

Космологический Аксионный Саровский Галоскоп (CASH): поиск аксионов тёмной материи, тёмных фотонов и высокочастотных гравитационных волн ниже квантового предела

П.С.Сатунин (ИЯИ РАН)

PHYSICAL REVIEW D **112**, 035003 (2025)

Search for dark-matter axions beyond the quantum limit: The cosmological axion Sarov haloscope proposal

Andrey L. Pankratov^{1,2,*} Pavel A. Belov³ Eduard E. Boos⁴ Alexander S. Chepurinov⁴ Alexander V. Chiginev^{1,2}
Alexander V. Derbin^{5,6} Ilya S. Drachnev⁵ Lev V. Dudko⁴ Dmitry S. Gorbunov^{7,8} Maxim A. Gorlach³
Vadim V. Ivanov^{1,2} Leonid V. Kravchuk⁷ Maxim V. Libanov^{7,8} Michael M. Merkin⁴ Valentina N. Muratova⁵
Alexander E. Pukhov⁴ Dmitry V. Salnikov^{7,9} Petr S. Satunin⁷ Dmitrii A. Semenov⁵ Alexander M. Sergeev^{10,11}
Maksim I. Starostin^{9,12} Igor I. Tkachev⁷ Sergey V. Troitsky^{7,9} Maxim V. Trushin⁵ Evgenii V. Unzhakov⁵
Maxim M. Vyalkov^{9,12,11,13} and Arkady A. Yukhimchuk¹³

Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, ИФМ РАН

Москва: ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ

Саров: НЦФМ, РФЯЦ-ВНИИЭФ

Санкт-Петербург: ПИЯФ (КИ), ИТМО

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»

11 марта 2026 года

- Стандартная модель (СМ) физики частиц неполна
- Нерешенная загадка космологии — какая частица составляет тёмную материю? Ни одна из частиц СМ не подходит
- Одна из загадок физики частиц — Сильная CP-проблема
- Одно из решений одних проблем — новая псевдоскалярная частица “**Аксион**”

Weinberg 1978, Wilczek 1978
Preskill et al 1983, Abbott et al 1983, Dine et al 1983

Свойства аксионной тёмной материи

- **Холодная** тёмная материя: **нерелятивистская** в эпоху формирования структур
- Нетепловой механизм образования (на фазовом переходе КХД)
- Распределена почти равномерно в Галактики либо скомкана в миникластеры – ещё открытая дискуссия
- Плотность энергии в окрестности Солнечной Системы в случае однородного распределения: $\rho_{\text{DM}} = 0.45 \text{ GeV}/\text{cm}^3$
- Аксионы образуют классическое поле с высоким уровнем когерентности: $Q_{\text{DM}} = \lambda_{\text{coh}}/\lambda \sim 10^6$.
- Масса аксиона m_a неизвестна.
- Аксионы массы $10 - 100 \mu\text{eV}$ предсказаны во многих моделях КХД:
[Buschmann et al 2022](#), [Sopov et al 2023](#), [Benabou et al 2025](#)

Мы ищем аксионы тёмной материи в этом диапазоне масс.

- Чистый канал поиска аксионов - по их взаимодействию с фотонами

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu a)^2 - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 - \frac{1}{4}g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} \quad (\hbar = c = 1)$$

$$F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} = -4\vec{E} \cdot \vec{B}$$

- Аксионоподобные Частицы (ALP) — нет связи между параметрами ($g_{a\gamma\gamma}$, m_a)
- Аксионы КХД — полоса в пространстве параметров,

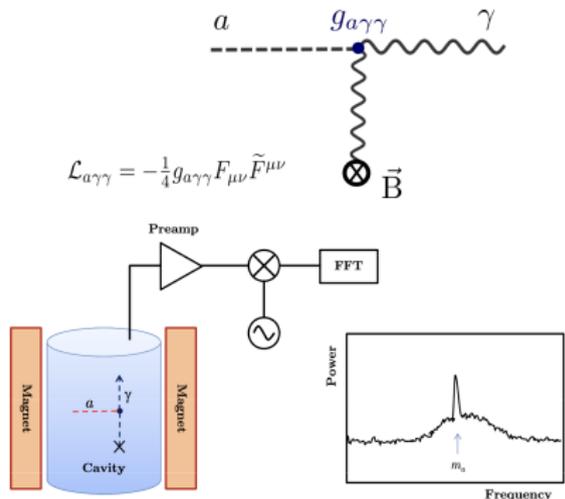
$$g_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{ GeV}^{-1} C_\gamma \frac{m_a}{0.5 \text{ eV}}, \quad C_\gamma \sim 1$$

Основные модели:

- KSVZ $C_\gamma \approx 1.92$ Kim, 1979, Shifman, Vainshtein, Zakharov 1979
- DFSZ $C_\gamma \approx 0.75$ Dine, 1981, Fischler, Srednicki, Zhitnitsky 1980

Поиск аксионов тёмной материи – концепт галоскопа

Pierre Sikivie PRL 1983



- Аксион тёмной материи с энергией ω (нерелятивистский, $\omega \simeq m_a$) переходит в фотон ω в присутствии внешнего магнитного поля \vec{B} . эффект Сикиви
- Резонанс при наличии резонатора с проводящими стенками (добротность Q_0) если $\omega = m_a$ – одна из собственных частот резонатора, $m_a \in \omega_n \times [1 - Q_0^{-1}, 1 + Q_0^{-1}]$.
- Очень узкий диапазон масс аксионов (для фикс. моды n), $\delta m_a \sim \frac{2m_a}{Q_0}$

Мощность сигнала:

