

# Экспериментальные поиски солнечных аксионов и аксионо- подобных частиц (ALPs)

Cryostat

**А.В. Дербин**

**Петербургский институт ядерной физики**

Flexible Lines

Inclination System

Telescopes

Support Frame

Rotating Disk

Services

Rotation System



# Популярность аксионной тематики

Частотное отношение упоминаний слов **AXION** и **NEUTRINO** в названии статей, выложенных в arXiv в последние годы.

2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
0.18	0.26	0.31	0.28	0.41	0.47	0.40	0.42	0.48

# Содержание

## 1) Появление аксиона

*CP-проблема, WWPQ-аксион, KSVZ- и DFSZ-аксионы, масса и константы связи  $g_{A\gamma}$ ,  $g_{Ae}$ , и  $g_{AN}$ . ALPs*

## 2) Ограничения и указания из астрофизики и космологии

*Аномальная прозрачность для  $\gamma$ -квантов, охлаждение б.к.*

## 3) Солнечные аксионы. Конверсия $A \rightarrow \gamma$ в гелиоскопах.

*Примаковские, комптоновские и тормозные аксионы*

*Монохроматические 14.4 кэВ, 478 кэВ, 5.5 МэВ аксионы,*

*Конверсия  $A \rightarrow \gamma$ , CAST, IAXO, ..*

## 4) Аксиоэлектрический эффект для солнечных аксионов

*$g_{Ae}$ , Si-детектор, Cuore, XMASS, Edelweiss, XENONnT, LUX  
5.5 MeV аксион, Bogerino, BGO-сцинтиллятор, BGO-болометр*

## 5) Резонансное возбуждение ядерных уровней

*$g_{AN}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{57}\text{Fe}$ ,  ${}^{83}\text{Kr}$ , для поиска монохроматических аксионов*

*${}^{169}\text{Tm}$  для поиска аксионов с непрерывным спектром,*

## 6) Реликтовые аксионы и галоскопы.

*Конверсия  $A \rightarrow \gamma$ , ADMX. Аксиоэлектрический эффект  $\text{Si}(\text{Li}) \rightarrow \text{XENONnT}$ .*

## 7) Лабораторные аксионы

*Реакторы, ускорители, p/a источники, лазеры "Light shining through walls"*

# Нейтралино (*superWIMPs*) и аксион

Частицы темной материи не содержатся в Стандартной модели (небарионная материя и не легкие нейтрино)

*WIMPs: weakly interacting massive particles*

Если реализуется суперсимметрия,  
легчайшая стабильная суперсимметричная частица  
(нейтралино) кандидат на роль частиц ТМ

$\chi$

$$\rho = 0.4 \text{ ГэВ/см}^3$$
$$\Phi = \rho/m_\chi \approx 3 \times 10^7 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

*WISPs: Axion.* Для решения проблемы CP-сохранения в сильных взаимодействиях, КХД СМ должна быть дополнена аксионом, который может составлять ТМ

$A, a$

Отрицательные результаты ЛНС и экспериментов по поиску рассеяния частиц темной материи на ядрах смещают интерес от SUSY в сторону моделей с более легкими частицами

# Strong CP-problem

(отсутствие CP-нарушения в сильных взаимодействиях)

Появление аксиона в теории связано с проблемой нарушения CP в сильных взаимодействиях. Лагранжиан КХД можно дополнить  $\Theta$ -членом, представляющим взаимодействие глюонных полей и являющимся CP-нечетным, т.е. в сильных взаимодействиях должно наблюдаться нарушение CP.

$$\mathcal{L}_\Theta = \Theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{a\mu\nu}$$

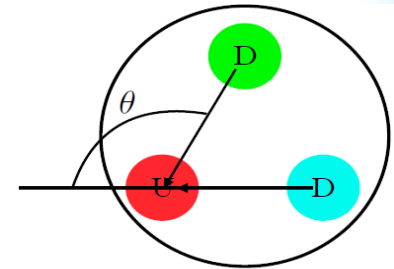
Например, ЭДМ нейтрона:

$$d_n \sim \Theta \times 10^{-16} \text{ e cm}$$

Современный верхний предел на  $nEDM$ :

$$|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \text{ e cm (90\% c.l.)} \Rightarrow \Theta < 10^{-10}$$

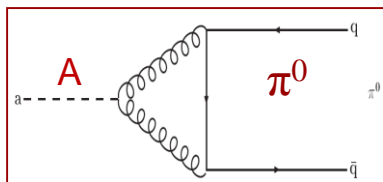
Как следует из экспериментального ограничения на ЭДМ нейтрона, верхний предел нарушающего CP параметра составляет  $\theta \leq 10^{-10}$ .  $\theta$ -член очень мал по сравнению с другими параметрами лагранжиана КХД, этот факт остается загадкой на протяжении нескольких десятилетий.  $\Theta$  является одним из 19-х свободных параметров СМ.



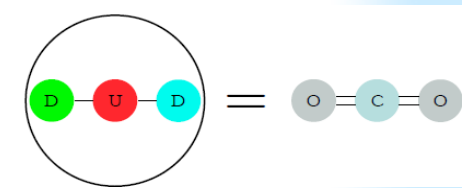
$$d_n = 32.7 \times 10^{-3} e \frac{3m_u m_d m_s}{m_u m_d + m_u m_s + m_d m_s} R^2 \bar{\theta}$$

# Появление аксиона

Для решения CP-проблемы *Р. Печчеи* и *Х. Куинн* в 1977 году предложили новую киральную симметрию  $U(1)_{PQ}$ . Спонтанное нарушение этой симметрии при энергии  $f_A$  позволяет полностью компенсировать CP-нарушающий член лагранжиана КХД. *С. Вайнберг* и *Ф. Вильчек* показали (1978), что введенная PQ-модель должна привести к существованию новой нейтральной псевдоскалярной частицы.



$$\mathcal{L}_{\Theta} = (\Theta - \frac{A}{f_A}) \frac{g_s^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{a\mu\nu}$$



Масса аксиона ( $m_A$ ) и эффективные константы связи аксиона с электронами ( $g_{Ae}$ ), фотонами ( $g_{A\gamma}$ ) и нуклонами ( $g_{AN}$ ) обратно пропорциональны  $f_A$ .

$$m_A \approx (f_\pi m_\pi / f_A) (\sqrt{z} / (1 + z))$$

$$g_{af} = \frac{C_f m_f}{f_A}$$

$$g_{Ae} = C_e m_e / f_A$$

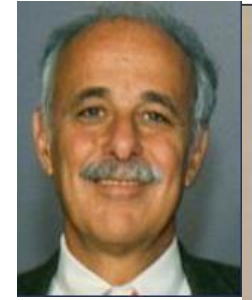
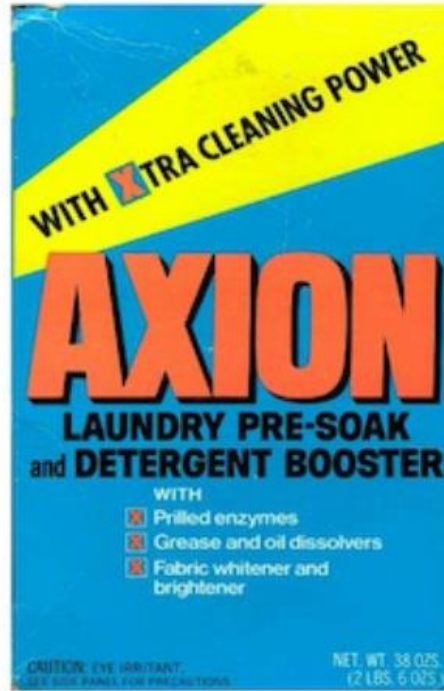
$$g_{A\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_A} \left( \frac{E}{N} - \frac{2(4+z+w)}{3(1+z+w)} \right) \equiv \frac{\alpha}{2\pi f_A} C_{A\gamma\gamma}$$

$$\frac{g_{A\gamma\gamma}}{10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1}} = C \frac{m}{1 \text{ эВ}}$$

$$g_{Ap} = C_{Ap} m_p / f_A$$

Название «аксион» придумано Ф. Вильчеком в соответствии с маркой стирального порошка, поскольку аксион должен «очистить» КХД от CP-проблемы, а также из-за связи CP-проблемы с аксиальным током.

# Peccei-Quinn-Weinberg-Wilczek (PQWW) аксион



*S. Weinberg - Higgslet*



The axion is a pseudoscalar; has the same quantum numbers as the  $\pi^0$ , and the same interactions, but with coupling strengths scaled by the axion mass

**“I named them after a laundry detergent, since they clean up a problem with an axial current.”  
(Nobel lecture 2004)**

# PQWW или стандартный аксион

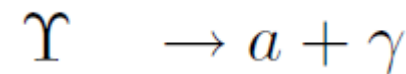
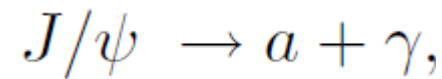
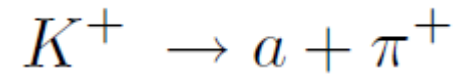
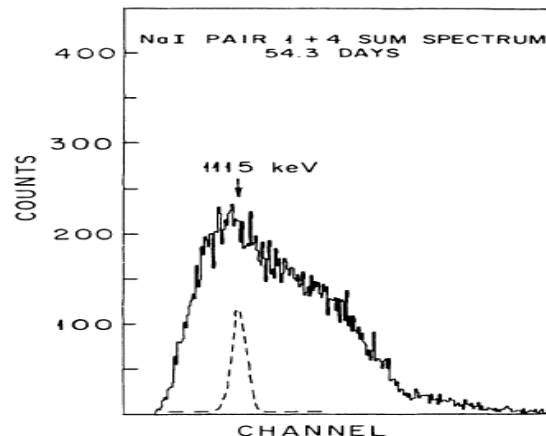
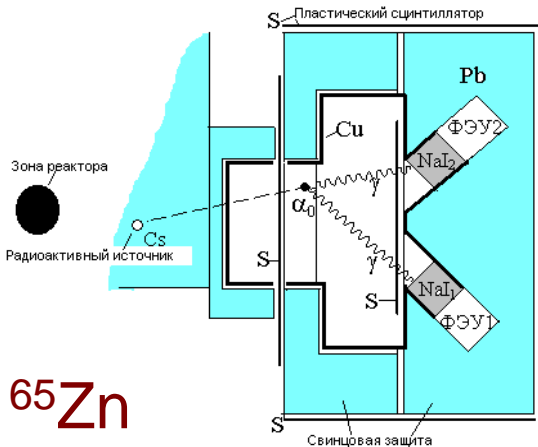
Первоначальная модель WWPQ-аксиона имела строго определенные предсказания для констант связи между аксионом и фотонами ( $g_{A\gamma}$ ), электронами ( $g_{Ae}$ ) и нуклонами ( $g_{AN}$ ), поскольку предполагалось, что нарушение симметрии происходит на электрослабом масштабе :

$$f_A = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} \approx 250\text{GeV}$$

Масса стандартного аксиона зависит от числа кварковых дублетов  $N$  и неизвестного параметра  $X$ , который является отношением значений вакуумных полей Хиггса, и должна быть больше:

$$m_A (\text{keV}) \approx 25N(X + 1/X) \geq 150\text{keV}$$

Существование аксиона WWPQ было опровергнуто экспериментами, проведенными на реакторах и ускорителях, а также экспериментами с искусственными радиоактивными источниками. В первую очередь искали распад  $A \rightarrow \gamma + \gamma$ .



$$\Gamma_{A \rightarrow \gamma\gamma} = \frac{G_{A\gamma\gamma}^2 m_A^3}{64\pi} = 1.1 \times 10^{-24} \text{ s}^{-1} \left(\frac{m_A}{\text{eV}}\right)^5$$



# «Невидимый» аксион



Два класса новых теоретических моделей «невидимого» аксиона сохранили эту частицу в форме, необходимой для решения -проблемы сильных взаимодействий, и в то же время подавили ее взаимодействие с веществом:

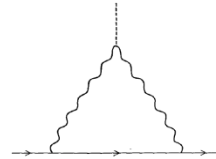
- 1) **Адронный, “hadronic”, KSVZ-аксион** (Kim, Shifman, Vainshtein, Zakharov)(Ким, Шифман, Вайнштейн, Захаров) модель аксиона, постулирующая существование дополнительных тяжелых кварков, несущих заряд Печчеи-Квин;
- 2) **“GUT”, или DFSZ-аксион** (Dine, Fischer, Srednicki, Zhitnyski)(Дайне, Фишлер, Средницкий, Житницкий) все кварки и лептоны несут PQ-заряд, но вводятся дополнительно два хиггсовских дублета.

## DSFZ

$$g_{Ae} = C_e m / f_A; \quad C_e = 1/3 \cos^2 \beta_{\text{dfsz}}$$

$$g_{Ae} \approx 2 \times 10^{-6}$$

$$g_{A\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_A} \left( \frac{E}{N} - \frac{2(4+z+w)}{3(1+z+w)} \right) \equiv \frac{\alpha}{2\pi f_A} C_{A\gamma\gamma} \quad \begin{matrix} E/N = 3/8 \\ (C_{A\gamma\gamma} = 0.74) \end{matrix}$$



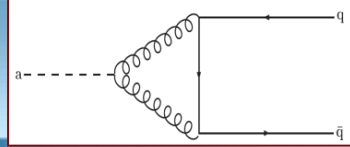
## KSVZ

$$g_{Ae} = \frac{3n\alpha^2 m}{2\pi f_a} \left( \frac{E}{N} \ln \frac{f_A}{m} - \frac{2(4+z+w)}{3(1+z+w)} \ln \frac{\Lambda}{m} \right)$$

$$g_{A\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_A} \left( \frac{E}{N} - \frac{2(4+z+w)}{3(1+z+w)} \right) \equiv \frac{\alpha}{2\pi f_A} C_{A\gamma\gamma} \quad \begin{matrix} E/N = 0 \\ (C_{A\gamma\gamma} = -1.92) \end{matrix}$$

Масштаб нарушения PQ-симметрии ( $f_A$ ) в обеих моделях произволен и может быть расширен до массы Планка  $\approx 10^{19}$  ГэВ. Сила взаимодействия масштабируется как  $1/f_A$ , а взаимодействие между аксионом и материей подавлено. В отличие от аксионов DFSZ, аксионы KSVZ не имеют связи с лептонами ( $g_{Ae}$ ) и обычными кварками на древесном уровне, что приводит к подавлению взаимодействия KSVZ с электронами через радиационные поправки. В некоторых вариантах этих моделей связь аксиона с фотоном ( $g_{A\gamma}$ ) может отличаться от исходных DFSZ- или KSVZ на фактор  $< 10^{-2}$ .

# Масса невидимого аксиона

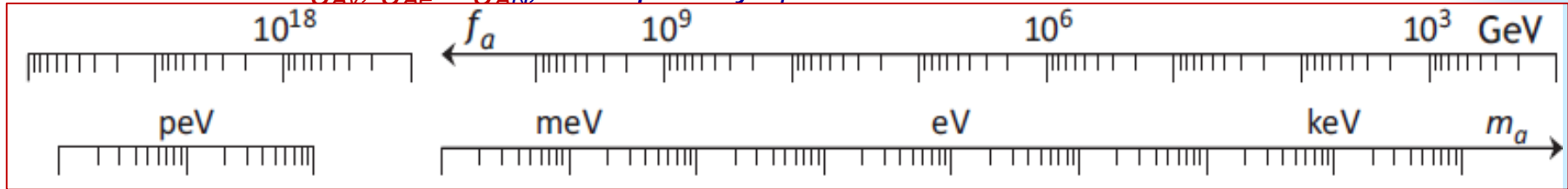


Масса аксиона в обеих моделях задается через свойства нейтрального пиона и зависит от константы распада аксиона  $f_A$ :

$$m_A [eV] = \frac{f_\pi m_\pi}{f_A} \sqrt{\frac{z}{(1+z+w)(1+z)}} \approx \frac{5.69(5) \times 10^6}{f_A [GeV]}$$

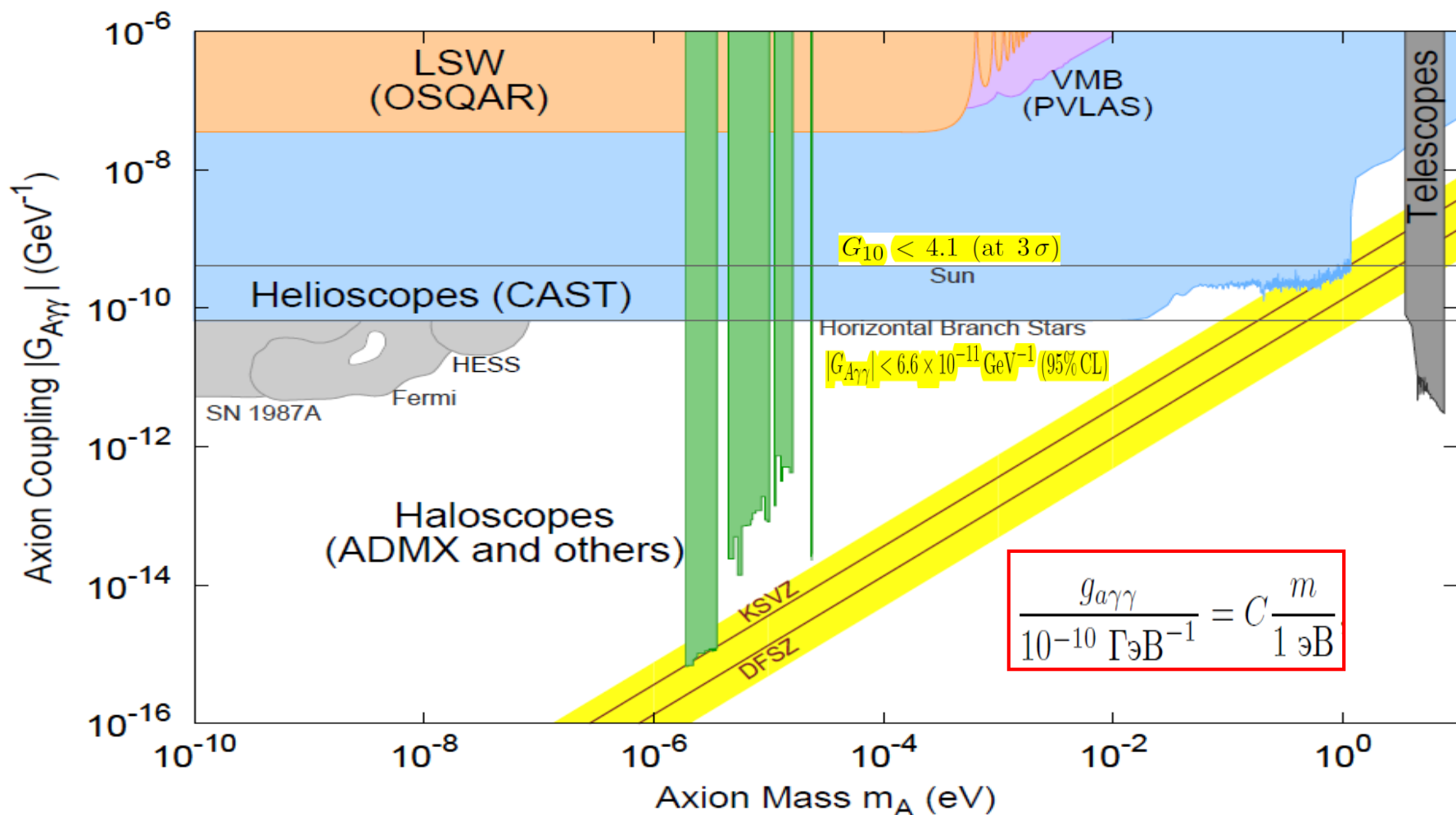
$$\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-10} \Gamma_{\text{эВ}}^{-1}} = C \frac{m}{1 \text{ эВ}}$$

где  $z$  и  $w$  – массовые отношения легких кварков ( $z = m_u / m_d = 0.462 \pm 0.020$  (0,56),  $w = m_u / m_s = 0.023 \pm 0.0008$  (0,029)),  $m_\pi = 135$  МэВ и  $f_\pi = (1 / 8.5 \cdot 10^{-18} \text{ s})$  – масса и константа распада  $\pi$ -мезона. Ограничения на массу аксиона возникают из-за ограничений на константы связи  $g_{A\nu\nu}$ ,  $g_{Ae}$  и  $g_{AN}$ , которые существенно зависят от модели.



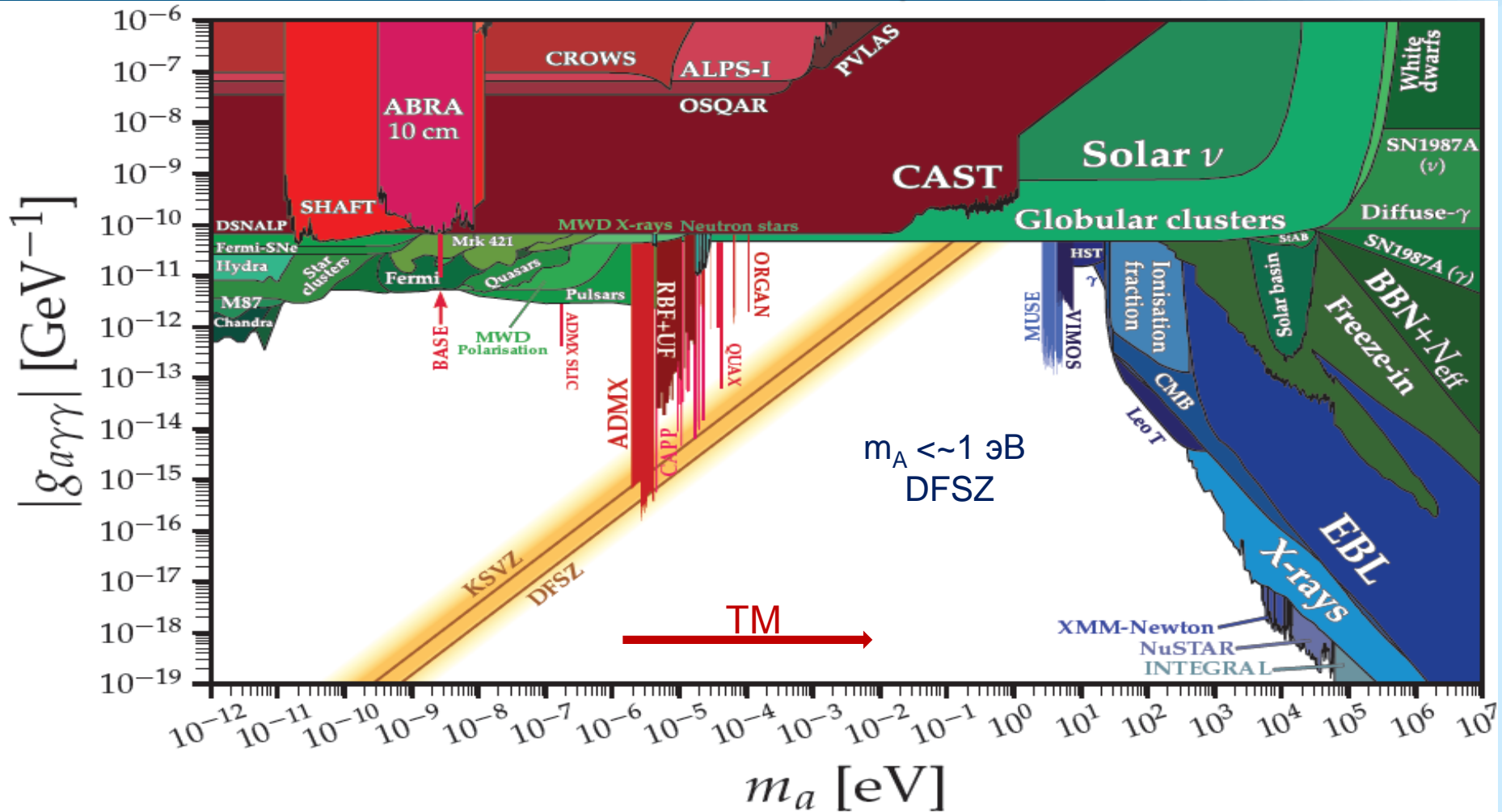
Результаты современных экспериментов интерпретируются в рамках этих двух наиболее популярных моделей аксиона. Основные экспериментальные усилия сосредоточены на поиске аксиона с массой в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  эВ. Этот диапазон свободен от астрофизических и космологических ограничений, и реликтовые аксионы с такой массой считаются наиболее вероятными кандидатами на роль частиц, формирующих темную материю. Прямые лабораторные поиски солнечных аксионов с помощью гелиоскопов CAST и IAXO и реликтовых аксионов с помощью галоскопа ADMX основаны на двухфотонной вершине, приводящей к конверсии аксиона в фотон в электромагнитных полях. Реакции аксиоэлектрического эффекта в атомах и резонансного поглощения ядрами обусловлены константами  $g_{Ae}$  и  $g_{AN}$ .

# Ограничения на константу связи аксиона с фотоном $g_{A\gamma}$



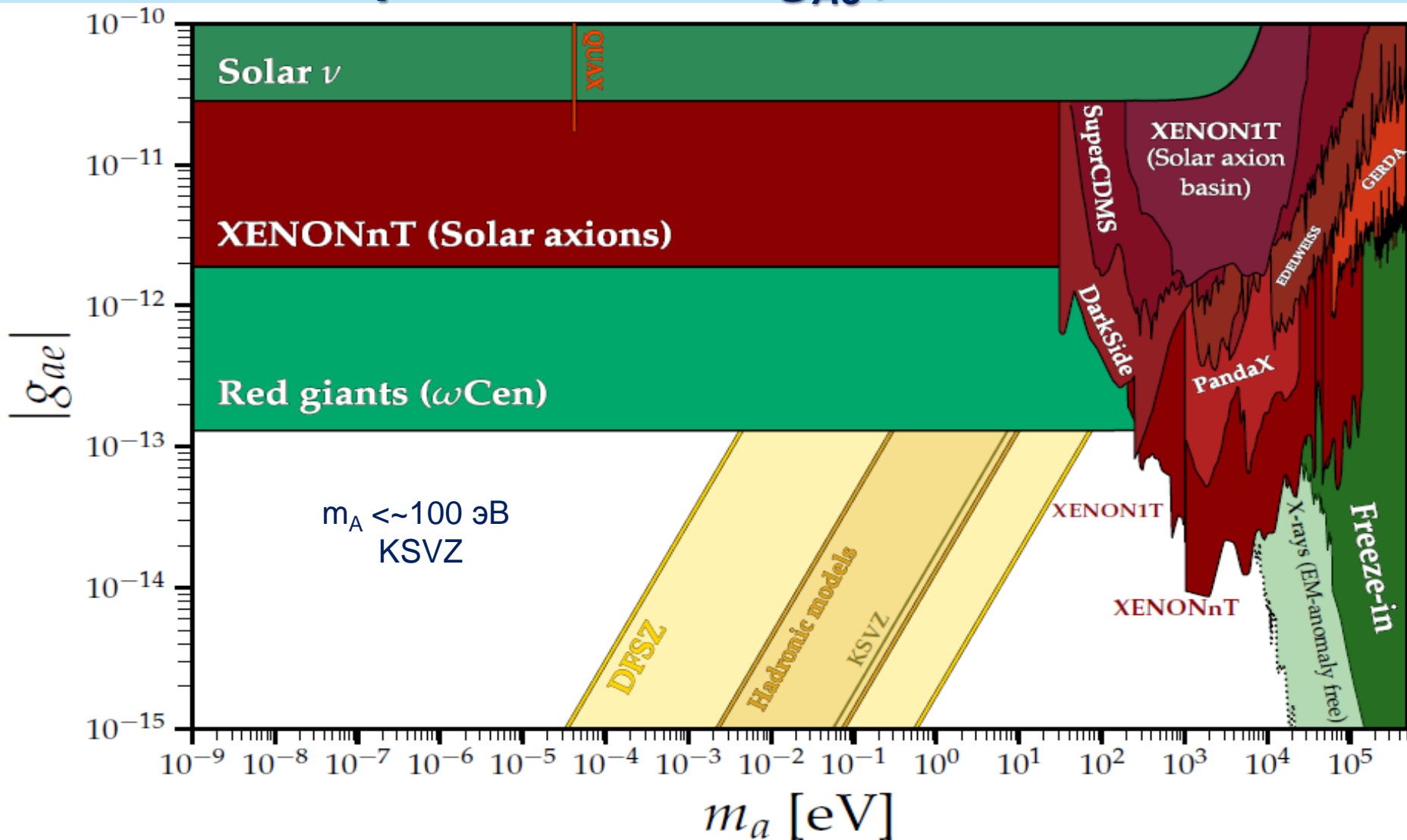
Области значений  $g_{A\gamma}$ , предсказываемых моделями KSVZ- и DFSZ-аксиона, решающие CP-проблему, и ограничения, полученные в прямых лабораторных экспериментах и из астрофизических данных.  $10^{-6}$ - $10^{-2}$  эВ область CDM. Добраться до KSVZ проще.

# Ограничения на $g_{A\gamma}$ , PDG 2024



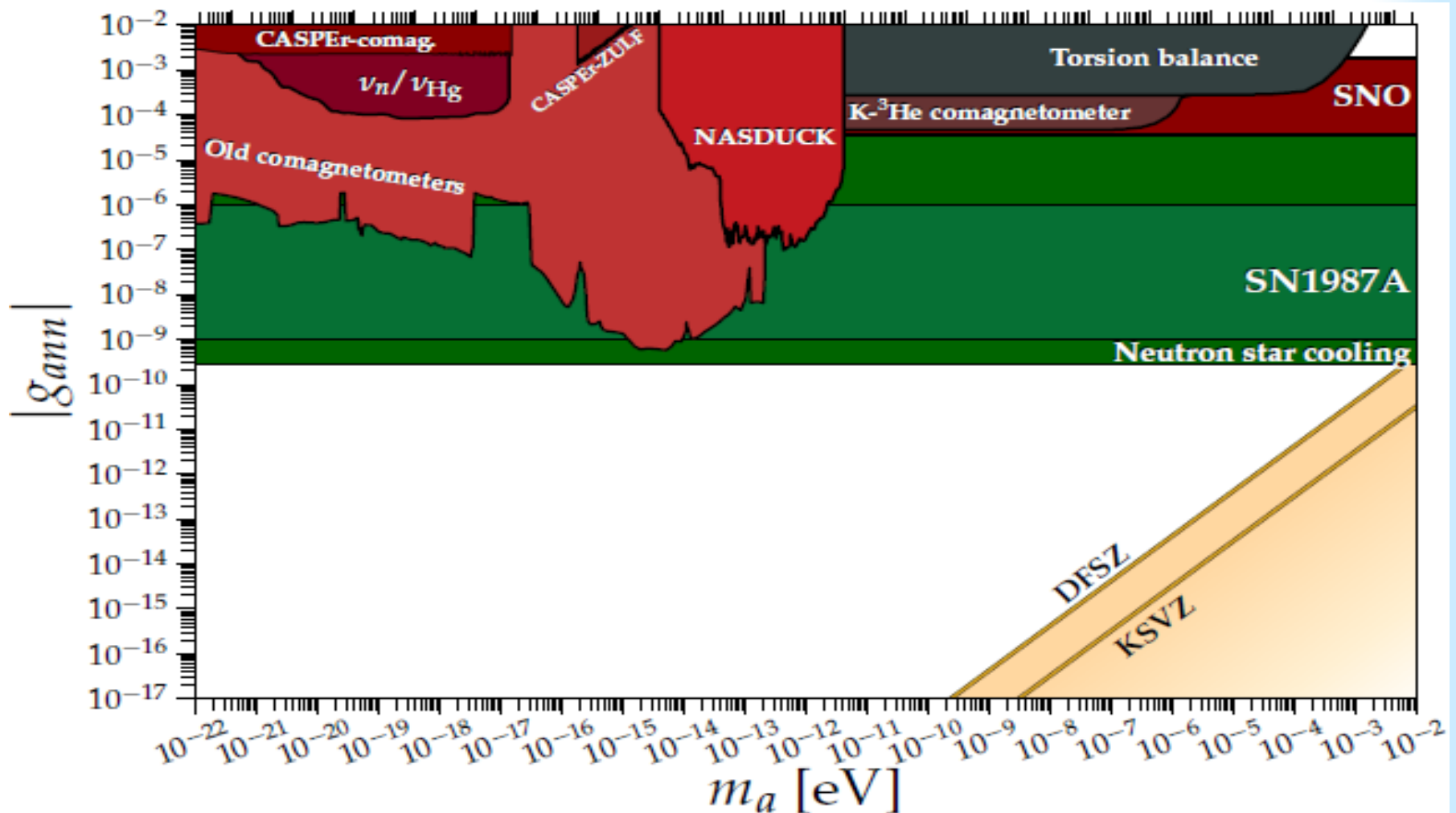
CAST, ADMX, IBS-CAPP - два наиболее продвинутых эксперимента по поиску конверсии в фотон в солнечных и реликтовых аксионов в лабораторном магнитном поле. ABRA, SHAFT, BASE, ADMX SLIC, ADMX, RBF+UF, CAPP, QUAX, ORGAN – 100% TM. CROWS, ALPS-I, OSQAR, PVLAS – LSTW. Solar, Globular cluster, SN1987A..

# Ограничения на $g_{Ae}$ , PDG 2024



Детекторы солнечных нейтрино (S-K, 8B- $\nu$ ) и темной материи (XENONnT) - наиболее продвину-  
тые эксперименты по взаимодействию аксионов с электроном. Добраться до KSVZ труднее.

# Ограничения на $g_{An}$ , PDG 2024



Константа  $g_{An} = C_{An} M_n / f_A$ . В модели KSVZ-аксиона  $C_{An} = -0.02 \pm 0.03$ ,  $C_{Ap} = -0.47 \pm 0.03$ . В модели DFSZ-аксиона  $g_{An}$  зависит от  $\tan\beta = V_u / V_d$ :  $C_{An} = 0.414 \sin^2\beta - 0.160 \pm 0.025$ ,  $C_{Ap} = -0.435 \sin^2\beta - 0.182 \pm 0.025$ .

