

УДК 523.11

В. Н. РУДЕНКО

ОБ ОПЫТАХ КАВЕНДИША НА БОЛЬШОМ РАССТОЯНИИ

1. Недостаточность экспериментальных данных по прямому измерению постоянной тяготения G сохраняет возможность спекуляций, содержащих гипотезу об изменении G с расстоянием. Известны модели теории гравитации, использующие эту возможность, например [1—3]. С экспериментальной точки зрения лабораторные измерения G доказывают ее постоянство на расстояниях до 1 м с точностью до 0,1%. Измеренная «лабораторная» величина гравитационной константы равна $G_{\text{л}} = 6,67 \dots$ с ошибкой в третьем десятичном разряде [4].

Слежение за динамикой планет и искусственных объектов обеспечивает измерение гелио- и геоцентрических постоянных GM (M — масса Солнца или Земли) с точностью до 10^{-5} [5]. Отсюда, кроме ограничений на временные вариации G [6], можно получить заключение о постоянстве G для расстояний $10^3 < r < 10^8$ км, без измерения ее абсолютной «космологической» величины $G = G_{\text{к}}$. В принципе мыслимо обсуждение ситуации, в которой $G_{\text{л}} \neq G_{\text{к}}$. По оценкам работы [7], на основе подсчета масс Солнца и Земли в рамках принятых структурных моделей, допустимо отличие $G_{\text{л}}$ от $G_{\text{к}}$ примерно 40%, связанное с ошибкой расчетов. (Несколько более жесткое ограничение $\sim 10\%$ предлагается в [8] на основе космологических соображений.)

В данной работе мы хотим указать на экспериментальную возможность измерения G в лаборатории для расстояний, превышающих 1 м естественно связанную с задачами построения гравитационных антенн второго поколения [9] и чувствительных градиентометров [10].

В оценках, следующих ниже, мы будем иметь в виду феноменологическую модель тяготения [7], в которой гравитационный потенциал описывается выражением

$$V(r) = -V_{\text{н}}(r) [1 + \alpha e^{-\mu r}]. \quad (1)$$

Для точечной массы $V_{\text{н}}(r) = G_{\text{к}}(M/r)$; α, μ — константы теории. Отклонение от закона Ньютона описывается в (1) потенциалом юкавского типа, предполагающим наличие добавочных короткодействующих сил. Для $G(r)$ имеем

$$G(r) = G_{\text{к}} [1 + \alpha(1 + \mu r) e^{-\mu r}]. \quad (2)$$

Отсюда для малых расстояний $\mu r \ll 1$ характерна «лабораторная» константа $G = G_{\text{л}} = G_{\text{к}}(1 + \alpha)$, для больших $\mu r \gg 1$ — «космологическая» $G = G_{\text{к}}$. Подчеркнем, что мы не рассматриваем отклонений от ньютоновской теории, содержащихся в ОТО (речь идет о поправках уже в области слабого поля $\varphi/c^2 \ll 1$) и не рассматриваем эффекты экраниров-

ки и анизотропии массы, отсутствие которых доказано в экспериментах [11, 12].

2. Прежде всего отметим, что традиционные кавендишевские установки обеспечат измерение пространственных вариаций G на расстояниях $r < 1$ м лишь при значительном увеличении метрологической точности. Действительно, как следует из (2): $\Delta G/G \simeq \alpha \mu^2 (r_1^2 - r_2^2)$, что при $r_1 = 20$ см, $r_2 = 10$ см, $|\alpha| \leq 1$ и, например, $\mu^{-1} = 50$ м дает $\Delta G/G \sim 10^{-5}$ (на два порядка лучше существующего уровня). Хотя проекты увеличения метрологической точности в измерении существуют [13], трудно в ближайшие годы ожидать роста точности более чем в два-три раза, что недостаточно. (Результат Лонга, наблюдавшего логарифмический рост G с расстоянием на обычной кавендишевской установке [14], пока не подтвержден и мог бы быть связан с аппаратными эффектами.)

При переходе к большим расстояниям $r > 1$ м требования к метрологической точности снижаются и сильно растут требования к чувствительности регистрирующей аппаратуры. Однако опыт, накопленный в технике измерения малых смещений макроскопических тел [15], позволяет рассмотреть эту возможность.

