

В. Б. БРАГИНСКИЙ, академик В. Л. ГИНЗБУРГ

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ ОТ ВРЕМЕНИ

В литературе уже давно обсуждается возможность того, что различные величины, считающиеся обычно постоянными, фактически изменяются со временем. Особое место в этом отношении занимает коэффициент гравитационной связи (гравитационная постоянная), в настоящее время равная  $G=6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сек}^{-2}$ . В самом деле, наиболее грандиозный известный объект — Вселенная, нестационарен и в то же время его поведение определяется гравитационным воздействием. Поэтому допущение о возможной зависимости  $G$  от времени  $t$ , хотя и ни в какой мере не обязательно, но все же не столь неестественно, как предположение о непостоянстве заряда электрона, скорости света и т. п. Так или иначе, зависимость (или независимость)  $G$  от  $t$ , как в случае других величин, может быть выяснена только на опыте.

Если  $G \neq \text{const}$ , то общая теория относительности (теория тяготения Эйнштейна) и основанная на ней космология нуждаются в соответствующем обобщении, которое уже неоднократно предлагалось<sup>(1-3)</sup>. Предполагаемое при этом изменение  $G$  порядка единицы за космологическое время  $\tau \sim 1/H \sim 10^{18}$  сек (наиболее вероятное современное значение постоянной Хаббла  $H = (55 \pm 7) \text{ км/сек} \cdot \text{Мпс}$ ). Другими словами, по предположению, в нашу эпоху

$$\frac{1}{G} \left| \frac{dG}{dt} \right| \equiv \frac{\dot{G}}{G} \sim 10^{-18} \text{ сек}^{-1} \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1},$$

и для проверки этой гипотезы нужно измерять  $G$  по крайней мере с точностью до  $10^{-11} \text{ год}^{-1}$ . При таком значении  $\dot{G}/G$  радиус орбиты планеты  $r$  (или гелиоцентрического спутника) изменяется на  $\Delta r = (\dot{G}/G)r \sim 10^2 \text{ см/год}$  (при  $r \sim 10^{13} \text{ см}$ ), а радиус орбиты спутника Земли изменяется на  $10^{-2} \text{ см/год}$  (при  $r \sim 10^9 \text{ см}$ ). В настоящее время из данных по радиолокации планет  $\dot{G}/G < 4 \cdot 10^{-10} \text{ год}$  (см. (4)), и на этом пути в будущем можно ожидать успеха, т. е. измерений с точностью  $10^{-11} \text{ год}^{-1}$ . Не исключено, что такая точность будет достигнута и с использованием спутников без сноса (drag-free satellites). Достигнутая на земной поверхности точность измерения  $\dot{G}/G$  не превосходит  $5 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$  (т. е. 5 мгал за год).

Цель настоящей заметки состоит в обсуждении метода измерений  $\dot{G}/G$  на Земле с точностью не хуже  $10^{-11} \text{ год}^{-1}$ .

Представляются разумными две схемы такого опыта. Первая схема является модификацией известного маятникового метода измерения  $G$  (см. рис. 1)\*. Если такой маятник изготовить из уже освоенного материала — целого монокристалла сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и поместить в вакуумную камеру при низкой температуре, то нестабильность периода его собственных колебаний в поле тяготения Земли за счет изменения температуры  $\Delta T$  будет весьма небольшой. Действительно, температура Дебая для сапфира  $T_D \approx 1040^\circ \text{ К}$ ; это означает, что для  $T = 300^\circ \text{ К}$  и ниже коэффициент линейного температурного расширения пропорционален  $T^3$ . Поэтому при

\* Как в этом, так и в обсуждаемом ниже другом методе непосредственно измеряется ускорение силы тяжести  $g$ , но мы пока предполагаем, что  $\dot{G}/G = |\dot{g}|/g$ .

$T=2^{\circ}\text{K}$   $\alpha \approx 2,5 \cdot 10^{-12}$  град $^{-1}$  и относительное изменение длины при  $\Delta T = 10^{-3}^{\circ}\text{K}$  (что легко достигается стабилизацией давления паров над жидким гелием в термостате) не превысит  $\Delta l/l \approx 2,5 \cdot 10^{-15}$ .

Таким образом, изменение периода колебаний маятника на уровне  $10^{-11}$  будет определяться лишь изменением  $G$  и может быть относительно легко проконтролировано с помощью стандартов частоты, стабильность которых не хуже  $10^{-12}$  за год. Отметим, что постоянная времени такого маятника при рабочей массе  $m=10$  г и вакууме  $10^{-8}$  тор будет порядка  $10^8$  сек и что уже разработанные емкостные датчики не вносят дополнительного затухания на этом уровне (см., например, (5)).

