О ПРИРОДЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Н.М.Полиевктов-Николадзе

Измерения сплюснутости Солнца (Дикке, Голденберг [1]) приводят к оценке $\delta \sim +10\%$ для Меркурия [1], где $1 - \delta$ есть скорость релятивистского вращения перигелия в единицах ее эйнштейновской величины. Результат (δ – эффект) показывает неточность уравнений Эйнштейна (для которых $\delta = 0$) и приводит к вопросу о правильности основного метрического принципа общей теории относительности (отождествление гравитационного поля с полем тензора кривизны 4-пространства). Покажем, что при некотором уточнении, метрический принцип (как таковой) допускает прямые эмпирические проверки. Уточнение заключается в предположении, что уравнения тяготения (аналогично [2, 3]) отвечают вариационному принципу и строго подчиняются принципу эквивалентности в смысле [3] включения гравитационного взаимодействия в лагранжиан материи (допустимо метрическое взаимодействие, при котором принцип эквивалентности выполняется только с заданной степенью точности; частное замечание Е.Л.Фейнберга, 1965). В таком случае уравнения тяготения, независимо от своей конкретной формы, приводят к геодезическим уравнениям движения для частицы в гравитационном поле, из которых следуют некоторые общие выводы.

В применении к δ-эффекту, геодезический принцип показывает, что реальная метрика внешнего поля Солнца не совпадает с шварцшильдовской, для которой тензор Риччи $R^l_k = 0$. Следовательно, в реальном поле $R^l_k \neq 0$ в пустоте (плотность солнечного излучения вносит в эмпирическую оценку δ вклад $\sim 10^{-6}\%$) и метрической причиной δ-эффекта является нелокальная связь между R^l_k и тензором материи T^l_k. Нелокальность противоречит только уравнениям Эйнштейна ($R^l_k = \kappa(T^l_k - 1/2\, \delta^l_k T^n_n)$) но не общим метрическим уравнениям [2, 3] (из которых она следует) и сама по себе не есть аргумент против метрической теории. Однако этот пункт допускает принципиальную проверку.

Нелокальность приводит к возникновению аномальных гравитационных волн, в поле которых $R^l_k \neq 0$. В следующем сообщении будет показано, что метрическая структура уравнений тяготения исключает конечную массу покоя μ аномальных гравитонов, если $\delta \neq 0$. Следовательно, экспериментальное значение μ для реальных гравитационных волн (которое в настоящее время неизвестно) есть один из критериев метрического принципа.

В применении к астрономическим данным, метрический принцип приводит к феноменологическим (независящим от конкретного вида теории) соотношениям между наблюдаемыми неэйнштейновскими величинами. В самом деле, рассмотрим гравитационное поле Солнца, считая его статическим и сферически-симметричным (квадрупольность вносит в численные коэффициенты (4) ничтожные поправки $\lesssim 10^{-3}\%$). Метрика центрального поля содержит три радиальные функции, из которых одна определяется способом измерения расстояния, а вторая – гравитационным полем, [4]. Измеряя расстояние r по угловому размеру объекта относительно центра Солнца (расстояние по Солнцу) имеем: $ds^2 = c^2 f dt^2 - (hf)^{-1} dr^2 - r^2 (d\nu^2 + \sin^2\nu\, d\phi^2)$, где f и h – функции поля, которые будем считать эмпирическими неизвестными. В метрике Шварцшильда ($h = 1$, $f = 1 - r_0 r^{-1}$, $r_0 = 2Gmc^{-2}$, m – гравитационная масса Солнца, [4]) имеется всего 1 эмпирический параметр r_0. В неэйнштейновском поле $h = 1 + u(r)$, $f = 1 - r_0 r^{-1} + w(r)$, где u и w вызваны нелокальной связью между R^i_k и T^i_k, а r_0 имеет прежний смысл (т.е. $r w \to 0$ при $r \to \infty$). Следовательно, здесь имеются 2 эмпирические функции u и w, которые можно определить из уравнений движения по двум (очевидно - неэйнштейновским) наблюдаемым величинам, после чего все остальные неэйнштейновские наблюдаемые окажутся связанными с первыми феноменологическими соотношениями, вид которых зависит только от характера уравнений движения; последние являются геодезическими для всех метрических теорий типа [2, 3], что и дает возможность их эмпирической проверки в целом. Независимо от проверки теории, феноменологические соотношения могут оказаться весьма полезными для метрического анализа эмпирических данных.

