

Оптимизация поиска частиц новой физики при помощи электромагнитных резонаторов

Сальников Дмитрий
студент 2 курса магистратуры физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. ОТФ ИЯИ РАН
Сатунин Пётр Сергеевич

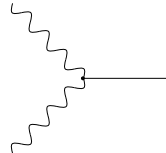
25 мая 2023 года



Введение

- Аксион и аксионоподобная частица – гипотетические псевдоскалярные частицы. Электрически нейтральные, массивные (масса m_a).
- Аксион как решение сильной CP-проблемы в КХД [Pescei-Quinn, 1977].
- Аксион и аксионоподобные частицы – составляющие тёмной материи [Preskill, Abbott, Dine, 1982].
- Взаимодействие с электромагнитным полем

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -\frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



для аксиона КХД масса и константа взаимодействия связаны:
 $g_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1} \left(\frac{m_a}{1 \text{ эВ}} \right)$, для аксионоподобных частиц независимы.



Текущие ограничения

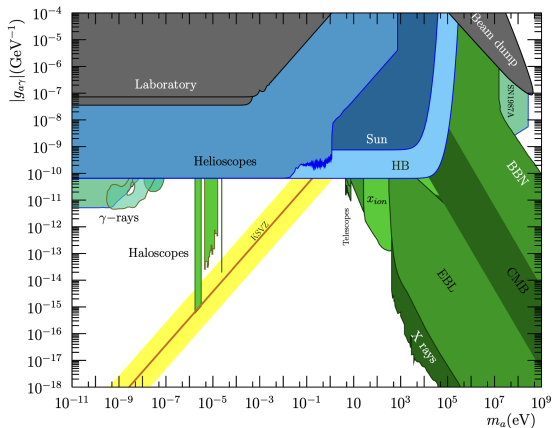


Рисунок 1 - Текущие ограничения на параметры $(m_a, g_{a\gamma\gamma})$ для аксиоподобных частиц и аксионов КХД



Схема экспериментальной модели

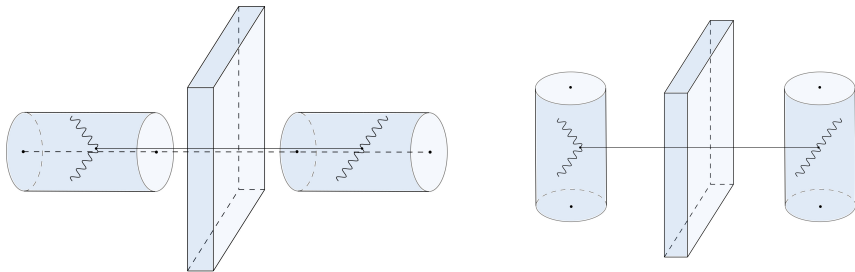


Рисунок 2 - Схема экспериментальной модели в случае двух расположений: коаксиального (слева), параллельного (справа).

Тип резонатора	B_0	B_{ext}	Q	P
RF	0.01 Тл	3 Тл	10^5	100 кВт
SRF	0.1 Тл	-	10^{10}	0.1 кВт

Таблица 1 - Сравнение характеристик нормально проводящего радиочастотного резонатора (RF) и сверхпроводящего радиочастотного резонатора (SRF)



Чувствительность установки

- Амплитуда сигнальной моды

$$G = iQ_{\text{rec}}g_{a\gamma\gamma}^2 E_0^{\text{em}} B_0^{\text{em}} B_0^{\text{rec}} V_{\text{em}} \mathcal{G}/d, \quad (1)$$

$$\mathcal{G} = \int_{V_{\text{rec}}} \frac{d^3x}{V_{\text{rec}}} \int_{V_{\text{em}}} \frac{d^3x'}{V_{\text{em}}} (\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{B}})^*(\vec{x}) (\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{B}})(\vec{x}') \frac{e^{i\sqrt{\omega_a^2 - m_a^2}|\vec{x} - \vec{x}'|}}{4\pi} \frac{d}{|\vec{x} - \vec{x}'|}. \quad (2)$$

- RF: $\omega_a = \omega_0$, $(\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{B}}) = (\vec{\mathcal{E}}_0 \cdot \vec{\mathcal{B}}_{\text{ext}})$
- SRF: $\omega_a = \omega_1 + \omega_2$, $(\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{B}}) = \frac{1}{2}(\vec{\mathcal{E}}_1 \cdot \vec{\mathcal{B}}_2 + \vec{\mathcal{E}}_2 \cdot \vec{\mathcal{B}}_1)$.
- Из радиометрического уравнения $\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \cdot \sqrt{t\Delta\nu}$, где $P_{\text{noise}} = T\Delta\nu$ – мощность тепловых шумов, находим чувствительность

$$g_{a\gamma\gamma} = \left[\frac{2d^2 T \text{SNR}}{\omega_s Q_{\text{rec}} E_{0,\text{em}}^2 B_{0,\text{em}}^2 B_{0,\text{rec}}^2 V_{\text{em}}^2 V_{\text{rec}} |\mathcal{G}|^2} \right]^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\Delta\nu}{t} \right)^{\frac{1}{8}}, \quad (3)$$

