

2. ОТ СПЕЦИАЛЬНОЙ К ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В сентябре 1905 г. в статье «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии» Эйнштейн, опираясь на свою работу «К электродинамике движущихся тел», нашел, что если тело отдает энергию E в виде излучения, то его масса уменьшается на величину $E : c^2$. Поскольку, при этом, несущественно, что энергия E , отданная телом, прямо перешла в лучистую энергию излучения, Эйнштейн приходит к более общему выводу, что масса тела служит мерой содержащейся в нем энергии. Если энергия изменяется на величину E , то масса меняется на величину $E : c^2$. Эйнштейн не исключает возможность того, что найденное им соотношение $E = mc^2$ удастся проверить для веществ, энергия которых меняется в значительной мере, например, для солей радия. Эту работу, в которой впервые сформулирована связь между энергией и массой, Эйнштейн заканчивает словами: «Если теория соответствует фактам, то излучение переносит инерцию между излучающими и поглощающими телами» [26, стр. 38]. В мае 1906 г. в статье «Закон сохранения движения центра тяжести и инерция энергии» Эйнштейн вновь обращается к вопросу о связи массы и энергии. Если в предыдущей работе было показано, что электромагнитные уравнения Максвелла вместе с принципом относительности и законом сохранения энергии приводят к выводу, что изменение энергии на величину ΔE влечет за собой изменение массы на величину $\Delta E : c^2$, то в этой работе доказано, «что это утверждение является необходимым и достаточным условием того, чтобы выполнялся, по крайней мере в первом приближении, закон сохранения движения центра тяжести системы, в которой, кроме механических, происходят также и электромагнитные процессы» [26, стр. 39].

Эйнштейн показал, что необходимо либо отказаться от основного положения механики, согласно которому покоящееся тело, не подверженное действию внешних сил, не приходит в состояние поступательного движения, либо принять указанную зависимость между массой и энергией.

В 1907 г. Эйнштейн отметил два существенных момента в понимании принципа и теории относительности:

а) Принцип относительности вместе с принципом постоянства скорости света следует понимать не как систему, а как некоторый эвристический принцип. Этот принцип содержит высказывания о твердых телах, часах и световых сигналах. Теория относительности требует существования связей между явлениями, казавшимися независимыми. В силу этого требования она приводит к определенным следствиям, например, к теории движения электрона.

б) Теория относительности привела указанным путем к пониманию кинематики прямолинейного движения и к выражению для кинетической энергии поступательно движущегося тела, не взаимодействующего с другими телами. В то время кинематика и динамика абсолютно твердого тела еще не получили релятивистской интерпретации.

В том же году в работе «Об инерции энергии, требуемой принципом относительности», Эйнштейн вновь обратился к вопросу об инерции энергии. Он рассматривает вопрос о кинетической энергии твердого тела, равномерно движущегося под действием внешних сил, вопрос об инерции электрически заряженного твердого тела и об энергии системы, состоящей из некоторого числа свободно движущихся материальных точек. То обстоятельство, что к предположению о зависимости инерции от энергии Эйнштейн пришел впервые из рассмотрения частного случая излучения, побудило его доказать найденную им зависимость более общим путем. В работе 1907 года «Об инерции энергии, требуемой принципом относительности», Эйнштейн писал: «Ответить на поставленный вопрос в общем виде пока невозможно, так как у нас еще нет полной картины мира, соответствующей принципу относительности. Мы скорее должны ограничиться теми частными случаями, которые можно в настоящее время без произвола рассматривать в рамках релятивистской электродинамики» [26, стр. 53]. Эйнштейн доказал в указанной работе: а) что электрически заряженное тело обладает инертной массой, которая больше массы незаряженного тела на величину электростатической энергии, деленную на квадрат скорости света; б) что система движущихся материальных точек, рассматриваемая как целое, обладает тем большей инертностью, чем быстрее движутся материальные точки друг относительно друга. В том же 1907 г. Эйнштейн написал большую работу «О принципе относительности и его следствиях». Эта работа подразделена на пять частей. В двух первых частях работы рассмотрены кинематические основы специальной теории относительности и их применение к основным уравнениям Максвелла. В третьей части развита динамика материальной точки (электрона). В четвертой части анализируются вопросы энергии и количества движения физических систем (зависимость массы от энергии, энергия и количество движения движущейся системы), а также зависимость энтропии и температуры от состояния движения.

В пятой части этой работы впервые поставлен вопрос о применимости принципа относительности, как требования независимости законов природы от состояния движения системы отсчета, для систем, движущихся с ускорением друг относительно друга. Рассматриваются две системы отсчета. Первая система отсчета S_1 движется с постоянным ускорением в направлении своей

оси x . Вторая система отсчета S_2 покоится, но находится в однородном гравитационном поле, сообщаемом всем телам ускорение γ в направлении оси x . В гравитационном поле все тела 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 относительности. Выдвинутое им предположение имело двоякую значимость: а) эвристическая значимость этого предположения заключалась в том, что можно было заменить однородное поле тяготения равномерно ускоренной системой отсчета, более доступной теоретическому исследованию; б) теоретическая значимость заключалась в том, что был сделан существенный шаг к утверждению принципа эквивалентности, как универсального физического закона.

Для анализа пространственных и временных особенностей в равномерно ускоренной системе и в поле тяготения Эйнштейн обращается к сложному мысленному эксперименту. Система отсчета S_1 движется равномерно ускоренно в направлении оси x неускоренной системы отсчета S . Начало координат системы S_1 движется вдоль оси x , а оси S_1 параллельны осям S . Часы и масштаб в системе отсчета S_1 в покое идентичны часам и масштабу в системе S . Для любого момента времени можно подобрать неускоренную систему отсчета S^1 , координатные оси которой в момент времени t^1 системы S^1 совпадают с координатными осями системы S_1 . Пусть событие, происшедшее в момент t^1 , имеет в S_1 координаты ξ , η , ζ . Поскольку не учитывается влияние ускорения на размеры тела, применяемого для измерения координат в S_1 , то координаты точечного события будут

$$x' = \xi, \quad y' = \eta, \quad z' = \zeta.$$

Представим себе, что часы в системе S_1 в момент времени t^1 в S^1 показывают такое же время t^1 , и определим показания часов в последующий промежуток времени τ .

