

ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Аграрный Университет  
и.м. Н.И. Вавилова»

по специальности: 35.06.04 Технологии, средства механизации и  
энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве.

## РЕФЕРАТ

«Релятивистская механика».

Выполнил: аспирант  
кафедры «Технический  
сервис и технология  
конструкционных материалов»

Соколов М.М.

Принял : д.т.н., доцент

Никитин Д.А.

*№ 34  
30.03.2016г.*

Саратов 2016



## Содержание

Релятивистская механика .....3

Библиографический список.....37

## Релятивистская механика

На рубеже XIX и XX столетий ряд выдающихся физиков сознавали неизбежность коренных изменений в наших взглядах на природу фундаментальных понятий. В 1904 г. А. Пуанкаре писал: «Может быть, мы должны построить совершенно новую механику, пока еще туманную, в которой инерция увеличивается со скоростью и скорость света является предельной»<sup>1</sup>.

В классической физике выявились глубокие противоречия. Согласно теории Фарадея — Максвелла, все электромагнитные явления, в том числе и световые, объясняются свойствами всепроникающего неподвижного эфира и его взаимодействием с веществом. Теория близкодействия Фарадея — Максвелла противоречила теории дальнодействия Ньютона, согласно которой взаимодействие распространяется с бесконечной скоростью. Не удавалось построение и самой модели эфира. С одной стороны, эфир должен быть твердым телом, поскольку электромагнитные волны поперечны, а с другой стороны, вещественные тела должны беспрепятственно двигаться через этот твердый эфир. Наконец, принцип относительности Галилея, бесспорный для механических явлений, утверждает, что невозможно установить, движется ли тело равномерно-поступательно или находится в покое, т. е. что понятие абсолютного движения лишено физического смысла. Однако, если эфир неподвижен, то можно говорить об абсолютном движении тела, понимая под этим движение тела относительно неподвижного эфира, и определить скорость этого движения экспериментально. Если электромагнитные и световые волны суть волны эфира, то скорость их распространения относительно эфира будет всегда одна и та же, независимо от движения источника или приемника. Но для движущегося наблюдателя (приемника) эта скорость будет иная, зависящая от скорости наблюдателя относительно эфира.

В своем годичном движении вокруг Солнца Земля меняет свою скорость, следовательно, скорость распространения эфирных волн на Земле должна меняться по временам года и зависеть от направления луча. Дж. Максвелл полагал, что существовавшая точность измерения времени недостаточна для земных опытов, и предложил астрономический эксперимент.

В статье «Эфир» Дж. Максвелл писал: «Единственный возможный способ прямого определения относительной скорости эфира по отношению к Солнечной системе заключается в сравнении значений скорости света, выведенных из наблюдений затмений спутников Юпитера, когда Юпитер

виден с Земли приблизительно в противоположных точках эклиптики»<sup>2</sup>. (Имеется в виду, когда Юпитер виден в направлении апекса и в противоположном направлении.)

Эксперимент не был осуществлен и вряд ли мог быть осуществлен из-за недостаточной точности астрономических наблюдений. Зато земные опыты оказались вполне возможными. А. Майкельсон<sup>2</sup>, а также Ф. Трутон и Г. Р. Нобль<sup>3</sup> предприняли эксперименты для обнаружения «эфирного ветра», т. е. измерения скорости эфирных волн в зависимости от скорости Земли. Вопреки ожиданию, опыты дали явно отрицательный результат<sup>4</sup>.

Опыты Майкельсона и другие аналогичные, повторенные многократно с возрастающей точностью, показали, что «эфирный ветер», если он вообще существует, не превосходит  $1/20$  скорости Земли. Лишь единственно Д. Миллер<sup>5</sup> обнаружил «эфирный ветер», доходящий до  $10$  км/сек. Корректность опытов Миллера оспаривалась многими физиками и их результаты приписывались побочным невыясненным причинам. То, что ход изменения «эфирного ветра» в опытах Миллера явно не совпадал с движением Земли вокруг Солнца, показывает, во всяком случае, что «эффект Миллера» заведомо не имеет отношения к рассматриваемому вопросу. Следует еще отметить, что в последнее время Дж. Миллер указал на возможность опыта с использованием доплер-эффекта от мазеров<sup>7</sup>.

Соответствующие эксперименты, осуществленные группой Таунса, доказали, что «эфирный ветер» меньше  $1/1000$  скорости Земли вокруг Солнца<sup>8</sup>.

Итак, оказалось, что определить абсолютную скорость Земли электромагнитными явлениями так же невозможно, как и механическими. Обнаружилось явное противоречие между теорией и фактами, т. е. обнаружилась несостоятельность теории неподвижного светоносного эфира.

Примирить теорию с фактами можно, конечно, отказавшись от гипотезы о неподвижности эфира, предположив вместе с Герцем, что эфир полностью увлекается средой. Тогда отрицательный результат опыта Майкельсона и его аналогов получается автоматически. Однако гипотеза Герца противоречит законам распространения света в движущихся средах. Скорость света в неподвижной среде с коэффициентом преломления  $n$  равна  $c/n$ . Если среда движется со скоростью  $v$ , а эфир полностью увлекается, то скорость света относительно неподвижного наблюдателя должна быть по законам классической механики равна  $c/n - v$ . В свое время А. Френель<sup>9</sup> предсказывал, что скорость света в движущейся среде должна быть равна так называемый коэффициент увлечения Френеля. Г.

Физо своими знаменитыми опытами измерил скорость света в движущейся воде, а П. Зееман — в движущемся стекле и кварце <sup>2</sup>. Эти опыты подтвердили формулу Френеля и тем самым опровергают гипотезу Герца о полном увлечении эфира средой.

Д. Комсток, Р. Толмен и В. Ритц <sup>3</sup> предлагали различные «теории истечения», так называемые «баллистические теории». В них свет распространяется не светоносным эфиром, а корпускулами, скорость которых складывается векторно из скорости истечения корпускул относительно источника и скорости самого источника. Таким образом, в этих теориях распространение света—явление механическое, и, в силу принципа относительности Галилея, опыты Майкельсона и других исследователей так же не могут обнаружить абсолютное движение Земли, как и другие механические опыты. Однако, как легко видеть, «теории истечения» противоречат опытам Физо и Зеемана, как и теория Герца. Веские возражения против этих теорий были выдвинуты В. де-Ситтером <sup>4</sup>: если скорость света зависит от скорости источника, то в наблюдаемых движениях двойных звезд должны отмечаться отклонения от законов Кеплера, и одна из звезд может даже быть видимой одновременно в двух местах. Позднее возражения де-Ситтера оспаривались другими астрономами <sup>5</sup>, считавшими, что астрономические наблюдения недостаточно точны для решения этого вопроса.

В настоящее время предложен и отчасти осуществлен ряд прямых экспериментов по проверке независимости скорости света от скорости источника.

Устранить противоречие между опытом Майкельсона и теорией неподвижного эфира пытались Д. Фицджеральд и независимо от него Г. Лоренц. Формально это им удалось, но ценой целого ряда дополнительных гипотез *ad hoc*. Так, Лоренц был вынужден выдвинуть следующие гипотезы: постулат о формулах преобразований, предположение о существовании неподвижного эфира, о шарообразности неподвижного электрона, о равномерности распределения заряда электрона, об электромагнитной природе всех масс, об изменении размера движущегося электрона пропорционально  $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ , о том, что силы между нейтральными частицами и между заряженными и нейтральными имеют те же самые свойства преобразования, как и электростатические силы в электростатической системе.

Совершенно иначе подошел к вопросу А. Эйнштейн в своей знаменитой работе 1905 г. «К электродинамике движущихся тел» <sup>7</sup>. Он прежде всего отмечает, что «электродинамика Максвелла в современном

ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям», иллюстрируя это на примере взаимодействия между магнитом и проводником. Затем, исходя из неудачности попыток обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды», он постулирует, что принцип относительности Галилея распространяется не только на механические явления, но и на все физические явления вообще (принцип относительности Эйнштейна). К этому постулату он добавляет и второй постулат о независимости скорости света от скорости источника. Этих двух постулатов достаточно для построения специальной теории относительности, изменившей наши понятия о времени и пространстве и тем самым произведшей глубочайший переворот в физике.

1. Обратимся к кинематике специальной теории относительности. *Относительность одновременности* можно доказать следующим мысленным экспериментом. Пусть в середине равномерно движущегося вагона производится световая вспышка. В системе вагона свет достигает передней и задней стенок вагона одновременно, поскольку расстояния их до середины вагона одинаковы, а скорость света в обе стороны также одинакова. Однако в системе полотна железной дороги расстояния неодинаковы, так как за время прохождения света вагон передвинулся. Поскольку и в этой системе скорость света одинакова в обе стороны, то свет достигнет задней стенки раньше, чем передней. Следовательно, эти два события, одновременные в системе вагона, неодновременны в системе полотна. Понятие одновременности событий, имевшее до теории относительности абсолютное значение, становится относительным, зависящим от системы отсчета.

Пусть в вагоне, движущемся равномерно со скоростью  $v$ , световой сигнал идет от одной боковой стенки к другой, отражается и возвращается к источнику. При ширине вагона  $l$  скорости света в вагоне  $c$  на это требуется время  $t = 2l/c$ . В системе полотна путь, пройденный светом, будет длиннее и при той же скорости света время  $t'$  будет больше. Легко видеть, что

$$t' = \frac{\sqrt{(2l)^2 + (vt')^2}}{c}, \quad (1)$$

$$t = t' \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

т. е. время в движущейся системе течет медленнее. С точки зрения вагона, время течет медленнее на полотне железной дороги, а с точки зрения полотна, время течет медленнее в вагоне.

*Сокращение длины движущихся тел.* Пусть в вагоне, движущемся со скоростью  $v$ , световой сигнал идет от задней стенки к передней, отражается

и возвращается к задней. При длине вагона в собственной системе отсчета  $l$  на это требуется время  $t = 2l/c$ . В системе отсчета полотна на это требуется время

$$t' = \frac{l'}{c-v} + \frac{l'}{c+v} = \frac{2l'c}{c^2 - v^2},$$

где  $V$  — длина вагона в системе отсчета полотна. Но мы знаем, что время в вагоне течет медленнее:

$$\begin{aligned} t &= t' \sqrt{1 - v^2/c^2}, \\ \frac{2l}{c} &= \frac{2l'c}{c^2 - v^2} \sqrt{1 - v^2/c^2}, \\ l' &= l \sqrt{1 - v^2/c^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Итак, длина вагона в системе полотна меньше, чем в системе самого вагона. Соответственно расстояния между телеграфными столбами, измеренные в системе вагона, меньше, чем те же расстояния, измеренные в системе полотна.

Рассмотрим *преобразование Лоренца*. Вышеизложенного достаточно для составления формул перехода от координат и времени в одной инерциальной системе отсчета к координатам и времени в другой инерциальной системе, движущейся относительно первой. Такие формулы содержатся уже в работе Г. Лоренца <sup>1</sup>.