где $\Delta\nu = \frac{\nu_s}{Q_{\text{rec}}}$ либо $\Delta\nu = \frac{1}{t}$ [Bogorad, 2019]



Чувствительность RF + RF схемы

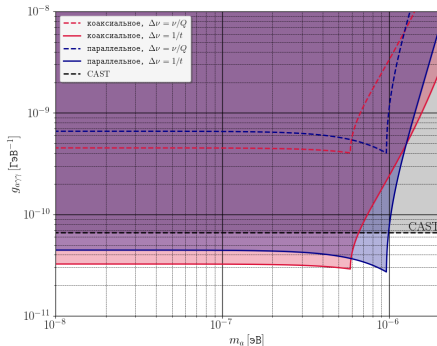
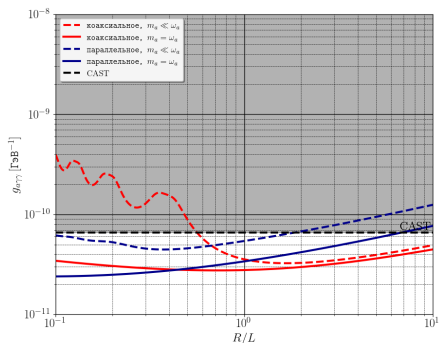


Рисунок 3 - Зависимость чувствительности $g_{a\gamma\gamma}$ для RF+RF схемы от отношения R/L для случаев $m_a = \omega_a$ и $m_a = 0$ (слева) и от массы при оптимальном отношении R/L (справа) для коаксиального и параллельного расположений. Объём резонаторов фиксированный $V = 1 \text{ м}^3$, расстояние между стенками резонаторов $\delta = 0.5 \text{ м}$, мода TM_{010} , время измерений $t = 10^6 \text{ с}$.



Чувствительность SRF + SRF схемы

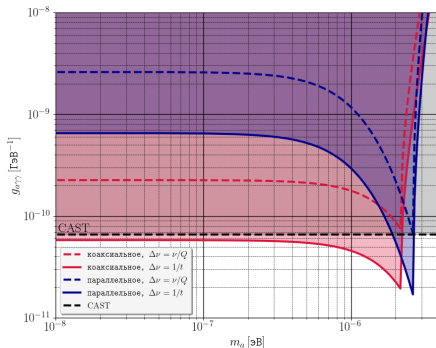
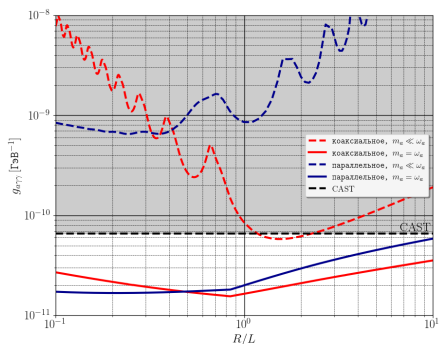


Рисунок 4 - Зависимость чувствительности $g_{a\gamma\gamma}$ для SRF+SRF схемы от отношения R/L для случаев $m_a = \omega_a$ и $m_a = 0$ (слева) и от массы при оптимальном отношении R/L (справа) для коаксиального и параллельного расположений. Объём резонаторов фиксированный $V = 1 \text{ м}^3$, расстояние между стенками резонаторов $\delta = 0.5 \text{ м}$, моды накачки эмиттера $\text{TM}_{010} + \text{TE}_{011}$, мода накачки ресивера TM_{010} , сигнальная мода ресивера TE_{011} , время измерений $t = 10^6 \text{ с}$.



