

Фундаментальные применения сверхпроводимости: квантовые интерферометры и принцип Маха

А.И.Головашкин, Л.Н.Жерихина, А.М.Цховребов
 Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия
 Кулешова Г.В.

Московский инженерно-физический институт (Государственный Университет), Москва, Россия

Исходя из оценок разрешающей способности современного сверхпроводящего квантового интерферометра, ранее нами была [1-4] предложена принципиальная схема эксперимента по регистрации изменения гравитационного потенциала, основанная на его связи с фазой куперовского конденсата, циркулирующего в замкнутом кольце. В настоящей работе на основе предложенной схемы анализируются экспериментальные возможности проверки некоторых следствий принципа Маха.

Достижения техники сверхпроводящих квантовых интерферометров (SQUID`ов) усиливают актуальность освоения этих новых возможностей, как при решении задач прикладной науки, так и в исследованиях фундаментальных проблем естествознания [5]. На классических сверхпроводниках у SQUID`ов уже реально достигнуто разрешение на уровне $\sqrt{\langle \delta\Phi^2 \rangle_{1\Gamma u}} = 6 \times 10^{-7} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma u}$ [6-8] (где $\Phi_0 = 2\pi\hbar/2e = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Вб}$ - квант магнитного потока). Речь идет о двухступенчатых DC-SQUID`ах, разработанных специально для современных гравитационных антенн Веберовского типа. Второй SQUID постоянного тока здесь играет роль малошумящего НЧ-усилителя, обрабатывающего электрический сигнал поступающий, с первого DC-SQUID`а. Современные ВТСП SQUID`ы не обладают столь высокой разрешающей способностью. Лучшая чувствительность у них оказывается сопоставимой с чувствительностью обычного коммерческого SQUID`а на классических сверхпроводниках, при этом ВТСП SQUID все равно должен быть охлажден до гелиевых температур. Однако предлагаемый ниже эксперимент не требует прибора с рекордной разрешающей способностью. Последующий анализ покажет: ожидаемый эффект настолько велик, что измерение могут проводиться и коммерческими и даже современными ВТСП SQUID`ами.

Ранее, для задач детектирования гравитационных волн и нестационарных вариаций метрики нами была предложена [1] принципиальная схема регистрации изменения гравитационного потенциала, основанная на связи последнего с фазой сверхпроводящего конденсата куперовских пар. Роль элемента, чувствительного к изменению гравитационного потенциала здесь выполняет сверхпроводящий трансформатор потока. Он представляет собой замкнутый сверхпроводящий контур, в котором

согласно теореме Стокса и условию квантования Бора-Зоммерфельда $\oint (\vec{p} + e\vec{A}) d\vec{l} = 2\pi n\hbar$ (здесь \vec{p} - импульс конденсата куперовских пар, \vec{A} - вектор потенциал магнитного поля) запасенный поток оказывается равен целому числу квантов потока $n\Phi_0$. Последнее выражение, будучи по существу интерференционным условием для фазы волновой функции конденсата, указывает на то, что в сущности здесь имеет место эффект Аронова/Бома.

Однако в поле тяготения условие на фазу сверхпроводящего конденсата видоизменяется: в скалярном произведении, стоящем под знаком контурного интеграла, необходимо учесть метрический тензор g_{ij} :

$$\oint g_{ij} (p^i + eA^i) dl^j = 2\pi(n + \eta)\hbar \quad [1-4].$$

Таким образом, введение тензора g_{ij} позволит определить поправки к эффекту Аронова/Бома в неевклидовой метрике.

По другому оценка поправок для случая слабой гравитации $\|\delta g_{ij}\| \ll \|g_{ij}\|$ может быть произведена на основе аналогии со схемой известного опыта Паунда-Рэбки-Снайдерса [9], которые используя технику Мессбауэровской спектроскопии зарегистрировали в эксперименте красное смещение γ квантов $\delta\omega$, испущенных у подножия силосной башни ($H=22,5\text{ м}$), детектором, находящемся на крыше. Как следует из принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс γ квант теряет энергию, преодолевая поле тяготения:

$$\hbar\delta\omega = \delta E = \frac{E}{c^2} gH = \frac{gH}{c^2} \hbar\omega - \text{ и это есть хорошо известный эффект красного смещения в гравитационном поле.}$$

Далее можно учесть, что в квазирелятивистском приближении изменение метрического тензора по отношению к пустому пространству

$$\|\delta g_{ij}\| = \frac{Hg}{c^2} = \frac{\varphi_G}{c^2}, \text{ однозначно определяется потенциалом гравитационного поля } \varphi_G \approx Hg \text{ и следова-$$

тельно $\delta\omega = \frac{\varphi_G}{c^2} \omega = \|\delta g_{ij}\| \omega$. Последнее выражение

получилось таким же каким должно было получиться при выводе из теореме Стокса с условиями квантования Бора-Зоммерфельда в поле тяготения.