Учитывая, что специфическое влияние ускорения γ на ход часов S_1 во внимание не принимается, поскольку оно порядка γ^2 , что влиянием на ход часов скорости, приобретенной за время τ , можно также пренебречь и что путь, пройденный часами относительно S^1 за время τ , по порядку величины равен τ^2 и пренебрежительно мал, можно полагать, что показания часов в S_1 за элемент времени τ полностью совпадает с показаниями часов в S^1 . Эти трудно воспринимаемые допущения позволяют применить принцип постоянства скорости света при определении понятия одновременности. Полагают, что часы в S_1 поставлены

вышеуказанным образом в момент $t=0$ в S , когда S_1 мгновенно покоится относительно S . «Совокупность показаний поставленных таким образом часов мы будем называть «местным временем» σ системы отсчета $\Sigma(S_1)$. Физический смысл местного времени, как это непосредственно видно, заключается в следующем. Если для измерения времени процессов, происходящих в отдельных элементах пространства $\Sigma(S_1)$, применять местное время σ то законы, которым подчиняются эти процессы, не могут зависеть от положения рассматриваемого элемента объема, т. е. от его координат, при условии, что в разных элементах объема применяются не только одинаковые часы, но и одинаковые масштабы» [26, стр. 107]. «Местное время» нельзя отождествить с временем τ_1 системы S_1 . Два точечных события, имеющие место в разных точках x_1 и x_2 системы S_1 , когда равны их местные времена, неодновременны. Двое часов неинерциальной системы, в момент $t=0$ синхронных относительно покоящейся системы S , всегда остаются синхронными по отношению к ней. Эти часы не синхронны относительно системы отсчета S^1 , покоящейся мгновенно относительно S_1 и движущейся относительно S . По определению они не синхронны относительно неинерциальной системы отсчета S_1 . Понятия «местного времени» и «времени системы» послужили прообразами «собственного» и «координатного» времени. Значительно проще вывод математических соотношений между «временем системы» τ_1 и «местным временем» σ . Из формулы преобразования $t^1 = \beta(t - \frac{v}{c^2}x)$ имеем, что два события одновременны относительно S^1 , если

$$t_1 - \frac{v}{c^2}x_1 = t_2 - \frac{v}{c^2}x_2.$$

Индексы указывают на принадлежность к тому или иному точечному событию. События, одновременные относительно S^1 , одновременны и относительно S_1 . Рассматривают такие короткие промежутки времени, чтобы можно было отбросить члены, содержащие τ^2 или v^2 :

$$x_2 - x_1 = x_2^1 - x_1^1 = \xi_2 - \xi_1;$$

$$t_1 = \sigma_1, \quad t_2 = \sigma_2, \quad v = \gamma t = \gamma \tau_1$$

и, следовательно,

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \frac{\gamma \tau_1}{c^2} (\xi_2 - \xi_1).$$

В начале координат $\sigma_1 = \tau_1$ и $\xi_1 \approx 0$,

$$\sigma_2 = \left(\frac{\gamma \xi}{c^2} + 1 \right) \tau_1.$$

Для однородного гравитационного поля имеем:

$$\sigma = \tau_1 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right),$$

$\Phi = \gamma \zeta$ — потенциал силы тяжести.

Отказ от понятия абсолютной одновременности привел к весьма далеко идущим последствиям. Стало невозможно ввести непосредственно 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.

В этой же работе было рассмотрено влияние гравитационного поля на электромагнитные процессы, определено влияние гравитационного поля на частоту излучаемого света, показано, что теорема о соответствии энергии E массе величины $E : c^2$ выполняется не только для инертной, но и для тяготеющей массы. Рассмотренные работы должны быть отнесены к началу первого подготовительного этапа в создании общей теории относительности.

В 1908 г. Эйнштейн совместно с И. Лаубом публикует работу «Об основных электродинамических уравнениях движущегося тела» (в 1908 г. — замечания к указанной работе), в том же году совместно с И. Лаубом работу «О пондермоторных силах, действующих в электромагнитном поле на покоящиеся тела», а в 1909 г. «Замечание к работе Мириманова «Об основных уравнениях...» В 1910 г. — статью «Принцип относительности и его следствия в современной физике». В этих работах Эйнштейн не затрагивает вопросов, относящихся к расширению теории. Лишь в 1911 г. в работе «О влиянии силы тяжести на распространение света» Эйнштейн опять возвращается к затронутым им в 1907 г. проблемам.

Эйнштейн полагает теперь, что скорость света зависит от гравитационного поля. Скорость света c в некотором месте с гравитационным потенциалом Φ определяется формулой.

$$c = c_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right),$$

c_0 — скорость света в начале координат.

Излучение, испускаемое в равномерно ускоренной системе отсчета из S_2 в S_1 , имело относительно часов, находящихся в S_2 , частоту ν_2 . По прибытии излучения в S_1 оно обладает относительно находящихся там таких же часов частотой ν_1 :

$$\nu_1 = \nu_2 \left(1 + \frac{\gamma h}{c^2} \right),$$

h — расстояние между S_1 и S_2 , γ — ускорение.

Величину γh заменим через потенциал Φ , взятый в S_2 по отношению к S_1 , потенциал которой принят за нуль:

$$v_1 = v_2 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right).$$

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

Значение работы Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» (1905) для физики в целом было к этому времени правильно понято и оценено рядом выдающихся физиков; М. Планк, Г. А. Лоренц, Анри Пуанкаре, А. Зоммерфельд, М. Лауэ, А. Эддингтон, М. Борн, Лармор, П. Дебай, П. Ланжевэн, Т. Леви-Чивита и многие другие, став на почву теории относительности, активно разрабатывали отдельные ее проблемы. Разработке отдельных проблем специальной теории относительности и поискам путей ее расширения посвящены работы Эйнштейна 1906—1910 гг.

В 1911 г. Эйнштейн впервые выступает на заседании Общества естествоиспытателей в Цюрихе с докладом, посвященным теории относительности. В предельно доступной форме Эйнштейн объясняет сущность принципа относительности, выясняет роль принципа относительности в классической механике. Классическая механика основана на принципе Галилея о прямолинейном и равномерном движении тела, не подвергнутого действию других тел. Выполнение принципа Галилея в одной из инерциальных систем влечет за собой его выполнение в другой инерциальной системе. В классической механике можно убедиться в этом двумя путями: а) непосредственно на опыте; б) на основании уравнений механики Ньютона, преобразуя их к системе отсчета, равномерно движущейся относительно первоначальной системы. В XVIII и первой половине XIX в. не возникало сомнений в применимости принципа относительности как к механическим, так и любым физическим процессам. Причина глубокой убежденности во всеобщей значимости принципа коренилась в механистическом миропонимании, в представлении о сводимости всех законов природы к механическим законам.

Развитие классической электродинамики и оптики привело к неустранимым противоречиям классической физики и принципа относительности Галилея. Одновременно была пробига значительная брешь в механистическом мировоззрении в целом. В совокупности это привело к необходимости коренного пересмотра фундаментального понятия физики — относительности. Изучение электромагнитных явлений в движущихся средах повлекло за собой необходимость в переосмыслении

господствовавших представлений об эфире. Возникла проблема о поведении эфира в тех случаях, когда тела рассматриваемой физической системы имеют разные скорости. Необходимо было дать однозначный ответ на вопрос, увлекается ли световой эфир движущимися телами или вовсе не участвует в движении вещества. Теория покоящегося светового эфира Лоренца оказалась единственной теорией, согласующейся со всей совокупностью известных к тому времени опытных данных, но несовместимой с принципом относительности. В этой теории из всех движущихся неускоренно систем выделены те системы, которые находятся в покое относительно эфира. В соответствии с теорией Лоренца необходимо было предположить существование явлений, в которых проявилось бы влияние движения Земли. Однако ничего подобного не обнаруживалось ни в одном опыте. Несовместимость принципа относительности и теории Лоренца привела к созданию кардинально новой теории — теории относительности. Эта теория отбросила произвол, содержащийся в классической кинематике, утверждающей, что время имеет абсолютный смысл, независимый от состояния движения системы отсчета, и что геометрические размеры тел независимы от состояния движения системы отсчета, относительно которой они определяются. Принцип относительности и принцип постоянства скорости света привели к новому, совместимому с опытом, решению проблемы преобразования координат и времени. Теперь теория оказалась совместимой с экспериментом. Специальная теория относительности оказалась единственной теорией, не противоречащей и совместимой с огромным числом механических, электродинамических и оптических опытов. Отныне (не считая небольшое замечание к статье Варичака в 1911 г.) интересы Эйнштейна на протяжении пяти лет, до завершения им общей теории относительности, сосредоточены на обобщении теории относительности и теории тяготения.