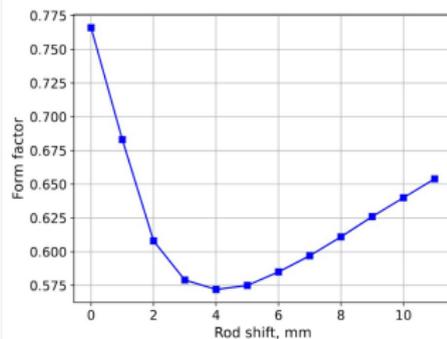
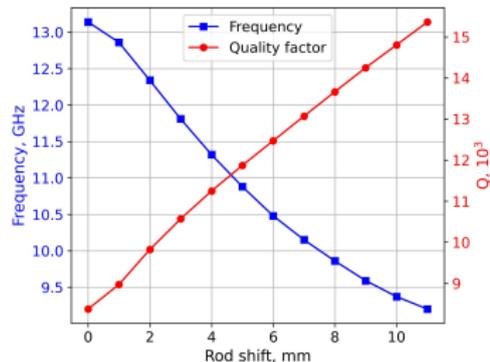
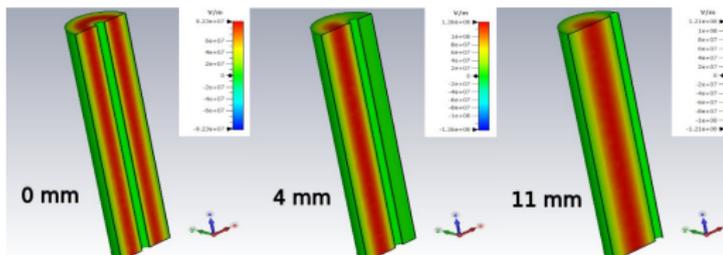
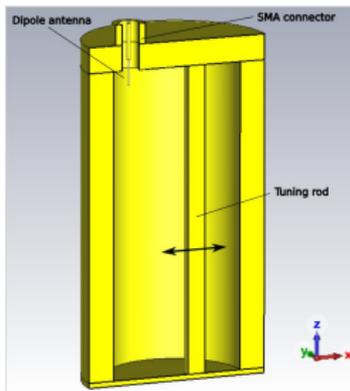
$$P_a = \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}^2}{m_a^2} \rho_{DM} \right) \times (F(\beta)\omega B^2 V C_{010} Q_0)$$

C_{010} - форм-фактор для моды $n = TM_{010}$, V - объём резонатора, $F(\beta)$ - коэфф связи

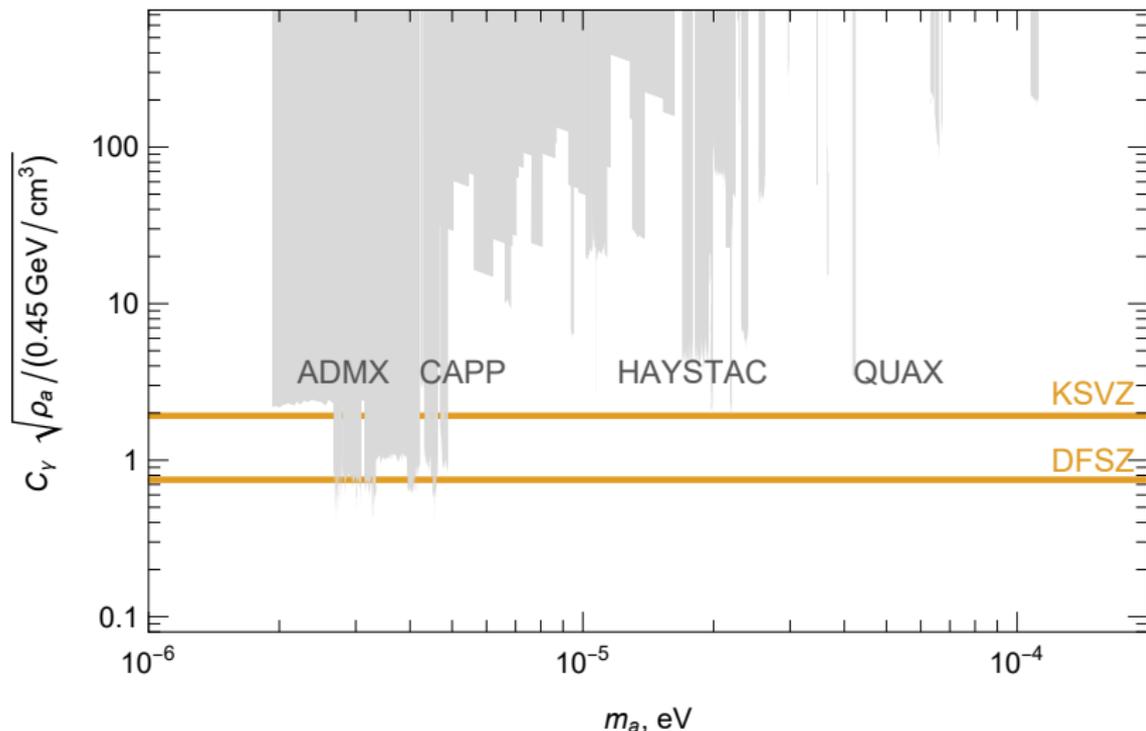
- Чтобы эксперимент был чувствителен к различным m_a , нужно менять собственные частоты ω_n , например изменением геометрии резонатора.

Изменение геометрии резонатора - пример

Cavity tuning with a metallic rod



Текущие ограничения из галоскопов на параметры ALP



Полный список ограничений, полученных коллаборациями - <https://cajohare.github.io/AxionLimits/>

$$g_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{ GeV}^{-1} C_\gamma \frac{m_a}{0.5 \text{ eV}}$$

Детекторы фотонов в радиодиапазоне 0.1 – 50 ГГц

- Стандартные детекторы для поиска аксионов в радио диапазоне — **линейные усилители** Измеряется величина ЭМ поля в равновесном режиме. Принцип неопределённости: $[\hat{E}, \hat{N}] \neq 0$. Чувствительность ограничена стандартным квантовым пределом (SQL):

$$T_{\text{noise}} > T_{\text{SQL}} \approx 50 \text{ mK} \times \frac{\omega}{\text{GHz}}$$

Dicke radiometer equation:
$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{sig}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{P_{\text{sig}}}{T_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{t}{\Delta\nu}}$$

Охлаждение ниже T_{noise} не уменьшает шум.

