

## РЕЛЯТИВИСТСКИЙ СПИН-КВАДРУПОЛЬНЫЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ

В.Б.Брагинский, А.Г.Полнарев

Общая теория относительности предсказывает возбуждение колебаний в квадрупольном механическом осцилляторе, движущемся вблизи вращающегося гравитирующего тела. Для осциллятора на орбите вокруг Земли относительная амплитуда колебаний может превышать  $10^{-10}$ . Обсуждены возможности обнаружения этого эффекта.

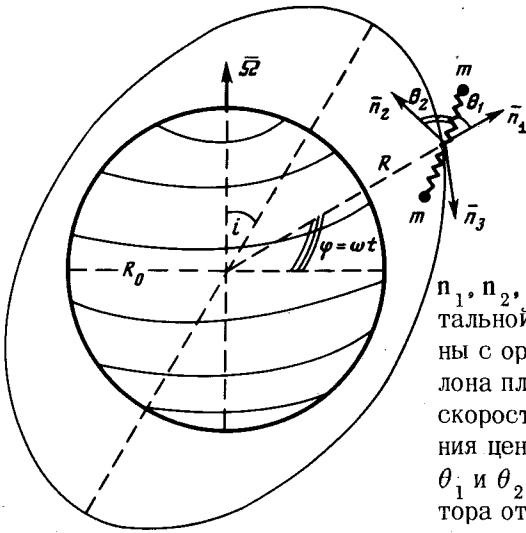
Возможности наблюдения новых релятивистских гравитационных эффектов в поле Земли были предметом ряда исследований. Папанетру и Шифф [1, 2] предсказали существование спин-орбитального и спин-спинового гравитационных эффектов, которые проявляются в медленной прецессии оси гироскопа, выведенного на околоземную орбиту. Зельдовичем был предсказан гравитационный эффект Зеемана [3] (поворот плоскости поляризации электромагнитной волны в поле вращающейся Земли). Наблюдение первых двух эффектов – основная цель подготавливаемого сейчас эксперимента, который условно назван "релятивистский гироскоп" (см., например, [4]). Цель этой работы состоит в рассмотрении следующего из общей теории относительности (ОТО) нового релятивистского гравитационного эффекта и в обсуждении возможностей его наблюдения.

Вращающийся с угловой скоростью  $\Omega$  шар с массой  $M$  и радиусом  $R_0$  создает вокруг себя неоднородное квазимагнитное поле, искажающее чисто ньютоновские траектории пробных тел в окрестности  $M$ . Это поле и ответственно за спин-спиновый эффект и гравитационный эффект Зеемана. Предположим, что на орбиту вокруг шара  $M$  выведена платформа с периодом обращения  $2\pi/\omega$ , на которой расположен механический линейный квадрупольный осциллятор, состоящий из двух масс  $m$ , соединенных жесткостью  $k = m\omega^2 l$  и разнесенных на расстояние  $l$ . Предположим также, что период вращения равен периоду обращения. Расчет, основанный на ОТО, показывает, что разность ускорений  $F/m$ , действующих на массы осциллятора равна

$$\left(\frac{F}{m}\right)_{\text{СКГЭ}} = A \times \Phi(\theta_1, \theta_2, i, \phi, t); \quad A = \frac{\alpha G M \Omega \omega l R_0^2}{c^2 R^3}, \quad (1)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $R$  – расстояние от платформы до центра шара,  $\Phi$  – есть безразмерная функция, в общем случае периодическая, зависящая от углов  $\theta_1, \theta_2, i$  и  $\phi$  (обозначения ясны из рисунка) и достигающая при наиболее благоприятных величинах  $\theta_1, \theta_2, i$  амплитудного значения  $\Phi_{\text{макс}} = 7$ ;  $\alpha$  для однородного шара равно 0,4, для Земли  $\alpha \approx 0,33$ . Очевидно, что эта разность ускорений будет возбуждать колебания в механическом осцилляторе. Как видно из выражения (1) величина  $(F/m)_{\text{СКГЭ}}$  зависит от скорости вращения шара

$\Omega$  и от размеров квадруполя  $l$ , поэтому возбуждение колебаний в осцилляторе за счет разности ускорений целесообразно называть спинквадрупольным гравитационным эффектом (СКГЭ). Если  $M = M_{\oplus}$ ,  $\Omega = \Omega_{\oplus}$ ,  $R \approx R_0 = R_{\oplus}$ ,  $l = 1 \cdot 10^2$  см, то при  $\Phi = \Phi_{\text{макс}} = 7$  амплитуда  $(F/m)_{\text{СКГЭ}} \approx 1,2 \cdot 10^{-14}$  см/сек<sup>2</sup>. Такую разность ускорений при  $\omega_m^2 \gtrsim 1,5\omega^2$  относительно легко измерить, так как отклик осциллятора  $\Delta l_{\text{СКГЭ}}$  будет порядка  $1 \cdot 10^{-8}$  см (измерения можно производить емкостным датчиком). Чтобы зарегистрировать  $(F/m)_{\text{СКГЭ}}$  на фоне теплового движения необходимо при  $T = 300\text{К}$ , добротности осциллятора  $Q = 10^4$  и  $m = 10^3\text{г}$  затратить  $\tau \approx 10^5$  сек. При больших  $\tau$  или  $Q$ , или  $m$  величину  $\Delta l_{\text{СКГЭ}}$  можно детально измерять.



