специальной теории относительности. Однако ясное понимание, цельная картина физики больших скоростей появились лишь в упомянутой работе Эйнштейна. Не случайно, несмотря на наличие прекрасных современных учебников, ее до сих пор можно рекомендовать для первого знакомства с предметом не только студентам, но и старшеклассникам.

Что же касается ОТО, то все ее основополагающие элементы были созданы Эйнштейном.

Впрочем, предчувствие того, что физика может быть связана с кривизной пространства, можно найти в трудах замечательных ученых прошлого века Гаусса, Римана, Гельмгольца, Клиффорда. Гаусс, который пришел к идеям неевклидовой геометрии несколько ранее Лобачевского и Бойаи, но так и не опубликовал своих исследований в этой области, не только считал, что «геометрию приходится ставить в один ряд не с арифметикой, существующей чисто a priori, а скорее с механикой». Он пытался проверить экспериментально, путем точных (для того времени) измерений геометрию нашего пространства. Его идея вдохновила Римана, полагавшего, что наше пространство действительно искривлено (а на малых расстояниях даже дискретно). Жесткие ограничения на кривизну пространства были получены из астрономических данных Гельмгольцем. Клиффорд считал материю рябью на искривленном пространстве.

Однако все эти блестящие догадки и прозрения были явно преждевременны. Создание современной теории тяготения было немыслимым без специальной теории относительности, без глубокого понимания структуры классической электродинамики, без осознания единства пространства–времени. Как уже отмечалось, ОТО была создана в основном усилиями одного человека. Путь Эйнштейна к построению этой теории был долгим и мучительным. Если его работа 1905 года «К электродинамике движущихся сред» появилась как бы сразу в законченном виде, оставляя вне поля зрения читателя длительные размышления, тяжелый труд автора, то с ОТО дело обстояло совершенно иначе. Эйнштейн начал работать над ней с 1907 года. Его путь к ОТО продолжался несколько лет. Это был путь проб и ошибок, который хотя бы отчасти можно проследить по публикациям Эйнштейна в эти годы. Окончательно задача была решена им в двух работах, доложенных на заседаниях Прусской Академии наук в Берлине 18 и 25 ноября 1915 года. В них были сформулированы уравнения гравитационного поля в пустоте и при наличии источников.

В последнем этапе создания ОТО принял участие Гильберт. Вообще значение математики (и математиков) для ОТО очень велико. Ее аппарат, тензорный анализ, или абсолютное дифференциальное исчисление, был развит Риччи и Леви-Чивита. Друг Эйнштейна, математик Гроссман познакомил его с этой техникой.

И все же ОТО – это физическая теория, в основе которой лежит ясный физический принцип, твердо установленный экспериментальный факт.

## Принцип эквивалентности и геометризация тяготения

Факт этот по существу был установлен еще Галилеем. Он хорошо известен каждому успевающему старшекласснику: все тела движутся в поле тяжести (в отсутствие сопротивления среды) с одним и тем же ускорением, траектории всех тел с заданной скоростью искривлены в гравитационном поле одинаково. Благодаря этому, в свободно падающем лифте никакой эксперимент не может обнаружить гравитационное поле. Иными словами, в системе отсчета, свободно движущейся в гравитационном поле, в малой области пространства–времени гравитации нет. Последнее утверждение – это одна из формулировок принципа эквивалентности.

Данное свойство поля тяготения отнюдь не тривиально. Достаточно вспомнить, что в случае электромагнитного поля ситуация совершенно иная. Существуют, например, незаряженные, нейтральные тела, которые электромагнитного поля вообще не чувствуют. Так вот, гравитационно-нейтральных тел нет, не существует ни линеек, ни часов, которые не чувствовали бы гравитационного поля. Эталоны привычного евклидова пространства меняются в поле тяготения. Геометрия нашего пространства оказывается неевклидовой.

Некоторое представление о свойствах такого пространства можно получить на простейшем примере сферы, поверхности обычного глобуса. Рассмотрим на ней сферический треугольник – фигуру, ограниченную дугами большого радиуса. (Дуга большого радиуса, соединяющая две точки на сфере, – это кратчайшее расстояние между ними; она естественный аналог прямой на плоскости.) Выберем в качестве этих дуг участки меридианов, отличающихся на 90° долготы, и экватора (рис. 1). Сумма углов этого сферического треугольника отнюдь не равна $\pi$, сумме углов треугольника на плоскости:

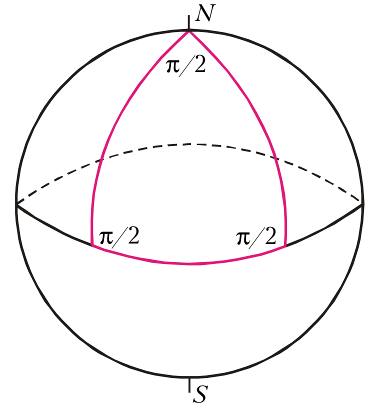


*Рис.1. Сферический треугольник*

$$\alpha+\beta+\gamma=\frac{3}{2}\pi. \qquad (1)$$

Заметим, что превышение суммы углов данного треугольника над $\pi$ может быть выражено через его площадь $S$ и радиус сферы $R$:

$$\alpha+\beta+\gamma-\pi=\frac{S}{R^2}. \qquad (2)$$

Можно доказать, что это соотношение справедливо для любого сферического треугольника. Заметим также, что обычный случай треугольника на плоскости тоже вытекает из этого равенства: плоскость может рассматриваться как сфера с $R\to\infty$.

Перепишем формулу (2) иначе:

$$K=\frac{1}{R^2}=\frac{\alpha+\beta+\gamma-\pi}{S}. \qquad (3)$$

Отсюда видно, что радиус сферы можно определить, оставаясь на ней, не обращаясь к трехмерному пространству, в которое она погружена. Для этого достаточно измерить площадь сферического треугольника и сумму его углов. Иными словами, $K$ (или $R$) является внутренней характеристикой сферы. Величину $K$ принято называть гауссовой кривизной, она естественным образом обобщает-