



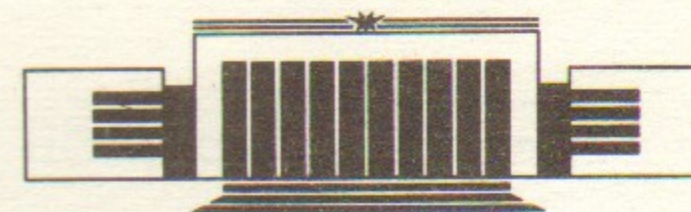
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

21

П.В. Воробьев

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА
ЭКЗОТИЧЕСКОГО ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ,
НАРУШАЮЩЕГО Т-ИНВАРИАНТНОСТЬ**

ПРЕПРИНТ 89-31



НОВОСИБИРСК

Предварительные результаты поиска
экзотического действия,
нарушающего Т-инвариантность

П.В. Воробьев

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Изложены предварительные результаты эксперимента по поиску экзотического дальнего действия, нарушающего Т- и Р-инвариантность. Приведены ограничения на константы взаимодействия. Обсуждается возможность увеличения чувствительности в новых экспериментах, подготавливаемых в ИЯФ.

1. ТЕОРИЯ

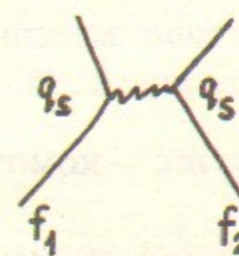
В работе [1] продемонстрированы три возможных типа взаимодействия (псевдо)голдстоунского бозона (аксиона) с фермионами. Голдстоуновский бозон может взаимодействовать с фермионом только как скаляр или псевдоскаляр с соответствующими константами связи q_s и q_p . Лагранжиан скалярного взаимодействия аксиона (a) с фермионом (f)

$$L = q_s \bar{f} \cdot f a. \quad (1)$$

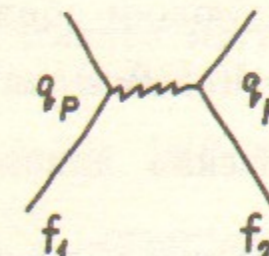
Лагранжиан псевдоскалярного взаимодействия

$$L = q_p \bar{f} i \gamma_5 f a. \quad (2)$$

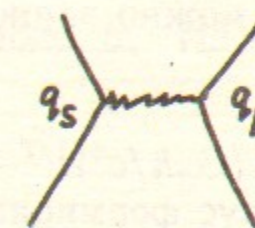
Скалярная и псевдоскалярная вершины могут образовать три типа фейнмановских диаграмм взаимодействия с однобозонным обменом:



тип 1



тип 2



тип 3

Соответственно должны существовать и три типа сил.

В нерелятивистском приближении взаимодействия можно представить следующим образом:

1. Скалярное (монополь-монопольное) взаимодействие:

$$V(r) = q_S q_S \exp(-m_a r) / 4\pi r. \quad (3)$$

2. Квазимагнитное (диполь-дипольное) спин-спиновое взаимодействие:

$$V(r) = (q_P q_P / 16\pi m_1 m_2) [(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) - 3(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{n})(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{n})] / r^3 \quad (4)$$

или

$$V(r) = G_P [(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) - 3(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{n})(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{n})] / r^3.$$

3. Монополь-дипольное взаимодействие:

$$V(r) = (q_S q_P / 8\pi m_2) \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{n} (m_a / r + 1 / r^2) \exp(-m_a r) \quad (5)$$

или в случае $m_a = 0$

$$V(r) = G_{SP} (\vec{\sigma} \cdot \vec{n}) / r^2, \quad G_{SP} = q_S q_P / 8\pi m. \quad (6)$$

Здесь: $\vec{n} = \vec{r} / |r|$, m_a — масса бозона, m_1 и m_2 — массы фермионов. Экзотичность такого взаимодействия в том, что оно нарушает P- и T-четность (P- и T-инвариантность нарушается $\vec{\sigma} \cdot \vec{n}$).