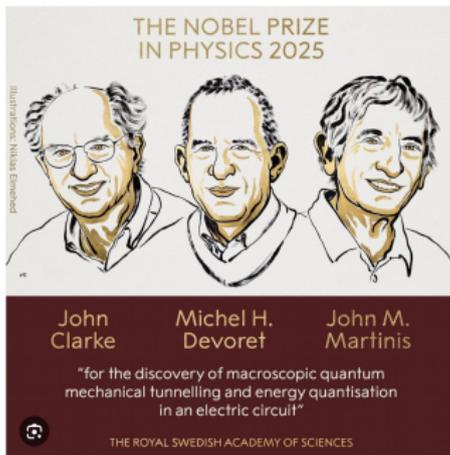
- SQL можно преодолеть:
 - Слегка ($T_{\text{noise}} \lesssim T_{\text{SQL}}$) используя сжатые состояния в детекторе (**HAYSTAC coll. PRD 107 (2023) 7**)
 - С помощью использования макроскопических детекторов находящихся в квантовом состоянии, в неравновесном режиме $T_{\text{noise}} \ll T_{\text{SQL}}$ — однофотонный детектор (SPD)

$$\text{SNR} = \frac{N_{\text{sig}}}{\sqrt{N_{\text{sig}} + N_{\text{d.c.}}}} = \frac{R_{\text{sig}}}{\sqrt{R_{\text{sig}} + R_{\text{d.c.}}}} \sqrt{t}$$

Rate $R = P/\omega = N/t$. d.c. — темновые отсчёты, — нетепловой шум.

Эффективно если тепловой шум подавлен, $e^{-\omega/T}$ for $T \ll \omega$.

Квантовые детекторы на джозефсоновских контактах



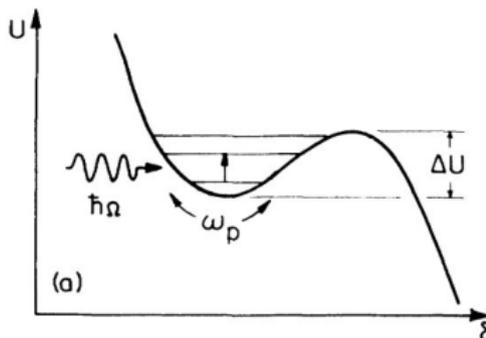
PHYSICAL REVIEW B

VOLUME 35, NUMBER 10

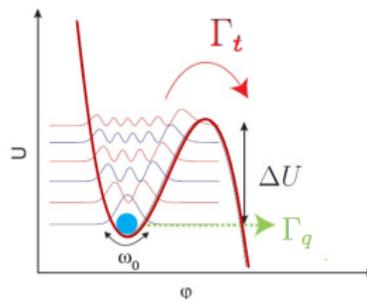
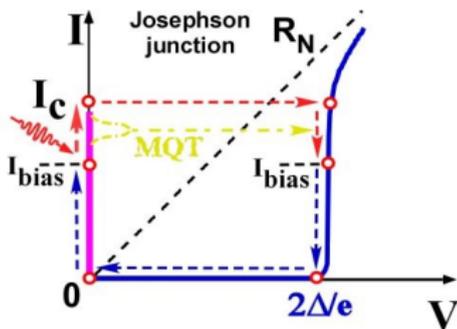
1 APRIL 1987

Experimental tests for the quantum behavior of a macroscopic degree of freedom:
The phase difference across a Josephson junction

John M. Martinis,* Michel H. Devoret,* and John Clarke



Джозефсоновский контакт как однофотонный детектор ложные срабатывания — тунnelирование

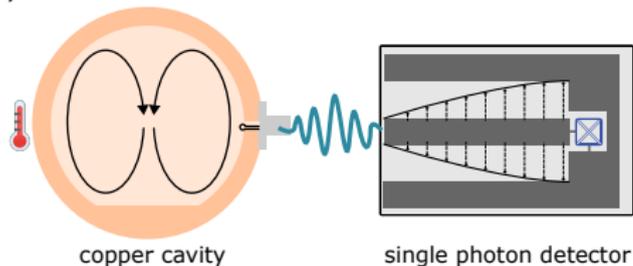


Однофотонный детектор на Джозефсоновских контактах для поиска аксионов

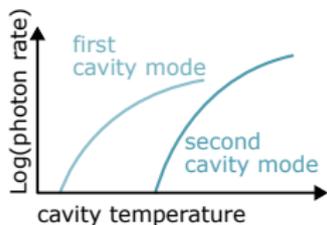
Технология изготовления SPD на частоты 5 – 15 ГГц разработана группой в НГТУ им. Р.Е.Алексеева & ИФМ РАН в Нижнем Новгороде

A.L.Pankratov et al. Observation of thermal microwave photons with a Josephson junction detector. arXiv:2404.10434 [quant-ph]. Nature Commun. 16 (2025) 1, 3457

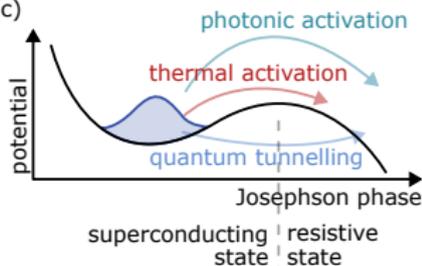
(a)