3. Наиболее чувствительной системой измерения малых механических возмущений будут гравитационные антенны второго поколения, которые смогут регистрировать амплитуду механических колебаний $\Delta x_0 \simeq 10^{-17}$ см за время $\hat{\tau} \simeq 2 \cdot 10^{-4}$ с [16]. Тогда измерение G возможно в эксперименте с двумя детекторами: источником и приемником переменного гравитационного поля. Одновременно такой эксперимент имеет смысл калибровки гравитационной антенны непосредственно в компонентах тензора Римана: $R_{i0j0} \simeq (\omega^2/c^2 Q) \varepsilon_g$, где ω , Q , ε_g — частота, добротность и измеряемая деформация детектора-приемника. Прецедент такой калибровки имел место в опыте Вебера — Синского [17] для расстояния $\sim 1,5$ м с точностью $\sim 10\%$. Максимально возможное расстояние определяется формулой

$$r^5 \leq 10GM l_s^2 \varepsilon (Q m \hat{\tau} / kT \omega)^{1/2}, \quad (3)$$

где M , l_s ; m , l_g — эффективные массы и длины источника и приемника; T — температура приемника; $\hat{\tau}$ — время измерения. Подстановка в (3) параметров антенн второго поколения: $M = m \simeq 10^8$, $l_s = l_g = 10^2$ см, $Q = 10^9$, $\omega = 10^4$, $T \sim 2$ К, максимально допустимой деформации источника $\varepsilon \sim 10^{-3}$ и $\hat{\tau} \sim (10^3 - 10^4)$ с — дает

$$r^5 \leq 2 \cdot 10^{19} \varepsilon (\hat{\tau}/T)^{1/2} \sim 2 \cdot 10^{18}, \text{ т. е. } r \leq 50 \text{ м.} \quad (4)$$

Амплитуда колебаний приемника на границе $r = 50$ м составит $\Delta x_g = 25GM l_s^2 \varepsilon (\hat{\tau}/\omega r^5) \sim 2 \cdot 10^{-20} \hat{\tau} \sim 10^{-16}$ см, что обеспечивает точность измерения $\Delta G/G \sim \Delta x_0/\Delta x_g \simeq 10^{-17} (2 \cdot 10^{-4}/\hat{\tau})^{1/2} / 2 \cdot 10^{-20} \hat{\tau} \leq 0,1\%$. Задание метрологических значений параметров, входящих в (4), с точностью $\leq 0,1\%$ на таком расстоянии заведомо допустимо. Аналогичные результаты можно получить, рассматривая в качестве генератора вращающуюся гантель длины $l_r = 30$ см с $M \sim 10^4$ г на частоте $\omega \approx 10^3$. При этом из (3) и (4) исчезает малый параметр ε , что, однако, компенсируется снижением массы и длины.

Отметим, что сильная зависимость эффекта от расстояния делает приведенные оценки мало чувствительными к заметному изменению параметров. Важным техническим ограничением здесь является требование синхронизма частот источника и приемника. Качество настройки в резонанс диктуется условиями: $\hat{\tau} < \tau^* = Q/\omega \sim 10^5$ с и $\Delta\omega\hat{\tau} \leq 1$, откуда $\Delta\omega/\omega \sim 10^{-7} - 10^{-8}$. С такой точностью в процессе эксперимента необходимо поддерживать частоту источника посредством активной системы подстройки, следящей за чистотой приемника. Стабильность собственной частоты детектора-приемника заведомо достаточно высока: для сапфира при $T \sim 2\text{ К}$ $\Delta\omega/\omega \leq 5 \cdot 10^{-12}$ за сутки [18].

4. В принципе максимальное значение r в (4) может быть больше, если рассматривать в качестве источника «асимметричный волчок» — массу, вращающуюся на расстоянии l_s от центра; при этом темп убывания поля $\sim r^{-4}$ вместо $\sim r^{-5}$. Оценка допустимой базы может быть найдена по формуле (4) с умножением ее правой части на фактор r/l_s . Полагая $M \simeq 10^4$ г, $l \simeq 30$ см и $\omega \simeq 10^3 \cdot \text{с}^{-1}$ для тех же, что и выше, параметров приемника, найдем

$$r^4 \leq 2 \cdot 10^{15} (\hat{\tau}/T)^{1/2}, \quad r \sim 200 \text{ м.} \quad (5)$$

Однако технические трудности этого варианта значительно превосходят схему п. 3.

5. До реализации антенн второго поколения возможно использование низкочастотных ($\omega \leq 1$) градиентометров для измерения G на расстояниях $r \leq 10$ м. Понижение частоты позволяет перейти к схемам с дальнейшим ослаблением зависимости от r ($\sim r^{-3}$) и снимает трудности частотной синхронизации. Однако при этом растет влияние сейсмички, так что реальная чувствительность уже не соответствует уровню тепловых флуктуаций.