# Астрофизические ограничения

## Излучение аксионов Солцем

$$g_{A\gamma} \lesssim 0.7 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1} \quad g_{ae} < 2.5 \times 10^{-11} \quad \Phi^{8B\nu} \sim T^{18}$$

## Время горения He в звездах Г-В

$$|G_{A\gamma\gamma}| < 6.6 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

$$m_A < 0.5 \text{ eV (DFSZ)}$$

$$|G_{A\gamma\gamma}| = 4.5_{-1.6}^{+1.2} \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

## Начало горения He в звездах В-К-Г

$$|g_{aee}| < 1.3 \times 10^{-13} \text{ (95\% CL)}$$

$$|g_{aee}| = 0.60_{-0.58}^{+0.32} \times 10^{-13}$$

## Скорость остывания Б-К

$$g_{aee} < .3 \times 10^{-13}$$

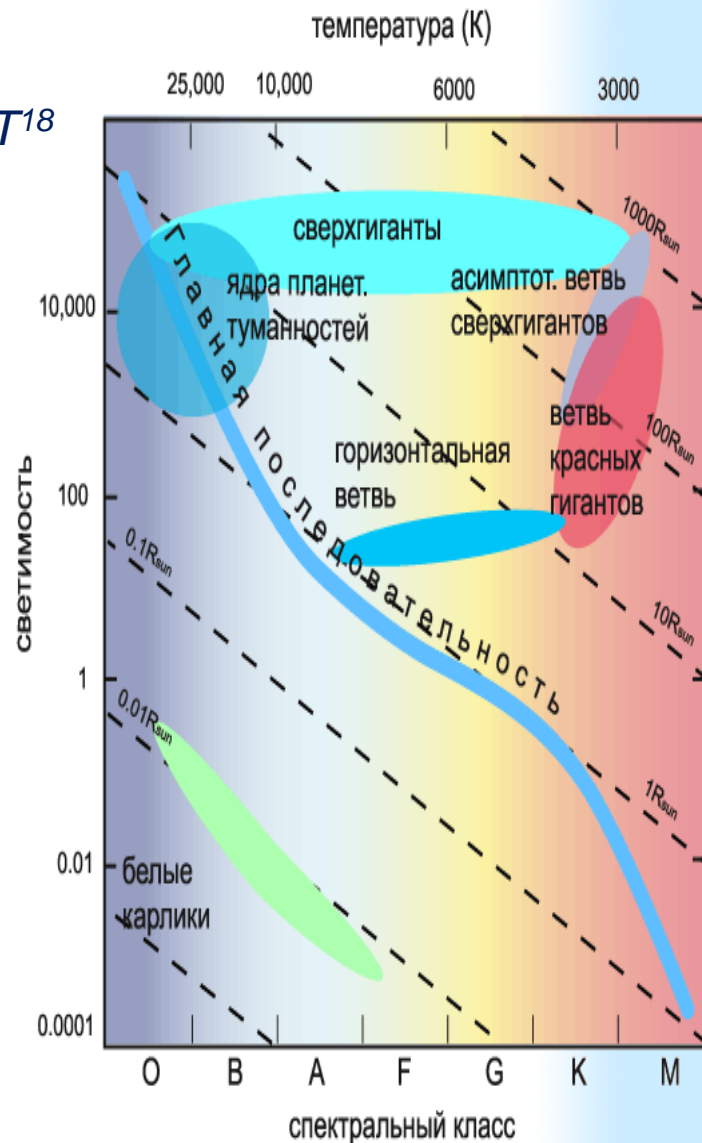
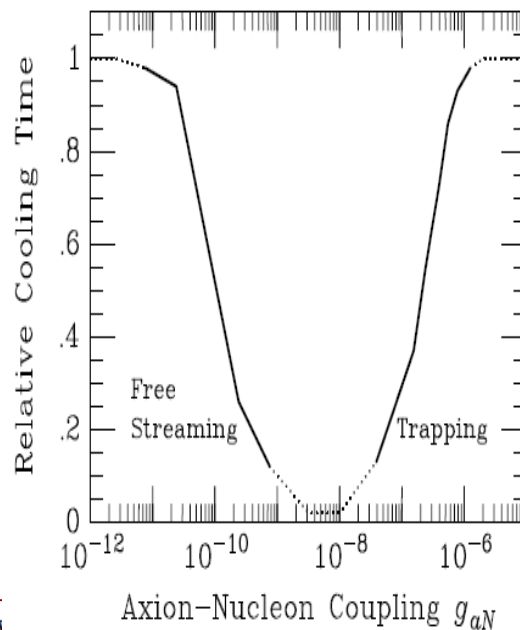
$$2.5 \text{ meV} \lesssim m_A \cos^2 \beta' \lesssim 7.5 \text{ meV}$$

## SN1987A и NS остывание

$$|g_{ann}| < 1.3 \times 10^{-9}$$

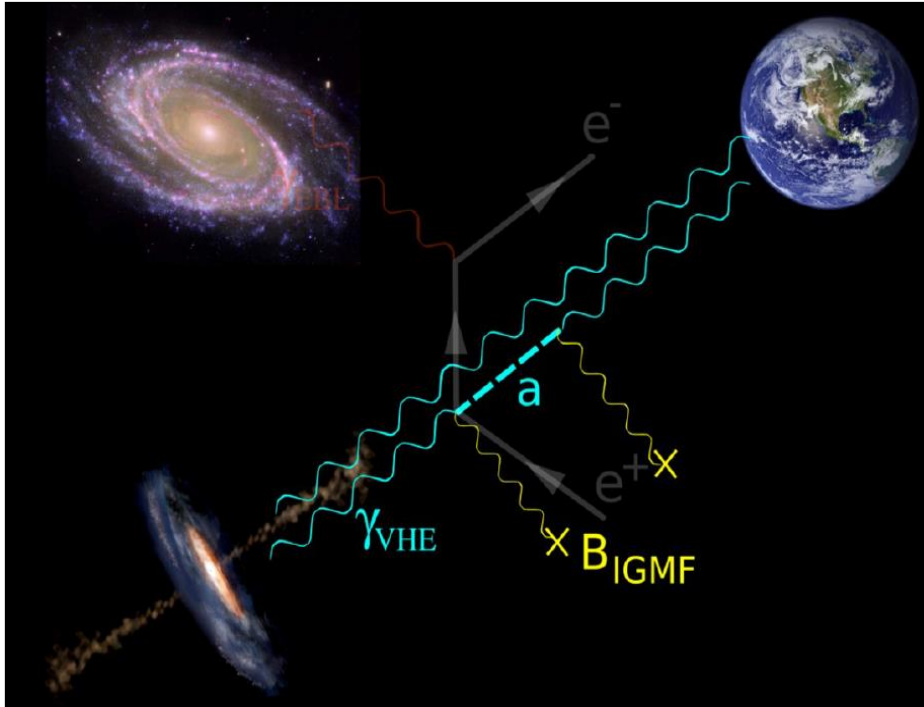
$$|g_{app}| < 1.5 \times 10^{-9}$$

$$m_A \lesssim 16 \text{ meV} \quad f_a \gtrsim 4 \times 10^8 \text{ GeV}$$

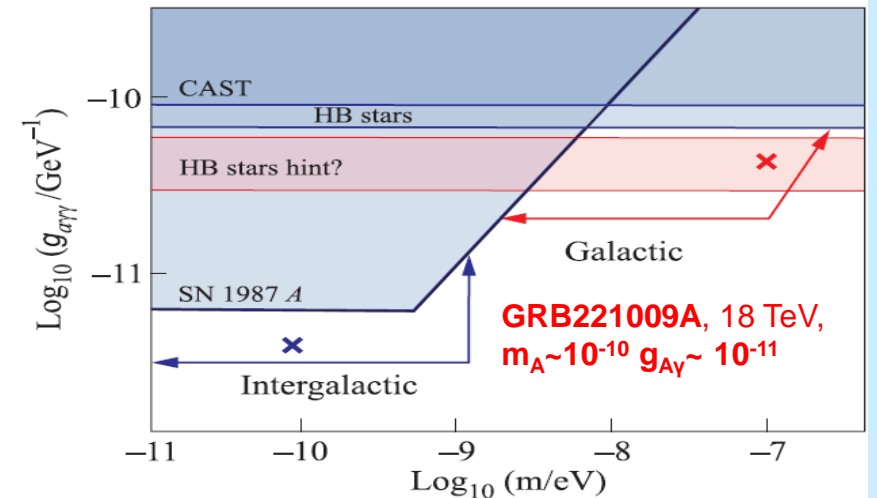
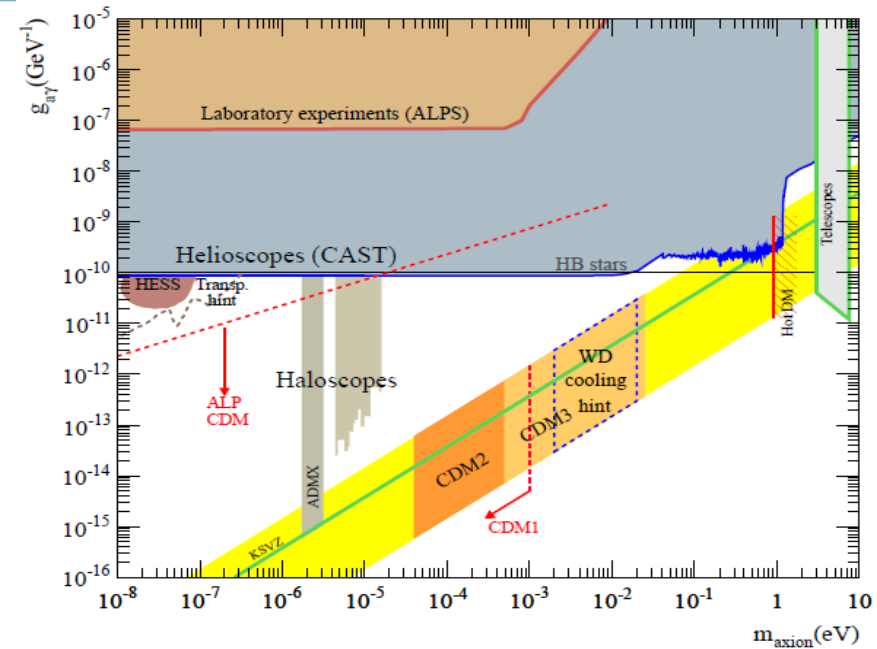


# Астрофизические указания на аксионы и ALPs

1. Аномальная прозрачность межгалактической среды для фотонов **ТэВ-ной энергии** для расстояний более 10 Мпс, что наблюдают HESS, Fermi, MAGIC. Оценки дают массу ALP  $m_A \sim 10^{10} - 10^7$  эВ и  $g_{A\gamma}$  в диапазоне  $10^{-12} - 10^{-10}$  ГэВ<sup>-1</sup>.

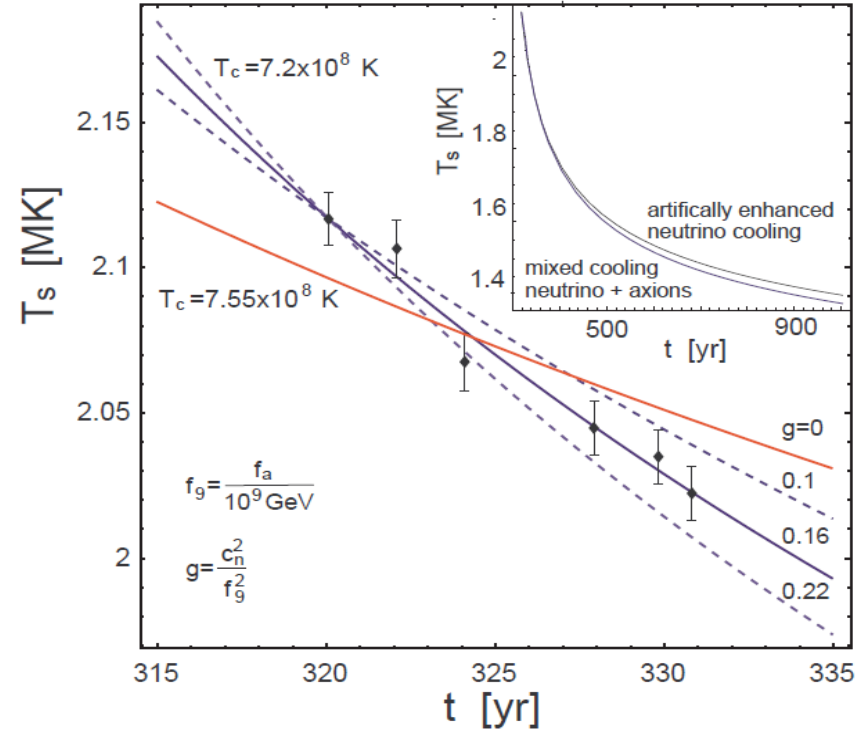
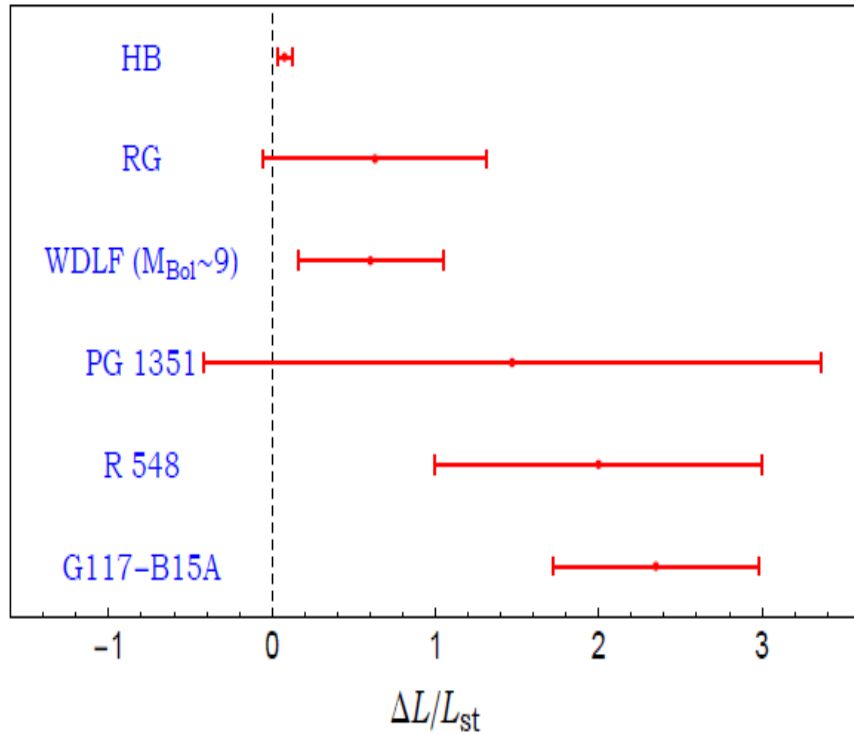


2. Аномальная скорость охлаждения белых карликов. Верхний предела  $g_{Ae} < 3 \times 10^{-13}$ . Недавние работы утверждают, что небольшие потери энергии БК за счет аксионов лучше согласуются с данными при  $g_{Ae} = (1-2) \times 10^{-13}$ .





# Аномальная скорость остывания звезд



Указания на чрезмерное охлаждение были обнаружены в: 1) нескольких пульсирующих белых карликах (WD), эффективность охлаждения которых была извлечена из скорости изменения периода (G17-B15A, R15, PG 1351); 2) функции светимости WD (WDLF), которая описывает распределение WD как функцию их яркости; 3) звездах ветви красных гигантов (RGB) в шаровых скоплениях, в частности, светимости кончика ветви; 4) звездах горизонтальной ветви (HB) в шаровых скоплениях или, точнее, параметре  $R$ , то есть отношении числа звезд HB к числу звезд RGB; 5) сверхгигантах, сжигающих гелий, в рассеянных скоплениях, точнее, отношении  $B=R$  синих и красных сверхгигантов; и 6) нейтронных звездах (NS).

# Источники и детекторы аксионов и ALPs



## Солнечные аксионы

Конверсия в фотон: Солнечные **гелиоскопы**: CAST, IAXO:

в поле кристалла: Solax, Cosme, DAMA, Edelweiss,

Аксиоэлектрический эффект (A.E): Si, Ge, Xe, Bi, Ar

Compton conversion: BOREXINO, BGO

Резонансное поглощение атомными ядрами:  $7\text{Li}$ ,  $57\text{Fe}$ ,  $169\text{Tm}$ ,  $83\text{Kr}$

## Реликтовые аксионы

Аксионный диффузный фон

Конверсия в фотон: **галоскопы**: ADMX, WISPDMMX, Carrack (RAs),

X3, ORGAN, CASPER, MADMAX, FUNKY, CAPP/CULTASK

A.E. в *Si*-, *Ge*-, *Xe*-, *Bi*- (Xenon, XMASS, Edelweiss, LUX)

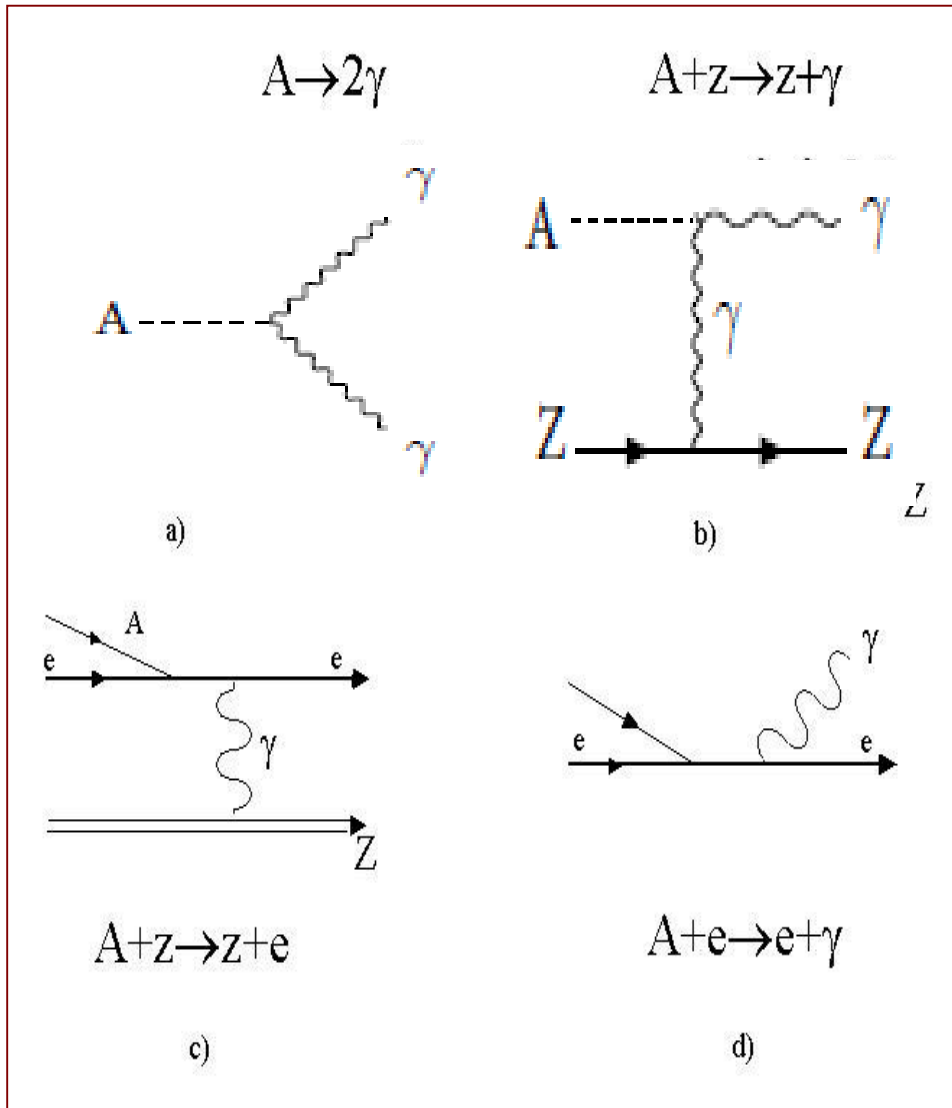
## Лабораторные аксионы

Реакторы, ускорители, p/a источники,

лазеры “Light shining through walls”

PVLAS, ALPS, OSQAR, CASCADE, ARIADNE

# Взаимодействия аксиона



Взаимодействие аксионов с веществом зависит от констант связи аксиона с фотонами, электронами и нуклонами :

$g_{A\gamma}$   
 •  $A \rightarrow 2\gamma$  распад (a) и обратный эффект **Примакова** (b) (аксион-2-фотон конверсия в электромагнитном поле)

$g_{Ae}$   
 • **аксио-электрический-** (c) и **комptonовский** (d) процессы;

$g_{AN}$   
 • как псевдоскалярная частица аксион может излучаться и поглощаться в **переходах магнитного типа**

# Классификация экспериментов

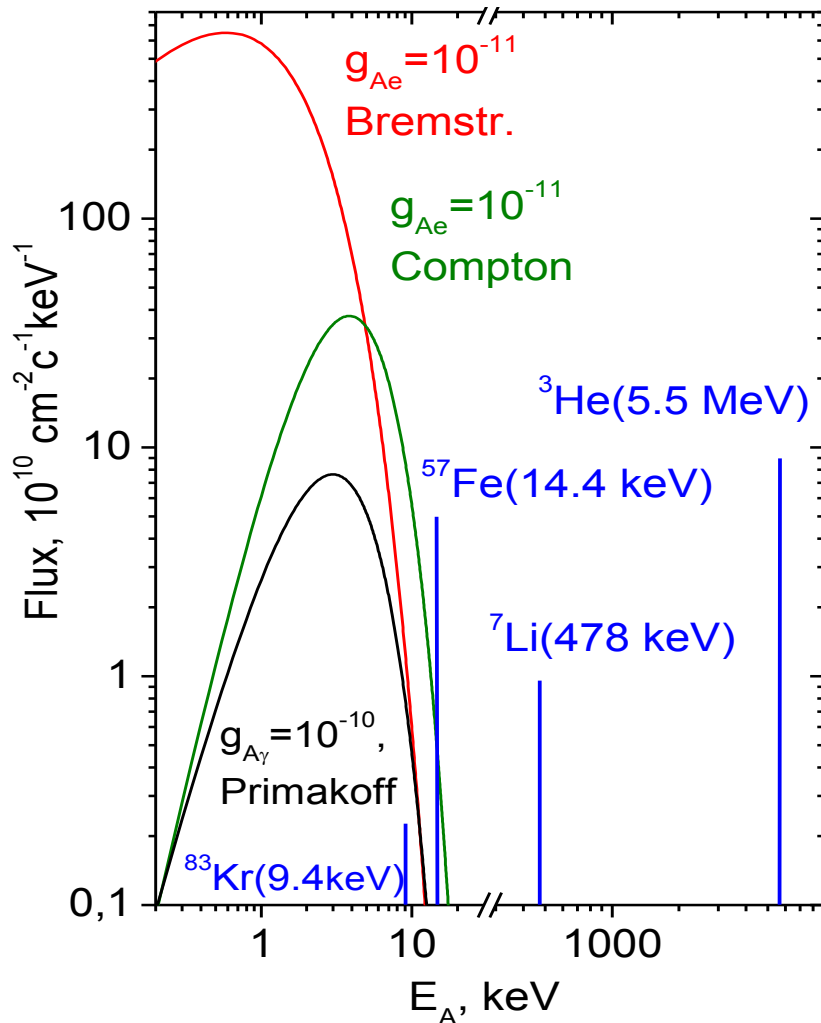
## Регистрация аксионов

Излучение аксионов

	$g_{A\gamma}$	$g_{AN}$	$g_{Ae}$
$g_{A\gamma}$	Конверсия аксиона в фотон в магнитном поле <b>CAST, IAXO, ADMX, CAPP</b>	Резонансное поглощение ядрами $^{169}\text{Tm}, ^{83}\text{Kr}$ <b>PNPI, BAKSAN, LNGS</b>	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si, Ge, Bi, Xe, Te, Ar <b>PNPI(SAXS), CUORE, EDELWEISS, XMASS, XENON, Borexino</b>
$g_{AN}$	Конверсия Примакова <b>7Li-axions, 3He-axions, BOREXINO</b>	Резонансное поглощение ядрами $^{57}\text{Fe}, ^6\text{Li}, ^{83}\text{Kr}$ <b>Krcmar et al, PNPI, BAKSAN</b>	А.Э. Э. в атомах, Комптоновский процесс Si, Ge, Bi, Xe, Te, Ar <b>CUORE, BAKSAN, BOREXINO</b>
$g_{Ae}$	Конверсия аксиона в фотон в магнитном поле <b>IAXO, CAST, Tokyo Helioscope</b>	Резонансное поглощение ядрами $^{169}\text{Tm}, ^{83}\text{Kr}$ <b>PNPI, BAKSAN, LNGS</b>	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si, Ge, Bi, Xe, Te, Ar <b>PNPI(SAXS), CUORE, EDELWEISS, XMASS, XENON</b>



# Спектры солнечных аксионов vs $g_{A\gamma}$ , $g_{Ae}$ и $g_{AN}$



Основные источники солнечных аксионов

1. Реакции pp-цепочки. Наиболее интенсивные потоки ожидаются от M1-переходов в ядрах  $^7\text{Li}$  и  $^3\text{He}$  ( $g_{AN}$ ):



2. Переходы магнитного типа в ядрах, чьи низколежащие уровни возбуждаются из-за высокой температуры в Солнце ( $^{57}\text{Fe}, ^{83}\text{Kr}$ ) ( $g_{AN}$ )

3. Конверсия фотонов в электромагнитном поле солнечной плазмы ( $g_{A\gamma}$ ).

4. Тормозное излучение:  $e + Z(e) \rightarrow Z + A$  ( $g_{Ae}$ )

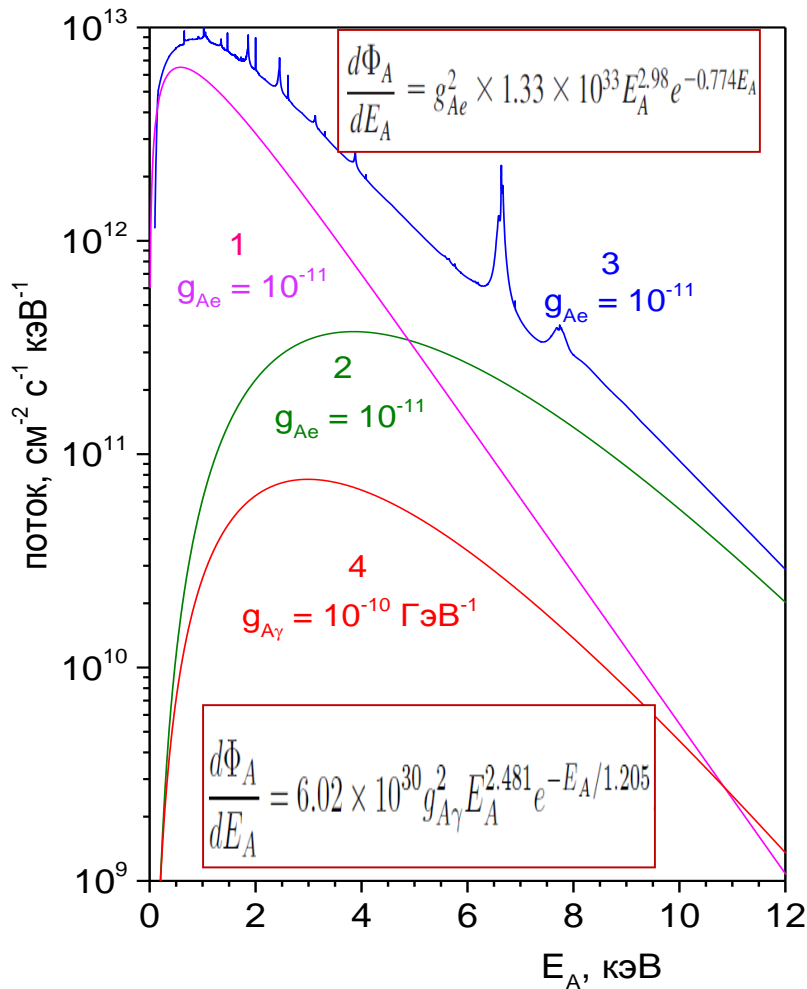
5. Комптоновский процесс:  $\gamma + e \rightarrow e + A$  ( $g_{Ae}$ )

6. Аксиорекомбинация:  $e + I \rightarrow I^- + A$   
аксиоразрядка:  $I^* \rightarrow I + A$ . ( $g_{Ae}$ )

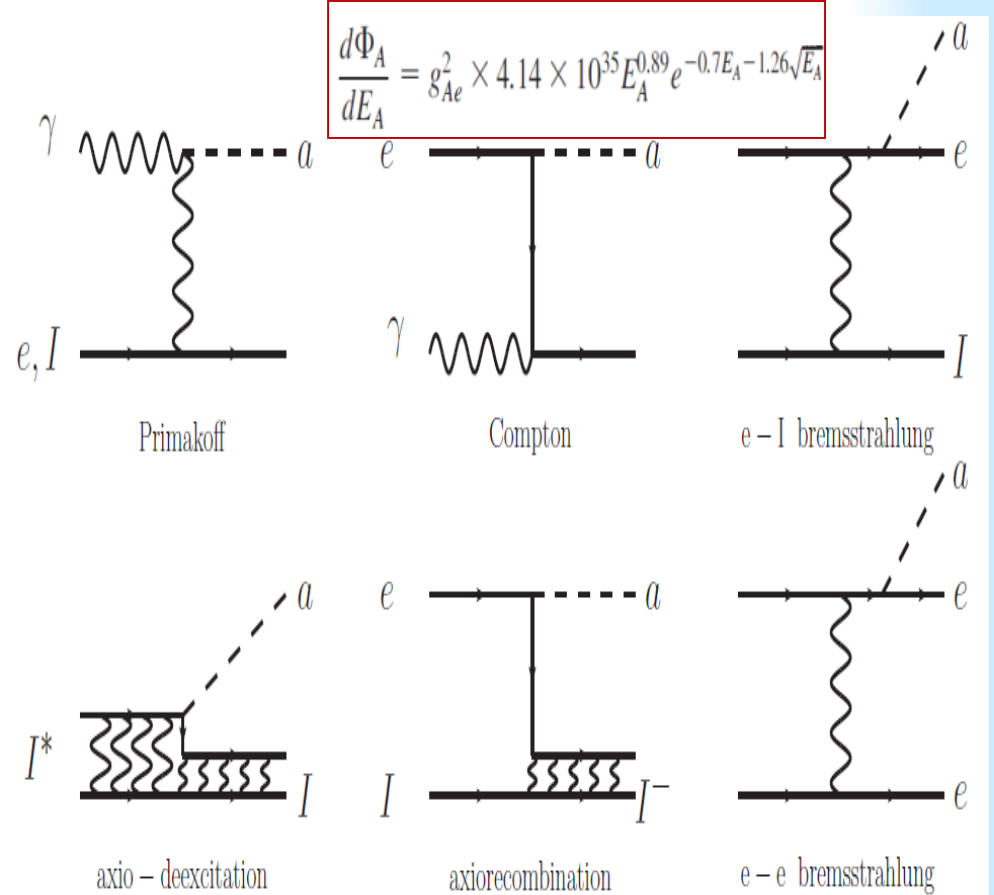
Если аксион существует, Солнце должно быть интенсивным источником аксионов. В звездах 6 основных процессов формирования аксионов:



# Спектры солнечных аксионов vs $g_{A\gamma}$ , $g_{Ae}$ и $g_{AN}$

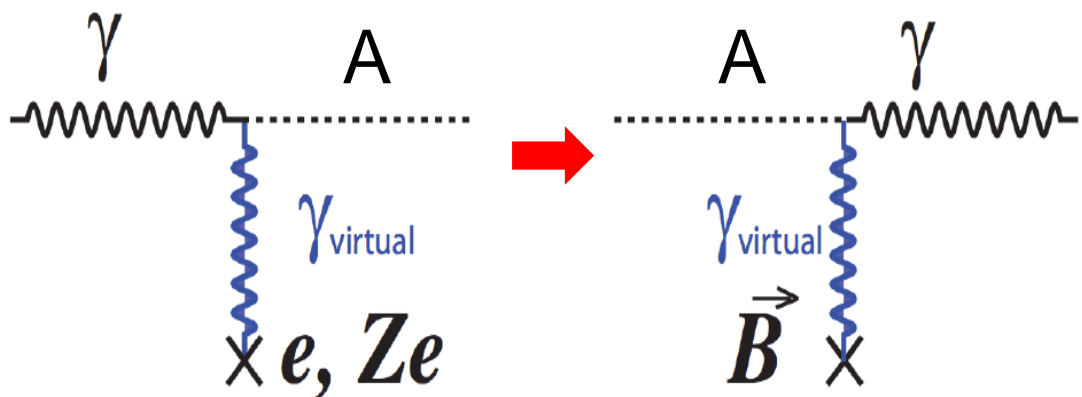


## Основные источники солнечных аксионов:



Если аксионы существуют, Солнце должно быть мощным источником низкоэнергетических кэВ-ных аксионов. Поток аксионов превышает поток нейтрино при  $g_{A\gamma} \sim 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$  and  $g_{Ae} \sim 10^{-11}$ .

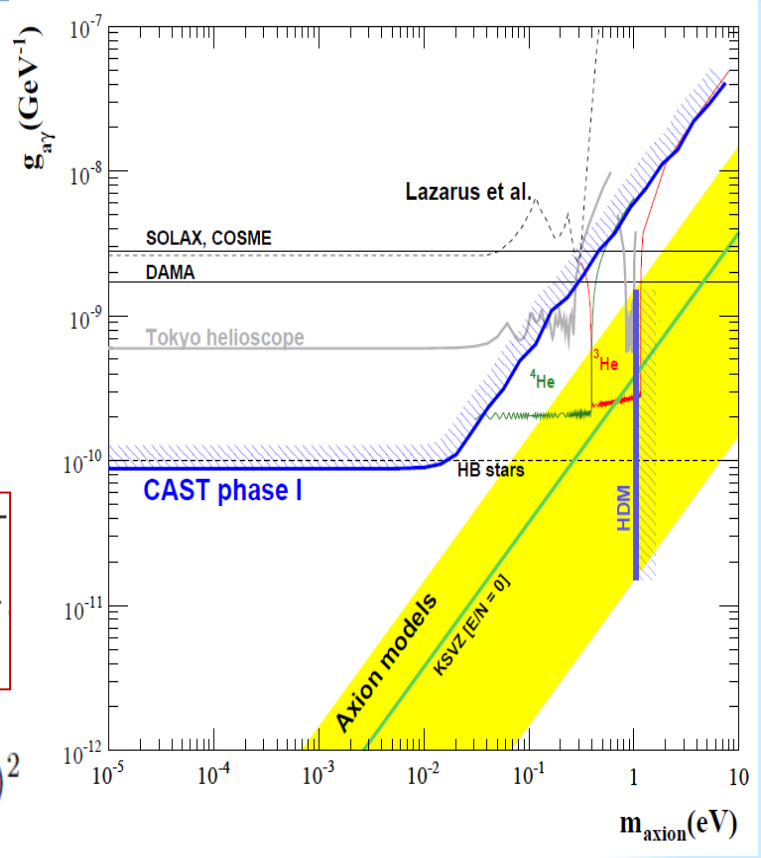
# Конверсия в лабораторном магнитном поле



$$P(a \rightarrow \gamma) \simeq \frac{(2g_{a\gamma} B \omega)^2}{m_a^4} \sin^2 \left( \frac{m_a^2 L}{4\omega} \right)$$

$$m_a < \sqrt{\frac{4\pi E_a}{L}}$$

$$P_{a\gamma} = \left( \frac{g_{a\gamma} B L}{\Delta_{\text{osc}}} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\Delta_{\text{osc}} L}{2} \right) \quad \text{with} \quad \Delta_{\text{osc}}^2 = \left( \frac{\omega_{\text{pl}}^2 - m_a^2}{2E_\gamma} \right)^2 + (g_{a\gamma} B)^2$$



В лабораторном магнитном поле аксионы могут быть преобразованы в реальные фотоны за счет обратного эффекта Примакова. Процесс преобразования можно рассматривать аналогично осцилляциям нейтрино. Хотя фотон имеет спин 1, а аксион спин 0, они могут смешиваться при условии, что магнитное поле компенсирует недостающие квантовые числа. Преобразование из фотона в аксион требует изменения азимутального квантового числа углового момента ( $J_z$ ). Продольное поле не может обеспечить эти переходы, однако поперечное поле допускает смешивание фотона с аксионом.

# BNL и Токуо гелиоскопы

BER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1992

## Search for Solar Axions

D. M. Lazarus and G. C. Smith

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

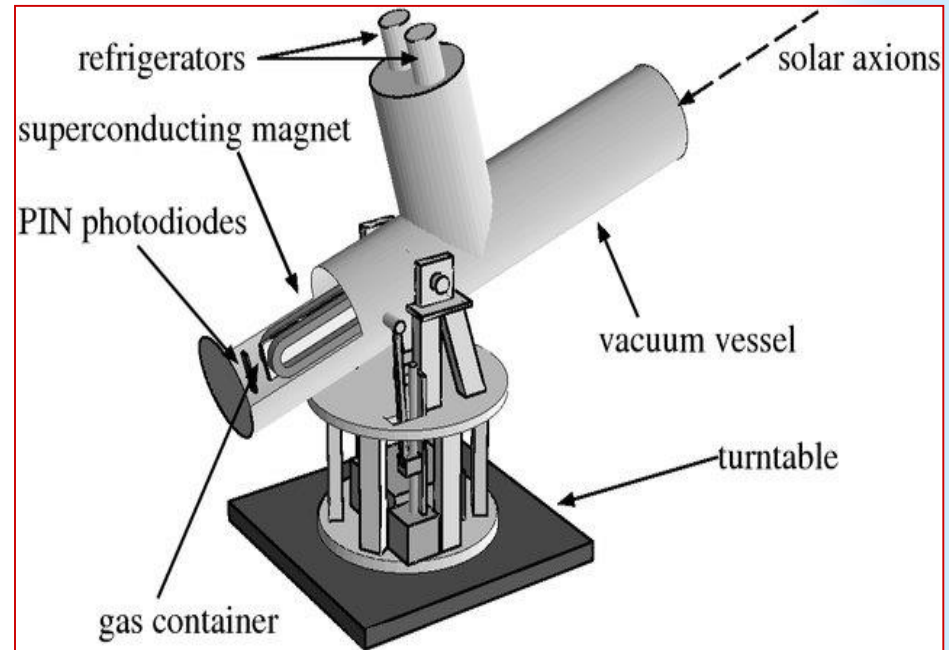
R. Cameron,<sup>(a)</sup> A. C. Melissinos, G. Ruoso,<sup>(b)</sup> and Y. K. Semertzidis<sup>(c)</sup>

Department of Physics and Astronomy, University of Rochester, Rochester, New York 14627

F. A. Nezrick

Fermi National Accelerator Laboratory, P.O. Box 500, Batavia, Illinois 60510

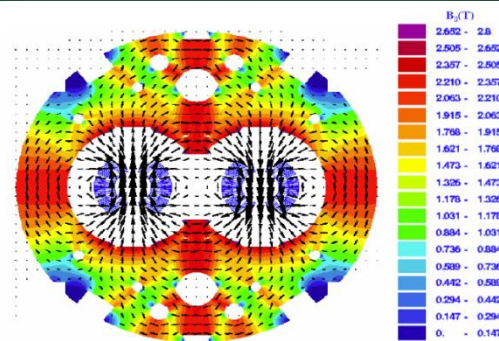
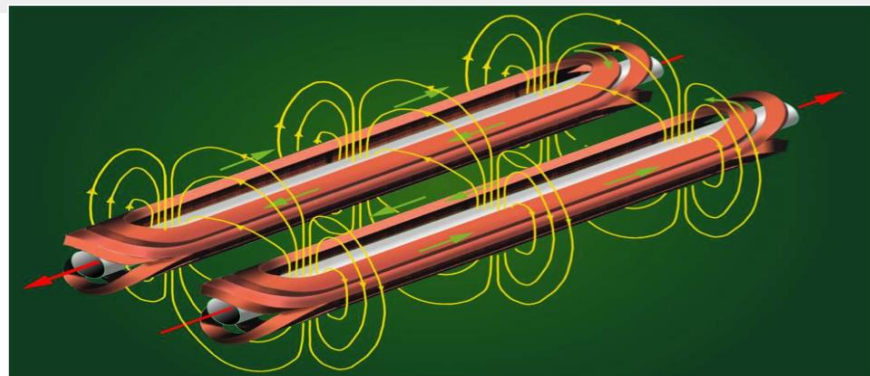
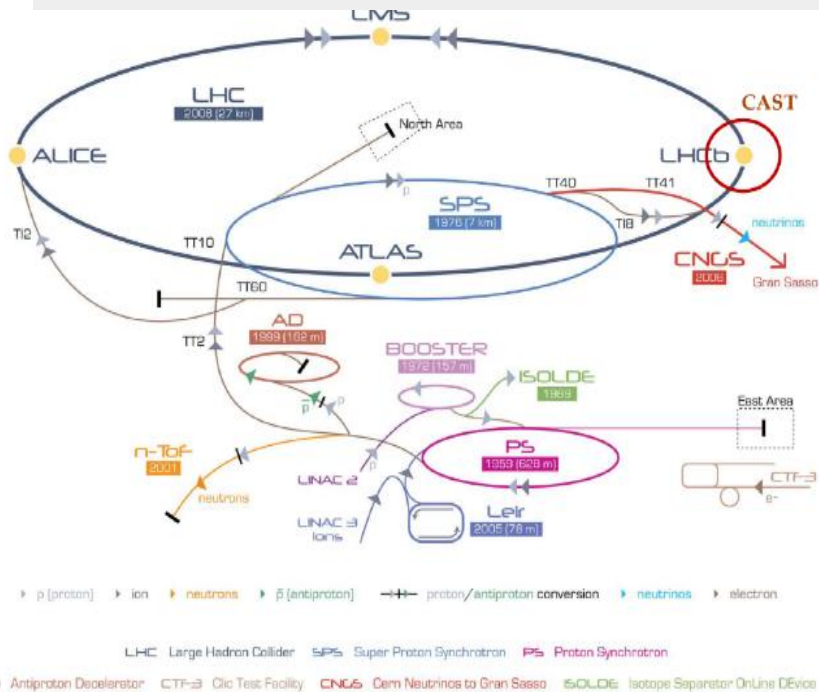
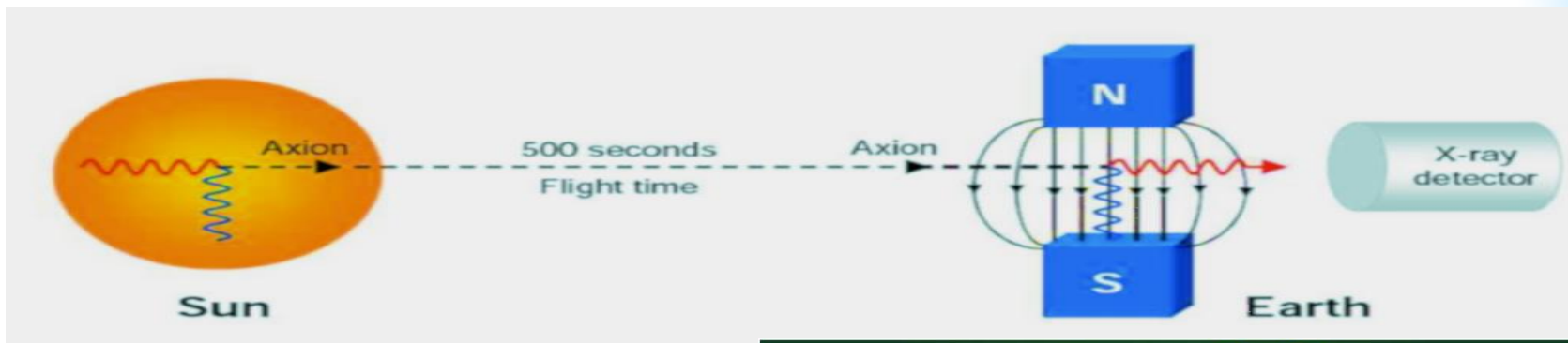
(Received 22 May 1992)



Первый эксперимент с гелиоскопом был проведен в **BNL в 1992 году** с использованием стационарного дипольного магнита. Эксперимент второго поколения, **токийский гелиоскоп (SUMICO)**, использовал более сильный магнит и динамическое отслеживание Солнца. Эксперимент третьего поколения, аксионный солнечный телескоп в **CERN (CAST)**, начал сбор данных в **2003 году**. Он использовал дипольный тестовый магнит LHC со сложным приводом высоты и азимута для отслеживания Солнца. **CAST** впервые использовал **рентгеновскую оптику** для фокусировки фотонного сигнала, а также применил низкофонные методы при создании детектора  $\gamma$ -квантов. Каждое поколение аксионного гелиоскопа достигало **~ 6-кратного** улучшения чувствительности к константе связи аксиона по сравнению с предыдущими.