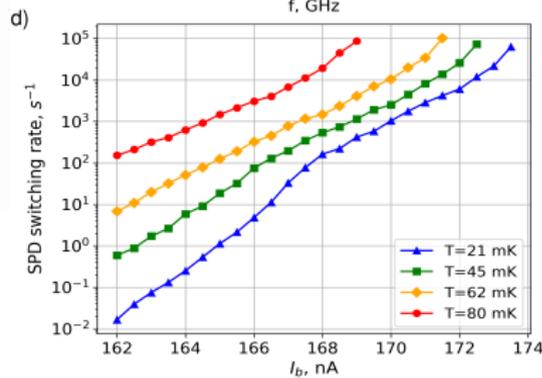
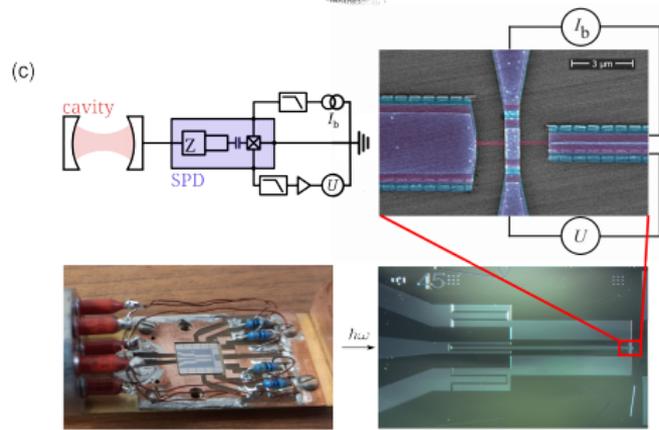
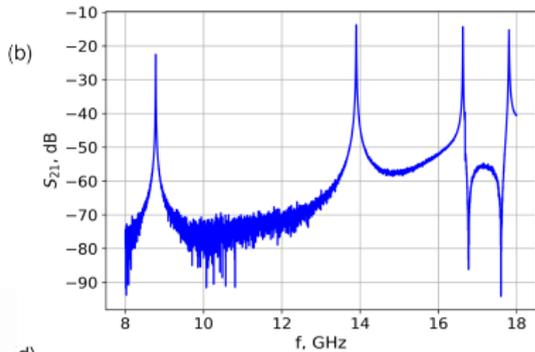
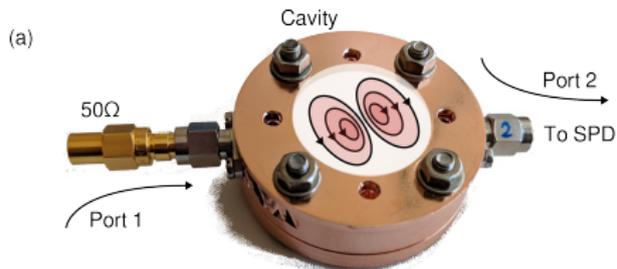
(b)



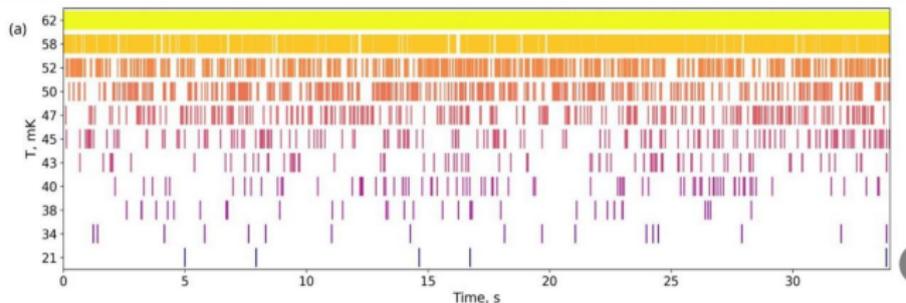
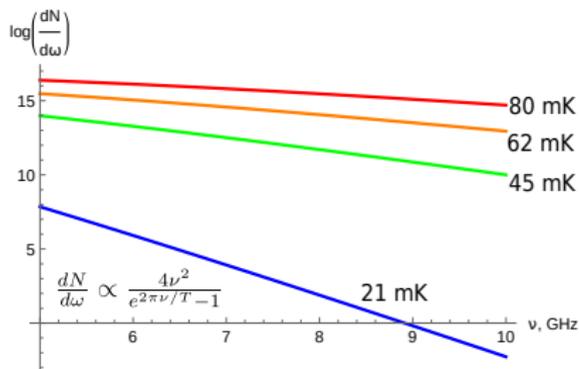
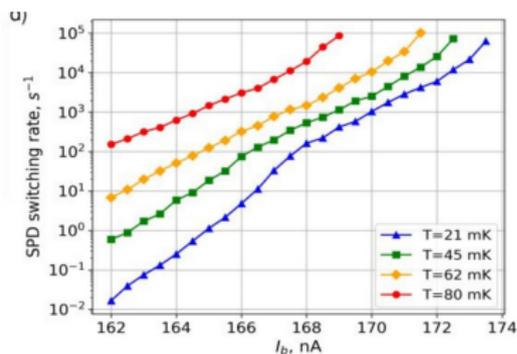
(c)



Однофотонный детектор на Джозефсоновских контактах для поиска аксионов



Режим без термальных фотонов



Нет тепловых фотонов при 21 mK. 1 темновой отсчёт (туннел.) в 100 секунд

Установка по измерению тепловых фотонов одnofотонными детекторами на джозефс. контактах



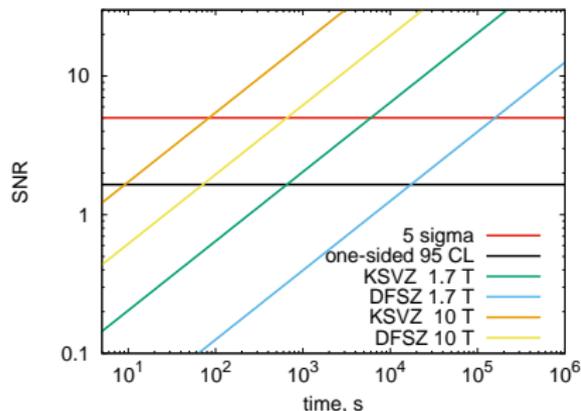
16



Проект эксперимента CASH. Оценка чувствительности.

$$\text{SNR} = \frac{R_{\text{sig}}}{\sqrt{R_{\text{sig}} + R_{\text{d.c.}}}} \sqrt{t},$$

$$R_{\text{sig}} = C_{\gamma}^2 B_0^2 Q_0 \times G, \quad G = 0.14 \text{ GeV}^{-3}, \quad R_{\text{d.c.}} = 0.01 \text{ s}^{-1}$$



	B, T	t
KSVZ	1.7	400 s \simeq 6.5 min
DFSZ	1.7	9 200 s \simeq 2.5 hours
KSVZ	7	14 s
DFSZ	7	112 s

