



УДК 530.12: 531.51

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ – ВЗГЛЯД ЧЕРЕЗ 100 ЛЕТ

А.М.Баранов*

Теория относительности занимает особое место в современной физике, являясь наряду с квантовой теорией детищем XX столетия, зачастую стимулируя новые научные разработки и обосновывая фундаментальные положения физики. В статье кратко отмечен вклад Красноярской гравитационной группы в развитие общей теории относительности и гравитации.

Для физики 2005 г. – год юбилейный, так как исполняется 100 лет со времени создания специальной теории относительности (СТО) и 90 лет – общей теории относительности (ОТО) – релятивистской теории гравитации, справедливой при скоростях, близких к скорости света, и плотностях вещества в миллион миллиардов раз превышающих плотность воды. Теория относительности, как и квантовая теория, заняла прочное место в фундаменте современной физики.

Через сто лет полезно оглянуться назад и окинуть взглядом прошедшие десятилетия с точки зрения не только того, что было сделано, но и попытаться оценить вклад той или иной теории в науку в целом. XX век подарил человечеству две основополагающие теории, оказавшие огромное влияние как на весь ход исторического развития, так и на всемирный научный и технический прогресс. Это квантовая теория, давшая начало квантовой механике и квантовой теории поля, и теория относительности: специальная (СТО) и общая (ОТО). У истоков обеих теорий стоял Альберт Эйнштейн.



А.Эйнштейн (1879-1955)
(рис. автора, 1969 г.)

Однако был еще и девятнадцатый век: век создания Майклом Фарадеем (1791-1867) и Джеймсом Максвеллом (1831-1879) электромагнитной теории, нашедшей столь широкое практическое применение в XX и XXI вв. (в том числе повседневное через телевидение, радио, телефонную связь, включая сотовую, компьютеры, Интернет). Без этой теории не было бы и теории относительности, т.к. теория Максвелла по своей сути релятивистская теория. Здесь мы находим лишь подтверждение тому, что любое развитие (и в теории тоже) проходит путь от более простого к более сложному, опираясь на предыдущее. О месте той или иной теории в физике трудно говорить без указания того влияния (прямого и косвенного), которое она оказала как на теоретическое развитие других разделов физики, так и на их практическое применение, включая совершенствование физического эксперимента. Вместе с Галилео Галилеем (1564-1642) закончилась эпоха феноменологического развития физики, и с Исаака Ньютона (1643-1727) началось развитие физики как точной науки, базирующейся на дифференциальном и интегральном исчислениях, столь успешно применяемые впоследствии многими механиками и физиками вплоть

до сегодняшних дней¹. Еще Г. Галилей сформулировал все три закона механики, которым И. Ньютон придал математический смысл, особенно второму закону, известному как второй закон механики. Он записал его в таком виде, что эта запись оказалась пригодной через 200 лет для использования и в специальной теории относительности (СТО) или, как говорят, этот закон в исходной записи является форм-инвариантным относительно релятивистских (лоренцевских) преобразований².

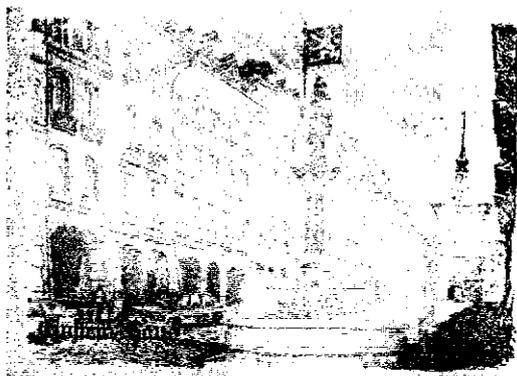
* © А.М.Баранов, bam@lan.krasu.ru, Красноярский государственный университет, 2005.

¹ Справедливости ради необходимо отметить, что независимо от И. Ньютона дифференциальное и интегральное исчисления были разработаны еще и Готфридом Лейбницем (1646-1716).

² Другими словами, сохраняется форма записи уравнения в других переменных, к которым были применены преобразования. Форм-инвариантность уравнения или закона относительно какого-либо класса преобразований называется еще ковариантностью.

Здесь небезынтересно было бы отметить удивительный исторический факт, связанный с рождением и смертью упомянутых выше крупнейших физиков. И.Ньютон, родившийся ровно через год после смерти Г. Галилея, оказался основоположником новой эпохи в развитии физики, той физики, которую мы сегодня называем классической. Именно он более 300 лет назад сформулировал закон Всемирного тяготения, согласно которому планеты движутся вокруг Солнца, а тела падают на Землю. Дж. Максвелл — создатель первой полевой теории: теории электромагнитного поля, умер в 1879 г., и в том же году родился А. Эйнштейн — автор нелинейной полевой теории гравитационного поля (1915), явившейся обобщением ньютоновской теории тяготения.

Цюрихский университет дважды отвергал докторскую диссертацию А. Эйнштейна (1902 и 1905 гг.), расценив ее как посредственную [1]. Во второй раз была представлена работа по специальной теории относительности, 100-летие которой сегодня и отмечаем. Третья попытка увенчалась, наконец, успехом, но к этому



Изображение дома, где проживал в 1905г. Альберт Эйнштейн в Берне (Швейцария). (Копия рис. из квартиры-музея в Берне любезно предоставлена выпускником физического факультета КрасГУ Д.А. Барановым)

времени А.Эйнштейн уже не нуждался в докторской степени, поскольку стал всемирно знаменит. Сегодня в Берне (Швейцария) есть квартира-музей А. Эйнштейна, как раз там, где он написал свою знаменитую работу по СТО. Общая теория относительности, созданная им через 10 лет, также была задумана в Берне.