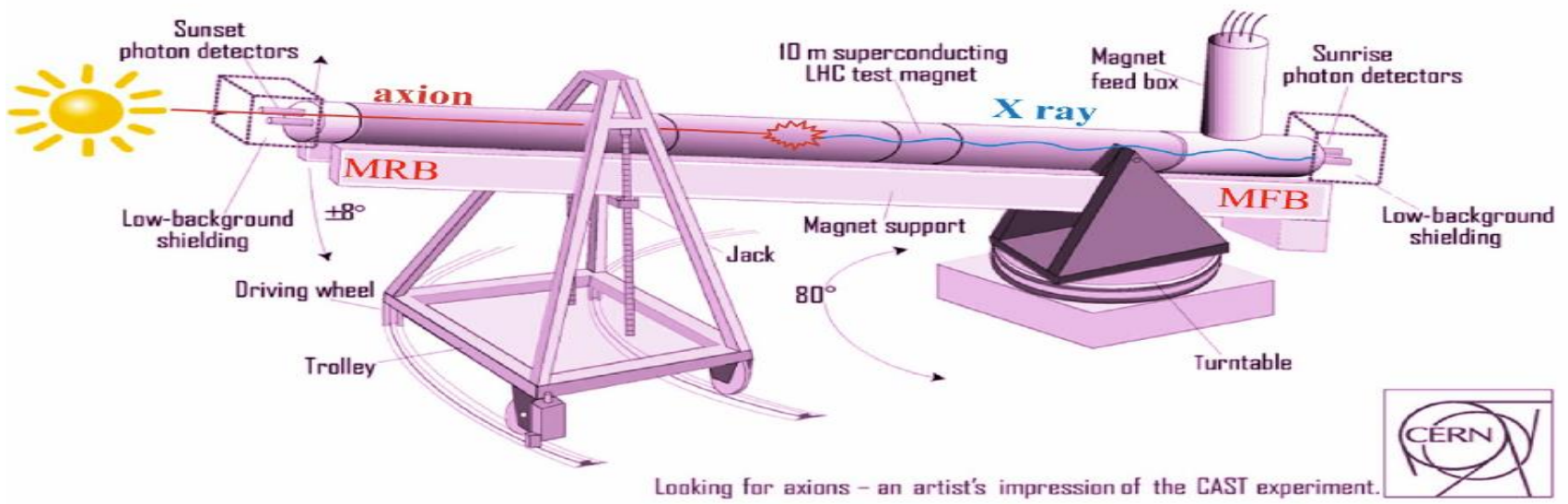


# CAST - CERN Axion Solar Telescope



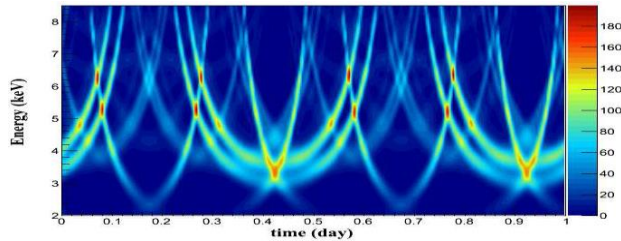
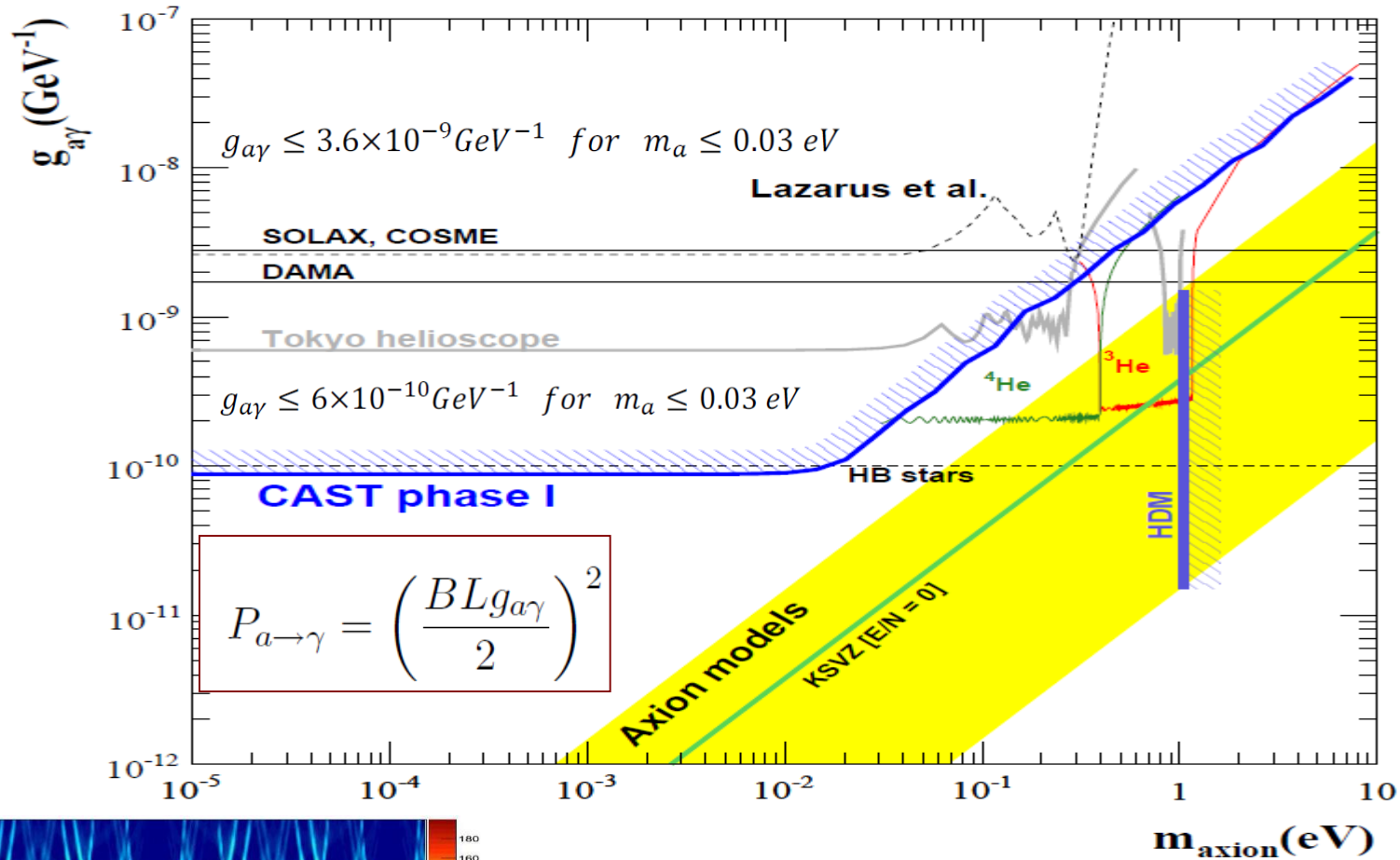
Поперечное магнитное поле, чтобы частица со спином ноль конвертировалась в реальный фотон. Труба длиной 9260 мм диаметром 43 мм, площадь 14 см<sup>2</sup>

# CAST - CERN Axion Solar Telescope



**6 часов в сутки** (3 на восходе и 3 на закате) ось магнита направлена на Солнце.

# Результаты CAST

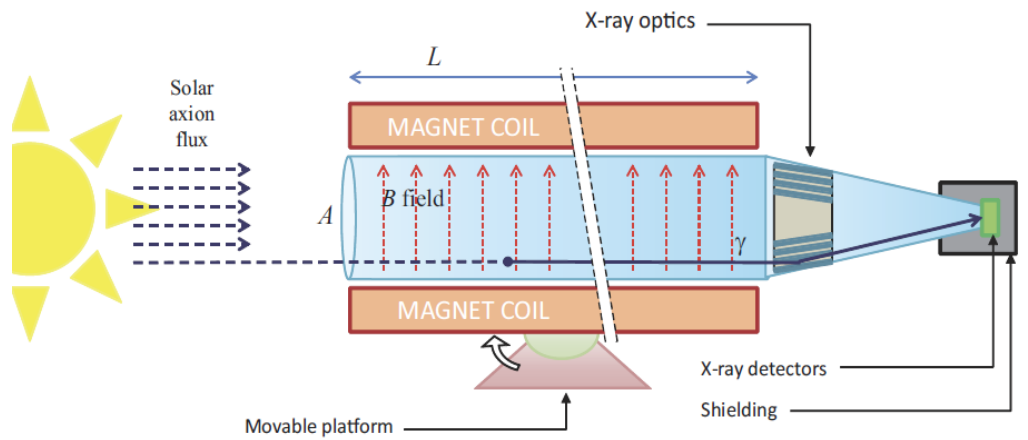
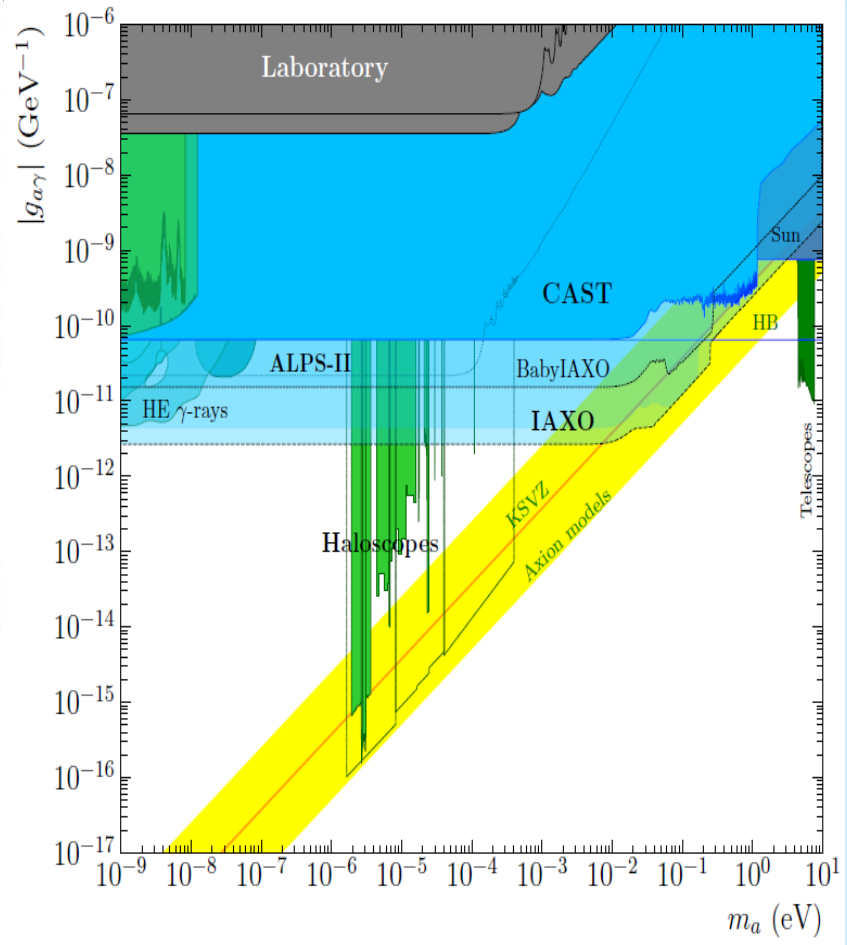
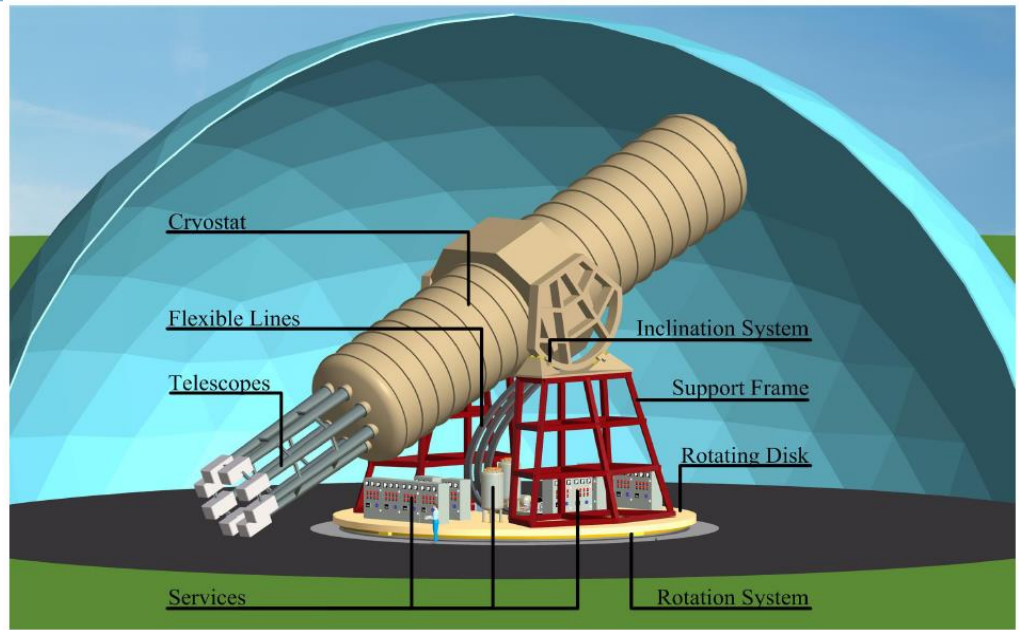


Year	Phase	Sensitivity Range
2000 – 2003	Commissioning	–
2003 – 2004	Phase I (Vacuum)	< 0.02 eV
2006 – 2007	Phase II ( $\text{He}^4$ )	0.02 eV – 0.4 eV
2008 – 2011	Phase II ( $\text{He}^3$ )	0.4 eV – 1.15 eV
2012	Phase II ( $\text{He}^4$ - revisit)	0.02 eV – 0.4 eV

*Solax, Cosme, DAMA, Edelweiss – конверсия  $A \rightarrow \gamma$  в поле кристалла*



# IAXO – International Axion Observatory



**Длина = 20 м; 8 каналов  $d = 0.6$  м  
Площадь  $\sim 2$  м<sup>2</sup>; Поле 5.4 Т;  $T \sim 4.5$  К**

**Увеличение чувствительности на 5 - 6 порядков (в 20 раз для  $g_{A\gamma}$ ). От РФ участвуют ИЯИ и ПИЯФ – axion theory and phenomenology,  $gAe$ , Si(Li) активной защиты**



# IAXO: International AXion Observatory



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Nuclear and Particle Physics Proceedings 273–275 (2016) 244–249

[www.elsevier.com/locate/nppp](http://www.elsevier.com/locate/nppp)



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Physics Procedia 61 (2015) 193 – 200

Physics

Procedia

An update on the Axion Helioscopes front: current activities at CAST and the IAXO project.

T. Dafni<sup>1,\*</sup>, M. Arik<sup>2</sup>, E. Armengaud<sup>3</sup>, S. Aune<sup>3</sup>, F. T. Avignone<sup>4</sup>, K. Barth<sup>5</sup>, A. Belov<sup>6</sup>, M. Betz<sup>5</sup>, H. Bräuninger<sup>7</sup>, P. Brax<sup>5</sup>, N. Breijnholt<sup>9</sup>, P. Brun<sup>3</sup>, G. Cantatore<sup>8</sup>, J. M. Carmona<sup>1</sup>, G. P. Carosi<sup>9</sup>, F. Caspers<sup>5</sup>, S. Caspi<sup>10</sup>, S. A. Cetin<sup>2</sup>, D. Chelouche<sup>11</sup>, F. E. Christensen<sup>12</sup>, J. I. Collar<sup>13</sup>, A. Dael<sup>3</sup>, M. Davenport<sup>4</sup>, A. V. Derbin<sup>14</sup>, K. Desch<sup>15</sup>, A. Diago<sup>1</sup>, B. Döbrich<sup>16</sup>, I. Dratchnev<sup>14</sup>, A. Dudarev<sup>5</sup>, C. Eleftheriadis<sup>17</sup>, G. Fanourakis<sup>18</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>3</sup>, P. Friedrich<sup>1</sup>, J. Galán<sup>3</sup>, J. A. García<sup>1</sup>, A. Gardikiotis<sup>19</sup>, J. G. Garza<sup>1</sup>, E. N. Gazis<sup>20</sup>, E. Georgiopolou<sup>19</sup>, T. Gerasis<sup>18</sup>, B. Gimeno<sup>21</sup>, I. Giomataris<sup>3</sup>, S. Gninenko<sup>6</sup>, H. Gómez<sup>1</sup>, D. González-Díaz<sup>1</sup>, E. Gruber<sup>22</sup>, E. Guendelman<sup>23</sup>, T. Guthörl<sup>22</sup>, C. J. Hailey<sup>24</sup>, R. Hartmann<sup>25</sup>, S. Hauf<sup>26</sup>, F. Haug<sup>5</sup>, M. D. Hasinoff<sup>27</sup>, T. Hiramatsu<sup>28</sup>, D. H. H. Hoffmann<sup>26</sup>, D. Horns<sup>29</sup>, F. J. Iguaz<sup>1</sup>, I. G. Irastorza<sup>1</sup>, J. Isern<sup>30</sup>, K. Imai<sup>31</sup>, J. Jacoby<sup>32</sup>, J. Jaeckel<sup>33</sup>, A. C. Jakobsen<sup>12</sup>, K. Jakovčić<sup>34</sup>, J. Kaminski<sup>15</sup>, M. Kawasaki<sup>35</sup>, M. Karuza<sup>36</sup>, K. Königsmann<sup>22</sup>, R. Kotthaus<sup>37</sup>, M. Krčmar<sup>34</sup>, K. Kousouris<sup>5</sup>, C. Krieger<sup>15</sup>, M. Kuster<sup>26</sup>, B. Lakić<sup>34</sup>, J. M. Laurent<sup>1,5</sup>, O. Limousin<sup>3</sup>, A. Lindner<sup>16</sup>, A. Liolios<sup>17</sup>, A. Ljubičić<sup>34</sup>, G. Luzón<sup>1</sup>, S. Matsuki<sup>38</sup>, V. N. Muratova<sup>14</sup>, S. Neff<sup>26</sup>, T. Niinikoski<sup>3</sup>, C. Nones<sup>3</sup>, I. Ortega<sup>1</sup>, T. Papaevangelou<sup>3</sup>, M. J. Pivovarov<sup>9</sup>, G. Raffelt<sup>37</sup>, J. Redondo<sup>1</sup>, H. Riege<sup>26</sup>, A. Ringwald<sup>16</sup>, A. Rodríguez<sup>1</sup>, M. Rosu<sup>26</sup>, S. Russenschuck<sup>5</sup>, J. Ruz<sup>9</sup>, K. Saikawa<sup>39</sup>, I. Savvidis<sup>17</sup>, T. Sekiguchi<sup>35</sup>, Y. K. Semertzidis<sup>40</sup>, I. Shilon<sup>1,5</sup>, P. Sikivie<sup>41</sup>, H. Silva<sup>5</sup>, S. K. Solanki<sup>42</sup>, L. Stewart<sup>5</sup>, H. H. J. ten Kate<sup>5</sup>, A. Tomas<sup>1</sup>, S. Troitsky<sup>6</sup>, T. Vafeiadis<sup>5</sup>, K. van Bibber<sup>33</sup>, P. Vedrine<sup>3</sup>, J. A. Villar<sup>1</sup>, J. K. Vogel<sup>9</sup>, L. Walckiers<sup>5</sup>, A. Weltman<sup>1</sup>, W. Wester<sup>45</sup>, S. C. Yildiz<sup>2</sup>, K. Zioutas<sup>19,5</sup>

The next generation of axion helioscopes: The International Axion Observatory (IAXO)

J. K. Vogel<sup>1,\*</sup>, E. Armengaud<sup>b</sup>, F. T. Avignone<sup>c</sup>, M. Betz<sup>d</sup>, P. Brax<sup>e</sup>, P. Brun<sup>b</sup>, G. Cantatore<sup>f</sup>, J. M. Carmona<sup>g</sup>, G. P. Carosi<sup>h</sup>, F. Caspers<sup>d</sup>, S. Caspi<sup>h</sup>, S. A. Cetin<sup>i</sup>, D. Chelouche<sup>f</sup>, F. E. Christensen<sup>k</sup>, A. Dael<sup>l</sup>, T. Dafni<sup>g</sup>, M. Davenport<sup>d</sup>, A. V. Derbin<sup>l</sup>, K. Desch<sup>m</sup>, A. Diago<sup>g</sup>, B. Döbrich<sup>n</sup>, I. Dratchnev<sup>l</sup>, A. Dudarev<sup>d</sup>, C. Eleftheriadis<sup>o</sup>, G. Fanourakis<sup>p</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>q</sup>, J. Galán<sup>b</sup>, J. A. García<sup>g</sup>, J. G. Garza<sup>g</sup>, T. Gerasis<sup>g</sup>, B. Gimeno<sup>q</sup>, I. Giomataris<sup>b</sup>, S. Gninenko<sup>r</sup>, H. Gómez<sup>g</sup>, D. González-Díaz<sup>g</sup>, E. Guendelman<sup>s</sup>, C. J. Hailey<sup>t</sup>, T. Hiramatsu<sup>u</sup>, D. H. H. Hoffmann<sup>v</sup>, D. Horns<sup>w</sup>, F. J. Iguaz<sup>g</sup>, I. G. Irastorza<sup>g</sup>, J. Isern<sup>x</sup>, K. Imai<sup>y</sup>, A. C. Jakobsen<sup>k</sup>, J. Jaeckel<sup>z</sup>, K. Jakovčić<sup>aa</sup>, J. Kaminski<sup>m</sup>, M. Kawasaki<sup>ab</sup>, M. Karuza<sup>ac</sup>, M. Krčmar<sup>aa</sup>, K. Kousouris<sup>d</sup>, C. Krieger<sup>mm</sup>, B. Lakić<sup>aa</sup>, O. Limousin<sup>b</sup>, A. Lindner<sup>n</sup>, A. Liolios<sup>o</sup>, G. Luzón<sup>g</sup>, S. Matsuki<sup>ad</sup>, V. N. Muratova<sup>l</sup>, C. Nones<sup>b</sup>, I. Ortega<sup>g</sup>, T. Papaevangelou<sup>b</sup>, M. J. Pivovarov<sup>h</sup>, G. Raffelt<sup>ac</sup>, J. Redondo<sup>ac</sup>, A. Ringwald<sup>o</sup>, S. Russenschuck<sup>d</sup>, J. Ruz<sup>q</sup>, K. Saikawa<sup>af</sup>, I. Savvidis<sup>o</sup>, T. Sekiguchi<sup>ab</sup>, Y. K. Semertzidis<sup>ag</sup>, I. Shilon<sup>d</sup>, P. Sikivie<sup>ah</sup>, H. Silva<sup>d</sup>, H. ten Kate<sup>d</sup>, A. Tomas<sup>g</sup>, S. Troitsky<sup>r</sup>, T. Vafeiadis<sup>d</sup>, K. van Bibber<sup>ai</sup>, P. Vedrine<sup>b</sup>, J. A. Villar<sup>g</sup>, L. Walckiers<sup>d</sup>, A. Weltman<sup>aj</sup>, W. Wester<sup>ak</sup>, S. C. Yildiz<sup>l</sup>, K. Zioutas<sup>al</sup>

<sup>a</sup> Physics Division, Physical and Life Sciences Directorate, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

<sup>b</sup> CEA Irfu, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>c</sup> Physics Department, University of South Carolina, Columbia, SC, USA

<sup>d</sup> European Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland

<sup>e</sup> IPHT, Centre d'Études de Saclay (CEA-Saclay), Gif-sur-Yvette, France

<sup>f</sup> Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Trieste and Università di Trieste, Trieste, Italy

<sup>g</sup> Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain

<sup>h</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

<sup>i</sup> Dogus University, Istanbul, Turkey

<sup>j</sup> Physics Department, University of Haifa, Haifa, 31905 Israel

<sup>k</sup> Technical University of Denmark, DTU Space Kgs. Lyngby, Denmark

<sup>l</sup> St. Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>m</sup> Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

<sup>n</sup> Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

<sup>o</sup> Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

<sup>p</sup> National Center for Scientific Research Demokritos, Athens, Greece

<sup>q</sup> Instituto de Ciencias de las Materiales, Universidad de Valencia, Valencia, Spain

<sup>r</sup> Institute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>s</sup> Physics department, Ben Gurion University, Beer Sheva, Israel

<sup>t</sup> Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, New York, USA

<sup>u</sup> Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

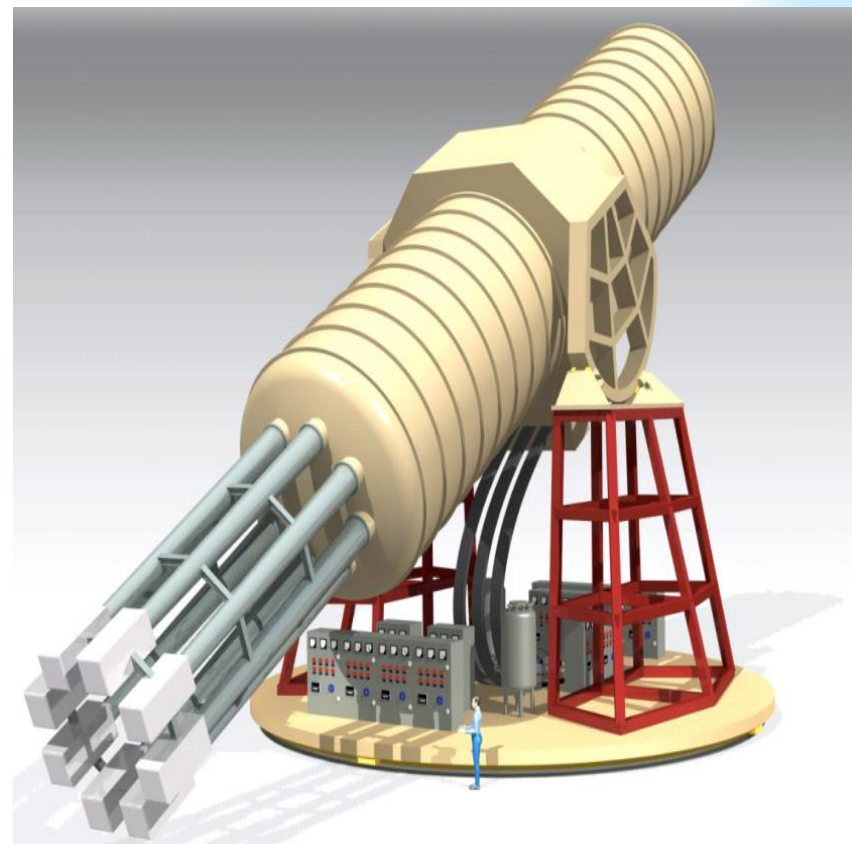
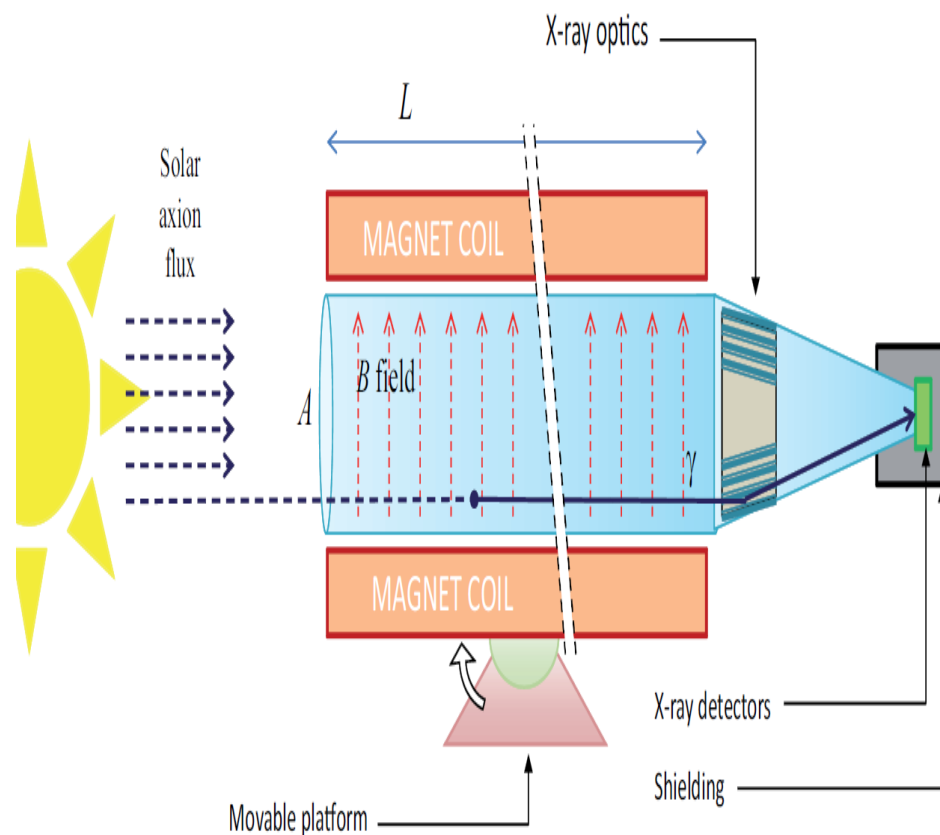
<sup>v</sup> Technische Universität Darmstadt, IKP, Darmstadt, Germany

ПИЯФ

ИЯИ

Первоначально 17 (>40) институтов ФРГ, Испания, США, Франция, Россия, Хорватия, ЮАР, ЦЕРН. ПИЯФ - Отбор материалов ICP MS+HPGe, монитор BGO, M-K симуляции, gAe

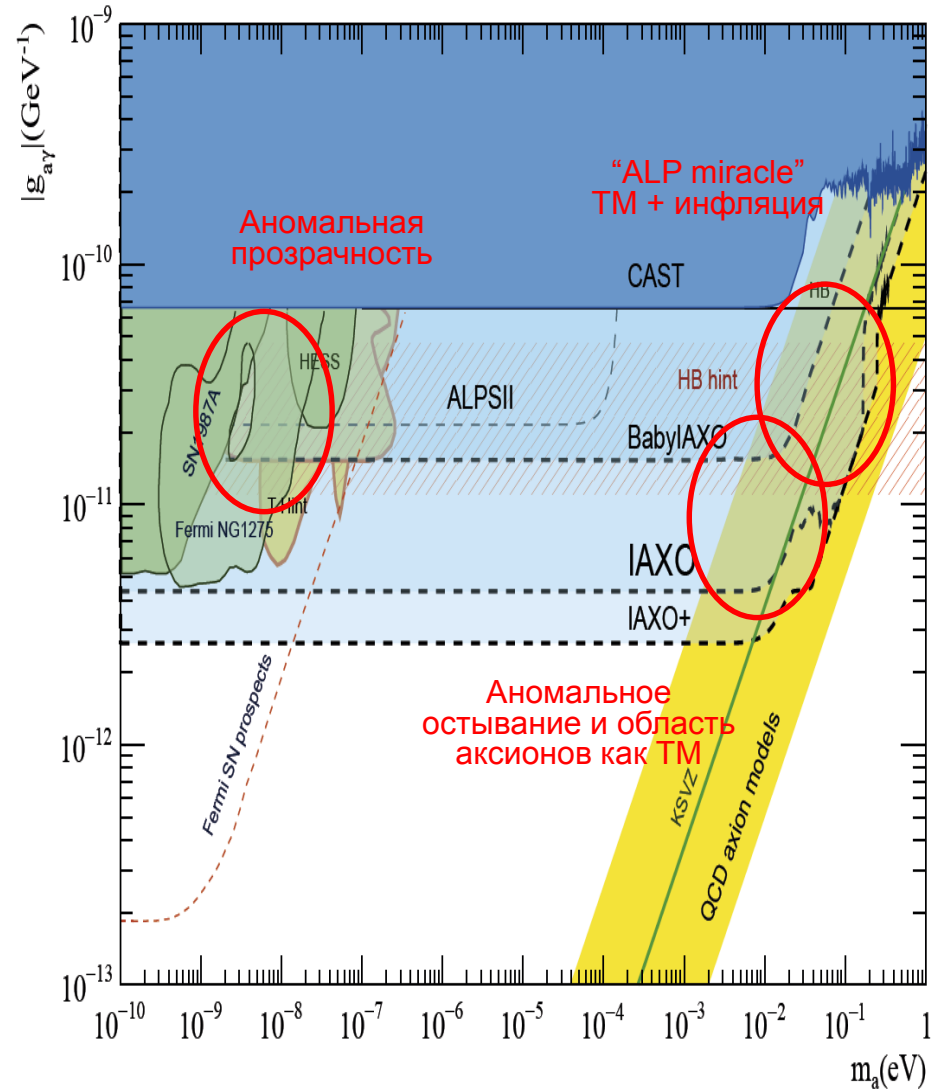
# Гелиоскоп IAXO



4-е поколение аксионных гелиоскопов после CAST с крупномасштабным магнитом, у которого **>300 раз больше  $B^2L^2A$** , чем у магнита CAST. Торoidalная геометрия с 8 конверсионными отверстиями диаметром 60 см и длиной 20 м. Детекторы выбраны на основе низкофонового опыта CAST. Рентгеновская оптика использовалась в NuStar. **50%** времени слежения за Солнцем. Большой объем с магнитным полем для поиска DM.

# Физическая программа IAXO

1. IAXO улучшит чувствительность к  $g_{ay}$  в **20 раз** (в  $10^5$  к отношению сигнал/шум)
2. IAXO проверит КХД-аксион модели мЭВ-эВ области масс.
3. Не предложено другой техники для проверки КХД аксиона в этой области – уникальность IAXO.
4. IAXO полностью проверит область аномальной прозрачности
5. IAXO проверит область аномального остывания звезд
6. IAXO частично проверит область моделей аксионной темной материи, включая “ALP miracle” модели, согласующиеся с ТМ и инфляцией.
7. IAXO проверит область параметров ALP в струнных теориях и область «темных» фотонов.