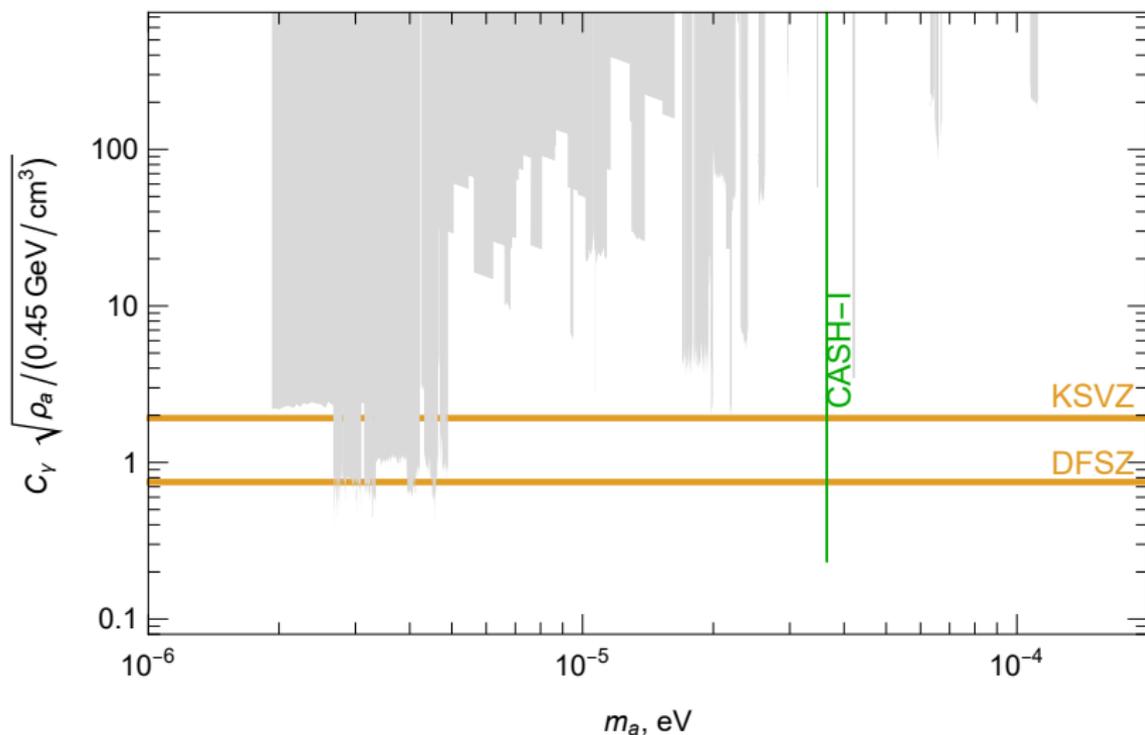
Время эксперимента для достижения 95% CL чувствительности ($\text{SNR} = 1.65$), $Q = 10^5$.

- Цилиндр. медный рез-р $R = 1.3 \text{ cm}$, $L = 12 \text{ cm}$ $C_{010} = 0.69$, $Q_0 = 10^5$.
- $m_a = 36.5 \mu\text{eV}$, $B = 1.7 \text{ T}$, $T = 20 \text{ mK}$, $t = 10^6 \text{ s} \approx 12 \text{ дней}$

Чувствительность к параметрам ALP:

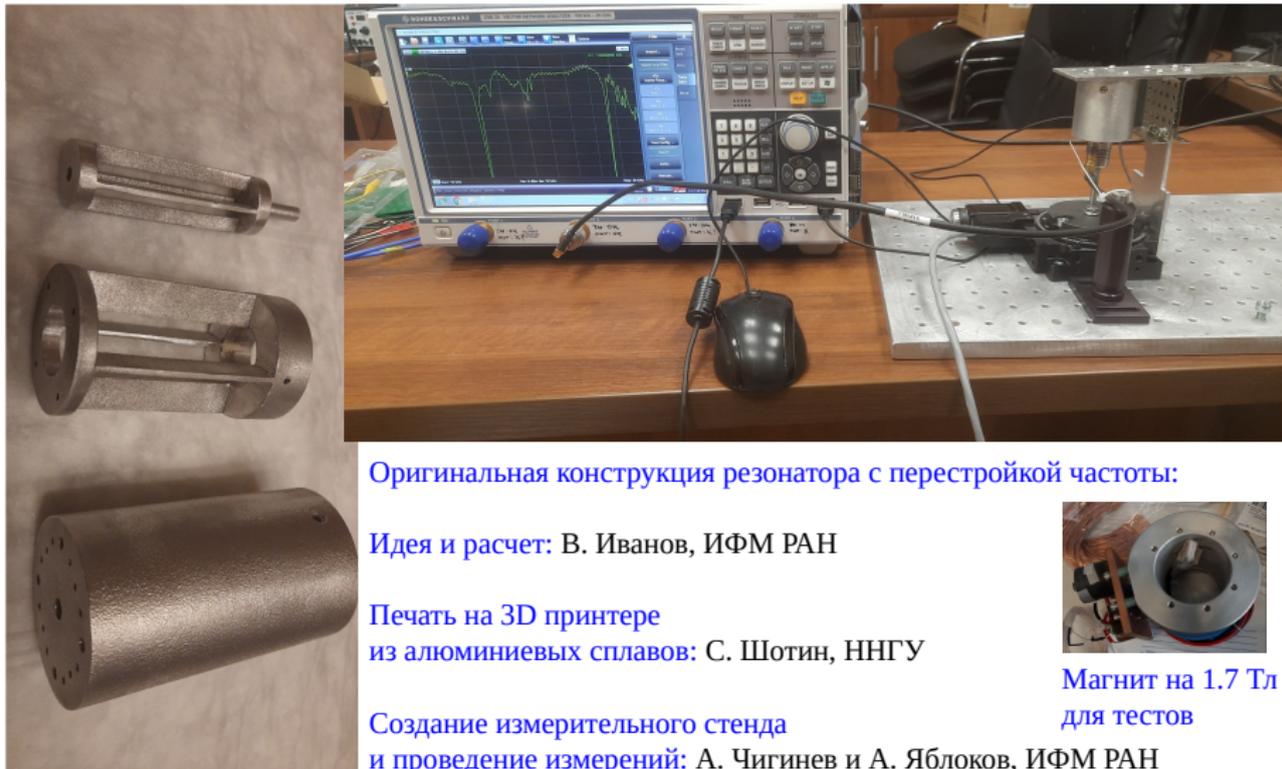
$$C_{\gamma} = 0.27, \quad \text{or} \quad g_{a\gamma\gamma} = 2.3 \cdot 10^{-15} \text{ GeV}^{-1}$$

CASH-I. График чувствительности.



