

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



15/v-78

P13 - 11252

B-191

2097/2-78

Б.В.Васильев, Е.В.Колычева

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКЕ  
ПРИНЦИПА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

**1978**

P13 - 11252

Б.В.Васильев, Е.В.Колычева

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКЕ  
ПРИНЦИПА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

*Направлено в ЖЭТФ*

Васильев Б.В., Колычева Е.В.

P13 - 11252

Об экспериментальной проверке принципа эквивалентности

Экспериментально с помощью высокочувствительного сверхпроводящего интерферометра измерена зависимость от ориентации в пространстве изменений магнитной индукции феррита, возникающих при приложении к нему электрического поля. Существование такой зависимости можно было бы ожидать в рамках общей теории относительности при движении Земли в гравитационном поле космических масс не по геодезической траектории. Систематического эффекта, коррелированного с суточным вращением Земли, не обнаружено.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Vasiliev B.V., Kolycheva E.V.

P13 - 11252

On Experimental Check-Up of the Principle of Equivalence

The dependence on space orientations of changes in magnetic induction of the ferrite due to the application of an electrical field is measured experimentally with the help of a sensitive superconducting interferometer. The existence of such dependence might be expected within the frame of the General Theory of Relativity for the motion of the Earth in the gravitational field of cosmic bodies along the nongeodesical trajectory. The systematic effect correlated with the daily Earth rotation has not been observed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

В настоящей работе описывается попытка обнаружить магнитную индукцию в объеме, где присутствует постоянное электрическое поле. Возникновения такого эффекта можно было бы ожидать, например, в результате воздействия гравитационного поля на электромагнитные процессы в соответствии с выводами общей теории относительности /ОТО/. В этом смысле данный эксперимент можно трактовать как экспериментальную проверку ОТО.

Осуществленная к настоящему времени экспериментальная проверка ОТО носит несколько односторонний характер. Знаменитые эффекты - красное смещение, отклонение лучей света полем Солнца и прецессия перигелия Меркурия, так же как запаздывание радарного эха в поле Солнца, - обуславливаются отличием от единицы диагональных компонент метрического тензора  $\epsilon_{00}$  и поэтому опытная проверка касается лишь этих компонент. При этом основное свойство эйнштейновской теории гравитации - тензорность взаимодействия - не проверяется. Проверкой тензорности взаимодействия могли бы служить опыты по релятивистской прецессии гироскопа. Однако эти эксперименты до сих пор не осуществлены.

Другой метод проверки ОТО может быть связан с измерением предсказываемого ОТО воздействия гравитации на электромагнетизм. Действительно, в гравитационном поле уравнения Максвелла приобретают несколько видоизмененную форму: необычными становятся соотношения между электрическими и магнитными индукциями  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  и полями  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в вакууме <sup>1/</sup>

$$\vec{B} = \frac{\vec{H}}{\sqrt{g_{00}}} + [\vec{g} \times \vec{E}], \quad /1/$$

$$\vec{D} = \frac{\vec{E}}{\sqrt{g_{00}}} + [\vec{H} \times \vec{g}]. \quad /2/$$

Здесь  $\vec{g}$  - вектор, проекции которого на оси координат равны величинам перекрестных компонент метрического тензора -  $g_{0\alpha}$ . Наличие первых слагаемых в правых частях этих уравнений можно трактовать как результат появления отличных от единицы электрических и магнитных проницаемостей у вакуума в присутствии тяготения, что ведет к отличному от единицы и зависящему от расстояния до гравитирующего тела коэффициенту преломления и таким образом описывает экспериментально наблюдаемое отклонение и замедление луча света /радиоволны/ полем Солнца.

Однако больший интерес, с нашей точки зрения, представляют вторые слагаемые в уравнениях /1,2/, т.к. они определяются недиагональными компонентами метрического тензора и, в принципе, могут служить базой для новой проверки ОТО.