# 2021 прототип - *babyIAXO*



PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: October 26, 2020

REVISED: March 5, 2021

ACCEPTED: April 16, 2021

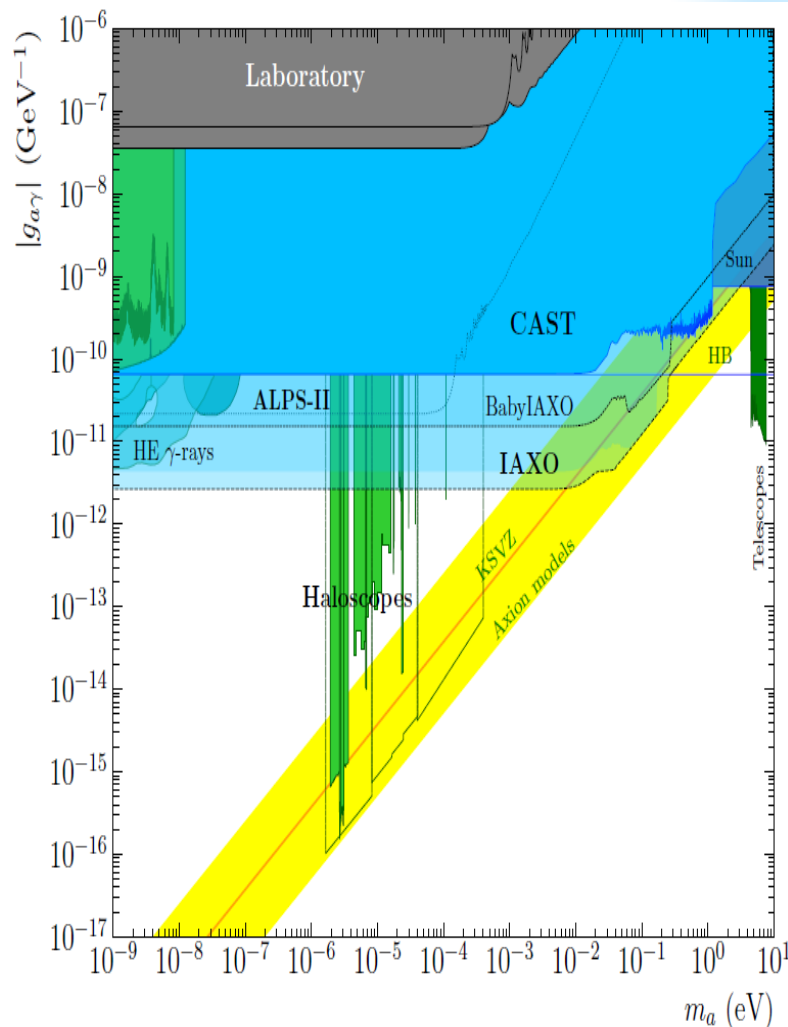
PUBLISHED: May 17, 2021

Conceptual design of **BabyIAXO**, the intermediate stage towards the International Axion Observatory



## The IAXO collaboration

A. Abeln<sup>1</sup>, K. Altenmüller<sup>2</sup>, S. Arguedas Cuendis<sup>3</sup>, E. Armengaud<sup>4</sup>, D. Attié<sup>4</sup>, S. Aune<sup>4</sup>, S. Basso<sup>5</sup>, L. Bergé<sup>6</sup>, B. Biasuzzi<sup>4</sup>, P.T.C. Borges De Sousa<sup>3</sup>, P. Brun<sup>4</sup>, N. Bykovskiy<sup>3</sup>, D. Calvet<sup>4</sup>, J.M. Carmona<sup>2</sup>, J.F. Castel<sup>2</sup>, S. Cebrián<sup>2</sup>, V. Chernov<sup>7,8</sup>, F.E. Christensen<sup>9</sup>, M.M. Civitani<sup>5</sup>, C. Cogollos<sup>10,11</sup>, T. Dafni<sup>2</sup>, A. Derbin<sup>12</sup>, K. Desch<sup>13</sup>, D. Díez<sup>2</sup>, M. Dinter<sup>21</sup>, B. Döbrich<sup>3</sup>, I. Drachnev<sup>12</sup>, A. Dudarev<sup>3</sup>, L. Dumoulin<sup>6</sup>, D.D.M. Ferreira<sup>9</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>4</sup>, I. Fleck<sup>14</sup>, J. Galán<sup>2</sup>, D. Gascón<sup>10,11</sup>, L. Gastaldo<sup>1</sup>, M. Giannotti<sup>15</sup>, Y. Giomataris<sup>4</sup>, A. Giuliani<sup>6</sup>, S. Gninenko<sup>8</sup>, J. Golm<sup>3,16</sup>, N. Golubev<sup>8</sup>, L. Hagge<sup>21</sup>, J. Hahn<sup>14</sup>, C.J. Hailey<sup>17</sup>, D. Hengstler<sup>1</sup>, P.L. Henriksen<sup>9</sup>, T. Houdy<sup>22,23</sup>, R. Iglesias-Marzoa<sup>18</sup>, F.J. Igua<sup>15</sup>, I.G. Irastorza<sup>2,a</sup>, C. Iniguez<sup>18</sup>, K. Jakovčić<sup>20</sup>, J. Kaminski<sup>13</sup>, B. Kanoute<sup>19</sup>, S. Karstensen<sup>21</sup>, L. Kravchuk<sup>8</sup>, B. Lakić<sup>20</sup>, T. Lasserre<sup>4</sup>, P. Laurent<sup>4</sup>, O. Limousin<sup>4</sup>, A. Lindner<sup>21</sup>, M. Loidl<sup>24</sup>, I. Lomskaya<sup>12</sup>, G. López-Alegre<sup>18</sup>, B. Lubsandorzhev<sup>8</sup>, K. Ludwig<sup>21</sup>, G. Luzón<sup>2</sup>, C. Malbrunot<sup>3</sup>, C. Margalejo<sup>2</sup>, A. Marin-Franch<sup>18</sup>, S. Marnieros<sup>6</sup>, F. Marutzky<sup>21</sup>, J. Mauricio<sup>10,11</sup>, Y. Menesguen<sup>24</sup>, M. Mentink<sup>3</sup>, S. Mertens<sup>22,23</sup>, F. Mescia<sup>10,11</sup>, J. Miralda-Escudé<sup>10,25</sup>, H. Mirallas<sup>2</sup>, J.P. Mols<sup>4</sup>, V. Muratova<sup>12</sup>, X.F. Navick<sup>4</sup>, C. Nones<sup>4</sup>, A. Notari<sup>10,11</sup>, A. Nozik<sup>7,8</sup>, L. Obis<sup>2</sup>, C. Oriol<sup>6</sup>, F. Orsini<sup>19</sup>, A. Ortiz de Solórzano<sup>2</sup>, S. Oster<sup>21</sup>, H.P. Pais Da Silva<sup>3</sup>, V. Pantuev<sup>8</sup>, T. Papaevangelou<sup>4</sup>, G. Pareschi<sup>5</sup>, K. Perez<sup>26</sup>, O. Pérez<sup>2</sup>, E. Picatoste<sup>10,11</sup>, M.J. Pivovarov<sup>27,28</sup>, D.V. Poda<sup>6</sup>, J. Redondo<sup>2</sup>, A. Ringwald<sup>21</sup>, M. Rodrigues<sup>24</sup>, F. Rueda-Teruel<sup>18</sup>, S. Rueda-Teruel<sup>18</sup>, E. Ruiz-Choliz<sup>29</sup>, J. Ruz<sup>27</sup>, E.O. Saemann<sup>21</sup>, J. Salvado<sup>10,11</sup>, T. Schiffer<sup>13</sup>, S. Schmidt<sup>13</sup>, U. Schneekloth<sup>21</sup>, M. Schott<sup>29</sup>, L. Seguí<sup>4</sup>, F. Tavecchio<sup>5</sup>, H.H.J. ten Kate<sup>3</sup>, I. Tkachev<sup>8</sup>, S. Troitsky<sup>8</sup>, D. Unger<sup>1</sup>, E. Unzhakov<sup>12</sup>, N. Ushakov<sup>8</sup>, J.K. Vogel<sup>27</sup>, D. Voronin<sup>8</sup>, A. Weltman<sup>30</sup>, U. Werthenbach<sup>14</sup>, W. Wuensch<sup>3</sup>, A. Yanes-Díaz<sup>18</sup>



ПИЯФ - Отбор материалов ICP MS+HPGe, монитор VGO, M-K симуляции, gAe



# Прототип - BabyIAXO



PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: October 26, 2020

REVISED: March 5, 2021

ACCEPTED: April 16, 2021

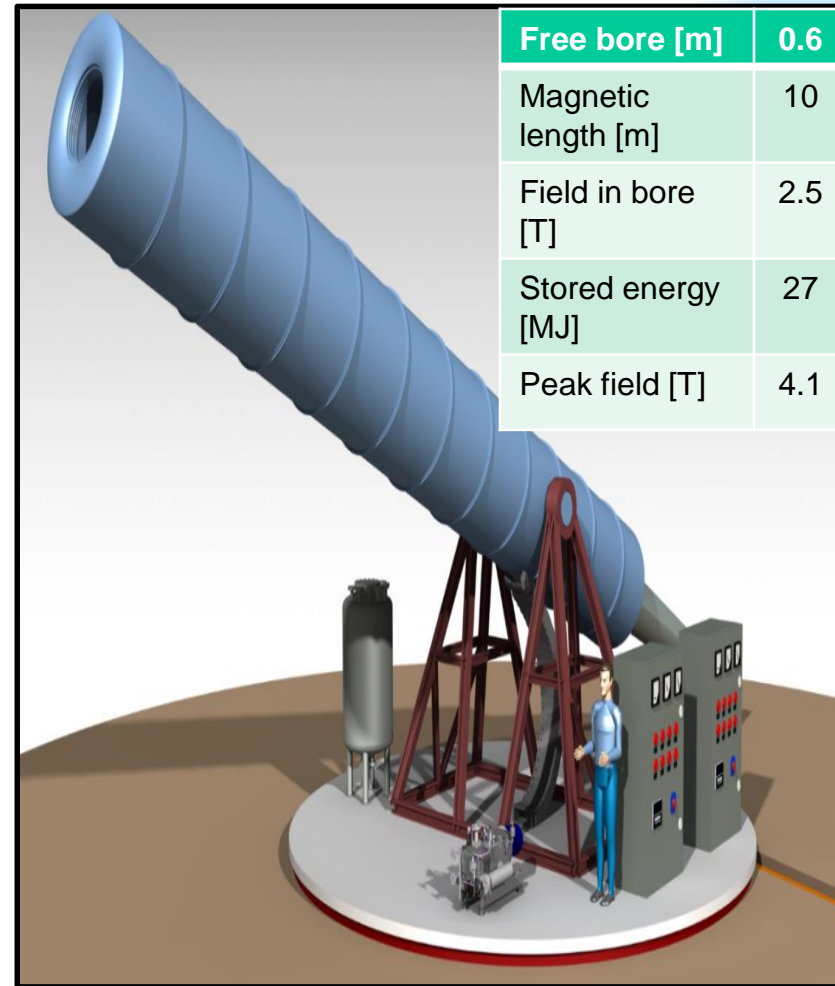
PUBLISHED: May 17, 2021

Conceptual design of **BabyIAXO**, the intermediate stage towards the International Axion Observatory



The IAXO collaboration

A. Abeln<sup>1</sup>, K. Altenmüller<sup>2</sup>, S. Arguedas Cuendis<sup>3</sup>, E. Armengaud<sup>4</sup>, D. Attié<sup>4</sup>, S. Aune<sup>4</sup>, S. Basso<sup>5</sup>, L. Bergé<sup>6</sup>, B. Biasuzzi<sup>4</sup>, P.T.C. Borges De Sousa<sup>3</sup>, P. Brun<sup>4</sup>, N. Bykovskiy<sup>3</sup>, D. Calvet<sup>4</sup>, J.M. Carmona<sup>2</sup>, J.F. Castel<sup>2</sup>, S. Cebrián<sup>2</sup>, V. Chernov<sup>7,8</sup>, F.E. Christensen<sup>9</sup>, M.M. Civitani<sup>5</sup>, C. Cogollos<sup>10,11</sup>, T. Dafni<sup>2</sup>, A. Derbin<sup>12</sup>, K. Desch<sup>13</sup>, D. Díez<sup>2</sup>, M. Dinter<sup>21</sup>, B. Döbrich<sup>3</sup>, I. Drachnev<sup>12</sup>, A. Dudarev<sup>3</sup>, L. Dumoulin<sup>5</sup>, D.D.M. Ferreira<sup>9</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>4</sup>, I. Fleck<sup>14</sup>, J. Galán<sup>2</sup>, D. Gascón<sup>10,11</sup>, L. Gastaldo<sup>1</sup>, M. Giannotti<sup>15</sup>, Y. Giomataris<sup>4</sup>, A. Giuliani<sup>6</sup>, S. Gninenko<sup>8</sup>, J. Golm<sup>3,16</sup>, N. Golubev<sup>8</sup>, L. Hagge<sup>21</sup>, J. Hahn<sup>14</sup>, C.J. Hailey<sup>17</sup>, D. Hengstler<sup>1</sup>, P.L. Henriksen<sup>9</sup>, T. Houdy<sup>22,23</sup>, R. Iglesias-Marzoa<sup>18</sup>, F.J. Iguaz<sup>15</sup>, I.G. Irastorza<sup>2,4</sup>, C. Iñiguez<sup>18</sup>, K. Jakovčić<sup>20</sup>, J. Kaminski<sup>13</sup>, B. Kanoute<sup>19</sup>, S. Karstensen<sup>21</sup>, L. Kravchuk<sup>8</sup>, B. Lakić<sup>20</sup>, T. Lasserre<sup>4</sup>, P. Laurent<sup>4</sup>, O. Limousin<sup>4</sup>, A. Lindner<sup>21</sup>, M. Loidl<sup>24</sup>, I. Lomskaaya<sup>12</sup>, G. López-Alegre<sup>18</sup>, B. Lubsandorzhiev<sup>8</sup>, K. Ludwig<sup>21</sup>, G. Luzón<sup>2</sup>, C. Malbrunot<sup>3</sup>, C. Margalejo<sup>2</sup>, A. Marin-Franch<sup>18</sup>, S. Marnieros<sup>6</sup>, F. Marutzky<sup>21</sup>, J. Mauricio<sup>10,11</sup>, Y. Menesguen<sup>24</sup>, M. Mentink<sup>3</sup>, S. Mertens<sup>22,23</sup>, F. Mescia<sup>10,11</sup>, J. Miralda-Escudé<sup>10,25</sup>, H. Mirallas<sup>2</sup>, J.P. Mols<sup>4</sup>, V. Muratova<sup>12</sup>, X.F. Navick<sup>4</sup>, C. Nones<sup>4</sup>, A. Notari<sup>10,11</sup>, A. Nozik<sup>7,8</sup>, L. Obis<sup>2</sup>, C. Oriol<sup>6</sup>, F. Orsini<sup>19</sup>, A. Ortiz de Solórzano<sup>2</sup>, S. Oster<sup>21</sup>, H.P. Pais Da Silva<sup>3</sup>, V. Pantuev<sup>8</sup>, T. Papaevangelou<sup>4</sup>, G. Pareschi<sup>5</sup>, K. Perez<sup>26</sup>, O. Pérez<sup>2</sup>, E. Picatoste<sup>10,11</sup>, M.J. Pivovarov<sup>27,28</sup>, D.V. Poda<sup>6</sup>, J. Redondo<sup>2</sup>, A. Ringwald<sup>21</sup>, M. Rodrigues<sup>24</sup>, F. Rueda-Teruel<sup>18</sup>, S. Rueda-Teruel<sup>18</sup>, E. Ruiz-Choliz<sup>29</sup>, J. Ruz<sup>27</sup>, E.O. Saemann<sup>21</sup>, J. Salvado<sup>10,11</sup>, T. Schiffer<sup>13</sup>, S. Schmidt<sup>13</sup>, U. Schneekloth<sup>21</sup>, M. Schott<sup>29</sup>, L. Seguí<sup>4</sup>, F. Tavecchio<sup>5</sup>, H.H.J. ten Kate<sup>3</sup>, I. Tkachev<sup>8</sup>, S. Troitsky<sup>8</sup>, D. Unger<sup>1</sup>, E. Unzhakov<sup>12</sup>, N. Ushakov<sup>8</sup>, J.K. Vogel<sup>27</sup>, D. Voronin<sup>8</sup>, A. Weltman<sup>30</sup>, U. Werthenbach<sup>14</sup>, W. Wuensch<sup>3</sup>, A. Yanes-Díaz<sup>18</sup>



Один магнит с размерами, как в полномасштабном варианте. Новая конфигурация магнита. Проверка всех систем. Идет изготовление. DESY, Гамбург. Доступна новая физика. ПИЯФ –  $g\text{Ae} + \text{Si}(\text{Li})$  детекторы (основной или детекторы активной защиты).

# TASTE - Troitsk Axion Solar Telescope Experiment



PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAE

RECEIVED: July 20, 2017

REVISED: September 29, 2017

ACCEPTED: November 8, 2017

PUBLISHED: November 21, 2017

## Towards a medium-scale axion helioscope and haloscope

V. Anastassopoulos,<sup>a</sup> F. Avignone,<sup>b</sup> A. Bykov,<sup>c</sup> G. Cantatore,<sup>d</sup> S.A. Cetin,<sup>e</sup> **A. Derbin,<sup>f</sup>**  
**I. Drachnev,<sup>f</sup>** R. Djilkibaev,<sup>g</sup> V. Eremin,<sup>c</sup> H. Fischer,<sup>h</sup> A. Gangapshev,<sup>i</sup> A. Gardiklitis,<sup>a</sup>  
 S. Gninenko,<sup>g</sup> N. Golubev,<sup>g</sup> D.H.H. Hoffmann,<sup>j</sup> M. Karuza,<sup>k</sup> L. Kravchuk,<sup>g</sup> M. Libanov,<sup>g</sup>  
 A. Lutovinov,<sup>l</sup> M. Maroudas,<sup>a</sup> V. Matveev,<sup>g,m</sup> S. Molkov,<sup>l</sup> **V. Muratova,<sup>f</sup>** V. Pantuev,<sup>g</sup>  
 M. Pavlinsky,<sup>l</sup> K. Ptitsyna,<sup>g</sup> G. Rubtsov,<sup>g</sup> D. Semenov,<sup>f</sup> P. Sikivile,<sup>n</sup> A. Spiridonov,<sup>o</sup>  
 P. Tinyakov,<sup>p</sup> I. Tkachev,<sup>g</sup> S. Troitsky,<sup>g</sup> **E. Unzhakov,<sup>f</sup>** and K. Zioutas<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Patras University, Patras, Greece

<sup>b</sup>University of South Carolina, Columbia, U.S.A.

<sup>c</sup>Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>d</sup>University of Trieste, Trieste, Italy

<sup>e</sup>High Energy Physics Research Center, Bilgi University, Istanbul, Turkey

<sup>f</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>g</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

<sup>h</sup>Albert-Ludwigs-Universitaet, Freiburg, Germany

<sup>i</sup>Baksan Neutrino Observatory, INR RAS, Neutrino, Russia

<sup>j</sup>Institut für Kernphysik/Technische Universität, Darmstadt, Germany

<sup>k</sup>University Rijeka, Rijeka, Croatia

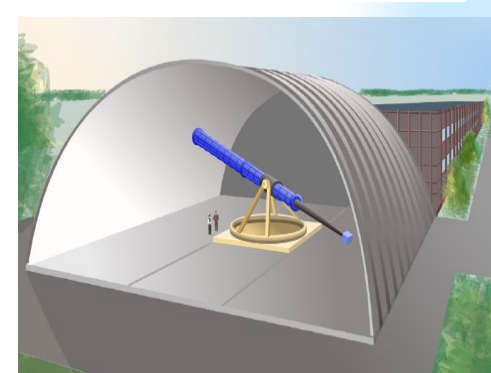
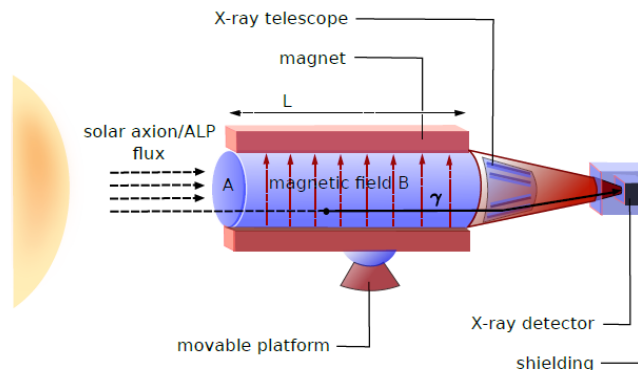
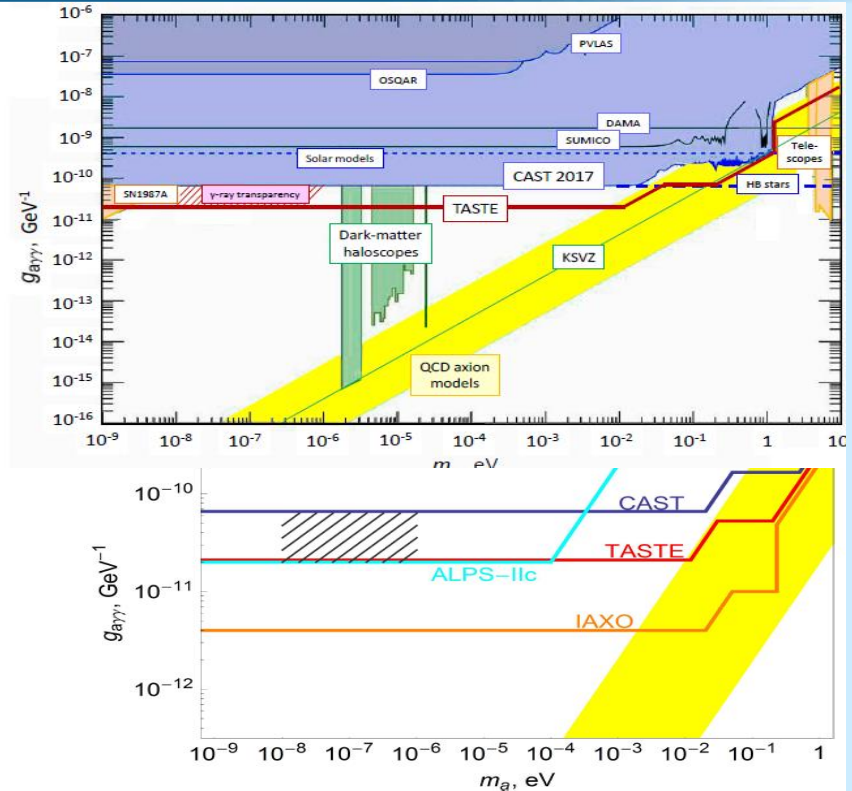
<sup>l</sup>Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>m</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>n</sup>University of Florida, Gainesville, U.S.A.

<sup>o</sup>Physics Department, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>p</sup>Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium



# Классификация экспериментов

## Регистрация аксионов

Излучение аксионов

	$g_{A\gamma}$	$g_{AN}$	$g_{Ae}$
$g_{A\gamma}$	Конверсия аксиона в фотон в магнитном поле <b>CAST, IAXO</b>	Резонансное поглощение ядрами $^{169}\text{Tm}, ^{83}\text{Kr}$ <b>PNPI, BAKSAN, LNGS</b>	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si, Ge, Bi, Xe, Te, Ar <b>PNPI(SAXS), CUORE, EDELWEISS, XMASS, XENON</b>
$g_{AN}$	Конверсия Примакова <b>7Li-axions, 3He-axions BOREXINO</b>	Резонансное поглощение ядрами $^{57}\text{Fe}, ^6\text{Li}, ^{83}\text{Kr}$ <b>Krcmar et al, PNPI, BAKSAN</b>	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si, Ge, Bi, Xe, Te, Ar <b>BOREXINO, CUORE, LUCIFER</b>
$g_{Ae}$	Конверсия аксиона в фотон в магнитном поле <b>IAXO, CAST, Tokyo Helioscope</b>	Резонансное поглощение ядрами $^{169}\text{Tm}, ^{83}\text{Kr}$ <b>PNPI, BAKSAN, LNGS</b>	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si, Ge, Bi, Xe, Te, Ar <b>PNPI(SAXS), CUORE, EDELWEISS, XMASS, XENON</b>

# Аксиоэлектрический эффект в атомах и резонансное поглощение ядрами

## Две реакции с большим сечением для $\gamma$ -квантов:

Аксиоэлектрический эффект, поглощение аксионов атомами, является аналогом фотоэффекта. Сечение реакции пропорционально  $g_{Ae}^2$  и  $\sigma_{pe}$ :

$$\sigma_{Ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_A) \frac{g_{Ae}^2}{\beta} \frac{3E_A^2}{16\pi\alpha m_e^2} \left(1 - \frac{\beta^2/3}{3}\right)$$

Сечение фотоэффекта  $4 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$  для C и  $4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  для Pb при  $E=10 \text{ кэВ}$

Сечение резонансного поглощения аксионов определяется выражением, аналогичным выражению для  $\gamma$ -лучей и поправленным на отношение  $\omega_A/\omega_\gamma$

$$\sigma(E_A) = 2\sqrt{\pi} \sigma_{0\gamma} \exp\left[-\frac{4(E_A - E_M)^2}{\Gamma^2}\right] \left(\frac{\omega_A}{\omega_\gamma}\right)$$

где  $\sigma_{0\gamma}$  максимальное сечение резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов и  $\Gamma = 1/\tau$ . Экспериментально определенное значение  $\sigma_{0\gamma}$  для  $^{57}\text{Fe}$  равно  $2.56 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ .

Высокая чувствительность к константам  $g_{Ae}$  и  $g_{AN}$ ,  $g_{Ay}$  может быть достигнута с относительно небольшим детектором.

## Сечение аксиоэлектрического эффекта: 2 случая

$$\sigma_{Ae} = 2(Z\alpha m)^5 \frac{g_{Ae}^2}{m^2} \frac{p_e}{p_A} \left\{ \frac{4E_A(E_A^2 + m_A^2)}{(p_A^2 - p_e^2)^4} - \frac{2E_A}{(p_A^2 - p_e^2)^3} - \frac{64}{3} p_e^2 p_A^2 m \frac{m_A^2}{(p_A^2 - p_e^2)^6} - \frac{16m_A^2 p_A^2 E_e}{(p_A^2 - p_e^2)^5} - \frac{E_A}{p_e p_A} \frac{1}{(p_A^2 - p_e^2)^2} \ln \frac{p_e + p_A}{p_e - p_A} \right\}.$$

**Высокоэнергетические аксионы.** Сечение а.э. эффекта для электронов на K-оболочке было вычислено в предположении что  $Z \ll 137$  и  $E_A \gg E_b$  в *A.P. Житницкий, Ю.И. Сковпень, ЯФ, 29, 995 (1979)* и имеет сложный вид  $\sim Z^5$

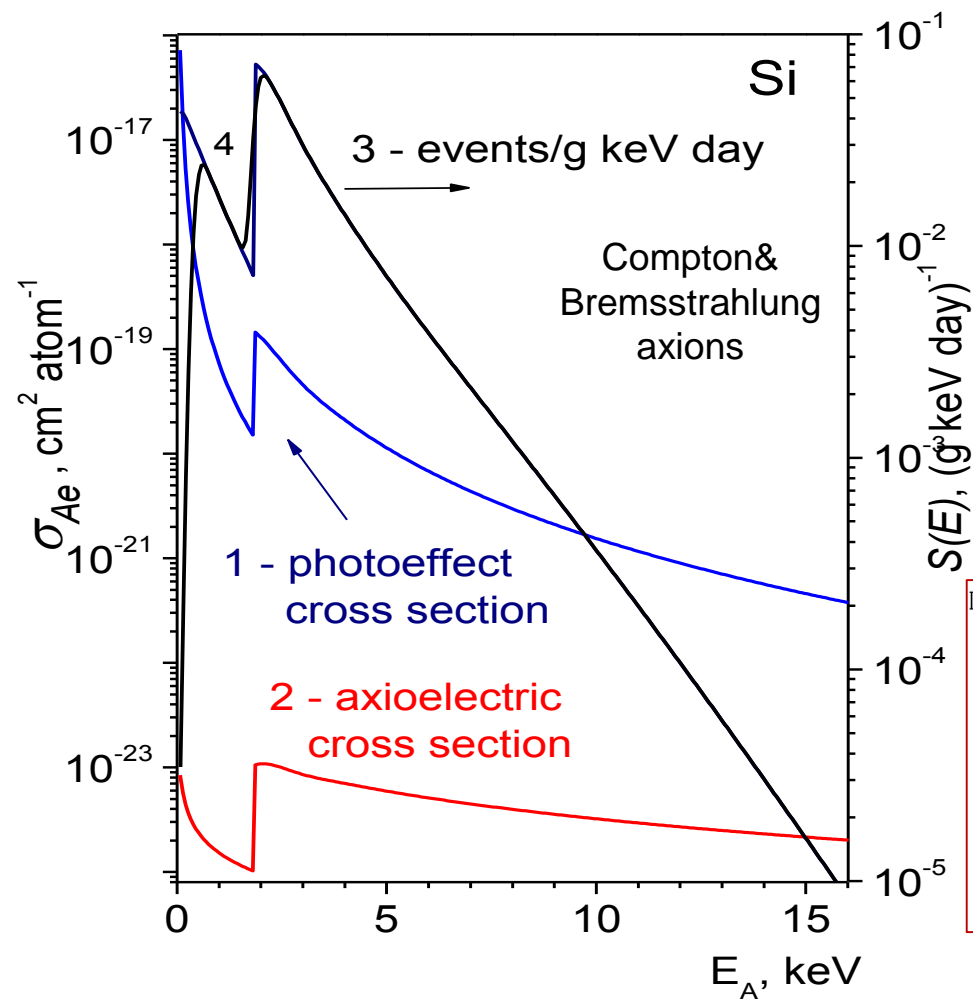
$$\sigma_{ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_A) \times g_{Ae}^2 \left( \frac{E_A^2}{8\pi\alpha m_e^2} \right)$$

$$\sigma_{ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_\gamma = m_A) \times g_{Ae}^2 \frac{1}{\beta} \left( \frac{3m_A^2}{16\pi\alpha m_e^2} \right)$$

$$\sigma_{Ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_A) \frac{g_{Ae}^2}{\beta} \frac{3E_A^2}{16\pi\alpha m_e^2} \left( 1 - \frac{\beta^{2/3}}{3} \right)$$

**Низкоэнергетические аксионы.**  $E_A, m_A < 511$  keV Сечение а.э. эффекта для нерелятивистских аксионов пропорционально сечению фотоэффекта для фотонов с энергией равной массе аксиона [*M. Pospelov, A. Ritz, and M.V. Voloshin, Phys. Rev. D78, 115012 (2008). A. Derevianko, V.A. Dzuba, V.V. Flambaum, and M. Pospelov, Phys. Rev. D 82,065006 (2010)*]. Для релятивистских аксионов при  $E_A < m_e$  и  $m_A \rightarrow 0$ , сечение отличается множителем  $2/3$  и заменой  $m_A$  на  $E_A$ . В промежуточном случае можно использовать простое приближение.

# Сечение а.э. эффекта для Si-атома



Аксиоэлектрический эффект аналог ф.э.  
Сечение для (не)релятивистских аксионов :

$$\sigma_{Ae} \Big|_{\beta \rightarrow 0} \simeq \sigma_{pe}(m_A) \frac{3m_A^2}{4\pi\alpha f_A^2 \beta}$$

$$\sigma_{Ae} \Big|_{\beta \rightarrow 1} \simeq \sigma_{pe}(E) \frac{E^2}{2\pi\alpha f_A^2},$$

Аппроксимация для всех значений  $\beta$

$$\sigma_{Ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_A) \frac{g_{Ae}^2}{\beta} \frac{3E_A^2}{16\pi\alpha m_e^2} \left(1 - \frac{\beta^{2/3}}{3}\right)$$

Письма в ЖЭТФ, том 95, вып. 7, с. 379 – 384

© 2012 г. 10 апреля

Ограничения на константу связи аксиона с электроном для  
солнечных аксионов, возникающих в результате тормозного  
излучения и комптоновского процесса

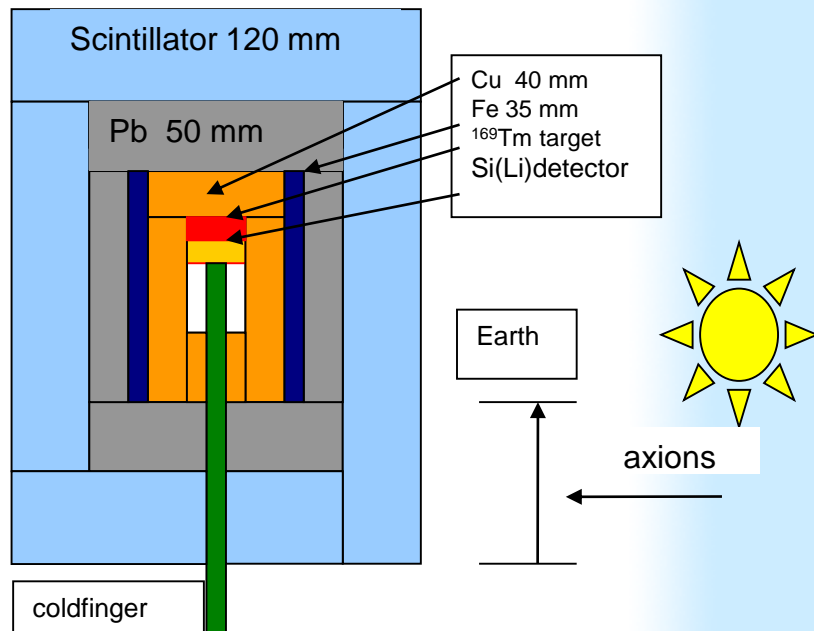
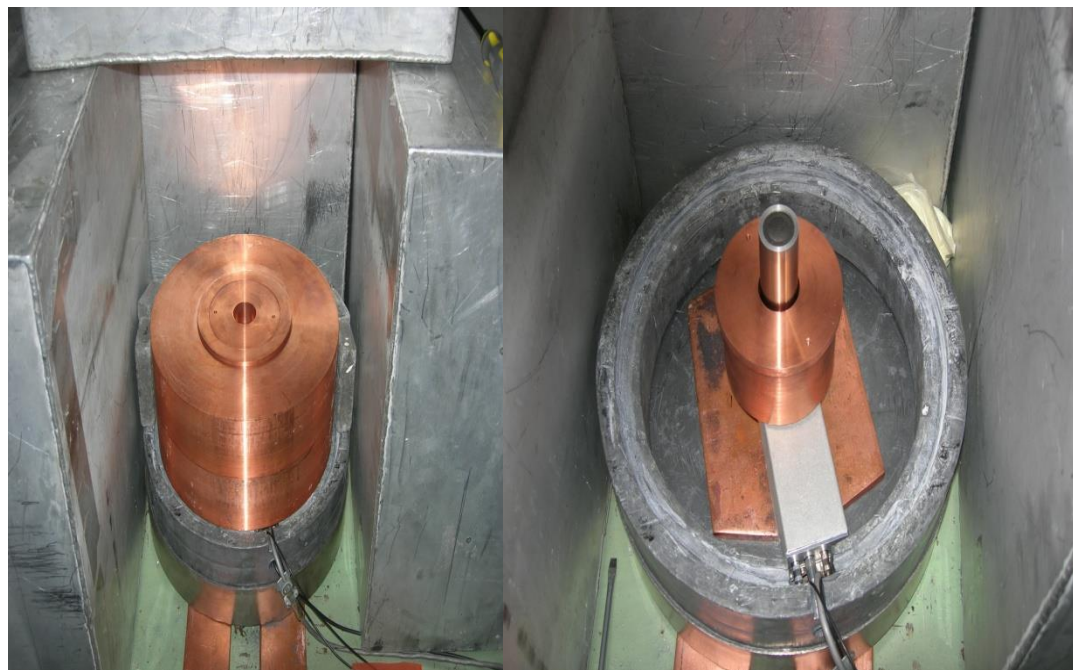
А. В. Дербин<sup>1)</sup>, И. С. Драчнев, А. С. Каюнов, В. Н. Муратова

Петербургский институт ядерной физики им. Константинова, 188300 Гатчина, Россия

JETP Lett., 95, 379 (2012) arXiv:1206.4142

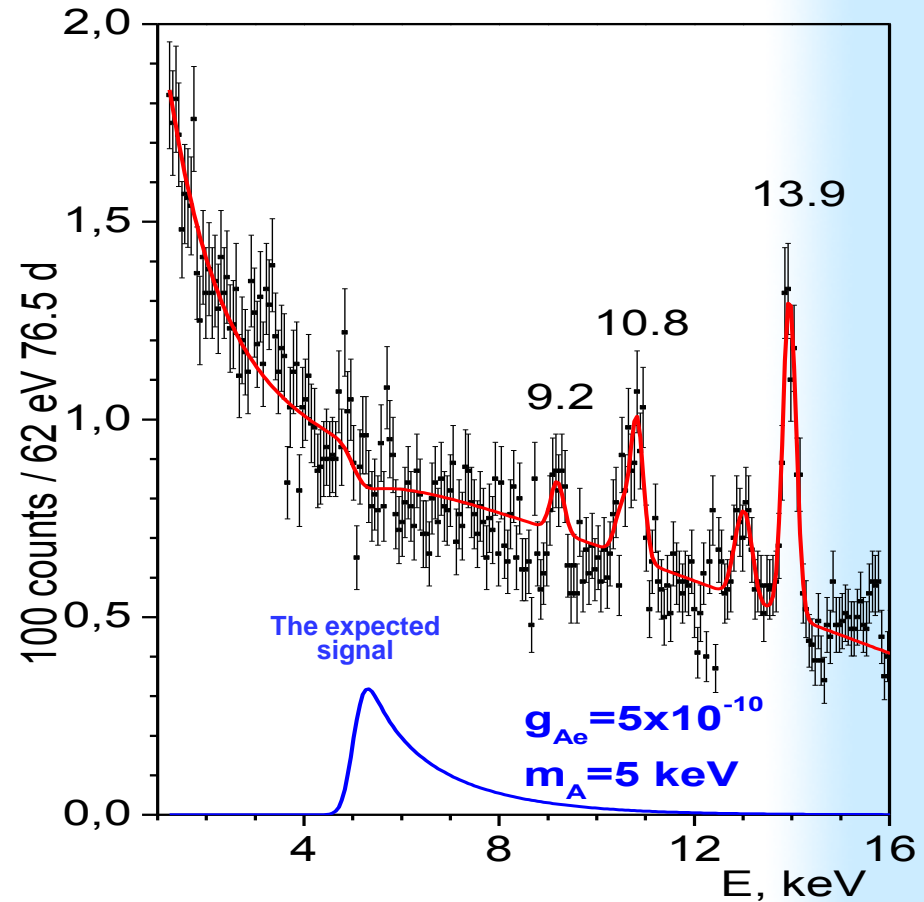
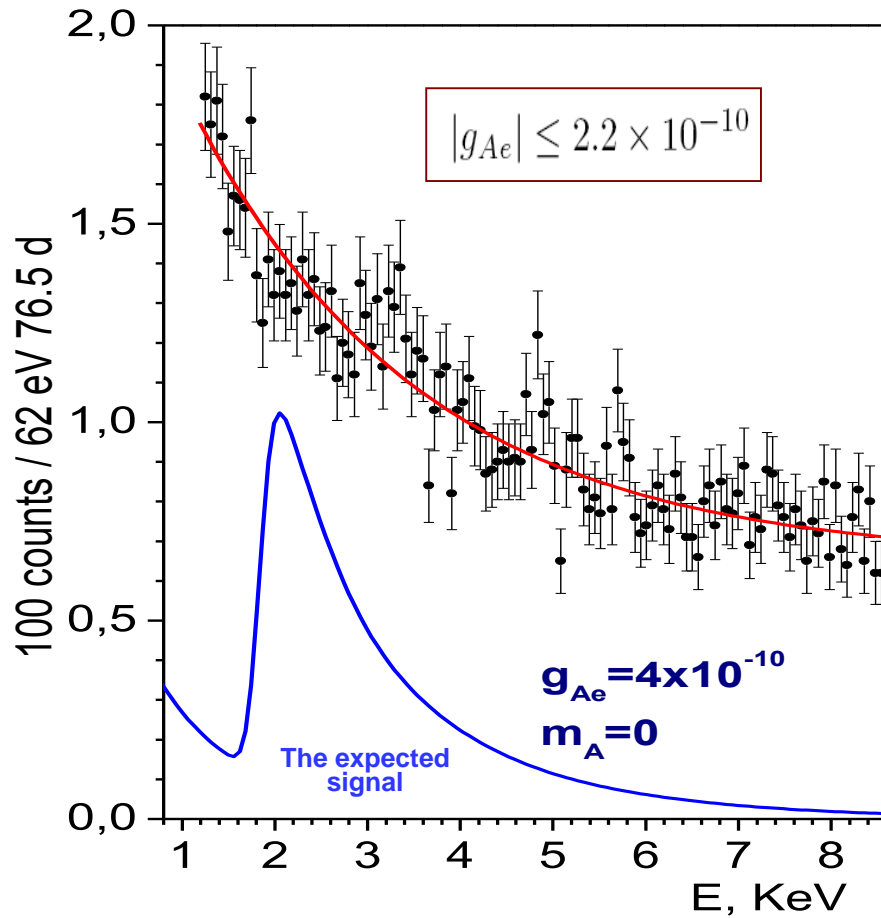
Сечения для (1) фотоэффекта для атома Si и (2) аксиоэлектрического эффекта для  $g_{Ae} = 1$  и  $m_A = 0$ , (3) ожидаемый спектр событий, регистрируемых за день в 1 г Si в 1 кэВ для аксионов CC и Br и  $g_{Ae} = 10^{-10}$ , (4) учтено разрешение Si-детектора (правая шкала).