В 1912 г. в работе «Скорость света и статическое гравитационное поле» Эйнштейн подчеркивает, что следствия из гипотезы о физической эквивалентности ускоренной системы координат полю тяготения не противоречат теории относительности равномерного движения. Однако справедливость закона постоянства скорости света оказывается ограниченной областями постоянного гравитационного потенциала. Этот результат исключает и всеобщую применимость преобразования Лоренца, но уверенность Эйнштейна в эквивалентности поля ускорения и поля тяготения настолько усилилась к этому времени, что, в отличие от Абрагама, он полагает возможным отказаться от постоянства c . «Нам кажется,— пишет Эйнштейн,— что проблеме 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 « c ». Если же не ограничиваться областями, где « c » постоянна, то множество эквивалентных систем, равно как и множество преобразований, оставляющих законы природы неизменными, станет более обширным; однако законы при этом станут более сложными» [26, стр. 201]. В работе «К теории статического гравитационного поля» (1912) исследуется влияние статического гравитационного поля на электромагнитные и тепловые процессы. В том же году Эйнштейн публикует статью «Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электродинамической индукции». В статье «Относительность и гравитация» (1912) Эйнштейн полемизирует с Абрагамом, 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 совместно с М. Гроссманом публикует работу «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения». Физическая часть написана Эйнштейном, математическая — М. Гроссманом. В этой работе даны уравнения второго порядка для гравитационного поля, определяющие нековариантно входящие в него величины. Эйнштейн отмечает, что излагаемая теория возникла из убежденности, что пропорциональность инертной и тяжелой масс есть закон природы и он должен найти отражение в самих основах теоретической физики. В работе дана связь гравитационного поля с фундаментальным тензором $g_{\mu\nu}$, приведен тензор кривизны Римана. М. Гроссман отмечает, что можно указать ковариантный тензор второго ранга и второго порядка, полезный для составления дифференциальных уравнений гравитационного поля. Более простой путь, а именно, сохранить лапласов скалярный потенциал и дополнить уравнение Пуассона производной по времени так, чтобы удовлетворить требованиям специальной теории относительности, был оставлен Эйнштейном на первых этапах поисков теории тяготения. Возврата к этому пути Эйнштейн не искал. Нордстрем в то же время строил теорию тяготения, основываясь на представлении о постоянстве скорости света и скалярном характере гравитационного потенциала. Было отмечено, что теория Нордстрема, «допускавшая ясную тензорную формулировку и приводившая к точному равенству тяжелой и инертной массы, была шагом вперед и сыграла роль при построении общей теории относительности. Скалярное уравнение Нордстрема является обобщением уравнения Лапласа — Пуассона» [27]. В том же году Эйнштейн прочитал доклад на годичном собрании Швейцарского общества естествоиспытателей. Название доклада — «Физические основы теории тяготения». Начало доклада посвящено опытам Этвеша. Два совер-

шенно 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 них — собственно тяжесть — зависит от тяжелой массы. Другая сила — центробежная — зависит от инертной массы. Результирующая этих двух сил и представляет собой наблюдаемую тяжесть тела. Этвеш установил, что отношение упомянутых двух сил не зависит от природы тела. Опытный факт, установленный Этвешем, формулируют так: «все тела в поле тяжести падают с одинаковым ускорением».

«Тем самым, — пишет Эйнштейн, — подсказывается предложение о том, что в отношении действия на механические и другие физические явления поле тяжести можно заменить ускоренным состоянием тела отсчета (системы координат)» [26, стр. 267]. Эта концепция эквивалентности не есть прямое и необходимое следствие опытов Этвеша. Эйнштейн выдвигает теперь 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. 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 лежит в пределах экспериментальных возможностей. Эйнштейн не ограничивается тем, что искривление лучей может служить подтверждением гипотезы эквивалентности. Оно служит для него 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» [26, стр. 268].

В 1913 г., в начале второго подготовительного этапа теории относительности, Эйнштейн развивает ее историческую и логическую схему. От опытов Этвеша — к принципу эквивалентности. Следствие принципа — непостоянство скорости света в гравитационном поле. Нарушение одного из постулатов построенной уже специальной теории относительности требует коренного пересмотра и обобщения наших пространственно-временных представлений. Совпадает ли эта схема с действительным ходом развития общей теории относительности, сказать трудно, поскольку в то время существовало много побуждающих причин к расширению теории.

Эйнштейн указывает, что единственно достаточно всеобъемлющее инвариантное обобщение закона движения получается при представлении «линейного элемента» в виде:

$$ds^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx_i dx_k,$$

где g_{ik} — функции x_1, x_2, x_3, x_4 .

В специальной теории относительности независимость «физических уравнений» от выбора системы отсчета основывалась на постулировании инварианта

$$ds^2 = \sum_i dx_i^2 = -dx^2 - dy^2 - dz^2 + c^2 dt^2.$$

В новой теории фундаментальным инвариантом служит

$$ds^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx_i dx_k, \quad g_{ik} = g_{ki}.$$

Поле тяготения характеризуется десятью величинами g_{ik} , заменяющими скалярный потенциал ϕ .

Эйнштейн обращается ко второму кардинальному вопросу теории тяготения — вопросу энергии-импульса гравитационного поля. Законы сохранения импульса и энергии специальной теории относительности содержатся в уравнениях:

$$\sum_{\nu} \frac{\partial T_{\sigma\nu}}{\partial x_{\nu}} = 0, \quad (\nu, \sigma = 1, 2, 3, 4),$$

$T_{\sigma\nu}$ — симметричный тензор.

Интегрируя уравнения по пространственным координатам, получают уравнения сохранения:

$$\frac{d}{dt} \left(\int T_{\sigma\nu} d\tau \right) = 0,$$

$d\tau$ — элемент трехмерного объема.