В течение всего XX в. ученые проверяли, претворяли в жизнь и внедряли в практику идеи, вытекающие из работ Эйнштейна. Установленная им в 1905 г. взаимосвязь между энергией и массой $E = mc^2$ (знаменитая формула Эйнштейна), как известно, послужила ключом (вместе с открытием искусственного деления ядер урана) к созданию атомной бомбы и атомных электростанций и стало основой всего последующего развития физики.

Именно связь энергии, массы покоя и импульса привела П. Дирака (1902-1983) к мысли о существовании античастиц. СТО стала мощным инструментом современной теории элементарных частиц. Благодаря СТО оказалось возможным получение и изучение новых элементарных частиц в современных ускорителях, что, в частности, необходимо для понимания происходившего во

время Большого Взрыва, положившего начало нашей Вселенной. Эффект замедления времени (часов) был подтвержден как на основе распада элементарных частиц, так и с использованием искусственных спутников Земли.

ЭФИР И ЕГО РОЛЬ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ

К сожалению, широко распространено мнение, что теория относительности не оказала заметного влияния на физику XX в. Однако это не совсем так. Возьмем, к примеру, специальную теорию относительности. К началу XX в. благодаря созданию электромагнитной теории и записи правильных уравнений поля (уравнений Максвелла) был поставлен ряд вопросов, касавшихся в основном существования всемирного эфира — некоей среды, в которой, как предполагалось на протяжении столетий, движутся физические тела и передаются различные физические возмущения (подобно тому, как в воздухе происходит распространение звука). Еще Рене Декарт (1596-1650) считал, что существует тончайшая материальная среда — **ЭФИР**, заполняющая все мировое пространство. Постепенно по мере открытия ряда физических законов и явлений гипотеза эфира подверглась значительной модификации, чтобы удовлетворить им³. В частности, дело дошло до того, что пришлось ввести атомарное строение эфира с атомами, обладающими рядом свойств, не всегда совместимых между собой, но позволяющих объяснить существующие к тому времени физические явления (включая электромагнетизм и гравитацию). После того, как Дж. Максвелл установил равенство между скоростью света и скоростью распространения электромагнитных возмущений, стали говорить о **мировом эфире**. В итоге к последней четверти XIX в. вся физика объяснялась на основе свойств эфира [2], а сам эфир приобрел такие свойства, что возникла настоятельная потребность его обнаружения из-за ряда несоответствий. Например, из-за невыполнимости для уравнений Максвелла принципа относительности, установленного Галилеем для классической механики, возникла мысль о существовании привилегированной системы отсчета, которую и связали с неподвижным мировым эфиром. Поэтому еще в 1875 г. Дж. Максвелл предложил способ обнаружения эфира, связанный с тем, что физическое тело, двигаясь сквозь эфир, должно обдуться

³ Ситуация очень напоминала положение с эпициклами, введенными до Иоганна Кеплера (1571-1630), чтобы теоретически объяснить видимое движение планет через движения по окружностям. Еще древние греки сформулировали догмат о равномерном движении по окружности. Поэтому чем больше открывалось фактов, связанных с движением планет, тем изощреннее становилась теория эпициклов, вводя все новые комбинации последних. Лишь у И. Кеплера этой теории не нашлось места.

эфирным ветром, подобно тому, как это происходит при быстрой езде в неподвижном воздухе. Используя эту идею, Альберт Майкельсон (1852-1931) попытался поставить в 1882 г. эксперимент по обнаружению эфирного ветра. Лишь один физик, Эрнст Мах (1838-1916), основываясь на полученном А. Майкельсоном отрицательном результате, предложил отбросить всякое представление об эфире. Однако А. Майкельсон (теперь уже совместно с Э. Морли) упорно продолжал совершенствовать эксперимент. Другие физики, Джордж Фицджеральд (1851-1901) и Хендрик Лоренц (1853-1928), в 1892 г. независимо друг от друга хотели совместить отсутствие в эксперименте эфирного ветра с новой гипотезой о сокращении размеров физических тел в направлении движения сквозь эфир в отношении

$$l/l_0 = \sqrt{1 - V^2/c^2}, \quad (1)$$

где l — длина движущегося относительно эфира со скоростью V тела, l_0 — длина тела в сопутствующей (собственной) системе отсчета, c — скорость света в вакууме. Дж. Фицджеральд объяснял сокращение размеров предмета тем, что эфир, сопротивляясь движущемуся сквозь него физическому телу, деформирует его. Х. Лоренц давал аналогичную интерпретацию, учитывая, однако, что электромагнитные силы суть напряжения эфира, а все тела состоят из атомов, взаимодействующих электромагнитным образом. При этом в соответствии с неудачей эксперимента Майкельсона-Морли и постоянством скорости света оба предложили еще гипотезу замедления времени, дополняющую эффект сокращения размеров тел,

$$\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - V^2/c^2}, \quad (2)$$

где Δt — промежуток времени, измеренный по движущимся относительно эфира часам, а Δt_0 — промежуток времени, отсчитываемый часами, покоящимися относительно абсолютного эфира. Такой подход позволял, с одной стороны, сохранить абсолютный эфир, а с другой, — уравнения электромагнитного поля (уравнения Максвелла) в отличие от уравнений классической механики оказывались форм-инвариантными относительно преобразований пространства и времени, приведенных выше и названных преобразованиями Фицджеральда-Лоренца.

Итак, эфир продолжал существовать в физике, а теория Фицджеральда-Лоренца с изменяющимися длиной и временем казалась большинству физиков если не абсурдной, то, по крайней мере, очень странной, так как позволяла полностью скрыть присутствие эфира.