Если штрихованная система движется вдоль оси  $x$  нештрихованной системы со скоростью  $v$ , то

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3a)$$

Обратные формулы получаются заменой  $v$  на  $-v$ :

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3b)$$

Пуанкаре назвал эти формулы «преобразованиями Лоренца» <sup>2</sup>, и это название сохранилось поныне. По-видимому, Эйнштейн не был знаком с работой Лоренца 1904 г. и вывел формулы перехода заново, исходя из своих двух постулатов. К этому еще следует добавить, что еще до Лоренца в 1887 г. В. Фойхт применил эквивалентные формулы в работе «О доплер-эффекте» <sup>8</sup>.

Из преобразований Лоренца вытекает релятивистская формула *сложения скоростей*.

Пусть в штрихованной инерциальной системе отсчета точка движется со скоростью  $u'$ :

$$x' = x'_0 + u'_x t', \quad y' = y'_0 + u'_y t', \quad z' = z'_0 + u'_z t', \quad (4)$$

а сама штрихованная система движется вдоль оси  $x$  нештрихованной системы со скоростью  $v$ . Из (3 Б) получим:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}}, \quad u_y = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} u'_y, \quad u_z = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}} u'_z. \quad (5)$$

Из них следует, что

$$u = \frac{\sqrt{u'^2 + v^2 + 2u'v \cos \alpha' - \frac{1}{c^2} (u'v \sin \alpha')^2}}{1 + \frac{u'v \cos \alpha'}{c^2}}, \quad (6)$$

где  $\alpha'$  — угол между  $u'$  и осью  $x'$ . Если  $u'_y = u'_z = 0$ , то

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}. \quad (7)$$

Из этих формул следует, что сумма двух скоростей, меньших скорости света, всегда меньше скорости света. Если одна из двух скоростей равна  $c$ , то и сумма будет равна  $c$ , в полном соответствии с принципом независимости скорости света от скорости источника.

Далее следует, как писал Эйнштейн в 1907 г.<sup>1</sup>, что никакой сигнал не может распространяться со сверхсветовой скоростью. Если в системе  $K$  событие  $B$  является следствием получения сигнала со сверхсветовой скоростью от события  $A$ , то существует система  $K'$ , движущаяся относительно  $K$  со скоростью  $v < C$  с, где событие  $B$  происходило бы раньше  $A$ , т. е. следствие происходило бы раньше причины.

Обратимся к эффекту Доплера и абберации.

Релятивистскую формулу доплер-эффекта

$$\nu' = \nu \frac{1 - v/c \cos \varphi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (8)$$

где  $\varphi$  — угол между скоростью наблюдателя и линией, соединяющей источник и наблюдателя в системе источника, и эквивалентную формулу

$$\nu = \nu' \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - v/c \cos \varphi}, \quad (9)$$

где  $\varphi$  — угол между скоростью источника и линией, соединяющей источник и наблюдателя в системе наблюдателя, Эйнштейн вывел из уравнений электромагнитных волн<sup>2</sup>. Точно так же вывел он формулу для абберации

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - v/c}{1 - v/c \cos \varphi}. \quad (10)$$

Исторически это оправдано самим заглавием статьи («К



электродинамике движущихся тел»). Поскольку оба эффекта чисто кинематические, их можно, конечно, обосновать безотносительно к электродинамике, чисто кинематически<sup>3</sup>.

Легко видеть, что формулы (8) и (9) отличаются от классической формулы доплер-эффекта лишь коэффициентом у  $1 - v^2/c^2$ , учитывающим замедление хода времени.

В первом приближении релятивистские формулы для доплер-эффекта и аберрации совпадают, естественно, с классическими.

При  $\phi = 0$  формулы (8) и (9) упрощаются. Так, вместо формулы (8) получим

$$v' = v \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}. \quad (11)$$

При  $\phi = \pi/2$  (в системе наблюдателя) формула (9) принимает вид

$$v' = v \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (12)$$

Это «поперечный доплер-эффект», подтвержденный опытами Г. Айвеса<sup>4</sup> и др.

Рассмотрим *скорость света в движущейся среде*. Прямым следствием теоремы о сложении скоростей является, как показал М. Лауэ в 1907 г.<sup>1</sup>, «коэффициент увлечения» А. Френеля. Относительно среды скорость света равняется  $cn$ , где  $n$  — показатель преломления. Если сама среда движется в том же направлении со скоростью  $v$  относительно наблюдателя, то для последнего скорость света равна согласно (7)

$$u = \frac{c/n + v}{1 + \frac{cv}{nc^2}} = \frac{c/n + v}{1 + \frac{v}{nc}} \approx \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right), \quad (13)$$

где  $n$  — показатель преломления для длины волны  $X'$ , измеряемой в системе среды  $\{\Gamma = X(1 + u/u') = Y(1 + n^*v/c)\}$ . В случае диспергирующей среды имеем

$$u = c/n + v \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}\right). \quad (14)$$

П. Зеemannу<sup>2</sup> удалось экспериментально доказать наличие добавочного члена,

$$-\frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (15)$$

В дальнейшем, в связи со статьей П. Гарцера<sup>3</sup> об опыте Г. Гарреса<sup>4</sup>, Эйнштейн показал необходимость различать случаи, когда свет входит в тело в том же направлении, в каком движется тело, и когда свет входит в

тело перпендикулярно к его движению, а также и случай, когда свет входит вдоль оси неподвижной трубы, вдоль которой течет жидкость <sup>5</sup>.

*Парадокс часов.* Из того, что ход часов (времени) замедлен при рассмотрении его из инерциальной системы отсчета, движущейся относительно них, следует, что если двое идентичных часов *A* и *B* встречаются дважды и одни из них (часы *A*) двигались между встречами все время инерциально, а другие (часы *B*) частично или все время неинерциально, то при вторичной встрече часы *B* отстают от часов *A*-

На это следствие Эйнштейн указал уже в своей первой работе <sup>6</sup>. В 1911 г. оно нашло яркую иллюстрацию в статье П. Ланжевена<sup>7</sup>: космический путешественник отправляется с почти световой скоростью до далекой звезды и возвращается на Землю- Хотя путешественник тратит на это лишь два года своей жизни, Земля за это время постарела на 200 лет. Следует подчеркнуть что, в отличие от относительного замедления хода времени, имевшего местов одной инерциальной системе при наблюдении его из другой инерциальной системы отсчета, здесь налицо абсолютное отставание, получившее название «парадокс часов» или «парадокс близнецов».

Этот результат, парадоксальный с точки зрения обычных представлений и классической физики, породил бесчисленные возражения и обширную полемику.

А. Арзелье \* приводит далеко не полный список более ста работ по этому вопросу до 1961 г. В последующие годы появились еще два десятка статей. А. Бергсон объявил парадокс «миражом» <sup>2</sup>, а Г. Дингль в многочисленных статьях пытался доказать с его помощью внутреннюю противоречивость теории относительности.

Наиболее типичные возражения рассмотрены и опровергнуты Эйнштейном в его знаменитой статье 1918 г. «Диалог по поводу возражений против теории относительности» <sup>3</sup>.

Хотя некоторые авторы, например Р. Толмен <sup>4</sup>, полагали, что строгое рассмотрение «парадокса часов» возможно лишь в общей теории относительности, ряд авторов показал, что он вполне разрешается в рамках специальной теории. Все же методически не лишне рассматривать его и в рамках общей теории <sup>5</sup>.

Точный количественный расчет в рамках общей теории относительности впервые произвел К. Мёллер <sup>6</sup>.

Косвенным экспериментальным подтверждением справедливости «парадокса часов» надо считать обнаружение удлинения «времени жизни» быстрых  $\mu$ -мезонов по сравнению с медленными или неподвижными и

существование «поперечного доплер-эффекта».

К прямым экспериментальным подтверждениям относится влияние температуры на положение линий испускания и поглощения гамма-квантов  $\text{Fe}^{57}$ , отмеченное П. Б. Паундом и Г. А. Ребка <sup>7</sup> при опытах с эффектом Мёссбау-ера по проверке гравитационного смещения. К. Шервин показал, что наблюдаемый сдвиг согласуется с предсказанием теории с точностью до 1% <sup>8</sup>.

Еще более прямое доказательство заключается в опытах, где источник неподвижен в центре вращающегося диска, а поглотитель на его ободе совершает круговое движение с постоянной скоростью.

В одних опытах <sup>9</sup> смещение частоты совпало с теоретическим с точностью до 5%, а в других <sup>10</sup> — с точностью до 1%.

2. Важным шагом в развитии специальной теории относительности явились работы Г. Минковского <sup>11</sup>, представляющие собой геометризацию кинематики. В трактовке Минковского совокупность всех «событий» образует четырехмерный континуум, «мир», или «пространство Минковского», где каждому событию соответствует определенная «мировая точка». Пространственные координаты события  $x_x$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и временная координата  $x_t$  — *ид* суть проекции мировой точки на четыре взаимно перпендикулярные оси  $x_1$ —  $x_4$ , и их величина зависит от расположения этих осей, образующих систему отсчета.

Аналогично тому, как в обычной геометрии при любом изменении координатной системы расстояние между двумя точками

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (16)$$

является инвариантом, в пространстве Минковского «расстояние» между двумя «мировыми точками-событиями» инвариантно

$$\delta^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2. \quad (17)$$

Это расстояние получило название «интервала». Действительный интервал  $S^2 > 0$  называется пространственно-подобным. Мнимый интервал  $s^2 < 0$  называется временно-подобным.

Совокупность мировых точек-событий, связанных с инерциальной материальной частицей, образует прямую линию — «мировую линию». При параллельности временной оси  $x_4$  с мировой линией проекции последней на другие оси  $x_1$ —  $x_3$  превращаются в точки, т. е. частица неподвижна в данной системе отсчета.

Если взять какую-либо мировую точку-событие  $A$ , то нулевой интервал  $s^2 = 0$  представляет все световые линии, проходящие через мировую точку, образующие «конус». Все мировые точки, находящиеся

внутри нижнего конуса, представляют события, временно удаленные от события  $A$ , т. е. прошлое, а внутри верхнего конуса — будущее. Событие  $A$  и любое событие — мировая точка  $B$  внутри конуса—могут происходить в одной и той же точке надлежаще выбранной системы отсчета. Мировые точки-события промежуточной области представляют события, пространственно удаленные от события  $A$ , и могут происходить одновременно с событием  $A$  в надлежаще выбранной системе отсчета.

Трактовка Минковского позволяет вывести преобразования Лоренца и все кинематические эффекты специальной теории относительности чисто геометрическим способом.

3. В отличие от *кинematики специальной теории относительности*, получившей в основном свой законченный вид уже в первой фундаментальной работе Эйнштейна 1905 г., *динамика специальной теории относительности* проделала более длительный и извилистый путь.

В первой своей работе Эйнштейн рассмотрел лишь динамику слабо ускоренного электрона, исходя из электродинамической теории. Существенно то, что Эйнштейн сохраняет определение силы классической механики: сила = масса  $\times$  ускорение.