# Si(Li)-детектор внутри низкофоновой установки



В эксперименте использовался Si(Li)-детектор с диаметром чувствительной области 17 мм и толщиной 2,5 мм (1,4 г). Детектор был помещен в вакуумный криостат, окружен 12,5 см меди и 2,5 см свинца, что снизило фон детектора при энергии 14 кэВ в 110 раз. Для подавления фона от космических лучей и быстрых нейтронов мы использовали пять сцинтилляционных детекторов (12x50x50 см), которые закрывали детектор практически полностью, за исключением нижней стороны, где был помещен сосуд Дьюара с жидким азотом. Измерения продолжались в течение 76,5 суток живого времени в виде двухчасовых серий с целью контроля стабильности работы Si(Li)-детектора и активной защиты из сцинт. детекторов.

# Результаты поиска а.э. эффекта в Si-атомах

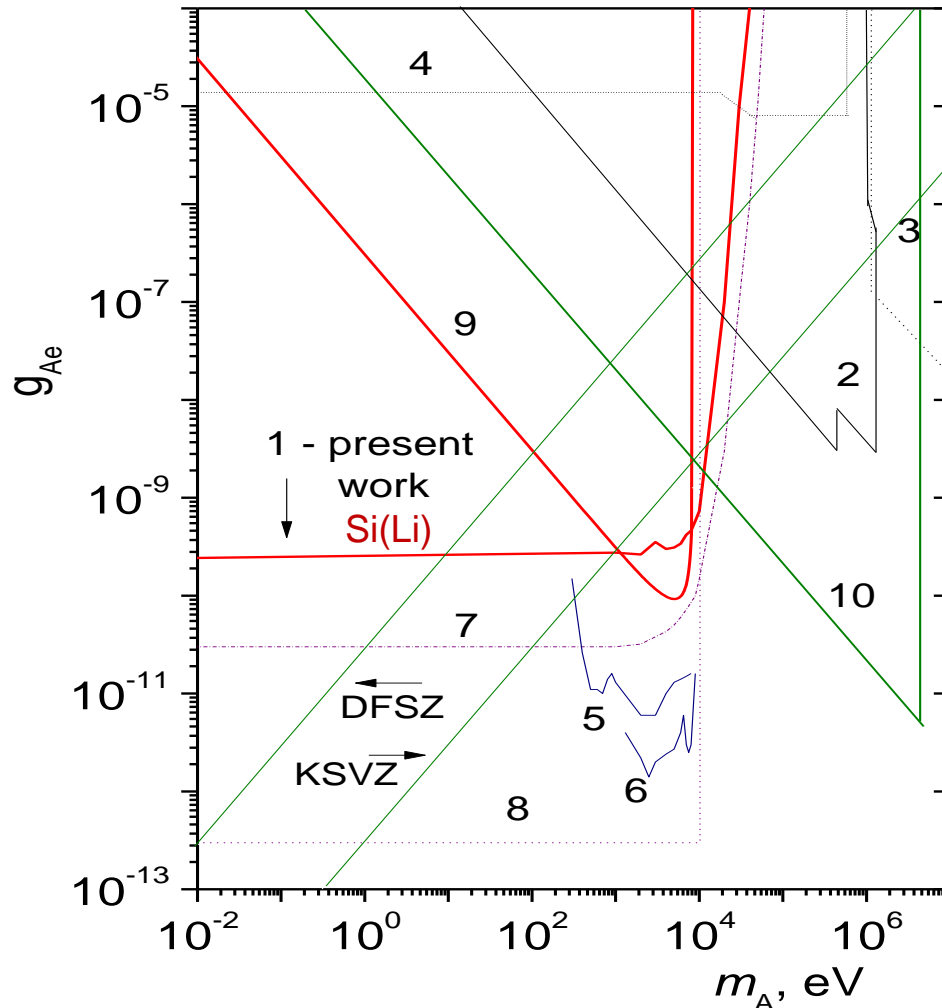


Спектр, измеренный Si(Li)-детектором. Оптимальный фит и ожидаемый спектр для случая  $m_A \approx 0$  и  $g_{Ae} = 4 \times 10^{-10}$ . Верхний предел на  $g_{Ae}$ :  $g_{Ae} < 2.2 \times 10^{-10}$  (90% c.l.)

Спектр в интервале (1-16) кэВ. Оптимальный фит для  $m_A = 5 \text{ keV}$ . Ожидаемый аксионный спектр показан для  $m_A = 5 \text{ keV}$  и  $g_{Ae} = 5 \times 10^{-10}$ .



# Ограничение на константу $g_{Ae}$



$$N_{\text{events}} \sim \text{Flux}(g_{Ae}^2) \times \sigma_{Ae}(g_{Ae}^2) \sim g_{Ae}^4$$

- 1- аксиоэлектрический эффект(Si)
- 2- реакторные эксперименты и 478 кэВ солнечные аксионы
- 3- *beat dmp* эксперименты
- 4- распад ортопозитрония
- 5- *CoGeNT*
- 6- *CDMS*
- 7- аксионная светимость Солнца меньше 10% от  $\nu$ -светимости
- 8- время загорания He в RG
- 9-  $^{169}\text{Tm}$  резонансное поглощение
- 10- *Borexino* 5.5 МэВ аксионы

Число аксионных событий  $\sim g_{Ae}^4$ . Области исключенных значений лежат выше соответствующих линий. 7,8 – более строгие значения. Часть значений  $g_{Ae}$  в DFSZ- и KSVZ - исключена. Результат Si(li) был улучшен детекторами частиц темной материи.

# Детекторы темной материи и двойного бета-распада CUORE ( $\text{TeO}_2$ ), XMASS ( $\text{Xe}$ ), EDELWEISS ( $\text{Ge}$ ), XENON ( $\text{Xe}$ ), LUX ( $\text{Xe}$ ), PANDAX ( $\text{Xe}$ )



*Cuore  $2\beta\nu$  740 kg  $\text{TeO}_2$   
LNGS*



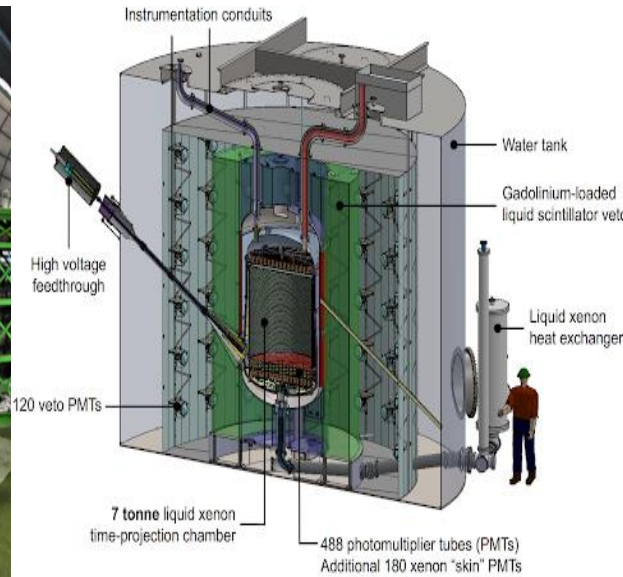
*XMASS DM 800 kg  $\text{Xe}$   
Kamioka*



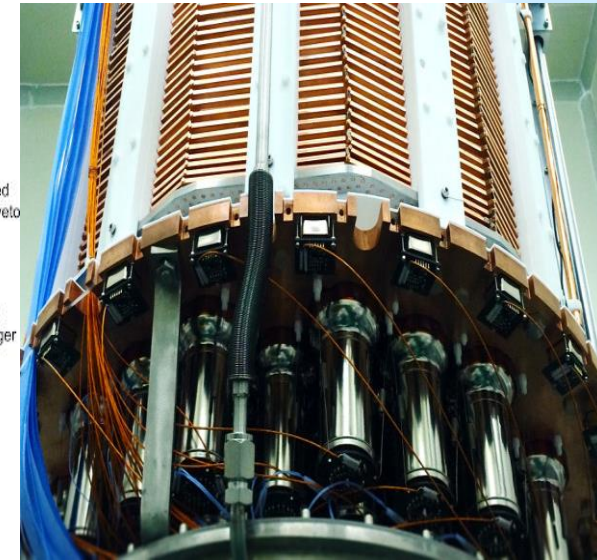
*Edelweiss DM  $\text{Ge}$   
bolometer Modane*



*Xenon DM 3.3 t  $\text{Xe}$  LNGS*



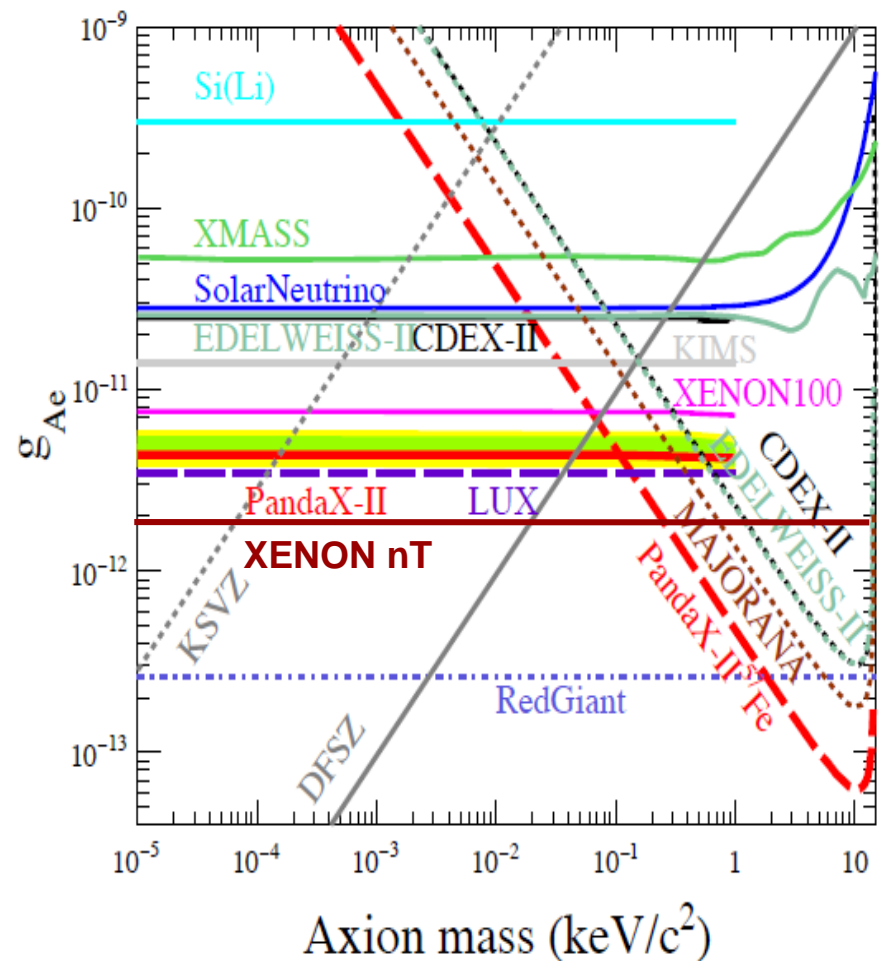
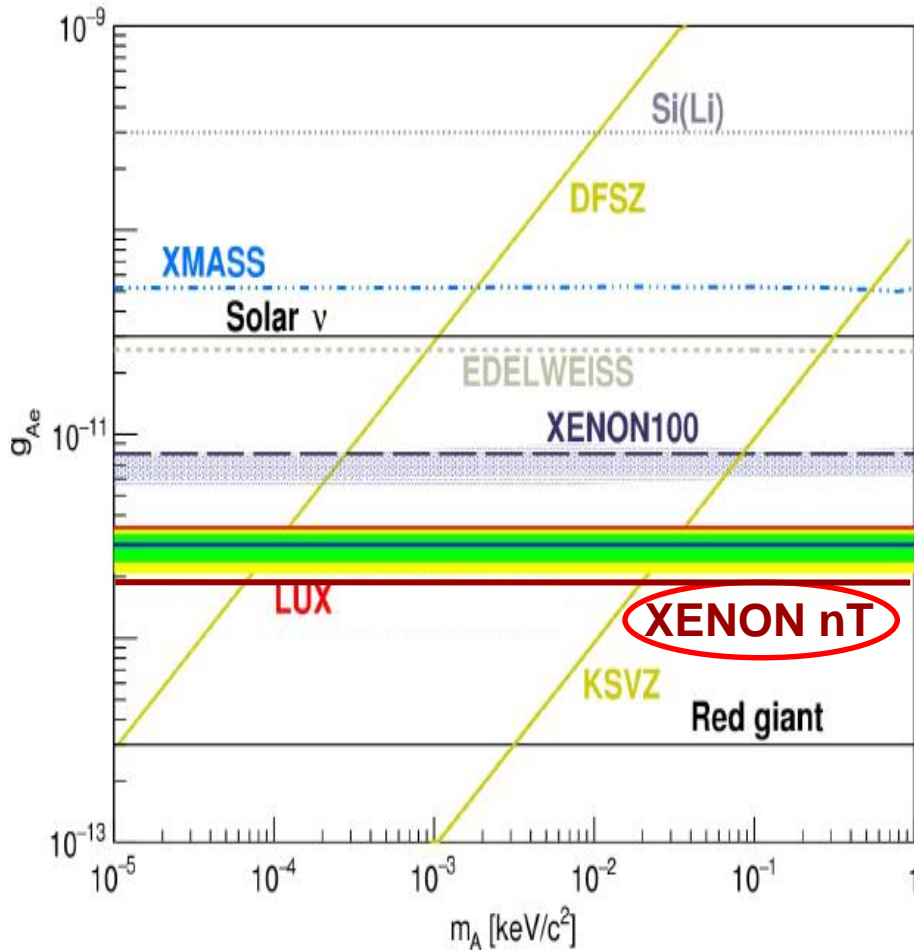
*LUX DM 370 kg LZ 7t L $\text{Xe}$  Sanford*



*PANDAX, 4 t L $\text{Xe}$  China*

# Хенон nT, $g_{Ae} < 1.9 \cdot 10^{-12}$ , PRL 129, 161805 (2022)

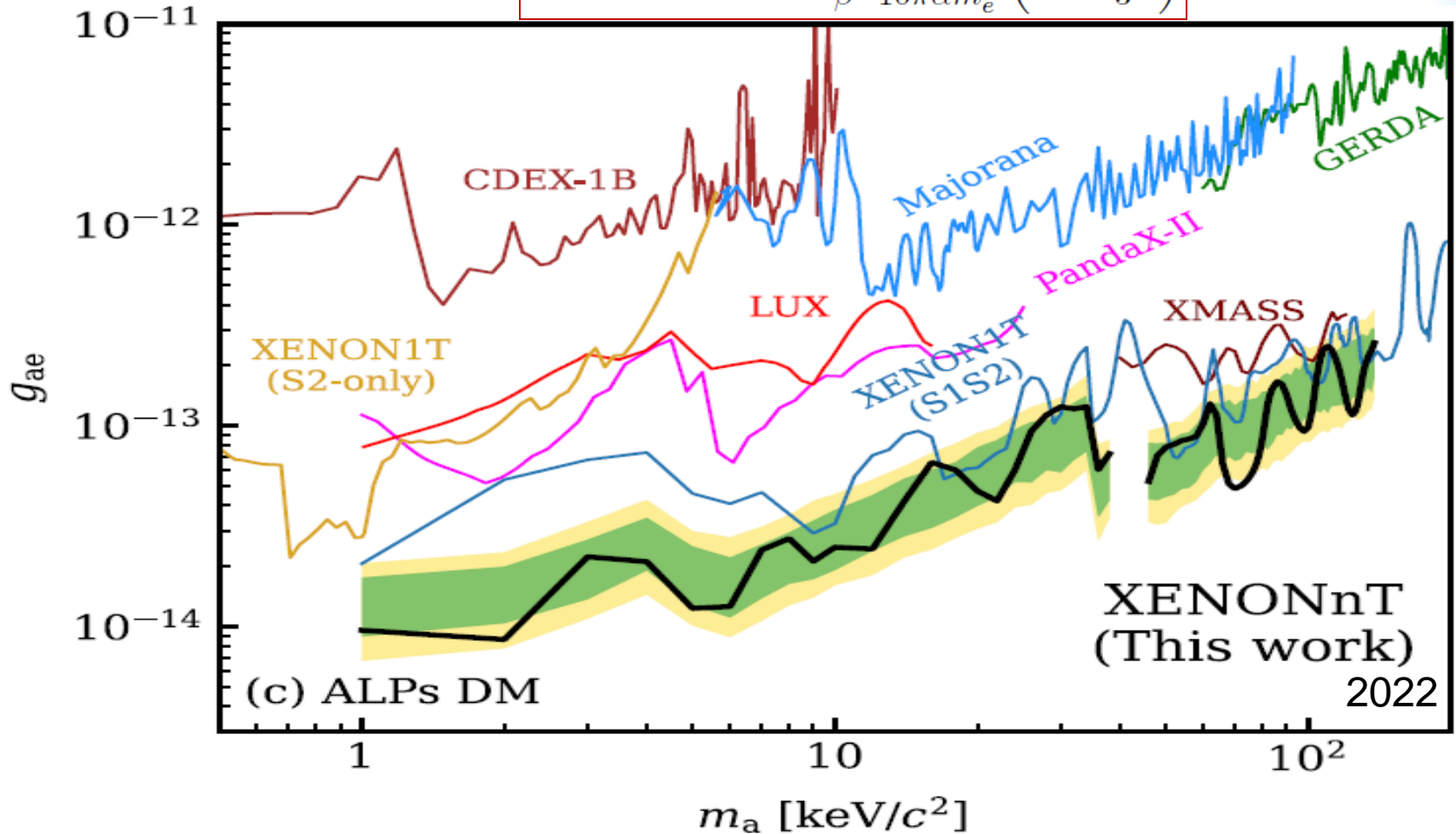
# Ограничения на $g_{Ae} \times g_{AN}$ для 14.4 кэВ $^{57}\text{Fe}$ аксионов



$\text{Si(Li)}$  предел на  $g_{Ae}^2$  был вскоре существенно улучшен. Наиболее строгий предел  $g_{Ae} < 1.9 \times 10^{-12}$  получен XENONnT. Предел на  $g_{Ae}$  из RG в 7 раз более строгий. Начало горения гелия в RG НВ зависит дает пределы на  $g_{Ae}$  и  $\text{MM-v}$ . Аксионы с энергией 14.4 кэВ испускаются в M1-переходе при разрядке первого ядерного уровня  $^{57}\text{Fe}$ , который возбуждается за счет высокой T Солнца.

# А.Э. эффект для реликтовых аксионов

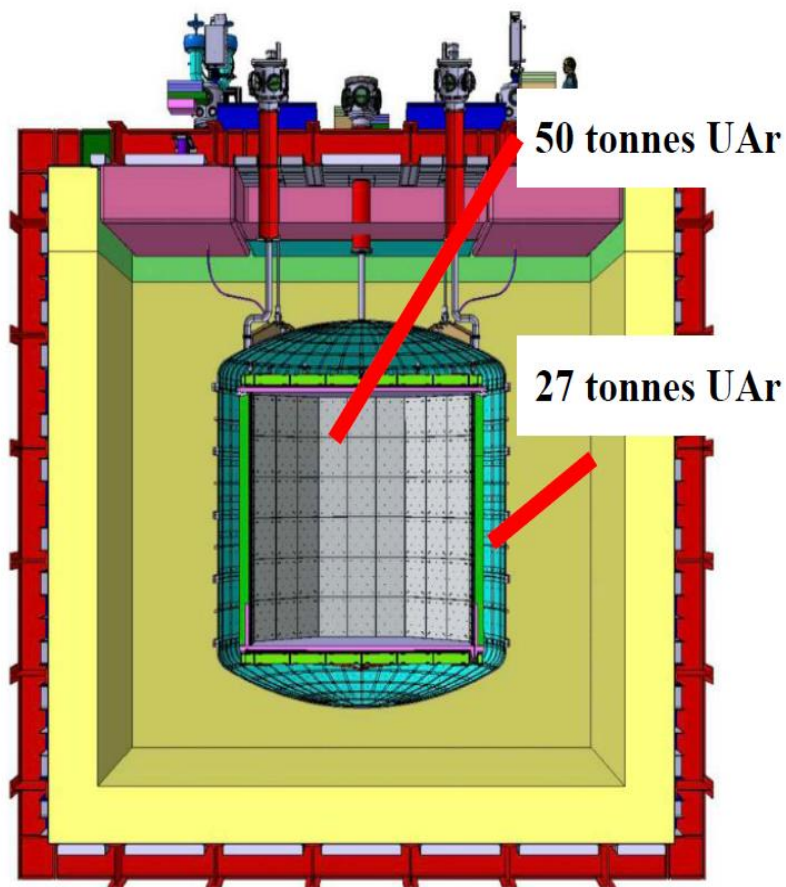
$$\sigma_{Ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_A) \frac{g_{Ae}^2}{\beta} \frac{3E_A^2}{16\pi\alpha m_e^2} \left(1 - \frac{\beta^{2/3}}{3}\right)$$



Для нерелятивистских аксионов сечение аксиоэлектрического эффекта пропорционально сечению фотоэффекта для фотонов с энергией равной массе аксиона.

# Детектор темной материи *DarkSide-10, 50, 20k, ARGO*

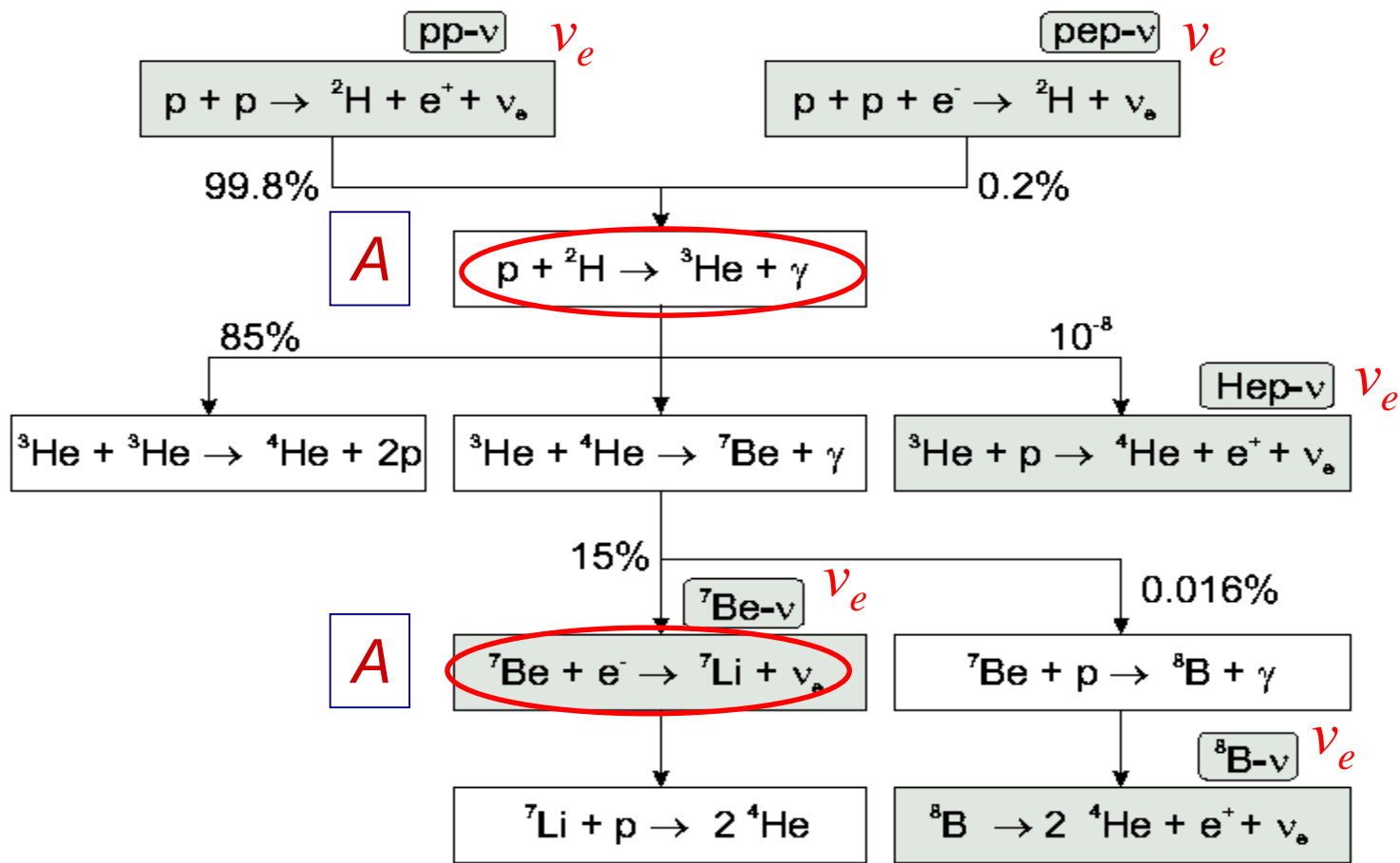
The next phase: DarkSide-20k detector



Заполнение LAr в 2026 г.

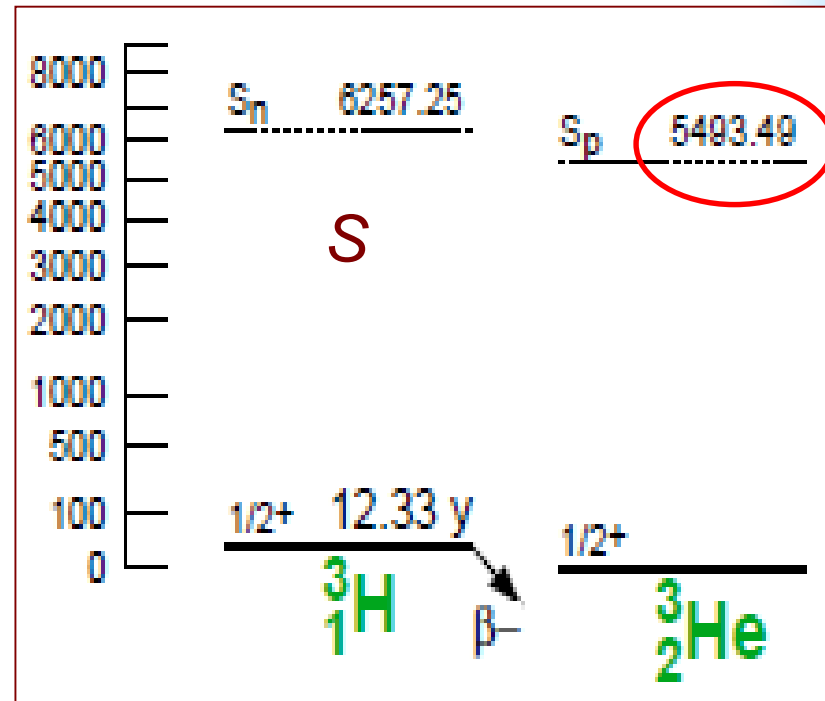
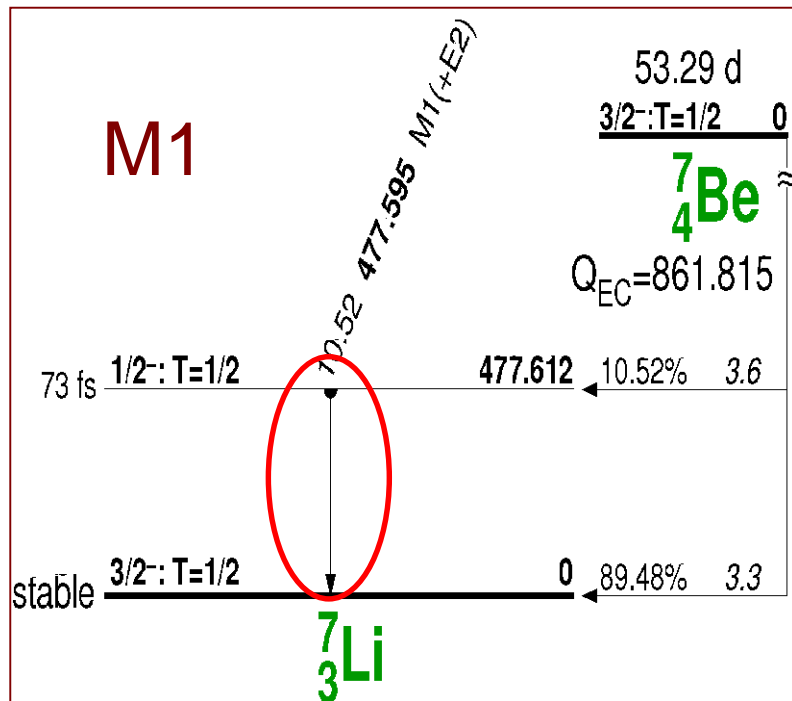
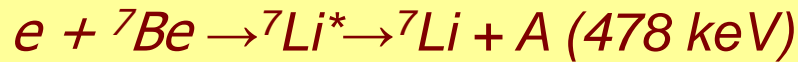


# А.Э. эффект для высокоэнергетических 478 кэВ и 5.5 МэВ солнечных аксионов



Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Общее выделение энергии составляет около **26,7 МэВ**, из которых около **0,6 МэВ** уносится нейтрино. Мы искали аксионы, испускаемые в 2 реакциях, которые напрямую связаны с реакциями, производящими 2 наиболее интенсивных потока - **pp- и  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино**.

# Аксионы с энергией 478 кэВ и 5.5 МэВ



Аксионы могут испускаться в реакциях электронного захвата и захвата протонов. Поскольку энергия переходов высока, диапазон масс исследуемых аксионов может быть расширен до 5 МэВ. Некоторые модели, основанные на концепции “зеркального мира” [Berezhiani et al., 2001], SUSY [Hall, Watari, 2004] и QCD [Girmohanta et al., 2405.13425, 2024] допускают существование аксионов с  $m_A \sim 1$  МэВ. Дополнительные возможные реакции, производящие высокоэнергетические солнечные аксионы, были рассмотрены [Raffelt, Stodolsky, 1982]. CNO цикл – 2.3 МэВ переход в  ${}^{13}\text{N}$ .

# Поток аксионов на Земле в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$

$$\begin{aligned}\Phi_{A0}(7\text{Be}) &\cong 0.1 \times \Phi_{\nu 7\text{Be}} (g_{AN}^0 + g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3 \\ &\cong 5 \times 10^8 (g_{AN}^0 + g_{AN}^3)^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{A0}(pd) &\cong 0.54 \times \Phi_{\nu pp} (g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3 \\ &\cong 3.3 \times 10^{10} (g_{AN}^3)^2\end{aligned}$$

Ожидаемый поток солнечных аксионов может быть выражен в терминах потоков 7Ве- и рр-нейтрино, которые составляют  $5,0 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $6,0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Потоки зависят от  $g_{AN}$ . Поток аксионов 5,5 МэВ в 60 раз больше, чем аксионов 478 кэВ. Дополнительным преимуществом поиска аксионов 5,5 МэВ является то, что фоновый уровень обычно ниже для более высоких энергий. Вorexipno были выбраны 4 реакции для обнаружения аксионов. Сигнатура всех этих реакций - пик 5,5 МэВ в энергетическом спектре.

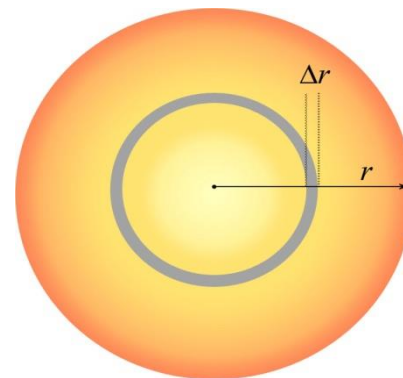


# Условия вылеты аксионов из Солнца

Эксперименты с солнечными аксионами имеют два основных недостатка: Солнце нельзя выключить, а аксионы должны вылететь из Солнца и достичь Земли.

частица	e	p	$^4\text{He}$	$^{12}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	$^{16}\text{O}$	Fe	Pb
$\sigma \cdot 10^{-35} \text{ cm}^2$	6.8	5	0.9	$6 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-10}$

константа	$g_{\text{Ae}}$	$g_{\text{Ay}} \text{ GeV}^{-1}$	$g_{\text{AN}}$
В. предел	$<10^{-6}$	$<10^{-4}$	$<10^{-3}$
процесс	CC	PC	PD



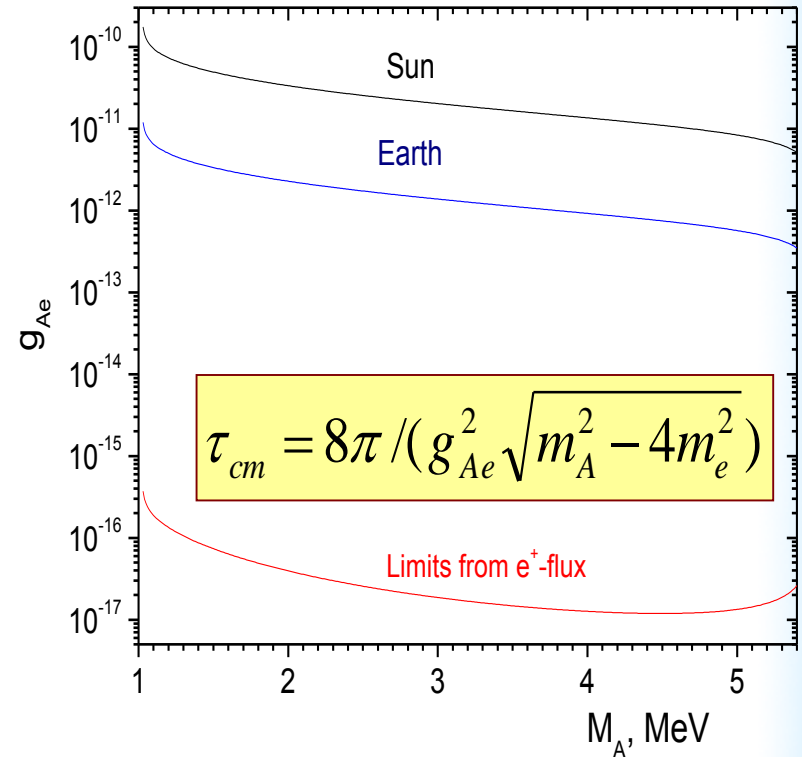
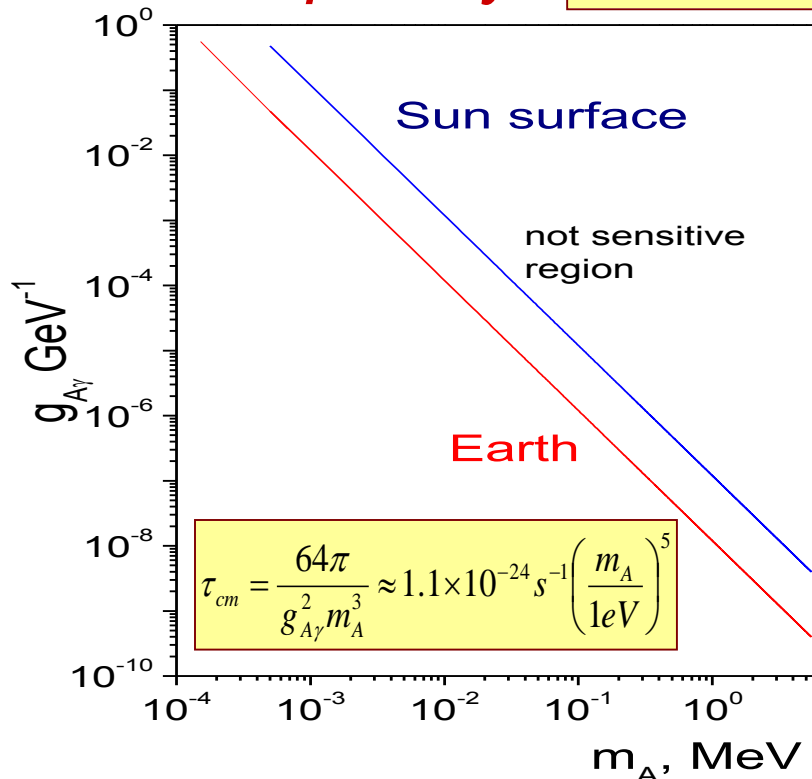
Аксионы, образующиеся внутри Солнца, должны пройти через слой  $6,8 \times 10^{35}$  электронов /  $\text{cm}^2$ ,  $5 \times 10^{35}$  протонов /  $\text{cm}^2$  и  $1 \times 10^{35}$   $\alpha$ -частиц /  $\text{cm}^2$ , чтобы достичь поверхности Солнца. Комptonовская конверсия аксиона в фотон определяет верхний предел чувствительности экспериментов на поверхности Земли к константе  $g_{\text{Ae}}$ . Для значений  $g_{\text{Ae}}$  ниже  $10^{-6}$  поток аксионов существенно не подавляется. Аналогичные ограничения существуют для констант связи аксиона с фотоном из-за конверсии Примакова и аксиона с нуклонами вследствие реакций фоторасщепления  $A + ^{17}\text{O} \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ ,  $A + ^{13}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C} + n$ ,  $A + ^3\text{He} \rightarrow d + p$ .

# Распад аксионов в полете

$$\Phi_A = \exp\left(-\frac{\tau_f}{\tau_{cm}}\right)\Phi_{A0}$$

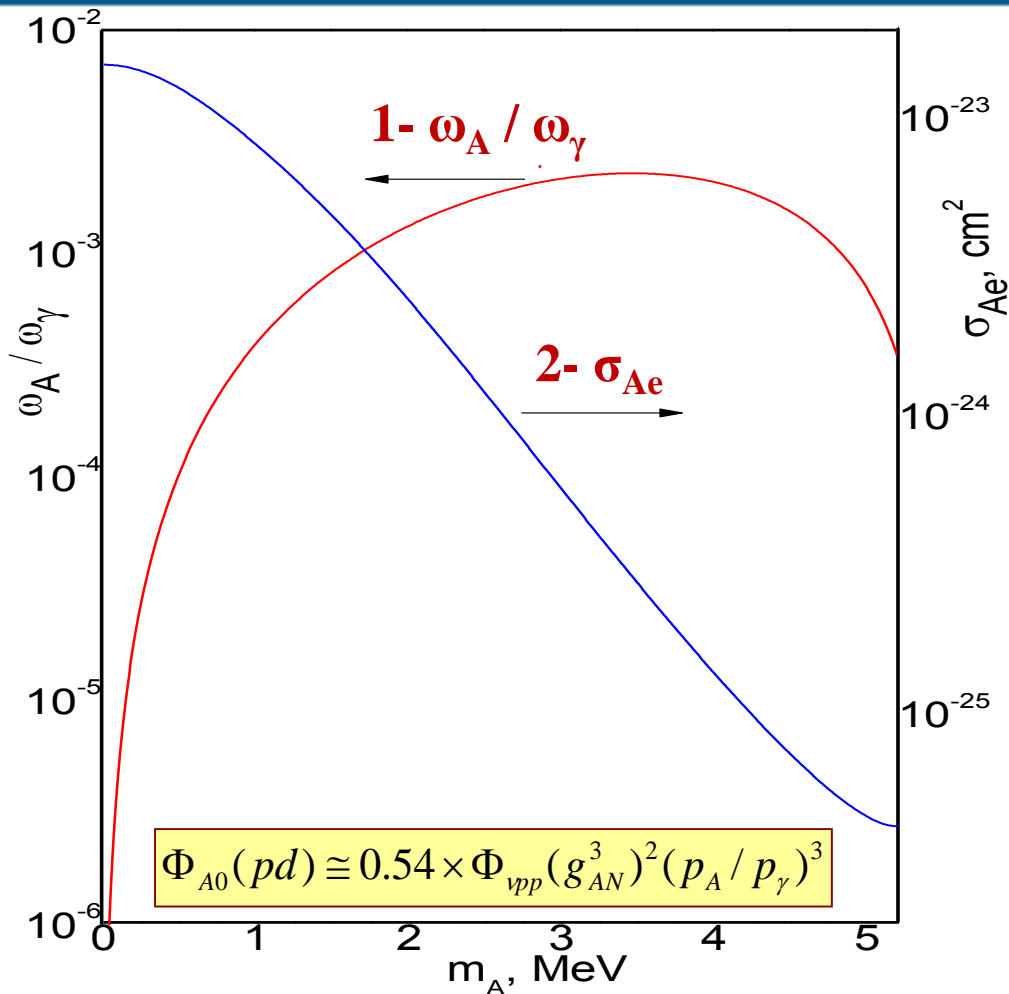
$A \rightarrow 2\gamma$  decay

$A \rightarrow e^+ e^-$  decay ( $m_A > 2m_e$ )



Для аксионов с массой более  $2m_e$ , основная мода распада на  $e^+e^-$  пару. Если  $m_A < 2m_e$  аксион может распасться на два  $\gamma$ -кванта. Условие  $\tau_{flight} < 0.1\tau_{cm}$  (в этом случае 90% аксионов достигают Земли) определяет чувствительность к константам связи  $g_{Ae}$  и  $g_{A\gamma}$  в зависимости от  $m_A$ .

