно рассматривать П-В также в 4-мерном смысле. При этом выясняется, что в силу абсолютного характера времени t метрика предельного 4-пространства сингулярна в том смысле, что определитель метрического тензора исчезает. Во временном направлении метрики уже нет, а в расслоении 3-пространств невырожденная метрика характеризует только каждый из слоев, определенных условием $t = \text{const}$. Но предельное сингулярное П-В все-таки в общем искривлено, так что в пределе $c \rightarrow \infty$ не все из 2-форм кривизны $\overset{\circ}{\Omega}_{\alpha\beta}$ исчезают. Кривизна П-В определяется по-прежнему распределением масс и 4-мерные геодезические линии описывают движение пробных частиц. Существенными величинами, описывающими НР г-поле и его динамическое воздействие, являются 1-формы связности $\lim_{c \rightarrow \infty} \overset{\circ}{\omega}_{\alpha\beta}$. Вы-

шесказанное характеризует более конкретным образом и сходство, и принципиальное различие трактовок П-В в ЭТГ и в НРТГ.

Отметим, что искривленность П-В в НР пределе доказана уже Картаном [18], но он пользовался также некоторыми дополнительными условиями и рассматривал только НТГ. Исходя из несколько иных систем постулатов, трактовка НТГ на языке искривленного П-В получена и другими авторами (см., например, [6], с. 300). В этих подходах «в духе Картана» к изучению гравитационных явлений в ньютоновом приближении привлечены и тетрадный формализм, и аппарат внешних форм, но при всем этом тесная внутренняя связь между ОТО и НТГ в полной мере все-таки не раскрывается.

Подход Кереса к пределу ОТО, изложенный и в некоторой мере развитый нами выше, позволяет, как мы показали, глубже и шире толковать этот предел, сильнее и теснее связывать его с самой ОТО. Мы тоже применяем тетрадный формализм и аппарат внешних форм, но, опираясь при этом на более глубокие физические идеи, пытаемся анализировать НР предел ОТО возможно полнее. «Традиционный» способ рассмотрения НР г-поля как стационарного линейного приближения релятивистских г-полей, получаемого в метрическом формализме, а также картанову модель ньютонова г-поля можно получить как частные

случаи нашего подхода. Это значит, что разные конкретные способы получения НР предела в ОТО могут быть теперь выведены из единого начала, причем такое выведение сопровождается отчетливым указанием на границы применимости тех или иных приемов. Таким образом, всевозможные трактовки НР предела ОТО приобретают стройность и единство.

Поскольку мы толкуем НР г-поля одновременно как частный вид г-полей, описываемых ОТО, то получается еще одно принципиальное отличие нашего подхода по сравнению с «традиционным». Ведь обычно предполагается, что некоторое определенное ньютоново поле является попросту асимптотическим видом определенного релятивистского г-поля для определенных областей П-В, где г-поле слабое. Наш подход представляет собой по существу построение НР аналогов, соответствующих определенным релятивистским г-полям после перехода $c \rightarrow \infty$. В рамках математического аппарата ОТО конструируются на самом деле полностью НР модели. При таком подходе фактически предположение о слабости поля не нужно, хотя обычно переход $c \rightarrow \infty$ толкуется как предположение о малости скоростей всех рассматриваемых движений материальных объектов, откуда следует, что и само г-поле должно быть слабым ([19], с. 315). Но в рамках НР модели, поставленной в соответствие некоторому релятивистскому г-полю, слабость поля в общем не требуется, так как в этом случае допустима принципиальная возможность сколь угодно больших скоростей материальных объектов.

Таким образом, мы видим, что, с одной стороны, единый (цельный) подход к ОТО и ее НР пределам действительно существенно расширяет и углубляет понимание этого предела, в том числе НТГ. С другой стороны, как покажем ниже, этот же подход раскрывает и новые существенные черты в ОТО, выявляет ряд скрывающихся в ней новых возможностей, а также открывает новый путь к лучшему пониманию сугубо релятивистских эффектов.

С помощью G-систем осуществляется универсальный способ сравнения релятивистских г-полей с НР г-полями. С одной стороны, с помощью аналогичных величин и соотношений мы можем параллельно изучать как релятивистские поля, так и НР поля. С другой стороны, мы имеем возможность толковать конкретные НР г-поля как НР образы (аналоги) определенных релятивистских г-полей и изучить их взаимные переходы. Как известно, из-за искривленности П-В и отсутствия непосредственного физического смысла применяемых в этом искривленном П-В голономных координатных систем, физическое толкование решений уравнений поля в ЭТГ является очень нелегкой задачей. Но, конструируя НР аналог данного решения уравнений Эйнштейна, можно получить существенную информацию о структуре г-поля. Следует иметь в виду, что физические ситуа-

ции становятся обычно хорошо интерпретируемыми именно с учетом НР предела. Главными являются прежде всего НР гравитационные эффекты, а сугубо релятивистские эффекты обнаруживают себя в первую очередь на пост-нерелятивистском уровне. В такой последовательности эффекты доступны также регистрации и измерению в экспериментах или наблюдениях.

Конечно, ньютонов НР предел, а также пост-ньютонов уровень конкретных релятивистских g -полей изучались и ранее довольно широко. Выработаны различные конкретные способы и определенные формализмы для вычисления различных физических величин и для описания физических эффектов на пост-ньютоновом, а затем пост-пост-ньютоновом и т. д. уровнях. Этими методами пользуются главным образом для решения некоторых конкретных задач определения структуры g -поля и уравнений движения материальных объектов в g -поле, причем предполагается, что материя имеет т. наз. островное распределение (см., например, [6], с. 1089; [19], с. 419). Развита специальная формализм — т. наз. PPN-формализм — для сравнения альтернативных теорий гравитации на постньютоновом уровне (см., например, [6], с. 1068). Но как уже было отмечено, все эти «традиционные» способы изучения ньютонова предела ОТО являются определенными частными следствиями («приближениями») рассмотренного нами общего подхода к НР, в том числе и ньютонову и неньютонову пределу.

Подход к НР пределам ОТО с точки зрения G -систем открывает принципиальную возможность дать в рамках единой системы глубоко обоснованный анализ любых классов решений уравнений Эйнштейна. Отметим, что, по-видимому, до сих пор вообще не предпринимались попытки более или менее систематического и всестороннего исследования существующих классов конкретных решений уравнений Эйнштейна с точки зрения их НР аналогов или пределов. Теперь мы имеем возможность приступить к этому делу и «осветить» и осмыслить целые классы решений уравнений поля ЭТГ с единой точки зрения.

Всестороннее изучение определенных классов решений уравнений Эйнштейна с точки зрения всевозможных НР пределов ОТО может заключать в себе много более специальных задач. Перечислим основные из них.

К важнейшим свойствам известных решений относятся прежде всего различные топологические качества, в том числе свойства их физических сингулярностей, указывающие на местонахождение источников g -поля. С исследованием этих качеств с точки зрения НР пределов связано и исследование взаимоотношений релятивистских и НР вакуумных решений. Отсюда в свою очередь возникает новый аспект оценки физической информации, заключающейся уже в вакуумных решениях уравнений Эйнштейна.

Далее заслуживают анализа с НР точки зрения различные групповые теоретические соображения, предположения о существовании определенных геодезических конгруэнций, классификация по алгебраической структуре тензора кривизны. НР аналоги, соответствующие релятивистским киллинговым векторным полям, характеристикам изотропных геодезических конгруэнций, в том числе т. наз. оптическим скалярам, и другим характеристикам кривизны П-В, могут дать новую ценную информацию о свойствах г-поля. Особой задачей следует здесь считать исследование взаимоотношений релятивистских и НР дифференциальных форм $\omega_{\alpha\beta}^{\wedge}$ и $\Omega_{\alpha\beta}^{\wedge}$ и уточнение их ролей в качестве релятивистских и НР динамических характеристик г-поля. Представляет большой интерес исследовать, в какой мере информация о свойствах конкретного г-поля, содержащаяся в каждой из величин $\omega_{\alpha\beta}^{\wedge}$ и $\Omega_{\alpha\beta}^{\wedge}$, обнаруживается уже при изучении НР пределов этого поля, каким образом знание НР аналогов этих величин может оказать помощь в задаче типизирования г-полей и пролить новый свет на уже известные классификации решений уравнений Эйнштейна, в том числе, например, на классификацию по типам Петрова.

С НР точки зрения можно также поставить задачу оценки формальных соображений, применяемых при отыскании определенных решений уравнений Эйнштейна. Ведь содержание НР аналогов этих решений может в некотором смысле охарактеризовать эффективность и физическую значимость используемых формальных приемов и соображений. Анализ с точки зрения НР пределов может также помочь осмыслить различные вводимые формально вспомогательные величины, определяемые формально евклидовы пространственные сечения в разных релятивистских моделях П-В и т. п.

Важную задачу составляет исследование специфической роли соответственно неголономных и голономных величин. С точки зрения нашего подхода здесь можно задать следующие вопросы. Какие свойства данного релятивистского решения остаются голономно инвариантными при переходе к пределу $c \rightarrow \infty$ и какие нет? Какую роль голономная система отсчета или координатная система, в которой дано изучаемое решение, играет в определении НР предела данного поля? Какую роль играют в рассматриваемой нами проблеме различные координатные условия, например, условия гармоничности? С одной стороны, приведенные здесь вопросы связаны с фундаментальной проблемой существования и единственности НР аналога при данном релятивистском г-поле. С другой стороны, нахождение ответа на эти вопросы позволяет пролить новый свет на специфическую роль неголономных и голономных величин, на роль различных голономных координатных систем в нахожде-

нии и толковании определенного решения уравнений Эйнштейна, а тем самым на взаимоотношение между внутренним содержанием г-поля и его т. наз. наблюдаемой формой, зависящей как от внутреннего строения поля, так и от применяемой системы отсчета. С точки зрения связывания конкретных решений уравнений Эйнштейна с конкретными физическими ситуациями, связывания теоретических выводов с эмпирическими данными оказывается немаловажным и тот факт, что при нашем подходе с применением тетрадного формализма и аппарата внешних форм нами вводится на всех этапах исследования ортогональный репер Минковского, переходящий в пределе $c \rightarrow \infty$ в декартовый репер и толкуемый как прототип локальной физической лаборатории.

Проблемой особой важности следует считать выяснение НР аспектов постоянных параметров, входящих в конкретное решение уравнений Эйнштейна. Здесь опять возникает целый ряд разнообразных вопросов. Каким образом структура этих параметров влияет на переход к НР аналогу данного релятивистского решения? В какой мере можно придать физический смысл постоянным параметрам релятивистского решения именно на основе изучения НР аналогов? Является ли здесь изучение с точки зрения НР аналогов равноценным анализу с точки зрения асимптотического слабого поля — ведь эти подходы по меньшей мере в принципе отличаются друг от друга (см. выше)?

Если решения уравнений Эйнштейна будут изучены во всех вышеупомянутых аспектах, то мы можем прийти к более или менее общему и комплексному представлению о том, в какой мере и с каких сторон соответствующие НР аналоги характеризуют конкретные релятивистские г-поля. С одной стороны, отсюда получаем ответ на вопрос, в какой мере при разных решениях «ядро физической сути» обнаруживает себя уже на НР уровне. С другой стороны, мы видим, какие возможности имеются для выяснения сугубо релятивистского содержания решений уравнений Эйнштейна.

Исходя из НР предела в применяемой нами трактовке, можно отыскивать новые релятивистские решения уравнений г-поля (см. также [17]). В связи с этим возникает еще задача изучить взаимоотношения между подходящим для нас методом приближений и другими аналогичными методами. В более широком плане эта задача составляет часть общей проблемы оценки различных методов приближений, используемых в ОТО.

В итоге из вышеизложенного вытекает большое эвристическое значение цельного подхода к ОТО и ее НР пределам, и, наряду с этим, значение конкретных вычислительных методов, разработанных на основе этого подхода. Отметим, что до сих пор нами изучены НР пределы стационарных г-полей вообще [20] и двухпеременных стационарных г-полей в частности [21—24]. Так как класс двухпеременных стационарных вакуумных

решений является непосредственным обобщением решений Шварцшильда и Керра как самых важных точных решений уравнений Эйнштейна, имеющих содержательные физические приложения, то тем самым общий детальный анализ этого класса решений представляет особый интерес *. В ближайшем будущем мы имеем в виду изучить с НР точки зрения также различные классы нестационарных решений уравнений Эйнштейна. При этом, как и в случае стационарных решений, мы хотим уделить главное внимание вопросу о возможности существования неньютонова предела конкретных релятивистских г-полей. Если такой предел окажется возможным, то мы хотим провести и подробный анализ этого факта.

3. О неньютоновом пределе ОТО.

Тот факт, что для ОТО имеет место символическое соотношение (3), впервые строго и в явном виде показано Кересом [4]. В применяемом нами языке дифференциальных форм (см. § 1) это обстоятельство выражается следующим образом: все г-поля, заданные в G -системах, можно разделить на два класса [16]: 1) те, в которых

$$\lim_{c \rightarrow \infty} \overset{\circ}{\Omega}_{ik}^{\wedge} = 0 \quad (10)$$

и 2) те, в которых хотя бы для одной пары индексов

$$\lim_{c \rightarrow \infty} \overset{\circ}{\Omega}_{ik}^{\wedge} \neq 0 \quad (11)$$

(здесь i, k пробегает значения 1, 2, 3). В первом случае в пределе $c \rightarrow \infty$ получается НТГ (причем для неоднородных полей обязательно выполняется условие $\lim_{c \rightarrow \infty} \overset{\circ}{\Omega}_{oi}^{\wedge} \neq 0$), а во втором случае мы имеем более широкую НРТГ, описывающую неньютоновы или вихревые г-поля **. В последнем случае имеем в предельном евклидовом пространстве уравнение Пуассона

$$\Delta \Phi = 4\pi G \tilde{\rho} \quad (12)$$

* Монографический обзор двухпеременных (аксиально- и плоскосимметричных) стационарных вакуумных решений уравнений Эйнштейна вместе с их многосторонним анализом с точки зрения НР пределов будет опубликован в ближайшем будущем.

** Говоря более строго, получение этих выводов предполагает определенные требования относительно тензора энергии-импульса в уравнениях Эйнштейна. Мы рассматриваем здесь случай «обычной материи», описываемой тензором энергии-импульса либо идеальной жидкости, либо электромагнитного поля.

для ньютонова потенциала Φ , и уравнение Лапласа

$$\Delta\psi=0 \quad (13)$$

для т. наз. вихревого потенциала ψ (здесь $\tilde{\rho}$ — плотность вещества в пределе $c \rightarrow \infty$). Кроме того, оказывается целесообразным ввести «векторный потенциал» \vec{A} , а также «напряженности поля» \vec{e} и \vec{h} , причем

$$\vec{e} = -\nabla(\Phi - \psi^2) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (14)$$

$$\vec{h} = 2\nabla\psi = \nabla \times \vec{A} \quad (15)$$

(здесь ∇ — оператор градиента (набла)). Теперь из уравнений геодезических линий для НР г-поля вытекают уравнения движения пробной частицы с единичной массой в неньютоновом (вихревом) поле:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{e} + (\vec{u} \times \vec{h}). \quad (16)$$

Отметим, что в силу условия (11) в уравнениях (16) никаким преобразованием координат нельзя уничтожить член кориолисова типа, содержащий вектор \vec{h} . В этом обстоятельстве и обнаруживается непосредственно вихревой характер г-поля при условии (11). Интересно еще отметить, что гамильтониан для пробной частицы с единичной массой получается в виде

$$H = \frac{\vec{u}^2}{2} + \Phi - \psi^2. \quad (17)$$

Вышеприведенные формулы и выражают строгим образом символическое соотношение (3). Именно эти формулы подрывают конкретным образом в случае ОТО «миф, имеющий хождение в учебной литературе, согласно которому любая релятивистская теория переходит в какую-либо одну содержательную классическую теорию, когда $c \rightarrow \infty$ » ([1], с. 263). Общие рассуждения в книге Бунге [1] о многовалентности перехода $c \rightarrow \infty$, по нашему мнению, бьют в случае ОТО мимо цели и фактически ничего не доказывают. Кроме того отметим, что, как показывает подробный анализ, для получения НТГ в пределе $c \rightarrow \infty$ не нужно «приравнять к нулю все компоненты тензора материи, за исключением компоненты 00» ([1], с. 261), поскольку в случае т. наз. обычной материи это условие попро-

сту получается как следствие перехода к НР пределу*. Теперь мы видим, что для получения только ньютонова предела фактически нужно сформулировать дополнительные условия относительно кривизны предельного сингулярного 4-мерного П-В, выражающиеся соотношениями (10).

Итак, в рамках цельного подхода к ОТО и ее пределам убеждаемся, что неньютонов предел тоже является НР пределом ОТО. Поэтому логично подвергнуть этот математически доказанный результат более подробному физическому анализу. При этом следует обсудить как НР соотношения типа (12)—(17) сами по себе, так и исследовать ЭТГ с точки зрения возможности неньютонова НР предела.

Уже из названных формул вытекает, что неньютоновы НР г-поля обнаруживают свойства, аналогичные квазистационарным магнитным полям**. Величина A является полным аналогом вектор-потенциала квазистационарного магнитного поля, а ψ — аналог скалярного потенциала этого поля для «магнитовакуума». Это значит, что все соотношения и формулы, а также все вычислительные методы и приемы, известные для этого частного вида магнитного поля, формально переносятся на неньютонов случай г-поля. Насколько далеко идущей и глубокой по существу является эта аналогия, требует, конечно, специального анализа. Из полученных уже формул следует, что взаимоотношения между электрическим и магнитным полями, с одной стороны, и между ньютоновым и неньютоновым НР г-полями, с другой стороны, несколько различаются (см. например, соотношения (14—15)). По существу, в случае г-поля эта связь нелинейна.

Охарактеризуем теперь основные отличительные черты физической природы НР предела в общем случае по сравнению с чисто ньютоновым пределом. Из (17) следует, что при наличии неньютонова г-поля сила притяжения к гравитирующему центру больше, чем соответствующая сила при наличии только ньютонова поля. Из (16) видим; что при движении свободной пробной частицы неньютонова часть г-поля порождает добавочную силу «магнитного» или «кориолисова» типа.

Если подойти к более фундаментальным следствиям, то следует констатировать существование следующей дилеммы: либо г-поля, имеющие неньютонов предел, существуют в природе и

* Вопрос о том, можно ли построить физически разумный тензор энергии-импульса, дающий иной результат в пределе $c \rightarrow \infty$, по-видимому, пока открыт и требует еще специального исследования. Отметим, что с этой проблемой тесно связана перспектива получения неоднородных векторных уравнений типа Пуассона для вихревых характеристик НР г-поля вместо уравнения Лапласа (13), т. е. перспектива получить теорию НР вихревых г-полей с источниками в уравнениях.

** Более подробно формальная аналогия электродинамики и общей НРТГ рассматривается в статье автора [25].

ньютонова теория не охватывает все гравитационные явления на НР уровне; либо в неньютоновых решениях НР уравнений гравитации обнаруживается некий элемент ЭТГ, не соответствующий действительности. В первом случае не исключено, что в результате тщательного анализа свойств, возможных источников и т. д. релятивистские решения уравнений г-поля с неньютоновым пределом могут приобрести особое значение для космологических и астрофизических применений ОТО. Во втором случае существование решений с неньютоновым пределом явно указывает на определенный «дефект» ЭТГ.

Обсуждая общие проблемы неньютоновых НР г-полей, кажется уместным указать на определенную аналогию этих физических феноменов с другими пока «сугубо теоретическими» физическими объектами (например, магнитными монополями, объектами с отрицательной массой, сверхсветовыми частицами и т. д.) *. Общепринято, что проблемы существования магнитного монополя, тахионов и т. д. можно считать окончательно решенными лишь после того, когда эти «экзотические» объекты будут открыты экспериментально или, напротив, «закрыты» теоретически. Но хорошо известно, что в физике доказательство «несуществования» является делом неизмеримо более сложным, чем доказательство «существования» (по этому поводу см. также, например, [26]). И до тех пор, пока обе возможности остаются (по меньшей мере теоретически), исследование «сугубо теоретических» физических объектов должно представлять определенный интерес как для теории (выяснение возможности «закрытия»), так и для опыта (выяснение возможностей «открытия»). К числу физических феноменов такого рода относим ныне также г-поля с неньютоновым пределом и оптимистически напоминаем реплику Дирака по поводу магнитных зарядов: «Было бы удивительно, если Природа не использовала этой возможности» [27].

Проблема уравнений с источниками для неньютоновых НР г-полей, по-видимому, пока одна из самых «неприятных» — ведь трудно найти вид релятивистского тензора энергии-импульса, дающий в пределе $c \rightarrow \infty$ для вихревых характеристик НР г-поля неоднородные уравнения типа Пуассона. В настоящий момент не ясно, является ли эта трудность принципиальной или, так сказать, технической. Может быть все-таки удастся сконструировать (с помощью δ -функции и т. п. образом) некоторый физически разумный тензор энергии-импульса, имеющий требуемые свойства. Здесь мы этой проблеме более подробно касаться не будем. Мы пока просто не считаем наличие трудно-

* Отметим, что рассматривая проблему т. наз. гравитационного вихревого монополя, можно выяснить и более тесную связь между проблемами неньютоновых г-полей и магнитных полей с монопольным магнитным зарядом.

стей, связанных с уравнениями для источников неньютоновых g -полей, достаточным поводом для снятия («закрытия») проблемы неньютонова предела ОТО. Кроме того подчеркиваем еще раз, что в общем НР случае связь между «кулоновой» (ньютоновой) и «магнитной» (неньютоновой) компонентами g -поля является на самом деле нелинейной (в формуле (14) аналогом скалярного потенциала электромагнитного поля является $U = \Phi - \psi^2$). Поэтому не исключено, что в этом случае даже вопрос об уравнениях с источниками следует поставить совсем по-иному. Например, обратим внимание на то, что вместо (12) получается более сложное уравнение для величин U и ψ , причем как U , так и ψ связываются с предельной плотностью ρ (более подробно см. [25]).

Как бы то ни было, подтвердят ли эмпирические данные существование g -полей с неньютоновым пределом или нет, удастся ли сконструировать вышеупомянутый тензор энергии-импульса с требуемыми свойствами или нет, несводимость, характеризующая взаимосвязь ЭТГ и НТГ, является фактом. Мы не получаем в пределе $c \rightarrow \infty$ только ту НР теорию, обобщением которой является ЭТГ и которая согласно принципу соответствия должна содержаться в ОТО. Чтобы имел место этот принцип в общепринятом смысле, необходимо, как мы видели выше, добавить некоторые определенные условия, логически от предельного перехода независимые. В настоящей работе мы не будем анализировать общих принципиальных и философских аспектов данного несоответствия. Отметим только, что, по-видимому, неньютонов предел действительно обнаруживает определенные «элементы принципиальной новизны» ЭТГ в сравнении с НТГ (проявление «магнитной» компоненты вдобавок к «кулоновой» в структуре g -поля, нелинейность гравитационных эффектов и т. п.). Но находит ли себе в этом выражение «центральное ядро» новой теории? Является ли указанное несоответствие вполне допустимым «дефектом» ЭТГ (может быть, даже обязательно нужным) или необходимо уже в принципе дополнить ЭТГ таким образом, чтобы исключить возможность неньютонова предела?

В заключение отметим, что стремление ко всестороннему теоретическому анализу содержания нелинейных уравнений Эйнштейна логически должно на нынешнем этапе развития ОТО привести нас и к детальному изучению возможного неньютонова НР предела у конкретных решений этих уравнений. Автором данной работы впервые показано, что некоторые точные решения релятивистских уравнений g -поля на самом деле имеют и неньютонов предел [22—24]. В связи с этим нами впервые поставлена задача обсудить, какую новую информацию о структуре и содержании уравнений Эйнштейна можно получить из изучения проблемы существования неньютонова предела

для широких классов решений этих уравнений. До сих пор этот вопрос далеко не ясен. На наш взгляд, подробное исследование той новой информации — новой с точки зрения известной НР теории, т. е. с точки зрения НТГ, — которая вытекает из ОТО уже при изучении явлений гравитации на НР уровне, представляет собой важную и далеко не тривиальную задачу. Без специального исследования остается совсем не ясным, какие именно конкретные решения уравнений Эйнштейна (в том числе точные решения) имеют ньютонов предел и с какими структурными свойствами релятивистских решений связано существование такого предела. Представляет большой интерес выяснение вопроса, почему некоторые релятивистские решения уравнений гравитации имеют ньютонов предел, а другие — нет. Можно надеяться, что такой анализ поможет и более подробному выявлению сущности «несоответствия», выраженного вообще в факте существования ньютонова предела. Таким образом, приступая к обсуждению проблем нахождения и анализа конкретных релятивистских решений уравнений г-поля, представляет интерес наряду с ньютоновым всегда учитывать возможность существования ньютонова предела ОТО. С методологической точки зрения мы вправе всегда ставить два вопроса: 1) к каким следствиям приведет исследование предела $c \rightarrow \infty$ в общем случае, т. е. каким конкретным образом выражается вышеупомянутое «несоответствие» ЭТГ и НТГ, и 2) как выглядят и какой смысл имеют в конкретных частных случаях те условия, которые являются необходимыми для исключения этого несоответствия, т. е. для получения однозначного соответствия ЭТГ и НТГ. * Во всяком случае выявление определенных множеств конкретных решений уравнений поля ЭТГ, имеющих ньютонов предел и описывающих тем самым такие релятивистские вихревые г-поля, вихревой характер которых не исчезает даже в НР пределе, образует ныне интересный теоретический «задел», геометрическое и физическое значение которого, на наш взгляд, заслуживает внимательного исследования.

Автор благодарен профессору П. Г. Карду за обсуждение и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Бунге. Философия физики. М., «Прогресс», 1975.
2. В. П. Хютт. Методология дополнителности как система принципов физического познания. — В кн.: Метод моделирования и некоторые философские проблемы истории и методологии естествознания. Таллин, 1975, с. 168.

* В общем случае стационарных г-полей последний вопрос нами более подробно уже изучался, причем получены общие формулы для идентификации решений как с ньютоновым, так и с ньютоновым пределом [20].