Муди и Вильчек [1] обсудили теорию и экспериментальные возможности детектирования таких взаимодействий в случае, когда бозон — легкий аксион.

Лейтнер и Окубо [2] рассмотрели вопрос о дискретных симметриях в гравитации и предложили характеризовать P- и T-нарушающие взаимодействия типа (6) параметром A :

$$V(r) = V_0(r) (1 + A \vec{\sigma} \cdot \vec{n}), \quad (7)$$

где $V_0 = G_N M m / r$ — потенциал ньютоновского гравитационного взаимодействия, m — масса фермиона. Аномальную часть взаимодействия можно записать следующим образом:

$$V_0(R) = A (L_P^2 / R_0 r_c) M_0 c^2, \quad (8)$$

где $L_P = (G_N \hbar / c^3)^{1/2}$ — планковская длина, $r_c = \hbar / m c$ — комптоновский радиус фермиона.

Такое взаимодействие приводит к прецессии спина фермиона в поле массивного неполяризованного тела, причем ось прецессии совпадает с локальной вертикалью. Поведение спинора в поле Земли подробно рассматривалось в работах [3, 4]. Частота прецессии спина:

$$\omega = 2A V_0(r) / \hbar. \quad (9)$$

Учитывая, что $V_0(r) = G_N M_0 m / R_0$ получим:

$$\omega = 2A G_N M_0 m S / R_0 \hbar \quad (10)$$

или

$$\omega = 2A g c^{-1} S R / r_c. \quad (11)$$

Здесь M_0 — масса Земли, R_0 — ее радиус, g — ускорение свободного падения, c — скорость света, m — масса фермиона, r_c — его комптоновский радиус, $S = 1/2$ — спин фермиона. С другой стороны, из (5) следует

$$\omega = 2k G_N M_0 c^{-1} / R_0 \quad \text{или} \quad \omega = 2k c^{-1} g. \quad (12)$$

В работе [4] обсуждалось взаимодействие спинора с гравитационным полем массивного тела. Рассматривалось взаимодействие вида

$$L \sim \bar{\psi} i \gamma^a \gamma_5 g_a \psi, \quad (13)$$

где g_a — 4-вектор гравитационного ускорения. Соответствующий потенциал взаимодействия:

$$V = k \hbar c^{-1} g = k \hbar c^{-1} G_N M_0 / R_0 \quad (14)$$

или

$$V = k (L_P / R_0)^2 M_0 c^2. \quad (15)$$

Частота прецессии спина:

$$\omega = 2k c^{-1} g, \quad (16)$$

что соответствует (12).

Соотношение между параметром Окубо — Лейтнера A и константой $k = G_{SP} / G_N$ следующее:

$$A = k r_c / R_0. \quad (17)$$

Мы можем ввести эффективное магнитное поле B_* . Из соотношения $\mu_B B_* / \hbar = \omega = A V_0 / \hbar$ получим:

$$B_* = 2A c^{-1} g (R_0 / r_c) (\hbar / \mu_B) \quad (18)$$

или

$$B_* = 2k c^{-1} g \hbar / \mu_B. \quad (19)$$

При $k = 1$ в поле Земли $\omega = 3 \cdot 10^{-8}$, $B_* \sim 10^{-14}$ Гс, $A \sim 10^{-20}$ (e), $A \sim 10^{23}$ (P).

Следует отметить, что здесь имеет место взаимодействие со

спином фермиона, а не с магнитным моментом, поэтому такое взаимодействие не экранируется сверхпроводящими экранами. Оно не различает фермионы и антифермионы в псевдоскалярной вершине.

2. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА КОНСТАНТУ Т-НАРУШАЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Экспериментов, посвященных поиску дальнедействий, нарушающих Т-инвариантность, немного. По-видимому, первой была работа Кокони и Салпетера [5]. Затем появилась работа Древера [6], который показал, что частота ЯМР для ядер ${}^7\text{Li}$ с точностью $\omega < 0.02$ Гц не зависит от ориентации спинов образца относительно Солнца и направления на центр Галактики. Несколько позже появилась работа [7], в которой сообщалось, что наблюдается зависимость частоты ЯМР-сигнала от ориентации относительно вертикали. Эффект примерно на 10 стандартных отклонений отличался от нуля! Это сообщение вызвало большое оживление, однако, более точные измерения [8] не обнаружили эффекта на заметно более высоком уровне точности. Все эти эксперименты дают ограничение на взаимодействие с нуклонами (кварками). Ограничение на взаимодействие с электроном можно получить из g -2 экспериментов [9, 10].

Сегодня имеется ряд методик, используя которые, можно резко увеличить чувствительность экспериментов [11].

Существующие ограничения на параметры A и k экзотического Т-нарушающего дальнедействия, а также ограничения, которые могут быть получены с использованием новых методик, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Ограничения для нуклонов

Источник гравитац. поля	Лучшее ограничение			Достижимое ограничение		
	на ω , Гц	на A	на k	на ω , Гц	на A	на k
Земля	0.2 [8]	$1.3 \cdot 10^{-15}$	$\sim 10^7$	10^{-4} [12] 10^{-6} [11]	$2.1 \cdot 10^{-19}$ $2.1 \cdot 10^{-21}$	$\sim 10^4$ $\sim 10^2$
Солнце	0.02 [6]	$1.3 \cdot 10^{-18}$	$\sim 10^9$	10^{-4} [12] 10^{-6} [11]	$1.6 \cdot 10^{-20}$ $1.6 \cdot 10^{-22}$	$\sim 10^7$ $\sim 10^5$
Галактика	0.02 [6]	$1.4 \cdot 10^{-20}$	$\sim 10^{16}$	10^{-4} [12] 10^{-6} [11]	$1.7 \cdot 10^{-22}$ $1.7 \cdot 10^{-24}$	$\sim 10^{14}$ $\sim 10^{12}$

Таблица 2
Ограничения для электронов

Источник гравитац. поля	Лучшее ограничение			Достижимое ограничение		
	на ω , Гц	на A	на k	на ω , Гц	на A	на k
Земля	0.1 [10]	10^{-12}	$\sim 10^7$	10^{-6} [13]	10^{-17}	10^2
Солнце				10^{-6} [13]	10^{-18}	10^5
Галактика				10^{-6} [13]	10^{-20}	10^{12}

3. ЭКСПЕРИМЕНТ ИЯФ: Т-1

Мы подготовили и поставили в ИЯФ эксперимент по поиску такого Т-нарушающего дальнедействия. Была использована криогенная методика, разработанная нами для экспериментов по поиску квазимагнитного дальнедействующего арионного поля [13, 14].

В настоящее время имеются предварительные результаты, полученные на этом детекторе. Нами получено ограничение на константу Т-нарушающего взаимодействия электронов со скалярным полем Солнца и Галактики.

Рассмотрим схему детектора Т-1 (рис. 1), в котором мы использовали криогенное оборудование и детали нашего детектора А-3 [14]. Собственно зонд, магнитометр и криогенная часть детектора были использованы без изменения.

