

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ДЕТЕКТОР (ПСЕВДО) ГОЛДСТОУНОВСКИХ БОЗОНОВ

П.В.Воробьев, И.В.Колоколов, В.Ф.Фогель

В этой работе мы обсуждаем лабораторный эксперимент по генерации и детектированию псевдоскалярных голдстоуновских бозонов (арион, аксион, майорон и т. д.) с помощью когерентной конверсии арион-фотон на резонансной системе замагниченных спинов параллельно ферромагнитной среды.

1. Эта работа посвящена обсуждению нового эксперимента по поиску экзотического дальнего действия, связанного с обменом безмассовым или очень легким (псевдо) голдстоуновским бозоном (арионом^{1, 2} или аксионом³).

Эксперименты по поиску таких дальних действий интересны как с общезначимой точки зрения (новая дальнедействующая сила!), так и потому, что позволяют получить (косвенную) информацию о физике в области энергий $10^6 - 10^{19}$ ГэВ, в области, совершенно недоступной для ускорителей. Перспективными выглядят методы поиска экзотических взаимодействий и соответствующих им бозонов по их макроскопическим проявлениям (например, аномалии во взаимодействии спин-поляризованных тел). Действительно, взаимодействие, возникающее при обмене арионом, рассмотренное в работах^{1, 2}, приводит к появлению квазимагнитных сил, действующих между поляризованными телами. Собственно же магнитное взаимодействие может быть эффективно подавлено сверхпроводящими экранами⁴.

Имеются экспериментальные ограничения на G_a – константу фермион-фермионного взаимодействия за счет обмена арионом:

$$G_a < 10^{-2} G_F \quad ^{5, 6}, \quad G_a < 10^{-3} G_F \quad ^4$$

2. Лагранжиан взаимодействия ариона (а) с электроном (е)^{1, 2}:

$$\mathcal{L}_{ae} = qa\bar{e}i\gamma_5 e, \quad (1)$$

где q – безразмерный арионный заряд ($G_a^{1,2} \sim q/m_e$) в низкоэнергетическом пределе порождает эффективный лагранжиан взаимодействия арионного поля с замагниченной средой:

$$\mathcal{L}_{eff} = \kappa \vec{\nabla} a \mathbf{m}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{m}(\mathbf{r})$ – плотность намагниченности (вернее, переменная ее часть), $\kappa = \mu_a/\mu_B g$ – отношение арионного магнетона к борновскому и фактору Ланде, $\mu_a = \sqrt{G_a/8\pi}$. Так как взаимодействие (2) подобно взаимодействию с магнитным полем $\kappa \vec{\nabla} a$, то возможна следующая постановка эксперимента (см. схематический рис.). Волновод-резонатор, помещенный в межполюсной зазор магнитов, заполнен высокочастотным ферритом.

Частота генератора накачки и приемника равны одной из собственных частот резонатора, заполненного магнетиком. Когерентная спиновая волна в ферромагнетике, возбуждаемая волной накачки, генерирует когерентное аксионное поле. Аксионный пучок, имеющий узкую диаграмму направленности, беспрепятственно проходит через стенки волновода и защиту, поглощающую фотоны, и попадает во второй волновод, также заполненный намагниченным ферритом. Аксионная волна резонансно возбуждает когерентную процессию спинов, что приводит к появлению связанной со спинами слабой электромагнитной волны. Эта электромагнитная волна регистрируется высокочувствительным приемником.

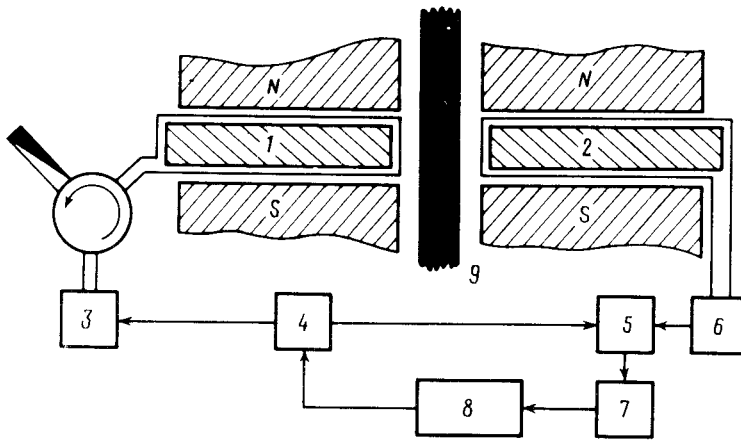


Схема эксперимента. 1, 2 – Волновод-резонатор с ферритовым заполнением. 3 – Мощный СВЧ генератор. 4 – Задающий генератор. 5 – Синхронный детектор. 6 – Высокочувствительный СВЧ усилитель. 7 – АЦП, 8 – ЭВМ. 9 – Экран.