Вектор  $\vec{g}$  согласно /2/ может быть представлен в виде

$$\vec{g} = \frac{2\gamma}{c^3 R^2} [\vec{m} \times \vec{n}]. \quad /3/$$

Здесь  $\vec{m}$  - момент импульса вращающегося гравитирующего тела,  $\vec{n}$  - единичный вектор в направлении наблюдателя, располагающегося на расстоянии R от вращающегося гравитирующего тела,  $\gamma$  - гравитационная константа.

Легко убедиться, что вращая тела лабораторных масштабов, невозможно получить сколько-нибудь заметных с экспериментальной точки зрения величин вектора  $\vec{g}$ .

Движение относительно Земли, например в самолете /в неинерциальных условиях/, дает возможность получить  $|\vec{g}| \approx 10^{-15}$ .

В зоне земной траектории существенно большие величины вектора  $\vec{g}$  создают вращение Солнца и Галактики в системе отсчета, связанной с неподвижными звездами.

Если предполагать в соответствии с астрофизическими данными, что звезды, населяющие сферическую составляющую Галактики, сконцентрированные в ее центральной области и ядре, имеют случайным образом ориентированные скорости своего вращения и не создают значительного поля  $\vec{g}$ , а звезды, населяющие плоскую составляющую, концентрирующиеся на периферии и формирующие относительно тонкий диск, вращаются вокруг центра по закону Кеплера в одном направлении, то поле вектора  $\vec{g}$ , связанного с этим вращением, в системе отсчета неподвижных звезд в области земной траектории может быть получено интегрированием в пределах этой плоской составляющей. Согласно с данными астрофизики /3/ масса плоской компоненты Галактики равна  $8 \cdot 10^{43}$  г, радиус плоской компоненты -  $5 \cdot 10^{22}$  см, Земля находится на расстоянии  $3 \cdot 10^{22}$  см от центра Галактики и вращается по кеплеровской орбите со скоростью 250 км/с, отсюда в области земной траектории

$$|\vec{g}| \approx 2,5 \cdot 10^{-10}. \quad /4/$$

Если предположить, что со скоростью 250 км/с Земля движется в статическом гравитационном поле Галактики прямолинейно и равномерно, то в такой лоренцевой системе, связанной с Землей, мы получим

$$|\vec{g}| \approx 2,3 \cdot 10^{-9}. \quad /5/$$

При существующей технике измерений эти эффекты могли бы быть вполне измеримы, однако в силу принципа эквивалентности в свободно падающей лаборатории они должны быть ненаблюдаемы.

Действительно, согласно принципу эквивалентности "наблюдатель, находящийся в закрытом ящике, никаким способом не сможет установить, покоится ящик /в однородном/ гравитационном поле или же находится в пространстве, свободном от гравитационных полей, но дви-

жется с ускорением, вызываемом приложенными к ящику силами" /4/. Поэтому результаты любых локальных экспериментов, проведенных в системе, падающей с естественным ускорением, характерным для существующего гравитационного поля, будут тождественны результатам опытов в инерциальной системе.

Иными словами, в соответствии с этим принципом свободно падающая лаборатория /Земля/ выберет такую траекторию, чтобы внутри лаборатории локальные гравитационные эффекты, пропорциональные гравитационному полю /но не его градиентам/, отсутствовали.

В связи с этими ограничениями следует ожидать, что в земных условиях эффекты, описываемые вторыми слагаемыми уравнений /1,2/ и возникающие за счет галактического гравитационного поля, могут существовать либо за счет нарушения принципа эквивалентности для компонент  $g_{0\alpha}$ , либо в случае, если Земля падает в галактическом поле несвободно, т.е. с ускорением, определяющимся не только гравитационным полем.

Эффекты, связанные с вращением Солнца и движением Земли вокруг него, имеют ту же природу, но так как расчеты показывают, что их величина на несколько порядков меньше, мы их не рассматриваем.