Это длилось до 1905 г. пока не появилась работа А. Эйнштейна "К электродинамике движущихся тел" ([3], т.1, с.7), которая заложила основы специальной теории относительности. В этой работе было впервые показано, что можно обойтись без понятия эфира и сохранить в физике постоянство скорости света вместе с принципом относительности, не ограничивая применимость последнего только механическими явлениями. До сих пор в ряде учебников пишется, что СТО опровергла существование эфира, хотя на самом деле ей просто не понадобилась эта гипотеза.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ МЕСТО В ФИЗИКЕ

Именно эта работа А.Эйнштейна и последующие позволяют нам говорить о том месте, которое СТО стала занимать в физических теориях XX в. Прежде всего, ей удалось отказаться от гипотезы эфира. При этом были сформулированы два постулата: специальный принцип относительности, обобщающий механический принцип относительности Г. Галилея на произвольные физические явления, и принцип независимости скорости света в вакууме от скорости источника света в инерциальной системе отсчета наблюдателя. Установив новые пространственно-временные отношения (относительность длины, времени и одновременности событий), СТО обобщила на случай движения со скоростями, близкими к скорости света в вакууме, законы классической физики. Другим важным итогом этой теории оказалось введение требования лоренц-инвариантности ко всем создаваемым физическим теориям, то есть любая физическая теория должна теперь быть инвариантной относительно преобразований Лоренца (как, например, теория электромагнитного поля). В рамках СТО Герману Минковскому (1864-1909) удалось объединить пространство и время, введя единое четырехмерное пространство-время⁴. Это позволило совсем с другой стороны взглянуть на физику в целом. В частности, выяснилось, что энергия и импульс суть компоненты единого четырехмерного вектора энергии-импульса. Более того, плотность энергии, плотность импульса и давление оказались частями единого тензора энергии-импульса. Кроме того, связь энергии E , импульса p и массы покоя m_0 с помощью соотношения

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (3)$$

⁴ Не все знают, что еще в 1904 г. А. Пуанкаре (1854-1912) формально ввел четырехмерное пространство-время.

привела Поля Дирака (1902-1983) к мысли о существовании античастиц, что и было блестяще подтверждено в экспериментах. Построенная П. Дираком теория дырок⁵, сформулированная вначале для электронов, легла в основу теории физического вакуума, влияние которого на физические явления было обнаружено в экспериментах Уиллиса Лэмба (1913) (лэмбовский сдвиг линий) и Хендрика Казимира (1909). Именно указанное выше соотношение для энергии заставило отказаться от представления о вакууме как состоянии, в котором отсутствуют частицы. П. Дираку также удалось построить релятивистскую теорию движения электрона, соединив воедино СТО, квантовую механику и понятие спина⁶.

Эффект замедления времени был проверен на искусственных спутниках Земли и позволил, например, создать глобальную навигационную систему (GPS) для определения географического местоположения на Земле.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИКУ

Однако принципы СТО, распространяясь на механические и электромагнитные явления, не захватывали теорию гравитации, которая стояла особняком, демонстрируя тем самым своеобразный изъян теории. Крупнейшим в то время физикам, Х.Лоренцу, Макс Планку (1858-1947), это не казалось странным ввиду малого влияния на Земле гравитационных сил на физические процессы и явления. Однако в Солнечной системе имелись некоторые факты астрономических наблюдений, которые на протяжении столетий не удавалось объяснить. Одним из них было отклонение луча света гравитационным полем Солнца, когда луч света от далекой звезды проходил вблизи солнечного диска. Еще И.Ньютон, введя гипотезу о корпускулах (частичках) света, на основе своей теории тяготения вычислил, что свет вблизи Солнца отклоняется на угол примерно в $0,87''$, а наблюдения давали около $1,7''$. Вплоть до XX в. не удавалось теоретическим путем получить согласие с астрономическими наблюдениями, несмотря на все усилия астрономов. Другой факт, омрачавший настроение от сознания неполного совершенства строения здания классической физики, — эффект смещения перигелия Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты. Если бы гравитационное поле, в котором движутся планеты, описывалось бы гравитационным потенциалом U , обратно пропорциональным расстоянию r от Солнца, $U \propto 1/r$ (потенциал кулоновского типа), а сами планеты представляли бы собой материальные точки, то их движение происходило бы по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце, как это и предписывается первым законом Кеплера. При этом по отношению к фокусу, где расположено Солнце, имеются две точки поворота, представляющие собой точки наименьшего и наибольшего удаления. Ближайшая носит название перигелия орбиты, а удаленная — афелия. В случае точного выполнения закона Всемирного тяготения при повторных оборотах вокруг Солнца планета проходит через те же самые точки перигелия и афелия. В действительности же мы не имеем такой идеальной картины, в частности, из-за того, что ни планеты, ни Солнце не являются материальными точками. Кроме того, планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн) вносят дополнительные возмущения в результирующее гравитационное поле. Поэтому в реальности мы наблюдаем хоть и малые, но заметные отличия от Всемирного закона тяготения, связанные с малыми различными возмущениями $\varepsilon(r, t)$, вообще говоря, зависящими как от расстояния, так и от времени t . Эти возмущения можно учесть в записи гравитационного потенциала, представив его в виде $U \propto 1/r + \varepsilon(r, t)$, что вместе с законом сохранения момента импульса приводит к медленному повороту эллипса⁷, по которому движется планета. В итоге траектория представляет собой розетку (не обязательно замкнутую), при этом точки перигелия и афелия с каждым оборотом планеты вокруг Солнца смешаются на некоторый угол, то есть планета фактически при каждом обороте проходит другие точки перигелия и афелия. Астрономы в течение столетий научились рассчитывать это смещение, но их вычисления, например, по смещению перигелия Меркурия немного не совпадали с наблюдениями. Эта разница для Меркурия за 100 лет составила около $43''$. Величина небольшая, но она все же вызвала обеспокоенность, так как не находила объяснения в классической физике.

