

поворота выражается как малый вектор, перпендикулярный исходному (это условие следует из того, что длина вектора при переносе не меняется). Однако условие перпендикулярности малого вектора исходному единичному еще не определяет полностью этот малый вектор. Поэтому кривизна трехмерного пространства выражается не одной функцией точки $K(x_1, x_2)$, а несколькими.

После создания теории относительности пространство и время объединились в один комплекс. Этот комплекс плоский, но его геометрия сложнее четырехмерного евклидова пространства с координатами x, y, z, w . Роль длины в четырехмерном евклидовом пространстве играет величина

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2 + w^2.$$

Но в теории относительности «интервал» — инвариантная величина типа длины — дается выражением

$$S = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2,$$

где c — скорость света. Такое 4-мерное пространство называется *плоским псевдоевклидовым* *).

Общая теория относительности «в ореховой скорлупе» состоит в том, что рассматривается *искривленное псевдоевклидово* пространство.

Физика искривленного псевдоевклидова пространства

Эйнштейн выдвинул предположение, что в искривленном пространстве-времени любые частицы движутся по геодезическим этого пространства-времени.

Если пространство плоское, его геодезические — это прямые линии, а прямые в псевдоевклидовом пространстве соответствуют движению с постоянной скоростью по трехмерной прямой траектории, т. е. инерциальному движению.

Предположение о геодезических сразу отвечает на вопрос о том, почему различные тела движутся по одним и тем же траекториям. Раньше мы сказали бы

*) «Псевдо» в переводе с латыни означает «якобы», т. е. «тот, да не тот», пространство хоть и похоже на евклидово, «но» существенно отличается от евклидова знаком одного слагаемого ($-c^2 t^2$ вместо w^2).

«по траекториям в поле тяготения», теперь мы говорим «по геодезическим» и ясно, что геодезические характеризуют пространство-время и не зависят от сорта частиц.

Второе предположение Эйнштейна состоит в том, говоря наглядно, что пространство-время обладает определенной упругостью, а вложенные в пространство тела и поля стремятся искривить его. При полном отсутствии вещества в настоящее время и в прошлом имеет место плоское (псевдоевклидово) пространство-время специальной теории относительности. С плотностью материи связана определенная комбинация величин, характеризующих кривизну пространства-времени.

Еще из СТО нам известно, что если в одной системе отсчета задана определенная плотность покоящегося вещества, то в другой движущейся системе отсчета появляется трехмерный вектор потока массы (или потока энергии) и натяжения (величины, подобной давлению или силе сдвига).

Неудивительно поэтому, что в уравнение для кривизны равноправно входят все эти величины. Поэтому в целом получаются 10 уравнений, связывающих кривизну со свойствами вещества (1 плотность энергии, 3 компоненты вектора потока энергии и 6 компонент силы в веществе).

Существенное замечание состоит в том, что в четырехмерном пространстве-времени общее число величин, характеризующих кривизну, больше 10. Поэтому пространство-время оказывается искривленным и вне тяжелых тел, и в их окрестности: таково, например, пространство, окружающее Солнце. Кривизна этого пространства влияет на движение планет и имитирует то, что раньше называлось гравитационным полем Солнца. Общая теория относительности объясняет сам закон тяготения, объясняет убывание эффективной силы по закону $1/r^2$. Более того, ОТО объяснила и малые отклонения от закона тяготения Ньютона, которые были уже давно обнаружены в движении ближайшей к Солнцу планеты — Меркурия.

Была развита также теория распространения электромагнитных волн в искривленном пространстве-времени. Предсказания этой теории: отклонение лучей света, проходящих вблизи диска Солнца, и изменение частоты света при распространении в поле

тяготения — эти предсказания великолепно, со всей точностью современной техники подтверждены опытом.

Еще одно предсказание ОТО состоит в том, что в пустом пространстве могут распространяться волны кривизны — так называемые *гравитационные волны*. Эти волны во многом подобны электромагнитным: они имеют такую же скорость распространения c , несут энергию и импульс. Гравитационные волны вызывают движение тел, лежащих на их пути, но реально ожидаемый эффект столь мал, что до сих пор он не наблюдается.

Источником гравитационных волн является, например, двойная звезда. При этом двойная звезда сама теряет энергию, расстояние между двумя звездами уменьшается, так же как электрон приближается к ядру при испускании электромагнитных волн *). При этом меняется — уменьшается — период обращения двойной звезды.

Этот эффект был наблюден несколько лет тому назад. Таким образом, ситуация с гравитационными волнами в настоящее время такая же, как с нейтрино в 1932—1952 гг.: мы наблюдаем эффекты, зависящие от испускания гравитационных волн, но не умеем обнаруживать сами волны.

И все-таки подчеркнем, что точнейшие измерения количественно подтвердили предсказание ОТО о существовании и испускании гравитационных волн.

Тяготение и другие силы

Создание ОТО является замечательным творением человеческого разума. Недаром Эйнштейн говорил, что другие его работы — специальная теория относительности, теория броуновского движения как часть термодинамики, теория фотонов (сегодня можно добавить индуцированное излучение и статистику Бозе — Эйнштейна) шли в русле исследований науки своего времени. То, что он сделал, было бы сделано без него другими, может быть, на два-три года позже.

Однако он делал исключение для ОТО: открытие ОТО могло бы задержаться на 50 лет!

*) Понятно, что в случае двойной звезды (в отличие от атома) квантовые эффекты не играют роли.