

Список литературы не претендует на то, чтобы быть избранной библиографией наиболее интересных книг и работ по ОТО, — это всего лишь те книги и статьи, которые были использованы при чтении лекций и написании пособия, с небольшими дополнениями, относящимися либо к последним достижениям, либо предназначенными для расширения круга интересов. Все упоминающиеся в пособии данные наблюдений содержатся в книге Уилла [13]. Классические работы, упомянутые в разд. 1.1 указаны явно или упоминаются в трудах Эйнштейна [1] и книгах Паули [4], Синга [6] и Мизнера, Торна и Уилера [8]. Хорошее изложение ранней истории ОТО имеется в книге Визгина [2]. В сборнике статей [10], изданном к 100-летию со дня рождения Эйнштейна, содержатся переводы наиболее фундаментальных работ по ОТО за 60 лет, прошедших с момента создания теории.

Авторы очень признательны Б.В. Медведеву, внимательно прочитавшему рукопись первого издания пособия, за многочисленные критические замечания, которые мы в меру сил и понимания постарались учесть. Мы благодарны В.П. Визгину за обсуждение истории ОТО, Л.Б. Окуню за ряд полезных замечаний, а также Е.Д. Жижину за любезно предоставленное право воспользоваться его записями лекций И.Ю. Кобзарева. С особым чувством вспоминались при подготовке этого издания глубокие замечания Я.Б. Зельдовича, сделанные им по поводу первого издания пособия.

## 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОТО

### 1.1. Исторический обзор

Работа Эйнштейна 1905 года, в которой была сформулирована частная теория относительности (частная ТО), с идейной стороны завершила развитие классической электродинамики. Стало ясно, что уравнения Максвелла-Лоренца описывают новый тип физической системы — классическое электромагнитное поле в пустом пространстве, взаимодействующее с заряженными частицами, причем кинематика такой системы есть кинематика частной ТО. Построение адекватной математической формулировки, использующей четырехмерное инвариантное действие и приводимой сейчас в учебниках, было начато независимо от Эйнштейна работами А. Пуанкаре в 1905 г. и вскоре завершено в трудах Планка, Минковского и др.

Задолго до того, как начала развиваться теория электромагнитных взаимодействий, Ньютон построил небесную механику (1687 г.), основанную на представлении о дальнедействии тяготения. Как до, так и после Ньютона (в том числе, и им самим) делались попытки построить механическую модель тяготения, в которой не использовалось бы дальнедействие. Построив

систему уравнений поля для электродинамики, Максвелл попытался этим же методом исключить дальноедействие из гравитации, но не достиг успеха. Попытки такого рода производились и в последующий период. Положение существенно изменилось после появления частной ТО, так как ньютоновская теория тяготения вообще была с ней несовместима. Ряд попыток описать тяготение с помощью запаздывающих потенциалов был предпринят Пуанкаре, Минковским, Лоренцом и Зоммерфельдом в 1905–1910 гг. В частности, уже тогда надеялись, что модернизированная теория объяснит прецессию перигелия Меркурия.

В 1907 г. Эйнштейн попытался рассмотреть поле тяготения, опираясь на кинематику частной ТО и принцип эквивалентности, а с появлением его статьи "О влиянии силы тяжести на распространение света" в 1911 г. началось быстрое движение вперед в построении теории тяготения. В нем участвовали также Абрагам, Ми, Нордстрем и др. Разрабатывая альтернативные варианты, они внесли важный вклад в развитие теории (в частности, Абрагам уже в 1912 г. впервые попробовал построить систему уравнений для поля тяготения).

Задача, поставленная Эйнштейном в 1907 г., была разрешена им в 1915 г., когда в двух работах, доложенных на заседании Прусской Академии Наук в Берлине 18 и 25 ноября 1915 г., были сформулированы принимаемые сейчас большинством теоретиков уравнения для гравитационного поля в пустоте,  $R_{ik} = 0$ , и при наличии источников,  $R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = \delta\delta G_{ik}^T$  [1]. В последний момент в развитии предложенной Эйнштейном тензорной теории тяготения принял также участие Гильберт. Независимо от Эйнштейна и даже раньше него он также получил правильную форму уравнений гравитационного поля при наличии источников (доложено в Геттингене 20 ноября 1915 г.). Подробный, хорошо документированный рассказ об истории возникновения ОТО содержится в книге В.П. Визгина [2].

Основные наблюдаемые следствия ОТО были обнаружены либо в начальный период развития теории, либо в период 1915–1925 гг. Большинство эффектов рассчитано самим Эйнштейном (красное смещение — 1907 г., отклонение света в поле Солнца — 1915 г., прецессия перигелия Меркурия — 1915 г., гравитационные волны — 1916 г.), геодезическая прецессия гироскопа указана де Ситтером (1916 г.), правильный расчет этого эффекта для круговой орбиты принадлежит Фоккеру (1921 г.). Сравнительно недавно к этому списку эффектов было добавлено запаздывание сигналов при прохождении их мимо Солнца (Шапиро, 1964 г.).

Достаточно полный анализ основ теории был сделан в те же первые 10 лет ее существования. Даже сейчас мало что можно добавить по существу к изложению классической статьи Эйнштейна "Основы общей теории относительности" (1916 г.) и к обзору Паули "Теория относительности" (1921 г.) [4]. Наиболее важным шагом вперед было рассмотрение де Сит-

гером (1916–1917 гг.) и Эйнштейном (1917 г.) Вселенной в целом на основе уравнений ОТО. За этим последовало открытие Фридманом нестационарных решений уравнений ОТО (1922 г.). После обнаружения на опыте космологического расширения, описанного Фридманом, и последующих подтверждений следствий, вытекающих из космологии расширяющейся Вселенной, работы А.А. Фридмана легли в основу наших представлений о Вселенной.