Получим феноменологическое соотношение для наблюдаемых δ, δ_K и δ_γ, где δ определена в начале, δ_K – релятивистская поправка к закону Кеплера ($T^2 a^{-3} = 4\pi^2 (Gm)^{-1}(1 + \delta K)$; a – большая полуось по Солнцу, T – по собственному времени планеты), $1 - \delta_\gamma$ – эмпирический угол гравитационного отклонения светового луча на краю Солнца в единицах его эйнштейновской величины. Считая u и w (см. выше) малыми (что допустимо, так как $\delta \sim 0{,}1 << 1$), учитывая их в геодезических уравнениях только в первом приближении и пренебрегая эксцентриситетом (ошибка $\sim 10\%$ для Меркурия и Плутона и $< 1\%$ для остальных планет), имеем:

$$\delta(r) = \frac{r}{3r_0} u - \frac{r^2}{3r_0} \frac{dw_1}{dr} + \frac{r}{3r_0} \left(w - 2r \frac{dw}{dr}\right), \qquad (1)$$

$$\delta_K(r) = \frac{3r_0}{2r} (1 - 2\delta(r)) + w_1 + \frac{1}{2} w, \qquad (2)$$

где $r_0 = 2Gmc^{-2}$, $w_1 = -r^2 r_0^{-1} w^*(r)$, r – радиус орбиты (по Солнцу) планеты, к которой относятся $\delta(r)$ и $\delta_K(r)$;

$$\delta_\gamma = \frac{r_\odot^2}{2r_0} \int_{r_\odot}^{\infty} \frac{dr}{r\sqrt{r^2 - r_\odot^2}} \left(u + w - r\frac{dw}{dr}\right), \qquad (3)$$

где $r_\odot = 7 \cdot 10^5$ *км* есть радиус Солнца ($r_0 = 3$ *км*). Оценивая производные делением на r (u и w должны быть степенными функциями вследствии $\mu = 0$; μ – см. выше), легко проверить, что с погрешностью $\sim r_0 r^{-1} \lesssim 10^{-7}$ в (1 – 2) можно вычеркнуть все w – члены кроме w_1, а в (3) – оставить только u. В результате получается весьма простое феноменологическое соотношение:

$$\delta_\gamma = \frac{3}{2} r_\odot^2 \int_{r_\odot}^{\infty} \frac{dr}{r^2\sqrt{r^2 - r_\odot^2}} \left[\delta(r) + \frac{r^2}{3r_0} \frac{d\bar{\delta}_K(r)}{dr} \right], \qquad (4)$$

где $\bar{\delta}_K(r) = \delta_K(r) - 1{,}5\, r_0 r^{-1}(1 - 2\delta/r)$ есть неэйнштейновская часть δ_K; знак $=$ означает погрешность $\lesssim 10\%$ (пренебрежение эксцентриситетом). Необходимый для проверки (4) уровень эмпирической информации очевиден.

(4) приводит к некоторым предсказаниям. Если для всех планет (как для Меркурия) $\delta > 0$, то вероятно $\bar{\delta}'_K(r) < 0$ и $r^2 r_0^{-1} |\bar{\delta}'_K(r)| \sim \delta(r)$. Результат отвечает вероятному знаку $\delta_\gamma < 0$ и $|\delta_\gamma| \sim \delta$ (данные по затмениям: $\delta_\gamma = -0{,}13 \pm 0{,}07$ (1919) $-0{,}15 \pm 0{,}15$ (1947), $+0{,}03 \pm 0{,}06$ (1952). Если в будущем окажется, что $\delta_\gamma < 0$, $\delta > 0$ и $r^2 r_0^{-1} |\bar{\delta}'_K| \ll \delta$, то это будет прямым опровержением геодезического принципа.

До получения достаточно точных проверочных данных, сомнения в метрической природе гравитационного поля нам кажутся лишенными основания.

Тбилисский
государственный университет

Поступило в редакцию
16 июня 1967 г.

Литература

[1] R.Dicke, H.Mark Goldenberg. Phys. Rev. Lett., 18, 313, 1967.
[2] Н.М.Полиевктов-Николадзе. Письма ЖЭТФ, 2, 551, 1965.
[3] Н.М.Полиевктов-Николадзе. ЖЭТФ, 52, 1360, 1967.
[4] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. Изд. 4-е, Физматгиз, 1962.