В общей теории этим уравнениям соответствуют уравнения вида:

$$\sum_{\nu} \frac{\partial \bar{T}_{\sigma\nu}}{\partial x_{\nu}} = \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\tau} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\nu}} \gamma_{\mu\tau} \bar{T}_{\sigma\tau}, \quad (\sigma=1, 2, 3, 4),$$

$$\bar{T}_{\sigma\nu} = \sqrt{-g} \sum_{\mu} g_{\sigma\mu} \theta_{\mu\nu},$$

$g = |g_{ik}|$, $\gamma_{\mu\tau}$ — миноры, деленные на определитель g . $\bar{T}_{\sigma\nu}$ имеют тот же смысл, что и тензор $T_{\sigma\nu}$ в специальной теории относительности, поскольку в них не содержатся компоненты натяжений и энергии гравитационного поля. $\theta_{\mu\nu}$ — симметричный контравариантный тензор второго ранга, характеризующий энергетические свойства в рассматриваемой области. При наличии гравитационного поля $g_{\mu\nu}$ переменны, компоненты тензора энергии одной материи не удовлетворяют законам сохранения и в этом случае из уравнений нельзя непосредственно вывести законы сохранения. Должны существовать четыре уравнения:

$$\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} (\bar{T}_{\sigma\nu} + t_{\sigma\nu}) = 0,$$

$t_{\sigma\nu}$ — компоненты тензора энергии-натяжения гравитационного поля. Эйнштейн полагал в то время, что уравнения, полностью определяющие гравитационное поле, не ковариантны относительно произвольных преобразований. От уравнений гравитационного поля требовалась ковариантность относительно лишь линейных уравнений.

Эйнштейн был убежден, что выдвинутая им теория устраняет гносеологический недостаток, присущий классической механике и специальной теории относительности — абсолютный характер ускорения. В новой теории бессмысленно приписывать телам сопротивление ускорения. Инертное сопротивление есть результат расположения в окрестности тела неускоренных инертных масс. В том же году в работе «К современному состоянию проблемы тяготения» Эйнштейн указывает на постулаты, которые можно принять в теории гравитации: 1) выполнение законов сохранения импульса и энергии, 2) равенство инертной и тяжелой масс замкнутых систем, 3) ковариантность системы уравнений относительно обобщенных преобразований Лоренца (линейных ортогональных преобразований), 4) совокупность связей между наблюдаемыми величинами не меняется с переносом лаборатории из области данного гравитационного поля в область с другим гравитационным потенциалом. В работе дан анализ теорий Абрагама и Нурдстрема.

Интересно высказывание Эйнштейна о четвертом постулате: «...постулат 4, вероятно, нельзя обосновать опытом. Он оправ-

дывается не чем иным, как верой в простоту законов природы, и мы не можем полагаться на то, что он выполняется с таким же правом, как в случае остальных трех упомянутых аксиом» [26, стр. 276].

В 1914 г. в статье «Принципиальные вопросы обобщенной теории относительности и теории гравитации» Эйнштейн polemизирует с Ми, считавшим, что идеи «обобщенной» теории относительности противоречат ранее выдвинутой идее постоянства скорости света. Ми полагал также, что поля тяготения образуют абсолютную систему отсчета. Эйнштейн усматривал серьезный недостаток «специальной» теории относительности в признании некоторых «привилегированных» систем отсчета, в которых законы природы принимают простую форму. «Привилегированные системы отсчета определяются как такие, в которых соблюдается принцип постоянства скорости света в пустоте. Можно не сомневаться в том, что этот принцип имеет фундаментальное значение; и все же я не могу верить, что он выполняется точно...» [26, стр. 319].

Поставлен вопрос о возможности построения теории относительности, не базирующейся на принципе постоянства скорости света. Отказ от постулата постоянства скорости света есть отказ от инварианта $ds^2 = \sum dx_\nu^2$ и от априорно выделенных систем координат. Уравнение свободной движущейся материальной точки в форме Гамильтона $\delta \int ds = 0$ должно быть дополнено равенством:

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu,$$

где $g_{\mu\nu}$ функции x_ν ; функции $g_{\mu\nu}$ надо понимать как компоненты гравитационного поля относительно произвольной системы отсчета. В 1914 г. Эйнштейн качественно рассмотрел вопрос об эквивалентности вращающихся систем координат. В 1915 г. в статье «К общей теории относительности» Эйнштейн подверг суровой критике свою работу 1914 г. «Формальные основы общей теории относительности». Он писал: «В последние годы я старался построить общую теорию относительности исходя из относительности также и неравномерных движений. Я думал, что на самом деле нашел единственный закон гравитации, который соответствует понятному по смыслу общему постулату относительности, и пытался доказать необходимость именно этого решения в работе, появившейся в прошлом году в этом журнале» [26, стр. 425].

Эйнштейн вернулся к требованию более общей ковариантности уравнений поля. «Подобно тому,— пишет Эйнштейн,— как частная теория относительности основана на постулате, что ее соотношения должны быть ковариантны относительно линейных ортогональных преобразований, излагаемая здесь

теория основана на постулате ковариантности всех систем уравнений относительно преобразований с определителем единица» [26, стр. 426]. В том же году вышло дополнение к указанной работе.

Анализируя эти работы, Я. А. Смородинский писал:

«В последних двух работах Эйнштейн делает последнюю (накануне правильного решения) попытку построить уравнения гравитационного поля $G_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}$, вводя дополнительное условие $T_{\sigma}^{\sigma} = 0$. Это условие нужно для того, чтобы из уравнения

$$\left[\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 g^{\alpha\beta}}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} - \sum_{\alpha\beta\sigma\tau} g^{\sigma\tau} \Gamma_{\sigma\beta}^{\alpha} \Gamma_{\tau\alpha}^{\beta} + \sum_{\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(g^{\alpha\beta} \frac{\partial \lg \sqrt{-g}}{\partial x_{\beta}} \right) \right] = -\kappa \sum_{\sigma} T_{\sigma}^{\sigma} \quad (21)$$

получить закон сохранения энергии-импульса (для чего понадобится ввести еще дополнительное требование:

$$\left[\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 g^{\alpha\beta}}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} - \sum_{\sigma\tau\alpha\beta} g^{\sigma\tau} \Gamma_{\sigma\beta}^{\alpha} \Gamma_{\tau\alpha}^{\beta} = 0 \right]. \quad (22a)$$

В работе («Уравнения гравитационного поля») будет сделан простой (но гениальный!) шаг, решивший судьбу теории — замена тензора $T_{\mu\nu}$ на $T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T$ или, что то же, тензора $G_{\mu\nu}$ на $C_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$, ковариантная дивергенция которого равна нулю тождественно» [26, стр. 438].

В 1916 г. Эйнштейн публикует работу «Основы общей теории относительности». «Излагаемая здесь теория,— пишет Эйнштейн,— является наиболее радикальным обобщением общеизвестной в настоящее время «теории относительности»; последнюю в отличие от первой я буду называть «специальной теорией относительности»...» [26, стр. 452].

Два момента облегчили обобщение специальной теории относительности: 1) работы Минковского, «который впервые вскрыл формальное равноправие пространственных координат и временной координаты в специальной теории относительности и использовал это равноправие для построения теории», 2) вспомогательный математический аппарат — «абсолютное дифференциальное исчисление», основы которого заложены исследованиями Гаусса, Римана и Кристоффеля, посвященными неевклидовым пространствам, и работами Риччи и Леви-Чивита.