Результат справедлив и для нейтральных материальных точек, «ибо такая материальная точка может быть путем присоединения сколь угодно малого электрического заряда превращена в электрон (в нашем смысле)». Понятия продольной и поперечной масс содержатся также в работе Лоренца 1904 г. в форме, эквивалентной формулам Эйнштейна. Еще раньше они были введены в физику М. Абрагамом (1902) и А. Бухерером (1904).

Еще в 1905 г. В. Кауфман <sup>2</sup> произвел измерения, лучше согласующиеся с формулой Абрагама, чем с формулой Эйнштейна — Лоренца. Позже более тщательные опыты А. Бухерера <sup>3</sup>, Е. Гупка <sup>4</sup>, а затем Г. Неймана <sup>5</sup> (с дополнением К. Шефера <sup>6</sup> и Ш. Гюи и Ш. Леванши <sup>7</sup>) установили справедливость релятивистской формулы.

Вскоре термины «продольная» и «поперечная» масса устарели и почти вышли из употребления после того, как М. Планк <sup>8</sup> показал в 1906 г., что естественнее и целесообразнее вместо определения силы классической механики как произведения массы на ускорение принять определение силы как производной от импульса по времени:

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}. \quad (18)$$

Тогда вместо «продольной» и «поперечной» масс получается единая масса, релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (19)$$

Сам Эйнштейн присоединился к планковскому определению силы в 1907 г. в статье «О принципе относительности и его следствиях»<sup>9</sup>.

Из такого определения силы и массы вытекают формулы преобразования сил при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую.

Если на тело действует сила  $F$  с компонентами  $F_x, F_y, F_z$  в системе отсчета, в которой тело покоится, то в системе штрихованной (относительно которой тело движется со скоростью  $v$  вдоль  $x'$ ) компоненты силы  $F'$  равны:

$$F'_x = F_x, \quad F'_y = F_y \sqrt{1 - \beta^2}, \quad F'_z = F_z \sqrt{1 - \beta^2} \quad (\beta = v/c). \quad (20)$$

Вывод формул (19) (20) у Планка и Эйнштейна опирается на электродинамические соображения.

К- Льюис и Р. Толмен<sup>1</sup> дали другой вывод этих же формул, не связанный с электродинамикой, исходя из законов сохранения. Тем самым была доказана возможность обосновать релятивистскую механику независимо от электродинамики.

Заметим еще, что законы упругого удара релятивистской механики для общего случая были исследованы Ф. Ютнером.

После того как Эйнштейн и Планк согласовали динамику материальной точки с теорией относительности, на очереди стали вопросы *динамики твердого тела* и, прежде всего, определение самого понятия «твердого» или «жесткого» тела в теории относительности.

В классической механике под абсолютно твердым, или абсолютно жестким, телом понимают тело, характеризующее тем, что расстояния между любыми его двумя точками инвариантны. Очевидно, что это определение не может сохраняться в теории относительности, ибо в последней размеры тела зависят от скорости тела относительно системы отсчета. Легко также видеть, что предположение о возможности существования абсолютно жесткого тела с инвариантными размерами несовместимо с утверждением о предельной скорости распространения сигнала. Приведя в движение один конец абсолютно жесткой линейки, мы привели бы мгновенно в движение и другой конец, т. е. сигнал передавался бы с бесконечной скоростью.

Первая попытка определения твердого тела в теории относительности принадлежит М. Борну<sup>2</sup>. Согласно Борну, тело считается твердым тогда, когда в системе отсчета, в которой определен элемент

объема тела в рассматриваемый момент покоится, этот элемент не деформирован. Это определение оказалось несостоятельным. П. Эренфест<sup>3</sup> показал, что «твердое» тело Борна не может быть приведено во вращение (или остановлено, если оно вращалось), так как в этом случае дуговые элементы подвержены лоренцову сокращению, а радиальные нет. Далее, в силу этого Г. Герглотц<sup>4</sup> и Ф. Нетер<sup>5</sup> показали, что пространственное положение «твердого тела» Борна вполне определяется положением одной из его точек, так что это тело имеет всего три степени свободы, в то время как в классической механике твердое тело имеет шесть степеней свободы.

В дальнейшем Борн опубликовал второе определение твердого тела, допускающее шесть степеней свободы<sup>6</sup>, а Нетер — даже девять.

Однако вскоре М. Лауэ<sup>7</sup> показал, что число степеней свободы любого тела неограниченно. Действительно, поскольку никакое действие не может распространяться со сверхсветовой скоростью, постольку толчок, сообщенный телу одновременно в  $n$  различных местах, вначале всегда вызовет движение минимум с  $n$  степенями свободы.

Итак, теория относительности не допускает возможности существования абсолютно твердого тела, и твердые тела должны рассматриваться лишь как тела с большим коэффициентом упругости, а проблема динамики твердых тел должна решаться на основе теории упругости (приведенной в согласии с теорией относительности).

Отличие релятивистской динамики твердого тела от классической динамики очень наглядно иллюстрируется в рассмотренном М. Лауэ законе рычага<sup>1</sup>. В классической механике для равномерного поступательного движения твердого тела не требуется момента внешних сил. Иначе обстоит дело в теории относительности: для тела с упругими напряжениями в общем случае необходим крутящий момент.

Пусть коленчатый рычаг с двумя перпендикулярными равными плечами находится в равновесии в системе отсчета, в которой он покоится. Очевидно, необходимо для этого, чтобы силы, действующие на плечи рычага (перпендикулярно к ним), были равными по величине так, чтобы их моменты уравнивались.

Рассмотрим эту установку в другой системе отсчета, движущейся со скоростью  $v$  относительно рычага, параллельно к одному из его плеч. В этой новой системе отсчета моменты внешних сил не уравниваются. Действительно, плечо, параллельное и, сокращается в отношении  $|\Delta l| \sim v^a/c^2$ , и в этом же отношении сокращается сила, действующая на него, так что момент этой силы сокращается в отношении, в то время как другое плечо и действующая на него сила не меняются.

Таким образом, в новой системе отсчета на рычаг действует крутящий момент  $Flv^2/c^2$ , и все же рычаг не вращается, а движется равномерно поступательно <sup>2</sup>.

Этот на первый взгляд парадоксальный результат объясняется Лауэ инертностью энергии. Сила, параллельная  $v$ , совершает работу  $Fv$  в единицу времени, а такая же работа отдается рычагом его оси. Таким образом, по плечу, перпендикулярному  $v$ , течет поток энергии  $Fv$ , инертная масса которого  $Fv/c^2$ . В месте, где этот поток входит в рычаг, его импульс равен  $Fv^2/c^2$ , а момент импульса — крутящему моменту  $Flv^2/c^2$ , что совпадает с вычисленным прежде.

В этой же статье Лауэ объясняет аналогично отрицательный результат опыта Ф. Трутона и А. Нобля и показывает, что механика Ньютона не пригодна для упруго напряженных тел даже как приближение для малых скоростей.

Ранее <sup>3</sup> он показал, что она пригодна лишь для тех тел, которые находятся в статическом равновесии в их системе покоя, не подвергаясь действию внешних сил.

4. Представление о тяготении как о всеобщем свойстве материи, не оформленное как научная теория, возникло задолго до Ньютона. Уже Коперник высказывался о взаимном притяжении частиц Земли как о причине ее шарообразности.

У Коперника не было идеи о едином центре мира, к которому тяготеют небесные и земные тела. По-видимому, он считал вероятным существование для каждого светила своего центра тяжести. Последователи Коперника полагали, что все тяжелые тела стремятся к центру мира и направляются к нему прямолинейно, естественным движением.

Особо важную роль для развития теории тяготения сыграли труды И. Кеплера. В сочинении «Новая астрономия с объяснением причины явлений, или небесная физика» <sup>4</sup>Кеплер дал два первых закона движения планет, установленных для Марса на основе обширнейших вычислений.

В 1619 г. в сочинении «Гармония мира»<sup>2</sup> Кеплер сформулировал третий закон.

Законы Кеплера гласят: 1. Каждая из планет движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. 2. Радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, в равные промежутки времени описывает равные площади. 3. Квадраты времен обращений планет вокруг Солнца относятся, как кубы их средних расстояний от Солнца.

Законы Кеплера не сразу нашли свое объяснение. Они нашли его в ньютоновском законе всемирного тяготения, хотя Кеплер и имел

представление об универсальности силы тяготения. «Он жил в эпоху,— пишет Эйнштейн,— когда не было еще уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и мало понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения»<sup>3</sup>.

Во втором дне «Диалога» \* (1632) Г. Галилей, рассматривая возражения, выдвинутые против вращения Земли, многократно и подробно обсуждает вопрос, почему не улетели все тела с поверхности движущейся Земли в окружающее пространство. Даже Симпличио начинает понимать сущность вопроса.

Количественных оценок у Галилея мы не находим. Характеризуя взгляды Галилея, Эйнштейн писал: «Он нашел закон инерции и закон свободного падения в поле тяготения Земли: масса (точнее, материальная точка), на которую не действуют другие массы, движется равномерно и прямолинейно. Вертикальная скорость свободно падающего тела возрастает в поле тяжести пропорционально времени. Сегодня нам может казаться, что только небольшой шаг отделяет результаты Галилея от законов Ньютона. Но все-таки следует отметить, что оба вышеприведенных утверждения Галилея по форме относятся к движению в целом...»<sup>5</sup>. Только дифференциальная форма закона позволила объяснить явления, связанные с тяготением.

Иным путем шел Р. Декарт. В отличие от своих современников, Декарт не принимал тяжесть за свойство и внутреннее качество тяжелого тела, в силу которого тело стремится к центру Земли. В июле 1638 г. в письме к М. Мерсенну он отмечал, что одни думают, что тяжесть как качество зависит от того, в каком физическом состоянии находится тело, и что одна и та же материя в форме жидкости будет тяжелой, а в форме воздуха становится легкой; другие же считают, что каждое тело более или менее тяжело лишь в зависимости от количества материи, входящей в состав тела, и степени ее сжатости.

Через восемь лет Декарт резко полемизировал с Ж. Робервалем, считавшим, что как во всей материи, так и в каждой ее части имеется свойство, вследствие которого она стремится в одно непрерывное тело. Чтобы представить себе это, писал Декарт, надо допустить, что каждая часть материи одушевлена многими душами, не мешающими одна другой, и принять, что души эти разумны и могут знать, что происходит в местах,



очень удаленных, и там оказывать свое действие.

Декарт усматривал причину тяжести в давлении небесного флюида на тела. Небесный флюид состоит из частиц второго элемента. Вращаясь вместе с Землей, которую он окружает, вокруг ее оси, флюид испытывает центробежную силу. Однако удаление одних тел от Земли возможно в том случае, когда другие тела равного объема будут к Земле приближаться. В письме к Мерсенну в октябре 1639 г. он описывал, каким образом тонкая материя, кружащая вокруг Земли, гонит тяжелые тела к ее центру, и предлагал опытную проверку этого положения. «Наполните какой-нибудь круглый сосуд маленькими кусочками свинца, смешав вместе со свинцом несколько кусков дерева или другого вещества, более легкого, чем свинец, и заставьте сосуд этот быстро вращаться около центра. Увидите, что кусочки свинца прогонят куски дерева или камня к центру сосуда, хотя бы они были бы больше по объему, чем маленькие кусочки свинца, изображающие собою тонкую материю...»<sup>1</sup>.