9. А. С. Арсеньев. Переход от старой теории к новой как превращение понятия (К анализу принципа соответствия в физике). — В кн.: Анализ развивающегося понятия. М., 1967, с. 249.
4. Х. Керес. Гравитационные поля ньютоновского типа. — ЖЭТФ, 1965, 48, № 5, 1319.
5. П. Г. Кард. Принцип несоответствия. — Уч. записки Тартуского гос. ун-та, вып. 360. Методологические вопросы физики, II. Тарту, 1975, с. 21.
6. C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler. Gravitation. San Francisco. W. H. Freeman and Co., 1973.
7. А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1955.
8. Х. Керес. О принципах эквивалентности и относительности. — «Тр. Ин-та физ. и астрон. АН ЭстССР», 1963, № 22, 5.
9. Х. П. Керес. Обобщенные инерциальные системы в ньютоновской и общерелятивистской механиках. II. Теория Эйнштейна. — «Тр. Ин-та физ. и астрон. АН ЭстССР», 1964, № 25, 3.
10. Х. П. Керес. Обобщенные инерциальные системы в ньютоновской и общерелятивистской механиках. I. Теория Ньютона. — «Тр. Ин-та физ. и астрон. АН ЭстССР», 1963, № 20, 92.
11. Х. Керес. Принцип соответствия в общей теории относительности. — ЖЭТФ, 1964, 46, № 5, 1741.
12. Х. П. Керес. Представление ньютоновой теории. — В кн.: Гравитация. Киев, «Наук. думка», 1972, с. 62.
13. Х. Керес. Тензорный гравитационный потенциал и четырехмерное представление ньютоновской теории Э. Картаном. — «Изв. АН ЭССР. Физ. Матем». 1976, 25, № 4, 349.
14. А. А. Коппель. О хронометрической калибровке тетрад и нерелятивистском пределе теории гравитации Эйнштейна. — Тезисы докладов VI Всесоюзной геометрической конференции. Вильнюс, 1975, с. 127.
15. А. Коппель. К вопросу о калибровках тетрадных потенциалов. (Системы отсчета с ньютоновым временем). — «Изв. АН ЭССР. Физ. Матем.» (в печати).
16. А. А. Коппель. Нерелятивистские гравитационные поля в общей теории относительности. Тарту, 1977.
17. А. А. Коппель. Нерелятивистский анализ релятивистских гравитационных полей. Тарту, 1977.
18. E. Cartan. Sur les variétés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée. «Ann. de l'École Normale Sup.», 1923, 40, 325; 1924, 41, 1.
19. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля. М., «Наука», 1973.
20. A. Korpel. Newtonian and non-Newtonian limits of the stationary gravitational fields. — «Изв. АН ЭССР, Физ. Матем», 1975, 24, № 3, 297.
21. А. Коппель. О нерелятивистском пределе стационарных двухпеременных решений уравнений, Эйнштейна. — «Изв. АН ЭССР. Физ. Матем.», 1974, 23, № 4, 370.
22. A. Korpel. Stationary two-variable gravitational vortex fields. Preprint FI-34, Tartu, 1974.
23. А. А. Коппель. Ньютоновы и ньютоновы пределы гравитационных полей типа Керра-НУТ. — «Изв. вузов СССР. Физика», 1975, № 9, 29.
24. А. А. Коппель. Двухпеременные стационарные гравитационные поля и их нерелятивистские пределы. — Тезисы докладов IV Советской гравитационной конференции. Минск, 1976, с. 230.
25. А. Коппель. Об аналогии между нерелятивистской теорией гравитации и теорией электромагнетизма. — «Изв. АН ЭССР. Физ. Матем.», 1977, 26, № 3 (в печати).
26. Монополь Дирака. Сборник статей. М., «Мир», 1970.
27. P. A. M. Dirac. Quantized singularities in the electromagnetic field. Proc. Roy. Soc., 1931, A 133, № 821, 60.

Поступила в редакцию 6 июня 1976 г.

ÜLDRELATIIVSUSTEORIA JA SELLE MITTERELATIVIST- LIKE PIIRJUHTUDE VAHEKORRAST

A. Koppel

Resümee

Järgides H. Keresse lähenemisviisi [4, 8—13], käsitletakse relativistlikku ja mitterelativistlikku gravitatsiooniteooriat ühtse tervikuna, sest nii matemaatilist aparati kui põhilisi füüsikalisi ideid võib mõlema juhu jaoks ühistena vaadelda. Seejuures on antud töös tuginetud tetraadformalismi kasutamisele välisdiferentsiaalvormide keeles. Lähtekohaks on nii relativistlike kui mitterelativistlike gravitatsiooniväljade uurimine vabalt langevates reeperites. Analüüsitakse nimetatud ühtse ja tervikliku käsitlusviisi metodoloogilist tähtsust ja heuristilisi väärtusi. Näidatakse, et niisugune lähenemisviis üldrelatiivsusteooriale ja selle mitterelativistlikele piirjuhtudele ühelt poolt avardab ja süvendab nende piirjuhtude, sealhulgas Newtoni gravitatsiooniteooria mõistmist, teiselt poolt toob aga ilmsiks üldrelatiivsusteooria uusi olulisi jooni ja selles seni varjujäänud võimalusi, näitab uusi teid ka puhtrelativistlike efektide tõlgendamiseks. Erilist tähelepanu pööratakse järeldestele üldrelatiivsusteooria mittenjuutonliku mitterelativistliku piirjuhu olemasolust. Rõhutatakse Einsteini gravitatsiooniteooria väljavõrrandite niisuguste konkreetsete lahendite leidmise ja uurimise olulist tähtsust, mille piirjuht on mittenjuutonlik ja mis seetõttu kirjeldavad isegi mitterelativistlikul piiril pööriselistena säilivaid relativistlikke pööriselisi gravitatsioonivälju. Märgitakse, et nimetatud pöörislahendid moodustavad praegu huvitava teoreetiliste võimaluste «tagavara» üldrelatiivsusteoorias, mille geomeetiline tähendus ja füüsikaline sisu väärib ilmselt üksikasjalikumat uurimist.

ON INTERRELATIONS BETWEEN THE GENERAL THEORY OF RELATIVITY AND ITS NON-RELATIVISTIC LIMITS

A. Koppel

Summary

Following the works of H. Keres [4, 8—13], a common approach to the relativistic and non-relativistic theory of gravitation is presented, making use of the fact that in both cases the mathematical apparatus as well as the underlying physical ideas can be regarded as being essentially the same. In this paper the treatment is based on tetrad formalism in the language of exterior differential forms. As a starting-point,

gravitational fields, both relativistic and non-relativistic, have been examined in freely falling local bases. The methodological significance and heuristic value of the above-mentioned treatment are discussed. On the one hand such an approach to general relativity enables a deeper insight into its non-relativistic limits, including the Newtonian theory of gravitation, and on the other hand it reveals new important features of general relativity itself, indicating yet undiscovered potentialities in it and opening new prospects for the interpretation of purely relativistic effects as well. Special attention has been paid to the conclusions that can be drawn from the possible existence of a non-Newtonian non-relativistic limit of general relativity. The importance of finding out such particular solutions to Einstein's field equations which have a non-Newtonian non-relativistic limit is stressed. These solutions describe the relativistic vortex gravitational fields with rotational character persisting even in the non-relativistic limit. It is noted that nowadays the above-mentioned vortex solutions form an interesting reserve of theoretical possibilities in general relativity and it is evidently worth-while to investigate in more detail the geometric and physical meaning of these solutions.

НУЛЕВАЯ ЭНЕРГИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА И ЕЕ КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

А. Я. Киппер

Квантовая теория волновых явлений непосредственно связана с проблемой гармонического осциллятора. Этот вопрос относится прежде всего к электромагнитному излучению, но он важен также в теории любых волновых полей, именно в процедуре т. наз. вторичного квантования.

Представление электромагнитного поля в виде интеграла или ряда Фурье позволяет рассматривать поле как суперпозицию монохроматических волн, каждая из которых обладает определенной частотой, поляризацией и направлением распространения. Каждая такая волна энергетически эквивалентна гармоническому осциллятору. Отсюда вытекает известная в теоретической физике теорема Джинса, согласно которой электромагнитное излучение можно рассматривать как совокупность (ансамбль) гармонических осцилляторов, заполняющих пространство с определенной плотностью.

Гармонический осциллятор характеризуется энергией (гамильтонианом)

$$H = \frac{1}{2}(p^2 + \omega^2 q^2), \quad (1)$$

где p и q — канонические переменные (импульс и координата), а ω — частота осциллятора. В квантовой теории p и q являются некоммутирующими операторами. Гамильтониан является, соответственно, тоже оператором, имеющим в диагональной форме вид

$$E = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad (2)$$

где n — положительное целое число (включая нуль). Целое число n означает в теории электромагнитного излучения число фотонов. Итак, каждый осциллятор поля излучения является носителем некоторого числа n фотонов. Связанные с данным осциллятором фотоны являются когерентными, т. е. все они имеют одну и ту же поляризацию, фазу и направление распростране-

ния, так как все они относятся к одному и тому же члену в разложении Фурье.

Энергия осциллятора имеет наименьшее значение при n , равном нулю. Тогда

$$E = \frac{1}{2} \hbar \omega \quad (3)$$

Эта величина называется нулевой энергией осциллятора. В настоящей статье мы рассмотрим вопросы, связанные с нулевой энергией.

Осциллятор, находящийся в состоянии с нулевой энергией, ведет себя своеобразно: обладая энергией, он не может передать ее другим физическим системам. В самом деле, обмен энергией между осциллятором и внешним по отношению к нему миром означает изменение числа фотонов n . Но в нулевом состоянии число фотонов уменьшиться не может; следовательно, осциллятор не может отдать энергию. Поскольку осциллятор в нулевом состоянии энергетически неактивен и ничем не может непосредственно обнаружить свое существование, то иногда это состояние рассматривалось как побочный математический продукт теории. Делались попытки устранить возможность появления нулевого состояния, например, с помощью замены выражения (1) формулой

$$H = \frac{1}{2} (p^2 + \omega^2 q^2) - \frac{1}{2} \hbar \omega, \quad (4)$$

дающей в самом деле желаемый результат.

Однако устранение нулевой энергии с помощью формулы (4) или другой подобной формулы является непоследовательным приемом, так как тем самым квантовая физика лишается одной из своих самых существенных особенностей. Появление нулевой энергии в выражении энергии гармонического осциллятора является прямым и неизбежным следствием одного из самых основных положений квантовой теории — соотношения неопределенностей Гейзенберга. Согласно этому соотношению, невозможно измерить одновременно сколь угодно точно величины, входящие в одну и ту же каноническую пару. Таковыми величинами являются p и q . В частности, никакое измерение не может дать равных нулю значений обеих величин p и q . Но отсюда следует, что и H , согласно формуле (1), не может стать равным нулю. В этом и заключается глубокий смысл и сущность нулевой энергии.

Обмен электромагнитной энергией происходит во всех известных до сих пор процессах только целыми фотонами. Эти процессы связаны с изменениями состояний осцилляторов, сопровождающимися изменениями квантовых чисел n . Но если допустим существование процессов, сопровождающихся измене-

нием частоты при неизменном квантовом числе n , то можем ожидать участия в этих процессах нулевой энергии.

Среди процессов, характеризующихся изменением частоты, наиболее известно космологическое красное смещение спектральных линий.

Согласно общеизвестному воззрению космологическое красное смещение является результатом расширения Вселенной. Наряду с этим воззрением высказывалось также мнение, по которому космологическое красное смещение является эффектом «усталости» фотонов. Усталость фотона понимается именно как непрерывное уменьшение его частоты, не связываемое обязательно с эффектом Допплера. Автор настоящей статьи рассматривал гипотезу, согласно которой космологическое пространство обладает некоторой электропроводностью σ_1 (см. [1, 2]). Такое пространство способно поглощать энергию электромагнитных волн. Уменьшение энергии происходит за счет уменьшения частоты фотона, в чем и заключается эффект «усталости» фотона.

С точки зрения обеих указанных гипотез можно по-прежнему рассматривать электромагнитное поле как ансамбль гармонических осцилляторов. В случае Вселенной де Ситтера энергия осциллятора выражается формулой

$$H = e^{-\frac{4\pi}{3}\sigma t} \frac{1}{2}(p^2 + \omega^2 q^2), \quad (5)$$

причем постоянная σ связана с постоянной Хаббла \mathfrak{H} соотношением:

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi}{3}\sigma.$$

Формула (5) верна также и с точки зрения гипотезы усталости фотона. Космологический коэффициент проводимости σ_1 оказывается связанным с постоянной σ в формуле (5) следующим образом:

$$\sigma_1 = \frac{1}{3}\sigma.$$

Итак, обе гипотезы — гипотеза расширения Вселенной и гипотеза усталости фотона — приводят практически к одному и тому же выражению (5) для энергии гармонического осциллятора. Это обстоятельство послужило автору настоящей статьи основанием к утверждению, что во многих проблемах, связанных с энергией электромагнитного излучения, обе гипотезы эквивалентны. Это положение находит себе опору еще в одном мысленном эксперименте, который в известной мере имитирует космологическое расширение Вселенной.*

* Автор благодарен академику Я. Б. Зельдовичу за привлечение внимания к этому эксперименту.

Мысленный эксперимент состоит в следующем. Вообразим сосуд с абсолютно отражающими стенками. Излучение, находящееся в сосуде, оказывает на стенки давление, в результате которого сосуд расширяется и его объем увеличивается. Движение стенок сосуда сопряжено с механической энергией. Описанное устройство превращает энергию излучения в механическую энергию, в строгом согласии с законом сохранения энергии. Отметим еще, что убывание энергии излучения происходит путем уменьшения частот элементарных волн при каждом отражении от движущихся стенок сосуда. Пусть объем сосуда возрастает подобно элементу объема во Вселенной де Ситтера. Тогда для энергии осциллятора получается формула

$$H = e^{-\frac{4\pi}{3}\sigma t} \frac{1}{2}(p^2 + \omega^2 q^2), \quad (6)$$

совпадающая с формулой энергии в расширяющейся Вселенной или согласно гипотезе усталости фотонов. Наш мысленный опыт включает наиболее существенные черты обеих гипотез: расширение сосуда соответствует расширению Вселенной, а усталость фотонов является источником энергии для расширения сосуда.*

Сравнивая выражение (1) энергии гармонического осциллятора, верное при малых значениях космологического времени, с выражением (6), свободным от налагаемых на время ограничений, мы видим их сходство. Различие состоит только в множителе

$$e^{-\frac{4\pi}{3}\sigma t}, \quad (7)$$

учитывающем убывание энергии осциллятора со временем t , когда осциллятор длительно пребывает в космологическом пространстве.

Указанное сходство двух выражений позволяет без труда провести квантование электромагнитного поля. В результате для энергии осциллятора получается выражение

$$E_n = e^{-\frac{4\pi}{3}\sigma t} \hbar \omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad (8)$$

отличающееся от соответствующего некосмологического выражения (2) опять только множителем (7). Энергия убывает экспоненциально во времени t , но число фотонов n остается при этом неизменным. Убывание энергии имеет место вследствие

* При расширении элемента объема находящиеся в нем точечные массы удаляются друг от друга. Потенциальная энергия, связанная с гравитационными силами, возрастает. Это происходит, по крайней мере отчасти, за счет энергии фотонов.

уменьшения частоты ω . Именно, наблюдаемая по прошествии времени t частота фотона равна

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{4\pi}{3} \sigma t} \quad (9)$$

Здесь ω_0 означает частоту колебаний осциллятора в момент $t = 0$ возбуждения. Формула (9) и есть формула космологического красного смещения.

Подчеркнем здесь вновь, что предпосылкой формулы (8) может быть или расширение Вселенной, или гипотеза усталости фотонов, а также мысленный эксперимент с расширением сосуда, имеющего идеально отражающие стенки.*

Формула (8) по-прежнему содержит нулевую энергию. В силу того, что зависящий от времени множитель

$$e^{-\frac{4\pi}{3} \sigma t}$$

стоит перед полным выражением энергии, нулевая энергия полностью принимает участие в убывании энергии осциллятора. При этом энергия осциллятора убывает быстрее, чем в случае отсутствия нулевой энергии. Покажем это на примере $n = 1$.

Пусть осциллятор в момент $t = 0$, получая энергию $\hbar\omega_0$, возбуждается за счет энергии какого-либо атома. При возбуждении происходит переход

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar\omega_0 \rightarrow E_1 = \frac{3}{2} \hbar\omega_0$$

В последующие моменты $t > 0$ энергия осциллятора равна

$$E_1(t) = e^{-\frac{4\pi}{3} \sigma t} \frac{3}{2} \hbar\omega_0. \quad (10)$$

Из этой формулы видно, что в момент

$$t_1 = \frac{1}{\frac{4\pi}{3} \sigma} \ln 3 \quad (11)$$

вся энергия $\hbar\omega_0$, полученная осциллятором при возбуждении, оказывается израсходованной. Наоборот, если бы нулевой энергии не было, то вся энергия возбуждения была бы израсходована только при $t = \infty$. Поэтому начиная с момента t_1 (см. фор-

* Отражение на стенках должно происходить так, чтобы падающая и отраженная волны были когерентны, т. е. чтобы при отражении квантовое число n осциллятора не изменялось.

мулу (11)) в процесс включается нулевая энергия, т. е. энергия осциллятора начинает убывать за счет той ее части, которую осциллятор при возбуждении не получал. Ясно, что здесь мы имеем дело с некоторой парадоксальной ситуацией, требующей решения в непротиворечивой теории. В качестве одной возможности решения в настоящей статье выдвигается предположение, согласно которому в момент t_1 процесс прекращается. Прекращение процесса состоит в переходе рассматриваемого осциллятора в нулевое состояние.

Высказанное утверждение опирается на результат рассмотренного выше мысленного опыта. В самом деле, если устройство, превращающее энергию излучения в механическую энергию, продолжало бы работать и после момента t_1 , то мы получили бы энергию не только за счет энергии, полученной осциллятором при возбуждении, но и за счет нулевой энергии. Такая машина была бы своеобразным вечным двигателем, который, правда, не производил бы энергию из ничего, но превращал бы в активную форму нулевую энергию, без этой машины не поддающуюся использованию. Подобный вечный двигатель следует признать невозможным.

Рассмотрим теперь более общий случай, когда осциллятор возбуждается в квантовое состояние с $n > 1$. Исходя из формулы (9), легко показать, что в момент

$$t_n = \frac{1}{\frac{4\pi}{3}\sigma} \ln \frac{2n+1}{2n-1} \quad (12)$$

осциллятор израсходовал энергию $\hbar\omega_0$, соответствующую энергии одного фотона. В частном случае $n = 1$ осциллятор должен исчезнуть, или, иными словами, должен произойти переход

$$n=1 \rightarrow n=0, \quad (13)$$

не сопровождаемый никаким обменом энергией. Если это утверждение верно, то можно думать, что и в случае $n > 1$ в момент t_n (см. формулу (12)) происходит переход

$$n \rightarrow n-1 \quad (14)$$

тоже без обмена энергией. Это значит, что после процесса (14) энергия осциллятора равна

$$E = e^{-\frac{4\pi}{3}\sigma(t-t_n)} \hbar\omega_0 \left(n-1 + \frac{1}{2} \right), \quad (15)$$

причем, как видно из этой формулы, в момент t_n первоначальная частота ω_0 восстанавливается.

Переход (14) не диктуется невозможностью построения вышеописанного вечного двигателя, подобно переходу (13). Но (14) является естественным обобщением перехода (13), совершающегося при значении квантового числа осциллятора $n = 1$. Поскольку переход не диктуется непосредственно энергетическим принципом, мы должны смягчить утверждение о его неизбежности. Следует потребовать, чтобы в момент t_n , определяемый формулой (12), переход (14) совершался только с некоторой вероятностью. Последнее утверждение позволяет, вполне в духе квантовой физики, некоторой доле осцилляторов сохранить прежнее квантовое число n и после момента t_n . Для этих осцилляторов справедлива по-прежнему при $t > t_n$ формула (8). Остальные осцилляторы испытывают переход (14) и для них имеет место формула (15). В последнем случае момент t_n следует считать моментом нового возбуждения осциллятора.

В силу того, что в момент t_n при переходе

$$n \rightarrow n - 1$$

первоначальная частота ω_0 осциллятора восстанавливается, возрастание красного смещения прерывается. Так как t_n является моментом нового возбуждения, то и красное смещение начинает вновь расти с нулевого значения. В результате теряется однозначная и непрерывная связь между величиной z красного смещения и удаленностью объекта, называемая законом Хаббла. Предсказания теории можно проверить путем исследования красного смещения далеких космологических объектов. Величина z красного смещения определяется, как известно, формулой

$$z = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega}, \quad (16)$$

где ω наблюдаемая, а ω_0 — т. наз. лабораторная (т. е. незатронутая красным смещением) частота спектральной линии.

Рассмотрим прежде всего простейшие случаи. Если квантовое число осцилляторов $n = 1$, то осциллятор исчезает в момент

$$t_1 = \frac{1}{\frac{4\pi}{3}\sigma} \ln 3$$

Имея в виду, что σ равно по порядку величины постоянной Хаббла, t_1 получается равным нескольким миллиардам лет. Это — время пребывания в космологическом пространстве фотонов, излученных квазарами и другими сверхдальними космологическими объектами.

Красное смещение спектральных линий квазаров измеряется, как правило, по эмиссионным линиям, так как они присутст-

вуют во всех спектрах этих объектов. Гораздо реже наблюдаются в спектрах квазаров линии поглощения. Они встречаются в том случае, когда найденное по эмиссионным линиям красное смещение велико, т. е. когда объект находится на особо далеком расстоянии. Но всякий раз, когда линии поглощения обнаруживаются, число их очень значительно.

Эмиссионные линии космических объектов возникают во внешних частях небесного тела — вообще там, где плотность излучения относительно мала. Отсюда вытекает, что процесс вынужденного испускания играет второстепенную роль по сравнению со спонтанной эмиссией. Соответственно, квантовое число n равно у большинства осцилляторов, дающих эмиссионные линии,

$$n=1.$$

В случае, когда эмиссионные линии видны на интенсивном сплошном фоне, можно ожидать также наличия осцилляторов с

$$n=2,$$

тогда как квантовые числа $n=3$ для эмиссионных линий несомненно редки.

Что касается квантовых чисел осцилляторов, принадлежащих сплошному спектру, то они, в отличие от квантовых чисел осцилляторов эмиссионных линий, должны быть больше. Это обусловлено тем, что фотоны, принадлежащие сплошному спектру, рождаются в более глубоких слоях оболочки объекта, где плотность излучения достаточно велика для повышения роли процессов вынужденного испускания. Квантовые числа осцилляторов, принадлежащих сплошному спектру, могут достигать нескольких десятков.

Вследствие того, что осцилляторы эмиссионных линий отличаются от осцилляторов линий поглощения значениями квантовых чисел n , величины красного смещения, определенные по этим линиям, тоже различны.

Осциллятор с квантовым числом $n=1$ (эмиссионная линия) существует до момента времени

$$t_1 = \frac{1}{\frac{4\pi}{3}\sigma} \ln 3,$$

после чего он перестает существовать. К этому времени величина красного смещения достигает значения

$$z=2, \quad (17)$$

как вытекает из формул (9), (11) и (16). Следовательно, эмиссионные линии осцилляторов с квантовым числом $n=1$ не

могут иметь значения красного смещения, превышающего $z = 2$.

Известно, правда, что существуют квазары с красным смещением $z > 2$, но таких квазаров относительно немного. Заслуживает внимания, что при $z = 2$ наблюдается резкое падение числа квазаров. Как отмечено выше, большинство осцилляторов эмиссионных линий имеют квантовое число $n = 1$, и лишь у немногих $n = 2$. В последнем случае z может быть больше чем 2. Этим объясняется резкое уменьшение числа квазаров при $z = 2$.

Иначе обстоит дело в случае линий поглощения. Квантовые числа n осцилляторов, соответствующих сплошному спектру, значительно больше единицы. Здесь следует применить формулу (12), согласно которой в момент t_n совершается с некоторой вероятностью переход

$$n \rightarrow n - 1 \quad (18)$$

и восстанавливается первоначальная частота ω_0 . Это значит, что у некоторой части осцилляторов в момент t_n красное смещение угасает. Если к этому моменту фотоны еще не достигли наблюдателя, то процесс красного смещения начинается снова. Учитывая, что t_n зависит от квантового числа n и что каждая спектральная линия образуется многими осцилляторами с различными квантовыми числами, переход (18) происходит в разные времена и на разных расстояниях от наблюдателя. На спектрограммах все это обнаруживается как расщепление линий поглощения на множество отдельных линий. Более подробный расчет показывает, что расщепление линий поглощения на отдельные компоненты имеет место при более значительных расстояниях, когда величина красного смещения z_{em} , измеренная по эмиссионным линиям, больше чем 2. Серии линий, образующихся при расщеплении линий поглощения, должны быть смещены в фиолетовую сторону от эмиссионной линии того же элемента. Эти выводы полностью согласуются с наблюдениями.

Расщепление линий поглощения на отдельные компоненты означает, что величина красного смещения z_{abs} определяется по ним неоднозначно. Многозначность смещения выражается формулой

$$\lg(1+z_{abs}) = \lg(1+z_{em}) - \lg \frac{2n+1}{2n-1} \quad (19)$$

где n — положительное целое число. Кроме того, имеют место еще формулы

$$\lg(1+z_{abs}) = \lg(1+z_{em}) - \lg \frac{2n+1}{2n-3} \quad (20)$$

и т. д. Формула (19) является все-таки главной.

К настоящему времени накопилось достаточно наблюдательных данных, чтобы проверить правдоподобность теории, изложенной в настоящей статье. Особо ценны спектральные данные относительно квазаров, у которых $z_{em} \geq 2$, так как в спектрах этих объектов число линий поглощения весьма значительно. Автор настоящей статьи имел в своем распоряжении промеры спектров поглощения шести квазаров, по которым были вычислены значения z_{abs} . Всего имелось 37 определений величины z_{abs} . Из них 27 совпали с точностью 0.1% с формулой (19). Остальные 10, которые сами авторы их отнесли к «мало вероятным», не обнаружили согласия с теоретической формулой.

Следует отметить, что вычисление z_{abs} из наблюдательных данных сопряжено с большими трудностями. Необходимо знать химический состав атмосферы квазара и условия возникновения спектральных линий, а это предполагает гораздо более глубокое понимание физики этих космологических объектов, чем дает современная неполная еще теория. Все это означает в итоге неопределенность в идентификации спектральных линий и отсюда также неопределенность в нахождении значений z_{abs} . Обычно принадлежность более чем половины измеренных линий поглощения остается неизвестной.

В настоящей статье мы изложили соображения относительно нулевой энергии осциллятора излучения. Мы попытались показать, что нулевая энергия не является просто добавочным членом в выражении энергии гармонического осциллятора, но что она обнаруживается в некоторых реальных процессах. Во всех явлениях обмена энергией, в которых энергия гармонического осциллятора изменяется целыми квантами при изменении квантового числа n , нулевая энергия не играет никакой существенной роли. Большинство наблюдаемых нами процессов излучения именно так и происходит. Но если энергия гармонического осциллятора изменяется непрерывно при убывании частоты ω , то наличие нулевой энергии становится существенным, что обнаруживается в ходе соответствующих процессов. Многозначность величины красного смещения z_{abs} , полученной из спектров поглощения квазаров, является согласно изложенной нами гипотезе одним из реальных проявлений существования нулевой энергии гармонического осциллятора. Можно думать, что реальное существование нулевой энергии находит свое отражение и в других явлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Киппер. О сущности космологического красного смещения. — «Астрофизика», 1974, 10, вып. 2.
2. А. Kipper. Regularities in the Redshifts of Quasar Spectral Lines. — «Публ. Тартуской обс.», 1973, 41.

Поступила в редакцию 27 марта 1976 г.

HARMOONILISE OSTSILLAATORI NULLENERGIA JA SELLE KOSMOLOOGILINE TÄHTSUS

A. Kipper

Resüme e

Laineliste nähtuste kvantteooria on otseselt seotud harmoonilise ostsillaatori probleemiga. Erinevalt klassikalisest teooriast omab harmoonilise ostsillaatori energia avaldis kvantteoorias eripärast liiget, mis kannab nullenergia nimetust. Valdaval enamikul reaalselt toimuvatest nähtustest ei mängi nullenergia olemasolu mingit olulist osa. Seevastu kosmoloogilistes nähtustes, esmajoones kaugete kosmoloogiliste objektide punanihkumise mitmesugustes eripärasustes, on ostsillaatorite nullenergial teatud tähtis funktsioon. Artiklis tõestatakse seda nii mõttelise eksperimendi kui ka kvasarite spektritest saadud vaatlusandemetega.

HARMONIC OSCILLATOR ZERO ENERGY AND ITS COSMOLOGICAL SIGNIFICANCE

A. Kipper

Summary

The quantum theory of wave phenomena is closely related to the harmonic oscillator problem. Unlike the classical theory, the expression for the harmonic oscillator energy has in the quantum theory a special term called zero energy. In most phenomena this zero energy does not play any role. But in cosmological phenomena the zero energy of oscillators is of importance, mainly for the explanation of the redshift peculiarities of remote cosmological objects. In this paper that role is proved by an imaginary experiment and by observational results obtained from quasar spectra.

КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЫ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Х. Т. Ээлсалу

Общенаучный методологический аппарат строится в значительной мере на основе объединения и стандартизации методологического арсенала отдельных дисциплин, каждая из которых вносит свой вклад в этот общий аппарат. Для методологического анализа научных дисциплин, характеризующихся длинным и сложным циклом исследования, может, в частности, оказаться полезной концепция исследовательских систем. Автором настоящей статьи разработана соответствующая концепция в связи с его трактовкой галактической статистики (концепция галактографической исследовательской системы [1]). Она была непосредственно использована как в интересах раскрытия логических взаимоотношений между астрономическими дисциплинами, так и в интересах объяснения внутренней логической структуры галактической статистики.

1. Мы считаем, что понятие **исследовательской системы** стыкуется в известной мере с таким философским понятием, как понятие **исследовательской программы**, которое является предметом анализа у Ярошевского [2]. Программный подход в его формулировке должен позволить раскрыть и анализировать логические и коммуникативные аспекты исследования, осознать проблемную ситуацию и включить в анализ то, что он называет личностными характеристиками исследователя. По нашему мнению, соответствующую интерпретацию должны допускать, в частности, астрономические исследовательские системы.

Роль концепции исследовательских систем можно раскрыть путем сравнения астрономии с другими отраслями науки. По отношению к физике, например, Киппер [3] говорит: «Физика распадается на отдельные полные и замкнутые физики, каждая из которых имеет свою систему пространства и времени». Очевидно, что такой изоляционизм неосуществим в астрономии. Здесь ближе к истине утверждение, что «астрономия распадается на отдельные относительно обособленные астрономические

исследовательские системы, которые занимаются частично одними и теми же наблюдательными данными и описательными признаками». Использованное здесь понятие **относительного обособления систем** предложено, как известно, Грневским в смысле указания на наличие у некоторой совокупности систем ограниченного числа взаимных входов. По-видимому, характерной особенностью относительно обособленных систем следует считать возможность подвергать их изучению на фоне друг друга методом последовательных приближений [4].

Надобность в разграничении предмета звездно-статистического исследования при помощи концепции исследовательской системы возникает, например, при разработке теории образования шкал наблюдательных данных, а также при разработке понятия опорного фона и понятия систем отсчета, в частности — понятия фундаментальных астрономических постоянных.

В статистико-астрономическом аспекте любая галактическая исследовательская система (в частности, **галактографическая исследовательская система**) трактуется преимущественно в качестве **информационной системы**, т. е. в качестве системы, в которой энергетические связи рассматриваются только в минимальной мере постольку, поскольку их рассмотрение неизбежно для понимания специфики информационных связей.

2. Исследовательская система приобретает свое наглядное содержание в значительной мере при разработке **концепции организации исследования**, если такая разработка осуществляется на уровне **органиграмм**. В частности, в органиграммах должна проявляться конкретность участия исследователя в процессе исследования. Связи, которые направлены к исследователю, являются информационными, а связи, направленные от него, имеют характер суждений. Для последнего типа связей предлагается название «эвристические связи» [4]. По-видимому, говорить о **системном подходе** или **программном подходе** к исследовательской работе имеет смысл именно в том случае, когда выдвигается определенная концепция, раскрывающая роль исследователя в сети связей, с упорядочения которых начинается организация исследования.

В случае галактической статистики учет роли исследователя представляет собой прежде всего описание того, каким образом он принимает индуктивные суждения, напр., описание того, как происходит исключение промахов в измерительной серии или как происходит замыкание цепи индуктивных суждений.

Ядром программного подхода к организации исследования должно служить создание представления о **проблемной ситуации**. Другими словами, методологический арсенал должен дать формальные средства, способствующие преодолению фрагментарности исследования. К этим средствам относятся прежде всего понятия **цели и стратегии исследования**.

Понятие цели исследования имеет некоторое отношение к таким методологическим понятиям, как, например, **фундаментальность исследования, обособление исследовательской системы, пре-информация и цикл исследования**. Например, с точки зрения цикличности исследования следует подчеркнуть принципиальное единство звездной статистики и динамики, так как разница подхода заключается только в том, каким образом мы интерпретируем цикл исследования: теория → наблюдение → теория или наблюдение → теория → наблюдение.

3. Вопрос о понятии стратегии исследования в галактической статистике можно было поставить после разработки теории того, что мы назвали галактографическим преобразованием. А именно, отправным пунктом при изложении сущности метода галактической статистики считается преобразование шкал наблюдательных данных к шкалам описательных переменных. Галактическая статистика приобретает свое содержание при рассмотрении как преобразования распределений наблюдательных данных, так и преобразования их моментов на основе правил галактографического преобразования шкал. Такой подход позволяет найти общие принципы для выяснения, систематизации и трактовки фундаментальных звездно-статистических соотношений и дает ответ на вопрос о том, в чем заключается специфика данной астрономической дисциплины.

Простая стратегическая схема по примеру теории игр не может распространяться на сложные дисциплины, подобные тем, которые охватываются астрономическими исследовательскими системами. Однако отправным пунктом должно все-таки стать какое-либо сходство с употреблением понятия стратегии в общенаучном смысле: мы должны иметь в виду процесс, в котором участвуют две стороны, предпринимающие определенные шаги, причем на некоторых стадиях процесса должны быть возможны альтернативные суждения.

В данном случае мы имеем дело не с двумя противниками, а с двумя партнерами — теоретиком и наблюдателем, которые в частном случае могут быть представлены одним и тем же исследователем. Теоретик располагает несколькими в общем соперничающими теориями, наблюдатель — некоторым комплектом статистических выборок, относящихся к наблюдательным данным разного качества, или комплектом средств наблюдения. Теоретик и наблюдатель должны прийти к соглашению относительно использования одних и тех же критериев статистических суждений (напр., в смысле теории проверки гипотез).

Если оказывается целесообразным интерпретировать рассмотрение уравнений галактографического преобразования распределений и преобразования моментов в виде последовательности шагов, предпринятых совместно теоретиком и наблюдателем, то имеет смысл говорить о стратегии исследования. Необ-

ходимость упорядочения процесса исследования в последовательность стратегических шагов возникает в тех случаях, когда возникают крупные осложнения в трактовке галактографических соотношений. Прежде всего, источником усложнений является невозможность непосредственного измерения расстояний в Галактике за исключением расстояний до околосолнечных звезд. Но даже для близких к нам звезд мы измеряем параллаксы только относительно такого опорного фона, расстояние до которого в строгом смысле неизвестно. Поэтому вопрос о масштабах галактических расстояний в принципе решается только так сказать в стратегическом плане.

Статистико-кинематическое определение расстояний основывается на уравнениях галактографического преобразования моментов. Даже простейшие из них, уравнения преобразования моментов первого порядка (уравнения центра движения), настолько сложны для статистической оценки входящих в них величин, что их нужно рассматривать поэтапно, в связи с какими-либо упрощениями. В методологической интерпретации можно считать каждый этап стратегическим шагом.

К вопросу о расстояниях относится также вопрос о калибровке расстояний через какие-либо фотометрические или спектральные признаки с целью расширения опорного фона. Калибровка основывается на использовании уравнений галактографического преобразования распределений (сами признаки могут тоже искажаться в зависимости от расстояний).

4. Концепция исследовательских систем входит в **понятийный аппарат** дисциплины. Понятия, образующие концепцию исследовательской системы или другие подобные концепции, можно назвать **демаркационными понятиями**. Они характеризуют формальные рамки и концентры исследовательской деятельности. Демаркационные понятия являются вспомогательными для научно-исследовательской работы как таковой и они включаются в рассмотрение только после периода значительного развития дисциплины.

Понятия же, входящие в фундамент и остов самой дисциплины, это — термины и обозначения, в которых сосредоточен накопленный опыт познания предмета. Они образуют ядро понятийного аппарата, которое можно считать сугубо специфическим для объекта и содержания дисциплины (например, в физике те понятия, анализом которых занимается Копель [5]). Их можно разделить на понятия, относящиеся к объекту и относящиеся к методу.

В галактической статистике разделение понятий на относящиеся к объекту и относящиеся к методу крайне условно и спорно, так как в данной исследовательской системе отсутствуют вещественные связи между исследователем и объектом, а в роли объекта выступает его модель. Относящимися к моделированию объекта можно условно считать, например, такие поня-

тия как «элемент галактического пространства», «тело скоростей», «космическая флуктуация», «галактическое вращение» и «популяция». Понятиями же, относящимися скорее к методике исследования, можно условно считать, например, такие как «фундаментальная система данных» и «галактографическое преобразование данных».

5. К методологическому анализу дисциплины относится сравнение методов исследования, применяемых в разных дисциплинах. В статистической астрономии это означает прежде всего вопрос о том, каково место галактической статистики среди статистических дисциплин. Формулировка ответа предполагает знание того, в чем заключается возможная характеристика статистических дисциплин в общем плане. Нами положен в основу следующий принцип: в общестатистическом плане разные дисциплины статистики отличаются друг от друга главным образом в трех следующих отношениях:

1) спецификой рассмотрения вектора \vec{x} шкал x_i для измеряемых, подсчитываемых или классифицируемых признаков; 2) спецификой рассмотрения выборочных распределений $f(\vec{x})$ признаков \vec{x} ; 3) спецификой упорядочения рассматриваемых выборок по некоторому параметру (обычно по времени или по фазам явлений).

Особенности дисциплин проявляются в основном при теоретической интерпретации результатов статистических исследований. Если имеется непосредственный доступ к исследуемым объектам, то шкалы \vec{x} не нуждаются в преобразованиях для интерпретации. В противном случае, при некоторых физических экспериментах и, особенно, при астрономических наблюдениях, требуются специальные шкалы для описания или моделирования объектов. Это означает переход по заданным формулам или прочим правилам от вектора \vec{x} шкал статистических данных к некоторому вектору \vec{y} шкал описания y_i . В простейшем случае $y_i = y_i(x_i)$, в более сложном случае $y_i = y_i(\vec{x})$, а в еще более сложном случае y_i зависит, кроме того, от $f(\vec{x})$.

Вышесказанное можно считать, в частности, ответом на вопрос Алексева [6] о том, в чем заключается специфика астрономии. Под астрономией он понимает то, что он называет «феноменологической астрономией», которую он старается противопоставить астрофизике. Астрофизическим исследовательским системам можно противопоставить не только статистические исследовательские системы, но и геологические (селенологические), географические (селенографические и ареографические), а так-

же космохимические исследовательские системы. Селенологическая исследовательская система, например, основывается не только на информационных связях, так как в ней играют роль вещественные связи: геологическая рекогносцировка на месте и лабораторный анализ образцов пород.

Автор признателен П. Г. Карду за критику рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Ээлсалу. Статистические принципы галактической оптической астрономии. — Tartu Astr. Obs. Teated, 1973—1975, №№ 41, 43, 45, 50, 51.
2. М. Г. Ярошевский. Структура научной деятельности. — «Вопросы философии», 1974, № 11, с. 97—109.
3. А. Киппер. О гравитационном парадоксе. — Вопросы космогонии, 8, Изд. АН СССР, М., 1962, с. 93.
4. H. Eelsalu. On relations between, and system-theoretical description of, astronomical disciplines. — Tartu Astr. Obs. Teated, 1971, № 31.
5. А. А. Коппель. О необходимости «перенормировки» научных понятий. — «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 331. Философские вопросы физики I. Тарту, 1974, с. 13—25.
6. И. С. Алексеев. О специфике астрономии как науки. — «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 360. Методологические вопросы физики II. Тарту, 1975, с. 14—20.

Поступила в редакцию 16 января 1976 г.

UURIMISSÜSTEEMI KONTSEPTSIOON TEADUSLIKU UURIMISPROTSESSI ANALÜÜSI METODOLOOGILISE VAHENDINA

H. Eelsalu

Resümee

Uuritatakse üldistada metodoloogilist kogemust, mis on kogunenud galaktilise statistilise astronoomia meetodite läbitöötamisel. Üldistamise tulemused on kokku võetud uurimissüsteemi kontseptsiooni vormis. Eriüksimusena on käsitletud statistiliste distsipliinide klassifitseerimise printsiipe.

THE CONCEPT OF THE RESEARCH SYSTEM AS A TOOL OF THE METHODOLOGICAL ANALYSIS OF SCIENTIFIC RESEARCH PROCESS

H. Eelsalu

Summary

An attempt is made to generalize the methodological experience gained from the elaboration of the methods of galactic statistical astronomy. The results are summed up in the form of the concept of the research system. The principles of classifying statistical disciplines are discussed as a particular problem.

МАССА СВЕТА

П. Г. Кард

0. Несмотря на то, что понятие массы света согласуется с общим релятивистским законом эквивалентности массы и энергии и вполне оправдывается фактом инертности и тяжести света, в значительной части литературы по теории относительности существование массы света или обходится молчанием, или прямо отрицается; часто масса света рассматривается также как некоторая фиктивная, кажущаяся величина, противопоставляемая «истинной» массе вещества. Отсюда проистекает немало неясностей и неточностей. Между тем, как было недавно показано [1—8], понятие массы света оказывается очень плодотворным в методическом и дидактическом плане. Оно относится к роду тех понятий, которые, пользуясь термином Ю. Соколовского [9, 10], можно назвать онтодидактическими. Уже по этой причине оно заслуживает полного признания и надлежащего использования. В настоящей статье мы ставим себе целью дать развернутое обоснование этого понятия. Параллельно мы сделаем критический обзор существующих мнений и покажем, к каким неудобствам, несообразностям, а иногда и прямо ошибкам ведет недооценка или отрицание массы света.

Вопрос о массе света фактически тесно связан с законом эквивалентности массы и энергии. Поэтому на протяжении всей статьи мы должны будем постоянно иметь дело и с этим законом. Так же как и понятие массы света, закон эквивалентности массы и энергии толкуется во многих работах — если вообще толкуется — неполно, непоследовательно, а иногда и просто неверно. Отсюда и возникают легко, в силу названной связи, недоразумения в вопросе о массе света. Часто, впрочем, эта связь действует в обратном направлении: неприятие массы света затрудняет и нарушает правильное понимание закона эквивалентности.

1. Начнем с «терминологического» отрицания массы света. Ряд авторов (см. [11—13]) употребляют термин «масса» только в смысле массы покоя. Поэтому у них нет не только массы света, но и кинетической массы движущихся тел. Как уже было

отмечено в [14], эта терминология означает фактически молчаливое признание тождественности массы и энергии. Масса света отсутствует просто потому, что для нее (как и для кинетической массы тел) принят другой термин — энергия. Но в явном виде эти авторы тождественность массы и энергии не формулируют. У них нет вообще универсальной формулы $E = mc^2$. Формула такого вида пишется только для энергии покоя, связываемой с массой покоя, которую называют просто массой.

Какую оценку мы должны дать этому «терминологическому» воззрению? С формальной стороны оно представляется физически корректным и логически безупречным. Более того: признание (хотя и молчаливое) тождественности массы и энергии избавляет от печальной необходимости пользоваться «спасительными», но немощными формулировками типа «взаимосвязи» или «пропорциональности» массы и энергии. И все-таки мы считаем эту позицию в целом неприемлемой. Она, во-первых, непоследовательна. В самом деле, если уж отказываться от явной формулировки принципа тождественности массы и энергии, то тогда следовало бы идти до конца, применяя во всех случаях только один из этих терминов. Выбрав из двух терминов «энергию» (как это делают авторы в [11—13]), следовало бы и массу покоя называть не массой, а только энергией покоя. Впрочем, дело не в названии. Ведь можно просто *условиться* называть энергию покоя массой. Но дело в том, что термин «масса» фигурирует в рассматриваемой концепции первично в смысле ньютоновской массы, а не в смысле энергии покоя. А тогда эквивалентность этой величины энергии покоя представляется каким-то странным, необъяснимым совпадением. В этом другой, более существенный недостаток «терминологической» концепции. Универсальная пропорциональность между ньютоновской массой и энергией покоя оказывается столь же непонятной, как и пропорциональность инертной и тяжелой масс в классической теории. Общая теория относительности делает, как известно, обе массы тождественными величинами. Аналогично, единственный способ снятия покровы таинственности с пропорциональности между массой покоя и энергией покоя состоит в признании тождественности физической сущности обеих величин. Вот почему мы и говорим, что рассматриваемое воззрение означает молчаливое признание тождественности массы и энергии. Но вместе с тем это молчание, когда термин «масса» употребляется не просто как синоним термина «энергия покоя», а в самостоятельном значении ньютоновской массы, означает сохранение покровы таинственности.

Далее. Еще один недостаток «терминологического» воззрения состоит в том, что умолчание об эквивалентности (тождественности) массы и энергии не соответствует фундаментальной важности этого закона. Этот закон является выражением открытия единства двух понятий, бывших в прежнем понимании

совершенно различными. Тем самым он является столь существенным элементом познания, что его терминологическое игнорирование неизбежно порождает неполноту и недоговоренность в важных соответствиях, связывающих классическую теорию с релятивистской. Одно из двух: или мы сознательно закроем глаза на всю нерелятивистскую физику и будем строить теорию относительности без учета каких бы то ни было соответствий; тогда, конечно, вместо двух терминов — «масса» и «энергия» — следует пользоваться только одним (каким именно, безразлично); в частности, приняв термин «энергия», следует о массе забыть совершенно, не забываясь нимало о том, что этот термин мог означать в нерелятивистской физике. Никакого закона эквивалентности тогда, конечно, в явном виде не будет. Или, наоборот, строя теорию относительности, мы будем трактовать ее как новую ступень познания, сохраняющую многообразные связи с классической теорией. В таком случае без явной формулировки закона эквивалентности (тождественности) массы и энергии обойтись невозможно.

Не может быть сомнения в том, что первый метод, будучи формально безупречным, практически и методологически несостоятелен. Практически потому, что нерелятивистская механика, как известно, работает (и будет всегда работать) с очень большой степенью точности в обширной области практических и теоретических применений. Методологически потому, что предметная связь между физическими теориями является выражением определенных закономерностей процесса познания, а знание этих закономерностей важно для прогресса физики не меньше, чем знание самих физических законов. Иначе говоря, физика не может успешно развиваться помимо методологии. Можно, конечно, излагать ту или другую физическую теорию в виде замкнутой, изолированной теории, лишенной связи с другими теориями или предшествовавшими ступенями познания. Это — законный методологический прием, помогающий уяснению основ данной теории. Однако такое изложение, во-первых, должно быть последовательным, и, во-вторых, оно не может претендовать на исключительность. Менее всего оно годится в качестве методического приема; оно совершенно неприменимо для первоначального обучения. Итак, имея в виду требования методологии и практики, а также методики и дидактики, мы должны признать «терминологическую» трактовку понятия массы нецелесообразной.

Наконец, еще одно замечание против критикуемой трактовки таково. Понятие релятивистской энергии вводится тут как обобщение классического (нерелятивистского) понятия энергии, но, вместе с тем, не менее важное понятие массы не обобщается. Под названием массы фигурирует та же величина (масса покоя), что и в классической теории. Это опять непоследователь-

но. В результате и получается та непонятная пропорциональность между массой и энергией покоя, о которой говорилось выше. Термин «масса», переносимый таким формальным образом из классической в релятивистскую теорию, наполняется там вдруг совершенно иным содержанием. В самом деле, в классической теории масса есть мера инертности и гравитации. Но «масса» у Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [11] и других авторов [12, 13] не есть мера инертности и гравитации. Это и означает, что понятие массы не обобщается. Оно просто произвольно изменяется. А в качестве меры инертности и гравитации выступает энергия. Конечно, в свете закона эквивалентности массы и энергии так и должно быть, но именно потому и нельзя об этом законе умалчивать; только он и является той познавательной формой, которая обобщает и объединяет оба понятия.

2. Мы говорили выше о «терминологическом» отрицании массы света. Повторяем: формально этот метод безупречен, но он неприемлем с методологической и методической точки зрения. Переходим к критике другого воззрения, физически ошибочного, хотя внешне сходного с «терминологической» концепцией. Оно основано на неправильном понимании инертности. Главным представителем этого воззрения является В. А. Угаров. В его книге [15] настойчиво проводится взгляд, что фотон массы не имеет (см. §§ 52, 57). Это не просто выбор термина, так как речь идет не о массе покоя, равной нулю, а о величине $h\nu/c^2$ (где $h\nu$ — энергия фотона), отличной от нуля. В. А. Угаров утверждает (см. [15], с. 224), что эта величина не имеет отношения к инертным свойствам фотона. Формулировка его тут неясна: трудно, собственно говоря, понять, отказывает ли автор фотону в инертных свойствах вообще, или утверждается лишь то, что величина $h\nu/c^2$ к инертным свойствам не относится (а есть ли эти свойства или нет, об этом не сказано). На с. 248 сказано яснее: «Говорить об инертной массе фотона бессмысленно вообще, потому что фотон нельзя ни ускорить, ни замедлить — в пустоте он всегда движется со скоростью c ». Итак, по В. А. Угарову, фотон инертностью не обладает; на этом основании он и отрицает возможность применения к фотону понятия массы. Но приведенная цитата содержит явно неверное утверждение о невозможности ускорения фотона. На самом деле фотон может быть ускорен путем изменения направления его скорости. Существует определенная мера его инертности, от которой зависит его ускоряемость, и этой мерой является именно величина $h\nu/c^2$, которую мы с полным основанием называем его массой. Вдобавок, если бы фотон был и впрямь абсолютно неускоряем, то это свидетельствовало бы о бесконечности его инертной массы, а не о ее отсутствии. Но он ускоряем и его масса конечна. Конечно, масса фотона эквивалентна его энергии, как и всякая другая масса, и наоборот, его энергия эквивалентна массе.

Инертность света (излучения) и его ускоряемость можно продемонстрировать еще иным способом. Вообразим тело, имеющее внутри замкнутую эвакуированную полость. Полость наполнена черным излучением. Легко показать (см. [5]), что масса покоя тела больше массы покоя оболочки на величину $\Sigma(h\nu/c^2)$, где сумма берется по всем фотонам излучения. Разве это не означает, что масса каждого фотона равна $h\nu/c^2$? Когда тело ускоряется, то вместе с ним ускоряется и находящееся в полости излучение. Его масса, давая вклад в полную массу тела, участвует вместе с массой оболочки на вполне одинаковых основаниях в образовании инертных свойств тела, т. е. определяет его ускоряемость. Импульс тела, когда оно движется, равен произведению его скорости на полную массу, опять-таки с учетом массы излучения. Нет никакого основания трактовать эти две части полной массы — массу оболочки и массу излучения — различным образом, полагая импульс оболочки равным произведению ее массы на скорость, а импульс излучения равным произведению его энергии на скорость, деленному на квадрат скорости света. Для чего такое различие? В конце концов и для оболочки можно импульс определять как деленное на c^2 произведение ее энергии на скорость. Такая возможность гарантируется законом эквивалентности массы и энергии. Но единообразии и последовательности в любом случае необходимы.

Аналогичная ситуация как в примере с черным излучением имеет место и в том случае, если возьмем идеальный газ в закрытом сосуде. Масса покоя сосуда, наполненного газом, больше массы покоя стенок сосуда, и остается больше даже тогда, если к массе покоя стенок прибавим сумму масс покоя всех частиц газа. Но заменив массы покоя частиц их релятивистскими массами, получим равенство. А черное излучение отличается от газа только тем, что его частицы (фотоны) имеют нулевую массу покоя. Для В. А. Угарова это обстоятельство «на первый взгляд очень неприятно» ([15], с. 223); мы, напротив, не видим в этом даже на первый взгляд ничего неприятного. Вот если бы истинная релятивистская масса фотона была равна нулю или бесконечности, то это было бы действительно неприятно. К счастью, этого нет.

3. Идя в нашей дискуссии дальше, мы должны отметить следующее обстоятельство. Одной из причин, порождающих отрицательное отношение к массе света, является давняя классическая традиция, по которой электромагнитное излучение рассматривалось как «чистая энергия» (см., например, [16], с. 345). Совершенно ясно, однако, что формальный перенос этого классического представления в теорию относительности столь же мало обоснован, как и перенос ньютоновского понятия массы под видом массы покоя (о чем мы говорили в п. 1). Приходится повторить, что одним из самых крупных достиже-

ний теории относительности является такое обобщение обоих понятий — массы и энергии, которым устанавливается полная тождественность (эквивалентность) этих величин.

Помимо сказанного, мы хотим подчеркнуть еще вот что. Рассматривая соотношение релятивистской и классической теории, необязательно брать классическую теорию в ее традиционном виде, где механика есть только механика тел, а свет — только энергия. Как показано в [5], понятие массы света легко обосновывается уже в рамках классической теории. Обычно считается, что этому противоречит обращение релятивистской массы света в нуль при предельном переходе $c \rightarrow \infty$. Однако, как показано в [7], стремление скорости света к бесконечности не выражает адекватно соотношения между теорией относительности и классической теорией. Вместо $c \rightarrow \infty$ следует, чтобы прийти к классической теории, просто отказаться от второго постулата Эйнштейна и подчинить скорость света классическому правилу сложения скоростей. Тогда мы получим более реалистическую классическую теорию, в которой механика включает в себя взаимодействие света с телами, а свет является носителем не только энергии, но и массы и импульса. Тем самым методика построения теории относительности находит себе в понятии массы света твердую и логически безупречную опору. К сказанному нужно добавить, что включение этого понятия в классическую теорию оправдывается и историческим ходом событий. Известно, что накануне создания теории относительности существование массы света доказывалось классическими средствами, и притом независимо несколькими авторами (см., например, [17—19]). Эти работы справедливо относят к предыстории теории относительности, но ни самой этой теории, ни даже ее начал еще там нет. Они принадлежат целиком классической системе воззрений. Так история науки подтверждает, что понятие массы света действительно не является специфически релятивистским понятием. В теорию относительности оно переходит (в обобщенном виде, конечно) из классической теории. Отсюда видно, что оглядка на классическую теорию тоже никак неспособна убрать массу света из теории относительности.

4. В предыдущем мы критически рассмотрели два наиболее характерных воззрения, в которых понятие массы света не находит себе места. Основная масса остальной литературы характеризуется более расплывчатым отношением к данному вопросу, причем нередко обнаруживается в разной степени непоследовательность.

Так, во многих монографиях формула $E = mc^2$ обосновывается и применяется почти исключительно для вещества, т. е. тел и частиц с ненулевой массой покоя. Правда, авторы считают эту формулу универсальной, но, тем не менее, масса света или вообще электромагнитного поля у них в лучшем случае

только упоминается. В этом мы видим явную недооценку понятия массы поля. Так поступают например Р. Толмен [21] и К. Мёллер [22]. Впрочем, эта традиция несколько нарушается у них в главах, посвященных общей теории относительности, где гравитационные свойства поля связываются с его массой. Примерно так же трактуют вопрос Р. Фейнман, Р. Лейтон и М. Сэндс (см. [23], с. 31—38 и [24], с. 139). Менее последовательна точка зрения М.-А. Тоннела [25]. Она близка к «терминологическому» воззрению. Однако автор пользуется термином «масса покоя», а не просто «масса»; с другой стороны, в формуле $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ величина m массой не называется, а за-

кон эквивалентности массы и энергии дается только для массы покоя. О массе света речи вообще нет, даже в общей теории относительности. Более того, автор считает процесс аннигиляции доказательством существования энергии покоя, подчеркивая, что в этом процессе «выделяется энергия».

Достаточно четкое признание массы света находим только в тех работах (см. [16, 26—29]), где авторы, следуя А. Эйнштейну [30], обосновывают перенос массы излучением с помощью некоторого мысленного опыта (смещение длинного цилиндра, когда вспышка света, излученного в одном его конце, поглощается в другом). Следует, однако, отметить, что этот метод, как показано в [31], логически безупречен, так как содержит логический круг. Тот же результат мог бы быть получен более строгим и более простым способом (см. [5]). Названные авторы, естественно, вплотную подходят и к формулировке закона эквивалентности массы и энергии в смысле тождества обеих величин. Но от последнего шага удерживает их по большей части «сакраментальная» формула: «энергия есть мера способности тела производить работу, а масса — мера его инерционности» (см. [26], с. 93). На самом деле не энергия есть мера способности производить работу, а работа есть мера макроскопической формы передачи энергии (массы). Та же энергия — столь же хорошая мера инерционности, как и масса. Но это — особая тема.