Неинерциальное движение лаборатории относительно Земли должно было бы дать исчезающий эффект, наблюдение которого явилось бы проверкой ОТО, а не принципа эквивалентности, однако при существующих технических возможностях не хватает нескольких порядков в чувствительности для его наблюдения.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Проверка принципа эквивалентности при таком подходе может быть сведена к измерению магнитной индукции в объеме, где присутствует электрическое поле или, точнее, к измерению изменения магнитной индукции при изменении ориентации электрического поля. Наибольшая чувствительность в измерении малых магнитных эффектов в настоящее время достигается при использовании

сверхпроводящих квантовых интерферометров /5,6/. Их действие основано на том, что магнитный поток через сверхпроводящий контур сохраняется при изменениях магнитного поля, создаваемых как внешними, так и внутренними по отношению к кольцу источниками. Если такой контур представить себе в виде двух сверхпроводящих колец, связанных сверхпроводящими проводами /рис. 1/, то условие сохранения магнитного потока приведет к возникновению во всем контуре незатухающего тока при изменении магнитного поля, пронизывающего одно из этих колец. Этот ток может быть измерен /во втором кольце/ с учетом эффекта квантования магнитного потока и эффекта Джозефсона с чрезвычайно высокой точностью /6,7/. Электрическое поле в исследуемом объеме удобно создать с помощью заряженного конденсатора.

Рассмотрим вопрос, приведет ли помещение конденсатора внутрь такого сверхпроводящего кольца к измеряемым эффектам? Предположим, что напряженность электрического поля в плоском конденсаторе, вектор  $\vec{E}$  и ось нашего сверхпроводящего кольца ориентированы взаимно перпендикулярно /рис. 2/, так, чтобы магнитный поток, возникающий в конденсаторе согласно формуле /1/, мог вызвать ток в сверхпроводящем кольце.

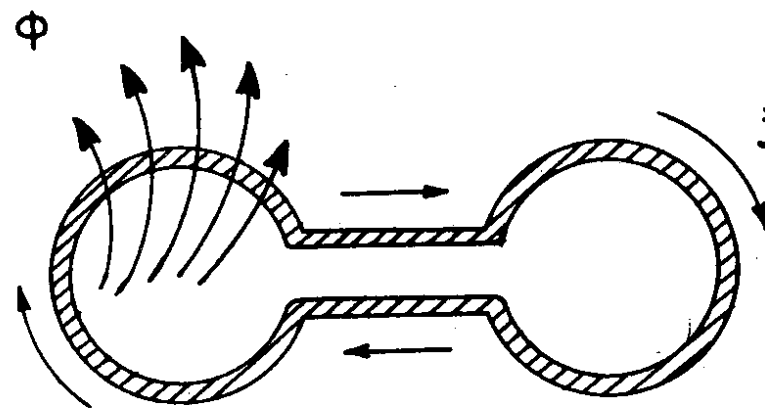


Рис. 1

Для простоты можно положить, что одна из обкладок конденсатора и кольцо находятся при нулевом потенциале. Если вторую обкладку зарядить, то электрическое поле в такой системе будет существовать в зазоре конденсатора и в зазоре между второй обкладкой и кольцом. Нетрудно видеть, что магнитные потоки, которые могли бы возникнуть в этих зазорах за счет рассматриваемого эффекта, точно скомпенсируют друг друга.

Можно доказать теорему, что при любой конфигурации кольца и пластин и при любом их числе нельзя получить при такой постановке отличный от нуля суммарный магнитный поток. Действительно, наличие ненулевого магнитного потока, пронизывающего кольцо, в этом случае означало бы неравенство нулю интеграла по площади кольца от напряженности электрического поля, лежащего в плоскости кольца:

$$\Phi = \iint ds B = g_{0y} \int dy \int dx E_x \quad /6/$$

Так как контур интегрирования в нашем случае ограничен проводником /сверхпроводником/, между любыми точками которого, по определению, отсутствует разность потенциалов, то интеграл тождественно равен нулю:

$$\int_A^B dx E_x \equiv U_{AB} = 0. \quad /7/$$

Для того чтобы суммарный магнитный поток через такое кольцо стал ненулевым, один из зазоров можно заполнить ферромагнитной средой с магнитной проницаемостью  $\mu \gg 1$ . Необходимость прикладывать к этому заполнителю электрическое поле заставляет остановить выбор на ферритах с малой проводимостью и удовлетворительной электрической прочностью, т.к. согласно уравнению /2/ в присутствии магнитного поля в поле вектора  $\vec{g}$  возникает приращение электрической индукции, а не напряженности электрического поля, воздействие этого обратного эффекта не окажет влияния на ориентацию магнитных моментов в феррите.