В нашем эксперименте Т-1, мы измеряли намагниченность ферромагнитного образца, заключенного в сверхпроводящий магнитный экран, в зависимости от его ориентации относительно Солнца и Галактики. Для изменения ориентации детектор был размещен на платформе, вращающейся со скоростью около одного оборота в минуту. Платформа имела акустический фильтр, на котором были смонтированы криостат детектора и ВЧ-блоки электроники СКВИДа. Для контроля углового положения зонда использовалась схема фотопривязки аналогичная схеме, использованной нами ранее в нашем детекторе А-3.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Детектор — зонд из пермаллоя 78НД2М размером $10 \times 1 \times 2$ мм помещен в трехслойный свинцовый сверхпроводящий магнитный экран диаметром 20 мм и длиной 150 мм. Намагниченность зонда измеряется СКВИД-магнитометром «КРИОМ-1М» с чувствительностью по

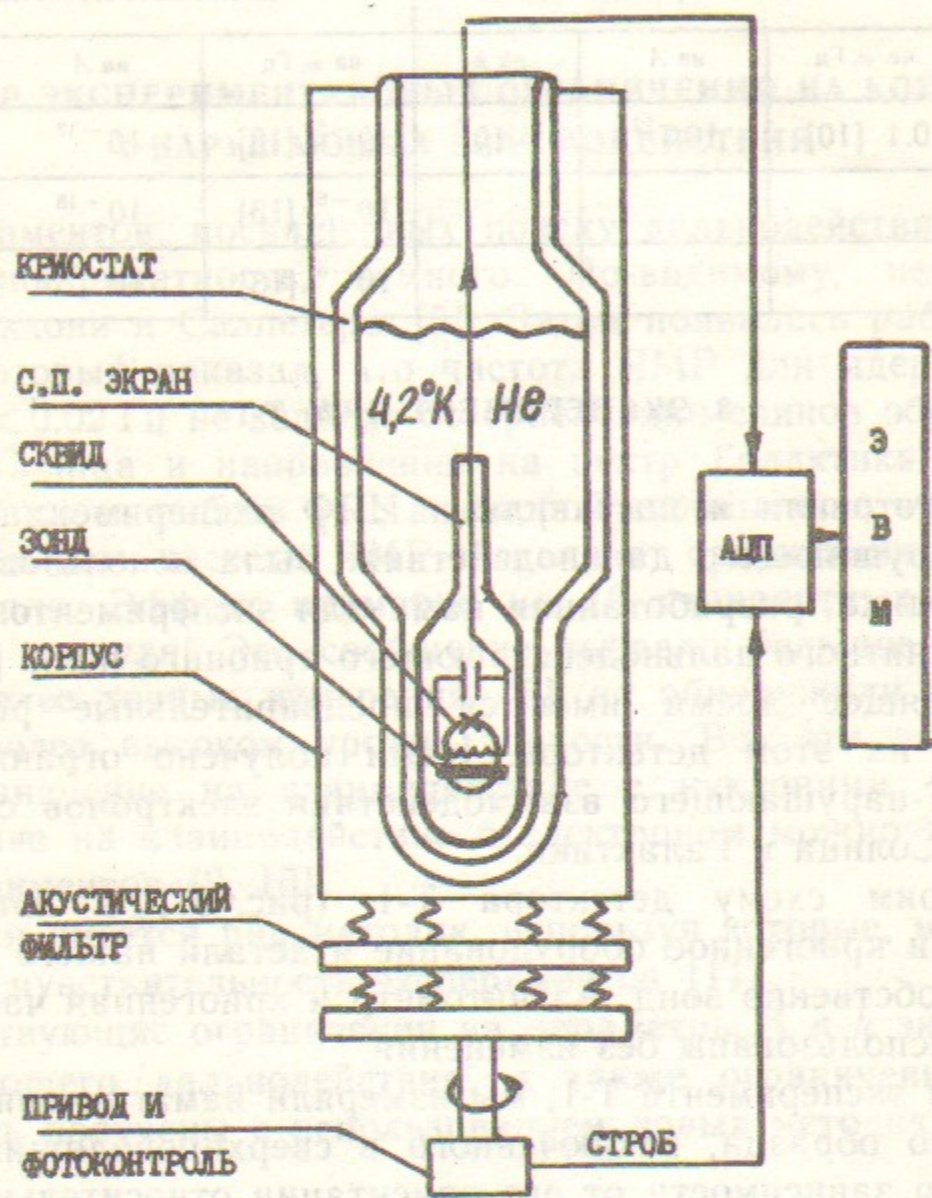


Рис. 1. Схема детектора Т-1.