В первую очередь Эйнштейн анализирует основания, подсаживающие расширение постулата относительности. Он прибегает к мысленному эксперименту. Два жидких тела одинаковой величины и состава парят свободно в пространстве. Они

находятся на таком большом расстоянии друг от друга и от остальных масс, что можно учитывать только гравитационные силы между частями одного и того же тела. Каждая масса, рассматриваемая наблюдателем, покоящимся относительно другой массы, вращается с постоянной угловой скоростью вокруг линии, соединяющей эти массы. Представим себе, что поверхности этих тел измерены с помощью масштабов, покоящихся относительно этих тел. Если в результате измерения окажется, что поверхность тела S_1 — сфера, а поверхность тела S_2 — эллипсоид вращения, то причина разного поведения этих тел должна быть наблюдаемым опытным фактом. Механика Ньютона не дает удовлетворительного ответа на вопрос, полагая, что законы механики справедливы для того пространства R_1 , относительно которого покоится тело S_1 , но несправедливы для пространства R_2 , в котором покоится S_2 . Но в действительности особенности галилеева пространства R_1 — это фиктивная причина, выдвинутая для объяснения наблюдаемого различия поверхностей. Эйнштейн приходит в результате анализа эксперимента к выводу: «Из всех мыслимых пространств R_1 , R_2 и т. д., движущихся любым образом относительно друг друга, ни одному из них *arguere* не должно отдаваться предпочтение, если только мы хотим устранить указанный теоретико-познавательный недостаток. Законы физики должны быть составлены так, чтобы они были справедливы для произвольно движущихся координатных систем» [26, стр. 456]. Кроме теоретико-познавательного аргумента, согласно которому нельзя выдвигать в качестве причины различия поверхностей движение по отношению к галилееву пространству, в пользу расширения теории относительности Эйнштейн приводит анализ известного физического факта.

K — галилеева координатная система, относительно которой некоторая масса, достаточно удаленная от других, движется прямолинейно и равномерно. K' — система, движущаяся равномерно ускоренно относительно K . Достаточно изолированная от других масса движется ускоренно относительно K' .

Наблюдатель, покоящийся относительно K' , может объяснить поведение масс, полагая, что K' не имеет ускорения, но что в рассматриваемой области существует гравитационное поле, вызывающее ускоренное движение тел относительно K' , сами же системы K и K' в силу этого равноправны для описания физических процессов. Построение теории относительности оказывается связанным с теорией тяготения.

Анализируя пространственно-временной континуум, Эйнштейн приходит также к выводу, что в общей теории относительности, в отличие от специальной, нельзя определить пространственные и временные величины так, чтобы стало возможным измерение разности пространственных координат

непосредственно единичным масштабом, а разности временных координат с помощью стандартных часов. Это измерение было возможно при накладываемых на пространство R_1 ограничениях определенного рода.

«Итак, прежний способ, заключавшийся в определенном построении системы координат в пространственно-временном континууме, оказывается неприменимым: представляется, что не существует пути, который позволил бы приспособить к четырехмерному миру такие координатные системы, чтобы с помощью их можно было бы ожидать простой формулировки законов природы» [26, стр. 459].

Необходимо отметить, что Эйнштейн усиливает ранее высказанное им положение, что «законы физики должны быть составлены так, чтобы они были справедливы для произвольно движущихся координатных систем» требованием общей ковариантности уравнений, выражающих общие законы природы. «Общие законы природы должны быть выражены через уравнения, справедливые во всех координатных системах, т. е. эти уравнения должны быть ковариантными относительно любых подстановок (общековариантными)» [26, стр. 459]. Задача нахождения общековариантных уравнений тяготения была не только поставлена, но и полностью решена. Пользуясь операцией образования тензоров посредством дифференцирования, Эйнштейн находит ковариантную производную тензора

$$A_{\mu\nu\sigma} = \frac{\partial A_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} - \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \tau \end{matrix} \right\} A_{\tau\nu} - \left\{ \begin{matrix} \nu \\ \tau \end{matrix} \right\} A_{\mu\tau}. \quad (1)$$

В соотношении (1) подставляют выражение для $A_{\mu\nu}$

$$A_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\mu}{\partial x_\nu} - \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} A_\rho, \quad (2)$$

$A_{\mu\nu}$ — тензорная производная четырехмерного вектора A_μ . Несколько изменив обозначения индексов, имеем:

$$A_{\mu\sigma\tau} = \frac{\partial^2 A_\mu}{\partial x_\sigma \partial x_\tau} - \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} \frac{\partial A_\rho}{\partial x_\tau} - \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} \frac{\partial A_\rho}{\partial x_\sigma} - \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \rho \end{matrix} \right\} \frac{\partial A_\mu}{\partial x_\rho} + \\ + \left[-\frac{\partial}{\partial x_\tau} \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \alpha \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \rho \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \alpha \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} \right] A. \quad (3)$$

Эйнштейн указывает, что это выражение приводит к мысли о составлении тензора

$$A_{\mu\sigma\tau} - A_{\mu\tau\sigma} = B_{\mu\sigma\tau}^\rho A_\rho, \quad (4)$$

$$B_{\mu\sigma\tau}^\rho = -\frac{\partial}{\partial x_\tau} \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_\sigma} \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \alpha \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \rho \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \alpha \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \rho \end{matrix} \right\}. \quad (5)$$

Несложно показать, что $B_{\mu\sigma\tau}^{\rho}$ есть тензор (тензор Римана — Кристоффеля). Свертывая по индексам τ и ρ в выражении (5), приходим к ковариантному тензору второго ранга, позволяющему найти уравнения:

$$\begin{aligned} B_{\mu\nu} &= R_{\mu\nu} + S_{\mu\nu}, \\ R_{\mu\nu} &= -\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ & \alpha \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \mu & \alpha \\ & \beta \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \nu & \beta \\ & \alpha \end{matrix} \right\}, \\ S_{\mu\nu} &= \frac{\partial \lg \sqrt{-g}}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} - \left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ & \alpha \end{matrix} \right\} \frac{\partial \lg \sqrt{-g}}{\partial x_{\alpha}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Выяснив принципиальные соображения о ковариантности и относительности и рассмотрев вспомогательные математические средства, Эйнштейн переходит к теории гравитационного поля. В первую очередь он рассматривает уравнения движения материальной точки в гравитационном поле.