С другой стороны, еще Г. Галилей экспериментально доказал, что все тела вблизи поверхности Земли падают с одинаковым ускорением вне зависимости от массы тела⁸. Он впервые четко сформулировал поня-

⁵ Суть теории дырок составляют следующие положения. В состоянии вакуума все уровни с отрицательной энергией заполнены частицами, а уровни с положительной энергией свободны. При этом такое распределение частиц ненаблюдаемо и играет роль начала отсчета для физических величин. Энергетическая разность между отрицательными и положительными состояниями составляет $\Delta = 2mc^2$. Заполненный уровень с положительной энергией воспринимается наблюдателем как частица, а свободный уровень ("дырка") с отрицательной энергией — как античастица. Квант света с энергией, большей разности Δ , может возбудить вакуум и перевести частицу из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной, что отвечает процессу рождения пары частица-античастица.

⁶ Спин — собственный неуничтожимый момент импульса элементарной частицы, являющийся своеобразной меткой данной микрочастицы (квантовым числом) и измеряемый в единицах постоянной Планка. С классических позиций спин связывают с собственным "вращением", хотя в микромире таковое отсутствует.

⁷ Другими словами, происходит прецессия эллипса, и планета одновременно участвует в движении по эллипсу и повороте вокруг Солнца вместе с эллипсом.

⁸ Г. Галилею приписывают опыты по сбрасыванию различных тел с наклонной Пизанской башни. На самом же деле он проводил эквивалентные эксперименты с катящимися по наклонному желобу шарами.

тие ускорения и инерциального движения, которому И. Ньютон придал форму первого закона механики, исключив из галилеевского определения прямое указание на то, что такое движение справедливо в плоском пространстве, подготовив тем самым понимание использования этого закона в более общем случае – движении по геодезической линии, т.е. наискратчайшему пути в произвольном пространстве.

Открытый Г. Галилеем принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс⁹ проверялся неоднократно как самим И. Ньютоном, так и другими исследователями¹⁰. Из этого принципа следует, что силы тяготения пропорциональны инертной массе тела, так же как и силы инерции¹¹. Это обстоятельство навело в 1907 г. А.Эйнштейна на мысль [3, т.1, с.65] о существовании связи между силами тяготения и силами инерции, так как в некоторых случаях невозможно их различить (принцип эквивалентности Галилея-Эйнштейна, сыгравший фундаментальную эвристическую роль при создании общей теории относительности)¹².

Обычно этот принцип иллюстрируется на примере лифта, в который помещен наблюдатель с пружинным динамометром. Рассмотрим две ситуации. Пусть сначала лифт покоится в однородном гравитационном поле напряженности g ¹³. Наблюдатель, подвесив к динамометру некоторое тело, фиксирует наличие в кабине силового поля по растяжению пружины. Предположим, что теперь лифт находится в области, свободной от внешних гравитационных сил, где он равноускоренно движется с ускорением g под действием сил негравитационного происхождения (о чем наш наблюдатель и не догадывается). В кабине возникает однородное поле сил инерции с напряженностью, по величине равной g , и наблюдатель обнаруживает то же самое растяжение пружины динамометра, что и в предыдущем случае. Это означает, что, находясь в замкнутой лаборатории, наблюдатель опытным путем не сможет отличить, находится ли он в статическом однородном гравитационном поле или движется равноускоренно. Таким образом, если лифт будет свободно падать в однородном гравитационном поле, то поле сил инерции скомпенсирует силовое воздействие гравитационного поля и наблюдатель отметит наличие невесомости, а проведенные опыты в своей системе отсчета позволят считать ее инерциальной. Однако из-за неоднородности реальных гравитационных полей свободно падающую систему отсчета нельзя неограниченно продолжить на все пространство и на все моменты времени из-за наличия приливных сил. Поэтому описанная выше компенсация гравитационного поля полем ускорений возможна лишь в локальной области пространства для ограниченных промежутков времени, то есть в локально падающей (локально инерциальной) системе отсчета. Следовательно, несмотря на то, что на протяжении всей истории физики пользовались преимущественно инерциальными системами отсчета (ИСО), при учете реальных гравитационных полей необходимо отказаться от прежней их роли, заменив локально свободно падающими системами отсчета. Теперь первый закон механики может быть сформулирован как локальный и обобщен именно на такие системы отсчета.

После того, как в ноябре 1915 г. А. Эйнштейн записал окончательный вариант уравнений гравитационного поля¹⁴, и он сам в 1916 г. обнаружил, что его теория дает правильные значения для отклонения луча света вблизи Солнца и смещения перигелия Меркурия. Оказалось, что в классической теории гравитации эти эффекты невозможно правильно рассчитать, так как они определяются кривизной пространства-времени¹⁵. Таким образом, новая теория оказалась тесно связанной с геометрией пространства-времени: кривизной и метрическими соотношениями. К 80-м годам на основе проведенных серий экспериментов в пределах Солнечной системы по проверке классических опытов, подтверждающих правильность общей теории относительности, удалось установить, что из всех предлагавшихся в XX в. гравитационных теорий лишь теория Эйнштейна давала наименьшее расхождение с наблюдениями (около 1%). Другими словами, ОТО заняла место одной из основных физических теорий. Если же принять во внимание, что гравитационное поле, создаваемое материальными объектами негравитационного происхождения, несет информацию о самих этих объектах и может рассматриваться как слепок с них, то понятна та важность изучения гравитационных полей, которая появляется с установлением правильности этой теории. Еще более убедительное

⁹ Учет факта падения тел с одинаковыми ускорениями и открытый И.Ньютоном закон Всемирного тяготения позволяют получить это утверждение из второго закона механики, куда входит инертная масса, и закона тяготения, в котором присутствует гравитационная масса.

