

4. **Принцип эквивалентности.** В 1911 г. А. Эйнштейн, основываясь на известном со времен Ньютона равенстве инертной и тяжелой масс, высказал гипотезу, которая приобрела фундаментальное значение для последующего развития теории гравитации [4]. Ввиду важности этой гипотезы, получившей название **принципа эквивалентности**, мы кратко воспроизведем здесь рассуждения Эйнштейна.

Пусть в однородном поле тяжести, заданном ускорением  $g$ , покоится система отсчета  $S$ , ориентированная таким образом, что силовые линии антипараллельны оси  $z$ . Система  $S'$  находится в пространстве, свободном от поля тяготения, и движется в направлении оси  $z$  с постоянным ускорением  $g$ . Материальная точка произвольной массы движется в системе  $S$  согласно уравнениям

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = 0; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = -g, \quad (3.4.1)$$

как это следует из закона Галилея, выражающего пропорциональность инертной и тяжелой масс.

Согласно динамике Ньютона, тем же уравнениям отвечает движение материальной точки в системе  $S'$ . Такое совпадение законов движения позволяет предположить, что системы  $S$  и  $S'$  механически равноценны. Это значит, что допустимы два истолкования: 1) система  $S$ , как и  $S'$ , находится вне поля, но движется с постоянным ускорением; 2) система  $S'$ , как и  $S$ , покоится в однородном поле тяжести. Подобно понятию скорости в специальной теории относительности, ускорение утрачивает абсолютное значение и оказывается лишь относительной характеристикой движения.

Вводя систему отсчета  $S''$ , движущуюся с постоянным ускорением  $-g$  относительно системы  $S$ , мы убеждаемся и в относительности поля тяжести: в системе  $S$  это поле существует, тогда как в системе  $S''$  его нет.

В более общем случае относительность поля тяготения состоит в том, что при переходе от  $S$  к системе отсчета с произвольным ускорением мы изменяем напряженность и структуру поля.

В данной форме гипотеза эквивалентности представляет собой лишь новое истолкование давно известной закономерности. В механике Ньютона поле тяготения считается абсолютным, а особенности движения, проявляющиеся в ускоренной системе координат, объясняются действием сил инерции.

Выбор той или другой точки зрения не влияет на решение конкретной механической задачи. Однако новое представление приобретет более глубокое физическое содержание и станет важным средством исследования, если, следуя Эйнштейну, принять, что ускоренные системы отсчета равноценны не только с точки зрения механики, а по отношению ко *всем* физическим процессам.

В такой форме принцип эквивалентности имеет большое эвристическое значение. Изучая физическое явление, протекающее вне поля относительно ускоренной системы координат, мы можем выяснить, как происходит это явление в гравитационном поле.

Основываясь на принципе эквивалентности, Эйнштейн получил несколько новых результатов, представляющих значительный интерес. Первый из них связан с релятивистским соотношением между массой и энергией.

Согласно СТО, инертная масса тела изменяется вместе с содержащейся в нем энергией; приращение энергии  $\Delta E$  сопровождается приращением инертной массы тела на величину  $\frac{\Delta E}{c^2}$ , где  $c$  — скорость света. Происходит ли при этом такое же изменение тяжелой массы тела?

Равенство инертной и гравитационной масс, как мы видели, является необходимой предпосылкой принципа эквивалентности. Нетрудно убедиться в том, что имеет место и обратное: при выполнении принципа эквивалентности должно выполняться и указанное равенство масс. Поэтому очень простые рассуждения, основанные на принципе эквивалентности, приводят Эйнштейна к заключению о том, что приращение энергии  $\Delta E$  изменяет на величину  $\frac{\Delta E}{c^2}$  как инертную, так и гравитационную массы тела.

Далее устанавливается влияние поля тяжести на время: продолжительность какого-либо периодического процесса в поле тяжести оказывается больше, чем вне поля; отношение периодов составляет  $1 - \frac{\Phi}{c^2}$ , где  $\Phi$  — ньютонов потенциал. В частности, если излучение наблюдается вне поля, а излучающие атомы расположены в поле тяжести, то измеренная частота  $\nu$  спектральной линии связана с нормальной частотой  $\nu_0$  соотношением

$$\nu = \nu_0 \left( 1 - \frac{\Phi}{c^2} \right), \quad (3,4,2)$$

показывающим, что, по сравнению с лабораторным спектром, линии должны смещаться к красному концу спектра. Это явление, называемое гравитационным смещением, действительно наблюдается в спектрах звезд в тех случаях, когда на их поверхности поле гравитации имеет достаточно высокий потенциал.

В настоящее время гравитационное смещение можно проверить с очень большой точностью в лаборатории, наблюдая в соответствующих условиях явление Мёссбауэра.

Зависимость времени от поля тяжести проявляется также в особенностях распространения света. Скорость света в вакууме, совпадающая в отсутствие поля тяжести с универсальной постоянной

$c_0$ , которая входит в формулы специальной теории относительности, при наличии поля равна

$$c = c_0 \left( 1 - \frac{\Phi}{c_0^2} \right). \quad (3,4,3)$$

Соотношение (3,4,3) имеет очень важное значение. В частности, оно устанавливает границы применимости специальной теории относительности, показывая, что эта теория выполняется лишь для достаточно слабых полей, когда отношением  $\frac{\Phi}{c^2}$  можно пренебречь по сравнению с единицей.

Из соотношения (3,4,3) непосредственно вытекает, что при распространении света в поле тяготения прямолинейность световых лучей в общем случае нарушается. Рассматривая распространение света в поле одного центра, Эйнштейн показывает, что вследствие искривления световой луч отклоняется на угол

$$\theta = \frac{2\gamma M}{c^2 a}, \quad (3,4,4)$$

где  $M$  — масса центра притяжения,  $a$  — длина перпендикуляра, опущенного из центра на направление луча.

Впоследствии оказалось, что искривление луча обусловлено не только зависимостью скорости света от потенциала поля, но и нарушением эвклидовой геометрии вблизи центра гравитации. Как было найдено Эйнштейном на основе общей теории относительности, полный эффект превосходит величину (3,4,4) в два раза. В случае Солнца максимальное значение эффекта соответствует лучу, касательному к солнечной поверхности; оно составляет около  $1''$ , 7, что хорошо согласуется с наблюдениями.

Принцип эквивалентности Эйнштейна, конечно, не является новой теорией гравитации. Однако он может служить исходным моментом и одной из физических предпосылок такой теории, а плодотворность подтверждается новизной и принципиальной важностью вытекающих из него следствий.

**5. Теория Абрагама.** В 1912 г. М. Абрагам предложил теорию гравитации, обобщающую закон Ньютона без учета принципа относительности [5]. В основу этой теории положено следующее уравнение для гравитационного потенциала:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial u^2} = -4\pi\gamma\rho, \quad (3,5,1)$$

где  $x, y, z$  — прямоугольные декартовы координаты,  $u$  — переменная, связанная со временем  $t$  соотношением  $u = ict$ ,  $i$  — мнимая единица,  $\rho$  — собственная плотность.