Свободное тело, не подверженное действию внешних сил, согласно специальной теории относительности, движется прямолинейно и равномерно. Согласно общей теории относительности это имеет место лишь при некоторых дополнительных и весьма искусственных предположениях, а именно: необходимо выделить часть четырехмерного пространства, в которой координатная система K_{α} может быть выбрана так, чтобы $g_{\sigma\tau}$ в выражении

$$ds^2 = \sum_{\sigma\tau} g_{\sigma\tau} dx_{\tau} dx_{\sigma}$$

приняли постоянные значения

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{pmatrix}$$

Это же тело с точки зрения произвольно выбранной координатной системы K_1 движется в некотором поле тяготения. Закон движения по отношению к системе K_0 есть геодезическая (четырёхмерная прямая). Поскольку геодезическая определяется независимо от координатной системы, то ее уравнение есть уравнение движения материальной точки относительно произвольно выбранной координатной системы K_1 . Уравнение движения точки относительно K_1 имеет вид:

$$\frac{d^2 x_{\tau}}{ds^2} = \Gamma_{\mu\nu}^{\tau} \frac{dx_{\mu}}{ds} \frac{dx_{\nu}}{ds}, \quad (7)$$

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\tau} = - \left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ & \tau \end{matrix} \right\} = - g^{\tau\alpha} \left[\begin{matrix} \mu & \nu \\ & \alpha \end{matrix} \right] = g^{\tau\alpha} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_{\mu\alpha}}{\partial x_{\nu}} + \frac{\partial g_{\nu\alpha}}{\partial x_{\mu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\alpha}} \right). \quad (8)$$

Если все $\Gamma_{\mu\nu}^{\tau}$ равны нулю, то мы имеем частный случай прямолинейного и равномерного движения. Величины $\Gamma_{\mu\nu}^{\tau}$ — компоненты гравитационного поля, обуславливающие отклонения от прямолинейного и равномерного движения. Далее Эйнштейн переходит к рассмотрению уравнений гравитационного поля в отсутствии материи. Он применяет тот же метод, как и при выводе уравнений движения материальной точки, т. е. рассматривает частный случай $g_{\mu\nu} = \text{const}$ в некоторой конечной области по отношению к определенной координатной системе. В этой системе все компоненты тензора Римана — Кристоффеля обращаются в нуль. В рассматриваемой области они будут равны нулю и в любой другой системе, в силу свойств тензора. «Таким образом, искомые уравнения свободного от материи гравитационного поля во всяком случае должны выполняться, если все $B_{\mu\sigma\tau}^{\rho}$ равны нулю. Но это условие заведомо требует слишком многого. В самом деле, гравитационное поле, создаваемое, например, материальной точкой, во всяком случае не может быть никаким выбором координатной системы «оттрансформировано», т. е. не может быть преобразовано к случаю постоянных $g_{\mu\nu}$. Поэтому представляется естественным требование, чтобы в свободном от материи гравитационном поле обращался в нуль симметричный тензор $B_{\mu\nu}$, полученный из тензора $B_{\mu\sigma\tau}^{\rho}$ [26, стр. 486]. При $\sqrt{-g} = 1$ из уравнений (6) имеем: $S_{\mu\nu} = 0$, а

$$\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} = 0, \quad \sqrt{-g} = 1. \quad (9)$$

«Тот факт, — пишет Эйнштейн, — что эти уравнения, вытекающие из общего принципа относительности чисто математическим путем, в соединении с уравнениями движения (9) дают в первом приближении ньютоновский закон тяготения, а во втором приближении — объяснение открытого Леверрье движения перигелия Меркурия (остающегося после внесения поправок на возмущение), должен, по нашему мнению, убедить в физической правильности теории» [26, стр. 486].

Для доказательства соответствия уравнений поля законам сохранения импульса и энергии Эйнштейн обращается к функции Гамильтона для гравитационного поля.

Анализ понятия энергии позволил перейти от уравнений

$$\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} = 0, \quad \sqrt{-g} = 1 \quad (10)$$

к уравнениям:

$$\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}^{\nu}} + \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right), \quad (11)$$

$$\sqrt{-g} = 1,$$

или

$$G_{\mu\nu} = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right), \quad \sqrt{-g} = 1,$$

$$G_{\mu\nu} = -\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left\{ \begin{matrix} \mu\nu \\ \alpha \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \nu\alpha \\ \beta \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \mu\beta \\ \alpha \end{matrix} \right\}.$$

Из этой системы уравнений видно, как надо вводить тензор энергии в уравнения гравитационного поля.

Эйнштейн сравнивал уравнения поля для свободного от материи пространства с уравнением Лапласа, а уравнения гравитационного поля в общем виде считал как бы соответствующими уравнениям Пуассона. Уравнения тяготения должны связывать тензор кривизны с тензором энергии-импульса. В этом случае вместо одних только компонент энергии t_{μ}^{σ} гравитационного поля надо подставить сумму компонент тензора энергии материи и гравитационного поля.

В 1916 г. в работе «Приближенное интегрирование уравнений гравитационного поля» Эйнштейн указал метод, позволяющий определить приближенно гравитационное поле для достаточно малых масс, движущихся с большими скоростями. Под «первым приближением» понимается, что величины $\gamma_{\mu\nu}$ из выражения $g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu}$ ($\delta_{\mu\nu} = 1$, если $\mu = \nu$ и $\delta_{\mu\nu} = 0$, если $\mu \neq \nu$), обладающие тензорным характером относительно линейных ортогональных преобразований, малы по сравнению с единицей и их квадратами «и более высокими степенями можно пренебречь по сравнению с первой степенью». Было показано: 1) величины $\gamma_{\mu\nu}$ могут быть вычислены тем же путем, что и запаздывающий потенциал в электродинамике

$$\gamma'_{\mu\nu} = -\frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu}(x_0, y_0, z_0, t-r)}{r} dV_0,$$

$$\gamma'_{\mu\nu} = \gamma_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} \gamma_{\alpha\alpha},$$

dV_0 — трехмерный элемент объема пространства интегрирования, r — пространственное расстояние, индекс «0» указывает на координаты элемента интегрирования.

2) Из вида $\gamma'_{\mu\nu}$ следует, что гравитационные воздействия распространяются со скоростью света.

Далее Эйнштейн вычисляет компоненты энергии гравитационного поля, рассматривает плоские гравитационные волны, потери энер-

гии системой тел путем излучения гравитационных волн. В дальнейшем Эйнштейн вновь обратился к вопросу о гравитационных волнах. В том же году в работе «Принцип Гамильтона и общая теория относительности» Эйнштейн вслед за Г. А. Лоренцом и Д. Гильбертом вывел уравнения общей теории относительности из одного единственного вариационного принципа.

В отличие от Лоренца, и, главным образом в отличие от Гильберта, Эйнштейн сделал меньше допущений о свойствах материи.

Вводится функция H от $g^{\mu\nu}$, $g_{\sigma}^{\mu\nu}$ ($= \frac{\partial g^{\mu\nu}}{\partial x_{\sigma}}$).

$$g_{\sigma\tau}^{\mu\nu} \left(= \frac{\partial^2 g^{\mu\nu}}{\partial x_{\sigma} \partial x_{\tau}} \right), q_{\rho}, q_{(\rho)\alpha} \left(= \frac{\partial q_{\rho}}{\partial x_{\alpha}} \right).$$

Гравитационное поле описывается $g^{\mu\nu}$, а материя, включая электромагнитное поле, любым числом пространственно-временных функций q_{ρ} .