Гюйгенс оспаривал точку зрения Декарта.

В 1659 г. он с помощью тщательного анализа движения с точки зрения наблюдателя, участвующего во вращении, показал, что для такого наблюдателя отклонение от инерциального движения, имеющее место в течение короткого промежутка времени, может быть аппроксимировано движением, направленным к центру.

Конструктивная часть гюйгенсовской теории тяготения во многом уступает ее критической части.

Гюйгенс представлял себе, что сферическая фигура Солнца могла образоваться таким же путем, каким образовалась сферическая фигура Земли. Однако он при этом не простирает действия тяжести на такие расстояния, как от Солнца к планетам и от Земли к Луне. Гюйгенс указывал, что этот важный шаг он не проделал потому, что его ум пленили вихри Декарта. Издатели шестнадцатого тома собрания сочинений Гюйгенса приводят его замечание на одной рукописи. Гюйгенс удивлялся, что Ньютон потратил столь много труда для доказательства многих теорем и даже целой теории о движении небесных тел, исходя из «маловероятной и смелой гипотезы» о протяжении частиц силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Это замечание не противоречит тому, что Гюйгенс отметил великие заслуги Ньютона в установлении закона всемирного тяготения. «Видя теперь,— пишет Гюйгенс,— благодаря доказательствам г. Ньютона, что если принять такое тяготение к Солнцу уменьшающимся по сказанному закону, то оно окажется так уравновешивающим центробежные силы планет, что произведет эллиптическое движение, угаданное Кеплером

и оправданное наблюдениями, не могу сомневаться, что гипотезы, допущенные относительно тяжести, и основанная на них система г. Ньютона верны. Это тем более вероятно, что в них находим разрешение трудностей, представлявшихся в системе вихрей Декарта»<sup>2</sup>.

Одновременно необходимо отметить и влияние Гюйгенса на Ньютона.

В 1666 г. Д. А. Борелли пытался объяснить движение планет начальной скоростью и притягательной силой Солнца.

Позднее в письме Э. Галлею от 20 июня 1686 г. Ньютон писал о заслугах Борелли. В письме Галлею от 14 июля 1686 г. Ньютон писал, что мысль об уменьшении тяжести пропорционально квадрату расстояния возникла у него примерно к 1666 г. Приблизительно в то же время Гук полагал, что от небесных тел исходят силы, с помощью которых они притягивают другие тела.

К открытию закона тяготения Ньютона привела проблема понимания строения Вселенной, но история этого открытия не получила еще своего разрешения. «Обстоятельства открытия закона тяготения,— пишет Л. Розен-фельд,— опять-таки связаны с некоторыми загадками, которые уже давно привлекли внимание историков: после того как Ньютон впервые пришел к идее тождественности силы тяжести на Земле с силой, которая управляет движениями планет, почему Ньютон не сразу пришел к решению вопроса? Почему прошло 20 лет, прежде чем он провозгласил закон всемирного тяготения?». К анализу этого вопроса обращались многие ученые, не решив его окончательно. В 1674 г. Гук предложил объяснение системы Вселенной исходя из трех основных законов: 1. Все тела обладают тяжестью не только по отношению к собственному центру, но и относительно друг друга в пределах круга их действия. 2. Все тела, имеющие простое прямолинейное движение, продолжают двигаться по прямой линии, если только какая-нибудь сила их постоянно не отклоняет от этого направления, заставляя описывать круг, эллипс или другую сложную кривую. 3. Притяжение тем сильнее, чем ближе находится притягивающее тело. Хотя Гук прибавил, что им не исследован подробнее закон, до которому происходит притяжение, тем не менее в дальнейшем он затеял спор о приоритете в открытии закона притяжения.

Галлей сделал вывод из третьего закона Кеплера, что притяжение Солнца должно убывать пропорционально квадрату расстояния. Он стремился определить пути планет, но не смог преодолеть возникшие математические трудности. В 1683 г. он в присутствии Врена спросил у Гука его мнение по этому вопросу. Хотя Гук стал утверждать, что эта задача

им решена, однако ни устного, ни письменного решения ее Гук не представил.

В 1684 г. Галлей при посещении Ньютона в Кембридже обнаружил, что задача полностью решена последним. Итак, первый этап в учении о тяготении был завершен работами Ньютона.

Ньютонова теория всемирного тяготения постепенно вытеснила вихревую теорию тяготения. В основных учебниках физики, наиболее распространенных в Англии, еще излагалось учение Декарта, но с дополнениями, в которых рассматривалась теория Ньютона.

В дальнейшем преимущественное развитие получили проблемы, связанные с применением ньютоновой теории тяготения к астрономии и геодезии. Декартова теория тяготения не могла быть применена в этих случаях, требовавших точных количественных расчетов.

В 1743 г. А. К. Клеро опубликовал книгу<sup>1</sup>, в которой содержатся теоремы, устанавливающие связь между распределением силы тяжести на поверхности Земли и некоторыми параметрами, характеризующими ее форму и угловую скорость ее вращения. Ж. Даламбер обосновал теорию возмущения и дал строгое объяснение теории предварения равноденствия и нутации.

Развитие теоретической астрономии шло по пути, намеченному Ньютоном, и полностью опиралось на его теорию тяготения, но, поскольку сама природа тяготения оставалась загадочной, продолжали существовать скрытые надежды, что проблема тяготения будет когда-либо разрешена в картезианском духе. Во второй половине XVIII в. стало очевидным, что отсутствие конструктивных элементов в декартовой теории тяготения не позволяет с ее помощью получить какие-либо существенные результаты, в то время как конструктивные элементы феноменологической теории Ньютона позволяют решать все более сложные задачи.

В 1745—1746 гг. Л. Эйлер вычислил возмущения Луны и предложил соответствующие лунные таблицы. Клеро и Даламбер опубликовали независимо друг от друга лунные таблицы, которые, как и эйлеровские, не давали точного движения Луны. Эйлер при этом даже обратился к некоторым элементам декартовой теории (сопротивление среды — эфира), но в дальнейшем недостатки лунных таблиц были исправлены на основе ньютоновой теории, ставшей фундаментом теоретической астрономии. Характерно, что при всем этом Эйлер стремился к механическому объяснению сил тяготения.

В 1777 г. Ж. Лагранж ввел понятие потенциала, градиент которого дает силу тяготения. П. Лаплас развил методы небесной механики. Он до-

казал, что закон всемирного тяготения полностью объясняет движение планет, если представить их взаимные возмущения математическими рядами. В 1782 г. он вывел для потенциала дифференциальное уравнение в частных производных  $\Delta\varphi = 0$ . Д. Пуассон видоизменил уравнение Лапласа, придав ему вид  $\Delta\varphi = 4\pi\rho$ . Дифференциальное уравнение Лапласа — Пуассона есть обобщенное выражение ньютоновского закона тяготения. Стремление объяснить тяготение близкодействующими силами временами возобновлялось. Ж. Лесаж выдвинул гипотезу о мельчайших твердых частицах, движущихся с огромными скоростями по всевозможным направлениям. Он полагал, что видимое притяжение материи можно объяснить ударами частиц. В конце XIX в. П. Прево, К. Лерэ и др. пытались без особых успехов развивать и модифицировать гипотезу Лесажа. Многократно обсуждался во второй половине XIX в. вопрос о мгновенном действии гравитации. И. Цельнер полагал, что закон Вебера для потенциала является основным законом для всякого дальнего действия. Ф. Тиссеран рассмотрел возможность использования закона электродинамического взаимодействия Гаусса для случая сил взаимного притяжения масс. Эти и многие другие попытки не привели к существенным результатам в учении о тяготении.

5. Первая и основная работа Эйнштейна по теории относительности «К электродинамике движущихся тел» поступила в редакцию журнала «Annalen der Physik» 30 июня 1905 г. 27 сентября в редакцию того же журнала поступила вторая статья, в которой Эйнштейн впервые сформулировал связь между массой и энергией<sup>2</sup>. Он показал, что уравнения Максвелла вместе с принципом относительности и законом сохранения энергии приводят к соотношению  $E = mc^2$  (в современных обозначениях). Статью Эйнштейн закончил словами: «Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии ... Если теория соответствует фактам, то излучение переносит инерцию между излучающими и поглощающими телами»<sup>1</sup>. В 1906 г. Эйнштейн показал, что необходимо либо отказаться от основного положения механики, «согласно которому первоначально покоящееся тело, не подвергающееся воздействиям внешних сил, не может прийти в состояние поступательного движения, либо принять, что инерция тела зависит указанным образом от содержащейся в нем энергии»<sup>2</sup>. К доказательству соотношения  $E = mc^2$  Эйнштейн вновь обратился в 1935 и 1946 гг. В 1907 г. Эйнштейн отметил два существенных момента в понимании принципа и теории относительности: 1. Принцип относительности вместе с принципом постоянства скорости света следует понимать не как систему, а как некоторый эвристический принцип. Этот

принцип содержит лишь высказывания о твердых телах, часах и световых сигналах. 2. Теория относительности требует существования связей между явлениями, казавшимися независимыми. Именно в силу этого требования она приводит к определенным следствиям. Теория относительности привела указанным путем к пониманию кинематики прямолинейного движения и к выражению для кинетической энергии поступательно движущегося тела, не взаимодействующего с другими телами. Другие проблемы, вызванные его работами по теории относительности, Эйнштейн считал нерешенными. «В теории относительности мы далеко еще не достигли последней цели. Мы знаем только кинематику прямолинейного движения...; в остальном же как динамику, так и кинематику абсолютно твердого тела для рассматриваемого случая следует считать пока неизвестной». Речь шла о поступательном движении деформируемых электронов.

В 1907 г. Эйнштейн доказывает сформулированные им ранее положения об инерции энергии<sup>4</sup>. В том же году он писал, что наличие инертной массы у энергии наводит на мысль о том, *не обладает ли энергия гравитирующей массой*. Эти вопросы обсуждаются в статье, которая представляет собой первую большую по объему работу из цикла, относящегося к теории относительности<sup>8</sup>. Она подразделена на пять частей. В пятой части Эйнштейн ставит вопрос о применимости принципа относительности как требования независимости законов природы от состояния движения системы для систем, движущихся с ускорением друг относительно друга. Рассматриваются две системы отсчета  $X_1$  и  $X_2$  - Первая система движется с постоянным по величине ускорением  $u$  в направлении оси  $x$ , вторая система покоится, находясь в однородном гравитационном поле. Все тела в этом поле ускоряются одинаково, и можно предположить, что физические законы относительно первой системы не отличаются от законов, отнесенных ко второй системе. Предполагая полную равноценность гравитационного поля и соответствующим образом подобранной ускоренной системы отсчета, Эйнштейн сделал решительный шаг к дальнейшему развитию теории. Выдвинутое им предположение имело двойное значение:

1) эвристическое заключалось в том, что можно было заменить однородное поле тяготения равномерно-ускоренной системой отсчета, более доступной теоретическому исследованию;

2) теоретическое — в том, что это был существенный шаг к утверждению принципа эквивалентности как общего физического закона.