Наш обзор литературы был в этой статье далеко не полным, но в нем, как нам кажется, учтены все основные мнения. В заключение укажем еще только на статью [32], которая, хотя и не содержит ничего специально о массе света, примечательна тем, что в ней, впервые после наших работ [14, 33], восстанавливается правильное понимание формулы $E = mc^2$ как единства физического смысла массы и энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Г. Кард. Релятивистская зависимость массы от скорости. Пятый зональный семинар-совещание по методике преподавания физики в высших учебных заведениях Белорусской, Латвийской, Литовской, Эстонской ССР и Калининградской области РСФСР (тезисы докладов). Калининград, 1974, с. 49—51.
2. P. Kard. Relativistliku massi valemist keskkooli füüsikakursuses. — «Nõukogude Kool», 1974, nr. 2, lk. 144—146.
3. P. Kard. Relatiivsusteooria aluste õpetamisest keskkoolis. — «Nõukogude Kool», 1975, nr. 3, lk. 225—229.
4. P. Kard. Valguse mass. — «Nõukogude Kool», 1975, nr. 5, lk. 408—410.
5. П. Кард. Новая методика преподавания основ теории относительности. — «Известия АН ЭССР, Физ., Матем.», 24, 305—311, 1975.
6. П. Кард. Основы теории относительности. Тарту, 1976.
7. П. Кард. К вопросу о соотношении релятивистской и классической механики. — «Известия АН ЭССР, Физ., Матем.», 25, 15—22, 1976.
8. П. Кард. К обоснованию релятивистских понятий массы и импульса. — «Известия АН ЭССР, Физ., Матем.», 25, 75—77, 1976.
9. Ю. Соколовский. Учитель и наука. — «Известия», № 136, 13.06.72.
10. Ю. Соколовский. Сколько стоит время? — «Известия», № 280, 29. 11. 73.
11. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля. Изд. 6-е М., «Наука», 1973.
12. Дж. Л. Синг. Общая теория относительности. М., ИИЛ, 1963.
13. Дж. Джексон. Классическая электродинамика. М., «Мир», 1965.
14. П. Г. Кард. К обоснованию принципа тождественности массы и энергии. — «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 331. Философские вопросы физики I. Тарту, 1974, с. 3—11.
15. В. А. Угаров. Специальная теория относительности. М., «Наука», 1969.
16. М. Борн. Эйнштейновская теория относительности. М., «Мир», 1964.
17. H. Poincaré. «Archives Néerland», 5, 252, 1900. — Цитируется по [20], с. 226.
18. F. Hasenöhrli. Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern. — «Ann. d. Phys.», (IV), 15, 344—370, 1904.
19. F. Hasenöhrli. Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern. Beichtigung. — «Ann. d. Phys.», (IV), 16, 589—592, 1905.
20. Эд. Уиттекер. Теория относительности Пуанкаре и Лоренца. — В кн.: Принцип относительности. М., «Атомиздат», 1973, с. 205—231.
21. Р. Толмен. Относительность, термодинамика и космология. М., «Наука», 1974.
22. К. Мёллер. Теория относительности. Второе изд. М., «Атомиздат», 1975.
23. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. 2. М., «Мир», 1965.
24. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. 1. М., «Мир», 1965.
25. М.-А. Тоннела. Основы электромагнетизма и теории относительности. М., ИИЛ, 1962.
26. Ю. Соколовский. Теория относительности в элементарном изложении. Харьков, Изд. Харьковского гос. ун-та, 1960.
27. В. Новак. Введение в электродинамику. М., ИИЛ, 1963.
28. Г. Бонди. Относительность и здравый смысл. М., «Мир», 1967.
29. Э. Тейлор, Дж. Уилер. Физика пространства-времени. Изд. 2-е. М., «Мир», 1971.
30. А. Эйнштейн. Закон сохранения центра тяжести и инерция энергии. — В кн.: Собрание научных трудов I. М., «Наука», 1965, с. 39—44.

31. П. Кард. Об одном релятивистском парадоксе. — «Известия АН ЭССР, Физ., Матем.», 24, 173—177, 1975.
32. И. П. Стаханов. Масса и энергия в теории относительности. «Квант», 1975, № 3, с. 25—29.
33. П. Г. Кард. Тожественность массы и энергии. — «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 212. Труды по философии XI. Тарту, 1968, с. 64—70.

Поступила в редакцию 31 августа 1976 г.

VALGUSE MASS

P. Kard

Resümee

Massi ja energia ekvivalentseuse seaduse taustal põhjendatakse valguse massi mõiste metodoloogilist ja metodilist väärtust. Ühtlasi kritiseeritakse seisukohti, mis seda mõistet kas alahindavad või eitavad hoopis.

DIE MASSE DES LICHTES

P. Kard

Zusammenfassung

Ausgehend von der Äquivalenz von Masse und Energie wird der methodologische und methodische Wert des Begriffes der Masse des Lichtes begründet. Daneben wird den Ansichten, die diesen Begriff unterschätzen oder gar ablehnen, kritisch begegnet.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ ТРИГОНОМЕТРИЯ В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ СКОРОСТЕЙ

П. Г. Кард

Введение

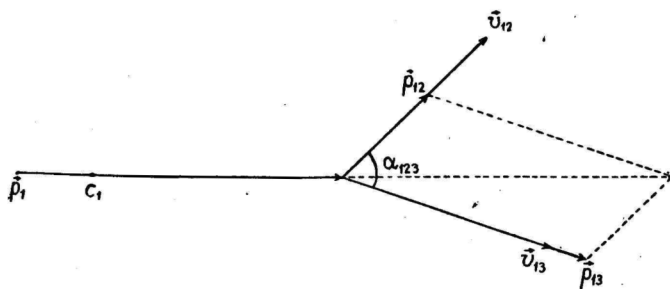
Хорошо известно, что пространство скоростей специальной теории относительности имеет метрику пространства Лобачевского (см., например, [1], с. 55). Отсюда вытекает, что соотношения, связывающие скорости и образуемые ими углы, могут быть выражены на языке гиперболической тригонометрии, развитой уже самим Н. И. Лобачевским в 1826 году (см. [2]). Обычно эти соотношения выводятся с помощью преобразований Лоренца. Однако при таком подходе тригонометрический характер соотношений остается в тени. Поэтому мы предложим в настоящей статье другой подход, использующий вместо преобразований Лоренца с самого начала тригонометрическую формулировку. Нам кажется, что этот подход обладает некоторыми методическими преимуществами. Во-первых, он проще и нагляднее, и, во-вторых, он связан с законами сохранения массы и импульса. Кроме того, он позволяет избежать некоторых характерных вычислительных парадоксов.

Скорость тела или частицы определяется обычно как производная его радиуса-вектора по времени. Не оспаривая этого определения, мы предпочтем здесь альтернативную возможность. Будем определять скорость частицы как ее импульс, деленный на массу. Исходя из этого определения и привлекая законы сохранения массы и импульса, мы сможем вывести в тригонометрической форме все соотношения, связывающие относительные скорости различных частиц и углы, образуемые скоростями.

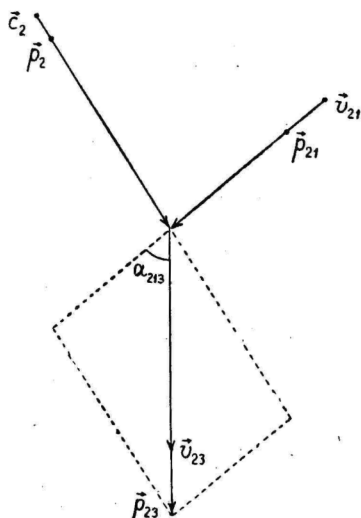
Исходные формулы

Чтобы получить исходные формулы, рассмотрим процесс фотодиссоциации частицы, т. е. распад ее под действием налетающего фотона на две другие частицы. На рис. 1 этот процесс

показан в системе покоя первичной частицы, обозначенной индексом 1. Стрелка \mathbf{c}_1 изображает скорость налетающего фотона, стрелки \mathbf{v}_{12} и \mathbf{v}_{13} — скорости вторичных частиц (имею-



Р и с. 1.



Р и с. 2.

щих индексы 2 и 3) относительно первичной частицы, а α_{123} — угол между этими скоростями. Показаны также импульсы \mathbf{p}_1 фотона и \mathbf{p}_{12} , \mathbf{p}_{13} вторичных частиц. Обозначая

$$\beta = v/c \quad (1)$$

и

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}, \quad (2)$$

где c — скорость света, и учитывая, что $|\mathbf{c}_1| = c$, напишем формулы сохранения массы и импульса в виде:

$$\begin{aligned} m_1 + \mu_1 &= m_2 \gamma_{12} + m_3 \gamma_{13}, \\ \mu_1 \mathbf{c}_1 / c &= m_2 \vec{\gamma}_{12} \beta_{12} + m_3 \vec{\gamma}_{13} \beta_{13}, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ_1 — масса фотона и m_1 , m_2 , m_3 — массы покоя трех частиц. Исключая μ_1 , находим:

$$\begin{aligned} m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 - 2m_1 m_2 \gamma_{12} + 2m_2 m_3 \gamma_{12} \gamma_{13} (1 - \beta_{12} \beta_{13} \cos \alpha_{123}) - \\ - 2m_1 m_3 \gamma_{13} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее рассмотрим тот же процесс в системе покоя 2-й частицы. На рис. 2 \mathbf{c}_2 — скорость налетающего фотона, \mathbf{v}_{21} и \mathbf{v}_{23} — скорости 1-й и 3-й частиц, α_{213} — угол между этими скоростями; \mathbf{p}_2 , \mathbf{p}_{21} и \mathbf{p}_{23} — импульсы фотона и 1-й и 3-й частиц. Конечно, $|\mathbf{c}_2| = c$ и $\mathbf{v}_{21} = -\mathbf{v}_{12}$, так что $\beta_{21} = \beta_{12}$ и $\gamma_{21} = \gamma_{12}$. Сохранение массы и импульса выражается формулами:

$$\begin{aligned} m_1 \gamma_{12} + \mu_2 &= m_2 + m_3 \gamma_{23}, \\ m_1 \vec{\gamma}_{12} \beta_{21} + \mu_2 \mathbf{c}_2 / c &= m_3 \vec{\gamma}_{23} \beta_{23}, \end{aligned} \quad (5)$$

где μ_2 — масса фотона. Исключая μ_2 , находим:

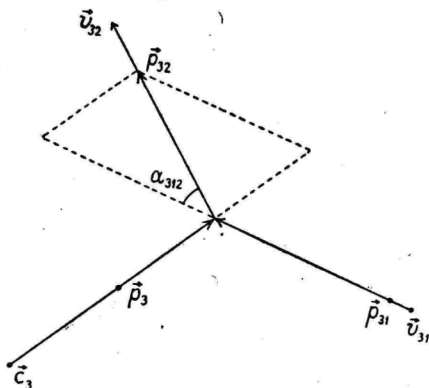
$$\begin{aligned} m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 - 2m_1 m_2 \gamma_{12} + 2m_2 m_3 \gamma_{23} - \\ - 2m_1 m_3 \gamma_{12} \gamma_{23} (1 - \beta_{12} \beta_{23} \cos \alpha_{213}) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Наконец, в системе покоя 3-й частицы скорость налетающего фотона пусть равна \mathbf{c}_3 , масса его μ_3 , а скорости первых двух частиц \mathbf{v}_{31} и \mathbf{v}_{32} с углом α_{312} между ними (рис. 3). Конечно, $|\mathbf{c}_3| = c$, $\mathbf{v}_{31} = -\mathbf{v}_{13}$ и $\mathbf{v}_{32} = -\mathbf{v}_{23}$. Теперь сохранение массы и импульса выражается формулами:

$$\begin{aligned} m_1 \gamma_{13} + \mu_3 &= m_2 \gamma_{23} + m_3, \\ m_1 \vec{\gamma}_{13} \beta_{31} + \mu_3 \mathbf{c}_3 / c &= m_2 \vec{\gamma}_{23} \beta_{32}, \end{aligned} \quad (7)$$

откуда, исключая μ_3 , находим:

$$\begin{aligned} m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 - 2m_1 m_2 \gamma_{13} \gamma_{23} (1 - \beta_{13} \beta_{23} \cos \alpha_{312}) + \\ + 2m_2 m_3 \gamma_{23} - 2m_1 m_3 \gamma_{13} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$



Р и с. 3.

В формулах (4), (6) и (8) все три массы покоя m_1 , m_2 , m_3 независимы друг от друга. Отсюда вытекает, во-первых, соотношение

$$m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 - 2m_1m_2\gamma_{12} + 2m_2m_3\gamma_{23} - 2m_1m_3\gamma_{13} = 0 \quad (9)$$

и, во-вторых, три соотношения:

$$\begin{aligned} \gamma_{23} &= \gamma_{12}\gamma_{13}(1 - \beta_{12}\beta_{13} \cos \alpha_{123}), \\ \gamma_{13} &= \gamma_{12}\gamma_{23}(1 - \beta_{12}\beta_{23} \cos \alpha_{213}), \\ \gamma_{12} &= \gamma_{13}\gamma_{23}(1 - \beta_{13}\beta_{23} \cos \alpha_{312}). \end{aligned} \quad (10)$$

Формула (9) определяет одну из трех скоростей v_{12} , v_{23} , v_{31} при заданных остальных скоростях и отношениях масс покоя m_2/m_1 и m_3/m_1 ; скорости же связаны друг с другом и с углами между ними формулами (10). Последние и являются тригонометрическими формулами для треугольника относительных скоростей трех частиц.

Основные формулы гиперболической тригонометрии

В треугольнике скоростей вершинами являются точки, изображающие частицы 1, 2, 3. Длина стороны треугольника меж-

ду точками i и k определяется через относительную скорость i -й и k -й частиц формулой

$$\text{th } \varphi_{ik} = \beta_{ik}, \quad (11)$$

где φ_{ik} — определяемая длина стороны. Углы треугольника α_{123} , α_{213} и α_{312} суть углы между скоростями. Заменяя в формулах (10) все β через φ , перепишем их в виде:

$$\begin{aligned} \text{ch } \varphi_{23} &= \text{ch } \varphi_{12} \text{ ch } \varphi_{13} - \text{sh } \varphi_{12} \text{ sh } \varphi_{13} \cos \alpha_{123}, \\ \text{ch } \varphi_{13} &= \text{ch } \varphi_{12} \text{ ch } \varphi_{23} - \text{sh } \varphi_{12} \text{ sh } \varphi_{23} \cos \alpha_{213}, \\ \text{ch } \varphi_{12} &= \text{ch } \varphi_{13} \text{ ch } \varphi_{23} - \text{sh } \varphi_{13} \text{ sh } \varphi_{23} \cos \alpha_{312}. \end{aligned} \quad (12)$$

Эти формулы выражают теорему косинусов гиперболической тригонометрии (обобщенную теорему Пифагора). Чтобы получить теорему синусов, выразим сначала косинусы углов. Например, из первой формулы (12) следует:

$$\cos \alpha_{123} = \frac{\text{ch } \varphi_{12} \text{ ch } \varphi_{13} - \text{ch } \varphi_{23}}{\text{sh } \varphi_{12} \text{ sh } \varphi_{13}}; \quad (13)$$

аналогичные выражения имеют место и для $\cos \alpha_{213}$ и $\cos \alpha_{312}$. Затем выражаем отсюда синусы углов:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{123} &= \frac{\sqrt{1 - \text{ch}^2 \varphi_{12} - \text{ch}^2 \varphi_{23} - \text{ch}^2 \varphi_{13} + 2 \text{ch } \varphi_{12} \text{ ch } \varphi_{23} \text{ ch } \varphi_{13}}}{\text{sh } \varphi_{12} \text{ sh } \varphi_{13}}, \\ \sin \alpha_{213} &= \frac{\sqrt{1 - \text{ch}^2 \varphi_{12} - \text{ch}^2 \varphi_{23} - \text{ch}^2 \varphi_{13} + 2 \text{ch } \varphi_{12} \text{ ch } \varphi_{23} \text{ ch } \varphi_{13}}}{\text{sh } \varphi_{12} \text{ sh } \varphi_{23}}, \\ \sin \alpha_{312} &= \frac{\sqrt{1 - \text{ch}^2 \varphi_{12} - \text{ch}^2 \varphi_{23} - \text{ch}^2 \varphi_{13} + 2 \text{ch } \varphi_{12} \text{ ch } \varphi_{23} \text{ ch } \varphi_{13}}}{\text{sh } \varphi_{13} \text{ sh } \varphi_{23}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из этих формул следует:

$$\sin \alpha_{123} / \text{sh } \varphi_{23} = \sin \alpha_{213} / \text{sh } \varphi_{13} = \sin \alpha_{312} / \text{sh } \varphi_{12}. \quad (15)$$

Это и есть теорема синусов.

Далее обратим внимание на дуальность. Каждой формуле соответствует дуальная по отношению к ней формула, в которой стороны и углы треугольника меняются определенным образом местами. Чтобы убедиться в этом, вычислим выражение

$$\frac{\cos \alpha_{213} \cos \alpha_{312} + \cos \alpha_{123}}{\sin \alpha_{213} \sin \alpha_{312}}$$

и два других аналогичных, подставляя вместо синусов и косинусов их выражения из формул (13) и (14). В результате получим формулы:

$$\begin{aligned}\cos a_{123} &= -\cos a_{213} \cos a_{312} + \sin a_{213} \sin a_{312} \operatorname{ch} \varphi_{23}, \\ \cos a_{213} &= -\cos a_{123} \cos a_{312} + \sin a_{123} \sin a_{312} \operatorname{ch} \varphi_{13}, \\ \cos a_{312} &= -\cos a_{123} \cos a_{213} + \sin a_{123} \sin a_{213} \operatorname{ch} \varphi_{12}.\end{aligned}\quad (16)$$

Эти формулы являются дуальными по отношению к формулам (12). Мы видим, что в каждой из последних можно произвести замену

$$\begin{aligned}\varphi_{lm} &\rightleftharpoons i(\pi - a_{klm}), \\ a_{klm} &\rightleftharpoons \pi + i\varphi_{lm},\end{aligned}\quad (17)$$

в результате чего получаются формулы (16). Наоборот, выполнив ту же замену в формулах (16), получим вновь формулы (12). Но так как формулы (12) являются основными, то и все прочие формулы, которые можно из них вывести, подчиняются тому же правилу дуальности. В частности, формулы (15) являются самодуальными. Формулы, дуальные к (14), имеют вид:

$$\begin{aligned}\operatorname{sh} \varphi_{12}/\sin a_{312} &= \operatorname{sh} \varphi_{13}/\sin a_{213} = \operatorname{sh} \varphi_{23}/\sin a_{123} = \\ &= \frac{\sqrt{-1 + \cos^2 a_{123} + \cos^2 a_{312} + \cos^2 a_{213} + 2 \cos a_{123} \cos a_{312} \cos a_{213}}}{\sin a_{123} \sin a_{312} \sin a_{213}}.\end{aligned}\quad (18)$$

Их можно преобразовать также к виду:

$$\begin{aligned}\operatorname{sh} \varphi_{12}/\sin a_{312} &= \operatorname{sh} \varphi_{13}/\sin a_{213} = \operatorname{sh} \varphi_{23}/\sin a_{123} = \\ &= 2(\sin a_{123} \sin a_{312} \sin a_{213})^{-1} \left[\cos \frac{a_{123} + a_{312} + a_{213}}{2} \times \right. \\ &\times \left. \cos \frac{a_{123} + a_{312} - a_{213}}{2} \cos \frac{a_{123} + a_{213} - a_{312}}{2} \cos \frac{a_{213} + a_{312} - a_{123}}{2} \right]^{1/2}\end{aligned}\quad (19)$$

(аналогичное преобразование возможно и в формулах (14)).

Мы не будем выписывать всех остальных формул гиперболической тригонометрии, поскольку все они хорошо известны. Выше мы привели только главные. Напишем еще только формулы для полусуммы углов треугольника и для дефекта суммы углов

$$\delta = \pi - (a_{123} + a_{213} + a_{312}).\quad (20)$$

Синус полусуммы углов выражается формулой

$$\sin \frac{a_{123} + a_{213} + a_{312}}{2} = \cos \frac{\delta}{2} = \frac{1 + \operatorname{ch} \varphi_{12} + \operatorname{ch} \varphi_{13} + \operatorname{ch} \varphi_{23}}{4 \operatorname{ch} \frac{\varphi_{12}}{2} \operatorname{ch} \frac{\varphi_{13}}{2} \operatorname{ch} \frac{\varphi_{23}}{2}},\quad (21)$$

откуда

$$\sin \delta = \frac{1 + \operatorname{ch} \varphi_{12} + \operatorname{ch} \varphi_{13} + \operatorname{ch} \varphi_{23}}{(1 + \operatorname{ch} \varphi_{12})(1 + \operatorname{ch} \varphi_{23})(1 + \operatorname{ch} \varphi_{13})} \times \quad (22)$$

$$\times \sqrt{1 - \operatorname{ch}^2 \varphi_{12} - \operatorname{ch}^2 \varphi_{13} - \operatorname{ch}^2 \varphi_{23} + 2 \operatorname{ch} \varphi_{12} \operatorname{ch} \varphi_{13} \operatorname{ch} \varphi_{23}}$$

Удобно также выразить полусумму углов через две стороны и угол между ними:

$$\operatorname{ctg} \frac{\alpha_{123} + \alpha_{213} + \alpha_{312}}{2} = \tan \frac{\delta}{2} = \frac{\operatorname{th} \frac{\varphi_{12}}{2} \operatorname{th} \frac{\varphi_{23}}{2} \sin \alpha_{213}}{1 - \operatorname{th} \frac{\varphi_{12}}{2} \operatorname{th} \frac{\varphi_{23}}{2} \cos \alpha_{213}}. \quad (23)$$

Некоторые следствия

Известно, что два последовательных преобразования Лоренца с неколлинеарными скоростями, в каждом из которых пространственные координатные оси остаются сами себе параллельными, эквивалентны одному преобразованию Лоренца, в котором пространственные оси повернуты на некоторый угол (см., например, [3], с. 93—97 или [4], с. 79—85). Покажем, что этот угол равен дефекту суммы углов треугольника скоростей.

Каждую точку релятивистского пространства скоростей можно считать изображением какой-либо инерциальной системы. Переходу к другой инерциальной системе соответствует отрезок прямой φ , так что $c \cdot \operatorname{th} \varphi$ есть относительная скорость обеих систем. Углы между различными отрезками суть углы между скоростями. Выполнив последовательно два преобразования Лоренца с неколлинеарными скоростями, получим гипер-

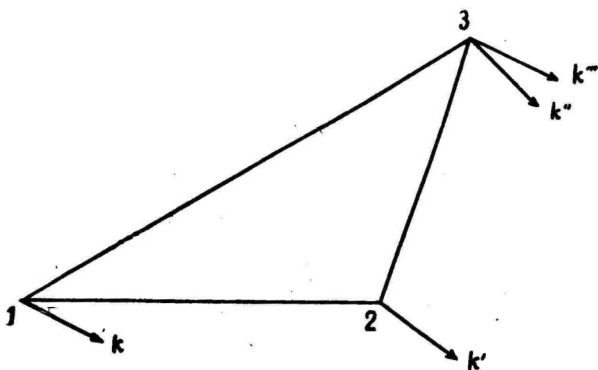


Рис. 4.

болический треугольник, три вершины которого изображают три инерциальные системы, стороны изображают их относительные скорости, а углы — углы между скоростями (см. рис. 4). Пусть теперь имеем в первой инерциальной системе произвольно выбранное в плоскости треугольника направление k (стрелка на рисунке в точке 1), образующее со стороной φ_{12} треугольника некоторый угол δ_{12k} . Пусть во второй инерциальной системе это направление составляет со стороной φ_{21} угол $\delta_{21k'}$. Равенство

$$\delta_{12k} + \delta_{21k'} = \pi \quad (24)$$

есть условие неизменности этого направления при переходе из первой инерциальной системы во вторую. Например, если k есть ось x , то условие (24) означает, что при данном преобразовании Лоренца координатные оси остаются сами себе параллельными. Точно так же, пусть при переходе из второй инерциальной системы в третью направление k остается неизменным, что выражается условием

$$\delta_{23k'} + \delta_{32k''} = \pi. \quad (25)$$

Равным образом, при прямом переходе из первой инерциальной системы в третью направление k тоже остается неизменным:

$$\delta_{13k} + \delta_{31k'''} = \pi. \quad (26)$$

Теперь оказывается, что направления k'' и k''' в третьей системе не совпадают, но образуют между собой некоторый угол $\delta_{3k''k'''}$. Покажем, что он равен дефекту суммы углов треугольника. В самом деле, так как

$$\begin{aligned} \alpha_{123} &= \delta_{13k} - \delta_{12k}, \\ \alpha_{213} &= 2\pi - \delta_{21k'} - \delta_{23k'}, \\ \alpha_{312} &= \delta_{31k'''} - \delta_{3k''k'''} - \delta_{32k''}, \end{aligned} \quad (27)$$

то, складывая эти равенства и учитывая равенства (24) — (26), находим:

$$\alpha_{123} + \alpha_{213} + \alpha_{312} = \pi - \delta_{3k''k'''}$$

или

$$\delta_{3k''k'''} = \pi - (\alpha_{123} + \alpha_{213} + \alpha_{312}) \equiv \delta. \quad (28)$$

Тот же угол δ обнаруживается еще в другой связи. Пусть имеем опять три инерциальные системы (вершины 1, 2, 3 треугольника на рис. 5). Изменим последовательность преобразований Лоренца $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$. Из первой инерциальной системы перейдем сначала в четвертую (точка 4 на рисунке), движущуюся относительно первой с той же скоростью, с какой третья инерциальная система движется относительно второй. Это значит, что $\varphi_{14} = \varphi_{23}$ и $\alpha_{124} = \pi - \alpha_{213}$. Из четвертой инерциальной

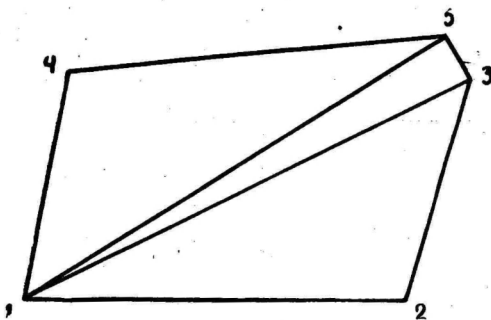


Рис. 5.

ной системы перейдем в пятую (точка 5 на рисунке), движущуюся относительно четвертой с той же скоростью, с какой вторая движется относительно первой. Это значит, что $\varphi_{45} = \varphi_{12}$ и $\alpha_{415} = \alpha_{213}$. Очевидно, треугольники 123 и 145 равны. Но точки 3 и 5 не совпадают (группа Лоренца не коммутативна). Правда, $\varphi_{13} = \varphi_{15}$, т. е. третья и пятая инерциальные системы движутся относительно первой с одинаковыми скоростями. Но направления их движения различны — они образуют между собой угол α_{135} . Легко видеть, что $\alpha_{135} = \delta$. В самом деле, так как $\alpha_{124} = \pi - \alpha_{213}$ и $\alpha_{145} = \alpha_{312}$, то $\alpha_{135} = \alpha_{124} - \alpha_{123} - \alpha_{145} = \pi - \alpha_{213} - \alpha_{123} - \alpha_{312} = \delta$.