Закон дисперсии Ω_k связанных колебаний электромагнитного поля и намагниченности дается формулой ⁷:

$$\Omega_k^2 = \frac{1}{2\epsilon} [k^2 + \tilde{\omega}_m^2 \pm \sqrt{(k^2 - \tilde{\omega}_m^2)^2 + 8k^2\omega_m\tilde{\omega}_m}], \quad (3)$$

где ϵ -- диэлектрическая проницаемость среды, $\omega_m = 2g\mu_B M_0$, M_0 -- намагниченность насыщения,

$$\tilde{\omega}_m = \sqrt{\omega_0(\omega_0 + 4\pi\omega_m)}$$

B_0 -- магнитное поле с учетом размагничивающих факторов. Поскольку $\epsilon > 1$, то арионный закон дисперсии $\Omega_k^a = k$ имеет точку пересечения с верхней ветвью из (3) при некоторой частоте Ω_0 . Именно на этой частоте и должен работать генератор. Амплитуда колебаний в первом резонаторе определяется энергетическим балансом: вся поступающая энергия \mathcal{E} уносится релаксирующими с частотой γ магнонами. Во втором -- как амплитуда осциллятора с затуханием γ , находящемся в резонансе с внешней силой. Простые расчеты приводят к следующей формуле для потока энергии \mathcal{E}_f электромагнитного излучения на выходе второго резонатора (коэффициента конверсии):

$$\frac{\mathcal{E}_f}{\mathcal{E}} = C \kappa^4 (kL) \frac{\Omega_0 \omega_m (\Omega_0 - \tilde{\omega}_m)^2}{\gamma^3 \omega_m}. \quad (4)$$

Здесь $C = \text{const}$ -- фактор порядка 1, L -- длина резонатора, k -- волновой вектор колебаний с частотой Ω_0 . По порядку величины:

$$\frac{\mathcal{E}_f}{\mathcal{E}} \sim \kappa^4 (kL) (\Omega_0/\gamma)^3. \quad (5)$$

Характерные добротности доступных ферритов: $\Omega/\gamma \approx 10^3$ и для $kL = 10^2$:

$$\mathcal{E}_f/\mathcal{E} \approx 10^{11} \kappa^4. \quad (6)$$

Непосредственная трансформация фотона в аксион и обратно в поперечном магнитном поле ⁸ дает коэффициент преобразования энергии $\mathcal{E}_f/\mathcal{E} \approx \alpha^4 \kappa^4 (kL)^4$, что при тех же значениях параметров: $\mathcal{E}_f/\mathcal{E} \approx \kappa^4$ -- на 11 порядков меньше.

Изменяя частоту накачки и напряженность внешнего поля, можно осуществить когерентное возбуждение и поглощение массивного аксиона, если его масса меньше щели в магнитном спектре, т. е. 10^{-4} эВ.

В заключение мы хотели бы выразить глубокую благодарность А.А.Ансельму, И.Б.Христовичу и В.Б.Черепанову за стимулирующие обсуждения и полезные советы.

Литература

1. Ансельм А.А., Уральцев Н.Г. Физика элементарных частиц. Материалы XX Зимней школы ЛЯЯФ. Л. 1985, с. 3.
2. Anselm A.A., Uraltsev N.G. Phys. Lett. B, 1982, 116, 161.
3. Peccei R.D., Quinn H.R. Phys. Rev. Lett., 1977, 38, 1440.
4. Vorobyev P.V., Gitarts Ya.I. Phys. Lett., 1988, 208, 146.
5. Александров Е.Б. и др. ЖЭТФ, 1983, 85, 1890.
6. Ансельм А.А., Неронов Ю.И. ЖЭТФ, 1985, 88, 1946.
7. White R.M. Quantum theory of magnetism, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1983; Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
8. Anselm A.A. Phys. Rev. D, 1988, 37, 2001; van Bibber K. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 759; Ансельм А.А. ЯФ, 1985, 42, 1480.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 июня 1989 г.