$n_1, n_2, n_3$  — направляющие векторы в орбитальной системе координат (жестко связаны с орбитальной платформой)  $i$  — угол наклона плоскости орбиты к вектору угловой скорости  $\vec{\Omega}$  шара;  $\phi$  — текущий угол положения центра масс орбитальной платформы;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — определяют ориентацию осциллятора относительно орбитальной платформы

Существенным отличием СКГЭ от других релятивистских неволновых эффектов является монотонная диссипация энергии в осцилляторе если  $Q$  конечна. Энергия при этом "черпается" из энергии платформы, орбита которой будет из-за СКГЭ монотонно сжиматься.

Наиболее серьезным препятствием для простой реализации опыта по обнаружению СКГЭ являются чисто ньютоновские приливные ускорения (при эксцентриситете  $e$  орбиты платформы не равно нулю) и ускорения из-за сплюснутости Земли —  $\epsilon$ , если орбита отличается от чисто полярной на угол  $i$ . Осциллятор будет откликаться на сумму всех этих ускорений. Однако зависимости  $(F/m)_{\text{СКГЭ}}$  и чисто ньютоновских ускорений от  $\theta_1, \theta_2, i$  различны, что позволяет, производя три измерения при трех ориентациях осциллятора, вычесть ньютоновские ускорения. Следует подчеркнуть, что при этом нет необходимости знать параметры орбиты заранее: они попутно измеряются с необходимой точностью. Приведем одну из возможных схем такого "вычитания".

В первом измерении осциллятор ориентирован так, что  $\theta_1 = 0$ , и  $\theta_2 = \pi/2$ . Отклик осциллятора обозначим через  $\Delta l_1$ . Во втором измерении  $\theta_1 = \theta_2 = \pi/4$ , отклик —  $\Delta l_2$ . И наконец, в третьем измерении  $\theta_1 = \pi/2, \theta_2 = \pi/4$ , отклик —  $\Delta l_3$ . Измеряя отклики осциллятора при

трех описанных ориентациях, получаем величину релятивистского эффекта  $A$ :

$$A = \omega_m^2 \left( \frac{7}{4} \Delta l_1 + 4 \Delta l_2 + \Delta l_3 \right). \quad (2)$$

Для того, чтобы описанная процедура вычитания относительно больших эффектов была корректна, требуется достаточно высокая точность измерения углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Если мы хотим измерить релятивистский эффект с точностью до 10%, то при  $e \approx 10^{-6}$  и  $i \approx 10^{-5}$  рад допустимые ошибки  $\Delta\theta_1$  и  $\Delta\theta_2$  не должны превышать  $10^{-3}$  рад, что легко достижимо. Выбор параметров орбиты  $e$  и  $i$  определяется из условия, чтобы не предъявлять слишком высоких требований к динамическому диапазону аппаратуры регистрирующей отклик  $\Delta l$ .

Мы здесь не приводим методов вычитания более тонких паразитных эффектов, ограничиваясь перечислением главных из этих эффектов с амплитудами относительных ускорений порядка  $10^{-12} - 10^{-13}$  см/сек<sup>2</sup>. Сюда относятся, например, линейные эффекты порядка  $\epsilon e(GM_\oplus/R^3)l$ , кроме этого имеются линейные эффекты с амплитудами того же поряд-

ка:  $\epsilon \epsilon \frac{G^2 M_\oplus^2}{R^6} \frac{l}{\omega_m^2}$  или  $\epsilon^2 i \frac{G^2 M_\oplus^2}{R^6 \omega_m^2} l$ . Все эти эффекты имеют фазовую

"окраску" и поэтому их можно "вычесть" с помощью тех же трех измерений (при трех измерениях мы получаем шесть величин: три амплитуды и три фазы).

Приливные ускорения в осцилляторе, вызванные Луной и Солнцем, можно также вычесть, не производя дополнительных измерений, если параметры орбиты известны с относительной точностью  $\sim 10^{-3}$ .

Для того, чтобы  $(F/m)_{\text{СКГЭ}}$  превысило разность ускорений, вызванную силой Лоренца в магнитном поле Земли необходимо, чтобы разность потенциалов между массами  $m$  не была бы больше  $\approx 0,1$  мВ.

Рекомендации процедуры измерения, приведенные выше, предполагают  $\omega_m \neq \omega$ , т. е. нерезонансное возбуждение колебаний в осцилляторе. Подстраивая величину  $k = m\omega_m^2$  так, что  $\omega_m = \omega$  можно получить значительно больший отклик  $\Delta l_{\text{СКГЭ}}$ , однако, при этом возникнет необходимость учитывать (и вычитать) нелинейные паразитные эффекты более высоких порядков.

В заключение отметим, что величина  $\Delta l_{\text{СКГЭ}}/l \approx 1 \cdot 10^{-10}$  не сильно отличается от прецессии оси гироскопа  $\Delta\theta_{\text{СКГЭ}}$  для спин-спинового гравитационного эффекта ( $\Delta\theta_{\text{ССГЭ}} \approx 8 \cdot 10^{-10}$  рад за  $\tau \approx 10^5$  сек), однако для СКГЭ нет необходимости применять весьма изощренную технику измерений [4].

Авторы пользуются случаем выразить искреннюю признательность Я.Б.Зельдовичу за ценные дискуссии и И.Д.Новикову за критические замечания.

## Литература

- [1] A. Papapetrou. PROC. R. Soc., 209, 248, 1951.
  - [2] L.I. Schiff. Phys. Rev. Lett., 4, 216, 1960.
  - [3] Я.Б.Зельдович, Письма в ЖЭТФ, 1, 40, 1965.
  - [4] C.W.F. Everitt. In "Experimental Gravitation" ed. B. Bertotti, Academia DEI Lincei, Roma, 1977.
-