Если вернуться к сверхпроводимости, то можно отметить, что куперовские пары оборачиваются по замкнутому сверхпроводящему контуру трансфор-

матора потока с циклотронной частотой $\omega_c = \frac{2e}{m} B$,

и в принципе по аналогии с γ -квантами здесь тоже можно говорить о красном смещении циклотронного кванта при вертикальном перемещении трансформатора потока в поле тяготения

$\hbar\delta\omega_c = \frac{gH}{c^2}\hbar\omega_c$. Переходя от угловых частот к индукции магнитного поля, а затем к его потоку через площадь кольца, получим:

$$\hbar\delta\left(\frac{2e}{m}B\right) = \frac{gH}{c^2}\hbar\left(\frac{2e}{m}B\right) \Rightarrow \delta B = \frac{gH}{c^2}B \Rightarrow \\ \Rightarrow \delta\Phi = \frac{gH}{c^2}\Phi = \frac{\varphi_G}{c^2}\Phi = \|\delta g_{ij}\|\Phi.$$

Набег фазы возникающий под действием тяготения $2\pi\eta$, а точнее отвечающее ему приращение потока в сверхпроводящем кольце, на поверхности Земли составляет значение

$$\delta\Phi = \frac{\varphi_G}{c^2}\Phi \approx \frac{v_1^2}{c^2}\Phi = \left(\frac{8\text{км/сек}}{300000\text{км/сек}}\right)^2\Phi \approx 0.71 \times 10^{-10},$$

что регистрируется коммерческим SQUID`ом ($\sqrt{\langle \delta\Phi^2 \rangle_{1\text{гн}}} = 10^{-5}\Phi_0/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$), при запасенном в его

трансформаторе потоке всего лишь $\Phi \approx 1.4 \times 10^5 \Phi_0 \approx 2.8 \times 10^{-10}$ Вб. Естественно, что при большем начальном потоке требуется меньшая чувствительность SQUID`а (“работает” обратная пропорциональность).

Теперь попытаемся понять, что произойдет, если это приращение $\delta\Phi$ измеряется SQUID`ом в свободнопадающем лифте. На первый взгляд невесомость как отсутствие силы тяготения еще не означает обнуление абсолютного значения гравитационного потенциала в каждой конкретной точке траектории падения. То есть получается, что $\varphi_G(r)$ остается тем же самым вне зависимости падает или покоится лифт. Однако, согласно обычному определению потенциал известным образом связан с

напряженностью поля $\varphi_G(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \frac{\vec{F}d\vec{r}}{m}$. Но если

задавать в каждой точке r силу не только с учетом гравитации, но и принимая в расчет наравне с силой тяготения и силу инерции, что по существу является следствием принципа Маха, то для свободнопадающего лифта $\vec{F}(\vec{r}) = \vec{F}_G - \vec{F}_I = 0$. Подставляя это в интеграл получаем, что при таком подходе потенциал гравитационного поля в условиях искусственной невесомости оказывается равным нулю. Какой из подходов верен следует определить из предлагаемого эксперимента: регистрирует ли SQUID достаточное изменение запасенного в сверхпроводящем кольце магнитного потока после начала свободного падения. Если да то гравитационные силы и силы инерции имеют фактически

общую природу, если нет то по “большому счету” их нельзя рассматривать наравне...

1. A.I.Golovashkin, G.V.Kuleshova, A.M.Tshovrebov and G.N.Izmailov Detection of Non-Stationary Variation of Metrics by Interference Methods// International Jornal of Modern Physics D, p.187-194, v.13, №13, January 2004.

2. A.I.Golovashkin, G.V.Kuleshova, A.M.Tshovrebov and G.N.Izmailov Detection of weak GW by interference methods and problem invertibal calculation //GR-QC/0312113, dec. 2003.

3. А.И.Головашкин, Г.В. Кулешова, А.М.Цховребов Г.Н.Измайлов Интерференционные методы регистрации нестационарных вариаций метрики без переноса энергии //Краткие сообщения по физике №11, 2002, стр.6-12.

4. A.I.Golovashkin, G.V.Kuleshova, A.M.Tshovrebov and G.N.Izmailov Detection of weak GW and reverse calculation problem //Phys.Interp. of Relativ.Theory, Bauman Moscow State Tech. Univ. 30.06-03.07 2003, p.150-160.

5. А.И.Головашкин, Л.Н.Жерихина, А.М.Цховребов и др., Письма в ЖЭТФ, т.60, вып. 8, с.595-599 (1994).

6. M.B.Ketchen, J.M.Jaycox, Appl.Phys.Lett. 40, 736 (1982).

7. P.Falferi, Class. Quantum Grav. 21, S973-S976(2004).

8. L.Gottardi, M.Podt, M.Bassan *et.al.*, Class. Quantum Grav. 21, S1191-S1196(2004).

9. R.V.Paund, G.A.Rebka, Phys.Rev.Lett. 4, 337 (1960).