Об одном парадоксе сложения скоростей

Этот кажущийся парадокс возникает при повторном преобразовании скорости согласно формулам, основанным на общих преобразованиях Лоренца. В векторной форме общая формула преобразования скорости частицы при переходе в другую инерциальную систему, движущуюся относительно первой со скоростью $\vec{v}_{12} = c\vec{\beta}_{12}$, такова (см. [4], с. 167):

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{u}_1 \sqrt{1 - \beta_{12}^2} + (\vec{\beta}_{12} \cdot \vec{u}_1 / \beta_{12}^2) (1 - \sqrt{1 - \beta_{12}^2}) - c\vec{\beta}_{12}}{1 - \vec{\beta}_{12} \cdot \vec{u}_1 / c}, \quad (29)$$

где \vec{u}_1 — скорость частицы в первой и \vec{u}_2 — во второй инерциальной системе. Перейдем из второй в третью инерциальную систему, движущуюся относительно второй со скоростью $\vec{v}_{23} = c\vec{\beta}_{23}$, а относительно первой со скоростью $\vec{v}_{13} = c\vec{\beta}_{13}$. Скорость частицы \vec{u}_3 в третьей системе можно выразить, аналогично (29), или как

$$\vec{u}_3 = \frac{\vec{u}_2 \sqrt{1 - \beta_{23}^2} + (\vec{\beta}_{23} \cdot \vec{u}_2 / \beta_{23}^2) (1 - \sqrt{1 - \beta_{23}^2}) - c\vec{\beta}_{23}}{1 - \vec{\beta}_{23} \cdot \vec{u}_2 / c}, \quad (30)$$

или как

$$\mathbf{u}_3 = \frac{\mathbf{u}_1 \sqrt{1 - \beta_{13}^2} + (\beta_{13} \mathbf{u} \cdot \vec{\beta}_{13} / \beta_{13}^2) (1 - \sqrt{1 - \beta_{13}^2}) - c \vec{\beta}_{13}}{1 - \beta_{13} \mathbf{u}_1 / c}, \quad (31)$$

С другой стороны, β_{13} выражается через β_{12} и β_{23} , согласно методу преобразований Лоренца; формулой (см. [4], с. 79):

$$\vec{\beta}_{13} = \frac{\vec{\beta}_{12} + \vec{\beta}_{23} \sqrt{1 - \beta_{12}^2} + (\beta_{12} \beta_{23} \cdot \vec{\beta}_{12} / \beta_{12}^2) (1 - \sqrt{1 - \beta_{12}^2})}{1 + \beta_{12} \beta_{23}}. \quad (32)$$

Эта формула получается и из формулы (29), если заменить в последней $\mathbf{u}_1 \rightarrow \vec{\beta}_{23}$, $\mathbf{u}_2 \rightarrow \vec{\beta}_{13}$ и $\vec{\beta}_{12} \rightarrow -\vec{\beta}_{12}$. Парадокс заключается в следующем. Если подставим в формулу (30) выражение \mathbf{u}_2 из формулы (29), а в формулу (31) выражение β_{13} из формулы (32), то в обоих случаях \mathbf{u}_3 будет выражено через \mathbf{u}_1 , β_{12} и β_{23} . Казалось бы, результаты должны совпасть. Однако, они не совпадают, в чем легко убедиться, выполнив указанные подстановки. Между тем, обе формулы — (30) и (31) — выражают одну и ту же скорость в одной и той же инерциальной системе.

Парадокс разрешается, если учтем поворот координатных осей при последовательных неколлинеарных преобразованиях Лоренца. На первый взгляд может показаться, что поворот осей не имеет никакого значения для формул, написанных в векторном виде. Однако, в данном случае векторная запись вводит в заблуждение. Смысл векторных формул (30) и (31) в следующем. Если в правых частях этих формул подставим вместо векторов их компоненты (с учетом компонентов, даваемых формулами (29) и (32)), то получим для вектора \mathbf{u}_3 в левой части его компоненты. Они будут различны, хотя сам вектор тот же; различны потому, что формула (30) представляет вектор \mathbf{u}_3 (т. е. дает его компоненты) в третьей инерциальной системе с повернутыми координатными осями, а формула (31) представляет тот же вектор (дает его компоненты) в той же инерциальной системе с первоначальными направлениями осей. Отсюда следует, что если преобразуем вектор \mathbf{u}_3 из формулы (30) с помощью обратного поворота осей (восстанавливая их первоначальные направления), то получим выражение, совпадающее с выражением (31).

Никакого парадокса с самого начала не возникает, если вместо преобразований Лоренца будем применять тригонометрический метод. Здесь нет нужды изображать скорости векто-

рами. Вместо этого любая скорость задается в любой инерциальной системе ее абсолютной величиной и тремя углами, определяющими ее направление. Все эти величины могут быть вычислены тригонометрически. Так, на рис. 6 точки 1, 2, 3 изображают три инерциальные системы, а точка U — частицу. В тетраэдре $U123$ (в частном случае — в плоском четырехугольнике) ребра φ_{12} , φ_{23} , φ_{13} , φ_1 , φ_2 , φ_3 связаны со скоростями v_{12} ,

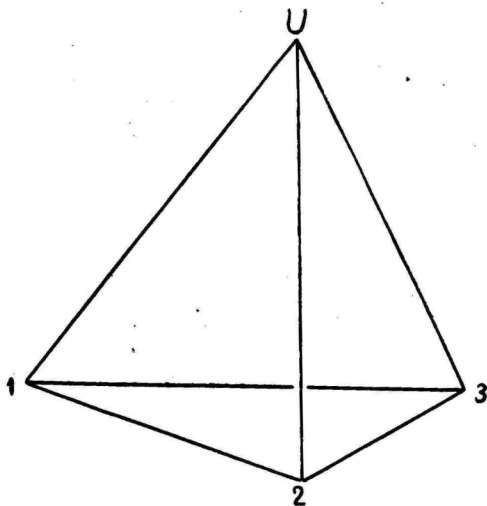


Рис. 6.

v_{23} , v_{13} , u_1 , u_2 , u_3 согласно формуле (11). Задавая ребра φ_{12} , φ_{23} , φ_1 (т. е. скорости v_{12} , v_{23} , u_1) и вдобавок необходимые углы, мы имеем возможность вычислить тригонометрическим путем все элементы тетраэдра. Этот способ представляется более простым и ясным, чем использование формул типа (29) — (32).

Заключение

В заключение отметим, что на основе тригонометрического метода возможно развить всю кинематику специальной теории относительности. Можно вывести формулы преобразования различных величин (включая преобразования Лоренца), а также разнообразные кинематические эффекты. Хотя эта методика не дает ничего существенно нового, она является во многих отношениях более простой и наглядной. Во всяком случае, кажется несомненным, что геометрия Лобачевского должна занять в релятивистской кинематике более видное и более прочное положение и найти более широкое применение, чем в существующей традиции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля. Изд. 6-е. М., «Наука», 1973.
2. Н. И. Лобачевский. Полное собрание сочинений, том первый. М.—Л., ГИТТЛ, 1946.
3. К. Мёллер. Теория относительности. Изд. 2-е, М., «Атомиздат», 1975.
4. P. Kard. Erirelatiivsusteooria I. TRU kirjastus, Tartu, 1972.

Поступила в редакцию 10 февраля 1976 г.

HÜPERBOOLNE TRIGONOMEETRIA RELATIVISTLIKUS KIIRUSTE RUUMIS

Resümee

P. Kard

Teatavasti on erirelativistlik kiiruste ruum Lobatševski meetrikaga, millest järgneb hüperboolse trigonomeetria kehtivus selles ruumis. Trigonomeetriliste põhivalemite tuletamiseks vaadeldakse osakese fotodissotsiatsiooni. Rakendades primaarse ja kahe sekundaarse osakese seisusüsteemides massi ja impulsi jäävuse seadusi saadakse pärast footoni massi ja kõigi kolme osakese seisumaside elimineerimist hüperboolse trigonomeetria koosinuslause valemid. Kolm osakest asetsevad kolmnurga tippudes, kolmnurga külgede pikkused on $\varphi_{ik} = \text{Arth}(v_{ik}/c)$, kus c on valguse kiirus ja v_{ik} on k -nda osakese kiirus i -nda suhtes; nurkadeks on kiirustevahelised nurgad. Koosinuslausest järgnevad ka kõik teised hüperboolse trigonomeetria valemid. Hüperboolse kolmnurga nurkade summa defekt osutub võrdseks nurgaga, mille võrra pöördub fikseeritud suund kahe järjestikuse mittekollineaarse Lorentzi teisenduse puhul (Thomase pretsessioon). Trigonomeetiline meetod on ekvivalentne Lorentzi teisenduste meetodiga, kuid ta on sellest mõnes suhtes lihtsam. Muuhulgas võimaldab ta vältida teatava iseloomuliku arvutusliku paradoksi, mis tekib kolmemõõtmelise kiiruse korduval teisendamisel Lorentzi teisenduse alusel.

HYPERBOLIC TRIGONOMETRY IN RELATIVISTIC VELOCITY-SPACE

P. Kard

Summary

It is well known that the relativistic velocity-space has the Lobachevskian metric. Hence hyperbolic trigonometry holds in this space. To derive the basic trigonometric formulae for this

space, the process of the photo-decay of a particle into two other particles is considered. Demanding in all the three rest-systems of the particles the conservation of mass and momentum and eliminating the mass of the photon and the rest-masses of the particles, one obtains the cosine theorem of hyperbolic trigonometry. The three particles are the apices of the triangle, the sides being the quantities $\varphi_{ik} = \operatorname{arctanh}(v_{ik}/c)$, where c is the velocity of light and v_{ik} means the velocity of the k^{th} particle in the rest-system of the i^{th} particle; the angles of the triangle are the angles between the velocities. From the cosine theorem all other formulae of hyperbolic trigonometry can be easily derived. Many points of relativistic kinematics can be more thoroughly elucidated by this method than by the standard method of Lorentz transformations.

НУЖНО ЛИ УЧИТЫВАТЬ РАЗЛИЧНЫЕ СМЫСЛЫ ОТНОШЕНИЯ ОДНОВРЕМЕННОСТИ?

Ю. Б. Молчанов ;

Вопрос об определении одновременности, выявлении различных аспектов этого отношения, установлении их объективного содержания и границах применения условных соглашений в логических дефинициях и экспериментальных процедурах (мысленных и реальных), связанных с этими проблемами, несмотря на многолетнюю историю его обсуждения, продолжает привлекать внимание исследователей как в нашей стране, так и за рубежом. В ряде публикаций последних лет наметилась тенденция к размежеванию различных точек зрения на роль условных соглашений при определении одновременности и пределов их применимости.

Согласно одной из них, значение условных соглашений при определении одновременности и формулировании математического аппарата специальной теории относительности настолько велико, а границы их применения являются такими широкими, что позволяют получить адекватное описание электромагнитных явлений как в рамках преобразований Лоренца, так и в рамках преобразований Галилея [1, 2].

Согласно другой точке зрения, условные соглашения не играют существенной роли при определении одновременности, поскольку могут быть найдены объективные критерии установления отношения одновременности [3—6].

Кроме этих двух крайних точек зрения, имеется довольно широкий круг авторов, занимающих промежуточные позиции и признающих в той или иной степени неизбежность применения (в определенных границах) условных соглашений (см. [7—12]).

Как показывает опыт, при обсуждении этих вопросов важное значение имеет четкая постановка вопросов, тщательный и глубокий анализ используемых понятий и достаточно развитая терминология интересующих нас вопросов, поскольку многие из них, будучи поставлены в самом общем виде, просто недоступны для содержательного обсуждения, а многие понятия обозначаются либо разными терминами, являясь фактически тождест-

венными по содержанию, либо один и тот же термин приобретает в разных контекстах различный смысл.

Прежде всего это касается самого понятия одновременности. Большинство авторов не только физических, но и философских работ не задумывается над его содержанием, либо полагая его интуитивно ясным, либо считая достаточным ссылку на «определение Эйнштейна». Однако «интуитивно ясное» понятие одновременности в ходе истории развития физики и философии приобретало различные значения [11]. Что же касается «определения Эйнштейна», то при ближайшем рассмотрении оно оказывается лишь практическим рецептом физической фиксации отношения одновременности, опирающимся на молчаливо подразумеваемое понятие одновременности, которое явным образом не определяется. В самом деле, по Эйнштейну, одновременными будут такие два события, относительно которых расположенные рядом с ними предварительно синхронизированные часы дают одинаковые показания [13]. Но ведь синхронизированными часами считаются такие, которые одновременно дают одинаковые показания. Тем самым для их синхронизации мы должны найти какое-то предварительное теоретическое определение одновременности, опираясь на которое мы сможем сначала синхронизировать часы, а потом уже с их помощью зафиксировать физически одновременные события. Итак, на первый взгляд «определение Эйнштейна» приводит к логическому кругу. Однако, как показывает анализ его сигнального метода, Эйнштейн исходит из понимания одновременности как такого объективного отношения, которое отражает принципиально невозможность разноместных событий (в силу отсутствия в природе мгновенного дальнего действия) взаимодействовать между собой [12].

Как известно, в своей фундаментальной статье [13] А. Эйнштейн подчеркнул одно принципиально важное следствие из своего анализа временных отношений и определения одновременности, а именно: события, одновременные в одной инерциальной системе, не будут одновременными в другой, и назвал это свойство относительностью одновременности.

Однако при дальнейшем исследовании философских проблем теории относительности Г. Рейхенбах указал на другую важную сторону этого отношения. Он показал, что по причине отсутствия в природе мгновенного дальнего действия и предельного характера скорости света с разноместные события будут относительно одновременными и в рамках единой инерциальной системы, но уже в ином смысле. Если, по Эйнштейну, относительность одновременности касается всеобщности этого отношения, то, по Рейхенбаху, она распространяется и на его уникальность.

В классическом понимании одновременность всегда абсо-

любно: любому событию, происшедшему в данной точке пространства, в любой другой его точке всегда соответствует только одно-единственное одновременное с ним событие, и данное отношение сохраняет силу во всех возможных системах отсчета.

Согласно Эйнштейну, данному событию в любой другой точке пространства будет соответствовать также только одно-единственное одновременное с ним событие, однако это отношение имеет силу только для одной инерциальной системы отсчета, а в другой системе отсчета данному событию в той же самой (другой) точке пространства будет соответствовать другое, но опять-таки только одно-единственное одновременное событие. Таким образом, Эйнштейн лишил классическое отношение абсолютной одновременности характера всеобщности и указал на его относительность в этом смысле. Однако он сделал при этом оговорку, что данное уникальное для каждой системы отсчета одновременное событие выбирается не на основании каких-либо объективных критериев, а по определению, то есть на основе условно принятого соглашения, согласно которому скорость света на пути от одной точки к другой и обратно считается одинаковой.

Анализируя эту сторону эйнштейновского определения одновременности, Г. Рейхенбах [14, 15] показал, что в основании конвенционального выбора одного-единственного одновременного события, происходящего в другой точке пространства в данной системе отсчета, лежит такой объективный факт, как отсутствие в природе мгновенной материальной связи между различными точками пространства. В силу этого обстоятельства и понимания одновременности событий как принципиальной невозможности взаимодействия между ними, в любой другой точке пространства данному событию будет соответствовать уже не одно-единственное событие, а некоторое их множество. Из этого множества одно-единственное событие и выбирается «по определению», поскольку ничем физически (в смысле возможности взаимодействия с данным событием) не отличается от других. И в этом состоит другой смысл относительности одновременности. Данное отношение лишается характера уникальности, причем не только в различных инерциальных системах, но даже в рамках одной системы.

Г. Рейхенбах назвал эйнштейновскую относительность одновременности «физической», а свою — «эпистемологической», поскольку считал, что в ее основе лежит не только отсутствие в природе дальнего действия, но и невозможность найти логически непротиворечивое доказательство равенства скорости света на пути туда-обратно.

Дальнейшее обсуждение этих вопросов А. Грюнбаумом привело последнего к выделению понятий «топологической» и «метрической» одновременности, которые подчеркивали некоторые

иные нюансы в различных интерпретации этого отношения. Так, «топологически» одновременными событиями являются у него все те, которые принципиально не могут взаимодействовать друг с другом, а «метрически» одновременными — устанавливаемые по определению уникальные пары событий.

Мною было предложено более широкое разграничение различных смыслов отношения одновременности [11].

Во-первых, необходимо подчеркнуть, что все те разноместные события, которые в силу такого объективного факта, как отсутствие в природе мгновенного дальнего действия, не могут взаимодействовать между собой, являются объективно одновременными. В физической литературе понятию объективно одновременных событий соответствует разделение их пространственно-подобным интервалом. В терминологии Г. Рейхенбаха им соответствует «эпистемологическая одновременность», а в терминологии А. Грюнбаума — «топологическая». Однако этой характеристики для дальнейшего анализа одновременности, на наш взгляд, недостаточно. Необходимо ввести более широкое различие понятия одновременности или, вернее, понятий абсолютной и относительной одновременности.

Понятия абсолютной и относительной одновременности можно трактовать в смысле их уникальности. Это означает, что событию, происходящему в данной точке пространства, соответствует либо только одно-единственное одновременное с ним событие (одновременность абсолютна в смысле уникальности), либо некоторое их множество (одновременность относительна в смысле уникальности), что обусловлено, с одной стороны, отсутствием дальнего действия, а с другой — реляционным пониманием одновременности как принципиальной невозможности взаимодействия.

В классической физике одновременность разноместных событий в смысле уникальности только абсолютна, в релятивистской только относительна.

Но, кроме того, абсолютность и относительность одновременности можно понимать еще с точки зрения их всеобщности. Это означает, что отношение одновременности одной-единственной пары событий или некоторых их множеств, установленная для какой-то одной системы отсчета, будет иметь силу либо для всех возможных систем отсчета (одновременность абсолютна), либо только для данной системы отсчета, а для другой будет иметь силу уже какая-то другая одна-единственная пара или какие-то другие множества событий (одновременность относительна).

Хотя терминология А. Грюнбаума на первый взгляд представляется информативно более емкой, к ней, на наш взгляд, следует отнестись критически. Дело в том, что понятия «топологической» и «метрической» одновременности затушевывают

различия в смыслах понятий относительной и абсолютной одновременности.

Действительно, «топологическая» одновременность равносильна, с одной стороны, «объективной» одновременности в нашей терминологии и, с другой стороны, «относительной одновременности в смысле уникальности». Все события, «топологически» одновременные, являются относительно одновременными в смысле уникальности. Выбираемая же из этого множества «по определению» или каким-то иным образом одна-единственная пара абсолютно одновременных в смысле уникальности событий и будет «метрической» одновременностью в терминологии А. Грюнбаума.

Значит, «топологическая» одновременность выражает относительный характер одновременности в смысле уникальности, тогда как «метрическая» одновременность выражает абсолютность одновременности в смысле уникальности. Соотношение же абсолютной и относительной одновременности в смысле всеобщности в данной терминологии пока не отражается.

Правда, затем специально указывается, что «метрическая» одновременность устанавливается «по определению», и что она не имеет всеобщего характера, то есть разная в разных системах отсчета. Тем самым вроде бы учитывается и относительность одновременности в смысле всеобщности.

Термин «топологический» не выражает проводимого нами разделения понятия одновременности на четыре самостоятельных понятия абсолютной и относительной одновременности в смысле уникальности и всеобщности, точно как же, как это происходит с термином «объективная одновременность» в нашей классификации. И для выражения этих различий смыслов в терминологии А. Грюнбаума остается лишь термин «метрическая» одновременность, которого явно недостаточно, и его приходится дополнять дальнейшими оговорками и условиями. Однако, хорошо выражая устанавливаемое по определению отношение абсолютной одновременности в смысле уникальности, он гораздо хуже отражает абсолютность и относительность одновременности в смысле всеобщности. Приходится добавлять, что «метрическая» одновременность различна в разных системах отсчета, а при этом затушевывается тот факт, что один и тот же термин «метрическая» одновременность выражает в разных высказываниях разные отношения, ибо «метрическая» одновременность в одной системе отсчета означает, что событию, происшедшему в данной точке пространства, в другой точке соответствует лишь одно-единственное одновременное с ним событие; когда же говорится, что «метрически» одновременные события — разные в разных системах отсчета, то здесь на сцену выступает совсем другое отношение — отношение всеобщности.

В тень отодвигается противопоставление относительной в

смысле уникальности одновременности ее абсолютной альтернативе: «одно-единственное одновременное событие или же множество одновременных событий?»

«Метрическая» одновременность не противостоит «топологической», а является ее составным элементом, какой-то ее частью, тогда как в нашей классификации и терминологии противопоставление абсолютной и относительной одновременности прослеживается с достаточной ясностью. А. Грюнбаум не может сказать, что события будут одновременны либо «топологически», либо «метрически». События для него одновременны только топологически и из них он по определению выбирает метрическую одновременность, которая оказывается разной в разных системах отсчета.

В физической литературе в большинстве случаев, когда говорят об относительности одновременности, обычно имеют в виду относительность одновременности в смысле всеобщности. В ней положение об относительности одновременности означает, что события, одновременные в одной системе отсчета, не будут одновременными в другой. Об относительности в этом смысле и говорил А. Эйнштейн в своей первой работе: «Два события, одновременные при наблюдении из одной координатной системы, уже не воспринимаются как одновременные при рассмотрении из системы, движущейся относительно данной системы» [13].

В работах же Г. Рейхенбаха и особенно А. Грюнбаума подчеркивается другая сторона проблемы одновременности, а именно, — относительность одновременности в смысле уникальности, которая имеет силу и для событий, происходящих в одной системе отсчета. И именно эту сторону дела подчеркивают термины «топологическая» и «метрическая» одновременность.

Однако относительность и абсолютность одновременности в смысле всеобщности имеют не менее важное значение. Это обстоятельство становится более ясным в свете аргументации П. Г. Карда [5, 6]. Рассмотрев предлагаемую нами терминологию, подразделяющую отношение одновременности на одновременность в смысле уникальности и всеобщности, и признавая в основном правильными доводы в ее пользу, он считает, однако, что для физики вообще, и для теории относительности в частности, фундаментальное значение имеет одновременность в смысле всеобщности. Что же касается отношения одновременности в смысле уникальности, то, по его мнению, это бесполезный придаток, без которого, вообще говоря, спокойно можно обойтись, поскольку явный учет относительности одновременности в смысле уникальности не способен ни в какой степени обогатить объективное содержание теории.

Можно согласиться с П. Г. Кардом в том, что относительность одновременности в смысле всеобщности сыграла фунда-

ментальную роль при построении теории относительности. Вторая же сторона отношения одновременности — одновременность в смысле уникальности фактически не учитывалась в физических построениях, что и приводило к известной путанице и неясностям при попытках ее философской интерпретации. Однако игнорирование этого отношения ведет также и к определенным физическим следствиям. Так, А. А. Тяпкин [1], справедливо подчеркивая значение работ А. Пуанкаре для создания теории относительности, считает, что соображения А. Пуанкаре на этот счет равнозначны соображениям А. Эйнштейна и что конвенциональный характер выбора уникальной одновременности позволяет сохранить преобразования Галилея. Однако, если с точки зрения Пуанкаре это действительно так, то с точки зрения Эйнштейна свобода выбора одновременности ограничена конечным характером скорости распространения света, откуда следует необходимость замены преобразований Галилея преобразованиями Лоренца [12].

Можно, конечно, не учитывать все эти терминологические различия и тонкости и говорить просто о пространственно-подобной разобщенности событий. Однако в этом случае вообще упускается из виду связь такой разобщенности с временными отношениями и с различными смыслами (а их, как мы уже отмечали, четыре или даже пять) отношения одновременности. Причем смешивание этих смыслов в реальных дискуссиях отнюдь не способствует прояснению проблемы.

П. Г. Кард полагает, что определенное конвенцией отношение абсолютной одновременности в смысле уникальности легко может быть путем перенормировки выбора инерциальной системы распространено на другую инерциальную систему «так, чтобы эти события стали одновременными согласно определению Эйнштейна. Так как возможность перехода в другую инерциальную систему отражает относительность в смысле всеобщности, то относительность в смысле уникальности теряет самостоятельное значение, поглощаясь относительностью в смысле всеобщности» [5]. Понятие перенормировки уточняется им в его последней работе: «Если мы для данной пары принятых одновременными событий выберем, используя относительность в смысле уникальности, инерциальную систему с $\epsilon \neq 1/2$, то немедленно вслед за этим можем, используя относительность в смысле всеобщности, перейти в систему с $\epsilon = 1/2$, то есть совершить, так сказать, «перенормировку» выбора инерциальной системы» [6].

Мысль П. Г. Карда можно, видимо, понять следующим образом. Он считает, что относительность одновременности в смысле уникальности заключается в свободе выбора ϵ (в известных пределах). Хотя подобное понимание и имеет некоторые основания, так как наличие множества объективно (или топологически, или относительно в смысле уникальности) одно-

временных событий, или, выражаясь в физической терминологии, наличие множества событий, разделенных пространственно-подобным интервалом, и обуславливает свободу выбора ε , однако сам выбор ε и его свобода не тождественны относительной в смысле уникальности одновременности, так как, какое бы ε мы ни выбрали, мы устанавливаем уже не относительную, а абсолютную в смысле уникальности одновременность. То есть, из множества относительно одновременных событий мы выбираем лишь одну-единственную пару, которую называем абсолютно одновременной.

Дело в том, что независимо от того, каким путем выбирается эта данная пара, независимо от того, по каким основаниям устанавливается ε , скажем, $\varepsilon = 1/2$: по соглашению ли, по соображениям ли теоретического удобства (симметрия) или даже на объективной основе (допустим, удалось доказать, что скорости света на пути туда и обратно равны), все равно физические свойства всех остальных событий, разделенных данным пространственно-подобным интервалом или объективно одновременных (относительно одновременных в смысле уникальности) по отношению к данному не изменятся, они так и останутся объективно одновременными или разделенными пространственно-подобным интервалом. Условное соглашение в данном случае состоит не только в произвольности выбора ε , но и в выделении из множества одинаковых по своим объективным свойствам событий какой-то одной пары, ничем от них не отличной. Поэтому, с нашей точки зрения, споры относительно того, можно ли получить «объективное определение» абсолютной одновременности, которые ведутся П. В. Бриджменом [16], П. Эллисом [3], П. Боуменом [3, 4], А. Грюнбаумом [7, 8] и др., не имеют принципиального значения.

Далее П. Г. Кард говорит, что, выбрав в одной системе $\varepsilon \neq 1/2$, мы всегда можем путем «перенормировки» найти для данной выбранной нами пары (не «относительно», как он думает, а именно «абсолютно») одновременных событий такую инерциальную систему, где для данной же пары ε будет равно $1/2$. Тем самым, по его мнению, относительность одновременности в смысле уникальности поглощается относительностью одновременности в смысле всеобщности, для нее не остается места, и она вообще бесполезна.

На самом же деле вопрос должен стоять несколько иначе. Да, для данной пары абсолютно одновременных в смысле уникальности событий, выбранных с помощью какого-либо ε , всегда можно найти какую-то иную инерциальную систему отсчета, где для данной же пары событий будет справедливо $\varepsilon = 1/2$ и наоборот. Однако, с другой стороны, если мы сохраняем прежнее ε , неважно, равно оно или нет $1/2$, то в любой другой инер-

циальной системе абсолютно одновременной в смысле уникальности будет опять-таки одна-единственная, но уже другая пара событий. Что, собственно говоря, мы и отмечали выше, утверждая, что выбранная по определению в рамках одной инерциальной системы пара абсолютно одновременных в смысле уникальности событий уже не будет таковой в другой системе отсчета, в чем и заключается относительность одновременности в другом смысле, в смысле всеобщности.

Что же касается утверждения П. Г. Карда о том, что относительность одновременности в смысле уникальности теряет свое значение, полностью поглощается относительностью одновременности в смысле всеобщности, то оно вызывает следующие возражения.