Чувствительность SRF + RF схемы

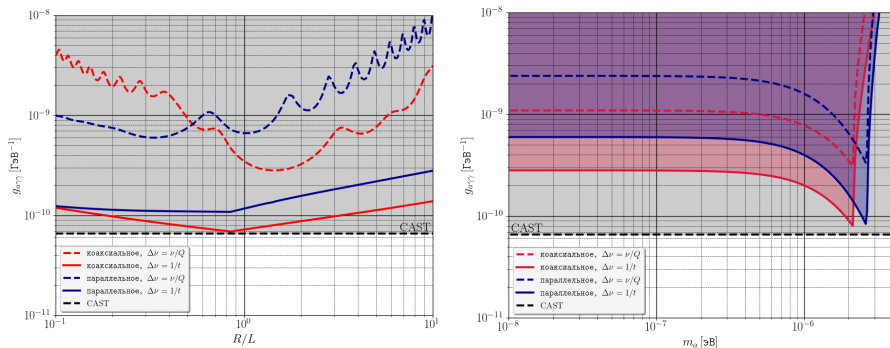


Рисунок 5 - Зависимость чувствительности $g_{a\gamma\gamma}$ для SRF+RF схемы от отношения R/L для случаев $m_a = \omega_a$ и $m_a = 0$ (слева) и от массы при оптимальном отношении R/L (справа) для коаксиального и параллельного расположений. Объём эмиттера фиксированный $V = 1 \text{ м}^3$, расстояние между стенками резонаторов $\delta = 0.5 \text{ м}$, моды накачки эмиттера $\text{TM}_{010} + \text{TE}_{011}$, сигнальная мода ресивера TM_{010} , время измерений $t = 10^6 \text{ с}$.



Чувствительность RF + SRF схемы

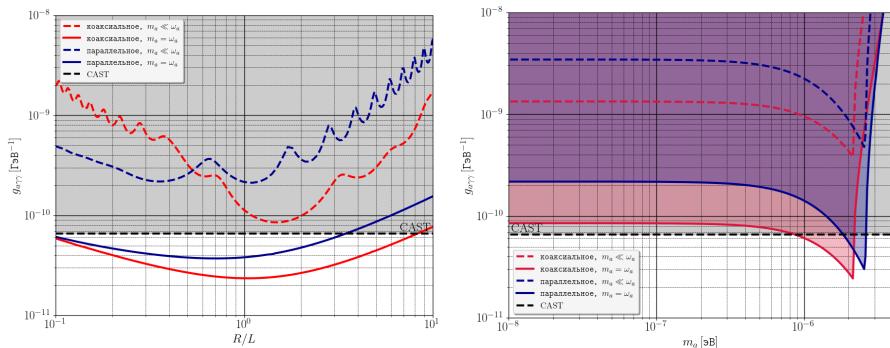


Рисунок 6 - Зависимость чувствительности $g_{a\gamma\gamma}$ для RF+SRF схемы от отношения R/L для случаев $m_a = \omega_a$ и $m_a = 0$ (слева) и от массы при оптимальном отношении R/L (справа) для коаксиального и параллельного расположений. Объём ресивера фиксированный $V = 1 \text{ м}^3$, расстояние между стенками резонаторов $\delta = 0.5 \text{ м}$, мода накачки эмиттера TM_{010} , мода накачки ресивера TM_{010} , сигнальная мода ресивера TE_{011} , время измерений $t = 10^6 \text{ с}$.



Результаты

Тип схемы	$B_0^{\text{em},(1)}$	$B_0^{\text{em},(2)}$	B_0^{rec}	Q_{rec}	P_{em}	$ \mathcal{G} $	$g_{a\gamma\gamma}$
RF+RF	0.01 Тл	3 Тл	3 Тл	10^5	100 кВт	10^{-2}	$3 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$
SRF+SRF	0.1 Тл	0.1 Тл	0.1 Тл	10^{10}	0.1 кВт	10^{-3}	$5 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$
SRF+RF	0.1 Тл	0.1 Тл	3 Тл	10^5	0.1 кВт	10^{-3}	$3 \times 10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1}$
RF+SRF	0.01 Тл	3 Тл	0.1 Тл	10^{10}	100 кВт	10^{-3}	$9 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$

Таблица 2 - Сравнение характеристик для различных экспериментальных схем. Геометрический форм-фактор $|\mathcal{G}|$ и чувствительность $g_{a\gamma\gamma}$ представлены для наилучшего отношения R/L коаксиального расположения и массы $m_a \lesssim \omega_a/2$



Выводы

- RF+RF и SRF+SRF схемы дают схожие чувствительности $g_{a\gamma\gamma} \simeq (3 - 5) \times 10^{-11} \text{ГэВ}^{-1}$, смешанные типы схем дают меньшую чувствительность.
- Наиболее оптимальное расположение – коаксиальное с отношением $R/L \simeq 1.6$
- Узкая ширина спектра $\Delta\nu = 1/t$ является ключевым фактором для улучшения чувствительности
- Недостатки схем
 - RF+RF: высокая мощность эмиттера;
 - SRF+SRF: сложнее выделить сигнал на фоне моды накачки.



Спасибо за внимание!