Вертикальный градиентометр — несимметричные весы, у которых одна из масс укрепленна на конце коромысла l , вторая масса подвешена к другому концу на нити длиной L . Поднесение к такому устройству массы M на расстоянии $r \gg l, L$ создает момент $\text{Мом } F \simeq \simeq GmMlLr^{-3}$. Для регистрации последнего необходима чувствительность к вариациям массы

$$\Delta m/m = 2GMLl/r^3g \sim 10^{-11} \quad (6)$$

(полагаем $M=10^6$, $L=10^2$ см, $r=10$ м). Существующие лабораторные установки такого типа обладают чувствительностью $\Delta m/m \simeq 3 \cdot 10^{-12}$ в квазистатическом режиме для 10 независимых опытов [19]. С накоплением до 10^3 отсчетов достигим уровень $\Delta m/m \simeq 3 \cdot 10^{-13}$, что обеспечит 3% точности в измерении G .

Горизонтальный градиентометр — крутильные весы, регистрирующие градиент поля в горизонтальной плоскости. На частотах $\omega \sim 10^2$ ($m \sim 10^5$) эквивалентная шумовая температура такого прибора $T_{\text{эвб}} \leq 10^5$ К [20]. При резонансном поднесении массы M на расстояние $r \leq 20$ м точность измерения G составит

$$\Delta G/G = (8kT_{\text{эвб}}/m\hat{\tau}\tau^*)^{1/2} (r^3/GM) \leq 3\% \quad (7)$$

(для $l=30$ см, $\tau^*=10^7$ и $\hat{\tau}=10^5$ с).

6. В заключение отметим, что по своему характеру измерения пространственных вариаций G подпадают под так называемую системати-

ку Дики [21], когда исследуются факты, лежащие в основе теории. Однако можно указать на теоретические схемы, для которых результат таких измерений явился бы критическим тестом. Это: варианты обобщения ОТО с введением в лагранжиан членов с высшими производными от метрики для устранения расходимостей в квантовой теории гравитации [22]; скалярнотензорные модели с константой скалярной связи, зависящей от координат [1], и, наконец, теории с нарушением масштабной инвариантности и появлением частицы массового поля или дилатона [2, 3]. Во всех случаях существенные ограничения на массу вводимых частиц можно получить из опытов по измерению G на расстояниях (10—100) м.

Автор благодарен В. Б. Брагинскому, В. И. Панову, В. Н. Фронтову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wagoner R. V. «Rhs. Rev.», 1970, **Д1**, 3209.
2. Fuji Y. «Nature (Phys. Sci)» 1971, **234**, 5; «Ann. Phys. (N. Y.)», 1972, **69**, 494.
3. Hanlon J. O. «Phys. Rev. Lett.», 1972, **29**, 137.
4. Сагитов М. У. Постоянная тяготения и поле Земли. М., 1969.
5. Сб. Фундаментальные постоянные астрономии. М., 1967.
6. Shapiro I. I., Smith W. B. et al «Phys. Rev. Lett.», 1971, **26**, 27.
7. Mikkelsen D. R., Newman M. J. «Phys. Rev.», 1977, **17**, 1406.
8. Blinnikov V. I. Preprint IKI, N 64, 1978.
9. Braginsky V. B., Rudenko V. N. «Physics Reports.», 1978, **46**, 166.
10. Forward R. «Res. report 516», Hughes Res. Lab. Malibu, march, 1978.
11. Брагинский В. Б., Руденко В. Н., Рукман Г. И. ЖЭТФ, 1962, **43**, 52.
12. Hughes V. W. et. al «Bull. Am. Phys. Soc», 1961, **6**, 424; Dreawer R. «Phil Mag.», 1961, **6**, 683.
13. Blair W., Jon R., Lebscher D. «Gerlands Beitrage zur Geophys.», 1976, **1**, 11.
14. Long D. R. «Nature», 1976, **260**, 417.
15. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерения малых сил в физических экспериментах. М., 1974.
16. Руденко В. Н. «Успехи физ. наук», 1978, **126**, вып. 3, 362.
17. Sinsky J., Weber J. «Phys. Rev. Lett.», 1967, **18**, 795.
18. Апальхов В. К., Митрофанов В. П., Шиян В. С. ДАН СССР, 1978, **242**, 578.
19. Брагинский В. Б., Панов В. И., Фронтон В. Н. «Приборы и техника эксперимента», 1977, № 3, 225.
20. Брагинский В. Б. Физические эксперименты с пробными телами. М., 1976.
21. Дики Р. Н. Сб. Гравитация и относительность. М., 1965, с. 156.
22. Pais A., Vhlenbeck V. «Phys. Rev.», 1950, **79**, 145; Сахаров А. Д. ДАН СССР, 1967, **177**, 70; Witt B. De. «Phys. Rev.», 1975, **19c**, 295; Stelle K. S. GRG, 1978, **9**, 53.