Для анализа пространственных и временных особенностей в

равномерно-ускоренной системе и в поле тяготения Эйнштейн обращается к сложному мысленному эксперименту. Он вводит понятия «местного времени» и «времени системы». Соотношения между ними можно получить из формул преобразований Лоренца. В этой же работе рассмотрено влияние гравитационного поля на часы, на электромагнитные процессы и определено влияние гравитационного поля на частоту излучаемого света (без учета эффекта кривизны пространства). Показано, что теорема о соответствии энергии  $E$  массе величины  $E/c^2$  выполняется не только для инертной, но и для тяготеющей массы.

Эйнштейн здесь стремится расширить принцип относительности, распространив его на равномерно-ускоренные движения. Выдвигается идея эквивалентности, но она не носит пока характера общезначимого принципа. Отказ от понятия абсолютной одновременности привел к весьма далеко идущим последствиям. Стало невозможно прямо ввести действие на расстоянии. Возникла необходимость в создании полевой теории тяготения. Поиски полевой теории тяготения в рамках специальной теории относительности были начаты Пуанкаре, но не продолжены им. Для Эйнштейна отказ от абсолютной одновременности — один из отправных пунктов при создании им общей теории относительности. Рассмотренные работы относятся к первому подготовительному периоду в создании общей теории относительности.

Спектральные линии солнечного света должны в силу указанного сместиться в сторону красного конца спектра по сравнению с соответствующими спектральными линиями земных источников.

Значение работ Эйнштейна к этому времени в целом было правильно понято и оценено рядом выдающихся физиков (М. Планк, Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Зоммерфельд, М. Лауэ, А. Эддингтон, М. Борн, Дж. Лармор, П. Дебай, П. Ланжевэн, Т. Леви-Чивита и многие другие), принявших активное участие в развитии специальной теории относительности. Разработке ее отдельных проблем и поискам путей ее расширения посвящены и работы Эйнштейна 1906—1910 гг. В начале 1911 г. в докладе на заседании Общества естествоиспытателей в Цюрихе Эйнштейн вновь обратился к вопросу о «принципе относительности» как к одному из устоев, на котором покоится вся теория. Отныне интересы Эйнштейна на протяжении пяти лет, до завершения им общей теории относительности, были сосредоточены на обобщении теории относительности и теории тяготения.

В 1912 г. Эйнштейн подчеркивал, что следствия из гипотезы о физической эквивалентности ускоренной системы координат полю

тяготения не противоречат теории относительности равномерного движения<sup>1</sup>. Что же касается закона постоянства скорости света, его применимость оказывается ограниченной областями постоянного гравитационного потенциала. Это исключает всеобщую применимость преобразований Лоренца, но уверенность Эйнштейна в эквивалентности поля ускорения и поля тяготения настолько укрепилась к этому времени, что, в отличие от Абрагама, он полагал возможным отказаться от постоянства «с».

«Нам кажется,— пишет Эйнштейн,— что проблему пространства — времени надо ставить следующим образом. Если ограничиться областью постоянного гравитационного потенциала, то законы природы принимают чрезвычайно простую и инвариантную форму по отношению к множеству пространственно-временных систем, связанных друг с другом преобразованиями Лоренца с постоянным «с».

Если же не ограничиваться областями, где «с» постоянна, то множество эквивалентных систем, равно как и множество преобразований, оставляющих законы природы неизменными, станет более обширным; однако законы при этом станут более сложными»<sup>2</sup>.

В 1912 г. Эйнштейн исследует влияние гравитационного поля на электромагнитные и тепловые процессы<sup>3</sup>. В том же году он публикует статью о гравитационном воздействии<sup>4</sup>. Эйнштейн полемизирует с Абрагамом<sup>6</sup>, считавшим, что поле тяжести есть абсолютная система отсчета, что отказ от постоянства скорости света является отказом от теории относительности и что принцип эквивалентности не может служить основой теории. В 1913 г. Эйнштейн публикует совместно с М. Гроссманом большую работу, физическая часть которой принадлежит ему, математическая — Гроссману<sup>в</sup>. В этой работе даны уравнения второго порядка для гравитационного поля, установлена связь гравитационного поля с фундаментальным тензором  $g^{\wedge}$  и приведен тензор кривизны Римана.

В общем случае гравитационное поле характеризуется десятью пространственно-временными функциями. Эйнштейн сформулировал связь гравитационного поля с фундаментальным тензором. В статье поставлена проблема полевых уравнений. Нужно найти уравнение, обобщающее уравнение Пуассона

Эйнштейн руководствуется при отыскании вида уравнения двумя условиями: а) не должны участвовать производные порядка выше, чем 2; б) должен соблюдаться закон сохранения. «Априори,— писал Эйнштейн,— нельзя утверждать, что окончательные точные дифференциальные уравнения гравитации могут быть ковариантными относительно

произвольных преобразований»

В 1913 г. Эйнштейн прочитал доклад на годовом собрании Швейцарского общества естествоиспытателей<sup>2</sup>. Начало доклада посвящено опытам Л. Этвеша. Два совершенно различных по определению понятия — инертное сопротивление тела и постоянная, определяющая воздействие поля тяжести на тело, обозначены словом «масса». Обе массы, инертная и тяжелая, оказываются в точности равными по своей величине. Равенство этих масс доказано опытами Этвеша. На всякое тело, находящееся на поверхности Земли, действуют две различно направленные силы. Одна из сил — собственно тяжесть—зависит от тяжелой массы. Другая сила—центробежная—зависит от инертной массы. Результирующая этих двух сил и представляет собой наблюдаемую тяжесть тела. Пропорциональность инертной и гравитационной масс впервые установлена Ньютоном. Он произвел опыт, показавший, что разные тела падают с одинаковой скоростью в трубе, из которой откачан воздух. Значительно точнее его опыт над маятниками. Опыты Ньютона были возобновлены с большей для того времени точностью Ф. В. Бесселем. Опыты Ньютона показали, что отношение разности количества масс для тел одинакового веса. Опыты Бесселя довели чувствительность Этвеша, применив крутильные весы, усилил чувствительность опытов и получил ее. Опыты Этвеша составили основную базу для утверждения об эквивалентности инертной и тяготеющей масс. Опытный факт, установленный Этвешем, формулируют так: «все тела в поле тяжести падают с одинаковым ускорением».

«Тем самым,— пишет Эйнштейн,— подсказывается предположение о том, что в отношении действия на механические и другие физические явления поле тяжести можно заменить ускоренным состоянием тела отсчета (системы координат)» \*. Эта концепция эквивалентности не есть прямое и необходимое следствие опытов Этвеша. Эйнштейн выдвигает на первый план ее эвристическую ценность. Поскольку ход многих событий, происходящих в ускоренной системе отсчета, теоретически определим, гипотеза эквивалентности позволяет предсказывать также влияние гравитационного поля на физические процессы. Допустив принцип эквивалентности, можно доказать, что физические процессы в системе протекают тем быстрее, чем больше гравитационный потенциал области, где находится система. Этот вопрос затронут Эйнштейном уже в 1907 г.: спектральные линии солнечного света должны испытать сдвиг в сторону красного конца спектра по сравнению с соответствующими линиями земных источников. Экспериментальная проверка следствий, вытекающих



из принципа эквивалентности, должна служить основанием для признания принципа эквивалентности, не являющегося необходимым следствием опытов Этвеша.

Гипотеза эквивалентности приводит также к следствию об искривлении световых лучей в поле тяготения. Для луча, проходящего мимо краев Солнца, это искривление лучей может служить дополнительным подтверждением гипотезы эквивалентности. Оно служит исходным пунктом для более общей концепции пространства — времени.

«Искривление световых лучей означает, что скорость света не постоянна, но зависит от места. Поэтому становится необходимым обобщить теорию пространства и времени, известную под названием теории относительности, поскольку последняя основана на постулате о постоянстве скорости света»<sup>2</sup>. В работе 1913 г.<sup>3</sup> Эйнштейн указал на четыре общих постулата, которые можно принять (но не обязательно все) в теории гравитации:

«1. Выполнение законов сохранения импульса и энергии. 2. Равенство инертной и тяжелой масс замкнутых систем. 3. Справедливость теории относительности (в более узком смысле), т. е. системы уравнений должны быть ковариантны относительно линейных ортогональных подстановок (обобщение преобразования Лоренца). 4. Наблюдаемые законы природы не должны зависеть от абсолютных значений гравитационного потенциала (или гравитационных потенциалов)...»<sup>4</sup>. Эйнштейн сформулировал различия между теориями, в которых потенциал поля считается скаляром, и теориями, в которых гравитационное поле является тензором. «Соответствует ли природе первый или второй путь, должно решить исследование снимков звезд, появляющихся рядом с Солнцем во время полных солнечных затмений»<sup>1</sup>. Заметим, что все же очень сложно проследить ход мысли Эйнштейна в период, предшествующий окончательной формулировке уравнений общей теории относительности. Уравнения, установленные Эйнштейном, — это уравнения для поля метрического тензора.

В 1915 г. впервые появилось правильное уравнение тяготения<sup>2</sup>. Обычно уравнения Эйнштейна записывают в виде

Эти уравнения описывают поведение гравитационного поля. Тензор источник поля. Эти уравнения Гильберт получил несколько ранее на основе теории Ми. В статье 1916 г. Эйнштейн подробно изложил ранее развитые им идеи<sup>3</sup>. М. Лауэ следующим образом характеризовал работы Эйнштейна 1915—1916 гг.: «Достигнутая после тяжелой борьбы конечная цель состояла в уравнениях поля тяготения Эйнштейна. Это — 10

дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка для 10 составляющих тензора  $g_{il}$ , связывающих их с 10 составляющими тензора энергии-импульса вещества и в этом смысле аналогичных дифференциальному уравнению Пуассона для ньютонова потенциала, которое позволяет вывести его из масс. Эти уравнения содержат в себе также и всю динамику, так как здесь тяготение и инерция тождественны. Между прочим, из них вытекает чисто математическим путем, что мировая линия свободного, т. е. свободно падающего, тела, представляет геодезическую линию и, как таковая, не зависит от свойств падающего тела. Здесь содержится, например, также и теория движения планет»<sup>4</sup>.

В 1916 г. К. Шварцшильд рассмотрел случай статического сферически-симметричного метрического поля при правой части уравнения, равной нулю всюду, кроме одной точки — начала координат<sup>6</sup>.

В 1917 г. Д. Гильберт доказал, что такое пространство соответствует наиболее общему центрально-симметричному распределению масс. Э. Кот-тлер в 1918 г. предложил пространство, являющееся обобщением решения Шварцшильда<sup>6</sup>.