На самом деле относительностью одновременности в смысле всеобщности поглощается не относительность одновременности в смысле уникальности, а лишь ее следствие — абсолютность одновременности в смысле уникальности. П. Г. Кард отождествляет свободу выбора ε с относительностью одновременности в смысле уникальности, тогда как это есть, с одной стороны, лишь ее следствие, а с другой стороны, выбор ε устанавливает абсолютно одновременные в смысле уникальности события.

Поэтому мы не можем согласиться с П. Г. Кардом также и в том, что понимание абсолютности и относительности одновременности в смысле уникальности не имеет никакого значения для объективного содержания теории.

Конечно, терминологические вопросы не имеют принципиального значения. Однако вряд ли можно утверждать, что понятие пространственно-подобной разобщенности событий не имеет никакого значения для физического содержания теории относительности. А различие между этим понятием и понятием «относительной в смысле уникальности (или топологической) одновременности» чисто терминологическое, связанное не столько с физической, сколько с философской интерпретацией теории.

В самом деле, абсолютное в смысле уникальности отношение одновременности между одной-единственной парой событий, происходящих в различных точках пространства, выбирается по определению из множества «относительных в смысле уникальности» («объективно» или «топологически») одновременных событий, или, если угодно, из множества пространственно-подобно разобщенных событий. И это отношение, имеющее силу в одной системе отсчета, не будет иметь силу в других (относительность отношения одновременности в смысле всеобщности) системах отсчета. Там абсолютно одновременными в смысле уникальности будут уже другие пары событий..., но из данного же множества пространственно-подобным образом разобщенных событий.

Относительность и абсолютность одновременности в смысле всеобщности обусловлены, таким образом, относительностью одновременности в смысле уникальности или «топологической» одновременностью, или, если угодно, пространственно-подобным разобщением событий.

Разобщенные пространственно-подобным образом события могут быть абсолютно одновременными в смысле уникальности в одной системе отсчета и относительно одновременными в смысле всеобщности в разных системах отсчета. События же, разделенные времени-подобным интервалом, не могут быть одновременными ни в каком смысле, ни в каких системах отсчета. Этим и определяется физическое значение пространственно-подобной разобщенности событий (или относительной в смысле уникальности одновременности) для теории относительности и реляционной концепции времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Тяпкин. Выражение общих свойств физических процессов в пространственно-временной метрике специальной теории относительности. — «Успехи физ. наук», 1972, **106**, 617—659.
2. P. Mittelstaedt. Conventionality in Special Relativity. In: 5th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science. Contributed papers. London (Ontario, Canada), 1975, pp. VII, 37—38.
3. B. Ellis, P. Bowman. Conventionality in distant simultaneity. — «Philos. Sci.», 1967, **34**, No. 2, 116—136.
4. P. Bowman. The Principle of Relativity and Conventionalism. In: 5th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science. Contributed papers. London (Ontario, Canada), 1975, pp. VII, 13—14.
5. П. Г. Кард. Об относительности одновременности в специальной теории относительности. — В кн.: Современная физика и проблемы марксистско-ленинской теории познания. М., Изд. МФТИ, 1972, с. 47—49.
6. П. Г. Кард. Релятивистская одновременность. — В кн.: Метод моделирования и некоторые философские проблемы истории и методологии естествознания. АН ЭССР, Институт истории, Таллин, 1975, с. 159—167.
7. А. Грюнбаум. Философские проблемы пространства и времени. М., «Прогресс», 1969, с. 527—553.
8. A. Grünbaum. Simultaneity by slow clock transport in the Special Theory of Relativity. — «Philos. Sci.», 1969, **36**, No. 1, 5—44.
9. Wesley C. Salmon. The conventionality of simultaneity. — «Philos. Sci.», 1969, **36**, No. 1, 44—63.
10. Bas. C. van Fraassen. Conventionality in the axiomatic foundation of the Special Theory of Relativity. — «Philos. Sci.», 1969, **36**, No. 1, 64—73.
11. Ю. Б. Молчанов. О различных смыслах одновременности. — В кн.: Эйнштейновский сборник 1968. М., «Наука», 1968, с. 92—114.
12. Ю. Б. Молчанов. О границах условности при определении одновременности. — В кн.: Философские основания естественных наук. М., «Наука», 1976, с. 357—374.
13. А. Эйнштейн. К электродинамике движущихся тел. Собрание научных трудов I. М., «Наука», 1965, с. 7—35.
14. H. Reichenbach. Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre. Braunschweig, 1924.

15. H. Reichenbach. The Philosophy of Space and Time. N. Y., 1950.
16. P. W. Bridgeman. A sophisticate's primer of relativity. Weslean University Press, Middletown, 1962.

Поступила в редакцию 19 мая 1976 г.

KAS ON TARVIS ARVESTADA SAMAAEGSUSE SUHTE ERI TÄHENDUSI?

J. Moltšanov

Resümee

Samaaegsuse absoluutsuse ja relatiivsuse mõisteid võib käsitleda kahes eri tähenduses — unikaalsuse ja universaalsuse mõttes. Kui antud ruumipunktis toimunud sündmusele vastab teises ruumipunktis ainult üks temaga samaaegne sündmus, siis on samaaegsus absoluutne unikaalsuse mõttes; kui aga mitu sündmust, siis (samas mõttes) relatiivne. Kui unikaalsuse mõttes antud taustsüsteemis kindlakstehtud samaaegsus — olgu see absoluutne või relatiivne — kehtib ka kõikides teistes taustsüsteemides, siis on samaaegsus universaalsuse mõttes absoluutne; kui aga ainult selles ühes antud taustsüsteemis, siis (samas mõttes) relatiivne. Et sündmustevaheliste ajaliste suhete fikseerimine eeldab vastastikuste mõjude võimalust nende vahel ja et hetkeline kaugmõju ei ole võimalik, siis on samaaegsus unikaalsuse mõttes alati relatiivne. On küll võimalik antud sündmusega samaaegsete sündmuste hulgast valida «definiitsiooni järgi» või mingil muul viisil üksainus sündmus, mida võiks siis eeliskorras nimetada antud sündmusega samaaegseks. Selles võimaluses seisneb samaaegsuse definiitsiooni konventsionaalsuse element. Niiviisi valitud kaks sündmust on siis unikaalsuse mõttes absoluutselt samaaegsed. Ent sel teel antud taustsüsteemis fikseeritud samaaegsus ei kehti teistes taustsüsteemides. Nendes osutuvad samade kriteeriumide alusel valitud unikaalsuse mõttes absoluutselt samaaegseteks teised sündmustepaarid. Selles seisneb samaaegsuse relatiivsus universaalsuse mõttes.

Samaaegsuse relatiivsuse ja absoluutsuse eri tähenduste arvestamine on suure tähtsusega niihästi relatiivsusteooria füüsikalise sisu kui ka tema filosoofilise interpreteerimise seisukohalt.

IS IT NECESSARY TO DISTINGUISH BETWEEN DIFFERENT MEANINGS OF THE RELATION OF SIMULTANEITY?

Yu. Molchanov

Summary

The concepts of the absoluteness and relativity of simultaneity can be treated in two different ways, in the meaning of uniqueness and in the meaning of universality. If to an arbitrary event occurring at a given point of space corresponds one and only one simultaneous event at another point of space, then simultaneity can be called absolute in the meaning of uniqueness; if a set of events, then simultaneity can be termed relative in the same meaning. If the relation of simultaneity in the meaning of uniqueness (no matter if it is absolute or relative), established in a given frame of reference, holds also in all other frames, then simultaneity is called absolute in the meaning of universality; if it holds only in that one frame, then it is termed relative in the same meaning. According to the relational conception of time and owing to the non-existence of *actio in distans* in Nature, simultaneity in the meaning of uniqueness is always relative. From the set of events which by virtue of this relativity are simultaneous with a given event, one can choose as absolutely (in the meaning of uniqueness) simultaneous with it one and only one event merely "by definition" or in some other way (if possible). This opportunity reveals the conventional nature of the relation of simultaneity. But in another frame of reference another pair of events will be absolutely simultaneous chosen by the same criteria. Hence simultaneity in the meaning of universality is relative.

The distinction of different meanings of relativity and absoluteness of simultaneity is highly important for the understanding of the physical contents of the Relativity Theory and for its philosophical interpretation as well.

О РЕЛЯТИВИСТСКОМ ПОНЯТИИ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

П. Г. Кард

Настоящая статья имеет целью привести дополнительные разъяснения по некоторым пунктам аргументации, данной автором в предыдущих статьях [1, 2] против конвенционалистических или близких к ним воззрений в вопросе об одновременности пространственно разобщенных событий. Соответственно этой цели, мы не будем здесь вновь формулировать с самого начала обсуждаемую проблему, предполагая, что читатель уже знаком с ней. Непосредственным стимулом к написанию этой статьи послужила публикуемая в этом же выпуске статья Ю. Б. Молчанова [3], в которой автор, полемизируя против нашей точки зрения, выдвигает, по сравнению со своими прежними публикациями [4, 5], некоторые новые соображения.

Как известно, в теории относительности одновременность пространственно разобщенных событий относительна. Это значит, что два события, одновременные в какой-либо инерциальной системе, неодновременны, вообще говоря, в других инерциальных системах. Чтобы это утверждение имело точный смысл, необходимо однозначное понятие одновременности. Согласно Эйнштейну, одновременность *определяется* как такое отношение двух событий, происходящих на расстоянии l друг от друга, когда световой сигнал, испущенный от одного из событий в направлении места второго, приходит туда спустя время l/c после того, как второе событие произошло. Здесь c — скорость света, измеряемая в экспериментах, где свет проходит замкнутый путь. Таким образом, определение одновременности включает у Эйнштейна в себя изотропность скорости света *по определению*.

Все это хорошо известно. Ясно, что концепция Эйнштейна в вопросе об одновременности логически совершенно безупречна. Правда, формулировки в начальных работах Эйнштейна по теории относительности страдают, возможно, некоторой неточностью, но это не имеет никакого существенного значения. Нам кажется поэтому, что напрасно Ю. Б. Молчанов уделяет повышенное внимание этим неточностям. Вместо того, чтобы отыс-

кивать у Эйнштейна логический круг (хотя бы только «на первый взгляд»), важно было бы подчеркнуть отсутствие у Эйнштейна всяких следов столь элементарной логической ошибки.

Казалось бы, вопрос об одновременности пространственно разобщенных событий вполне исчерпывается концепцией Эйнштейна. Успех теории относительности, основанной существенным образом на этой концепции, говорит в ее пользу настолько убедительно, что мы начинаем *post factum* ощущать эйнштейновское положение об изотропности скорости света уже не как определение, а как эмпирический факт. Подобная эволюция свойственна, впрочем, многим определениям: то, что вначале выступает как произвольное определение, потом, на фоне развернутой теории, воспринимается как доказанная истина (см. также [6]). Доказательством является вся теория как целое. Даже чисто формально мы бываем часто вправе перевести бывшее определение в разряд доказуемых истин, поскольку в рамках законченной теории первоначальная система аксиом и определений может быть заменена эквивалентной системой. Понятно, речь идет здесь не о чисто словесных определениях, когда вопрос заключается не в создании с помощью определения нового понятия, а просто в выборе наиболее подходящего термина для того или другого уже существующего понятия. Такие «определения» или, вернее, обозначения, без всякого сомнения, вполне «конвенциональны», только эта конвенциональность относится не к физике, а к языку. Речь может идти тогда только о языковом удобстве и целесообразности.

Перейдем к разногласиям. Не все согласны с вышесказанным. История разногласий начинается с тезиса Г. Рейхенбаха [7]. Он говорит, что в качестве события, одновременного данному в данной точке, можно в другой точке выбрать любое событие, не могущее иметь с данным причинной связи (т. е. отделенное от данного пространственно-подобным интервалом). Этот тезис обосновывается — если выразить все в немногих словах — следующим образом: определение одновременности по Эйнштейну или содержит логический круг, или оно конвенционально; а так как логический круг недопустим, то оно конвенционально; а если так, то любая иная, отличная от эйнштейновской, конвенция не менее, чем та, правомерна и допустима; следовательно, одновременными событиями можно в каждой инерциальной системе считать не только одновременные по Эйнштейну, но и любые два события, разделенные пространственно-подобным интервалом. В этом и заключается тезис Рейхенбаха (см. также [8], с. 436—448 и далее).

Приведенное рассуждение кажется вполне убедительным, но все-таки оно неприемлемо. Наша основная аргументация против этого воззрения дана в [2]. Здесь выскажем дополнительные соображения. Главный дефект рейхенбаховского воззрения лежит, по нашему мнению, там, где эйнштейновское определение

одновременности полагается конвенциональным. Конечно, в чисто терминологическом смысле любое определение конвенционально, поскольку оно устанавливает, по соглашению, смысл того или другого термина. Однако, конвенциональность такого рода, как указано выше, является всего лишь языковым явлением, и никакого физического значения она иметь не может. Поэтому, если кто по этому поводу укажет на возможность иной конвенции, то это может означать лишь субъективное недовольство предложенным термином и желание употреблять его в ином значении. Тезис Рейхенбаха будет тогда, стало быть, равносильен предложению называть одновременностью пространственно-подобную разделенность событий. Целесообразно ли такое предложение (напомним, что, кроме целесообразности, иного критерия здесь быть не может)? Без сомнения, нет. Отношение между событиями, о котором идет речь, отражено в понятии пространственно-подобной разделенности. Менять это название на другое нет никакого основания. Не улучшится дело и оттого, если будем называть это отношение одновременностью в каком-то особом смысле («топологической» одновременностью, как у А. Грюнбаума [8] или еще как-нибудь иначе).

А. Грюнбаум (см. [8], с. 445) приводит, правда, в подкрепление критикуемого воззрения следующее рассуждение. Так как события в некоторой точке, отделенные от данного в другой точке события пространственно-подобным интервалом, не могут находиться с ним в причинной связи, то ни одно из них не может называться более ранним или более поздним относительно данного события. Следовательно, они все одновременны с ним. Однако это рассуждение неубедительно. Оно показывает лишь возможность такого *определения* одновременности, что каждое из множества событий, отделенных от данного пространственно-подобным интервалом, может оказаться при надлежащем выборе инерциальной системы одновременным ему. Такое определение и дал Эйнштейн. Конечно, если из двух событий одно является причиной другого, то оно происходит раньше, а другое позже. Но отсюда никак не вытекает, что если причинная связь между двумя событиями невозможна, то их нужно считать одновременными. Пока у нас определение одновременности отсутствует, к ним действительно нельзя применить слова «раньше» или «позже», но не столько потому, что между ними невозможна причинная связь, сколько потому, что нет определения одновременности. Не следует опираться здесь на обыденный язык (против чего протестует и сам А. Грюнбаум в [8], с. 466) по схеме: раз не позже и не раньше, то одновременно. До введения метрики эта схема вообще лишена смысла. А после введения метрики понятия «раньше» и «позже» получают обобщенный смысл — они могут применяться теперь не только к событиям, могущим быть в причинной связи друг с другом, но и к событиям, разделенным пространственно-подобным интервалом. При

этом, конечно, и одновременность, и отношение «раньше-позже» являются относительными, т. е. зависящими от инерциальной системы.

Итак, мы ничего не можем возразить против того, чтобы считать эйнштейново определение одновременности конвенциональным, но только в смысле языковой, терминологической конвенциональности. Повторим, что в этом смысле любое определение конвенционально, только никаких физических заключений получить отсюда невозможно.

Но Г. Рейхенбах и его последователи претендуют на большее. Они считают эйнштейново определение одновременности конвенцией в каком-то другом, нетерминологическом смысле. Каков же должен быть этот смысл для того, чтобы были оправданы дальнейшие выводы Рейхенбаха?

По-видимому, здесь может подразумеваться только конвенциональность в смысле Пуанкаре. Только такая конвенциональность может иметь физический смысл. А для этого необходимо, чтобы вещи, между которыми осуществляется конвенциональный выбор, определялись независимо и имели каждая свой смысл *до конвенции*. Таков, например, знаменитый тезис А. Пуанкаре о конвенциональности геометрии в физическом мире. Эвклидова и неевклидова геометрия имеют каждая свое определенное содержание, а какая из них реализуется в мире, есть, согласно Пуанкаре, вопрос условного соглашения. Независимо от того, верен ли этот тезис или нет (он неверен, но речь не об этом), мы имеем здесь пример нетерминологической конвенциональности, означающей возможность условного выбора между различными геометриями мира.

Возвращаясь к тезису Рейхенбаха, мы видим, что и этот тезис мог бы иметь нетерминологический смысл только в том случае, если бы мы располагали содержательным понятием одновременности пространственно разобщенных событий *до конвенции* о том, к каким именно парам событий это понятие будет прилагаться. Но как раз этого здесь нет. Понятие одновременности еще только подлежит определению, и поэтому о конвенции можно в связи с ним говорить только в терминологическом смысле. Мы думаем, что тут-то и лежит фундаментальная ошибка Рейхенбаха. Она порождена в сущности забвением того обстоятельства, что эйнштейново определение одновременности есть в подлинном смысле именно *определение*; рассуждая о конвенциональности одновременности, Рейхенбах как бы неосознанно оперирует интуитивным представлением об одновременности, представлением того же типа, что и у Ньютона. Разница только в том, что у Ньютона это интуитивное представление накладывается на подразумеваемую возможность дальнего действия, а у Рейхенбаха — на релятивистскую ограниченность скорости взаимодействий. Достаточно совершенно отказаться от предвзятого, хотя и неосознанного представления об

одновременности, чтобы увидеть, вместе с Эйнштейном, неизбежность *определения* этого понятия. А тогда, как мы показали, места для конвенциональности, помимо терминологической, не остается.

Еще два слова о терминологической конвенциональности. Если бы мы даже согласились — на мгновение — «конвенционально» изменить смысл термина «одновременность», то все равно потребовался бы особый термин для обозначения того отношения событий, когда они «одновременны» по Эйнштейну. Ведь значение $\varepsilon = 1/2$ параметра Рейхенбаха является выделенным по своей симметрии сравнительно с другими. Поэтому, если даже закроем глаза на объективный смысл этой симметрии, нельзя наложить запрет на обозначение ее особым термином. Положим, обозначили. А потом ничто не может помешать нам опять поменять термины местами. Так термин «одновременность» возвращается на свое место. Дело вкуса, конечно, соглашаться с такой перетасовкой терминов или нет, только нелишне напомнить, что первым начал тасовать Рейхенбах, а не мы...

Обратимся теперь к последней работе Ю. Б. Молчанова [3]. Автор дает в ней положительный ответ на поставленный в заголовке вопрос: нужно ли учитывать различные смыслы отношения одновременности? Однако убедительного обоснования такой необходимости мы в статье не находим. Нет в ней и ответа на вопрос: для чего нужно вводить относительность одновременности в смысле уникальности, в чем физический или философский смысл этого понятия. Вместо этого Ю. Б. Молчанов энергично доказывает важность понятия пространственно-подобной разобщенности событий. Но ведь вопрос-то не в этом. Никто против этого не возражает и никто не спорит. Между тем, Ю. Б. Молчанов изображает дело так, как будто признание важности понятия пространственно-подобной разобщенности должно автоматически означать и признание понятия «относительной в смысле уникальности одновременности». Но как раз здесь и лежит суть вопроса. Никакого автоматизма здесь быть не может. Возражая против нашего тезиса о том, что понятие одновременности в смысле уникальности неспособно как-либо обогатить объективное содержание теории относительности, Ю. Б. Молчанов говорит: «... вряд ли можно утверждать, что понятие пространственно-подобной разобщенности не имеет никакого значения для физического содержания теории относительности.» Без сомнения, этого никак нельзя утверждать, только утверждалось вовсе не это. Дальше Ю. Б. Молчанов пишет: «А различие между этим понятием и понятием «относительной в смысле уникальности (или топологической) одновременности» чисто терминологическое, связанное не столько с физической, сколько с философской интерпретацией теории.» Ну что ж, если

различие только терминологическое (с чем мы согласны), то отсюда вытекает как раз обратное тому, что подразумевает Ю. Б. Молчанов. Как мы показали выше, такое терминологическое нововведение ненужно и нецелесообразно, поскольку оно ничего не дает для реального содержания теории. Но Ю. Б. Молчанов, по-видимому, думает, что при наличии чисто терминологического различия понятию «одновременности в смысле уникальности» автоматически гарантируется место в теории. Правда, в конце цитированной фразы имеется ссылка на «философскую интерпретацию теории». Но каким именно образом понятие, о котором идет речь, способно укрепить философскую интерпретацию? Об этом в статье тоже нет ничего. Помимо всего прочего, подчеркнем, что, по нашему мнению, ничто из того, что не имеет физической интерпретации, не может улучшить и философскую интерпретацию. Приходится здесь вновь настаивать, что философская интерпретация должна всегда вытекать из физического смысла теории, а не привноситься извне. А если «одновременность в смысле уникальности» есть терминологическое явление, не связанное (или хотя бы связанное «не столько») с физической интерпретацией, то какое значение оно может иметь для философской интерпретации теории относительно?

Посмотрим, впрочем, как сам Ю. Б. Молчанов раскрывает смысл утверждения о философской интерпретации. Мы вправе искать разъяснительного комментария в заключительных абзацах его статьи, следующих за этим утверждением. Но тут мы не находим никакой философии, кроме повторения тех же необоснованных деклараций, отождествляющих относительность одновременности в смысле уникальности с пространственно-подобной разобщенностью событий. Характерно, что Ю. Б. Молчанов неоднократно употребляет оборот «относительность одновременности в смысле уникальности или, если угодно, пространственно-подобная разобщенность», опять, по-видимому, подразумевая, что знак равенства между этими терминами автоматически оправдывает «различные смыслы отношения одновременности». Нет, нам действительно «угодно» пользоваться ясным и общепринятым термином «пространственно-подобная разобщенность», не создавая искусственную сложность и терминологическую путаницу.

В заключение мы хотим остановиться еще на одной терминологической особенности в статье Ю. Б. Молчанова, которая, правда, не имеет для нашей сегодняшней темы решающего значения, но которое, тем не менее, занимает в аргументации Ю. Б. Молчанова заметное место. Речь идет о смысле терминов «относительность» и «абсолютность». Под термином «относительность одновременности в смысле уникальности» Ю. Б. Молчанов понимает следующее: если в данной точке дано событие, то в другой точке существует не одно-единственное одновремен-

ное с ним событие, а целое множество их. Такое понимание термина «относительность» расходится с общепринятым и производит странные выводы. Это следовало бы называть не относительностью, а многозначностью. Обычно под относительностью отношений или величин понимают зависимость их от выбора чего-то, относительно чего берутся эти отношения или величины. Так, относительность одновременности в обычном (эйнштейновском) понимании означает зависимость одновременности от выбора инерциальной системы. Так и «относительность в смысле уникальности» могла бы означать зависимость одновременности от выбора параметра Рейхенбаха ϵ . Именно так мы и трактовали это понятие в [2]. Но теперь Ю. Б. Молчанов учит нас, что, выбирая в данной инерциальной системе произвольно некоторое значение ϵ , мы «устанавливаем уже не относительную, а абсолютную в смысле уникальности одновременность». Это трудно понять. Ведь выбор значения ϵ произволен и все значения ϵ равноправны. Непонятно, как можно получить что-либо абсолютное по произволу. Правильнее было бы назвать одновременность при фиксированном значении ϵ однозначной одновременностью.

Впрочем, не будем спорить, а лучше посмотрим, к каким дальнейшим выводам ведет такое понимание относительности и абсолютности. Кроме относительности (т. е. многозначности) и абсолютности (т. е. однозначности) одновременности в смысле уникальности, Ю. Б. Молчанов вводит еще понятия относительности и абсолютности в смысле всеобщности. Приведем полную цитату: «Это означает, что отношение одновременности одной-единственной пары событий или некоторых их множеств, установленная для какой-то одной системы отсчета, будет иметь силу либо для всех возможных систем отсчета (одновременность абсолютна), либо только для данной системы отсчета, а для другой будет иметь силу уже какая-то другая одна-единственная пара или какие-то другие множества событий (одновременность относительна)». Из этого определения, если сопоставить его с молчановским определением относительности и абсолютности одновременности в смысле уникальности, вытекает, что если одновременность в смысле уникальности относительна, то в смысле всеобщности она абсолютна, и наоборот. Сам Ю. Б. Молчанов этого вывода почему-то не формулирует; но так как он неоднократно настаивает на относительности одновременности в смысле уникальности (отождествляя ее с пространственно-подобной разобщенностью), то он должен неизбежно прийти к абсолютности одновременности в смысле всеобщности. Конечно, если отбросить терминологическую шелуху, этот вывод правилен до тривиальности: пространственно-подобная разобщенность событий действительно является инвариантным отношением. Но неужели общеизвестный факт релятивистской относительности одновременности («в смысле всеобщно-

сти») нельзя принять иначе, как только ценой введения произвольной «абсолютной одновременности в смысле уникальности»? Ведь Эйнштейн получил этот результат гораздо более скромными средствами, нимало не нуждаясь в подобных терминологических излишествах.

Заканчивая, отметим еще одно обстоятельство. Обычно считается, что абсолютность времени в классической (нерелятивистской) физике нуждается для своего обоснования в мгновенных (бесконечно быстрых) сигналах. Этому соответствует распространенное мнение о том, что переход от релятивистской к классической теории требует стремления скорости света к бесконечности. Однако, как было недавно автором показано [9], последнее утверждение, строго говоря, неверно, так как классическая теория с конечной скоростью света является логически мыслимой. Вообще нельзя считать дальное действие каким-то неизбежным элементом классической физики. Скорости тел, правда, в ней неограничены, но все же не бесконечны. Поэтому и для обоснования абсолютности времени достаточно исходить из комплекса предпосылок, не включающего дальнего действия. Приведенные соображения могут, очевидно, сыграть свою роль в проблеме релятивистского определения времени. Предполагая вернуться к этой теме в другом месте, выражаем уверенность, что изложенная в настоящей статье точка зрения сможет получить новое освещение.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Г. Кард. Об относительности одновременности в специальной теории относительности. — В кн.: Современная физика и проблемы марксистско-ленинской теории познания. М., Изд. МФТИ, 1972, с. 47—49.
2. П. Г. Кард. Релятивистская одновременность. — В кн.: Метод моделирования и некоторые философские проблемы истории и методологии естествознания. АН ЭССР, Институт истории, Таллин, 1975, с. 159—167.
3. Ю. Б. Молчанов. Нужно ли учитывать различные смыслы отношения одновременности? Настоящий сборник, с. 70—81.
4. Ю. Б. Молчанов. О различных смыслах отношения одновременности (К истории вопроса). — В кн.: Эйнштейновский сборник 1968. М., «Наука», 1968, с. 92—114.
5. Ю. Б. Молчанов. Классическая и релятивистская концепция времени и отношение одновременности. — «Вопросы философии», 1970, № 12, 93—104.
6. А. Д. Александров. Заключительное слово. — В кн.: Физическая наука и философия. М., «Наука», 1973, с. 347—348.
7. H. Reichenbach. Philosophie der Raum-Zeit-Lehre. Berlin, Walter de Gruyter & Co, 1928.
8. А. Грюнбаум. Философские проблемы пространства и времени. М., «Прогресс», 1969.
9. П. Кард. К вопросу о соотношении релятивистской и классической механики. — «Известия АН ЭССР, Физ. Матем.», 25, 15—22, 1976.

Поступила в редакцию 28 августа 1976 г.

RELATIVISTLIK SAMAAEGSUSE MÕISTE

P. Kard

Resümee

Esitatakse uusi põhjendusi ruumiliselt eraldatud sündmuste samaaegsuse konventsionalistliku (või konventsionalismile lähedase) käsitluse vastu. Muuhulgas väidetakse, et samaaegsuse definitsioon Einsteini järgi ei ole — mitteterminoloogilises mõttes — konventsionaalne, sest enne seda definitsiooni samaaegsuse mõistet veel üldse olemas ei ole.