Основные технические и конструктивные характеристики использованного нами сверхпроводящего квантового интерферометра более подробно описаны ранее /6,8/.

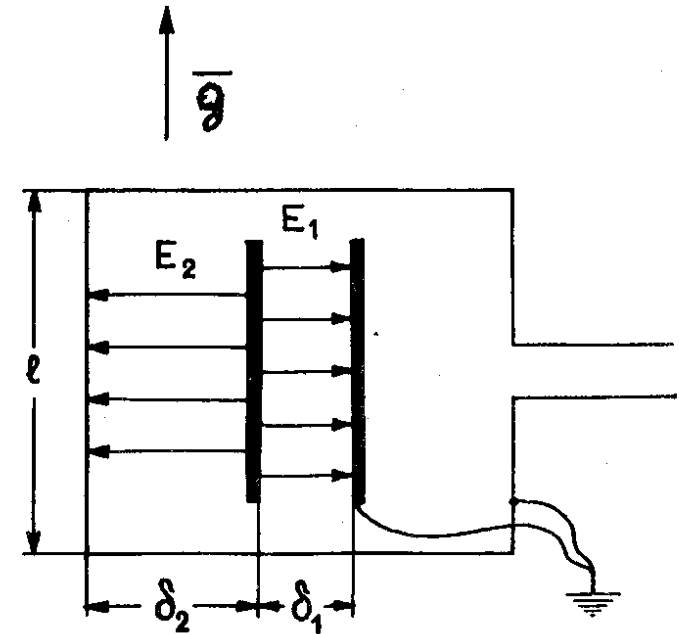


Рис. 2

В данном эксперименте в качестве датчика интерферометра использовался одноиндуктивный сквид. Он представлял собой /см. рис. 3/ блок из ниобия /6/ с одним отверстием диаметром 2 мм /8/, игравшем роль рабочей индуктивности сквида. Тонкая прорезь соединяла внешнюю поверхность блока с внутренним отверстием, делая весь блок односвязным. Внутри прорези помещался точечный джозефсоновский контакт /7/. Ниобиевый стаканчик /1/ тороидальной топологии, внутри которого размещался феррит /4/, играл роль первичной катушки сверхпроводящего трансформатора. Рабочая индуктивность сквида служила одновременно вторичной катушкой трансформатора, внутрь которой вводилась катушка колебательного контура интерферометра. Ранее проведенная оптимизация параметров сквида и контура /6,9/ и использование удачной радиоэлектронной схемы позволили

получить без внесения в трансформатор ферритов и подачи напряжения чувствительность на уровне  $10^{-4} \Phi_0 / \Phi_0$  - квант магнитного потока/ при постоянной времени прибора, равной 1 с.

Проведенные ранее измерения показали, что у всех исследованных ферритов обратимая магнитная восприимчивость при гелиевой температуре сильно снижается и у никель-цинкового феррита, так же как и у магнетодиэлектриков типа  $CdCrO_4$  и  $EuO$ , оказывается близкой к 10. В связи с тем, что одновременно малой электропроводностью, значительной электрической прочностью /до 3 кВ/см/\* и удовлетворительными магнитными свойствами обладает никель-цинковый феррит, описываемый эксперимент был проведен с использованием этого феррита.