Т. Леви-Чивита в 1918 г., Г. Вейль в 1919 г.<sup>1</sup> нашли и исследовали статическое решение, обладающее только осевой симметрией. В дальнейшем в 1922 г. П. Бах<sup>2</sup> сделал одну из первых попыток найти приближенные решения уравнения поля. Приближенные методы были развиты в работах А. Эйнштейна, Л. Инфельда, В. А. Фока.

С 1911 г. наряду с Эйнштейном, но с иных позиций теорию гравитации разрабатывали М. Абрагам, Г. Нордстрем, Г. Ми. М. Борн и А. Фоккер и др. в наиболее распространенных журналах того времени знакомили физиков с новейшими результатами. В 1917—1918 гг. работы Т. Леви-Чивиты, Г. Вейля, М. Лауэ, Ф. Клейна и др. были посвящены вопросам теории. В дальнейшем появились работы Е. Рейхенбехера, Л. Зильберштейна, К. Ланчоса, Э. Картана и др. В 1922 г. появилась работа А. А. Фридмана, наметившая коренной перелом в релятивистской космологии. Значительный интерес представляют работы А. З. Петрова, посвященные различным вопросам теории гравитации (классификация полей тяготения, пространства Эйнштейна).

6. Обратимся теперь к *экспериментальным основам общей теории относительности*.

**Гравитационное смещение.** В 1907 г. Эйнштейн предсказал существование гравитационного смещения частоты<sup>3</sup>. Обоснованием гравитационного смещения служит принцип эквивалентности. Эйнштейн ввел понятие «местное время». Это — время,

которое показывают часы, установленные в ускоренной системе на расстоянии  $x$  от начала координат системы. Путем сложных рассуждений Эйнштейн пришел к формуле

где  $t$  — промежуток времени по часам, установленным в начале координат. Эту формулу в силу принципа эквивалентности можно отнести и к однородному гравитационному полю

В 1911 г. Эйнштейн дал обоснование гравитационного смещения с помощью доплер-эффекта <sup>4</sup>. Он рассматривает равномерно-ускоренную систему отсчета в отсутствии гравитации. В момент испускания света относительная скорость источника и приемника равна нулю. За время  $t = lie$ , в течение которого свет преодолевает расстояние между источником и приемником,

скорость приемника изменится на величину  $v_0 = g \cdot t$ . Наличие относительной

скорости между приемником и источником приводит к возникновению доплер-эффекта. Опираясь на принцип эквивалентности, можно утверждать, что такое же соотношение между частотами должно иметь место и в однородном гравитационном поле:

В работе «Основы общей теории относительности» анализируются свойства масштабов и часов в статическом гравитационном поле и указывается, что «часы идут медленнее, если они установлены вблизи весомых масс. Отсюда следует, что спектральные линии света, попадающего к нам с поверхности больших звезд, должны сместиться к красному концу спектра» \*. В примечании Эйнштейн отмечает, что, согласно Э. Фрейндлиху, спектральные наблюдения над звездами определенных типов говорят в пользу существования подобного смещения. Однако окончательной проверки предпринято не было. В 1920 г. в приложении к книге «О специальной и общей теории относительности» <sup>2</sup> Эйнштейн приводит формулу для смещения и отмечает, что надежные расчеты для неподвижных звезд невозможны, поскольку ни масса  $M$ , ни радиус  $r$  неизвестны. «Вопрос о том, существует ли этот эффект, остается открытым; в настоящее время астрономы с большим упорством работают над его решением. Вследствие того, что этот эффект в случае Солнца весьма мал, трудно судить о его существовании» <sup>3</sup>. Эйнштейн указывает на исследования Л. Греббе и Бахем, которые на основе собственных измерений и измерений И. Эвершеде и К.Шварцшильда для полос циана считали эффект гравитационного смещения существующим, а также на исследования Ч. Сент-Джона и др., отрицавших существование эффекта. В 1964 г. О. А. Мельников получил хорошее согласие между наблюдаемыми

сдвигами в центральной части солнечного диска и теорией <sup>4</sup>. После открытия в 1958г. эффекта Мессбауера возникли новые методы проверки гравитационного смещения. При некоторых условиях удалось добиться того, что излучаемый гамма-квант передает импульс всему кристаллу в целом, а не одному излучающему ядру. Это сводит потери энергии до исчезающе малой величины. Линии поглощения и испускания почти совпадают и возникает резонансный эффект. Ширина линий настолько сужается, что при относительной скорости в несколько сантиметров в секунду это приводит к исчезновению резонанса. Эффект Мессбауера был использован для экспериментальной проверки гравитационного смещения. Проведение экспериментов было начато одновременно в Гарварде Р. В. Паундом и Г. А. Ребка и в Гарвелле Т. Е. Крэншоу и др. Гарвелльская группа опубликовала результаты несколько раньше. Теоретически ожидаемое относительное гравитационное смещение равнялось

Эксперименты приводят к значениям, близким к теоретически вычисленным .

**Перигелий Меркурия** . Меркурий — ближайшая к Солнцу планета. Орбитальное движение планеты можно рассматривать как кеплеров-ское эллиптическое движение. Под влиянием других планет «элементы орбиты» (ориентация орбитальной плоскости, направление главных осей эллипса, их эксцентриситет и т. д.) подвержены изменениям. Точка орбиты, ближайшая к Солнцу,— перигелия — обнаруживает небольшое движение вокруг Солнца. Смещение перигелия Меркурия происходит под влиянием многих причин. Многочисленные исследования У. Ж.-Ж. Леверрье позволили установить не совсем полное совпадение между теоретическими вычислениями на основе ньютоновской механики и наблюдаемыми положениями планеты. Согласно теории, долгота перигелия (т. е. угол между направлением к точке весеннего равноденствия и к перигелию) Меркурия должна возрасть за 100 лет на 527", но с большой точностью выполненные наблюдения дали 565". Согласно теории тяготения Эйнштейна, перигелий продвигается при каждом обороте на величину

Считают, что смещение перигелия находится в хорошем согласии с предсказаниями общей теории относительности. В 1953 г. Дж. Гильварри рассмотрел вопрос о возможности подтверждения релятивистского смещения перигелиев планетных орбит из наблюдений над малыми планетами с большими эксцентриситетами. В частности, рассмотрена планета 1566 Икар, имеющая наибольший эксцентриситет.

**Отклонение лучей света в полете жести Солнца**. В 1907 г. в работе «О принципе относительности и его следствиях» Эйнштейн

рассмотрел вопрос о влиянии тяготения на электромагнитные и оптические процессы. Он пришел к выводу, что влияние поля тяготения Земли так незначительно, что отсутствуют перспективы на сравнение результатов теории с опытом. В этих расчетах отклонения луча света не учитывается эффект кривизны пространства. В 1911 г. Эйнштейн вновь обратился к указанному вопросу<sup>1</sup>. Лучи, проходящие вблизи Солнца, должны испытывать под влиянием его поля тяготения отклонение. В результате отклонения должно иметь место кажущееся увеличение углового расстояния между Солнцем и оказавшейся вблизи него звездой. Эйнштейн писал: «Было бы крайне желательно, чтобы астрономы заинтересовались поставленным здесь вопросом даже и в том случае, если бы предыдущие рассуждения казались недостаточно обоснованными или фантастическими»<sup>2</sup>.

В работе «Основы общей теории относительности», в отличие от рассмотренных работ, Эйнштейн пришел к правильному результату, так как учитывал кривизну пространства. Отклонения видимых положений неподвижных звезд, расположенных «недалеко» от Солнца, наблюдают в течение полных солнечных затмений. Во всякое другое время ярко светящееся Солнце не позволяет наблюдать ближайšie к нему звезды. Звезды, которые находятся вблизи Солнца, фотографируют во время солнечного затмения и сравнивают с их же фотографией, когда Солнце находится в другой части неба. Положения звезд на фотографии, сделанной во время затмения, должны быть смещенными в радиальном направлении. Попытки проверить смещения положения звезд во время полных солнечных затмений начались в 1907 г., а в 1914 г. была снаряжена специальная экспедиция в Крым для проверки формулы Эйнштейна в ее первоначальном виде. Война помешала провести необходимые наблюдения. Не удалась и попытка, предпринятая Ликской обсерваторией во время затмения 1918 г. Надежные фотографические снимки были получены лишь во время затмения 29 мая 1919 г. Были снаряжены две экспедиции. Первая экспедиция работала в местечке Собраль в северной Бразилии, вторая — на острове Принсипе у берегов Африки. Солнце в это время проектировалось на область в созвездии Тельца, богатую яркими звездами. Возникающие при этом трудности подробно описаны А. А. Михайловым. Наблюдения можно производить только фотографически с помощью длиннофокусной камеры — астрографа. При фокусном расстоянии объектива в 6 м, 1",75 на пластинке соответствует линейная длина в 0,051 мм. Это — смещение звезды, находящейся на самом краю Солнца, но ее нельзя наблюдать, так как свет ее утонет в ярких частях внутренней короны Солнца.

С. И. Вавилов классифицировал возможные сомнения по вопросу об

отклонении лучей следующим образом: «1. Объективно ли найденное смещение и не вызывается ли оно какими-либо недостатками в измерительных приборах? 2. Если отклонения объективны, то не связаны ли они с другими причинами, не имеющими ничего общего с эффектом Эйнштейна? 3. Если отклонения объективны и вызываются полем тяготения Солнца, то достаточно ли установлена количественная сторона явления, т. е. имеем ли мы дело с полным эйнштейновским эффектом или только половинным»<sup>1</sup>.

В Собрале было получено семь фотографий звезд, находящихся вблизи Солнца. На каждой из фотографий точно определено положение семи звезд. Две из этих звезд были на расстоянии двух солнечных радиусов от центра Солнца. В сентябре 1922 г. экспедицией в Австралии достигнуты лучшие результаты. Кроме упомянутых затмений 1919 и 1922 гг., при затмениях 1929, 1936, 1947 и 1952 гг. также проверяли эффект Эйнштейна. Все наблюдения обнаружили наличие смещений изображений звезд в сторону, требуемую теорией относительности; величина отклонения имеет тот же порядок, к какому приводят теоретические расчеты. В 1962 г. было предложено использовать искусственные спутники небесных тел для экспериментального наблюдения отклонения луча света при распространении в гравитационном поле. Спутники должны двигаться по строго определенным орбитам и снабжены источниками электромагнитного излучения.

**Г р а в и т а ц и о н н ы е в о л н ы .** По вопросу о *гравитационных волнах* и их характере не существует единства мнений. Гравитационные волны можно характеризовать как слабое нестационарное гравитационное поле в вакууме. Они могут уподобляться электромагнитным в том смысле, что они поперечны и в вакууме распространяются со скоростью света. Понятие о гравитационных волнах было впервые введено Эйнштейном. Математически задача сводилась к нахождению периодических во времени и пространстве точных или приближенных решений уравнения тяготения Эйнштейна. Дж. Вебер полагает, что проблема гравитационных волн является одной из основных в общей теории относительности. Л. Инфельд фактически отрицает существование гравитационных волн, несущих энергию. Он полагает, что вряд ли можно приписывать какой-либо физический смысл потоку тензора энергии-импульса, определяемому с помощью псевдотензора энергии-импульса. В 1959 г. Вебер подробно проанализировал возможность осуществления гравитационного излучения, используя при этом механические колебания протяженных масс. В последнее время Вебер и его сотрудники исследуют возможности

обнаружить гравитационное излучение веземного происхождения. Значительный интерес представляют работы В. Б. Брагинского об экспериментальном исследовании гравитационного излучения.