магнитному потоку $\Phi = 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$. Эффективная магнитная восприимчивость зонда μ_F была измерена. В полях, соответствующих $1 - 10^2$ квантов потока в объеме детектора: $\mu_F \approx 10$. Для калибровки системы имеется небольшой соленоид, создающий слабое магнитное поле в месте расположения зонда. Сверхпроводящий экран с зондом и СКВИДом размещен в стеклянном безазотном криостате емкостью около 1.5 л. Ресурс работы без дозаправки LHe около 1.5 суток.

Сигнал СКВИДа оцифровывается АЦП типа Ц0609, который стробируется системой фотопривязки к углу поворота детектора. Привязка к углу позволяет не заботиться о стабильности скорости вращения детектора. Вся система контролируется и управляется микроЭВМ. Производится фурье-анализ сигнала СКВИДа. Выделяется фурье-компонента намагниченности зонда на частоте вращения детектора. Остальные гармоники фурье-разложения используются для оценки шумов.

На рис. 2 можно видеть сигнал СКВИДа в зависимости от угла поворота детектора. Значительная амплитуда первой гармоники намагниченности объясняется, по-видимому, эффектом магнестрикции материала зонда в гравитационном поле Земли. Наклон оси вращения детектора на 5° относительно вертикали приводит к увеличению сигнала СКВИДа в 10 раз. Это, конечно, может быть искомым эффект — экзотическое Т-нарушающее поле Земли. Однако, эффект такой величины противоречит результатам, полученным в $g-2$ экспериментах [9, 10]. Таким образом, в детекторе этого типа неизбежна систематическая помеха на частоте наблюдения. Эффект взаимодействия детектора с полем Солнца и Галактики должен проявляться, в основном, как изменение фазы сигнала с периодом солнечных или звездных суток.

Таблица 3

Ограничения для электронов (Эксп. Т-1)

Источник гравитац. поля	Ограничение		
	на ω , Гц	на A	на k
Солнце	10^{-3}	$\sim 10^{-15}$	$\sim 10^8$
Галактика	10^{-3}	$\sim 10^{-17}$	$\sim 10^{15}$

Для Земли такое ограничение на ω дало бы $k < 10^5$, $A < 10^{-14}$.