ÜBER DEN RELATIVISTISCHEN BEGRIFF DER GLEICHZEITIGKEIT

P. Kard

Zusammenfassung

Einige neue Beweisgründe gegen die konventionalistischen (oder dem Konventionalismus nahegelegenen) Ansichten werden anlässlich der Frage nach der Gleichzeitigkeit der räumlich getrennten Ereignisse angeführt. Unter anderem wird behauptet, dass die Einsteinsche Definition der Gleichzeitigkeit keine konventionelle Definition ist (es sei denn im terminologischen Sinne), weil der Begriff der Gleichzeitigkeit überhaupt fehlt, bevor diese Definition gegeben wird.

СООТВЕТВИЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ

И. С. Алексеев

Начиная с известной работы И. В. Кузнецова [1], принцип соответствия трактуется в нашей философской и методологической литературе как специфическая форма преемственной взаимосвязи старой и новой теорий. В указанной работе он сформулирован следующим образом: «Теории, справедливость которых была экспериментально установлена для определенной группы явлений, с появлением новых теорий не отбрасываются, но сохраняют свое значение для прежней области явлений как предельная форма и частный случай новых теорий. Выводы новых теорий в той области, где была справедлива старая «классическая» теория, переходят в выводы классической теории» [1]. Как нетрудно видеть, при таком подходе к идее соответствия в центре внимания оказывается историческая смена одной естественнонаучной теории другой, установление определенной связи между старой и новой теориями, которые рассматриваются, во-первых, как разные, и, во-вторых, как ставшие, завершенные.

Безусловно, такое понимание сути принципа соответствия, которое можно назвать каноническим, представляет собой, как говорят юристы, истину и только истину. Действительно, ретроспективное сопоставление квантовой (новая теория) и классической (старая теория) механик как разных и завершенных теорий недвусмысленно выявляет отношение предельного перехода между ними: «Математический аппарат новой теории, содержащий некий характеристический параметр, значения которого различны в старой и новой области явлений, при надлежащем значении характеристического параметра переходит в математический аппарат старой теории» [1].

Однако это далеко еще не вся истина. Содержание идеи соответствия, выдвинутой Н. Бором, отнюдь не исчерпывается простым установлением предельного перехода между математическими аппаратами квантовой и классической теорий. Как показали исследования К. Мейер-Абиха [17] и А. Петерсена [18], эта идея является гораздо более богатой.

Данная работа также не претендует на раскрытие всей истины в отношении принципа соответствия. Нас будет интересовать лишь тот аспект его многогранного содержания, в котором этот принцип предстает в качестве одного из исторических истоков концепции дополнительности. Защищаемый нами тезис состоит в том, что идею соответствия и концепцию дополнительности можно рассматривать как исторически последовательные, но логически самостоятельные по отношению друг к другу варианты разрешения более общей проблемы — проблемы роли классических понятий в квантовом описании и объяснении микромира.

На первом этапе построения квантовой теории атома классические понятия использовались Бором двояким образом. С одной стороны, они неустранимо входили в тело квантовых представлений — согласно первому постулату Бора, поведение атомных систем в стационарных состояниях следовало описывать с помощью обычной классической механики. Электродинамике в этом отношении повезло гораздо меньше — она не работала ни в деле трактовки переходов между стационарными состояниями (для этого не годилась и механика), ни в деле описания стационарных состояний. Тем не менее, классические электродинамические представления все же имели свою специфическую сферу применения. Их использование целиком укладывалось в каноническое понимание принципа соответствия — длинноволновое излучение можно было трактовать с позиций классической электродинамики. Это приводило к тем же числовым характеристикам его частоты, которые давал расчет, основанный на втором постулате Бора, т. е. с квантовых позиций. Возможность применения обычной электродинамики к расчету длинноволновых спектральных линий и составляла вторую сторону употребления классических понятий, характерного для первых шагов создания квантовой теории атома.

Хотелось бы обратить внимание на то, что такое применение классической электродинамики к длинноволновой области спектра не было обязательным. Оно было только возможным. Таким образом, для испускания длинных волн наличествовали два теоретических механизма, в равной степени согласующиеся с экспериментальными данными — классический, в котором частота излучения совпадала с частотой обращения электрона вокруг ядра, и квантовый, в котором акт испускания был элементарным и не имел никакого отношения к движению элементарных составных частей атома. При этом, строго говоря, классическая трактовка была непоследовательной, ибо не учитывала изменения частоты обращения электрона в результате потерь энергии на излучение. Однако для длинных волн (малых частот) такое изменение было небольшим, и им можно было пренебречь — практически излучение оставалось монохроматическим.

Описанное первое проявление идеи соответствия в работах Бора [2—4] еще не было оформлено в надлежащую терминологию, не носило статуса принципа и не содержало никаких эвристических моментов. Оно просто констатировало численное совпадение результатов вычислений, проведенных с помощью классической и квантовой моделей процессов испускания излучения атомами. Сами же эти модели коренным образом различались по своему содержанию, так что ни о каком соответствии между ними как таковыми не могло быть и речи [10, 17].

Из чтения первых работ Бора по квантовой теории атома создается впечатление, что он сначала надеялся построить систему типично квантовых понятий, которая бы заменила классические механику и электродинамику при построении последовательной теории атома. Поэтому можно думать, что классические понятия использовались им вынужденно — «не от хорошей жизни» — как временные суррогаты, за неимением ничего лучшего. Однако ориентация Бора на отход от классических представлений как не адекватных миру атома не предполагала квалификации классических механики и электродинамики как ложных теорий, т. е. полного отказа от них. «Неадекватность» в устах Бора означала не «ложность», а «недостаточность» [17], — продолжая употреблять классические понятия, он делал акцент на их прагматически полезном статусе как средств описания реальности и объяснения экспериментальных данных [3]. К тому же в отношении Бора к классическим теориям имелся еще один немаловажный момент — эти теории служили для него эталоном внутренней согласованности, логической последовательности и гармонии [3, 21]. Поэтому очень скоро Бор явно стал акцентировать внимание на том, что квантовая теория должна быть не простым отрицанием, а «рациональным обобщением» классической теории излучения [5, 17].

В ходе поисков надлежащего способа такого «рационального обобщения» классические теории обнаружили свою эвристическую ценность. Их оказалось возможным использовать в качестве своеобразных ориентиров при нахождении квантовых формул, описывающих не только частоты, но и интенсивности спектральных линий. Вот как об этом писал Бор в 1921 году: «Из постулатов квантовой теории, в особенности из условия частот, ясно, что исключена возможность непосредственной связи между спектром и движением в атоме такого же типа, как и в классической электродинамике; однако в то же время форма этих постулатов наводит нас на след другой своеобразной связи. Если имеется некоторая электродинамическая система и мы на основании обычных представлений задаемся вопросом о ее излучении, возникающем от движения системы, то мы разлагаем мысленно эти движения на так называемые чисто гармонические колебания; далее предполагается, что излучение состоит из некоторого числа одновременно испускаемых цугов электро-

магнитных волн, частоты колебаний которых равны частотам гармонических компонент движения, а интенсивность определяется амплитудами соответствующих компонент. Исследование формальных основ квантовой теории показывает, что вопрос об излучении, сопровождающем переход атома из одного стационарного состояния в другое, может быть сведен к изучению различных гармонических компонент в движении атома; возможность осуществления определенного перехода обусловлена наличием определенной «соответственной» компоненты в движении» [6].

Указанное соответствие между характеристиками гармонических фурье-компонент классического движения электронов и параметрами спектральных линий не носило характера причинной связи, как это должно было быть согласно классической электродинамике. Бор неоднократно подчеркивал формальный характер аналогии, зафиксированной в принципе соответствия [7, 8]. Но факт оставался фактом — благодаря соответствию спектра и движения (которое, очевидно, носит принципиально иной характер, нежели первое проявление идеи соответствия как асимптотического совпадения результатов классического и квантового подходов в длинноволновой области спектра) классические понятия расширили сферу своего применения в теле квантовой теории.

В квантовую теорию, однако, эти понятия входили не так, как они входили в состав классической теории. Движению атомных электронов и его разложению на гармонические компоненты в квантовой теории атома не придавалось онтологического смысла, как это было в классической электродинамике. Классическая картина движения электронов в атоме имела лишь эвристический, т. е. сугубо методологический смысл, служа вспомогательным средством для установления эмпирически измеримых квантовых характеристик излучения на феноменологическом уровне, но отнюдь не претендовала на отображение внутреннего механизма излучения. Успешное применение этой формы принципа соответствия вселяло надежду, что, как писал Бор, хотя этот принцип «и не дает нам прямых сведений о природе процессов излучения и о причине стабильности стационарных состояний, он освещает применение квантовой теории таким образом, что для этой теории можно предполагать наличие внутренних связей, аналогичных соотношениям классической теории» [9].

Имея в виду только что сказанное, можно понять Бора, когда он называл принцип соответствия «чисто квантовотеоретическим законом» [9], невзирая на то обстоятельство, что в формулировку этого принципа явным образом входили классические понятия. Дело было в том, что эти понятия были включены в существенно иные взаимосвязи, чем в классической теории. Поэтому, хотя взятые в целом классическая и квантовая

теории радикально отличались друг от друга по своему физическому (онтологическому) содержанию, отдельные классические понятия, будучи включенными в новые взаимосвязи, продолжали работать и в квантовой области.

Итак, несовместимость классической и квантовой теорий как целостных систем, по мысли Бора, вовсе не означала несовместимости отдельных элементов этих систем — отдельных классических и квантовых понятий. Поэтому их совместное употребление в рамках идеи соответствия «спектр — движение» отнюдь не представляло собой эклектического смешения классической и квантовой точек зрения, на что прозрачно намекал Зоммерфельд [11], считавший принцип соответствия недостаточно удовлетворительным именно по этой причине.

Более того, по мысли Бора, окончательно оформившейся в четкую формулировку к 1922 году, было необходимо признать, что, несмотря на решительный характер ломки наших представлений, вызванный введением прерывности в законы природы, «с точки зрения современной физики любое описание природы должно быть основано на использовании представлений, введенных и определенных классической теорией» [9]. Действительно, если бы дело обстояло не так — если бы теоретически систематизированные квантовые представления не содержали ни одного общего элемента с системой классических представлений, то квантовая теория оказалась бы чересчур отличной от классической и никак не могла бы рассматриваться как ее рациональное обобщение. В таком случае от подлинной преемственности между этими теориями не могло быть и речи — отрицание классических представлений квантовыми имело бы характер чисто негативного, метафизического, а не диалектического отрицания.

Таким образом, ориентация Бора на замену классических понятий квантовыми никоим образом не означала полного отказа от использования классических понятий. Его беспокоило лишь конкретное разрешение вопроса «о возможности представления принципов квантовой теории в такой форме, чтобы это использование оказалось свободным от противоречий» [9]. Нетрудно видеть, что идея соответствия представляла собой определенный способ ответа на этот вопрос.

Если сравнить «асимптотическое соответствие» классической и квантовой теорий в области малых частот (больших квантовых чисел) и соответствие «спектр — движение», то с определенностью можно указать на прогресс в решении вопроса о вхождении классических понятий в тело квантовой теории и в развитии общей идеи соответствия. «Асимптотическое соответствие» лишь *допускало* применение классических понятий наряду с квантовыми, которое не играло никакой эвристической роли. Соответствие же «спектр — движение» *требовало* приме-

нять классические понятия для формулировки квантовых представлений, акцентируя внимание на эвристической роли первых в процессе перехода ко вторым.

В каком же логическом отношении находится идея соответствия к концепции дополнительности, также претендующей на определенный способ решения вопроса о непротиворечивом использовании классических понятий в рамках квантовой теории? То, что исторически соответствие «старше» дополнительно — факт бесспорный. Однако, как указывал К. Маркс, нередко встречаются ситуации, когда «наука возводит отдельные жилые этажи здания прежде чем она заложила его фундамент» [12]. Поэтому историческое предшествование идеи соответствия концепции дополнительности само по себе еще ни о чем не говорит.

И действительно, в литературе можно встретить диаметрально противоположные истолкования связи между соответствием и дополнительностью. Так, один из учеников Н. Бора А. Петерсен считает, что идея соответствия, затрагивающая одну из главных квантовых проблем — проблему соотношения между квантовой и классической физикой, является более общей и менее специфической характеристикой квантового способа описания, нежели дополнительность [19]. Это происходит, по его мнению, потому, что в идее соответствия «подчеркивается само понятие обобщения как такового, а не какая-то специфическая особенность квантового обобщения» [19], как это имеет место в концепции дополнительности. Поэтому, по его мнению, именно идею соответствия следует рассматривать в качестве эпистемологического ядра копенгагенской интерпретации, так что «принцип дополнительности является скорее частным случаем, специфическим проявлением принципа соответствия» [13], как выразился датский философ Й. Витт-Хансен при разъяснении позиции А. Петерсена и своей собственной.

В противоположность А. Петерсену и Й. Витт-Хансену эстонский философ В. Хютт защищает точку зрения, что «общая идея дополнительности была выработана Н. Бором еще в 1913 г. и что дополнительный способ мышления присутствовал с самого начала в научном творчестве Бора» [14]. При этом В. Хютт настаивает на том, что общую идею дополнительности, выражающую, по его мнению, требование согласованного понимания новых идей в результате исследования противоположностей в их противоречивом соотношении [15], следует отличать от принципа дополнительности, который, как он считает, «есть конкретизация данного общеметодологического подхода в связи с интерпретацией квантовой механики» [16]. Что же касается принципа соответствия, то, по мысли В. Хютта, «он также воплощает в себе эту общую идею, устанавливая специфическую дополнительную связь между квантовыми и классическими понятиями».

ми» [14]. Аналогичные взгляды можно обнаружить также у Г. Холтона [20], который, однако, формулирует их не столь явным и отчетливым образом, как В. Хютт.

Бесспорно, Н. Бор, начиная с 1913 г., был убежден, что прогресс в деле развития квантовой теории не может быть достигнут до тех пор, пока противоречие между квантово-теоретическими и классическими представлениями не будет поставлено во главу теоретического анализа [21]. В этом В. Хютт и Г. Холтон правы. Бесспорно также, что идея соответствия в ее отдельных аспектах и концепция дополнительности были шагами на пути разрешения противоречия между классическими и квантовыми представлениями, обеспечивавшими прогресс в деле развития квантовой теории и ее интерпретации. Однако, по нашему мнению, вряд ли будет правильным квалифицировать магистральную линию боровского мышления, ориентированную на «рациональное обобщение» классической физики, целиком в русле идеи соответствия, как это делают А. Петерсен и Й. Витт-Хансен, или всецело в русле идеи дополнительности, как это предлагает делать В. Хютт. Такое расширительное понимание этих концепций едва ли целесообразно. Более точной и отвечающей действительной истории развития взглядов Бора нам представляется трактовка, рассматривающая их как различные частные реализации общей идеи «рационального обобщения» классической физики. При таком истолковании ни соответствие, ни дополнительность не будут логически первичными по отношению друг к другу. Историческое же предшествование идеи соответствия концепции дополнительности делает ее одной из концептуальных предпосылок последней, в которой впервые было осуществлено «рациональное обобщение» классических представлений и признана необходимость неклассического использования классических понятий в квантовой области, нашедшая свое дальнейшее воплощение в дополнительном способе мышления.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Кузнецов. Принципы соответствия в современной физике и его философское значение. М.—Л., 1948.
2. Н. Бор. О строении атомов и молекул. — «Избранные научные труды» (ИНТ). Т. I. М., 1970, с. 84—148.
3. Н. Бор. О спектре водорода. — ИНТ, т. I, с. 152—167.
4. Н. Бор. О влиянии электрических и магнитных полей на спектральные линии. — ИНТ, т. I, с. 169—186.
5. Н. Бор. О сериальных спектрах элементов. — ИНТ, т. I, с. 247—284.
6. Н. Бор. Строение атомов в связи с физическими и химическими свойствами элементов. — ИНТ, т. I, с. 318—375.
7. Н. Бор. Строение атома. — ИНТ, т. I, с. 285—292.
8. Н. Бор (совместно с Г. Крамерсом и Дж. Слетером). Квантовая теория излучения. — ИНТ, т. I, с. 526—541.
9. Н. Бор. О применении квантовой теории к строению атома. I. — ИНТ, т. I, с. 482—525.

10. П. Г. Кард. Принцип несоответствия. — «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 360. Методологические вопросы физики, II. Тарту, 1975, с. 21—26.
11. А. Зоммерфельд. Основы квантовой теории и модель атома Бора. В кн.: Пути познания в физике. М., «Наука», 1973, с. 8—15.
12. К. Маркс. К критике политической экономии. М., 1953.
13. У. А. Раджабов, Н. И. Степанов. О некоторых вопросах методологии науки в исследованиях датских физиков. — «Вопросы философии», 1965, № 11, с. 170—174.
14. В. П. Хютт. Абсолютное и относительное в интерпретации квантовой механики. — «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 174. Труды по философии, IX. Тарту, 1965.
15. В. П. Хютт. Методологическое значение принципа дополнительности. — «Изв. АН ЭССР, серия физ.-мат. и тех. наук», 1965, 14, № 4, с. 499—506.
16. В. П. Хютт. Дополнительность Н. Бора и ее методологическое значение. — В кн.: Логика и методология науки. М., «Наука», 1967, с. 257—263.
17. K. Meyer-Abich. Korrespondenz, Individualität und Komplementarität. Wiesbaden, 1965.
18. A. Petersen. On the philosophical significance of the correspondence argument. — Boston Studies in the Philosophy of Science. Vol. V. Dordrecht, 1969, pp. 242—252.
19. A. Petersen. Quantum Physics and the Philosophical Tradition. Cambridge, 1968.
20. G. Holton. The Roots of Complementarity. — The Graduate Journal, 1973. Supplement, vol. IX, pp. 115—161.
21. M. Jammer. The Conceptual Development of the Quantum Mechanics. N.-Y. et al., 1966.

Поступила в редакцию 19 марта 1976 г.

VASTAVUS JA KOMPLEMENTAARSUS

I. Alekseyev

Resümee

Näidatakse, et vastavuse ideed ja komplementaarsuse kontseptsiooni võib käsitleda kahe järjestikuse sammuna klassikalise füüsika ratsionaalse üldistamise teel.

CORRESPONDENCE AND COMPLEMENTARITY

I. Alekseyev

Summary

It is shown that the correspondence argument and the concept of complementarity are two successive steps on the line of the rational generalization of classical physics.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МАТРИЧНОЙ ФОРМУЛИРОВКИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ (МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ)

В. П. Хюгг

Теория явлений атомного масштаба — квантовая механика — возникла в 1925 году в связи с построением математического формализма, на языке которого были записаны соответствующие уравнения движения. основополагающая статья В. Гейзенберга [1] была написана летом 1925 (ее автору было в это время 23 года!) Рукопись статьи с рекомендацией Макса Борна была получена редакцией «Zeitschrift für Physik» 27 сентября 1925 года и сразу же опубликована. М. Борн, моментально оценив значение идей Гейзенберга, в том же году опубликовал в сотрудничестве со своим учеником Паскуалем Йорданом работу [2], развивающую эти идеи до вывода наиболее важных принципов квантовой механики. Но еще прежде, чем появилась эта статья, в Англии другой молодой физик П. А. М. Дирак (очевидно, под влиянием лекций В. Гейзенберга в Кембридже летом 1925 года) опубликовал почти аналогичные результаты — в частности, открыл и развил учение о некоммутирующих символах [3].

Другим, независимым, направлением формулирования квантовой механики являются работы австрийского физика Эрвина Шредингера, который в 1926 году одно за другим опубликовал три сообщения под общим названием «Квантование как задача о собственных значениях». Уже на второй странице первого сообщения [4] приведено знаменитое уравнение Шредингера.

Шредингер исходил из работ французского физика Луи де Бройля 1923—1924 гг., в частности — из идеи взаимосвязи волнового и корпускулярного движения. На основе этой идеи Шредингер трактовал квантовомеханическое движение наподобие некоторого классического типа волнового процесса внутри атома. Во втором сообщении он, правда, признает невозможность последовательного истолкования понятий «положение» и «траектория» для электрона внутри атома («эти понятия неизбежно окажутся противоречивыми»), но здесь же делает следую-

щий роковой вывод: «Это противоречие настолько резко, что возникает сомнение, может ли вообще быть понята сущность движения в атоме с помощью пространственно-временной формы мышления. С философской точки зрения я считаю решение вопроса в подобном духе равносильным полному поражению, так как мы в действительности не можем изменить своих методов мышления и все, что не познаваемо с помощью этих методов, не может быть понято вообще» (см. [5], с. 691).

Таким образом, Шредингер связывал содержание новой теории с классическим физическим мировоззрением, с классической онтологизацией фундаментальных квантовых понятий. В противоположность этому гейзенберговское направление с самого начала стало на путь радикального изменения самого способа мышления в физике. Поэтому оправданным является анализ именно этого, гейзенберговского, направления в качестве становления квантовой механики. И совсем не потому, что Гейзенберг опередил Шредингера в публикации на каких-то 4 месяца, а по следующим мотивам: 1) в работах Гейзенберга, Борна и Йордана процесс становления квантовой механики происходит в чистом виде, свободном от неадекватных напластований классического способа мышления; 2) это направление с самого начала лежит в русле идей концепции дополнительности Н. Бора, а последняя представляет собой единственное адекватное понимание квантовой механики в качестве образца нового, неклассического типа физического знания.

1. Методология построения матричной формулировки

В статье «О методе теоретической физики» А. Эйнштейн писал: «Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы. Опыт может подсказать нам соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него. Конечно, опыт остается единственным критерием пригодности конструкций физики. Но *настоящее творческое начало присуще именно математике* (курсив мой. — В. Х.) ([6], с. 184). Прекрасным подтверждением высказывания Эйнштейна служит построение матричной формулировки квантовой механики. Предпосылки, из которых исходил В. Гейзенберг, были следующие: во-первых, полуклассическая теория Бора и ее недостаточная эмпирическая состоятельность, и, во-вторых, принцип соответствия как методический прием конструирования новой теории.

В упомянутой основополагающей работе В. Гейзенберг отмечает недостаточность полуклассической теории Бора в двух

смыслах: 1) правила вычисления наблюдаемых в опыте величин (энергия) содержат отношения между физическими величинами, ненаблюдаемыми экспериментально. Надежда, что эти величины будут измерены впоследствии в опыте, неоправдана в силу того, что 2) существующие правила не допускают обобщения на более сложные экспериментальные ситуации. Поэтому «представляется более удобным оставить всякую надежду на наблюдение до сих пор ненаблюдаемых величин... допустить одновременно, что частичное согласие названных квантовых правил с опытом является более или менее случайным, и попытаться построить (по аналогии с классической механикой) такую квантотеоретическую механику, в которой встречаются отношения только между наблюдаемыми физическими величинами» ([1], с. 880). В этом состоит так наз. принцип наблюдаемости Гейзенберга. Однако этот принцип не является еще одним самостоятельным исходным моментом, но лишь формой осознания необходимости перехода к новым, более адекватным опыту и его квантовомеханической реконструкции понятиям. Впоследствии Гейзенберг писал: «Единственным выходом представлялось построение нового вида механики, в которой понятие дискретных стационарных состояний было бы фундаментальным, а от понятия электронной орбиты, видимо, следовало отказаться» ([7], с. 82). Механизм поиска новых понятий определяется принципом соответствия. Вводится представление о квантовомеханическом аналоге классической физической величины и конструируется математический образ этого аналога. Далее находятся квантовые аналоги других классических величин и из них составляется уравнение движения по аналогии с классическим уравнением.

Существенно следующее обстоятельство. Квантовые аналоги, которые Гейзенберг сконструировал и первоначально называл «группой величин» (eine Gesamtheit von Größen), подчинялись особым математическим закономерностям умножения. Нахождение этих закономерностей и представляло основную трудность в конструировании нового уравнения движения. В этот момент — в момент нахождения определяющих структурных связей между математическими образами — работа стимулировалась только математической интуицией; физические и методологические соображения уже выполнили свою функцию. Но как раз в открытии этих соотношений, т. е. в формулировке на языке построенного математического формализма закона движения, состояла суть открытия. Эмпирия, физические и методологические соображения подсказали направление поисков, но решающая, конструктивная функция, как это верно заметил Эйнштейн, принадлежала математике. В найденных В. Гейзенбергом математических соотношениях уже были закодированы основные законы квантовой механики, квантовомеханического описания реальности.

М. Борн в «открытом» В. Гейзенбергом математическом аппарате узнал известное в математике матричное исчисление и совместно с Иорданом завершил математическое построение теории, включая ее распространение на электродинамику. В методологическом аспекте решающим здесь был связанный с построением формализма гносеологический поворот относительно точки зрения на физическую реальность: новые элементы формализма ищутся с целью утверждения их в качестве фундаментальных образцов физической реальности, а соотношения между ними в этом случае естественно рассматривать в качестве законов природы атомного мира. «Математическая основа рассмотрения Гейзенберга есть закон умножения квантовомеханических величин... Это не что иное, как закон умножения матриц... Так наз. матрицы суть представители физических величин, которые в классической теории даны как функции от времени» ([2], с. 859). Разъясняя далее этот момент, В. Гейзенберг замечает, что матрица как новый математический образ ничуть не менее может быть ассоциирована с реальностью, чем символы классической физики: «она, возможно, не абстрактнее и не ненагляднее... Как только принято, что все квантотеоретические величины «в действительности» суть матрицы, все квантотеоретические законы следуют без затруднений» ([8], с. 196).

Данный гносеологический поворот имеет конкретно-физическое содержание и философское обоснование. К физическому содержанию относится анализ В. Гейзенбергом так наз. «проблемы измерения» в квантовой механике (мысленные эксперименты с γ -микроскопом). Отказ от абсолютной применимости классических понятий требовал анализа условий их адекватности физической реальности. Разрабатывая эту мысль, Гейзенберг установил, что результаты последовательных измерений координаты электрона (в силу наличия кванта действия и связанного с ним процесса взаимодействия между электроном и «освещающим» его фотоном) не лягут на какую-либо плавную кривую. Более того, чем точнее производится измерение, тем более скачкообразный и беспорядочный характер будут иметь данные. Это означает, что понятия траектории и скорости теряют свой обычный физический смысл. Следовательно, в камере Вильсона наблюдается не траектория электрона, но лишь дискретные следы неточно определенных координат. «Наблюдаемыми» в условиях квантовомеханического измерения являются не траектория и скорость, но излучение атома и связанные с ним величины. Поэтому «вполне логична мысль, что механические законы следует записывать не как уравнения для координат и скоростей электронов, а как уравнения для частот и амплитуд» ([9], с. 20).

Этот ход мысли заставил В. Гейзенберга вплотную заняться проблемой «наблюдаемости». Обычно с возникновением матричной формулировки связывают элиминирование элемента наглядности из физической теории. Это, однако, не совсем верно. В статье 1927 года «О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики» речь идет не об отказе от наглядности, но о новом ее понимании: «Мы считаем, что понимаем физическую теорию в качестве наглядной, если мы во всех простых случаях можем представить себе качественно экспериментальные следствия этой теории, и одновременно убеждены, что применение теории не содержит внутренних противоречий» ([8], с. 172). Следовательно, речь по существу идет о необходимости логически согласованного понимания ненаглядной в обычном, классическом смысле области явлений: действительным содержанием принципа наблюдаемости и связанной с этим проблемой наглядности является проблема введения новых физических понятий и возможность понимания соответствующей физической реальности. Действительно, сам Гейзенберг впоследствии вспоминал о своей стимулирующей беседе с Эйнштейном, состоявшейся как раз в 1926 году. В этой беседе А. Эйнштейн заметил: «Именно теория решает, что может наблюдаться» ([7], с. 83), правильно подчеркнув производность «наблюдаемости» (и вместе с тем наглядности) от решения проблемы физической реальности.