¹⁰ Сам И.Ньютон провел изящный эксперимент, позволивший выяснить, что период маятника не зависит от природы груза (точность 10^{-2}). Р.Этвеш (Венгрия, 1848-1919) в 1889-1908 гг. осуществил серию экспериментов по проверке равенства гравитационной и инертной масс, которые показали, что такое равенство выполняется с точностью до $5 \cdot 10^{-5}$. Аналогичную серию экспериментов в 1959-1963 гг. в США выполнил Р.Дикке (1916) с сотрудниками (точность составила 10^{-11}). В СССР В.Б.Брагинскому с сотрудниками в 1969 г. удалось увеличить точность до 10^{-12} .

¹¹ Силы инерции — силы, которые обнаруживает наблюдатель, находясь в инерциальной системе отсчета.

¹² На самом деле природа сил инерции и сил гравитации различна. Возникновение сил инерции не связано с наличием кривизны пространства-времени в отличие от сил гравитации. Поэтому сходство между ними чисто локальное.

¹³ Обычно такие условия предполагаются вблизи поверхности Земли.

¹⁴ Эти уравнения известны как уравнения Эйнштейна. Если появление ОТО было подготовлено всем ходом исторического развития классической физики, то возникновение ОТО на том временном промежутке — несомненная заслуга А. Эйнштейна, поставившего и решившего задачу о построении релятивистски инвариантной теории гравитации.

¹⁵ Стало совершенно ясно, что ни Н. Лобачевский (1792-1856), ни Б. Риман (1826-1866), ни другие исследователи не могли создать современную теорию гравитации, так как они пытались связать гравитацию с искривлением обычного (трехмерного) пространства, а не единого пространства-времени. Однако необходимо отметить их существенный вклад в создание условий появления такой теории.

подтверждение получила эта теория после открытия двойных пульсаров в 1974 г. Дж. Тейлором и Р. Халсом [4]-[6]. За 20 лет наблюдения за одной из таких двойных систем удалось установить, что эффект смещения периастра одного из объектов (аналог эффекта смещения перигелия Меркурия) составил за эти годы более 80° или почти 4° в год. На сегодня это наиболее убедительное доказательство справедливости ОТО вне Солнечной системы, дающее расхождение с теорией $\approx 0,4\%$.

В 1917 г. А. Эйнштейн показал, что новая теория допускает существование гравитационных волн¹⁶, аналогично тому, как теория Максвелла — электромагнитных волн. Из-за чрезвычайной малости эффектов, производимых гравитационными волнами, постановка проблемы обнаружения этих волн на Земле стала возможной лишь в 60-х годах XX столетия после появления достаточной экспериментальной базы. Хотя попытки экспериментальных групп в США (Дж. Вебер), СССР (В.Б. Брагинский) и других странах за последние 30 лет не увенчались на Земле успехом, они значительно продвинули технику и теорию физического эксперимента. Однако косвенное обнаружение гравитационных волн все же состоялось при наблюдениях все тех же двойных систем пульсаров, упомянутых выше [5]-[6]. Эту систему можно сравнить с вращающейся гантелью, которая согласно ОТО должна излучать гравитационные волны, а значит, терять энергию, как это происходит с физической системой при излучении ею электромагнитных волн. Такие потери были обнаружены в пределах 20 %-й ошибки наблюдений, что явилось еще одним доказательством справедливости ОТО.

Из всех попыток, связанных с обобщением теории Эйнштейна, необходимо упомянуть о подходе Теодора Калуцы (1885-1954) [7], оказавшем сильное влияние на исследования в области единой теории поля. В 1921 г. он предложил переписать уравнения Эйнштейна для пятимерного пространства-времени, введя еще одно пространственноподобное измерение. При этом все величины оказывались не зависящими от пятой переменной. Удивительный результат заключается в том, что эти уравнения объединяют в себе уравнения Эйнштейна и Максвелла для четырехмерия. Это подтолкнуло ряд исследователей (в том числе и А.Эйнштейна) на работу по созданию единой теории поля. Не последнюю роль эти идеи сыграли и в построении единой теории электрослабых взаимодействий (Ш.Гэшоу, С.Вайнберг, А.Салам). Примерно каждые 15 лет происходит возрождение интереса к теории Калуцы, которая продолжает и в наши дни будоражить умы исследователей. Здесь, в частности, можно упомянуть об одном обобщении, связанном с записью уравнений Максвелла в плоском пространстве-времени Калуцы и обнаружением магнитного заряда, силовые линии которого в нашем 4-мерном пространстве-времени задаются градиентом скалярной функции, являющейся пятой компонентой 5-мерного вектор-потенциала [8]. При этом электрический e и магнитный m заряды связаны между собой дуальными поворотами, определенными в двух 4-мерных подпространствах: Минковского и Евклида,

$$\times * e = m; \quad * \times m = -e. \quad (4)$$

Свое другое применение ОТО нашла в релятивистской астрофизике, где с ее помощью в 60-х годах было предсказано существование черных дыр¹⁷ — астрофизических объектов, обладающих настолько мощным гравитационным полем, что ни один материальный объект или сигнал не может вырваться из них наружу¹⁸. Эти предсказания стимулировали как астрономические наблюдения по поиску таких объектов во Вселенной, так и теоретические разработки по предсказанию свойств черных дыр (см., например, [9]-[10]). В начале 70-х годов были обнаружены первые кандидаты в черные дыры, то есть астрофизические объекты, по своим наблюдательным характеристикам подходящие на эту роль. К концу XX века черные дыры были обнаружены. Сегодня ряд спиральных галактик, включая нашу (Млечный путь), имеют в центре гигантские черные дыры до 150 млн солнечных масс. При этом вопрос о пределе их устойчивости остается открытым.