С опубликованием в 1927 г. совместной работы А. Эйнштейна и Я. Гром-мера <sup>x</sup> начинается история проблемы движения в общей теории относительности. Рассматривая теорию гравитации Ньютона как теорию поля, ее можно разбить на две логически независимые части: «во-первых, на уравнение Пуассона для поля... и, во-вторых, на закон движения материальной точки»<sup>2</sup>. Электродинамика Максвелла — Лоренца также базируется на двух логически независимых положениях: «во-первых, на уравнениях поля Максвелла — Лоренца, определяющих поле по движению электрически заряженной материи, и, во-вторых, на законе движения электрона под действием силы Лоренца со стороны электромагнитного поля»<sup>3</sup>. Эйнштейн и Громмер показали, что нет необходимости к уравнениям поля добавлять уравнения движения для пробной частицы с массой нуль. Уравнения движения частицы могут быть выведены из релятивистских уравнений поля. В работах А. Эйнштейна, Л. Инфельда и К. Д. Гофмана (1938—1940) задача была обобщена. В 1939 г. В. А. Фок независимо вывел ньютоновские уравнения движения из уравнений движения и уравнений поля. Метод Фока был развит А. Папапетру и Н. М. Петровой. Основное различие методов, согласно Инфельду, состоит в использовании в методе Фока гармонической системы координат. В дальнейшем эти вопросы разрабатывались Л. Инфельдом, Г. Плебанским и 'Б; Бертогги, А. Траутманом, В. П. Кашкаровым и др.

7. Рассмотрим теперь некоторые космологические вопросы.<sup>1</sup> В 1917 г. А. Эйнштейн обобщил уравнения тяготения Эйнштейн нашел решение этих уравнений, описывающих модель статически однородной Вселенной, обладающей замкнутым пространством. В том же году де-Ситтер нашел решение уравнений Эйнштейна, соответствующее статической модели пустого мира. В 1922—1924 гг. А. А. Фридман предложил модель нестационарной Вселенной. Современная релятивистская космология во многом опирается на работы Фридмана. Теория однородной изотропной Вселенной вслед за Фридманом развивалась многими учеными. Учитывая, что кривизна пространства может быть положительной, нулевой и отрицательной и что космологический член может также принимать такие значения, легко понять разнообразие в наборе возможных решений космологической проблемы. Многочисленные затруднения теории однородной изотропной Вселенной, основанной на теории тяготения Эйнштейна, вызвали появление теорий Эддингтона,

Дирака, Иордана, в которых теория тяготения Эйнштейна дополняется или обобщается, и теорий Бонди — Гол-да, Милна и др., которые отходят от теории тяготения Эйнштейна при решении космологических вопросов. Число работ, посвященных детальному анализу теории однородных изотропных моделей и теории анизотропной неоднородной Вселенной, весьма значительно.

П р и н ц и п Э. Маха. Причины, из-за которых Ньютон полагал различными между собой «абсолютные» и относительные движения,— это центробежные силы, направленные от оси движения. Силы эти проявляются в большей или меньшей мере в зависимости от величины «абсолютного» движения, но независимы от относительного движения. Для подтверждения своей концепции Ньютон прибегал к помощи эксперимента. Цель эксперимента — выяснение характера вращения.

Из приведенного им эксперимента над вращающимся цилиндром, наполненным водой, Ньютон заключил, что вода не обнаруживала стремления удалиться от оси вначале, при ее наибольшем относительном движении.

При уменьшении относительного движения воды заметно стремление удалиться от оси. Относительное вращение стенок сосуда по отношению к воде не сопровождается никакими силами, действующими на воду. В том случае, когда сама вода принимает участие во вращении, центробежные силы становятся заметными. Ньютон полагал, что факт существования центробежных сил является аргументом в пользу абсолютного движения. В работе «De Mo-tu» (1721) Дж. Беркли удалось указать на одно слабое звено в трактовке ньютоновского эксперимента с вращающимся ведром. Решающим в доказательстве Ньютона было предположение, что тот же результат должен быть получен и в пустом пространстве. В действительности ведро было вращающимся, а затем покоящимся относительно Земли. Р. Дикки ошибочно полагал, что у Беркли мы видим предвосхищение идеи относительности. В новое время Э. Мах подверг критике ряд положений Ньютона \*, особенно те из них, в которых Ньютон основывается на различии относительного и абсолютного движения.

Мах отмечал, что из утверждения об изменении телом /£ своего направления и скорости только под действием другого тела  $K'$  мы не можем получить такой вывод, если нет налицо других тел  $A, B, C$ , относительно которых мы определяем движение тела.

Мах допускает, что движение определено средой, в которой находится тело  $K$ , но у него среда эта играет не кинематическую, а



динамическую роль; здесь Мах сближается с Эйнштейном лишь в критической оценке механики Ньютона.

«Принцип Маха» выражен в его книге «Механика» в весьма условной форме.

Б. и И. Фридлиндеры предложили опыт для доказательства относительности вращательного движения. Крутильные весы располагают на не слишком далеком расстоянии от большого махового колеса. Это — модификация опыта Ньютона. Крутильные весы занимают в нем место воды, но, в отличие от воды, они отмечают весьма малые силы. Масса махового колеса заменяет массу сосуда. Опыты такого рода, разумеется, явно недостаточны ввиду малой массы махового колеса.

В 1913 г. Эйнштейн писал Маху: «Глубокоуважаемый Коллега! Вероятно, Вы недавно получили мою новую работу об относительности и гравитации, которую я, наконец, закончил после бесконечных усилий и мучительных сомнений. В будущем году во время солнечного затмения будет проверено, изгибаются ли световые лучи Солнцем, или, другими словами, верно ли основное и фундаментальное предположение об эквивалентности ускоренной системы и гравитационного поля. Если это так, то Ваши вдохновляющие исследования об основах механики — вопреки несправедливой критике Планка — получают блестящее подтверждение. Тогда неизбежным следствием будет то, что инерция проявляется как своего рода взаимодействие тел, вполне в духе Вашей критики ньютоновского эксперимента с вращающимся сосудом. Первое следствие в этом смысле Вы найдете на стр. 6 этой работы. Дальше оказалось:

1. Если ускорить массивную сферическую оболочку  $S$ , то, согласно теории, заключенное внутри тело должно испытать ускоряющую силу.

2. Если вращать оболочку  $S$  вокруг оси, проходящей через ее центр (вращать относительно неподвижных звезд, т. е. «неподвижной системы»), то внутри оболочки возникает кориолисово поле, т. е. происходит увлечение плоскости маятника Фуко (конечно, с практически неизмеримо малой скоростью...)»<sup>x</sup>.

Г. Хенль указал, что следствие, согласно которому масса пробного тела должна возрасть при приближении тела к скоплению больших масс, и следствие, состоящее в утверждении, что ускорение большой массы влечет за собой одинаково направленное ускорение находящегося вблизи пробного тела, ведущие к принципу Маха, получены не самим Махом. Третье следствие — частичное увлечение инерциальной системы вращающимися массами — имеется в качестве намеков в критике Махом

опытов с вращающимся сосудом.

В 1914 г. Эйнштейн обратился к вопросу об эквивалентности вращающихся координатных систем <sup>2</sup>. Кинематическая эквивалентность двух систем координат не ограничена случаем, когда системы движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Она имеет место и в том случае, когда одна система  $K'$  равномерно вращается относительно другой системы  $K$ . ( $K$ —система, координат в смысле Галилея — Ньютона.) По-видимому, эта кинематическая эквивалентность приводит к необходимости такого обобщения теории относительности, которое позволяло бы исключить существующее предпочтение равномерных и прямолинейных движений перед относительными движениями других видов.

На первый взгляд может казаться, что системы  $K$  и  $K'$  физически не равноценны. На массы, покоящиеся в системе  $K'$ , действуют центробежные силы, не действующие на массы, покоящиеся в системе  $K$ .

В пользу трактовки систем  $K$  и  $K'$ , как эквивалентных, Эйнштейн приводит существенно важную аргументацию, имеющую аналог в специальной теории относительности. Пондеромоторная сила, действующая на электрическую массу, движущуюся в магнитном поле, истолковывается как действие электрического поля, которое присутствует в месте расположения заряда. В данном случае мы не имеем возможности отличить «поле центробежных сил» от поля тяжести.

«Таким образом,— пишет Эйнштейн,— то, что мы измеряем как вес некоторого тела на поверхности Земли, на самом деле представляет собою результат совместного действия полей обоих названных типов, которые мы не можем разделить. Отсюда следует, что мы имеем все основания рассматривать вращающуюся систему  $K'$  как покоящуюся и интерпретировать поле центробежных сил как некоторое гравитационное поле» <sup>3</sup>.

В 1914 г. Эйнштейн рассматривал главным образом теоретико-познавательное значение расширенного принципа относительности, распространенного на равномерно-вращательное движение. Количественно такая задача

еще не была решена. Для решения задачи о вращающихся массах существенную роль сыграла работа Эйнштейна 1916 г., посвященная приближенному интегрированию уравнений поля. На ее основе проведены исследования Г. Тирринга.

В 1922 г. Эйнштейн опять обращается к принципу Маха <sup>1</sup>. Ф. Селети обсудил вопрос о возможности бесконечной Вселенной, в которой не имеет

места парадокс Г. Зеелигера. В этой модели Вселенной нет бесконечно больших градиентов потенциалов, а средние скорости звезд малы. Галактики образуют системы. На каждой следующей ступени системы предыдущей входят как составные<sup>1</sup> части.

Возражая против взглядов Селети, Эйнштейн указывает, что в «молекулярно-иерархическом мире», так же, как и в «островном мире», не выполняется постулат Маха.

В 1923 г. Эйнштейн указывает, что уже Ньютон осознал неудовлетворительность закона инерции в силу того, что в нем нет указания на реальную причину физического выделения состояний движения инерциальных систем по сравнению со всеми другими состояниями движения<sup>2</sup>. «В то время как за гравитационные свойства материальной точки ответственными считаются наблюдаемые материальные тела, для инерционных свойств материальной точки указывается не какая-либо материальная причина, а фиктивная (абсолютное пространство, или инерциальный эфир). Это хотя и не является логически недопустимым, но оставляет чувство неудовлетворенности. По этой причине Э. Мах требовал видоизменения закона инерции в том смысле, что инерцию следовало бы понимать как сопротивление тел ускорению по отношению друг с другом, а не по отношению к «пространству». При таком понимании следует ожидать, что ускоренные тела одинаково ускоряюще действуют на другие тела (ускорительная индукция)»<sup>3</sup>.