CASH-I: $t = 10^6 \text{ s} \simeq 12 \text{ days}$, $B = 1.7 \text{ T}$. $m_a = 36.5 \mu\text{eV}$. $C_\gamma = 0.27$

Разработка резонаторов с перестройкой частоты



Оригинальная конструкция резонатора с перестройкой частоты:

Идея и расчет: В. Иванов, ИФМ РАН

Печать на 3D принтере
из алюминиевых сплавов: С. Шотин, ННГУ

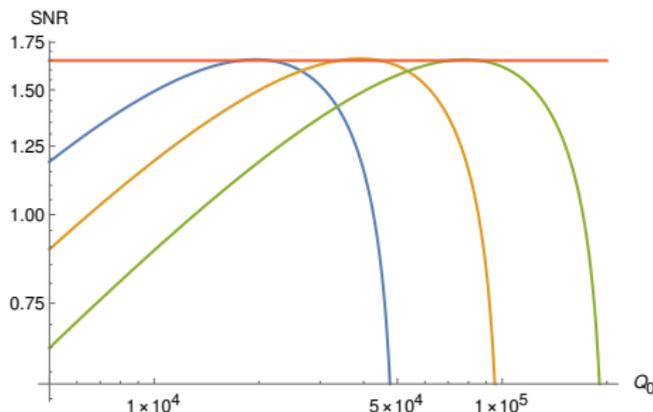
Создание измерительного стенда
и проведение измерений: А. Чигинев и А. Яблоков, ИФМ РАН



Магнит на 1.7 Тл
для тестов

CASH-II. Оптимизация добротности

$$\text{SNR} = \frac{C_\gamma^2 B_0^2 G Q_0}{\sqrt{C_\gamma^2 B_0^2 G Q_0 + R_{d.c.}}} \sqrt{\frac{2\tau}{Q_0 \log 1.4}} - \delta t.$$

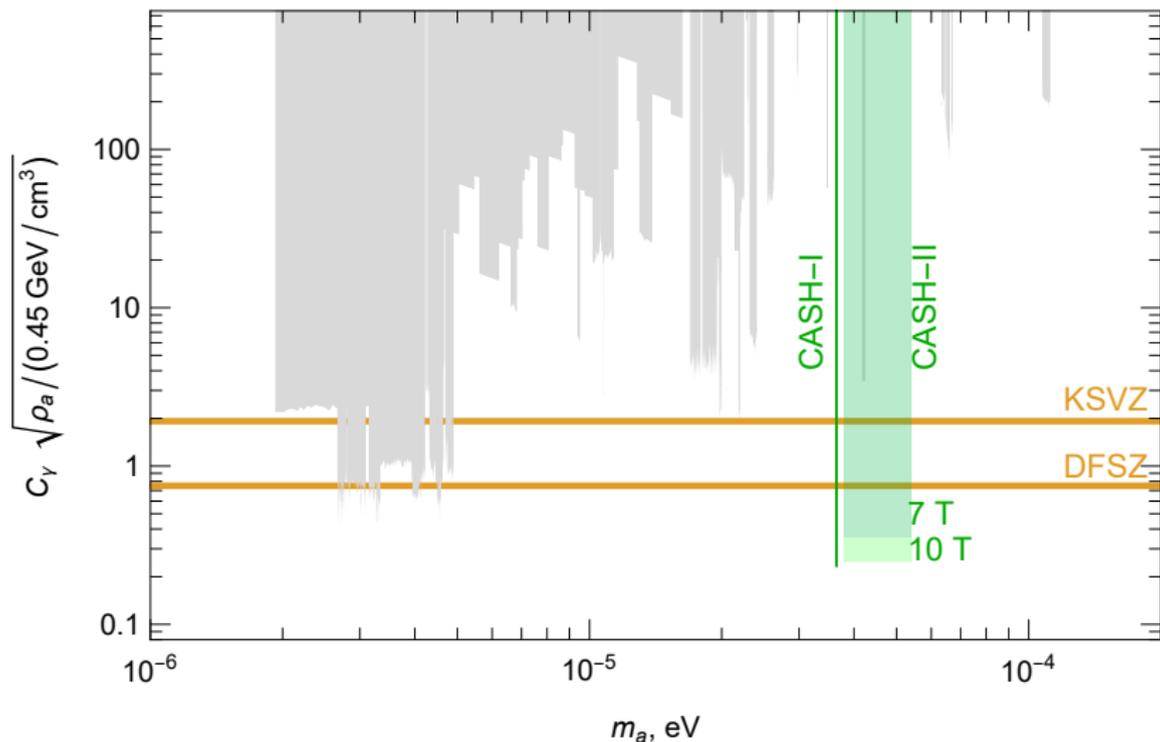


полное время τ , лет	0.25	0.5	1
оптимальная Q_0	2×10^4	4×10^4	8×10^4
число шагов N	3.5×10^3	7×10^3	1.4×10^4
C_γ for $B_0 = 7$ Т	0.72	0.51	0.36
C_γ for $B_0 = 10$ Т	0.50	0.36	0.25

Оптимальное время измерения на фикс. частоте $t = 1350$ секунд ≈ 22.6 минут.