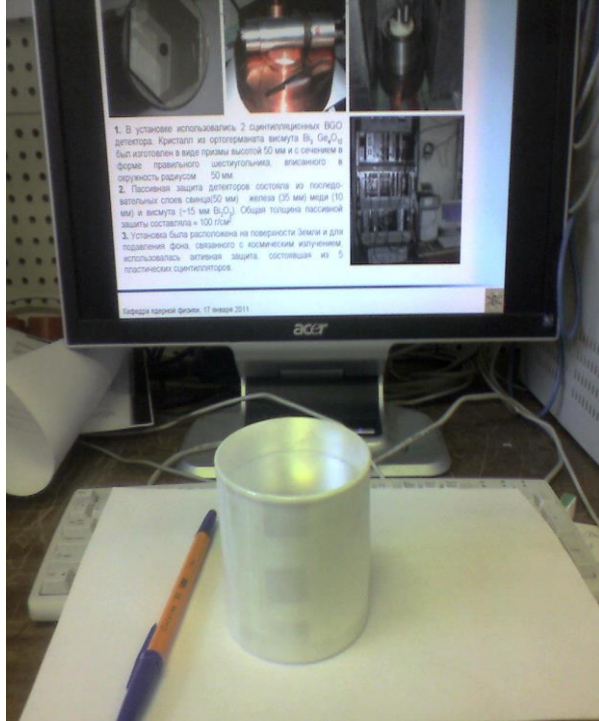
# $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ детектор для поиска АЕ эффекта для 5.5 МэВ аксионов



Отношение  $(\omega_A/\omega_\gamma)$  в реакции  $p+d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$  (1, левая шкала); сечение  $\sigma_{Ae}$  для 5.5 МэВ аксионов на атоме Bi для  $g_{Ae}=1$  (2, правая шкала)

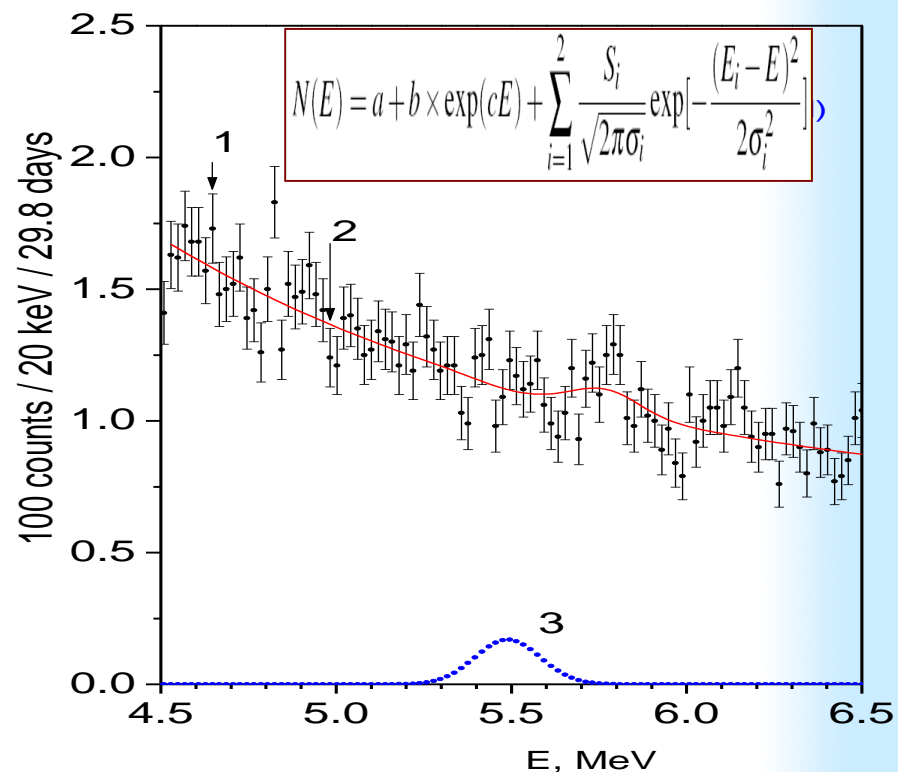
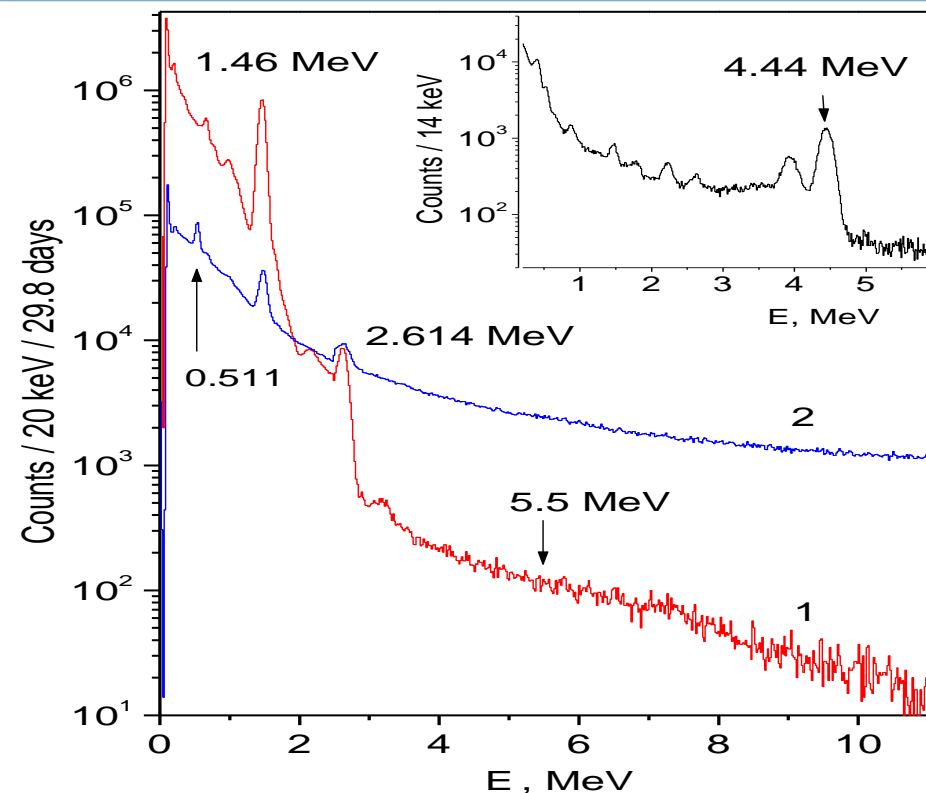
Для обнаружения солнечных аксионов с энергией 5,5 МэВ мы выбрали реакцию аксио-электрического эффекта  $A + Z + e \rightarrow Z + e$  в атомах Bi, которая определяется константой связи аксион-электрон  $g_{Ae}$ . Сечение этого процесса зависит от заряда ядра как  $Z^5$ , что делает материалы с высокими значениями  $Z$  благоприятными для использования в таких экспериментах. Для атомов висмута сечение аксио-электрического эффекта превышает сечение комптоновского процесса почти на два порядка. Сечение аксио-электрический эффект для атома Bi в  $5 \times 10^5$  раз больше, чем для атомов углерода.

# Установка с BGO сцинтилляционными детекторами



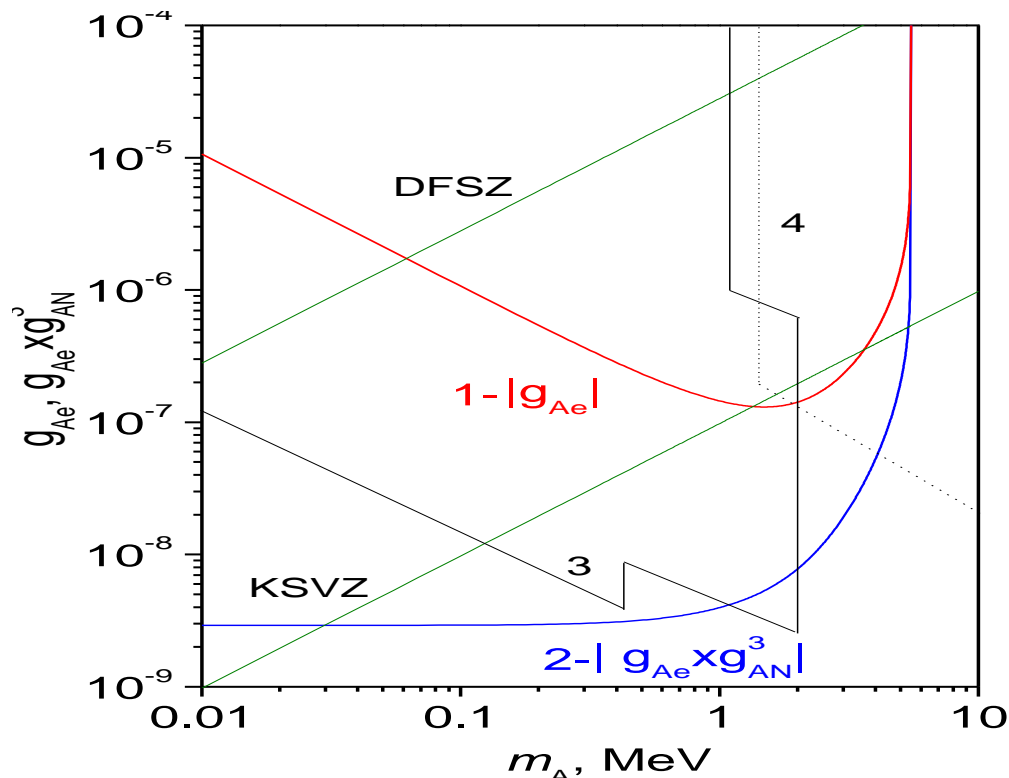
Для поиска аксионов с энергией **5,5 МэВ** мы использовали кристалл BGO весом **2,46 кг**, изготовленный из ортогерманата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (**1,65 кг Bi**). Кристалл BGO имел форму цилиндра диаметром **76 мм** и высотой **76 мм**. Пассивная защита детектора состояла из слоев свинца (100 мм), висмута (~ 20 мм  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) и меди (10 мм). Общая толщина пассивной защиты составляла  $\approx$  **130 г/см<sup>2</sup>**. Установка располагалась на поверхности Земли. Для подавления фона космических лучей мы использовали активное вето, состоящее из пяти пластиковых сцинтилляторов размером **50x50x12 см**.

# Спектр ВГО за 29.8 суток и результаты подгонки



Энергетический спектр детектора ВГО, измеренный (1) в антисовпадении и (2) в совпадении с мюонным ветом. На вставке показан спектр, измеренный с нейтронным источником Pu-Be. Пики 1,46 МэВ и 2,614 МэВ использовались для энергетической калибровки и проверки стабильности. Зависимость энергетического разрешения детектора ВГО от энергии  $\sigma(E)$  (МэВ) =  $0,04 \cdot (E(\text{МэВ}))^{1/2}$ . Ожидаемое разрешение пика 5,5 МэВ составляет  $\sigma(5,5 \text{ МэВ})=93 \text{ кэВ}$ . Второй гауссиан описывает 5,824 МэВ от  $n(113\text{Cd}, 114\text{Cd})\gamma$ . Интенсивность пика 5,49 МэВ равна  $S1=18\pm 58$ , что соответствует верхнему пределу на число отсчетов в пике,  $Slim = 85$  для 90% у.д..

# Пределы на константы $g_{Ae}$ и $g_{Ae} \times g_{AN}$



Ограничения на  $g_{Ae}$  (линия 1) и  $|g_{Ae} \times g_{AN}^3|$  (линия 2), 3- солнечные и реакторные эксперименты (СФ, Техоно), 4- ускорительные эксперименты.

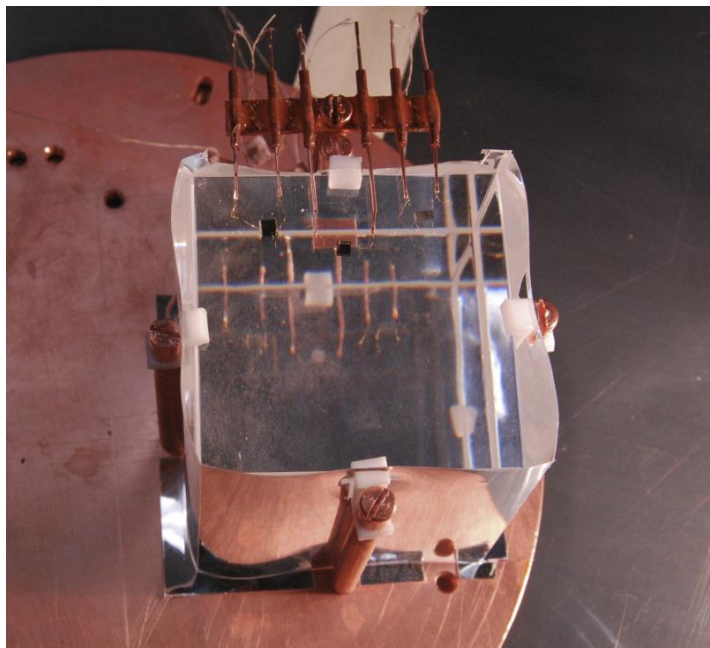
Ожидаемое число аксионных событий:

$$S = \varepsilon \cdot N_{Bi} \cdot T \cdot \Phi_A \cdot \sigma_{Ae}$$

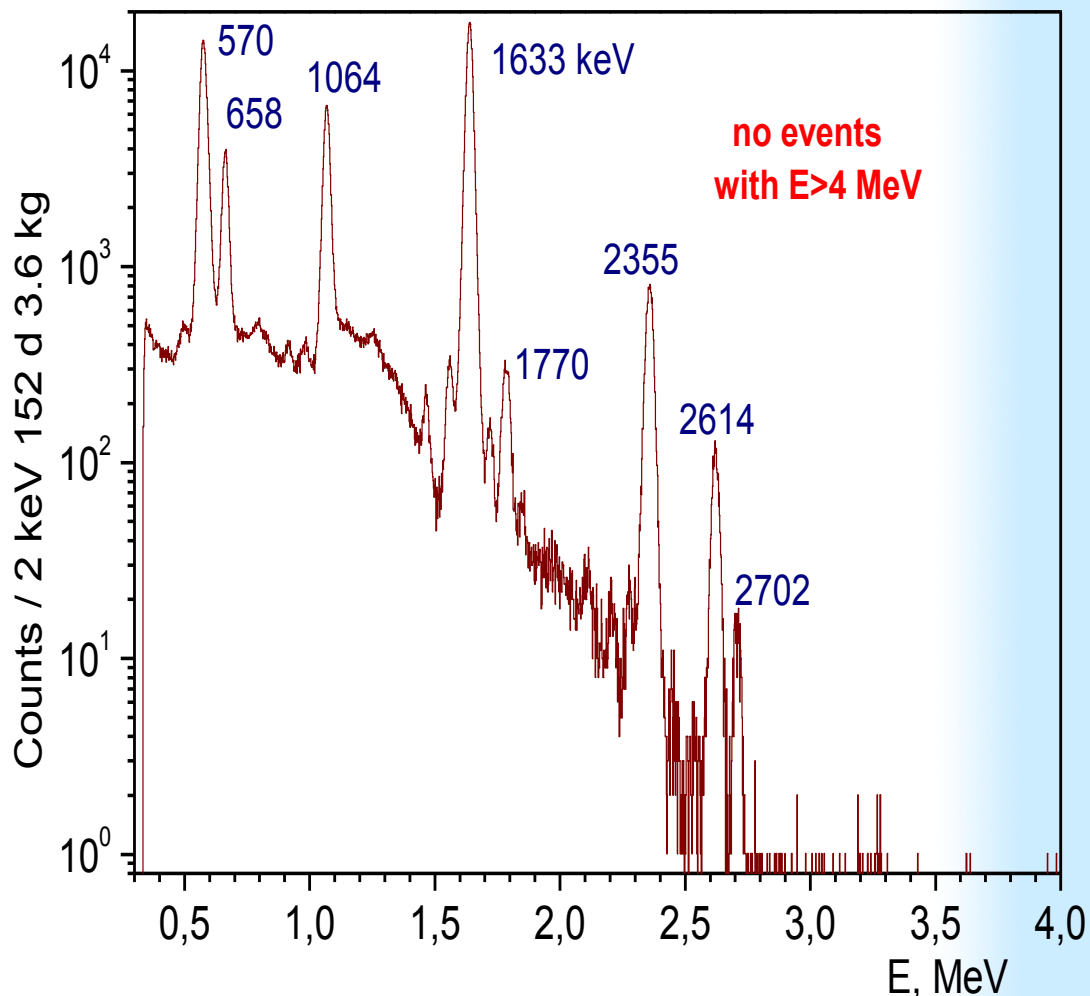
где  $\varepsilon=0.67$ - эффективность регистрации 5.5 МэВ  $\gamma$ -квантов,  $N_{Bi}=4.76 \cdot 10^{24}$ - число атомов Bi,  $T=2.57 \cdot 10^6$  – время измерения. Поток аксионов  $\Phi_A$  пропорционален  $(g_{AN}^3)^2$  и сечение  $\sigma_{Ae}$  пропорционально  $g_{Ae}^2$ . В результате, значение  $S$  зависит от произведения –  $(g_{Ae})^2 \times (g_{AN}^3)^2$ . Отношение  $S \leq S_{lim}$ , полученное в эксперименте, ограничивает  $|g_{Ae} \times g_{AN}^3|$  и  $m_A$ , как показано на рисунке.

В результате, новый верхний предел  $|g_{Ae} \times g_{AN}^3| < 2.9 \cdot 10^{-9}$  (90% c.l.) при  $m_A=1$  МэВ получен. В модели адронного аксиона это ограничение соответствует пределу на константу связи аксиона с электроном  $|g_{Ae} \times m_A(\text{MeV})| \leq \sim 1.0 \times 10^7$  для аксионов с массами в интервале  $m_A < \sim 1$  МэВ.

# Спектр BGO-болометра за 152 суток



4 кубических ( $5 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$ ) кристалла BGO (1,65 кг Bi) были установлены в рефрижераторе растворения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в зале С и работали при температуре в несколько мК. Кристалла были размещены в защите из высокочистой меди. К каждому болометру подключен NTD Ge-термистор.



Энергетический спектр 4-х детекторов BGO-детекторов, измеренный в течение 152 сут. Наиболее интенсивные  $\gamma$ -линии связаны с распадами  $^{207}\text{Bi}$ . Ограничения на поток и сечение 5,5 МэВ аксионов основаны на отсутствии событий выше 4 МэВ.

# Сцинтиллятор vs Болومتر (+Сцинтиллятор)

Eur. Phys. J. C (2014) 74:3035  
DOI 10.1140/epjc/s10052-014-3035-8

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL C

Regular Article - Experimental Physics

## Search for axioelectric effect of solar axions using BGO scintillating bolometer

A. V. Derbin<sup>1,a</sup>, L. Gironi<sup>2,3</sup>, S. S. Nagorny<sup>4,5</sup>, L. Pattavina<sup>4</sup>, J. W. Beeman<sup>6</sup>, F. Bellini<sup>7,8</sup>, M. Biassoni<sup>2,3</sup>, S. Capelli<sup>2,3</sup>, M. Clemenza<sup>2,3</sup>, I. S. Drachnev<sup>1,5</sup>, E. Ferri<sup>2,3</sup>, A. Giachero<sup>2,3</sup>, C. Gotti<sup>2,3</sup>, A. S. Kayunov<sup>1</sup>, C. Maiano<sup>2,3</sup>, M. Maino<sup>2,3</sup>, V. N. Muratova<sup>1</sup>, M. Pavan<sup>2,3</sup>, S. Pirro<sup>4</sup>, D. A. Semenov<sup>1</sup>, M. Sisti<sup>2,3</sup>, E. V. Unzhakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg Nuclear Physics Institute, 188350 Gatchina, Russia

<sup>2</sup> INFN-Sezione di Milano Bicocca, 20126 Milano, Italy

<sup>3</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Milano-Bicocca, 20126 Milano, Italy

<sup>4</sup> INFN-Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, 67100 L'Aquila, Italy

<sup>5</sup> Gran Sasso Science Institute, INFN, 67100 L'Aquila, AQ, Italy

<sup>6</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

<sup>7</sup> INFN-Sezione di Roma, 00185 Rome, Italy

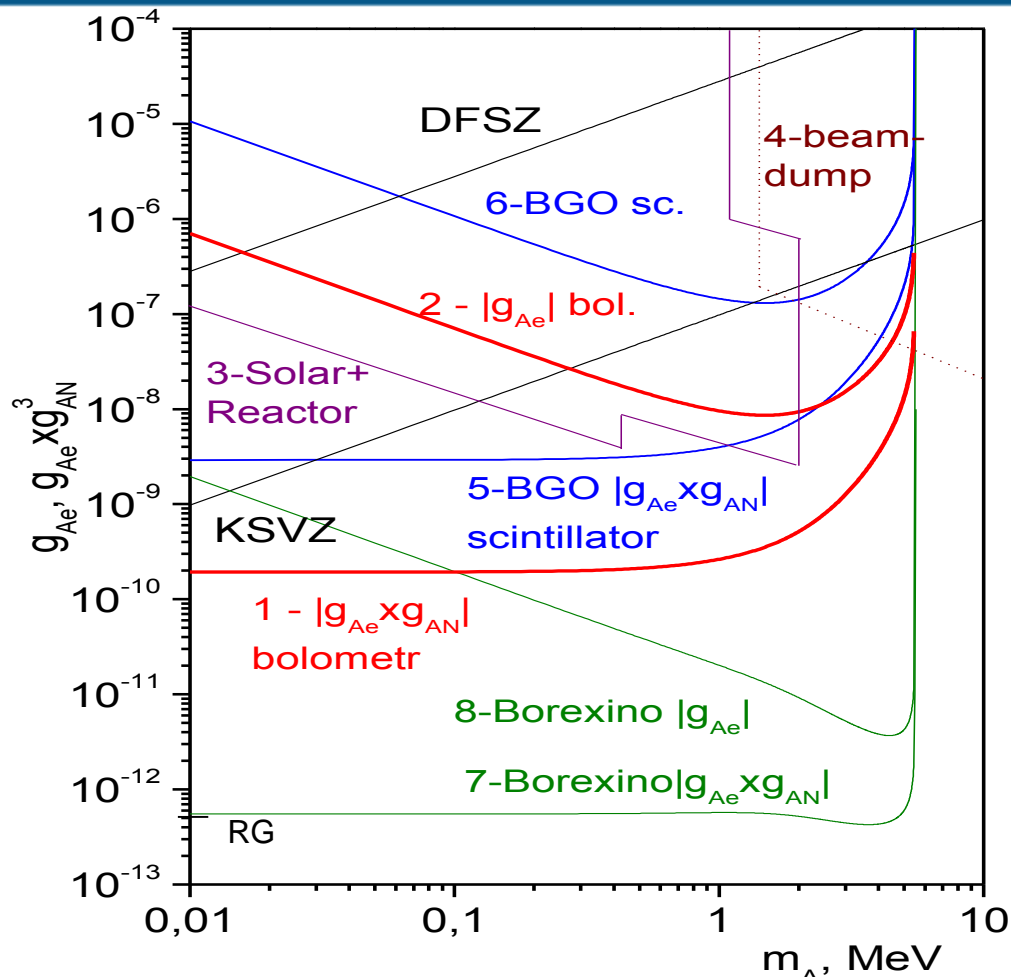
<sup>8</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza, 00185 Rome, Italy

Detector	$\sigma$ (keV) at 5.5 MeV	S_lim c / d	mass, g
Scintillator	93	85 / 30	2460
Bolometer	16	2.44 / 152	4x890

*Характеристики BGO-болометра (энергетическое разрешение, уровень фона, масса) в сравнении со сцинтилляционным BGO-детектором.*



# Пределы на $|g_{Ae} \times g_{AN}|$ и $|g_{Ae}|$ для $m_A$ в интервале (0.01-10) МэВ



1,2–BGO болометр, пределы на  $|g_{Ae} \times g_{AN}|$  and  $|g_{Ae}|$ , соответственно;

3 – солнечные и реакторные (CTF и Техон);

4 – ускорительные эксперименты;

5,6–BGO сцинтиллятор  $|g_{Ae} \times g_{AN}|$  и  $|g_{Ae}|$ ;

7,8–Borexino - 2012  $|g_{Ae} \times g_{AN}|$  и  $|g_{Ae}|$ ;

Зависимости  $g_{Ae}$  от  $m_A$  для DFSZ и KSVZ-моделей показана.

В результате, получен модельно-независимы предел  $|g_{Ae} \times g_{AN}| < 1.9 \times 10^{-10}$  (90% c.l.), который более чем на порядок превышает полученный с 2.5 kg BGO сцинтилляционным детектором. В отличие от данной работы, пределы Borexino для  $g_{Ae}$  были получены в предположении, что аксион взаимодействует посредством комптоновского процесса.

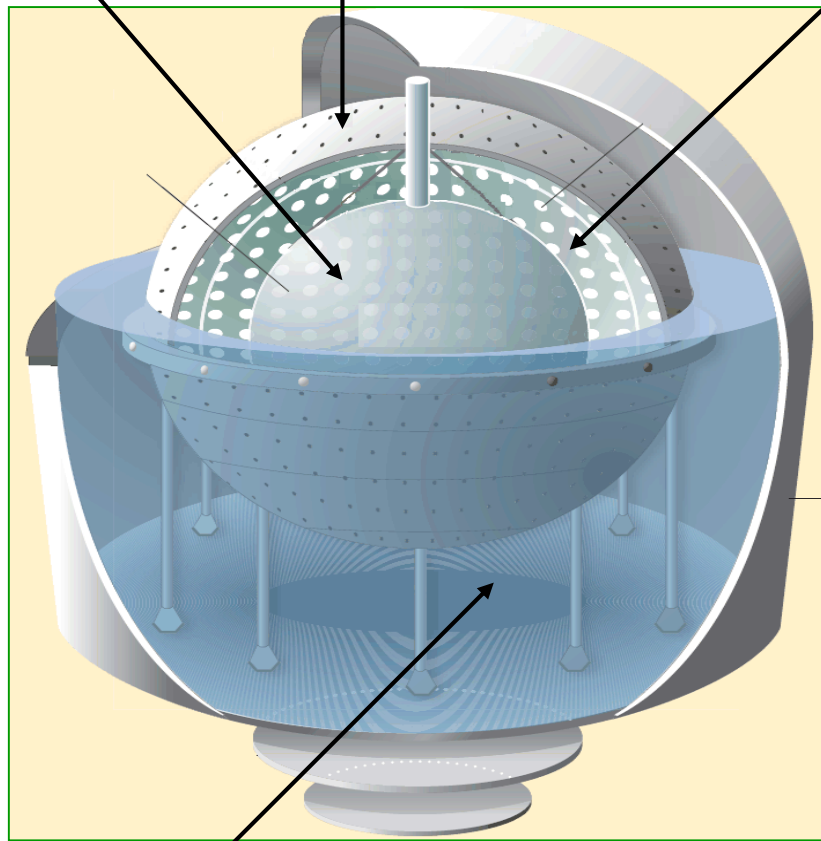


# Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

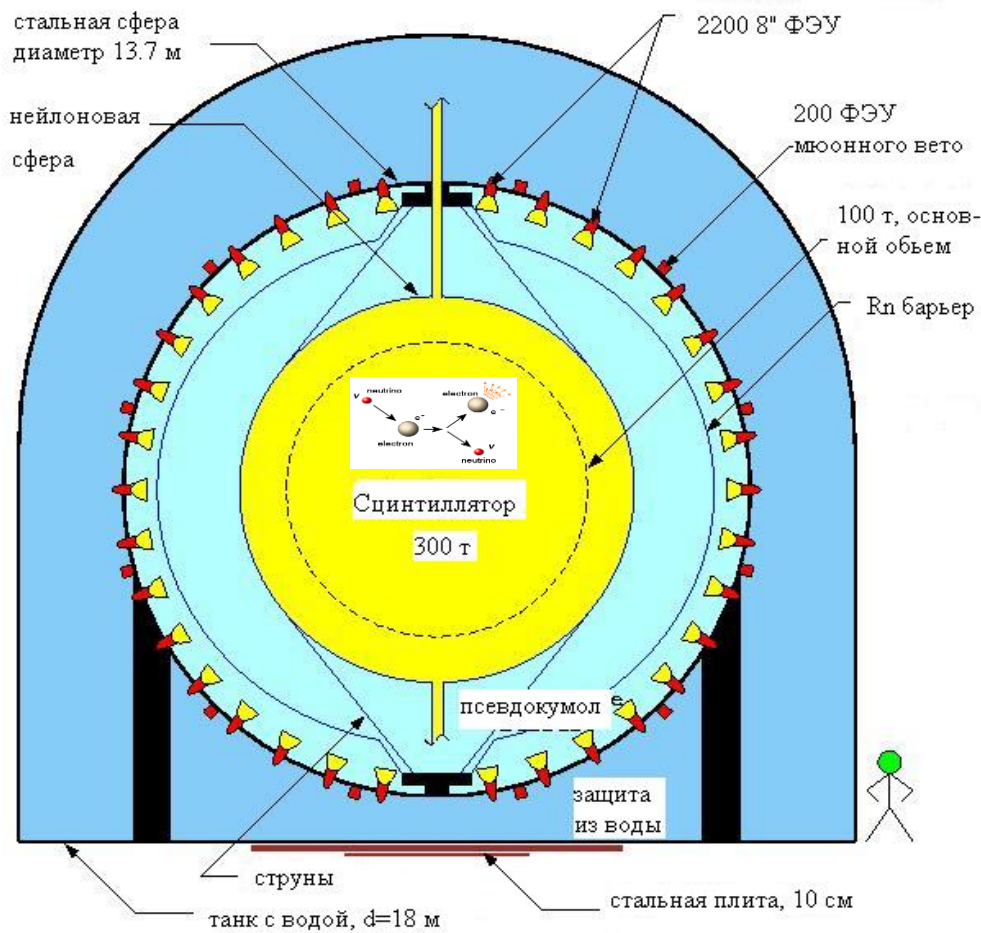
278 т. PC+PPO  
(1,5 г/л)

Стальная сфера (R=6,85 м)  
- 2212 8" ФЭУ;  
- 1350 м<sup>3</sup> PC+DMP (5,0 г/л)

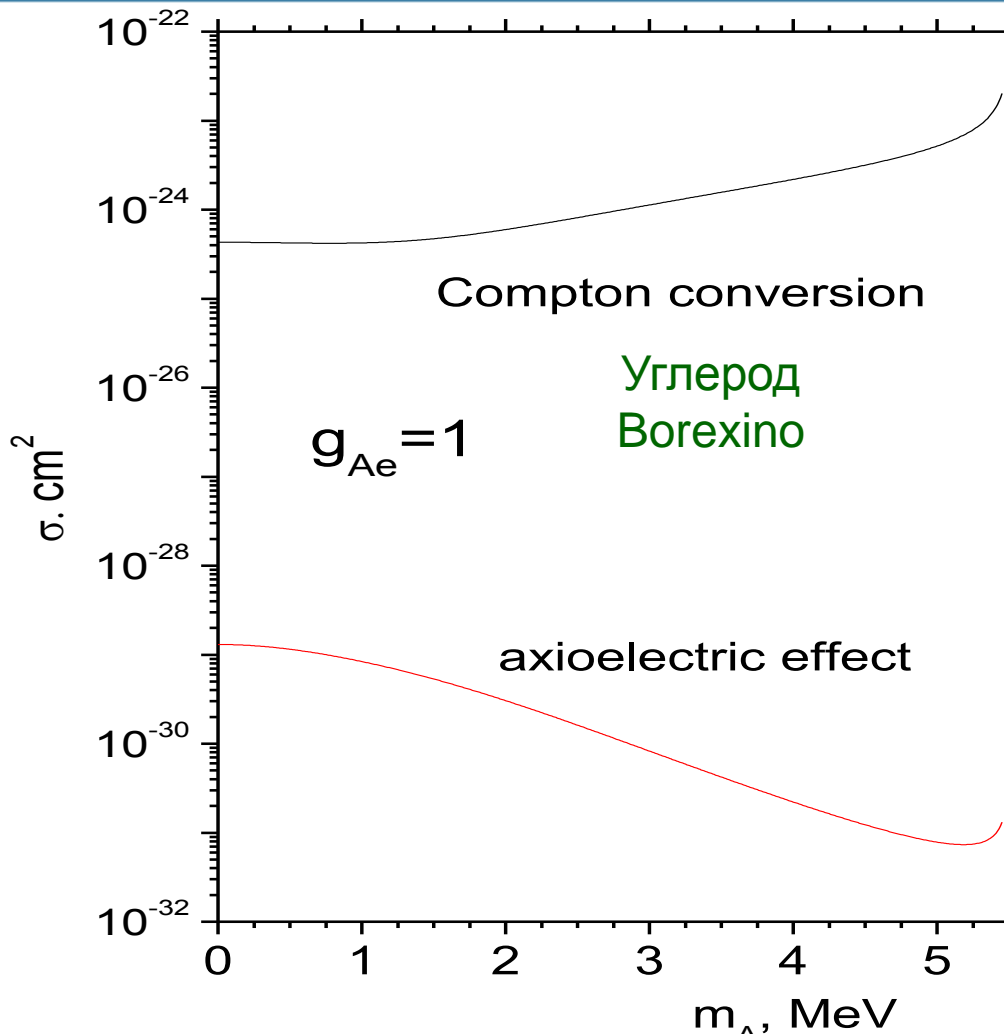
Две 125 мкм нейлоновые сферы:  
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



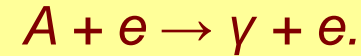
2100 м<sup>3</sup> водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;  
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;  
- защита от  $\mu$ ,  $\gamma$  и  $n$



# 5.5 МэВ аксион в Борексино. Регистрация через константу $g_{Ae}$



## 1. Compton conversion:



электрон и  $\gamma$  регистрируются  
Сечение имеет сложный вид,  
Полное  $\sigma$  для 5.5 МэВ аксионов

$$\sigma_{CC} \approx g_{Ae}^2 \times 4.3 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

при  $m_A < 1$  МэВ

## 2. Axioelectric effect:



Аналог фотоэффекта

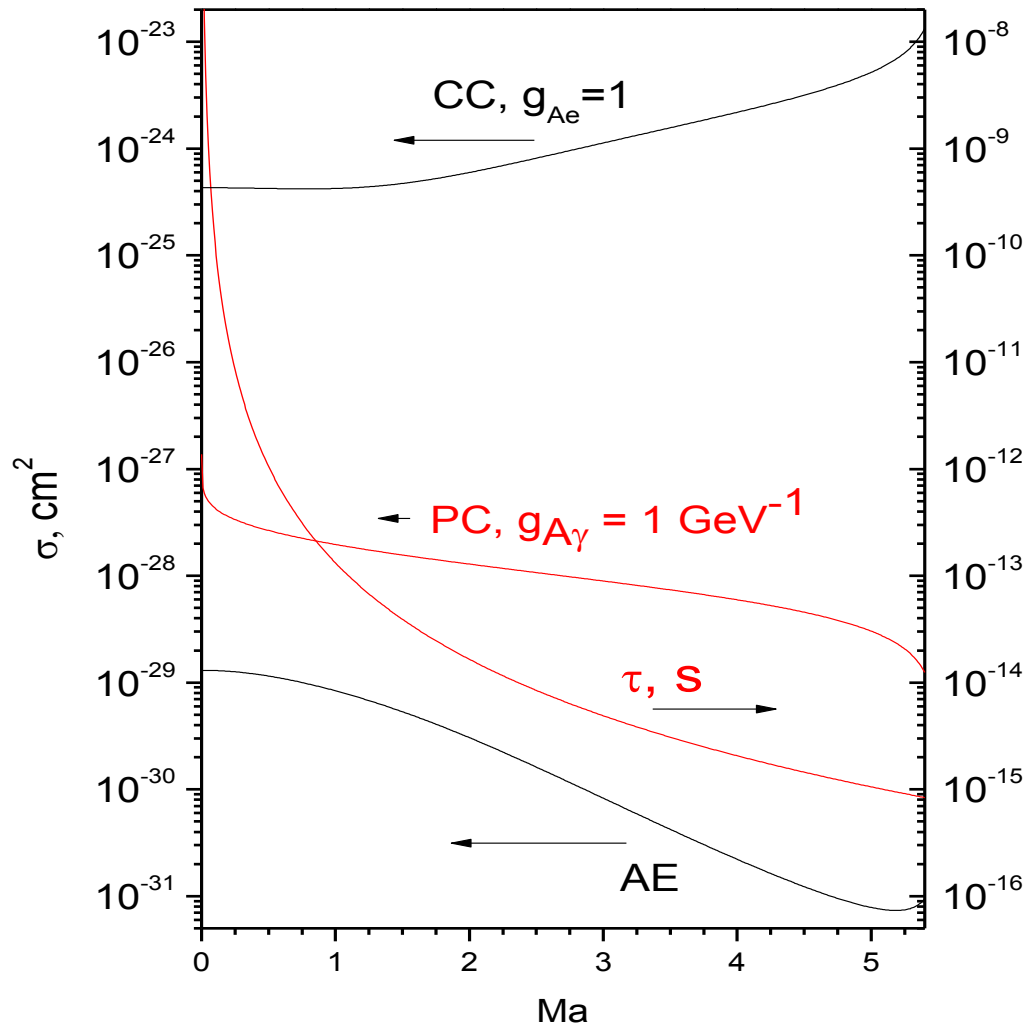
Сечение для атома углерода и

$$E_A = 5.5 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_{AE} \approx g_{Ae}^2 \times 1.3 \times 10^{-29} \text{ cm}^2$$

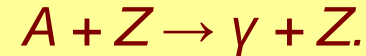
Для углерода (псевдокумол  $C_9H_{12}$ ) сечение а.э. эффекта на 4 порядка ниже сечения комптоновского процесса. Поскольку сечение  $\sigma_{CC} \sim E_A$ , а  $\sigma_{AE} \sim E_A^{-3/2} Z^5$ , а.э. эффект следует искать при низких энергиях и больших  $Z$ .  $(83\text{Bi} / 6\text{C})^5 = 0.5 \times 10^6$ .