Общая теория относительности, устраняющая разграничение между эффектами тяготения и инерции, казалось, еще более подкрепляет требования материальной причины инерции. «В пользу требования Маха,— пишет далее Эйнштейн,<sup>4</sup>— говорит еще и то, что, согласно уравнениям поля тяготения, ускорительная индукция действительно существует, хотя и является столь слабым эффектом, что возможность ее прямого обнаружения с помощью механических опытов исключена»<sup>4</sup>. В этой работе Эйнштейн одновременно вносит и критический момент в отношении принципа Маха. Для выполнения постулата Маха в уравнения поля приходится вводить член, не основанный на опытных данных и не обусловленный логически остальными членами уравнений. В 1924 г. Эйнштейн высказался более категорически в отношении Маха. «Мы видим,— пишет Эйнштейн,— что для Ньютона «пространство» было чем-то физически реальным. Это ясно понимал Мах, который первым после Ньютона подверг глубокому анализу основания механики. Он пытался избежать гипотезы об «эфире механики», сводя инерцию к непосредственному взаимодействию рассматриваемой массы со всеми остальными массами Вселенной. Хотя эта идея логически и

возможна, но в наши дни она как теория взаимодействия уже не может рассматриваться всерьез. Механический эфир,

названный Ньютоном абсолютным пространством, должен оставаться для нас физически реальным»<sup>1</sup>.

Критическое отношение к принципу Маха усилилось после 1924 г. На протяжении многих лет Эйнштейн не подвергал его дальнейшему специальному анализу, но указывал, что применение принципа Маха не вяжется с духом теории поля.

Как отметил А. З. Петров, основные тенденции развития общей теории относительности можно выразить следующим образом:

1) Тщательный анализ основ теории тяготения как дедуктивной теории, исследование ее логического скелета, переоценка основных посылок теории;

2) стремление поставить теорию на более прочную экспериментальную базу;

3) постановка конкретных задач современной теории гравитации, допускающих экспериментальную проверку и, в связи с этим, как необходимое условие, тщательное определение основных физических понятий и величин в той теории и физическое осмысливание того математического аппарата, который применяется при решении той или иной конкретной физической проблемы»<sup>2</sup>.

## Библиографический список

1 H. Poincare. L'etat actuel et l'avenir de la physique mathematique.— Bull. sci. math., 1914, p. 23.

2. Дж. Максвелл. Эфир.— В сб.: Дж. Максвелл. Речи и статьи. М.— Л., Гостехиздат, 1940, стр. 202.

3. C. V. Burton. The Sun's motion with respect to the ether.— Philos. Mag., 1910, v. 19, p. 417—423.

4. A. Michelson. The relative motion of the earth and the luminiferous ether.— Amer. J. Sci., 1881, v. 22, p. 120—129; A. Michelson, E. W. Morley. Amer. J. Sci., 1887, v. 34, p. 333—345.

F. T. Trouton, H. R. Noble. The forces acting on a charged condenser through space.— Proc. Roy. Soc, 1903, v. 72, N 479, p. 132—133.

5. С. И. Вавилов. Экспериментальные основания теории относительности. Л., Госиздат, 1928. См. также Собрание сочинений, т. IV. М., Изд-во АН СССР, стр. 9—111.

6. D. C. Miller. Ether-drift experiments at Mount Wilson.— Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1925, v. 11, p. 307. Русск. перев.: Экспериментальные наблюдения эфирного ветра на обсерватории в Маунт Вильсон.— УФН, 1925, т. 5, стр. 177.

7. С. И. Вавилов. Экспериментальные основания теории относительности.

8. G. Miller. On the possibility of terrestrial tests of the general theory of relativity.— Nuovocimento, suppl., 1957, v. 6, p. 381—398.

9. T. P. Caderholm, G. F. Bland, B. L. Havens, C. H. Townes. New experimental test of special relativity.— Phys. Letters, 1958, v. 1, p. 342—343; T. S. Taseja, A. Tavan, T. Nurray, C. H. Townes. Test of special relativity or of the isotropy of space by use of infrared masers.— Phys. Rev., 1964, v. 133, p. 1221—1225.

10. A. Fresnel. Une lettre a Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phe-nomenes optiques.— Ann. chim. et phys., 1918, v. 9, p. 57.

11. H. Fizeau. Sur les hypotheses relatives a l'ether lumineux et sur un experiment qui parait demontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumiere se propage dans leur interieur.— Ann. chim. et phys., 1859, v. 57, p. 385—404.

12. P. Zeemann. Le coefficient d'entrainement de Fresnel pour diverses couleurs.— Amsterdam Akad. Versl., 1914, v. 23, p. 245; 1915, v. 24, p. 18; Arch, neerl., 1927, v. 10, p. 131—150.

13. D. F. Comstock. A neglected type of relativity.— Phys. Rev., 1910, v.

30, p. 267; R. Tolman. The second postulate of relativity.— *Phys. Rev.*, 1910, v. 30, p. 291; W. Ritz. Recherches sur l'électrodynamique générale.— *Phys. Rev.*, 1910, v. 31, p. 26—40; *Ann. chim. et phys.*, 1908, v. 13, p. 145—275. См. также *Ges. Werke*. Paris, 1911, p. 315—461.

14. W. de-Sitter. Ueber die Genauigkeit innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann,— *Phys. Z.*, 1919, Rd. 14, S. 1267—1268.

15. См. А. М. Бонч-Бруевич, Б. А. Молчанов. Новый оптический релятивистский опыт.— *Опт. и спектр.*, 1956, т. 1, стр. 113—124.

16. H. A. Lorentz. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light.— *Proc. Roy. Acad., Amsterdam*, 1904, v. 6, p. 809; 1904, v. 12, p. 986. Русск. перев.: Г. Лоренц. Электромагнитные явления в системе, движущейся с произвольной скоростью, меньшей скорости света.— В кн.: *Принцип относительности. Сб. работ классиков релятивизма*. Л., 1935, стр. 9—15.

A. Einstein. Zur Elektrodynamik der bewegten Körper.— *Ann. Phys.*, 1905, Bd. 17, p. 891—921. Русск. перев.: А. Эйнштейн. К электродинамике движущихся тел.— *Собр. научн. трудов*, т. I. М., «Наука», 1965, стр. 7—36.

17. H. A. Lorentz. Electromagnetic phenomena in a system... (См. стр. 349).

18. H. Poincaré. Sur la dynamique de l'électron.— *C. r. Acad. sci.*, 1905, v. 140, p. 1504—1508.

19. W. Voigt. Ueber das Dopplersche Prinzip.— *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, 1887, S. 41 —51; *Phys. Z.*, 1915, Bd. 2, N 16, S. 381—386.

20. A. Einstein. Über die von Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie.— *Ann. Phys.*, 1907, Bd. 23, S. 371—384. Русск. перев.: А. Эйнштейн. Об инерции энергии, требуемой принципом относительности.— *Собр. научн. трудов*, т. I, стр. 53—64.

21. A. Einstein. Zur Elektrodynamik der bewegten Körper.— *Ann. Phys.*, 1905, Bd. 17, S. 891—921. Русск. перев.: А. Эйнштейн. К электродинамике движущихся тел.— *Собр. научн. трудов*, т. I, стр. 7—36.

22. C. N. Lewis., R. Tolman. The principle of relativity and non-Newtonian mechanics.— *Philos. Mag.*, 1909, v. 18, p. 510—523; P. Epstein. Ueber relativistische Statik.— *Ann. Phys.*, 1911, Bd. 36, p. 779—795.

23. H. E. Ives, G. R. Stilwell. Experimental study of the rate of a moving atomic clock.— *J. Opt. Soc. America*, 1938, v. 28, p. 215; 1941, v. 31, p. 369-374.

24. H. Arzelies. *La cinématique relativiste*, 1955, p. 149—150. *La dynamique relativiste et ses applications*, 1958, p. 434—436.

25. Henri Bergson. Duree et simultanite, 1922. Русск. перев.: Анри Бергсон. Длительности и одновременность (по поводу теории Эйнштейна). Пг., Academia, 1923.
26. A. Einstein. Eine Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie.— Naturwissenschaften, 1918, Bd. 6, N 48, S. 697—702. Русск. перев.: А. Эйнштейн. Диалог по поводу возражений против теории относительности.— Собр. научн. трудов, т. I, стр. 616—625.
27. K. Tolman. Relativity, thermodynamic, cosmology. Oxford, 1934, p. 194—195.
28. C. V. Laffert, P. V. Donatue. Clock paradox and the physics of discontinuous gravitational fields.— Amer. J. Phys., 1958, v. 26, p. 515—523.
29. C Moller. The theory of relativity. Oxford, 1962, p. 258.
30. П. В. Иаунд. Овеселфотонув.— УФН, 1960, № 4, стр. 673—683.
31. C. W. Sherwin. Some recent experimental tests of the «Clock Paradox».— Phys. Rev., 1960, v. 120, N 1, p. 17—21.
32. H. T. Hay, T. P. Schiffer, T. E. Kranshaw, P. A. Egelstaff. Measurement of the red shift in an accelerated system using the Mossbauer effect in Fe<sup>67</sup>.— Phys. Rev., Letters, 1960, v. 4, N 4, p. 165—166.
33. W. Kiindig. Measurement of the transverse Doppler effect in an accelerated system. Phys. Rev., 1963, v. 129, N 6, p. 2371—2375.
34. H. Minkowski. Das Relativitätsprinzip.— Ann. Phys., 1915, Bd. 47, S. 927—938. Русск. перев.: Г. Минковский. Принцип относительности. М.— Л., ОНТИ, 1935.
35. A. Einstein. Ueber eine Methode zur Bestimmung der Verhältnisse der Transversal- und Longitudinalmasse des Elektrons.— Ann. Phys., 1906, Bd. 21, S. 583—586. Русск. перев.: А. Эйнштейн. О методе определения соотношения между поперечной и продольной массами электрона.— Собр. научн. трудов, т. I, стр. 45—48.
36. W. Kaufmann. Ueber die Konstitution des Elektrons.— Ann. Phys., 1906, Bd. 19, S. 487—553; 1906, Bd. 20, S. 639—640.<sup>3</sup> A. Bucherer. Bestätigung des Relativitätsprinzips.— Verhandl. Dtsch. phys. Ges., 1908, Bd. 6, p. 688; Phys. Z., 1908, Bd. 9, p. 755; Ann. Phys., 1909, Bd. 28, S. 513; 1909, Bd. 29, S. 1063.
37. E. Hupka. Beiträge zur Kenntnis der träge Masse bewegter Elektronen.— Ann. Phys., 1910, Bd. 31, S. 169—204.
38. G. Neumann. Die träge Masse schnell bewegter Elektronen.— Ann. Phys., 1914, Bd. 45, S. 529—579.
39. C. Schafer. Die träge Masse schnell bewegter Elektronen.— Ann. Phys., 1916, Bd. 49, S. 934—936.