Другая проблема — это задача моделирования релятивистских звезд в рамках ОТО, в которых вещество обладает гигантскими плотностями и находится под действием сверхгигантских давлений. В числе многих попыток следует упомянуть об исследованиях по моделированию внутренних областей как статических звезд, включая электрически заряженные (см., например, [11]-[15]), так и излучающих релятивистских звезд с учетом радиационной сублимации (см., например, [16]-[17]).

Следующей областью физики XX в., где существенно сказалось влияние ОТО, оказалась космология — учение о Вселенной. Чтобы спасти классическую статическую модель Вселенной, А. Эйнштейну пришлось в свои уравнения ввести член, который впоследствии получил название λ — члена или космологической постоянной. Свое место в физике этот член занял совсем недавно, когда началось интенсивное теоретическое исследование теории и физики возникновения Вселенной: Большого Взрыва. Именно тогда пришло понимание того, что λ — член связан с физическим вакуумом — средой, из которой и родилась наша Вселенная. Эта среда обладает свойством упругости и отрицательным давлением p , которое связано с

¹⁶ С геометрической точки зрения гравитационные волны — «рябь» на «поверхности» пространства-времени.

¹⁷ Первые попытки в классической физике описать массивные объекты, с поверхности которых не может вырваться луч света, были предприняты Дж. Митчеллом в 1783 г. и П.С. Лапласом (1749-1827) в 1796 г.

¹⁸ Гравитационное поле черных дыр настолько изменяет структуру пространства-времени, что принцип причинности превращается в абсолютный закон.

Эта среда обладает свойством упругости и отрицательным давлением p , которое связано с положительной плотностью энергии ε как $p = -\varepsilon$ (уравнение состояния физического вакуума).

Однако не все были согласны с А.Эйнштейном по поводу теории статической Вселенной, обладающей не меняющейся со временем кривизной. Наиболее удачной попыткой следует считать создание в России в начале 20-х годов Александром Фридманом (1888-1925) моделей нестационарной изотропной Вселенной: открытой и закрытой, имеющих, соответственно, отрицательную и положительную кривизны [18, с.229-244]. Эти модели оказались в первом приближении правильно описывающими Вселенную. Однако решение вопроса о замкнутости или открытости нашей Вселенной осталось открытым до сегодняшнего дня из-за неопределенности наблюдательных данных по средней плотности Вселенной. Рассматривая все множество галактик как бесстолкновительную пыль, А.Фридман предсказал расширение нашей Вселенной, пропорциональное скорости разбегания галактик, которое и было сразу после его смерти обнаружено в серии наблюдений Эдвина Хаббла (1889-1953) (закон Хаббла), что явилось доказательством однородности Вселенной в больших масштабах. Точные модели, обобщающие фридмановскую открытую Вселенную на случаи наличия кроме вещества еще и равновесного излучения, излучения и объемной вязкости, были построены значительно позже [19]–[20]. Примером дальнейшего обобщения открытых космологических моделей может служить [21].

Еще в 1946-1948 гг. Джордж Гамов (1904-1968) предложил модель «горячей Вселенной», в рамках которой и предсказал существование реликтового электромагнитного излучения, остывшего с момента Большого Взрыва до 6 К. Его теория была подтверждена экспериментальным открытием в 1965 г. реликтового излучения с температурой в 3 К. В конце 70-х - начале 80-х годов к теории Большого Взрыва был проявлен повышенный интерес в связи с теорией Великого объединения взаимодействий. Возникла теория инфляционной Вселенной¹⁹ [22] которая позволила в рамках современных физических представлений описать эволюцию Вселенной. Здесь, как и в теории черных дыр, нашли свое применение две теории: современная теория гравитации и квантовая теория поля.

В числе исследований по самой структуре гравитационных полей, тесно связанной со структурой 4-мерного пространства-времени, следует отметить работы А.З. Петрова [23] по алгебраической классификации гравитационных полей. Эта классификация позволяет заранее выявить ряд свойств гравитационного поля, присущих данному алгебраическому типу. Кроме того, на основе этой классификации удалось обнаружить фазовые переходы между типами гравитационных полей ([24]–[27]), аналогичные фазовым переходам в конденсированной материи.

Одним из примеров таких фазовых переходов являются светоподобные пределы решений уравнений Эйнштейна для островных источников, когда скорость источников устремляется к скорости света, а масса покоя – к нулю. Сами такие светоподобные пределы оказываются точными решениями уравнений тяготения [28] – [32].

Другим примером могут служить исследования по генерации и конструированию статических сферически симметричных решений уравнений тяготения и связанного с этим изменением алгебраического типа гравитационного поля [33].

Распространением подхода Петрова на алгебраическую классификацию 4-мерных локально евклидовых пространств (где появляются двойные переменные вместо комплексных при классификации 4D локально псевдоевклидовых пространств) и на 5D пространства-времени типа Калуцы могут служить работы [34] и [35].

ОШИБКИ ЭЙНШТЕЙНА

А.Эйнштейн считал одной из самых своих больших ошибок это введение космологической постоянной [36]. В самом деле, удивительно, что он допустил тривиальную ошибку, введя эту постоянную. Космологическая постоянная действует подобно силе, которая увеличивается с расстоянием (например, сила инерции), в то время как обычные притягивающие гравитационные силы уменьшаются с увеличением расстояния. Хотя существует критическая плотность массы, при которой наступает баланс между этими силами, такое состояние неустойчиво. В итоге в 1917 г. А. Эйнштейн спас положение тем, что предположил статичность Вселенной, но не ее конечность. Поэтому введение космологической постоянной оказалось необходимым. Позднее, во второй половине XX в., оказалось, что космологическая постоянная Эйнштейна тесно связана с физическим вакуумом.