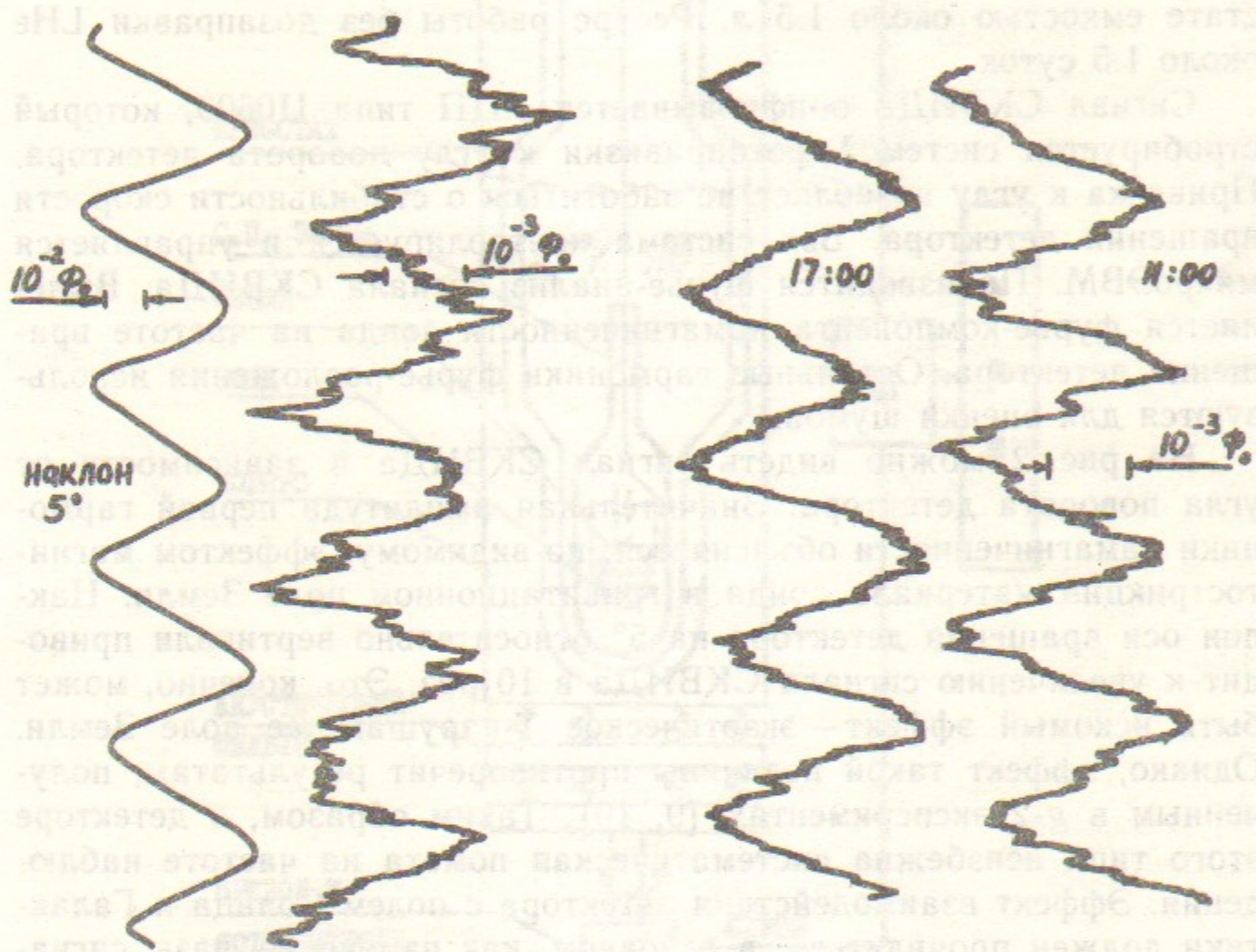


Рис. 2.

Рис. 3.

Время	Сигнал	Масштаб	Угол наклона
17:00	10 ⁻³ Φ	10 ⁻³ Φ	5°
11:00	10 ⁻³ Φ	10 ⁻³ Φ	5°

На рис. 3 приведены сигналы СКВИДа для двух экспериментальных заходов, разделенных интервалом времени 6 часов. Из отсутствия значимого сдвига фазы в записях разделенных интервалом 1/4 суток, было получено ограничение:

$$\omega < 10^{-3}. \quad (20)$$

Это дает ограничения, приведенные в табл. 3

В ближайшее время мы планируем улучшить точность еще на два порядка, используя карданный подвес детектора и увеличив статистику. Использование карданного подвеса детектора должно существенно снизить фоновый сигнал магнитострикции.

4. ПЕРСПЕКТИВЫ (Т-2, Т-3, ...)

Сильный фоновый сигнал, связанный с магнитострикцией, не позволяет использовать Землю в качестве источника поля. Необходимо избавиться от переменных натяжений, возникающих при вращении зонда в гравитационном поле Земли. В эксперименте Т-2, который мы сейчас готовим в ИЯФ, эта проблема решается следующим способом: детектор и его электроника размещены на вращающейся платформе (рис. 4). Детектор, т. е. криостат с зондом и СКВИДОм, подвешен в стороне от оси вращения платформы так, что детектор свободно может отклоняться от вертикали под действием центробежной силы. При этом детектор вращается вокруг собственной оси, совпадающей с равнодействующей силы тяготения и центробежной силы. В этом случае не возникают переменные силы, действующие на зонд. В то же время чувствительность к полю Земли может быть велика, так как угол между осью вращения детектора и вертикалью порядка единицы.