В отличие от предыдущего эксперимента<sup>11/</sup>, в котором ферритовая пластинка помещалась прямо внутрь сквида, в описываемом опыте для получения более высокой чувствительности электрическое напряжение прикладывалось к столбику, набранному из ферритовых колец с внутренним диаметром 2 мм и наружным - 3 мм. Для получения надежного электрического контакта между ферритом и подводщими электродами внутренняя и внешняя поверхности ферритовых колец были посеребрены. Ферритовые кольца /4/ помещались внутри ниобиевого стаканчика с центральным ниобиевым стержнем /1/ /рис. 3/. Электрическое поле к ферритовым кольцам прикладывалось радиально. При этом электродами служили ниобиевый стаканчик со стержнем и специальный цилиндр из медной фольги /5/, намотанный поверх ферритового цилиндра. Этот медный цилиндр тщательно изолировался от ниобиевого, чтобы исключить утечки и пробой. Для обеспечения надежного контакта между внутренней посеребренной поверхностью ферритовых колец и центральным ниобиевым стержнем,

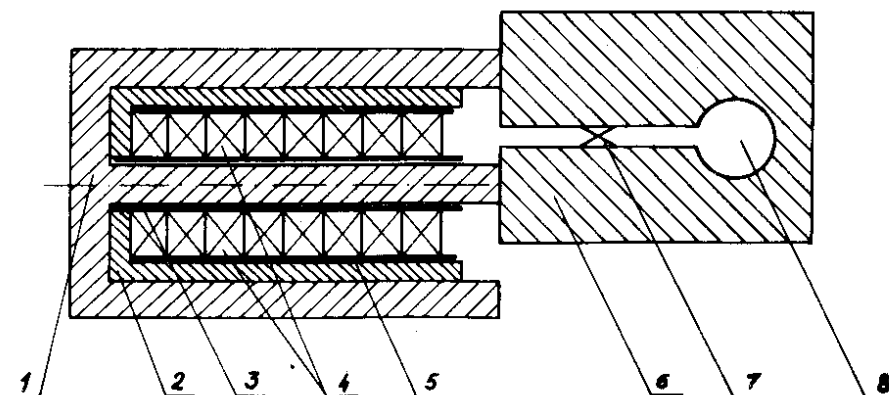


Рис. 3. Датчик интерферометра с трансформатором потока. 1 - сверхпроводящий трансформатор потока - ниобиевый стакан со стержнем; 2 - изолятор; 3 - внутренняя обкладка конденсатора - медная фольга; 4 - ферритовые кольца; 5 - внешняя обкладка конденсатора; 6 - корпус датчика; 7 - точечный контакт; 8 - отверстие датчика.

а также для компенсации разницы коэффициентов теплового расширения феррита и ниобия, между ними также помещался цилиндр /3/ из 20-микронной медной фольги, игравшей роль пружинящего токоподвода.

Электрическое поле, приложенное к ферритовому кольцу в радиальном направлении при наличии вектора  $\vec{g}$ , направленного по оси кольца, согласно уравнению /1/, должно было бы вызвать циркулярное намагничивание ферритовых колец и, как результат закона сохранения магнитного потока, возникновение постоянного тока в сверхпроводящей цепи ниобиевый стакан - стержень и сквид.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Существование поля вектора  $\vec{g}$ , таким образом, должно было бы привести после включения электрического поля  $\vec{E}$  к возникновению в феррите магнитного потока:

$$\Phi_f = \mu S_f E g. \quad /8/$$

\* Электрическая прочность ферритов при комнатных температурах также обычно не очень велика: меньше 10 кВ/см /10/.

Здесь  $S_f$  - поперечное сечение ферритовых колец,  $\mu$  - магнитная проницаемость феррита.