# Регистрация через константу $g_{A\gamma}$



## 1. Обратная конверсия

Примакова:



на ядре,  $E_\gamma \approx E_A$  и  $\gamma$  квант регистрируется.

Сечение имеет сложный вид, Полное  $\sigma$  для 5.5 МэВ аксионов

$$\sigma_{CC} \approx g_{A\gamma}^2 \times 4.7 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$$

при  $m_A < 1$  МэВ

## 2. Распад аксиона:



Время жизни аксиона

$$\Gamma [\text{s}^{-1}] = 1/\tau = g_{A\gamma}^2 m_A^3 / 64\pi =$$

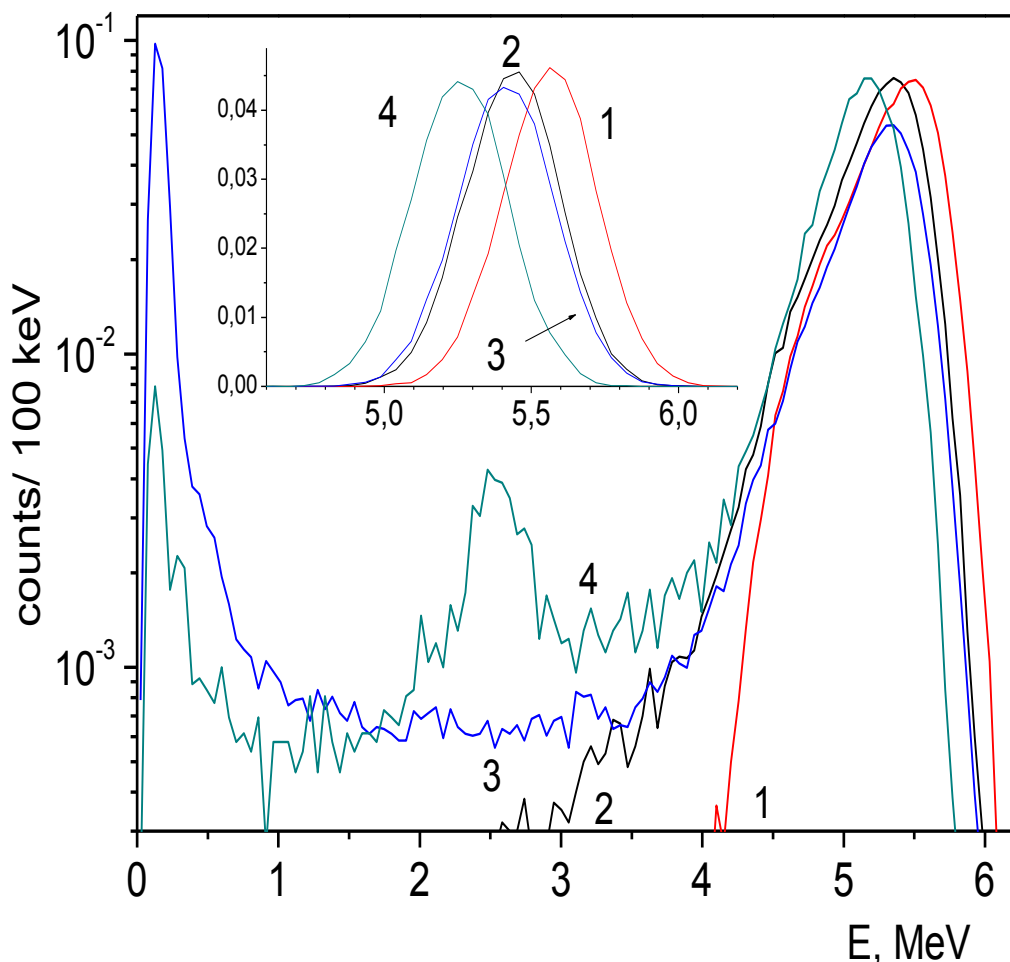
$$0.8 \times 10^{-5} (g_{A\gamma} [\text{GeV}^{-1}])^2 (m_A [\text{eV}])^3$$

и должно быть больше 500 с

Проанализированы возможные сигналы от распада аксиона на два  $\gamma$ -кванта и от примаковской конверсии на ядрах. Амплитуды реакций зависят от  $g_{A\gamma}$ .



# Функция отклика Бorexино для аксионных процессов

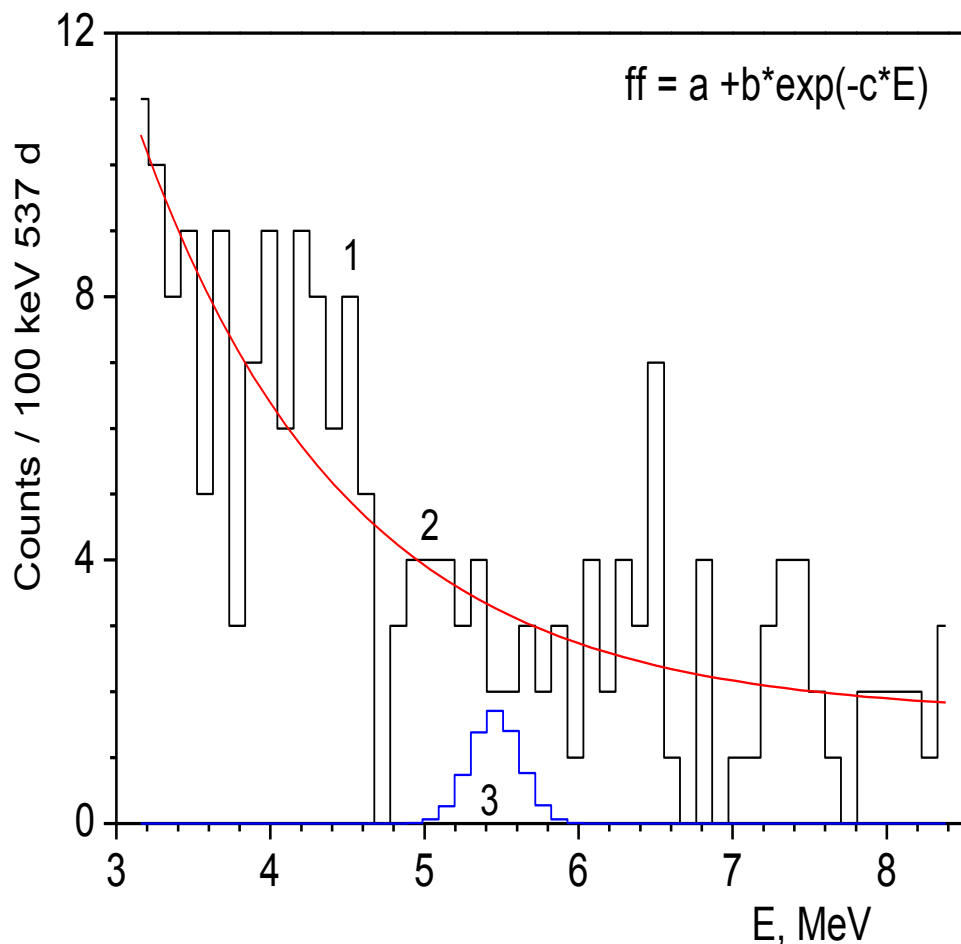


- 1 – axioelectric effect
- 2 – Compton conversion
- 3 – Primakoff conversion
- 4 – Axion decay  $A \rightarrow 2\gamma$

Метод Монте-Карло был использован для моделирования отклика Borexino на электроны и  $\gamma$ -кванты, возникающие при взаимодействии аксионов. Функция отклика Borexino на аксионы была найдена путем МК-моделирования на основе кода GEANT4 с учетом эффекта гашения ионизации и зависимости регистрируемого заряда от расстояния от центра детектора.

Равномерно распределенные  $\gamma$ -кванты и электроны разыгрывались в объеме сцинтиллятора, но функции отклика были получены для событий, восстановленных внутри чувствительного объема. События отбирались с теми же критериями, которые применялись для реальных данных. **Признак всех реакций — пик при энергии 5,5 МэВ.**

# Подгонка измеренного спектра Vorexino



Спектр был аппроксимирован суммой экспоненциальной и гауссовой функций, положение и дисперсия последней были найдены М-К методом

$$N_{th}(E) = a + b \exp(-cE) + \frac{S}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(E_0 - E)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Число отсчетов в пике аксиона  $S$  рассчитывалось с использованием метода максимального правдоподобия для распределения Пуассона.

$$L = \prod_i \exp(-N_i^{th}) (N_i^{th})^{N_i^{exp}} / N_i^{exp} !$$

Верхний предел числа на отсчетов в пике был найден с использованием профиля функции правдоподобия  $L(S)$  для различных фиксированных значений  $S$ , при этом все остальные параметры были свободны. Полученные значения  $L_{max}(S)$  были нормированы на единицу для  $S < 0$ , что позволяет выбрать заданный уровень достоверности.

# Верхние пределы для числа событий от 5.5 МэВ аксионов

реакция	CC	AE	A→2γ	PC	
S <sub>lim</sub> , 68(90)%	3.8(6.9)	3.4(6.5)	4.8(8.4)	3.8(6.9)	(100 t 536 d) <sup>-1</sup>

Верхний предел для скорости счета 5.5 МэВ аксионов - **< 0.013 соб / (100 т 1 сут)**

Для сравнения число событий от солнечных нейтрино (соб / (100 т 1 сут.)):

**pp-ν – 135; <sup>7</sup>Be-ν – 45; <sup>8</sup>B-ν – 0.25; (LMAMSW)**

Верхний предел на произведение потока и сечения можно получить из соотношения:

$$N_{events} = \varepsilon \cdot N_{e,12C} \cdot T \cdot \Phi_A \cdot \sigma_{CC,Ae,PC} \leq S_{lim}$$

$$\Phi_A \times \sigma_{axion-electron} \leq 4.5 \times 10^{-39} s^{-1}$$

4.5x10<sup>-3</sup> SNU  
SNU = 1 c/ s10<sup>36</sup> at

$$\Phi_A \times \sigma_{axion-proton} \leq 2.5 \times 10^{-38} s^{-1}$$

$$\Phi_A \times \sigma_{axion-carbon} \leq 3.3 \times 10^{-38} s^{-1}$$

Получены строгие модельно-независимые ограничения на поток и сечение для любой частицы, дающей пик **5,5 МэВ**. Для сравнения стандартная скорость захвата солнечных нейтрино составляет **SNU 10<sup>-36</sup> с<sup>-1</sup> атом<sup>-1</sup>**. Скорость захвата солнечных нейтрино, измеренная радиохимическими детекторами Ga-Ge, составляет ~70 SNU.

# Пределы на $g_{AN}$ , $g_{Ae}$ и $g_{Ay}$ и $m_A$ для 5.5 МэВ аксионов

$$\Phi_{A0}(pd) \cong 3.3 \times 10^{10} (g_{AN}^3)^2$$

$$\sigma_{CC} \cong g_{Ae}^2 \times 4.3 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

Поскольку поток аксионов зависит от  $g_{AN}$ , а сечение комптоновского процесса зависит от  $g_{Ae}$ , полученный предел приводит к модельно-независимому пределу на  $g_{AN} \times g_{Ae}$  для любого псевдоскаляра (90% у.д.):

$$|g_{Ae} \times g_{AN}| \leq 5.5 \times 10^{-13} \quad (m_A \leq 1 \text{ MeV})$$

$$g_{AN}^3 = -2.75 \times 10^{-8} (m_A / 1 \text{ eV})$$

Учитывая зависимость  $g_{AN}^3$  от  $m_A$  для KSVZ-модели исключается область  $g_{Ae}$  и  $m_A$ :

$$|g_{Ae} \times m_A| \leq 2.0 \times 10^{-5} \text{ eV}$$

BGO  $-9 \times 10^{-2}, 7 \times 10^{-3}$

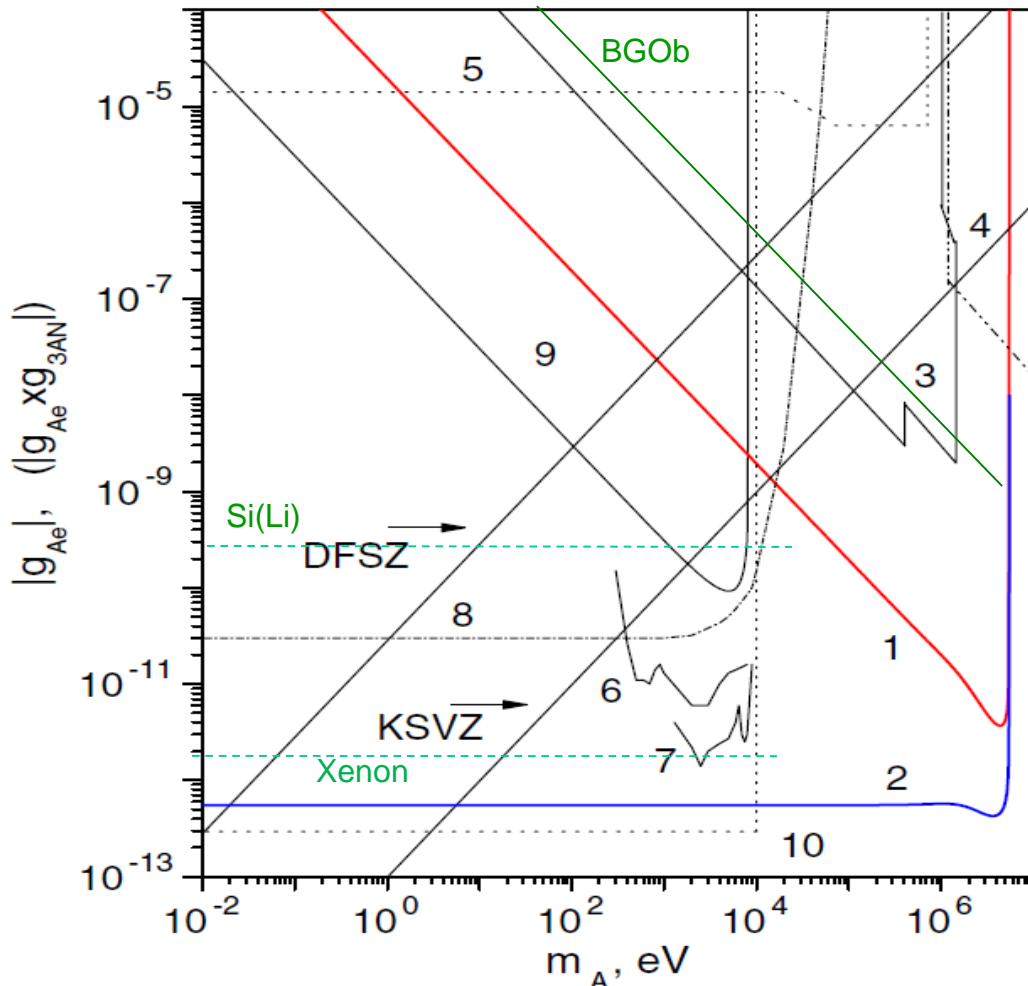
Наконец, можно получить ограничения на массу аксиона:

$$g_{Ae}^{DFSZ} = 2.8 \times 10^{-11} m_A \quad (\cos^2 \beta = 1) \Rightarrow m_A \leq 845 \text{ eV}$$

$$g_{Ae}^{KSVZ} = \frac{3\alpha^2 N m_e}{2\pi f_A} \left( \frac{E}{N} \ln \frac{f_A}{m_e} - \frac{2}{3} \frac{4+z+w}{1+z+w} \ln \frac{\Lambda}{m_e} \right) \Rightarrow m_A \leq 12 \text{ keV}$$



# Пределы на $(g_{Ae} \times g_{AN} \text{ и } m_A)$ и $(g_{Ae} \text{ и } m_A)$



- 1 - Vorexino предел на  $g_{Ae}$
- 2 - Vorexino предел на  $g_{Ae} \times g_{AN}$
- 3 - Реакторные эксперименты и источник  $^{64}\text{Cu}$  (1.1 МэВ)
- 4 - ускорительные beam dump
- 5 - распад ортопозитрония
- 6 - CoGeNT coll.
- 7 - CDMS coll.
- 8 - Солнечные нейтрино
- 9 - Резонансное поглощение ядрами  $^{169}\text{Tm}$
- 10 - Красные гиганты ГВ
- 11 - BGO аксиоэлектрический эффект

Результаты Vorexino исключают новую большую область масс аксиона (0,01-1) МэВ и констант связи  $g_{Ae} \sim (10^{-11} - 10^{-9})$ . Для адронного аксиона с  $m_A = 1$  МэВ  $g_{Ae} < 2 \times 10^{-11}$ . На рисунке показаны ограничения на  $g_{Ae}$ , полученные в экспериментах с реактором, ускорителем и солнечными аксионами, а также из астрофизических данных.

# Пределы на $g_{A\gamma}$ и $m_A$

Если масса аксиона меньше  $2m_e$ , распад  $A \rightarrow e^+e^-$  невозможен, но аксион может распадаться на  $2\gamma$ 's. Поток аксионов, достигших детектора:

$$\Phi_A = \exp\left(-\frac{\tau_f}{\tau_{cm}}\right)\Phi_{A0}$$

где  $\tau_{cm}$  время жизни аксиона в собственной с. о.

$$\tau_{cm} = \frac{64\pi}{g_{A\gamma}^2 m_A^3} = \frac{1.3 \times 10^5}{g_{A\gamma}^2 m_A^3} s \quad (g_{A\gamma} \text{ in } GeV^{-1} \quad m_A \text{ in } eV)$$

$\tau_f$  время пролета аксиона в с.с.о.

$$\tau_f = \frac{m_A L}{E_A \beta c} \cong 9.1 \times 10^{-5} (m_A / 1eV)[s] \quad (\beta = 1)$$

$$\Phi_A = \exp(-7.0 \times 10^{-10} g_{A\gamma}^2 m_A^4) \Phi_{A0}$$

Анализ распада  $A \rightarrow 2\gamma$  и обратного эффекта Примакова более сложный, поскольку требует учесть возможные распады аксионов на пути к Земле. Экспоненциальная зависимость потока от  $g_{A\gamma}$  и  $m_A$  включена.

# Пределы на $g_{AN}$ и $g_{A\gamma}$ и $m_A$ из конверсии Примакова

Число обратных конверсий Примакова на ядрах  $^{12}\text{C}$  ( $N_{^{12}\text{C}}$ ) за время измерений  $T$  при эффективности  $\varepsilon$  пропорционально:

$$\begin{aligned} N_{PC} &= \sigma_{PC} \exp(\sim g_{A\gamma}^2 m_A^4) \Phi_{A0} N_{^{12}\text{C}} T \varepsilon \\ &\sim (g_{AN}^2 g_{A\gamma}^2) \exp(\sim g_{A\gamma}^2 m_A^4) \\ &\sim (g_{\gamma}^2 m_A^2) \exp(\sim g_{A\gamma}^2 m_A^4) \\ &\sim m_A^4 \exp(\sim m_A^6) \end{aligned}$$

If  $\exp(\ ) \approx 1$  then

$$|g_{AN} \times g_{A\gamma}| < 4.6 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

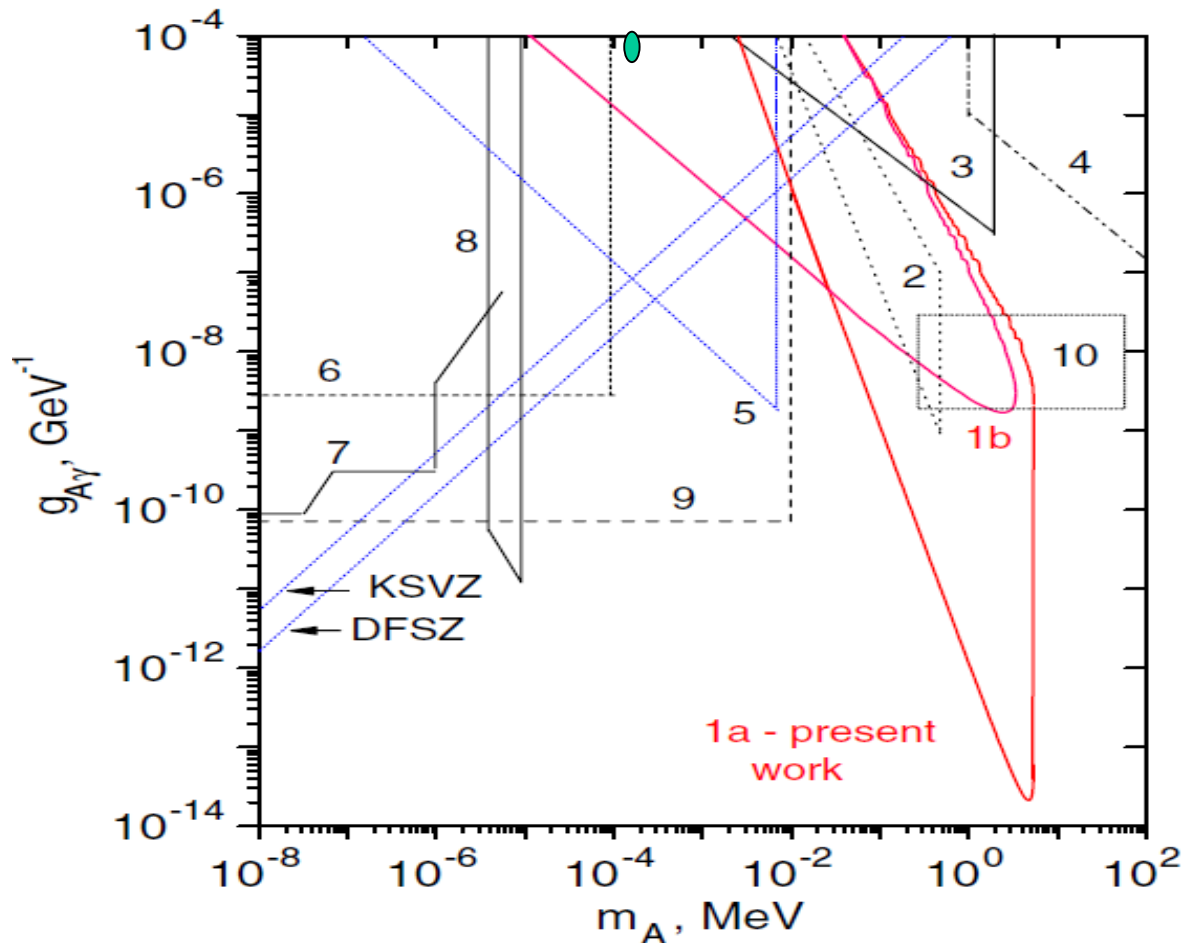
$$|g_{A\gamma} \times m_A| < 1.7 \times 10^{-12}$$

if  $m_A = 1 \text{ MeV}$

$$g_{A\gamma} < 1.7 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$$

Полученный модельно независимый предел на произведение  $|g_{AN} \times g_{A\gamma}| \leq 4.6 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$  (90% C.L.). Этот предел в 25 раз более строгий, чем полученный в эксперименте CAST [JCAP 03 (2010) 032.], по поиску конверсии 5.5 МэВ аксионов в лабораторном магнитном поле  $|g_{A\gamma} \times g_{ZAN}| < 1.1 \times 10^{-9}$  at  $m_A < 1 \text{ eV}$ . В KSVZ - модели, ограничение на  $|g_{A\gamma} \times m_A| < 1.7 \times 10^{-12}$  в предположении, что  $g_{A\gamma}$  зависит от  $m_A$  как для KSVZ-аксиона, исключается область масс аксиона (1.5—73) кэВ.

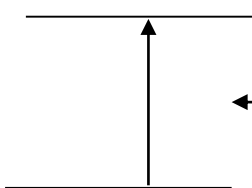
# Пределы на $g_{A\gamma}$ и $m_A$ для $g_{AN}^3 \approx 2.8 \times 10^{-8} m_A$ (KSVZ)



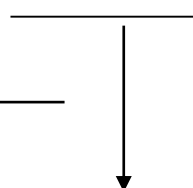
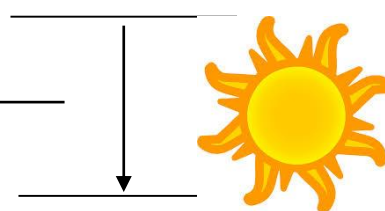
- 1a – Borexino  $A \rightarrow 2\gamma$  распад
- 1b – Borexino PC
- 2 – CTF
- 3 – Реактор
- 4 – beam-dump
- 5 – Резонансное поглощение
- 6 – Cosme, Solax, DAMA
- 7, 11 – CAST
- 8 – Телескопы ( $A \rightarrow 2\gamma$ )
- 9 – НВ время горения He
- 10 – SUSY и mirror- модели массивного аксиона

Borexino исключает новую большую область масс аксиона от  $10$  кэВ до  $5$  МэВ и констант связи  $g_{A\gamma}$  ( $2 \times 10^{-14} - 10^{-7}$ )  $\text{ГэВ}^{-1}$ . Для больших значений  $g^2 m^3$  аксионы распадаются до того как достигнут детектора, для малых – вероятность распада внутри детектора мала. Ограничения Borexino на  $2-4$  порядка более строгие чем полученные в реакторных экспериментах и с искусственными  $p/\alpha$  источниками.

# Резонансное возбуждение ядерных уровней



${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{57}\text{Fe}$ ,  ${}^{83}\text{Kr}$ ,  ${}^{169}\text{Tm}$



${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{57}\text{Fe}$ ,  ${}^{83}\text{Kr}$ ,  ${}^{169}\text{Tm}$

18. W. C. Haxton and K. Y. Lee, Phys. Rev. Lett. **66**, 2557 (1991).

19. S. Mariyama, Phys. Rev. Lett. **75**, 3222 (1995).

20. M. Krejmar, Z. Krečak, A. Ljubičić, et al., Phys. Rev. D **64**, 115016 (2001).

$$g_{AN}^0 = -4.03 \times 10^{-8} (m_A/1 \text{ eV})$$

$$g_{AN}^3 = -2.75 \times 10^{-8} (m_A/1 \text{ eV})$$

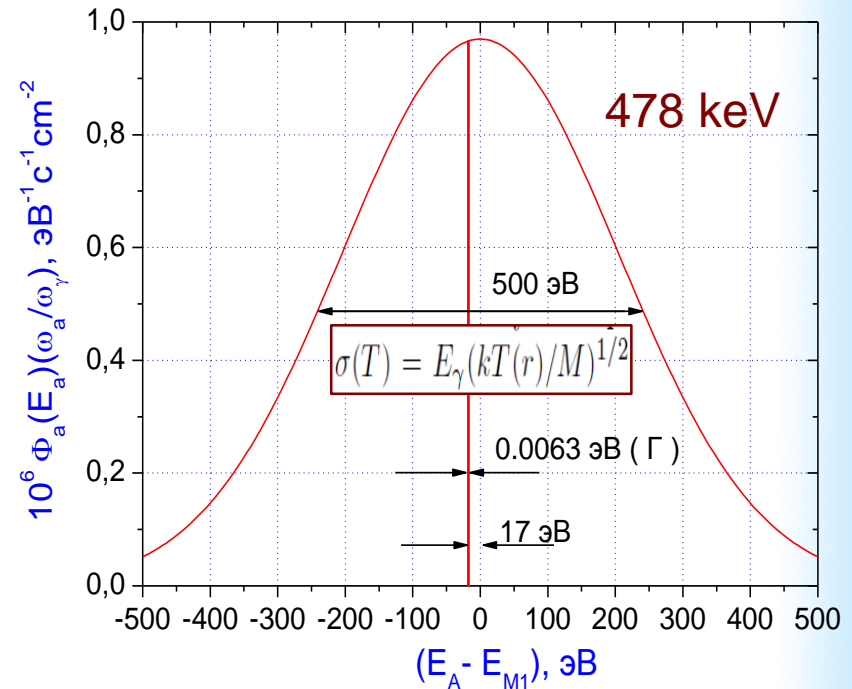
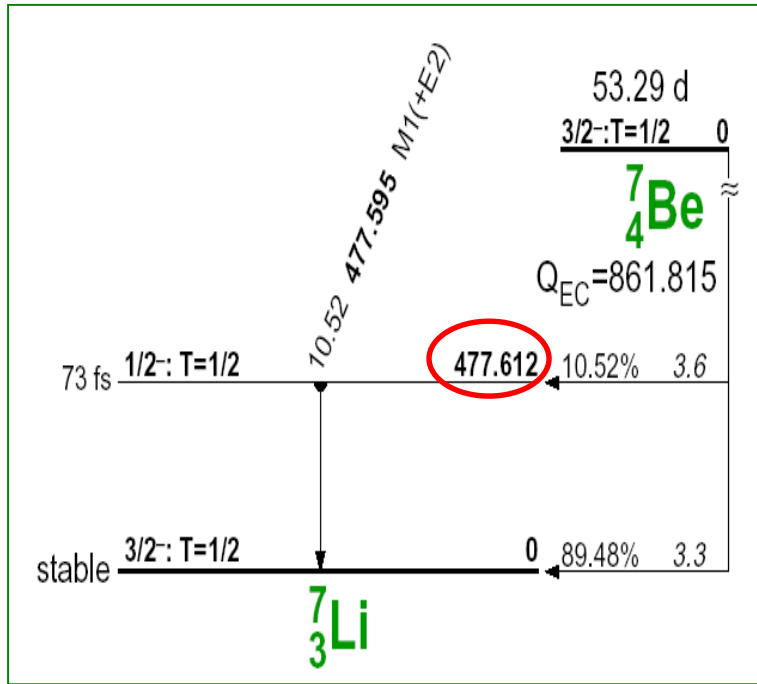
$$\sigma(E_A) = 2\sqrt{\pi}\sigma_{0\gamma} \exp\left[-\frac{4(E_A - E_{M1})^2}{\Gamma^2}\right] \left(\frac{\omega_A}{\omega_\gamma}\right)$$

$$\frac{\omega_A}{\omega_\gamma} = \frac{1}{2\pi\alpha} \frac{1}{1 + \delta^2} \left[ \frac{g_{AN}^0\beta + g_{AN}^3}{(\mu_0 - 0.5)\beta + \mu_3 - \eta} \right]^2 \left(\frac{p_A}{p_\gamma}\right)^3$$

Солнечные монохроматические аксионы могут резонансно возбуждать ядерный уровень в лаборатории, поскольку линия уширяется из-за теплового движения и, таким образом, некоторые аксионы обладают подходящей энергией. Часть аксионов с широким непрерывным спектром (примаковские, комптоновские, тормозные) также удовлетворяет условиям резонансного поглощения. Сечение резонансного поглощения аксионов определяется выражением, аналогичным резонансному поглощению  $\gamma$ -лучей, поправленному на отношение  $\omega_A/\omega_\gamma$ , где  $\sigma_{0\gamma}$  — максимальное сечение резонансного поглощения  $\gamma$ -лучей. Например, экспериментально определенное значение  $\sigma_{0\gamma}$  для ядра  ${}^{57}\text{Fe}$  равно  $2,56 \times 10^{-18} \text{ см}^2$ . Вероятность испускания аксиона ( $\omega_A/\omega_\gamma$ ) определяется приведенным выше выражением и зависит от  $g_{AN}^0$  и  $g_{AN}^3$ . Здесь  $p_\gamma$  и  $p_A$  — импульсы фотона и аксиона соответственно;  $\delta$  — отношение вероятностей E2- и M1- переходов;  $\mu_0$  и  $\mu_3$  — изоскалярный и изовекторный ядерные магнитные моменты соответственно;  $\beta$  и  $\eta$  — параметры, зависящие от конкретных ядерных матричных элементов.

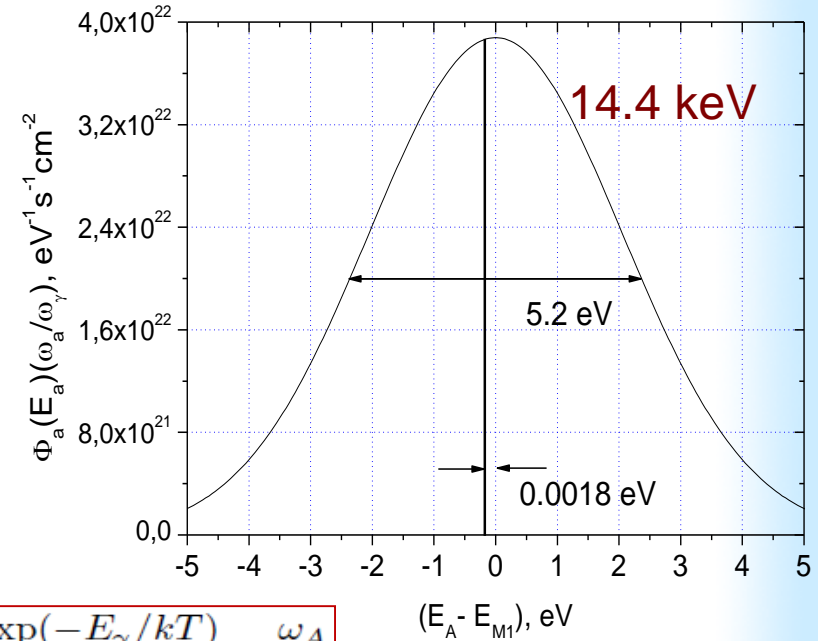
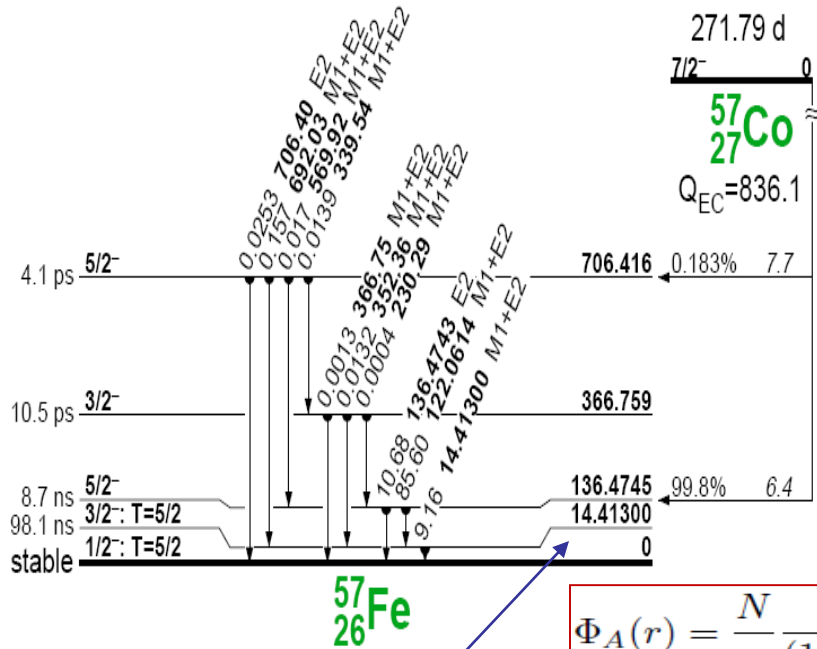
# Резонансное возбуждение ядер ${}^7\text{Li}$

Одним из возможных источников аксионов являются реакции основного солнечного пр-цикла. Реакция электронного захвата  ${}^7\text{Be} + e \rightarrow {}^7\text{Li} ({}^7\text{Li}^*) + \nu_e$  с вероятностью  $\approx 10\%$  переходит в первое возбужденное состояние ядра  ${}^7\text{Li}$ , которое разряжается в  $\gamma$ -переходе магнитного типа  $M1$ . Ожидаемый поток аксионов, напрямую связан с потоком  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино, который на поверхности Земли составляет  $5.0 \times 10^9 \nu/\text{см}^2\text{с}$



Квазимонохроматические аксионы на Земле могут возбудить ядерный уровень  ${}^7\text{Li}$  с энергией 478 кэВ. Возникающие при разрядке кванты могут быть зарегистрированы:  $A + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li}^* \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$ . Доплеровское уширение составляет  $\sigma_S = 210$  эВ, энергия ядра отдачи 17 эВ, собственная ширина уровня  $\Gamma = 6.3 \times 10^{-3}$  eV.  $\Gamma/\sigma_S \sim 10^{-5}$

# Резонансное возбуждение ядер $^{57}\text{Fe}$

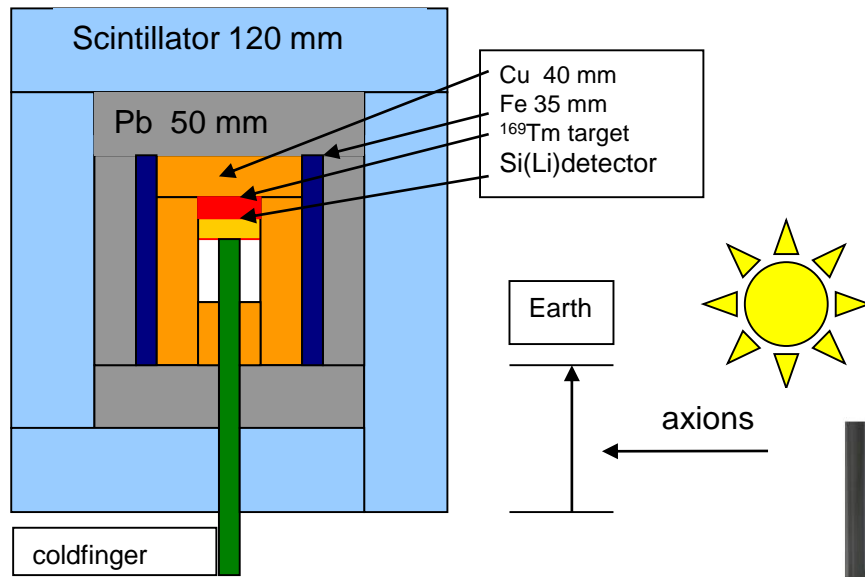


$$\Phi_A(r) = \frac{N}{\tau_\gamma} \frac{2 \exp(-E_\gamma/kT)}{(1 + 2 \exp(-E_\gamma/kT))} \frac{\omega_A}{\omega_\gamma}$$

$$\Phi_A(E_{M1}) = 4.15 \times 10^{25} \left( \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \right) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$$

Наиболее интенсивный поток солнечных аксионов обусловлен M1-переходом в ядрах  $^{57}\text{Fe}$ . Энергия первого возбужденного ядерного уровня равна **14,413 кэВ**, а коэффициент электронной конверсии равен  $\alpha = 8,5$ . Из-за доплеровского уширения спектр аксионов представляет собой гауссову кривую  $\Phi_A(E_A)$  с шириной  $\sigma_S(T) = E_\gamma(kT/M)^{1/2} = 2,2 \text{ эВ}$ . Эта величина существенно превышает энергию ядра отдачи (**1,8 мэВ**), доплеровское уширение линии при температуре  $T = 300 \text{ К}$  ядер мишени (**10 мэВ**) и собственную ширину уровня  $\Gamma = 4,7 \times 10^{-9} \text{ эВ}$ . Таким образом, доля аксионов, удовлетворяющих условию резонансного поглощения, равна  $\sim \Gamma/\sigma_S \sim 10^{-9}$ .