Другим важным достижением был анализ сингулярных решений, начатый Эддингтоном (1924 г.) и Леметром (1933 г.) и приведший к предсказанию черных дыр, по-видимому, уже обнаруженных астрономами.

В основном, наблюдаемые эффекты ОТО, которые обсуждаются сейчас, относятся к перечисленным выше. Если говорить о классических эффектах, рассчитанных еще Эйнштейном, то они были либо уже известны из наблюдений, либо вскоре обнаружены экспериментально (за исключением гравитационных волн, ждущих своего прямого обнаружения и сейчас; существуют, правда, убедительные косвенные свидетельства существования гравитационных волн, полученные астрономами при изучении двойных систем). Именно эти эффекты, а также немногие другие, измеряются в наши дни или будут измерены в скором времени. Основной результат семидесяти прошедших лет — увеличение точности, с которой теория согласуется с наблюдениями, с 20–30% до 1%. С такой точностью сомнений в правильности ОТО в настоящее время нет [13] .

Существует мнение, что в ОТО много неясного. Нам кажется, что это не так, поскольку похоже, никогда не возникало сомнений в том, какой результат предсказывает ОТО для реально осуществимых наблюдений и опытов.

Конечно, имеется класс проблем, где трудности реальны: уравнения ОТО нелинейны, в сильных полях эволюция приводит к сингулярностям, где поле становится бесконечным и теория теряет применимость; по всей видимости, здесь становятся существенными квантовые эффекты. Другой "болезнью" ОТО является существование решений с замкнутыми времениподобными геодезическими, что означает нарушение причинности в ее обычном понимании. Этому вопросу посвящено много работ, следовавших за пионерской работой Геделя [20], в том числе [21], где даны ссылки на другую литературу, и недавний цикл работ К. Торна, И.Д. Новикова и др [22]

Вероятно, можно утверждать, что для слабых полей наиболее интересные результаты ОТО уже получены и теория завершена. Новых интересных результатов можно ожидать в двух областях: в анализе решений, описывающих пространство-время с топологией, отличной от псевдоевклидовой, типа черных дыр и космологических решений, и в изучении квантовых эффектов. В этих областях теория граничит с неизведанным. До каких пределов применимы уравнения ОТО и каковы правильные методы их

квантования, сейчас неизвестно. Развиваемые в последние годы теории супергравитации и суперструн, с которыми связываются амбициозные надежды на построение единой теории всех взаимодействий в природе, пока еще не привели к осязаемым физическим результатам. Мы не будем касаться этих вопросов. Некоторое представление о них можно получить из книг [12, 14, 15, 18].

Если избегать сингулярностей и квантовых эффектов, то ОТО, в принципе, столь же простая и ясная теория, как электродинамика. Это тоже классическая теория поля, близкая по структуре электродинамике; в этом смысле их параллельное изложение в классическом учебнике [7] очень естественно.

При изучении ОТО возникают трудности, связанные с тем, что поле тяготения надо рассматривать не в псевдоевклидовом (плоском) пространстве-времени Минковского (как электромагнитное), а в искривленном пространстве Римана. Объективно геометрия Римана несколько сложнее геометрии Евклида, но, в принципе, вполне ясна; однако обычно она не изучается физиками в достаточном объеме и необходимость преодолеть непривычный математический аппарат затрудняет восприятие ОТО. Уничтожить эту трудность нельзя, но, излагая элементы римановой геометрии, мы будем стараться по крайней мере подчеркнуть ее интуитивные и наглядные стороны, с тем чтобы понятия риманового тензора, связности и т.п. ассоциировались бы не просто с увешанными латинскими и греческими индексами буквами, а с геометрическими образами, допускающими не только формально-вычислительную, но и наглядно-геометрическую трактовку, иногда дающую возможность получить ответ кратчайшим путем.

В том что касается обозначений и выбора метрики, мы следуем последнему (1988 г.) изданию "Теории поля" Ландау и Лифшица [7]. Везде далее латинские индексы пробегают значения 0, 1, 2, 3, а греческие индексы — значения 1, 2, 3. Метрический тензор пространства Минковского  $\eta_{ik} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ , причем выполнено соотношение  $\eta_{in} \eta^{nk} = \delta_i^k$  (где  $\delta_i^k$  — символ Кронекера). В основном мы будем пользоваться системой единиц, где скорость света  $c = 1$ . Ньютоновская гравитационная постоянная будет обозначаться  $G$ , она равна:

$$G = (6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 / (\text{г} \cdot \text{с}^2).$$

Заметим, что точность, с которой известна гравитационная постоянная, заметно ниже, чем точность, с которой известны другие мировые константы ( $10^{-8}$  для  $c$ ,  $10^{-7}$  для  $\alpha = e^2 / 4\pi \hbar c$  и т.д.).

### 1.2. Метрика пространства-времени в ОТО. Принцип эквивалентности

Со времен Галилея известно, что движение массивного тела в поле тяжести зависит только от начальной скорости (но не от внутренних характеристик тела) и траектории всех тел с заданной скоростью искривлены в