Мы собираемся подготовить и провести в течение ближайшего времени совместно с ГОИ (Ленинград) другой эксперимент по поиску Т-нарушающих взаимодействий. В эксперименте Т-3 мы планируем, используя оптические ядерные магнитометры ГОИ, чувствительность которых практически достигла чувствительности СКВИДов, и криогенную методику ИЯФ, значительно улучшить ограничение и для взаимодействия с нуклоном (кварком).

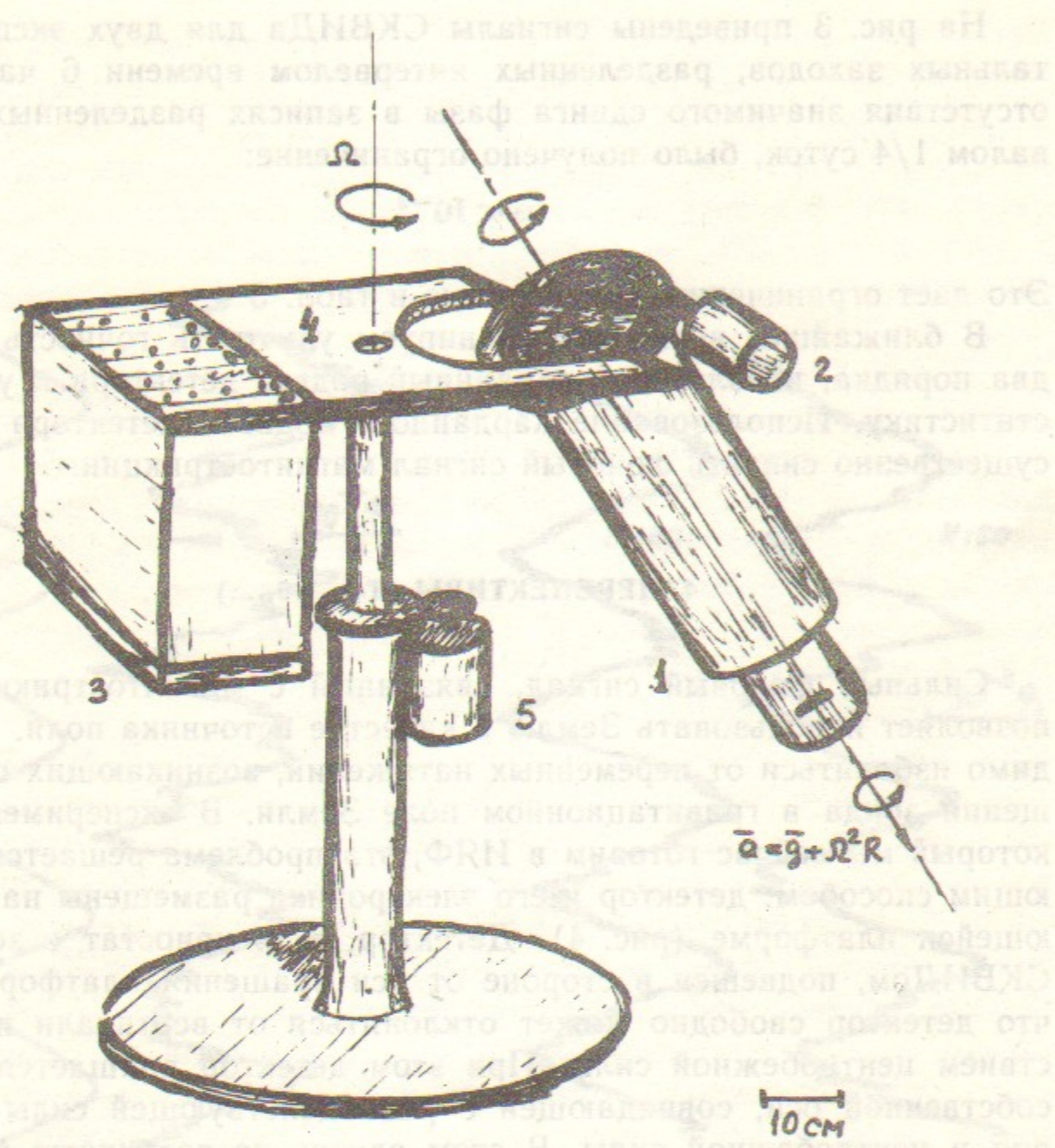


Рис. 4. Схема детектора Т-2:

1—детектор, 2—привод вращения детектора, 3—электроника детектора, 4—платформа, 5—привод вращения платформы.

Таблица 4

Достижимое ограничение электронов (Эксп. Т-2)

Источник гравитац. поля	Достижимое ограничение		
	на ω , Гц	на A	на k
Земля	10^{-5}	10^{-16}	10^3
Солнце	10^{-5}	10^{-17}	10^6
Галактика	10^{-5}	10^{-19}	10^{13}

Таблица 5

Достижимое ограничение для нуклонов (Эксп. Т-3)

Источник гравитац. поля	Достижимое ограничение		
	на ω , Гц	на A	на k
Земля	10^{-5}	10^{-20}	10^3
Солнце	10^{-5}	10^{-21}	10^6
Галактика	10^{-5}	10^{-23}	10^{13}

В заключение хочется заметить, что во Вселенной существует две практически стопроцентные асимметрии: необратимость времени и положительность массы. Т-нарушающие компоненты гравитации естественным образом связывают их.

Автор благодарен А.А. Ансельму, Л.М. Баркову, М.С. Золотеву, Э.А. Кураеву, И.Б. Хриповичу за многочисленные обсуждения и поддержку.

