Для измерений использовалось мессбауэровское резонансное поглощение на Fe^{57}. Несмотря на чрезвычайную трудность опыта, была достигнута точность

$$\frac{\Delta \nu_{эксп}}{\Delta \nu_{теор}} = 1{,}00 \pm 0{,}01 .$$

С середины 70-х годов наступила новая эра для экспериментов по красному смещению. Это связано с развитием стандартов частоты сверхвысокой стабильности порядка $10^{-15} \div 10^{-16}$ при временах усреднения от 10 до 100 с и более. Благодаря этому удалось зафиксировать разницу в показаниях часов, совершающих длительный полет на самолете на высоте $\sim 10^4$ м с аналогичными часами на поверхности Земли, а также уследить за смещением частоты в зависимости от высоты при запуске водородных мазерных часов на ракете на высоту до 10 000 км. Во всех случаях согласие с предсказаниями ОТО было лучше, чем 1 %.

4.3. О смысле переменной времени в статической метрике

При рассмотрении эффекта красного смещения мы ввели переменную t и назвали ее мировым временем. При этом t определена неявно тем, что интервал имеет вид (110), где g_{ik} не зависит от t. Покажем, что этим требованием t определено в данной системе отсчета (при выбранных x^α) с точностью до линейного преобразования $t' = at + b$. Действительно, в случае общего преобразования $t = f(x^\alpha, t')$ имеем: $dt = f_{t'}\, dt' + f_\alpha\, dx^\alpha$,

$$ds^2 = g_{00} f_{t'}^2\, dt'^2 + 2 g_{00} f_{t'} f_\alpha\, dt'\, dx^\alpha + (g_{\alpha\beta} + f_\alpha f_\beta)\, dx^\alpha dx^\beta .$$

Если мы хотим, чтобы $g'_{0\alpha} = 0$, то $f_\alpha = 0$ и, следовательно, $f = f(t')$. Из $\partial g'_{00}/\partial t' = 0$ следует, что $f_{t'} = const$ и $f = at' + b$. Таким образом, условия, наложенные на g_{ik}, жестко определяют переменную t (с точностью до масштаба и начала отсчета).

Останется ли поле статическим, если перейти к другой системе отсчета? По-видимому, в общем случае это не так. Пространство Минковского однородно, в нем возможны преобразования $x^i = \Lambda^i_k x^k$, при которых $\Lambda^\beta_0 = 0$. Но при наличии масс, по-видимому, любой переход к другой системе отсчета приводит к зависящим от времени g_{ik} либо (при преобразованиях типа вращения) к появлению $g_{0\alpha}$-компонент, и метрика становится уже нестатической. Заметим, что статическая метрика – это довольно частный случай. Ее простейшая реализация – поле жестко скрепленных тел. Если тело или тела несферичны, то это поле может быть сложным. Если тела двигаются, то теряется статичность. Уже само движение планет в Солнечной системе нарушает и статичность, и стационарность гравитационного поля, если учесть поле самих планет.

Обсудим, как физически измерить мировое время t в стационарном случае. В метрике (110) скорость света, определяемая уравнением $ds = 0$, зависит, вообще говоря, от направления, но не меняется при изменении направления на противоположное, т.е. $\vec{v}(\vec{r},\vec{n}) = \vec{v}(\vec{r}, -\vec{n})$, где $\vec{n}$ – единичный вектор в x^{α}-системе. От времени скорость v не зависит. Это сразу видно из уравнения для скорости

$$v^{\alpha} = \frac{dx^{\alpha}}{dt} = vn^{\alpha},$$

имеющего вид

$$g_{00}dt^2 + g_{\alpha\beta}n^{\alpha}n^{\beta}v^2dt^2 = 0, \quad v = \sqrt{\frac{g_{00}}{(-g_{\alpha\beta})n^{\alpha}n^{\beta}}}.$$

При таких свойствах v путь распространения сигнала из А в В и из В в А одинаков и не зависит от t, а время распространения сигнала из А в В и назад одинаково во времени t. Следовательно, если мы посылаем сигнал из А в В, а потом из В в А, то время его прибытия в В синхронно во времени t с серединой интервала между посылкой и возвращением сигнала в А. Середину интервала можно определить с помощью стандартных часов в А. Таким образом, можно построить сетку одномоментных событий во всем пространстве. Для того чтобы интервалы такой сетки Δt были равны временному интервалу Δs стандартных часов ("секунда"), часы, задающие счет, нужно вынести из поля так, чтобы ошибка, вносимая красным смещением, была меньше требуемой точности.

4.4. Наглядная интерпретация эффекта красного смещения

Формулировка ПЭ, данная нами в разд. 2, отличается от той, которую дал Эйнштейн. Он хотел избавиться от выделенности инерциальных систем отсчета, и ПЭ у Эйнштейна – утверждение об эквивалентности всех систем отсчета, как инерциальных, так и неинерциальных, понимаемое как утверждение, что законы природы должны иметь одинаковый вид во всех системах отсчета. Уравнения ОТО действительно так сформулированы, что ими можно пользоваться в любой системе отсчета (локально). Конечно, на самом деле в целом эквивалентности систем отсчета нет. Класс L-систем явно физически выделен, так же как локально выделены геодезические системы координат на поверхности. Фактически мы очень широко пользуемся именно такими системами. Например, когда мы решаем уравнения Эйнштейна для Солнечной системы, то мы вводим систему отсчета, связанную с центром масс Солнца и планет, и говорим, что $g_{ik} \to \eta_{ik}$ "на бесконечности". В действительности, Солнечная система движется в поле Галактики, вообще говоря, неоднородном, и на бесконечность уйти нельзя. Однако для расстояний r таких, что $r_g \ll r \ll l$, где