Другая возможная установка (рис. 2) представляет собой, по сути дела, неастиазированный пружинный гравиметр, в котором роль пружины

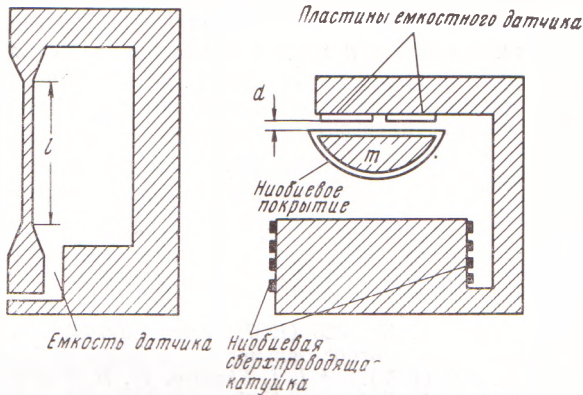


Рис. 1

Рис. 2

играет сверхпроводящий (левитационный) подвес (отметим, что такой подвес уже применялся для сейсмографа (6)). Ясно, что жесткость  $K$  и стабильность  $\dot{K}/K$  такой «пружины» определяется стабильностью линейных размеров подвешенной массы  $M$  и линейных размеров сверхпроводящего соленоида. Если изготовить массу  $m$ , соленоид и емкостный датчик из сапфира, покрытого ниобием, то, очевидно,  $\Delta K/K \approx \Delta l/l$ . При стабильности температуры термостата  $\Delta T = 1 \cdot 10^{-30}$  К при  $T = 2^{\circ}\text{K}$  (так же как и в первом варианте опыта) отношение  $\Delta K/K \approx 2,5 \cdot 10^{-15}$ . Поэтому, если  $G$  изменяется со временем на уровне  $\Delta G \sim 10^{-11}$   $G$  за год, вертикальное перемещение  $\Delta y$  у массы  $m$  будет в основном определяться изменением  $\Delta G$ , т. е.

$$\Delta y = \frac{g}{\omega_0^2} \frac{\Delta G}{G} \sim 10^{-8} \text{ см/год}$$

для  $\omega_0 = (K/m)^{1/2} \sim 1$  рад/сек. При зазоре емкостного датчика  $d = 10^{-2}$  см в этом случае будет необходимо измерять уход частоты  $\Delta \omega/\omega$  радиочастотного генератора на уровне  $\Delta y/d \sim 10^{-6}$ , что не представляет трудностей.

Таким образом, вторая схема опыта значительно проще с точки зрения требования к емкостному датчику, однако очевидно, что появляется дополнительное требование к стабильности магнитного поля. Если поддерживать массу  $m$  магнитное поле  $H = 5 \cdot 10^2$ , то сверхпроводящий магнитный экран должен обеспечить в течение года наблюдений вариации  $\Delta H$ , не большие  $2 \cdot 10^{-9}$  э.

В двух рассмотренных выше вариантах опытов существует неопределенный параметр: изменение геометрических размеров  $\Delta l/l$  за счет старения монокристалла сапфира. Можно предположить, что  $\Delta l/l$  у сапфира существенно меньше, чем у кварца ( $\text{SiO}_2$ ), для которого  $\Delta l/l \sim 10^{-9}$  год $^{-1}$ , так как температура Дебая для кварца, равная  $250^{\circ}\text{K}$ , много ниже, чем

у сапфира. Ясно, однако, что необходимы прямые контрольные измерения этого эффекта.

Резюмируя, можно сделать вывод, что на земной поверхности можно измерить эффект на уровне  $\dot{g}/g \sim 10^{-11}$  год<sup>-1</sup>. Переход к такой же точности при измерении  $\dot{G}/G$  возможен, очевидно, только при сделанном выше предположении, что  $\dot{G}/G = |\dot{g}|/g$  (или, во всяком случае, при установлении достаточно надежной связи между  $\dot{G}/G$  и  $\dot{g}/g$ ). Между тем,  $g$  изменяется не только с изменением  $G$ , но и в результате подъема и опускания материков (от возможности изменения массы тел<sup>1, 3</sup>) мы отвлекаемся). Соответствующее изменение величины  $|\dot{g}|/g$ , по-видимому, достигает  $10^{-8}$  год<sup>-1</sup> (если применить оценку  $g = GM_{\oplus}/r^2$ , то  $\dot{g}/g = -2\dot{r}/r$  и при указанном значении  $|\dot{g}|/g$  и  $r \sim 6,3 \cdot 10^8$  см получаем  $|\Delta r| = |\Delta g|/(2gr) \sim \sim 10$  см/год). Таким образом, измерение  $\dot{G}/G$  на нужном уровне потребует наблюдений в нескольких удаленных точках земной поверхности. С другой стороны, уже измерения  $\dot{g}/g$  имеют большой самостоятельный геофизический интерес.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
25 XII 1973

Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Академии наук СССР  
Москва

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> P. A. M. Dirac, Nature, v. 139, 323 (1937); Proc. Roy. Soc., v. A165, 199 (1938).  
<sup>2</sup> P. Дикки, Сборн. Гравитация и относительность, гл. 8, М., 1965. <sup>3</sup> P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc., v. A333, 419 (1973). <sup>4</sup> I. I. Shapiro, W. B. Smith et al., Phys. Rev. Lett., v. 26, 27 (1971). <sup>5</sup> В. Б. Брагинский, Физические эксперименты с пробными телами, «Наука», 1970. <sup>6</sup> V. S. Tuman, G RG J., v. 4, 273 (1973).