Вариационный принцип $\delta \left\{ \int H d\tau \right\} = 0$ «дает столько дифференциальных уравнений, сколько имеется подлежащих определению функций $g_{\mu\nu}$ и $q_{(\rho)}$, если только мы при этом установим, что $g^{\mu\nu}$ и $q_{(\rho)}$ должны варьироваться независимо друг от друга и так, чтобы на границах интегрирования все $\delta q_{(\rho)}$, $\delta g^{\mu\nu}$, и $\delta \delta g_{\mu\nu} / \partial x_{\sigma}$ обращались в нуль» [26, стр. 525]. При условии, что функция H линейна по отношению ко всем $g_{\sigma\tau}^{\mu\nu}$ и такова, что коэффициенты при $g_{\sigma\tau}^{\mu\nu}$ зависят только от $g^{\mu\nu}$, Эйнштейн получил более удобный вариационный принцип, а выполнив вариации по $g^{\mu\nu}$ и $q_{(\rho)}$, получил уравнения гравитационного поля и материи.

В 1917 г. Эйнштейн публикует книгу «О специальной и общей теории относительности», имеющей целью «дать возможно точное представление о теории относительности читателям, интересующимся этой теорией с общенаучной, философской точки зрения, но не владеющим математическим аппаратом теоретической физики» [26, стр. 532].

В том же году Эйнштейн публикует работу «Вопросы космологии и общая теория относительности», в 1918 г. работы: «Принципиальное содержание общей теории относительности», «Диалог по поводу возражений против теории относительности», «О гравитационных волнах», «Закон сохранения энергии в общей теории относительности» и некоторые замечания к работам Э. Шредингера и де Ситтера; в 1919 г. «Гравитационные поля и элементарные частицы материи», «Замечания о периодических изменениях длины лунного месяца, до сих пор казавшихся необъяснимыми механикой Ньютона», «Что такое теория относительности»; в 1920 г. им произнесена речь «Эфир

и теория относительности», опубликованы статьи: «Ответ на статью Рейхенбехера» и «Мой ответ. По поводу антирелятивистского общества».

В 1921 г. Эйнштейн прочитал лекции, опубликованные в том же году в Принстоне под названием «The meaning of relativity», доклад на тему «Геометрия и опыт», опубликовал статьи «Краткий очерк развития теории относительности», «Простое применение закона тяготения Ньютона к шаровому скоплению звезд» и произнес речь в Королевском колледже (Лондон) «О теории относительности».

В 1921 г. в «Nature» появилась статья Эйнштейна «Краткий очерк развития теории относительности», в которой он своеобразно выразил свой взгляд на эстетическую сторону истории научных идей.

«Есть нечто привлекательное в изложении эволюции идей, максимально кратком и в то же время достаточно полном, чтобы передать непрерывность их развития. Мы попытаемся изложить, таким образом, теорию относительности и показать, что все движение вперед складывается из небольших, почти самоочевидных шагов» [28, стр. 99].

Ход рассуждений Эйнштейна такой.

1) Первым и определяющим моментом развития была идея непрерывности процесса, противопоставляемая действию на расстоянии (Фарадей, Максвелл). Максвелл осуществил описание этого процесса в дифференциальных уравнениях в частных производных для электромагнитных процессов в покоящихся телах. При этом описании он опирался, во-первых, на представление о магнитном эффекте тока смещения в вакууме, во-вторых, на постулат тождественности электромагнитного поля, возникающего вследствие индукции, и электростатического поля.

2) Последователи Максвелла распространили электродинамику на случай движущихся тел: а) Герц решал проблему, приписав пустому пространству — эфиру физические свойства, например, аналогично весомой материи эфир должен иметь в каждой точке определенную скорость. «Как и в покоящихся телах, электромагнитную или магнитоэлектрическую индукцию следовало определять скоростью изменения соответственно электрического или магнитного потока при условии, что эти скорости изменения относились к элементам поверхности, движущимся вместе с телом» [26, стр. 99]. Опыт Физо по распространению света в движущейся жидкости оказался несовместимым с теорией Герца. б) Лоренц полагал эфир независимым от вещества. Недостаток теории состоял в том, что она отдавала предпочтение системе, покоящейся по отношению к эфиру, и противоречила идее эквивалентности инерциальных систем.

3) Специальный принцип относительности показал, что в основе преобразований Галилея лежит произвольное утвержде-

ние о том, что понятие одновременности имеет смысл независимо от состояния движения используемой системы координат. Были введены преобразования Лоренца. Необходимо, чтобы все системы уравнений, выражающие законы физики, были ковариантны относительно преобразований Лоренца. С методологической точки зрения специальный принцип относительности можно сравнивать с принципом Карно «ибо подобно последнему он дает нам общее условие, которому должны удовлетворять все законы природы» [26, стр. 101].

Минковский нашел изящное и плодотворное выражение условия ковариантности.

Далее оказалось, что специальную теорию относительности нельзя естественным образом связать с гравитацией. Сила тяготения обладает фундаментальным свойством, отличающим его от электромагнитных сил — все тела падают в гравитационном поле с одинаковым ускорением.

«Могут ли инерция и тяготение быть тождественными? Этот вопрос ведет непосредственно к общей теории относительности. Разве нельзя рассматривать Землю как лишенную вращения, если представлять себе центробежные силы, которые действуют на все тела, покоящиеся относительно Земли, как «истинное» поле тяготения или часть такого поля?» [28, стр. 103]. Удача в проведении такой идеи означала бы доказательство тождественности инерции и тяготения по самой их природе. Это означало бы, что свойство, рассматриваемое с точки зрения системы, не принимающей участия во вращении, как инерции, будет интерпретировано как тяготение, если рассматривать его по отношению к системе координат, участвующей во вращении.

Согласно Ньютону центробежное поле нельзя считать порожденным веществом. «Но быть может, закон поля Ньютона можно заменить другим законом, согласующимся с полем, возникающим по отношению к «вращающейся» системе координат? Мое убеждение в тождестве инертной и тяготеющей масс породило во мне чувство абсолютной уверенности в справедливости такой интерпретации..» [28, стр. 103].

Соображения, базирующиеся на метрических результатах специальной теории относительности, приводят к выводу о неприменимости евклидовой метрики в ускоренных системах отсчета. «Хотя,— пишет Эйнштейн,— это задержало развитие теории на несколько лет, возникшая трудность была смягчена знанием того факта, что евклидова метрика справедлива для малых областей». Тем самым ds сохранило смысл в общей теории относительности, в то время как координаты потеряли свое значение. Три условия определили закон гравитационного поля: 1) закон должен быть верен при любом выборе системы координат; 2) он должен определяться тензором энергии вещества; 3) он не должен содержать производных от функций $g_{\mu\nu}$ выше

второго порядка и должен быть линейным по этим функциям. По такому пути был найден новый закон тяготения. Этот новый закон, сильно отличающийся от закона Ньютона, настолько тесно соответствует ему по следствиям, что оказалось лишь небольшое число критериев, по которым можно подвергнуть проверке его выводы. Далее Эйнштейн перечисляет вопросы, оставшиеся неразрешенными: «Действительно ли электрическое и гравитационное поле настолько различны по своей природе, что они не могут быть формально объединены? Игруют ли гравитационные поля какую-либо роль в строении вещества и следует ли рассматривать континуум внутри атомного ядра осциллирующим неевклидовским?.. Следует ли относить инерцию к взаимному влиянию отдаленных масс? И вопрос, связанный с предыдущим: является ли Вселенная пространственно ограниченной? В этом пункте я расхожусь во мнениях с Эддингтоном. Вместе с Махом я ощущаю, что положительный ответ настоятельно необходим, но доказать пока ничего нельзя. Пока не будет проведено динамическое исследование больших систем неподвижных звезд с точки зрения пределов применимости закона тяготения Ньютона для огромных областей пространства, до тех пор, по-видимому, нельзя будет получить точную основу для решения этой увлекательной задачи» [28, стр. 104].