В результате конкретизации мысли Эйнштейна относительно теории и «наблюдаемости» к ситуации квантовомеханического измерения В. Гейзенберг пришел к основополагающей идее теоретического воспроизведения предмета квантовой теории — к идее «оборачивания» роли математического формализма. Эта идея, о глубоком философском содержании которой будет сказано далее, выражает определенный сдвиг субъектно-объектного отношения, определенный гносеологический поворот в физическом познании и представляет собой философское обоснование физической стороны дела. Ключевое значение идеи В. Гейзенберг подчеркивал неоднократно:

1. «... Все зависело от правильного выражения связи математики и экспериментов... У меня мелькнула мысль, не следует ли постулировать, что природа допускает существование только таких экспериментальных ситуаций, которые можно описать в рамках квантовомеханического формализма. Это, очевидно, означало бы, что, исходя из математического формализма, нельзя одновременно определить место и скорость частицы» ([10], с. 17—18);

2. «Окончательное решение пришло с двух сторон. Один из путей сводился к переформулировке вопроса. Вместо того, чтобы спрашивать, как можно данную экспериментальную ситуацию описать с помощью известной математической схемы, ставится другой вопрос: верно ли, что в природе встречается только такая экспериментальная ситуация, которая выражается в математическом формализме квантовой теории?» ([9], с. 23);

3. «Вместо того, чтобы задаваться вопросом, что является математическим представлением траектории электрона в камере Вильсона в рамках квантовой теории, мы должны были бы спросить: верно ли, что в Природе возникают только такие ситуации, которые могут быть представлены в математическом формализме квантовой теории?» ([7], с. 83).

Таким образом, содержание основной идеи Гейзенберга сводится к тому, что при теоретическом построении предмета квантовой механики структурные закономерности искомого математического формализма играют (начиная с определенного момента познавательного движения) относительно самостоятельную, как бы «априорную» и «первичную» роль — роль творческого начала (А. Эйнштейн): с их помощью находятся фундаментальные элементы и структурные связи физической реальности, определяющие организацию эмпирического материала. Так, например, соотношение неопределенностей с самого начала имплицитно содержится в формализме и определяет структуру возможных результатов квантовомеханического измерения, то есть взаимосвязь результатов измерения классических физических величин микрообъекта.

На первый взгляд вышеприведенные формулировки В. Гейзенберга звучат явно идеалистически. Подобный вывод был бы поспешным и ошибочным. Эти формулировки будут идеалистическими в том случае, если их поставить в контекст идеалистической схемы *априоризма*, что зачастую делают представители современного неокантианства, стремясь записать Гейзенберга по своему «ведомству» и тем самым скомпрометировать материалистическую сущность реального движения процесса познания в современной науке вообще и в квантовой механике в частности. Но подобные идеалистические интерпретации процесса познания ни в коей мере не являются необходимыми, обусловленными существом дела. Сам Гейзенберг указывает на возможность материалистического понимания своей идеи: «Для того, чтобы понять Природу, мы должны подойти к ней с помощью некоторых понятий, и мы пытаемся установить непосредственную связь между наблюдаемыми явлениями и понятиями. Если мы добиваемся успеха, мы, с одной стороны, определяем, что мы наблюдали, а с другой стороны, получаем подтверждение справедливости понятий. Если нет, то мы вынуждены изменить концептуальную схему» ([7], с. 82). Таким образом, «первичность» формализма не является абсолютной. Рассмотрим этот вопрос подробнее и раскроем более глубокое, философское содержание идеи Гейзенберга.

2. Проблема обоснования теоретического знания и особенности квантовомеханического познания

Оживление интереса к интерпретации квантовой механики в духе априоризма, т. е. в духе идей философии И. Канта (см.,

например, работы известного современного немецкого физика фон Вайцзеккера) обусловлено 1) крахом неопозитивистской интерпретации квантовой механики и 2) тем обстоятельством, что в философии И. Канта впервые разрабатывалась идея обоснования естественнонаучного знания в его наиболее развитой — теоретической — форме. Как известно, Кант решал проблему обоснования всеобщности и необходимости (аподиктичности) основных законов и принципов естественнонаучных теорий. Подобные законы и принципы претендуют на универсальность (в смысле аподиктичности), но никакой отдельный опыт или их сумма не может служить оправданием такого рода претензии.

Немецкий философ решает проблему на основе ее своеобразного «оборачивания», которое он обозначил как «коперниковский переворот в гносеологии»:

«До сих пор считали, что всякие наши знания должны сообразоваться с предметами. При этом, однако, кончались неудачей все попытки через понятия что-то априорно установить относительно предметов, что расширяло бы наше знание о них. Поэтому следовало бы попытаться выяснить, не разрешим ли мы задачи метафизики более успешно, если будем исходить из предположения, что предметы должны сообразоваться с нашим познанием...»

«... даже физика обязана столь благоприятной для нее революцией в способе своего мышления исключительно лишь [счастливой] догадке — сообразно с тем, что сам разум вкладывает в природу, искать (а не придумывать) в ней то, чему он должен научиться у нее и чего он сам по себе не познал бы» ([11], с. 86—87).

Развертыванием этой идеи служит учение Канта об априорных синтетических суждениях (положениях). Это такого рода принципы, которые невозможно дедуцировать из опыта, но которые, являясь «свободным творением разума», лежат в основе всякого научного знания и тем самым делают возможным самый опыт.

Изложенная в первом пункте идея Гейзенберга вполне аналогична по содержанию «коперниковскому перевороту» Канта. Это сходство не случайно — идея Гейзенберга представляет собой конкретно-научное воплощение того философского обращения мысли, который за полтора века до построения квантовой механики был сформулирован немецким философом. Существовало, что Гейзенберг, исходя из своего варианта конкретизированной идеи Канта, построил не только матричную формулировку квантовой механики, но и открыл один из важнейших законов квантовомеханического описания реальности — соотношение неопределенностей. Последнее соотношение в принципе не может быть «снято» с опыта. Так наз. мысленные эксперименты не являются экспериментами в прямом смысле и лишь иллюстрируют и подтверждают соотношение неопределенностей. Таким образом, это соотношение (и соответствующий принцип неопределенности, утверждающий бес-

траекторный характер механического «поведения» микрообъектов) действительно является относительно независимым от опыта, относительно априорным в этом смысле. Из этого факта вытекают два вывода: *во-первых*, возможность идеалистической интерпретации сути квантовомеханического познания. Сам познавательный процесс предоставляет для этого гносеологические корни: если мы абсолютизируем относительную независимость данного принципа от опыта, то получим идеалистическую интерпретацию процесса построения квантовой механики в духе априоризма; и, *во-вторых*, вывод о том, что за идеалистической терминологией И. Канта и В. Гейзенберга скрывается реальная проблема методологии науки, проблема, требующая решения на диалектико-материалистической основе. Как указывал В. И. Ленин, недостаточно лишь с порога, вульгарно-материалистически отвергать рассуждения Канта; следует исправлять «эти рассуждения, углубляя, обобщая, расширяя их» ([12], с. 161).

Современный философско-методологический анализ позволяет вычленивать ту реальную проблему — проблему построения и относительной самостоятельности теоретического знания по отношению к эмпирии, которую Кант ставил и решал в духе априоризма. «За идеалистическим тезисом о творении субъектом мира объектов лежит глубокая диалектическая догадка об активности субъекта: субъект не просто воспринимает «данный» ему мир ощущений или готовых рассудочных понятий, а творчески перерабатывает «данность», строит из нее новое по содержанию знание, не сводимое к тому, что служило исходным пунктом его деятельности (в этом рациональный смысл кантовского тезиса о «существовании синтетических суждений a priori»)» ([13], с. 26). Суть дела в специфике теоретического знания. Его нельзя просто «вывести» из опыта, «снять» с эмпирии. Сущность теоретического знания (в отличие от эмпирического) обусловлена особой направленностью продуцирующей его познавательной деятельности. При получении эмпирического знания деятельность сознания направлена на внешнее ему содержание — на объект и условия его эмпирической констатации. При переходе на теоретический уровень исследования происходит «обращение» сознания — познавательная деятельность оказывается направленной на концептуальные средства самой мыслительной деятельности. Сознание оказывается направленным не на нечто ему внешнее, но на результаты (и процесс) своей собственной «работы». В результате достигается развитие понятийного аппарата, концептуальных средств освоения реальности, соответствующих более глубокой, не лежащей на поверхности сущности. Поэтому своеобразие «активности, конструктивности, творческого характера теоретического мышления заключается в том, что оно не заимствует своего содержания извне в готовом виде, а воспроизводит глубинную кар-

тину реальности собственными средствами, формирует собственное теоретическое мысленное содержание» ([14], с. 8). В. С. Швырев подчеркивает, что не следует противопоставлять понимание теоретической деятельности как направленности мышления на концептуальные средства содержательности мышления, его объективной истинности. Диалектика ручается за то, что действительность отражается как в содержании, так и в форме мышления. Поэтому деятельность, направленная на развитие концептуальных средств, есть тоже деятельность по развитию мысленного содержания более глубокого уровня реальности.

Так, в развитой В. Гейзенбергом математической схеме уже заложены имплицитно основные закономерности квантовой механики. И здесь нет ничего сверхъестественного. Теоретик не извлекает из математической модели то, что он в нее сам априорно вложил, как это считал И. Кант. Следует помнить, что построение (выбор) схемы был результатом содержательного методологического и конкретно-физического анализа. Гейзенберг опирался на методiku соответствия, теорию Бора, анализ проблемы «наблюдаемости». Эти факторы явились теми каналами, через которые информация о структурных особенностях нового типа физической реальности, закодированная в экспериментальных данных и в первоначальной теории атома Бора, «просочилась» в математический формализм матричной формулировки. В этом смысле мы все время подчеркивали относительный характер «априорности» (т. е. независимости от опыта) кванвотеоретических закономерностей, полученных из формализма. Далее, само получение этих принципов кванвотеоретического описания физической реальности (например, соотношения неопределенностей) не есть чистая дедукция из математической схемы. Требуется привлечение содержательных соображений (интерпретация), мысленное экспериментирование и другие познавательные процедуры. «Метод математической гипотезы отнюдь не отменяет необходимости содержательно-физического анализа, соответствующего промежуточным этапам формирования математического аппарата теории. Специфика современных исследований состоит... в том, что деятельность, направленная на построение, осуществляется как непрерывный переход от одной промежуточной интерпретации к другой в соответствии с логикой сложившегося аппарата, в котором сжато воспроизводится история его развития» ([15], с. 88—89). Посредством этого происходит содержательная проверка конструкции, проверка, в конечном счете опирающаяся на опыт, эмпирию. От априоризма ничего не остается. Становится ясным, почему реальный эксперимент над квантовым объектом не может опровергнуть мысленного экспериментирования на основе соотношения неопределенностей. Это происходит не в силу того, что «разум диктует законы природе», а в силу того, что схема

Гейзенберга подобрана и построена таким образом, что в нее «просочился» не выраженный явно (но закодированный уже в экспериментальных спектрах атомов) основной закон квантово-механического поведения микрообъектов. Этот закон впервые символически выражается явным образом в алгебре матричного исчисления (перестановочный характер символики), затем содержательно-физически осмысливается в виде соотношения неопределенностей и, наконец, выражается на языке классической физики в виде принципа неопределенности, утверждающего бестраекторный характер движения в микромире (см. [16], с. 14).

Таким образом, всю процедуру формулирования квантовой механики можно разбить на два этапа. На первом этапе ищутся основные математические образы. Поиском управляют содержательные соображения и методологические принципы физического познания. Связь с эмпирией прослеживается довольно четко. На втором этапе устанавливается математическая связь найденных образов и осуществляется разворачивание теоретической конструкции на основе работы с выделенным и зафиксированным в данной конструкции мысленным содержанием. Происходит «оборачивание» метода — движение идет на собственной почве теоретической схемы и регулируется внутренними структурными закономерностями данной конструкции. Связь с эмпирией обратная — последняя получает свою функциональную определенность (структурированность) со стороны теоретической схемы. Соответствие схемы реальности подтверждается мысленным экспериментированием с наглядно-содержательными моделями классического типа и посредством интерпретации.

Сказанное ярко демонстрирует эвристическую роль математики в процессе формирования современных физических теорий. В последнее время данная проблема вновь приобрела актуальность в связи со статьей Е. Вигнера «Непостижимая эффективность математики в естественных науках» ([17], с. 182—198). Как показано выше, «непостижимость» и «сверхестественность» в значительной мере испаряется при конкретно-содержательном рассмотрении проблемы на основе диалектико-материалистической методологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Heisenberg. Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. — «Zs. f. Phys.», 33, 879—893, 1925.
2. M. Born, P. Jordan. Zur Quantenmechanik. — «Zs. f. Phys.», 34, 858—888, 1925.
3. P. A. M. Dirac. The Fundamental Equations of Quantum Mechanics. — «Proc. Roy. Soc.» 109A, 642—653, 1925.
4. E. Schrödinger. Quantisierung als Eigenwertproblem. (Erste Mitteilung). — «Ann. d. Phys.», IV, 79, 361—376, 1926.

5. Вариационные принципы механики. Под ред. А. С. Полака. М., 1959.
6. А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, т. 4. М., «Наука», 1967.
7. В. Гейзенберг. Развитие понятий в физике XX столетия. — «Вопросы философии», 1975, № 1, с. 79—88.
8. W. Heisenberg. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. — «Zs. f. Phys.», 43, 172—198, 1927.
9. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
10. В. Гейзенберг. Квантовая теория и ее интерпретация. — В кн.: Нильс Бор. Жизнь и творчество. М., «Наука», 1967, с. 5—20.
11. И. Кант. Критика чистого разума. Соч., т. 3. М., «Мысль», 1964.
12. В. И. Ленин. Философские тетради. Полн. собр. соч., Изд. пятое, т. 29.
13. В. А. Лекторский. Проблема субъекта и объекта в классической и современной буржуазной философии. М., «Высшая школа», 1965.
14. В. С. Швырев. К анализу категорий теоретического и эмпирического в научном познании. — «Вопросы философии», 1975, № 2, с. 3—14.
15. В. С. Степин. Методология построения физической теории. — «Вопросы философии», 1974, № 12, с. 79—89.
16. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Квантовая механика. М., ГИФМЛ, 1963.
17. Е. Вигнер. Этюды о симметрии. М., «Мир», 1971.

Поступила в редакцию 29 марта 1976 г.

KVANTMEHAANIKA MAATRIKSESITUSE TEKKIMINE (METODOLOOGILISED PROBLEEMID)

V. Hütt

Resümee

Analüüsitakse kvantmehaanika maatriksesituse ülesehitamise metodoloogiat W. Heisenbergil. Näidatakse, et Heisenbergi põhiidee on filosoofilisest küljest sügavalt põhjendatud ja on kaugeleulatuva metodoloogilise tähtsusega. K. Marxi «meetodi ümberpööramise» adekvaatses formuleeringus kehtib see idee põhiseadusena siiretel empiirilisel teoreetilisele teadmisele.

DIE ENTSTEHUNG DER MATRIXDARSTELLUNG DER QUANTENMECHANIK (METHODOLOGISCHE PROBLEME)

W. Hütt

Zusammenfassung

Im Aufsatz wird eine Analyse der Methodologie des Aufbaus der Matrixdarstellung der Quantenmechanik durch W. Heisenberg dargelegt. Es wird gezeigt, dass die Hauptidee Heisenbergs eine tiefgreifende philosophische Grundlage und weitgehende methodologische Bedeutung hat. Adäquat als der „Umschlag der Methode“ (nach K. Marx) formuliert, gilt diese Idee als das Grundgesetz des Übergangs vom empirischen zum theoretischen Wissen.

СОДЕРЖАНИЕ — SISUKORD

X. П. Керес. Симметрия физического мира и теория относительности	3
H. Keres. Füüsilise maailma sümmeetria ja relatiivsusteooria. <i>Resümee</i>	9
H. Keres. Symmetry of the physical world and the theory of relativity. <i>Summary</i>	9
A. A. Коппель. О взаимоотношениях между общей теорией относительности и ее нерелятивистскими пределами	10
A. Koppel. Üldrelatiivsusteooria ja selle mitterelativistlike piirjuhtude vahekorrast. <i>Resümee</i>	29
A. Koppel. On interrelations between the general theory of relativity and its non-relativistic limits. <i>Summary</i>	29
A. Я. Киппер. Нулевая энергия гармонического осциллятора и ее космологическое значение	31
A. Kipper. Harmoonilise ostsillaatori null-energia ja selle kosmoloogiline tähtsus. <i>Resümee</i>	41
A. Kipper. Harmonic oscillator zero energy and its cosmological significance. <i>Summary</i>	41
X. T. Ээлсалу. Концепция исследовательской системы как методологическое средство анализа процесса научного исследования	42
H. Eelsalu. Uurimissüsteemi kontseptsioon teadusliku uurimisprotsessi analüüsi metodoloogilise vahendina. <i>Resümee</i>	47
H. Eelsalu. The concept of the research system as a tool of the methodological analysis of scientific research process. <i>Summary</i>	47
П. Г. Кард. Масса света	48
P. Kard. Valguse mass. <i>Resümee</i>	56
P. Kard. Die Masse des Lichtes. <i>Zusammenfassung</i>	56
П. Г. Кард. Гиперболическая тригонометрия в релятивистском пространстве скоростей	57
P. Kard. Hüperboolne trigonomeetria relativistlikus kiiruste ruumis. <i>Resümee</i>	68
P. Kard. Hyperbolic trigonometry in relativistic velocity-space. <i>Summary</i>	68
Ю. Б. Молчанов. Нужно ли учитывать различные смыслы отношения одновременности?	70

J. Moltšanov. Kas on tarvis arvestada samaaegsuse suhte eri tähendusi? <i>Resüme</i>	80
У. Молчанов. Is it necessary to distinguish between different meanings of the relation of simultaneity? <i>Summary</i>	81
П. Г. Кард. О релятивистском понятии одновременности	82
P. Kard. Relativistlik samaaegsuse mõiste. <i>Resüme</i>	90
P. Kard. Über den relativistische Begriff der Gleichzeitigkeit. <i>Zusammenfassung</i>	90
И. С. Алексеев. Соответствие и дополнительность	91
I. Aleksejev. Vastavus ja komplementaarsus. <i>Resüme</i>	98
I. Aleksejev. Correspondence and complementarity. <i>Summary</i>	98
В. П. Хютт. Возникновение матричной формулировки квантовой механики (методологические проблемы)	99
V. Hütt. Kvantmehaanika maatriksesituse tekkimine (metodoloogilised probleemid). <i>Resüme</i>	109
W. Hütt. Die Entstehung der Matrixdarstellung der Quantenmechanik (methodologische Probleme). <i>Zusammenfassung</i>	109

Ученые записки Тартуского государственного университета. Выпуск 417.
Методологические вопросы физики III. На русском языке. Резюме на эстонском, английском и немецком языках. Тартуский государственный университет. ЭССР, г. Тарту, ул. Юликооли, 18. Ответственный редактор Ю. Лембра. Корректоры Н. Чикалова, Ю. Лаанекаск, Л. Отсмаа, Л. Кивимяги. Сдано в набор 23/XII 1976. Подписано к печати 11/IV 1977. Печ. листов 7,5. Учетно-издат. листов 7,05. Бумага печатная № 2, 60×90 1/16. Тираж 600. МВ 03539. Зак. № 6670. Типография им. Ханса Хейдеманна, ЭССР, г. Тарту, ул. Юликооли, 11/19. II.

Цена 1 руб. 06 коп.

2—3

Симметрия физического мира и теория относительности. Керес Х. П. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 3—9.

По поводу 60-летия общей теории относительности в статье дается обзор первоначальных идей Эйнштейна, положенных им в основу теории относительности. В течение шестидесяти лет общая теория относительности была в сильной степени переформулирована и так или иначе изменена. Невсегда эти переделки бывали бесспорны. Поэтому полезно время от времени возобновлять в памяти первоначальные идеи Эйнштейна.

Теория относительности трактуется в статье как учение о пространственно-временной симметрии физического мира. Специальная теория относительности есть учение о симметрии, присущей комплексу механических и электродинамических явлений; общая теория относительности изучает пространственно-временную симметрию механических, электродинамических и гравитационных явлений. Но когда общий принцип относительности отождествляется с принципом обобщенности, то названная симметрия остается незамеченной.

Рез. эст., англ.

О взаимоотношениях между общей теорией относительности и ее нерелятивистскими пределами. Коппель А. А. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 10—30.

Согласно Кересу (ЖЭТФ, 1964, 46, 1741; 1965, 48, 1319); релятивистская и нерелятивистская теории гравитации могут трактоваться как одно целое, поскольку и математический аппарат, и основные физические идеи в них по существу одни и те же. В данной статье принят в основу тетрадный формализм на языке внешних дифференциальных форм. Исходным является рассмотрение гравитационных явлений в свободно падающих реперах. Обсуждается методологическая ценность и эвристическое значение упомянутой трактовки. Показано, что единый и цельный подход к ОТО и ее нерелятивистским пределам с одной стороны существенно расширяет и углубляет понимание этих пределов, в том числе ньютоновой теории гравитации, и, с другой стороны, раскрывает новые существенные черты ОТО, выявляет ряд скрывающихся в ней новых возможностей, а также открывает новый путь к лучшему пониманию сугубо релятивистских эффектов. Подробно анализируются следствия из возможности существования неньютонова нерелятивистского предела ОТО. Отмечается существование определенных множеств конкретных решений уравнений поля эйнштейновской теории гравитации, имеющих неньютонов предел и описывающих тем самым такие релятивистские вихревые гравитационные поля, вихревой характер которых не исчезает даже в нерелятивистском пределе. Выявление таких решений образует ныне интересный теоретический «задел», геометрическое и физическое значение которого заслуживает самого внимательного исследования.

Библ. 27 назв. Рез. эст., англ.

Нулевая энергия гармонического осциллятора и ее космологическое значение. Килпер А. Я. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, Тарту, с. 31—41.

Квантовая теория волновых явлений непосредственно связана с проблемой гармонического осциллятора. В отличие от классической теории выражение энергии осциллятора имеет в квантовой теории своеобразный член, называемый нулевой энергией. В большинстве реальных явлений нулевая энергия не имеет никакого значения. Однако в космологических явлениях нулевая энергия может оказаться причиной наблюдаемых эффектов. Так, многозначность красного смещения в спектрах далеких космологических объектов находит себе объяснение с привлечением нулевой энергии. В статье этот вывод обосновывается с помощью некоторого мысленного эксперимента и подтверждается данными наблюдений спектров квазаров.

Библ. 2 назв. Рез. эст. англ.

Концепция исследовательской системы как методологическое средство анализа процесса научного исследования. Ээлсалу Х. Т. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 42—47.

В статье обобщается методологический опыт, накопленный при разработке методов галактической статистической астрономии. Обсуждаются принципы классификации статистических дисциплин.

Библ. 6 назв. Рез. эст., англ.

Масса света. Кард П. Г. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 48—56.

В рамках закона эквивалентности массы и энергии обосновывается методологическая и методическая ценность понятия массы света. Параллельно критикуются воззрения, недооценивающие или отрицающие это понятие.

Библ. 33 назв. Рез. эст., нем.

Гиперболическая тригонометрия в релятивистском пространстве скоростей. Кард П. Г. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 57—69.

Пространство скоростей специальной теории относительности имеет, как известно, метрику пространства Лобачевского. Отсюда вытекает возможность построения в этом пространстве гиперболической тригонометрии. За исходную точку в статье берется для этой цели процесс фотодиссоциации частицы. Применение законов сохранения массы и импульса в системах покоя первичной и двух вторичных частиц приводит после исключения массы фотона и масс покоя трех частиц к формулам, выражающим теорему косинусов гиперболической тригонометрии. Три частицы находятся в вершинах треугольника, стороны которого определяются как $\varphi_{ik} = \text{Arth}(v_{ik}/c)$, где c — скорость света, а v_{ik} — скорость k -й частицы относительно i -й; углы треугольника равны углам между соответствующими скоростями. Из формулы косинусов получаются и все остальные формулы гиперболической тригонометрии. Дефект суммы углов гиперболического треугольника, образованного скоростями трех инерциальных систем друг относительно друга, оказывается равным углу, на который поворачивается фиксированное направление в результате двух последовательных неколлинеарных преобразований Лоренца (прецессия Томаса). Тригонометрический метод эквивалентен методу преобразований Лоренца, но в некоторых отношениях проще него. В частности, он позволяет избежать характерного вычислительного парадокса, возникающего при повторном преобразований трехмерной скорости на основе преобразований Лоренца.

Рис. 6. Библ. 4 назв. Рез. зст., англ.

Нужно ли учитывать различные смыслы отношения одновременности? Молчанов Ю. Б. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 70—81.

Понятия абсолютности и относительности одновременности можно трактовать в двух различных смыслах — в смысле уникальности и в смысле всеобщности. Если данному в данной точке событию соответствует в другой точке одно-единственное одновременное с ним событие, то одновременность абсолютна в смысле уникальности; если множество событий, то в том же смысле относительна. Если отношение одновременности (безразлично, абсолютной или относительной), установленное в смысле уникальности в данной системе отсчета, имеет место и во всех других системах отсчета, то одновременность абсолютна в смысле всеобщности; если нет, то относительна в том же смысле. Согласно реляционной концепции времени и в силу отсутствия в природе дальнего действия одновременность в смысле уникальности всегда относительна. Из множества событий, одновременных с данным в силу относительности в смысле уникальности, может быть выбрано «по определению» или каким-либо иным способом одно-единственное событие, которое тем самым становится абсолютно одновременным в смысле уникальности с данным событием. В этом основной смысл конвенционального характера отношения одновременности. Однако в другой системе отсчета абсолютно одновременной, выбранной по тем же критериям, будет уже другая пара событий, т. е. одновременность в смысле всеобщности относительна.

Учет различных смыслов относительности и абсолютности одновременности имеет важное значение как для физического содержания, так и для философской интерпретации теории относительности.

Библ. 16 назв. Рез. зст., англ.

УДК 530.12:115.

О релятивистском понятии одновременности. Кард П. Г. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 82—90.

Приведена новая аргументация против конвенционалистических или близких к ним воззрений в вопросе об одновременности пространственно разобщенных событий. В частности, указано, что определение одновременности, данное Эйнштейном, нельзя считать (нетерминологической) конвенцией, так как понятие одновременности до этого определения вообще отсутствует.

Библ. 9 назв. Рез. эст., нем.

УДК 530.145

Соответствие и дополнительность. Алексеев И. С. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 91—98.

Показывается, что идею соответствия и концепцию дополнительности можно трактовать как два последовательных шага на пути рационального обобщения классической физики.

Библ. 21 назв. Рез. эст., англ.

УДК 530.145

Возникновение матричной формулировки квантовой механики (методологические проблемы). Хютт В. П. «Уч. записки Тартуского гос. ун-та», вып. 417, Тарту, 1977, с. 99—109.

В основе построения матричной формулировки квантовой механики (1925) лежит идея В. Гейзенберга: не подыскивать формализм для описания эмпирических данных, но, наоборот, постулировать, что в природе осуществляются только такие эмпирические ситуации, которые «разрешены» квантотеоретической схемой (в частности — удовлетворяют соотношению неопределенностей). Показано, что эта идея является конкретно-научным воплощением философской идеи И. Канта об активности субъекта в познании. Дана критика идеалистического (априористического) понимания этой идеи. Установлено, что в адекватной форме методологического принципа К. Маркса — метода оборачивания (Umschlag der Methode) данная идея является основным законом перехода от эмпирического знания к теоретическому.

Библ. 17 назв. Рез. эст., нем.