Полный магнитный поток в тороидальном трансформаторе /с учетом эффекта второй части цилиндрического конденсатора, не содержащей феррит/ будет:

$$\Phi_t = (\mu - 1) S_f E g. \quad /9/$$

Сквид в этом случае может зарегистрировать поток

$$\Phi_s = \frac{L_s}{L_s + L_t} \Phi_t. \quad /10/$$

$L_s$  и  $L_t$  - индуктивности сквида и тороидального трансформатора с ферритом, откуда

$$g = \frac{3 \Phi_s (L_s + L_t) \delta}{(\epsilon + 2) U S_f L_s (\mu - 1)}. \quad /11/$$

Здесь учтено, что электрическое поле в феррите с кубической структурой равно

$$E = \frac{U(\epsilon + 2)}{3\delta}. \quad /12/$$

$U$  - электрическое напряжение, приложенное к ферриту,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость феррита,  $\delta$  - толщина стенки ферритового кольца. Предварительные измерения показали, что

$$L_s = /2,88 \pm 0,04/ \cdot 10^{-10} \Gamma,$$

$$L_t = /4,7 \pm 0,1/ \cdot 10^{-10} \Gamma,$$

$$\mu = 11 \pm 2,$$

$$\epsilon = 2,3 \pm 0,1,$$

$$\delta = 0,05 \text{ см},$$

$$S_f = 6,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2. \quad /13/$$

Электрическое напряжение, прикладываемое к ферритам, вырабатывалось генератором прямоугольных импульсов с размахом амплитуды от +100 до -100 В примерно на частоте 30 Гц.

Схема регистрации была смонтирована так, что сигнал, т.е. напряжение с выхода интерферометра, закодированное с помощью аналого-цифрового преобразователя, регистрировался специальным пересчетным устройством в виде разницы между показаниями интерферометра во время положительного и отрицательного полупериодов поданного на феррит напряжения<sup>/12/</sup>. Такое синхронное детектирование позволяло сделать постоянную времени прибора равной десяткам минут и более и значительно снизить шумы.

Для того, чтобы избежать помех, вызванных нестабильностью внешнего магнитного поля, сквид вместе с тороидальным трансформатором, содержащим феррит, был помещен в сверхпроводящий магнитный экран, изготовленный из свинца и имевший форму несколько сплюсненной бутылки. Коэффициент экранирования был лучше  $10^8$ , так что эффектов внешних полей на выходе интерферометра не было замечено.

Внутри криостата ось тороидального трансформатора /т.е. оси ферритовых колец/ ориентировалась горизонтально. В связи с этим установка могла зарегистрировать только проекцию вектора  $\vec{g}$  на горизонтальную плоскость. Для того, чтобы иметь возможность изменить угол между электрическим полем и направлением вектора  $\vec{g}$ , весь криостат вместе с первичной радиоэлектронной аппаратурой устанавливался на поворотной платформе и мог вращаться вокруг вертикальной оси. Специальные меры были приняты для антивибрационной подвески поворотной платформы.

Эксперименты проводились по две серии измерений в сутки. Первая серия измерений осуществлялась, когда  $\alpha$ -Лебеда - звезда Денеб, в направлении которой, согласно данным астрономов, движется Солнечная система в Галактике, а значит, в том же направлении ориентирован вектор  $\vec{g}$ , находилась вблизи линии горизонта. При этом ось ферритовых колец вместе с криостатом



ориентировалась по направлению на звезду Денеб и с помощью цифрового синхронного детектора регистрировались показания интерферометра в течение примерно 3 минут. Затем криостат поворачивался на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси и определялись показания для новой ориентации. Полученные таким образом результаты вычитались, и разница регистрировалась как искомый эффект. Далее процедура повторялась. Другая серия измерений проводилась примерно через двенадцать часов, когда созвездие Лебедя располагалось в зените и при любой ориентации криостата ось ферритовых колец была ортогональна к направлению на звезду Денеб. В этой контрольной серии измерений при любой ориентации криостата, даже в случае нарушения принципа эквивалентности, эффект галактического поля  $\vec{g}$  должен был отсутствовать.