Литература

1. *Moody J.E., Wilczek F.* Phys. Rev. D30 (1984) 130.
2. *Leitner J., Okubo S.* Phys. Rev. B136 (1964) 1542.
3. *Harri Dass N.D.* Phys. Rev. Lett. 36 (1976) 393.
4. *Peres A.* Phys. Rev. D 18 (1978) 2739.
5. *Cokkoni G., Salpeter E.* Nuovo Cimento 10 (1958) 647.
6. *Drever R.W.P.* Phil. Mag. 6 (1961) 683.
7. *Велюхов Г.Е.* Письма в ЖЭТФ 8 (1968) 229.
8. *V. Arlen Young,* Phys. Rev. Lett. 22 (1969) 1445.
9. *Экстрем Ф., Вайнленд Д.* УФН 134 (1981) 711.
10. *Vasserman I.B. et. al.* Phys. Lett. B198 (1987) 302.
11. *Gallop J.C., Petley b.w.,* Nature 303 (1983) 53.
12. *Cohen-Tannoudji C. et. al.* Phys. Rev. Lett. 22 (1969) 1445.
13. *Воробьев П.В.* Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-161. Новосибирск 1983.
14. *Vorobyov P.V., Gitarts Ya.I.* Phys. Lett. B198 (1988) 146.
15. *Peccei R.D.* Preprint DESY 88-006
16. *Mikkelsen D.R., Newman M.J.* Phys. Rev. D16 (1977) 919.

П.В. Воробьев

**Предварительные результаты поиска
экзотического дальнего действия,
нарушающего Т-инвариантность**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 21 марта 1989 г.
Подписано в печать 23.03. 1989 г. МН 12027
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,2 печ.л., 1,1 уч.-изд.л.
Тираж 170 экз. Бесплатно. Заказ № 31

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*