В единой теории поля (теории единого взаимодействия) у А. Эйнштейна была возможность воспользоваться идеей Калуцы–Клейна, основанной на введении пятого измерения, по которому пространство-время свернуто и поля оказываются периодическими по этой координате. Далее, распространяя эту идею на пространства большей размерности, чем пять, он должен был прийти к открытию полевой теории, сконструированной в 1954 г. С.Янгом и Р.Милсом, и ее обобщениям. Позже оказалось, что это части современных теорий сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. А. Эйнштейн, по-видимому, не мог предполо-

¹⁹ Инфляционная модель описывает очень быстрое (экспоненциальное) расширение Вселенной в первые мгновения после Большого Взрыва.

жить, что эти взаимодействия и гравитация могут быть как-то связаны, настолько они разные. В итоге лишь через десятилетия была создана единая теория электрослабого взаимодействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был сделан беглый обзор по тем основным моментам создания и открытий теории относительности, которые, на наш взгляд, оказали существенное влияние на развитие и становление современной физики и ее мировоззренческий характер. Надо отдать должное тому, что исследования как по специальной теории относительности, так и по общей теории относительности стимулировали физическую мысль и физический эксперимент на протяжении всего двадцатого столетия. В последние десятилетия ряд космологических открытий: реликтового электромагнитного излучения, пульсаров (включая двойные), квазаров, ячеистой крупномасштабной структуры Вселенной, черных дыр, а также попытки экспериментального обнаружения гравитационных волн – не только подтвердили выводы ОТО, но и вызвали большой интерес к этому чисто теоретическому ранее разделу физики. Кроме того, создание объединенной теории электрослабых взаимодействий возродило надежды на унификацию физических взаимодействий с участием гравитационных.

На теории относительности зиждется современная экспериментальная физика: в ускорителях на встречных пучках (коллайдерах) используется возрастание массы и увеличение времени жизни быстрых элементарных частиц, опыты с радиоактивными изотопами основаны на преобразовании массы в энергию.

По-видимому, первое серьезное использование теории относительности в пределах Солнечной системы в практических целях было сделано в 1988 г., когда проводились исследования кометы Галлея. Теория относительности была применена для навигационных целей по коррекции полета космических исследовательских аппаратов.

Другое, современное применение специальной и общей теории относительности связано с определением поправок для вычисления географических координат на местности пользователей системы GPS (глобальной навигационной системы), использующей систему околоземных спутников, которые оснащены атомными часами для точного измерения расстояний [37]. Доступные обычным пользователям GPS-приемники определяют положение на местности с точностью до 30 м. Для того чтобы точность была выше (т.е. погрешность составляла менее 15 м), координаты положения тела необходимо вычислять с учетом релятивистской поправки. Спутник движется со скоростью 14 тыс. км/ч, а атомные часы отстают (по сравнению с земными) на 7 мкс за сутки. С другой стороны, средний радиус орбиты спутника составляет 26 тыс. км, т.е. сила земного притяжения в 4 раза меньше, чем у поверхности Земли. Из-за этого атомные часы за сутки уходят («спешат») на 45 мкс. В итоге результирующее отставание за сутки составляет 38 мкс. Это означает необходимость введения поправки в системе GPS. В противном случае ошибка определения расстояния будет нарастать со скоростью не менее 11 км в сутки.

Несмотря на ряд неоспоримых достижений, связанных с теорией относительности, мы имеем еще много безответных вопросов, которые ждут своего решения в настоящем XXI в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стикс Г. Дети относительности / Г.Стикс // В мире науки. –2004. – С.24-29.
2. Баранов А.М. Основы теории относительности и гравитации: Математическое введение: учеб. пособие / А.М.Баранов – Красноярск : Краснояр. ун-т, 1987. – 91 с.
3. Эйнштейн А. Собрание научных трудов /А.Эйнштейн – М.: Наука, 1965. –Т. 1. – 700 с.
4. Халс Р.А. Открытие двойного пульсара / Р.А.Халс //УФН. -1994. – Т.164. – № 7. – С.743-756.
5. Тейлор Дж.Х (мл.) Двойные пульсары и релятивистская гравитация / Дж.Х.Тейлор (мл.) //УФН. -1994. – Т.164. – № 7. – С.757-764.
6. Уилл К.М. Двойной пульсар, гравитационные волны и Нобелевская премия / К.М.Уилл //УФН. -1994. – Т.164. – № 7. – С.765-773.
7. Калуца Т. К проблеме единства физики / Т.Калуца //Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сборник статей к 100-летию со дня рождения А.Эйнштейна. – М.: Мир, 1979. – С.529-534.
8. Баранов А.М. Алгебраическая классификация бивектора в плоском пространстве Калуцы и магнитный заряд / А.М.Баранов // Известия вузов. Физика.–1997. – № 1. – С.114-119.
9. Новиков И.Д. Физика черных дыр / И.Д.Новиков, В.П. Фролов. – М.: Наука, 1986. – 327 с.
10. Чандрасекар С. Математическая теория черных дыр / С. Чандрасекар. – М.: Мир, 1986. – Ч.1,2.
11. Баранов А.М. О новых подходах к моделированию статических звезд в ОТО / А.М. Баранов, М.В. Луконенко, С.Ф. Тегай, Д.А. Баранов // Теория и эксперимент в современной физике: Юбил. сб. научн. статей. – Красноярск: Краснояр. гос.ун-т, 2000. – С.63-72.
12. Baranov A.M. О подходе к моделированию статических звезд / А.М. Baranov, D.A. Baranov // Gravitation & Cosmology. – 1999. – V.5 – No.4 (Suppl.). – P.17-12.
13. Баранов А.М. Осцилляторный подход к описанию статической звезды с нейтральной и заряженной жидкостью / А.М. Баранов // Вестник Красноярского государственного университета (Физ.-мат. науки). – 2002. – № 1.– С.5-12.