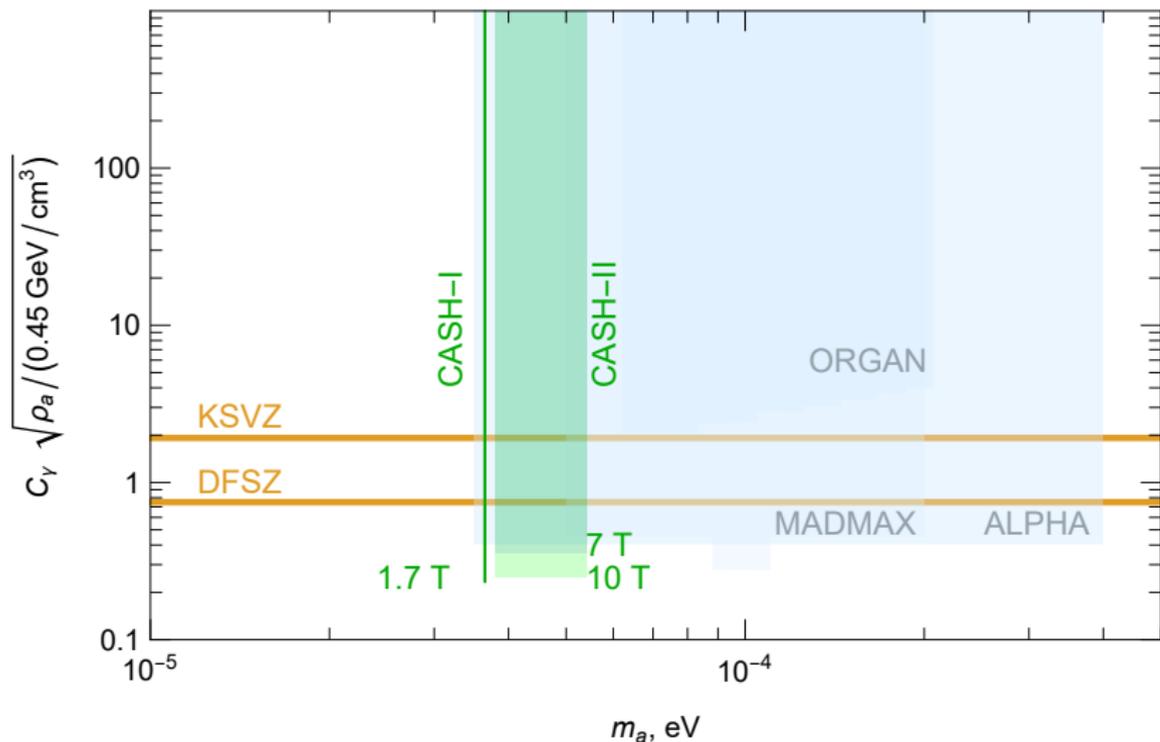
$N_{d.c.} \approx 13.5$ темновых отсчётов. $\delta t = 15$ минут на перестройку частоты

CASH-II. График чувствительности.



CASH-II: планы, 1 год измерений, $B_0 = 7$ and 10 T.

CASH-II. Сравнение с другими проектами.



CASH-II: планы, 1 год измерений, $B_0 = 7$ and 10 T.

CASH sensitivity to Dark Photons

Another dark matter candidate - Dark Photon

Okun 1982, Holdom 1986

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^2 - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}{}^2 - \frac{m_{A'}}{2}A'_\mu A'^\mu + \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu}$$

A'_μ - dark photon field, $m_{A'}$ - the mass, χ - kinetic mixing. Dark photon field transfers to normal photons in a haloscope **without a magnetic field** – but in a magnetic field **as well**.

In case of a signal observation, two measurements with and without frequency are necessary to distinguish a and A' !

The signal power induced by Dark Photon:

$$P_s(\nu) = m_{A'}\rho_{A'}\chi^2 VCQ_0 F(\beta)$$

CASH sensitivity to χ for large t :

$$\chi = \left(\frac{1}{\rho_{A'} V Q_0 C} \text{SNR} \sqrt{\frac{R_{d.c.}}{t}} \right)^{1/2}.$$

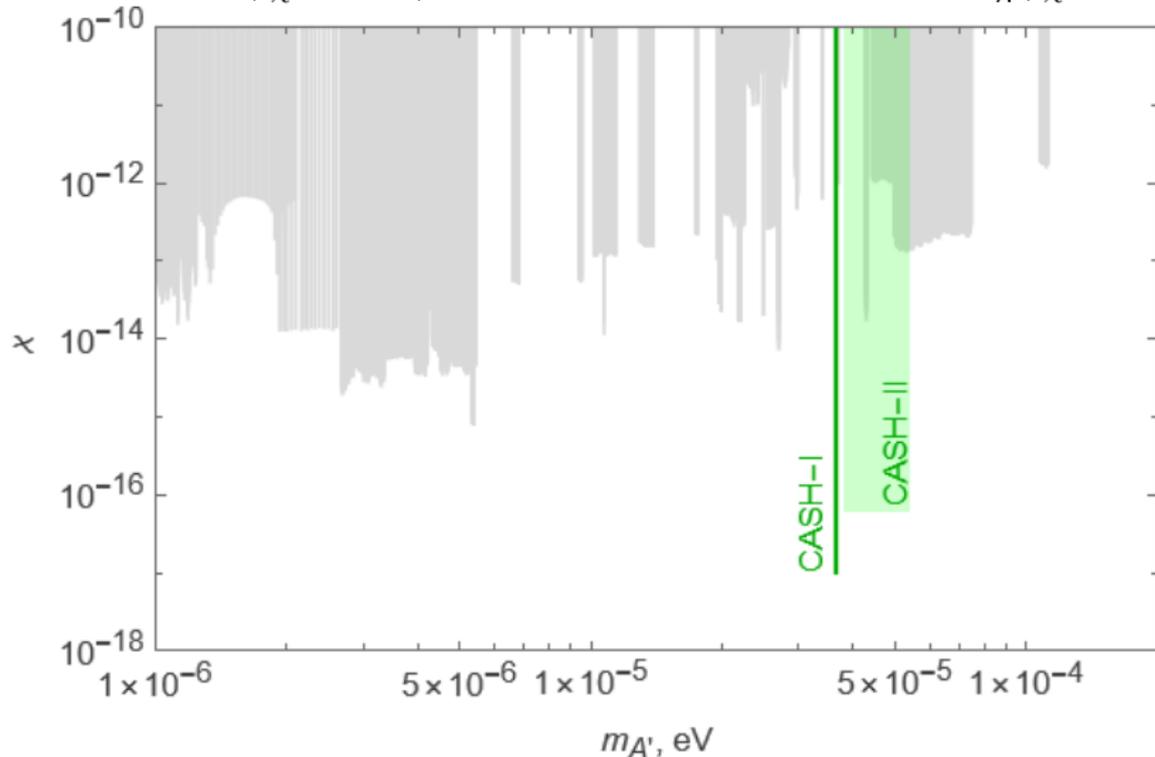
C includes angle dependence $\cos^2 \theta$, θ is the angle between dark photon polarization and haloscope axis, we use the averaged value. Oscillations are subleading.