С 1911 г. наряду с Эйнштейном, но с иных позиций, теорию гравитации разрабатывали Абрагам, Нордстрем, Ми.

В 1914 г. Коттлер рассматривал системы отсчета, движущиеся с ускорением. В 1915 г. Гильберт пришел к существенным результатам, близким к результатам Эйнштейна.

Борн и Фоккер в наиболее распространенных журналах того времени «*Physikalische Zeitschrift*» и «*Philosophical Magazine*» знакомят физиков с новейшими результатами Эйнштейна периода поисков общей теории относительности, уравнения которой удовлетворяли бы условиям ковариантности. 1916 г. ознаменовался крупнейшими достижениями: была обнародована общая теория относительности. В том же году Шварцшильд решил на основе теории Эйнштейна задачу сферически-симметрического поля. Лоренц применил принцип Гамильтона в общей теории относительности. В 1917—1918 гг. работы Леви-Чивита, Вейля, Лауэ, Клейна, Шредингера и др., были посвящены как математическим вопросам теории, так и ее принципиальным аспектам.

Эддингтон продолжал работы, начатые им в 1916 г. В 1920—1923 гг. появился ряд работ Эддингтона, Рейхенбехера, Е. Форсайта, Зарембы, Вейля, Лауэ, Керра, Леви-Чивита, Зильберштейна Л., Пенлеве, Ланчоса К., Ферми, Бриллюэна М., Картана Е., наметивших разработку многочисленных проблем, связанных с теорией относительности. Признавая исходные моменты теории, не претендуя на изменение полученных Эйнштейном

уравнений тяготения, они устраняли трудности в вопросах энергии-импульса гравитационного поля, сложности решений ее уравнений в общем виде.

Общее число работ к 1924 г. стало внушительным (около 200). Ученые многих стран активно приобщались к новой тематике. На основе теории относительности делается ряд попыток постановки и решения космологических проблем.

В 1922 г. появилась работа Фридмана, наметившая коренной перелом в релятивистской космологии.

С 1925 г. Эйнштейн обращается к проблемам единой полевой теории тяготения и электричества, и им посвящены главным образом последующие работы. Работы по общей теории не были оставлены им. В 1926 г. он публикует работы «Неевклидова геометрия и физика» и «О формальном отношении римановского тензора кривизны к уравнениям гравитационного поля». В 1927 г.— «Новые опыты по влиянию движения Земли на скорость света» и впервые в двух работах поставлен вопрос о связи уравнений поля и уравнений движения; вопрос этот в дальнейшем многократно анализировался Эйнштейном.

В 1933 г. в статье «Некоторые замечания о возникновении общей теории относительности» Эйнштейн писал: «Я охотно принял предложение рассказать об истории своей научной деятельности. Разумеется, не потому, что мне хотелось бы всхвалять свой труд! Ведь чтобы писать об истории работы другого человека, требуется понимание процесса его мышления; этого гораздо легче добиться профессиональным историкам. Объяснить же ход своих собственных мыслей прежних лет, конечно, намного легче. Здесь автор находится в несравненно более выгодном положении, чем кто-либо другой; упускать такую возможность вовсе не значит проявлять скромность» [28, стр. 404].

Схематизируя высказывания Эйнштейна, можно сказать, что провозглашение в 1905 г. равноправия всех инерциальных систем для формулировки законов природы поставило со всей остротой вопрос о более всеобъемлющем равноправии систем координат.

Относительный смысл должен быть придан ускорению в той же мере, как он придан скорости.

Эйнштейн сделал первый шаг на пути решения поставленной задачи, рассматривая закон тяготения в рамках специальной теории относительности. Отказ от понятия абсолютной одновременности приводил к необходимости отыскивать полевой закон тяготения, поскольку непосредственное действие на расстоянии нельзя было естественным образом совместить с новым представлением об одновременности.

«Конечно,— пишет Эйнштейн,— проще всего было сохранить лапласов скалярный потенциал тяготения и дополнить уравне-

ние Пуассона производной по времени так, чтобы удовлетворить требованиям специальной теории относительности. Следовало также привести в соответствие со специальной теорией относительности и закон движения материальной точки в гравитационном поле. Путь к этому был не столь очевиден, поскольку инертная масса тела могла зависеть от гравитационного потенциала. Этого даже следовало ожидать в силу закона инерции энергии» [28, стр. 404].

Исследования Эйнштейна привели его к результату, вызвавшему у него глубокое недоверие, поскольку его теория приводила к выводу, что ускорение падения зависит от горизонтальной скорости и, следовательно, от внутренней энергии системы. Эйнштейн вступил на новый путь, отказавшись от попытки рассматривать проблему гравитации в рамках специальной теории относительности. Не зная результатов опытов Этвеша, он ищет ключ к решению проблемы тяготения в равенстве инертной и тяжелой массы. «Если бы этот закон выполнялся для любых явлений («принцип эквивалентности»), то это указывало бы на то, что принцип относительности должен быть распространен на неравномерно движущиеся системы координат, если стремиться к естественной теории гравитационного поля. Подобные размышления занимали меня с 1908 по 1911 г., и я старался вывести из них конкретные следствия, о которых я не предполагал говорить здесь» [28, стр. 404—405].

Поиски естественной формулировки принципа эквивалентности привели Эйнштейна к выводу, что реальный физический смысл имеют не дифференциалы координат, а соответствующая им риманова метрика. Этим были заложены основы общей теории относительности.

«Однако остались нерешенными еще две проблемы. 1) Если уравнения поля выражены в терминах специальной теории относительности, то как перенести их на случай римановой метрики?

2) Каковы дифференциальные уравнения, определяющие саму риманову метрику (т. е. $g_{\mu\nu}$)?» [28, стр. 406]. Над этими проблемами Эйнштейн работал со своим другом Марселем Гроссманом с 1912 по 1914 г. Математические методы для решения первой проблемы существовали в абсолютном дифференциальном исчислении Риччи и Леви-Чивита, для решения второй проблемы они обратились к римановскому тензору кривизны. Эйнштейну, весьма близкому в то время к правильным уравнениям гравитационного поля, казалось, что закон тяготения, инвариантный относительно произвольных преобразований координат, несовместим с принципом причинности. «Это заблуждение стоило мне двух лет чрезвычайно тяжелой работы, пока я, наконец, не убедился в этом в конце 1915 года и нашел связь теории с данными астрономических наблюдений, после чего я с раскаянием вернулся к римановой кривизне» [28, стр. 406].