14. Баранов А.М. Модель заряженного гравитирующего шара / А.М. Баранов, З.В. Власов // Вестник Красноярского государственного университета (Физ.-мат. науки). – 2005. – № 1. – С.4-11.
15. Баранов А.М. Моделирование статических звезд и метод Галеркина / А.М. Баранов, В.В. Прокофьев // Тезисы докл. XVI Междунар. летн. шк.-семинара по современ. пробл. теор. и мат. физики "Волга-16'2004" (XVI Петровские чтения, Казань, 22 июня-3 июля 2004 г.). – Казань, 2004. – С. 27.
16. Баранов А.М. О внутреннем источнике решения Вайдья / А.М. Баранов, Н.Н. Паклин // Известия вузов. Физика. – 1988. – № 3. – С.36-39.
17. Баранов А.М. Радиационная сублимация однородной релятивистской звезды / А.М. Баранов, Н.Н. Паклин // Известия вузов. Физика. – 1994. – № 10. – С.13-17.
18. Фридман А.А. Избранные труды / А.А. Фридман. – М.: Наука, 1966. – 462 с.
19. Баранов А.М. Сферически-симметричное светоподобное излучение и конформно-плоские пространства-времени / А.М. Баранов, Е.В. Савельев // Известия вузов. Физика. – 1984. – № 7. – С.32-35.
20. Баранов А.М. Точное решение для открытой Вселенной с вязкостью / А.М. Баранов, И.В. Жабрун, Е.В. Савельев // Известия вузов. Физика. – 1995. – № 1. – С.79-83.
21. Baranov A.M. Open Universe: Description by Mathieu Functions / A.M. Baranov, D.A. Baranov // Gravitation & Cosmology. – 2002. – V.8. – Suppl. II – P.12-13.
22. Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология / А.Д. Линде. – М.: Наука, 1990. – 275 с.
23. Петров А.З. Новые методы в общей теории относительности / А.З. Петров – М.: Наука, 1966. – 495 с.
24. Баранов А.М. Анализ гравитационных полей на основе классификации Петрова: их конструирование и композиция: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.02 / А.М. Баранов; – УДН им.П.Лумумбы. М., 1976. – 13 с.
25. Baranov A.M. Catastrophe Theory and Algebraic Classification of Gravitational and Electromagnetic Fields / A.M. Baranov // Abstracts of Contributed Papers of 10th Intern. Confer. on GRG. – Padova (Italy), 1983. – V.1. – P.174-175.
26. Баранов А.М. Алгебраические классификации пространств и физические модели в общей теории относительности: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.02 / А.М. Баранов; – Томский гос. ун-т. Томск, 1994. – 20 с.
27. Баранов А.М. Теория катастроф и алгебраическая классификация Петрова / А.М. Баранов // Сб. тезисов юбилейной научн. конфер. физического фак-та КГУ (200 лет Казанскому университету, Казань, ноябрь 2004). – Казань, 2004. – С.107.
28. Баранов А.М. Гравитационные поля «светоподобных» источников / А.М. Баранов // Ун-т дружбы народов им.П.Лумумбы. – М.: 1976, деп ВИНТИ СССР. – № 2631-76.
29. Баранов А.М. Светоподобный предел источника НУТ / А.М. Баранов // Гравитация и теория относительности. – Казань: КГУ. – 1987. – Вып. 24. – С.11-19.
30. Баранов А.М. Светоподобный предел решения Керра и конструирование светоподобной нити / А.М. Баранов // Известия вузов. Физика. – 1994. – № 10. – С.64-69.
31. Баранов А.М. Светоподобный предел шварцшильдподобного источника как катастрофа / А.М. Баранов // Гравитация и электромагнетизм. – Минск: Университетское, 1992. – Вып. 5. – С.27-31.
32. Baranov A.M. Lightlike limits of massive particles in general relativity as catastrophes // Proceedings of Intern. Conference "Physical Interpretations of Relativity Theory (PIRT-2005)" (Moscow (Russia): June-July, 2005). – Moscow-Liverpool-Sunderland, 2005. – P. 116-122.
33. Баранов А.М. Генерирование и конструирование статических сферически-симметричных решений уравнений тяготения / А.М. Баранов, Н.Н. Паклин // Известия вузов. Физика. – 1997. – № 6. – С. 5-9.
34. Баранов А.М. Алгебраическая классификация четырехмерных локально-евклидовых пространств / А.М. Баранов // Известия вузов. Физика. – 1994. – № 11. – С. 90-95.
35. Баранов А.М. Алгебраическая классификация гравитационных полей в 5-мерном пространстве-времени / А.М. Баранов // Известия вузов. Физика. – 1995. – № 3. – С. 73-78.
36. Weinberg S. Einstein's Mistakes / S. Weinberg // Physics Today. – November 2005. – P.31-35.
37. Ям Ф. Повсеместный Эйнштейн / Ф. Ям // В мире науки. – 2004. – С.30-35.

THEORY OF RELATIVITY – THE VIEW OVER 100 YEARS

A.M. Baranov

The theory of relativity occupies a special place in a modern physics. This theory is a child of the XX century together with a quantum theory, frequently boosting new scientific developments and justifying fundamental standings of physics. In the article the contribution of Krasnoyarsk gravitational group into development of General Relativity and Gravitation briefly is noted.