CASH sensitivity to Dark Photons

Preliminary!

CASH-I: $t = 10^6$ s, $\chi = 10^{-17}$,

CASH-II: $t = 1350$ s for a certain $m_{A'}$, $\chi = 6.2 \times 10^{-17}$.



Высокочастотные гравитационные волны (HFGV)

эффект Герценштейна: гравитационная волна переходит в фотон в магнитном поле
Герценштейн и Пустовойт, 1962, Письма в ЖЭТФ

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(-\frac{1}{4} g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} F_{\mu\nu} F_{\alpha\beta} \right), \quad g^{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} + h^{\mu\nu}$$

$$S_{h\gamma\gamma} = -\frac{1}{2} \int d^4x A^\nu \partial_\nu \left(\frac{1}{2} h F^{\mu\nu} + h_\alpha^\nu F^{\alpha\mu} - h_\alpha^\mu F^{\alpha\nu} \right), \quad h \equiv \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu}$$

Similar to Sikivie effect! In principle, a HFGW source can induce in a haloscope the same signal as from a or A' .
Berlin, Blas et al, 2022

Relativistic gravitons instead of **non-relativistic** DM.

Signal power induced by gravity waves:

$$P_{sig} = \frac{1}{2} Q \omega_g^3 V_{cav}^{\frac{5}{3}} (\eta_n h_0 B)^2$$

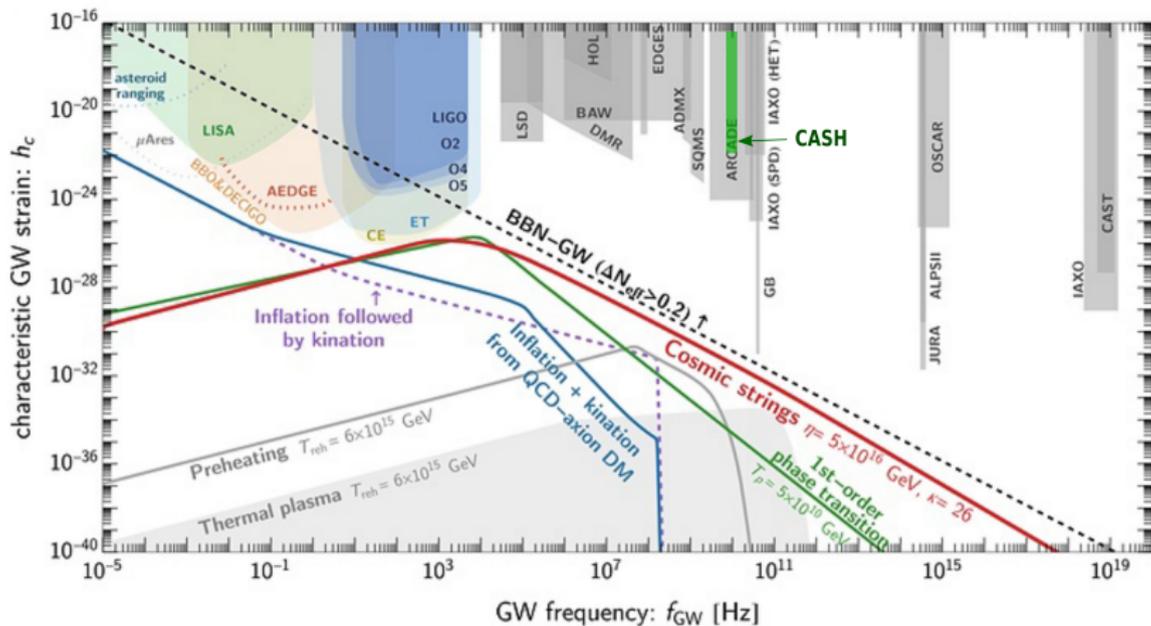
CASH-I(TM010): $h_0 = 1.5 \times 10^{-22}$ for $\nu = 8.8$ GHz, $B = 1.7$ T

... but if HFGW are **coherent**. Otherwise, $Q \rightarrow 1$, $h_0 \rightarrow 10^{-20}$

- Cosmological HFGW (inflation, preheating, domain walls) – stochastic, not coherent!
- h_0 constrained by the number of relativistic degrees of freedom in thermal bath
 $\rightarrow h_0 < 10^{-30}$ for $\nu \sim 10$ GHz.

Gravitational waves - constraints?

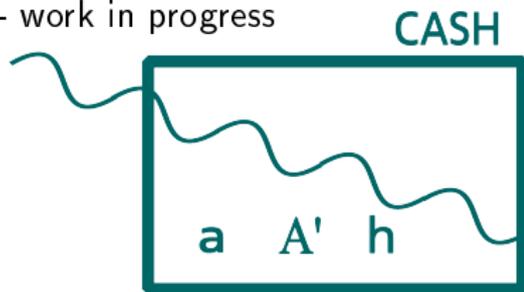
credit: Servant Simakachorn, 2024



ARCADE: balloon observation for galactic radio background (2006-2009). An excess, disappeared?

Заключение

- CASH — компактный недорогой проект по поиску тёмной материи (аксионы, тёмные фотоны в интересном диапазоне масс 38-56 $\mu\text{эВ}$) с рекордной чувствительностью выше мировых аналогов.
- Ключевой элемент установки – однофотонные детекторы на джожефсоновских контактах, преодолевающие квантовый предел, с минимальным шумовым сигналом (1 темновой отсчёт в 100 секунд), что позволяет увеличить чувствительность установки на 1-2 порядка по сравнению с аналогами. Технология производства уже разработана в НГТУ & ИФМ РАН. Мировые аналоги только разрабатываются.
- В случае детектирования сигнала необходим дополнительный анализ природы (запуск без магнитного поля)
- Дополнительная программа - поиск высокочастотных гравитационных волн с помощью эффекта Герценштейна - work in progress



Поддержано РФФ 25-22-00932