В первой серии измерений, проводившейся примерно в течение часа, интерферометр зарегистрировал изменение потока:

$$\Delta\Phi = (4,1 \pm 10,1) \cdot 10^{-5} \Phi_0 \quad /14/$$

во второй -

$$\Delta\Phi = (1,2 \pm 11,2) \cdot 10^{-5} \Phi_0 \quad /15/$$

Таким образом, используя равенство /11/, получаем, что в первой серии

$$|\vec{g}| = (0,92 \pm 4,20) \cdot 10^{-12} \quad /16/$$

и во второй -

$$|\vec{g}| = (0,27 \pm 3,67) \cdot 10^{-12} \quad /17/$$

В связи с этим можно утверждать, что эффект отсутствовал как в первой, так и во второй серии измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный эксперимент показывает, что в земных условиях эффекты, обусловленные перекрестными компонентами галактического гравитационного поля  $\vec{g}$ , отсутствуют в полном соответствии с принципом эквивалентности и, с другой стороны, движение Земли в галактическом поле определяется с точностью не хуже  $10^{-3}$  чисто гравитационными силами.

Полученный отрицательный результат опыта нельзя считать противоречащим выводу о релятивистской прецессии гироскопа, размещенного на спутнике Земли<sup>/13/</sup>, хотя и в том и в другом случае эффекты описываются в терминах действия гравитационного поля с компонентами  $g_{\alpha}$  и измерения ведутся в свободно падающей лаборатории. Измерение угла прецессии возможно по отношению к неподвижным звездам, и потому подобный эксперимент в этом смысле проводится в неинерциальной системе. В это же время описанный эксперимент можно считать проведенным в локально-инерциальной системе отсчета.

Следует отметить, что результаты проведенного эксперимента нельзя, строго говоря, трактовать однозначно, поскольку в настоящее время нет ни экспериментальных данных, ни теоретических предсказаний о поведении магнитных моментов в феррите в присутствии электрического и гравитационного полей.

Авторы искренне признательны В.М.Лачинову и М.М.Миржалилову за помощь в подготовке аппаратуры и проведении измерений, а также Р.А.Асанову, В.Б.Брагинскому, В.К.Игнатовичу, Д.А.Киржницу, В.Л.Любошину, Л.А.Максимову, Л.А.Микаэлян, В.И.Огиевскому, Ю.М.Останевичу, М.И.Подгорецкому, Э.А.Перельштейну, Г.В.Скродскому, Я.А.Сморозинскому, Л.Черу, Н.А.Черникову, В.В.Шмидту за полезные и интересные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скроцкий Г.В. Доклады АН СССР, 1957, 114, №1, с.73; Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля, "Наука", М., 1973, с.328;  
Cohen J. *Phys.Rev.*, 1966, 148, p.1264;  
Ehlers J., Rindler W. *Phys.Rev.*, D4, p.3543.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. "Наука", М., 1973, с.423.
3. Попов П.И. и др. *Астрономия*, ГУПИ, М., 1958;  
Зонн В., Рудницкий К. *Звездная астрономия*, ИЛ, М., 1959, с.197.
4. Эйнштейн А. Сб. научн. трудов, т.1, "Наука", М., 1965, с.227.
5. Clark J. *Proc. IEEE*, 1973, 61, p.7.
6. Vasiliev B.V., Danilov V.V., Licharev K.K. *IEEE Trans. Magn.*, MAG-11, 1975, no. 2, p.743.
7. Giffard J.M., Webb R.A., Wheatley. *J.C.Low Temp.*, 1972, 6, p.533.
8. Васильев Б.В., Иваненко А.И., Трофимов В.Н. *Радиотехника и электроника*, 1975, XX, №6, с.1255.
9. Lounsmaa O.V. *Experimental Principles and Methods below 1 K. L and N.*, 1974.
10. Белов К.П., Свирина Е.П. *УФН*, 1968, 96, с.21.
11. Васильев Б.В. *ОИЯИ*, P8-9905, Дубна, 1976.
12. Васильев Б.В., Сермягин А.В., Суханов А.Ю. *ОИЯИ*, P13-10949, Дубна, 1977.
13. Schiff L.I. *Phys.Rev.Lett.*, 1960, 4, p.215.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 января 1978 года.