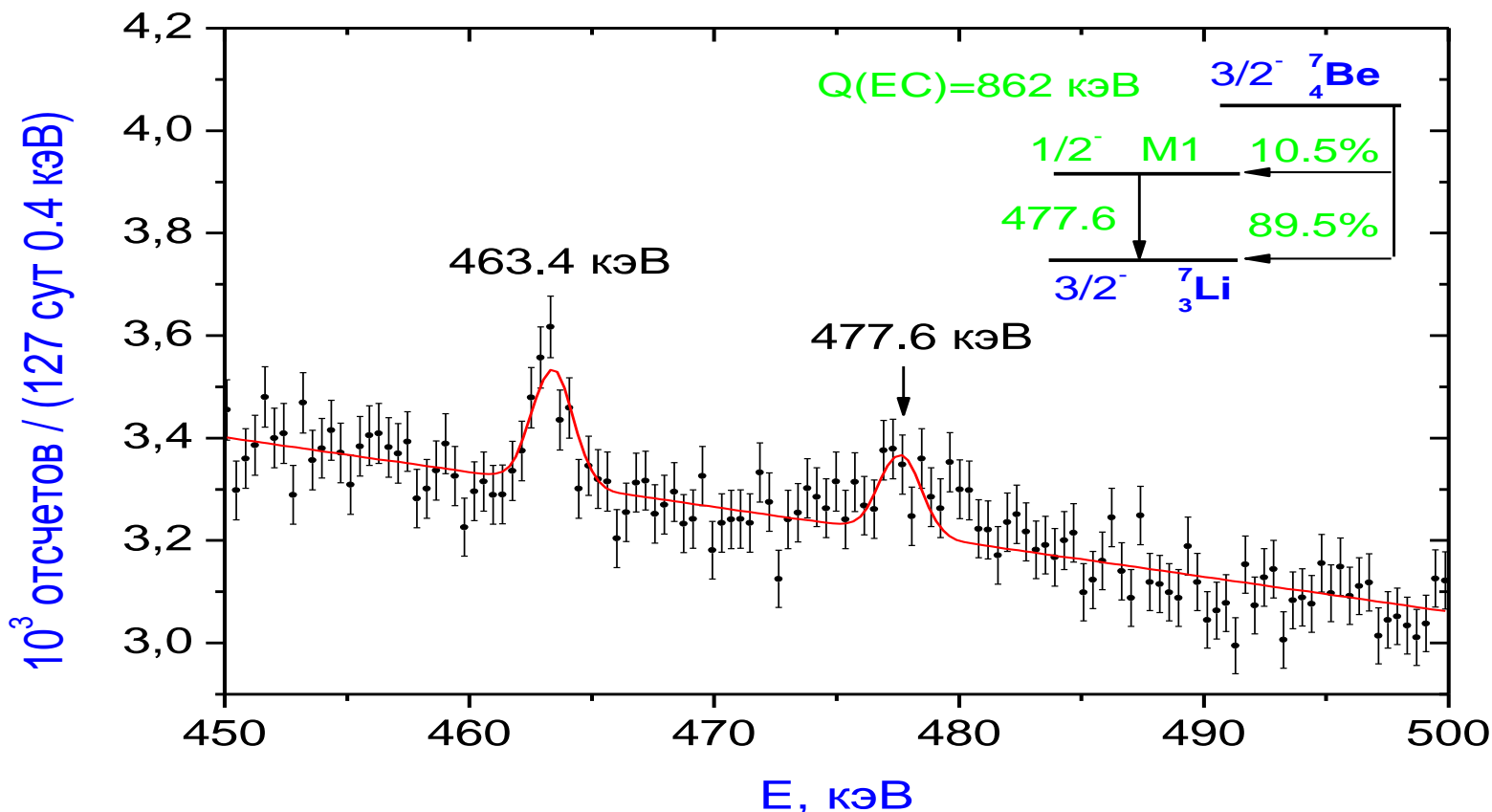
# Si(Li)- и Ge-детекторы и $^{57}\text{Fe}$ - и $^7\text{Li}$ -мишени



*Si(Li) и HPGe детекторы и  $^{57}\text{Fe}$  и  $^7\text{Li}$  мишени помещались внутри низкофоновой установки на поверхности Земли, снабженной активной защитой от мюонов и ядерно-активной компоненты космического излучения.*

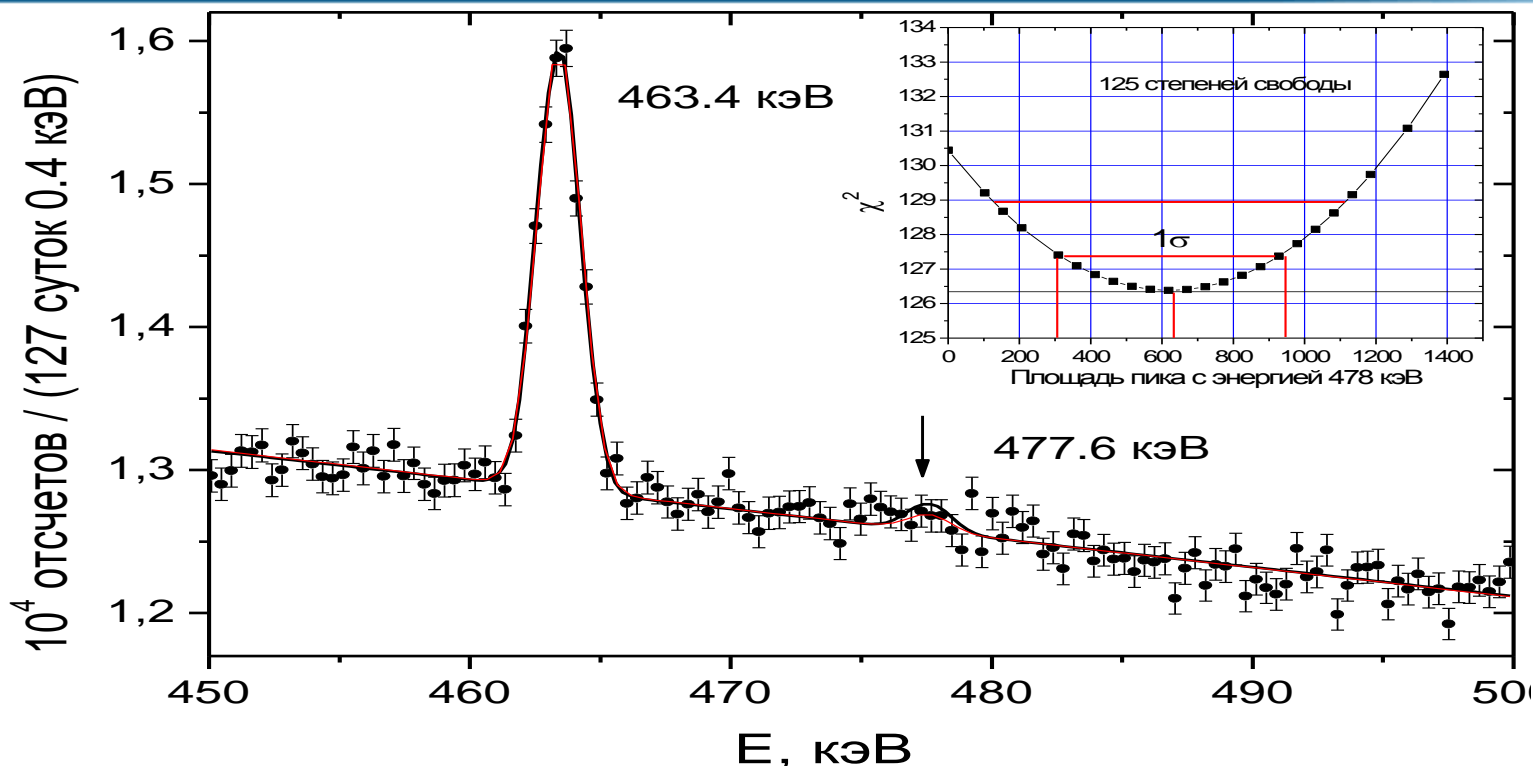


# Интервал 450-500 кэВ спектра сигналов, зарегистрированных в совпадении с сигналом активной защиты



Измерение спектра Ge-детектора в совпадении с активной защитой позволяет определить вероятность возбуждения первого уровня  ${}^7\text{Li}$  космическим излучением. Площадь пика с энергией **463.4 кэВ** составила  $(1200 \pm 180)$  событий, что согласуется с 7% вероятностью случайных совпадений сигналов Ge-детектора и активной защиты. Интенсивность пика с энергией **477.6 кэВ** оказывается равной  $(840 \pm 170)$ , что свидетельствует о том, что мы действительно наблюдаем возбуждение данного уровня  ${}^7\text{Li}$  ядерно-активной компонентой и мюонами космического излучения.

# Интервал 450-500 кэВ спектра сигналов, зарегистрированных в антисовпадении с сигналом активной защиты



$$R = NT\varepsilon\sigma_0\xi\Phi_\nu(^7\text{Be})\left(\frac{\Gamma}{\sigma_S}\right)\left(\frac{\omega_a}{\omega_\gamma}\right)^2 < S_{\text{lim}}$$

$$m_A \leq 16 \text{ кэВ}$$

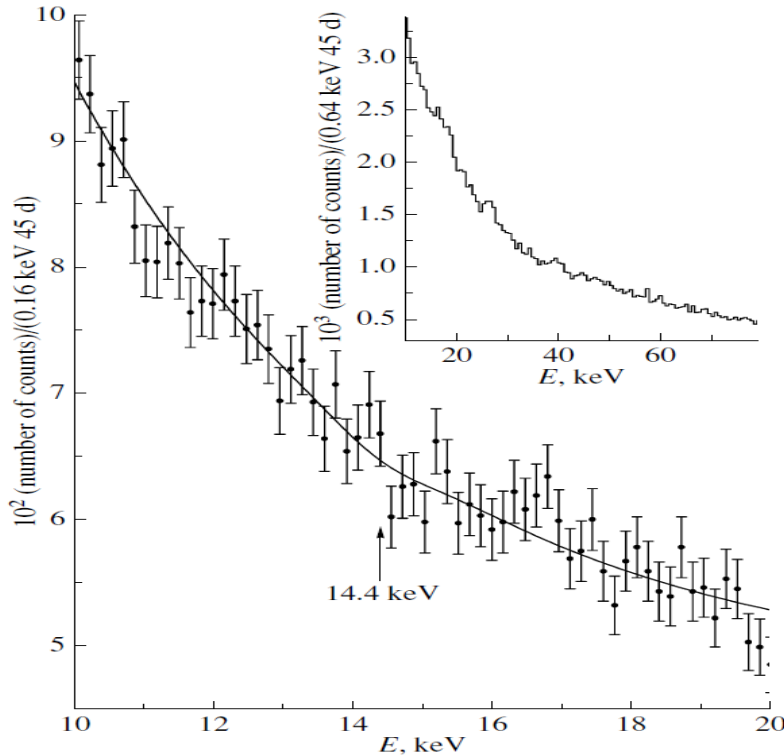
Определенное значение  $S = 630 \pm 320$  событий, что соответствует верхнему пределу на массу аксиона  $m_A \leq 16$  кэВ. Данный результат является вдвое более строгим, чем полученный в предыдущих работах и практически закрывает окно возможных масс аксиона до значения энергии  $M1$ -перехода ядра  $^{57}\text{Fe}$  (14.4 кэВ), следующего возможного наиболее интенсивного источника монохроматических солнечных аксионов.

# Скорость поглощения $^{57}\text{Fe}$ -аксионов $\sim \Phi_A \sigma$

$$\Phi_A(r) = \frac{N}{\tau_\gamma} \frac{2 \exp(-E_\gamma/kT)}{(1 + 2 \exp(-E_\gamma/kT))} \frac{\omega_A}{\omega_\gamma}$$

$$\Phi_A(E_{M1}) = 4.15 \times 10^{25} \left( \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \right) [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}].$$

$$\sigma(E_A) = 2\sqrt{\pi} \sigma_{0\gamma} \times \exp \left[ -\frac{4(E_A - E_M)^2}{\Gamma^2} \right] \left( \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \right)$$



$$\frac{\omega_A}{\omega_\gamma} = \frac{1}{2\pi\alpha} \frac{1}{1 + \delta^2} \times \left[ \frac{g_{AN}^0 \beta + g_{AN}^3}{(\mu_0 - 0.5)\beta + \mu_3 - \eta} \right]^2 \left( \frac{p_A}{p_\gamma} \right)$$

$$g_{AN}^0 = -\frac{m_N}{6f_A} \left[ 2S + (3F - D) \frac{1+z-2w}{1+z+w} \right]$$

$$g_{AN}^3 = -\frac{m_N}{2f_A} \left[ (D+F) \frac{1-z}{1+z+w} \right].$$

$$\beta = -1.19 \quad \eta = 0.8$$

Haxton, Lee, PRL (1991)

$$S = 0.5 \quad (0.15-0.53)$$

$$z = 0.56 \quad (0.35-0.6)$$

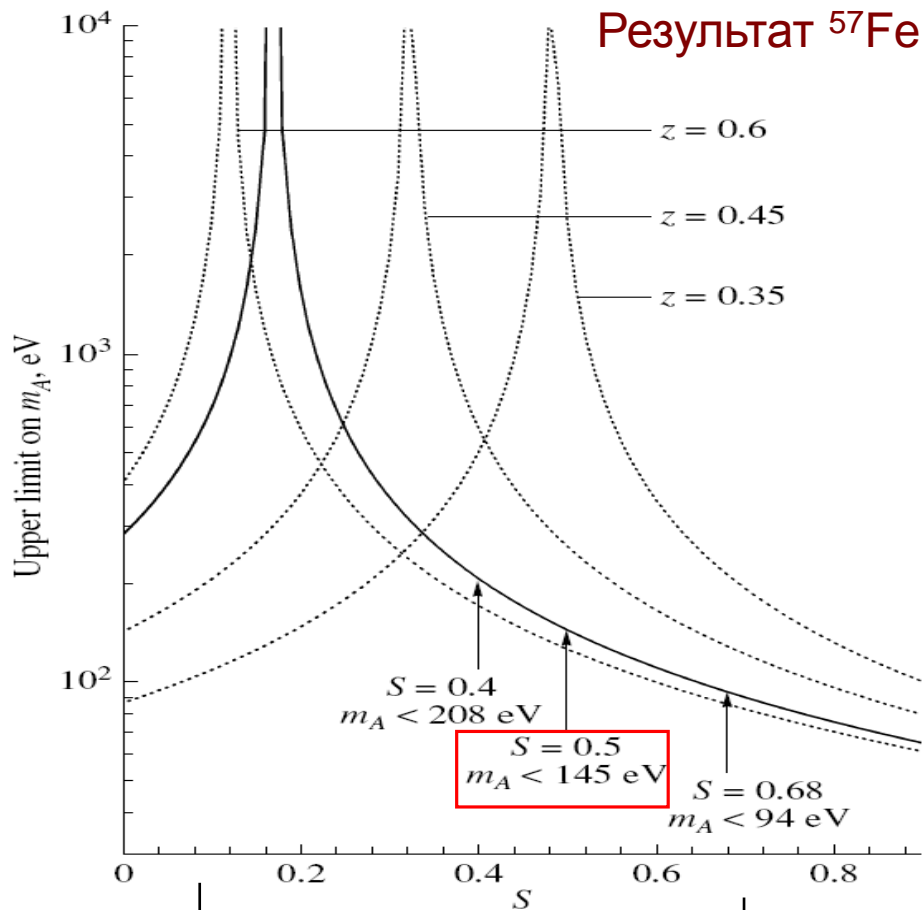
$$g_{AN}^0 = -4.03 \times 10^{-8} (m_A/1 \text{ eV})$$

$$g_{AN}^3 = -2.75 \times 10^{-8} (m_A/1 \text{ eV})$$

$$R_A [\text{s}^{-1}] = \begin{cases} 1.56 \times 10^{-3} (\omega_A/\omega_\gamma)^2, \\ 5.16 \times 10^{-3} (g_{AN}^0 \beta + g_{AN}^3)^4 (p_A/p_\gamma)^6 \\ 9.29 \times 10^{-34} (m_A)^4 (p_A/p_\gamma)^6. \end{cases}$$

Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксиона ядром  $^{57}\text{Fe}$  зависит от вероятности испускания аксиона  $(\omega_A/\omega_\gamma)^4$  -> константы связи аксиона с нуклонами  $(g_{AN}^0 \beta + g_{AN}^3)^4$  ( $D=0,808$ ,  $F=0,462$ )-> и массы аксиона  $m_A^4$ . Численные соотношения получены для модели KSVZ с конкретными значениями параметров  $S, z, \beta, \eta$ .

# Верхний предел на $m_A$ для KSVZ аксиона (от S и z)



$$\omega_A/\omega_\gamma \leq 1.63 \times 10^{-11},$$

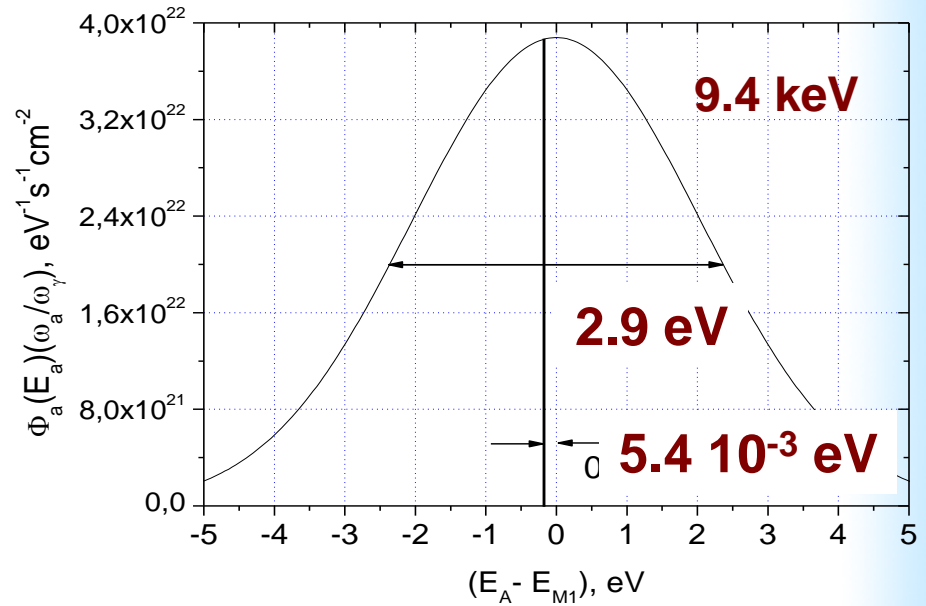
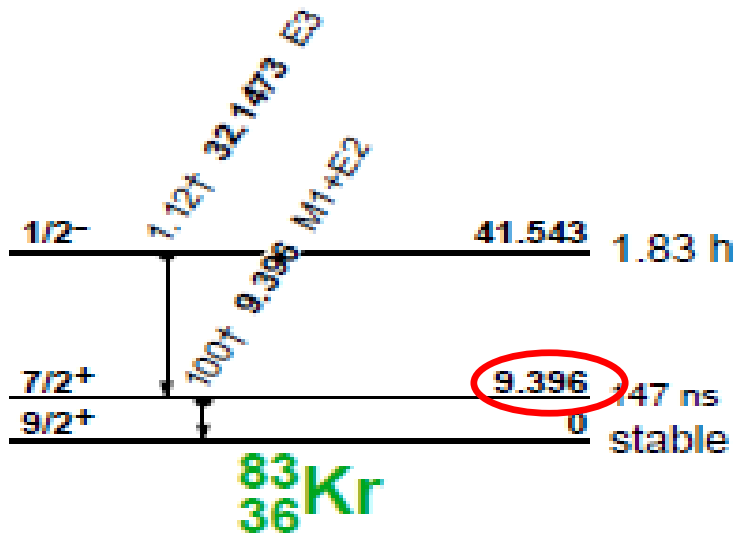
$$|-1.19g_{AN}^0 + g_{AN}^3| \leq 3.0 \times 10^{-6}$$

$$m_A \leq 145 \text{ eV},$$

Можно показать, что если значения  $S$  и  $z$  удовлетворяют соотношению  $S = 1 - 1.5(z \pm 0.01)$ , то вероятность испускания аксиона  $\omega_A/\omega_\gamma$  близка к нулю. Отрицательное значение параметра  $\beta$  вместе с широкими интервалами возможных значений  $S$  и  $z$  приводит к большой неопределенности в ожидаемой вероятности испускания аксиона в переходе  $M1$  с энергией 14,4 кэВ в ядре  $^{57}\text{Fe}$ , и это также является серьезным недостатком ядра  $^{83}\text{Kr}$ .

Верхний предел массы адронного аксиона сильно зависит от конкретных значений параметров  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $S$  и  $z$ . Неопределенность в значении параметра  $S$  существенно изменяет предел на массу аксиона:  $m_A < 208 \text{ эВ}$  при  $S = 0,4$  и  $m_A < 94 \text{ эВ}$  при  $S = 0,68$ . Более того, при  $S \approx 0,17$  предел массы адронного аксиона получить невозможно, поскольку  $|g_{AN}^0 \beta + g_{AN}^3| = 0$ .

# Резонансное возбуждение ядер $^{83}\text{Kr}$

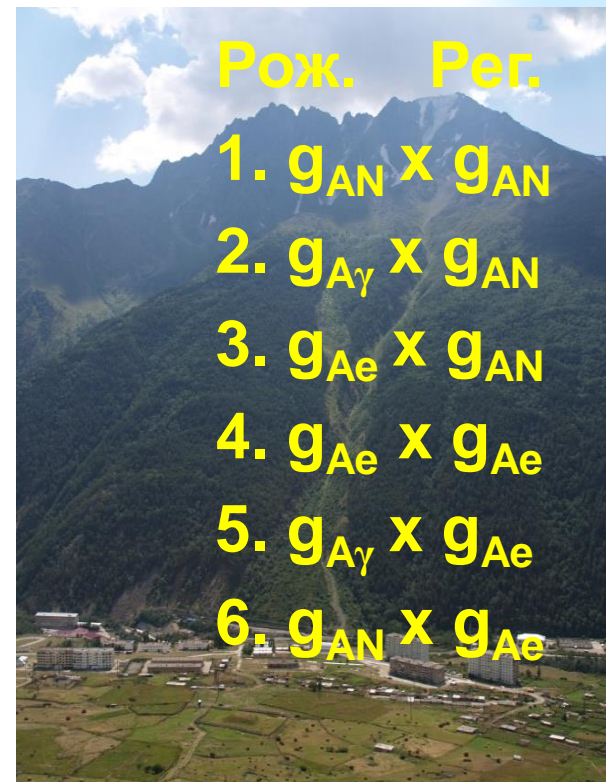


$$\Phi_A = N \frac{2 \exp(-E_\gamma / kT)}{1 + 2 \exp(-E_\gamma / kT)} \frac{\omega_A}{\tau_\gamma \omega_\gamma}$$

$$\frac{\omega_A}{\omega_\gamma} = \frac{1}{2\pi\alpha(1 + \delta^2)} \left[ \frac{g_{AN}^0\beta + g_{AN}^3}{(\mu_0 - 0.5)\beta + \mu_3 - \eta} \right]^2 \left( \frac{p_A}{p_\gamma} \right)^3$$

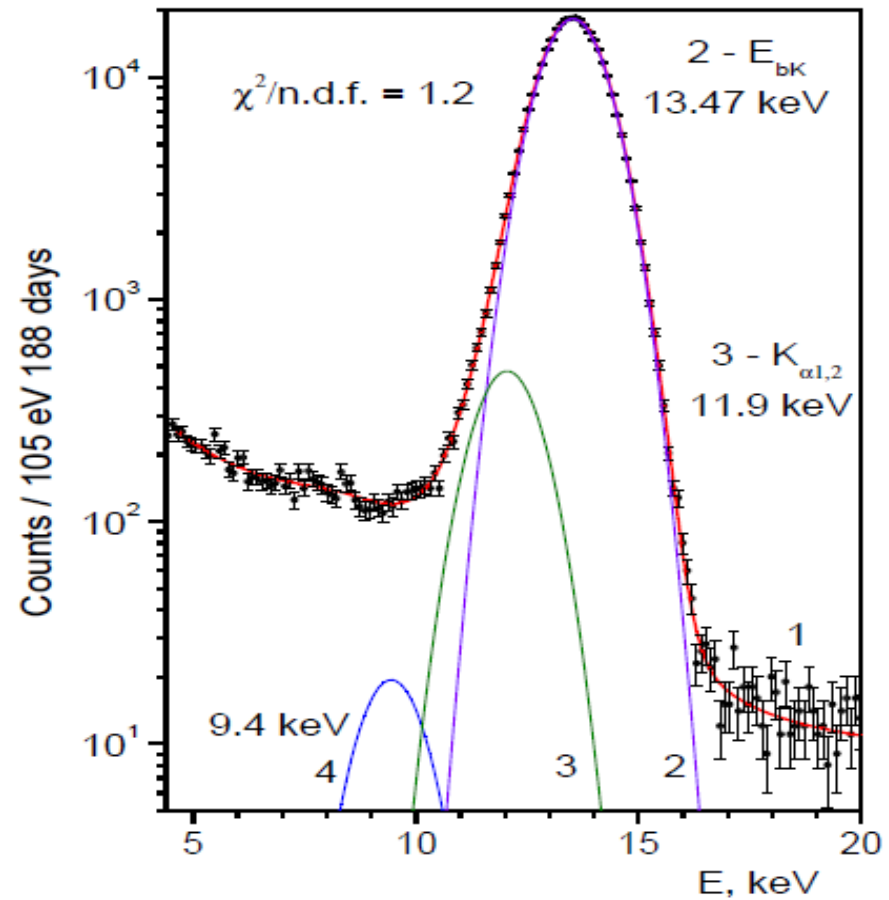
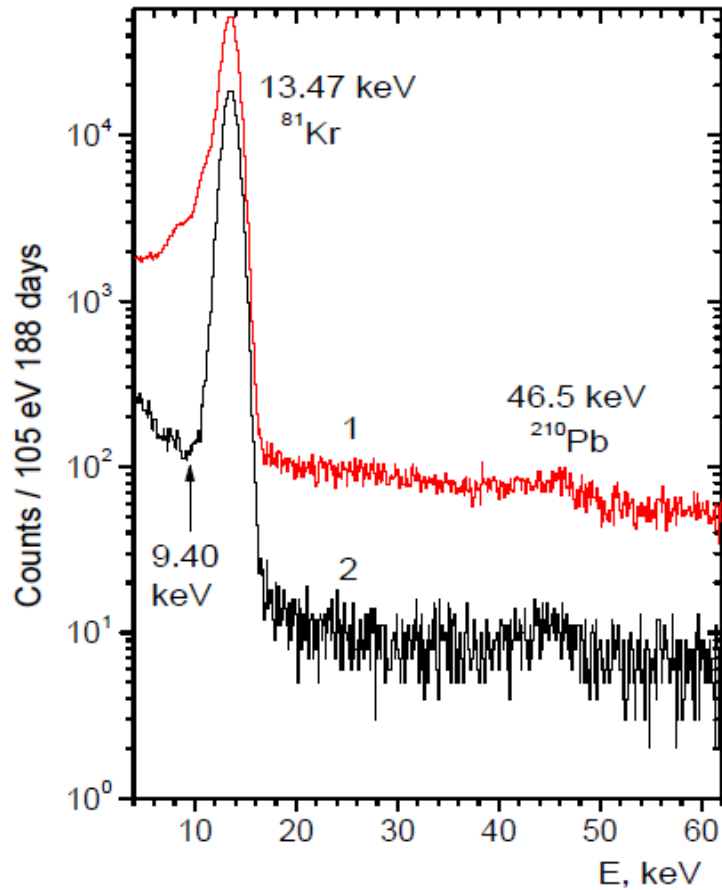
**Возможность совмещения детектора и мишени.** Энергия первого возбужденного ядерного уровня равна  $9,4$  кэВ, а коэффициент электронной конверсии равен  $\alpha = 17,1$ . Из-за доплеровского уширения спектр аксиона представляет собой гауссову кривую  $\Phi_A(E_A)$  с шириной  $\sigma_S(T) = E_\gamma(kT/M)^{1/2}$ ,  $= 1,23$  эВ. Эта величина существенно превышает энергию ядра отдачи ( $0,5$  мэВ), доплеровское уширение линии при температуре  $T = 300$  К ядер мишени ( $5,4$  мэВ) и собственную ширину уровня  $\Gamma = 3,0 \times 10^{-9}$  эВ. Таким образом, доля аксионов, удовлетворяющих условию резонансного поглощения, равна  $\sim \Gamma/\sigma_S \sim 10^{-9}$ . На Солнце  $\text{Kr} / \text{H} = 1,78 \times 10^{-9}$  атом/атом.

# Поиск солнечных аксионов, излучаемых в М1-переходе $^{83}\text{Kr}$ – (ИЯИ+ПИЯФ)



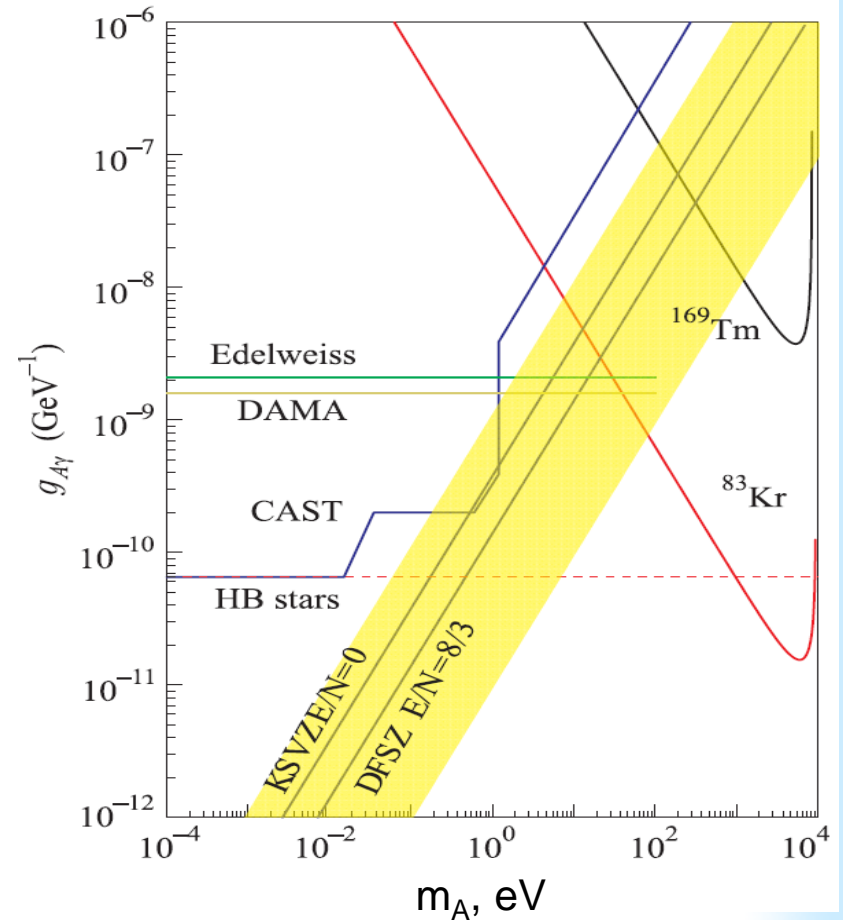
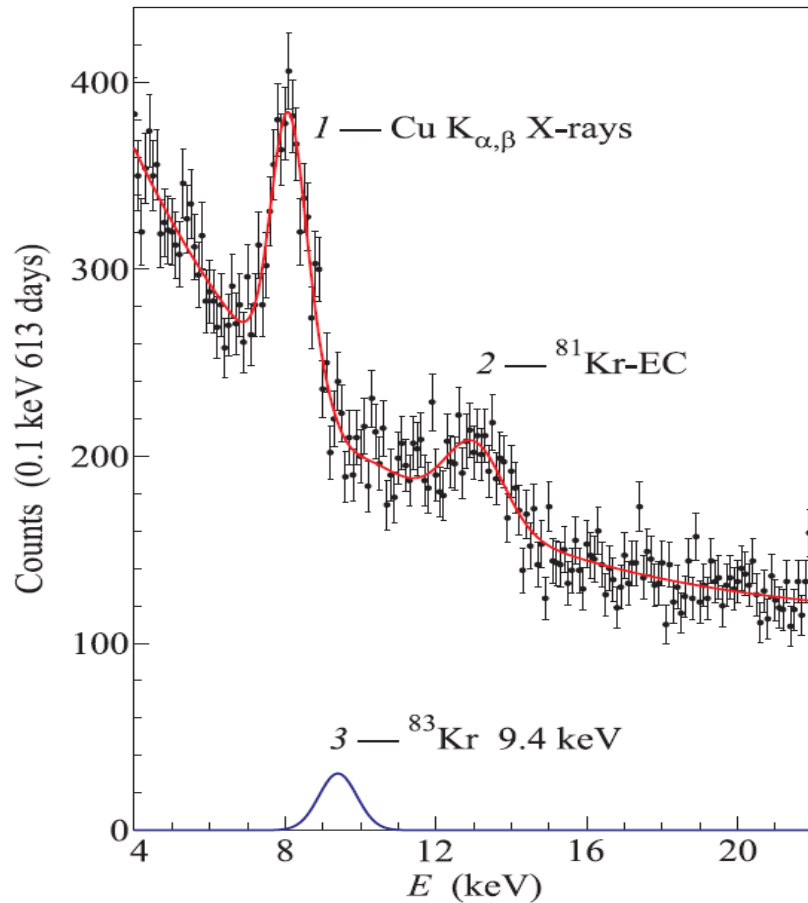
Проведен поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер  $^{83}\text{Kr}$  на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения:  $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma (9.4 \text{ кэВ})$ . Для регистрации  $\gamma$ -квантов и электронов, возникающих в результате разрядки ядерного уровня, использовался большой ( $d=150, L=600$  мм, 8.8 л) пропорциональный счетчик, заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории **Баксанской нейтринной обсерватории**. Слева – два пропорциональных Kr-счетчика с первым слоем пассивной защиты. В центре – низкофоновая камера. Справа – гора Андырчи, под которой расположена БНО ИЯИ на глубине 4800 м.в.э..

# Ограничение константы связи аксиона с нуклонами $g_{AN}$ (поглощение) $\times$ $g_{AN}$ (излучение)



В первой серии измерений (58%  $^{83}\text{Kr}$ ) установлено новое ограничение на изоскалярную и изовекторную константы связи аксиона с нуклонами  $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1.29 \times 10^{-6}$ , которое в модели адронного аксиона приводит к **новому** верхнему пределу на массу аксиона  $m_A \leq 100$  эВ (95% у.д.). Предыдущий предел улучшен в 1.5 раза. Фон от  $^{81}\text{Kr}$ .

# Ограничения на константу связи аксиона с фотоном $g_{AN} \times g_{A\gamma}$

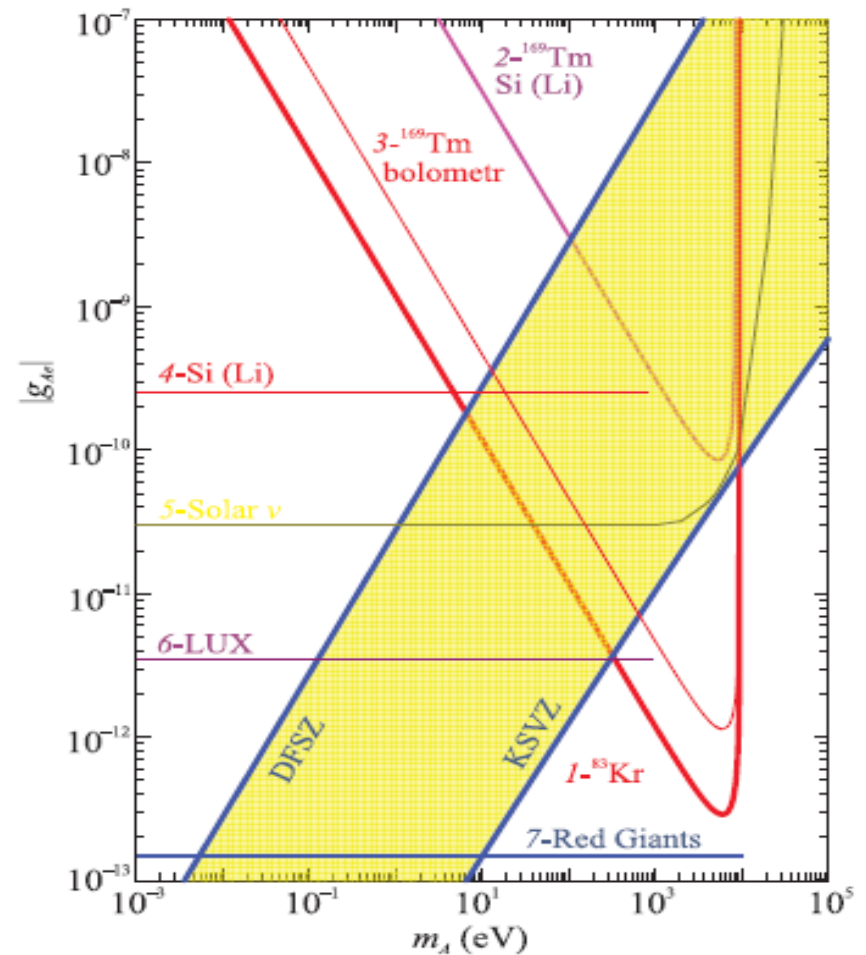
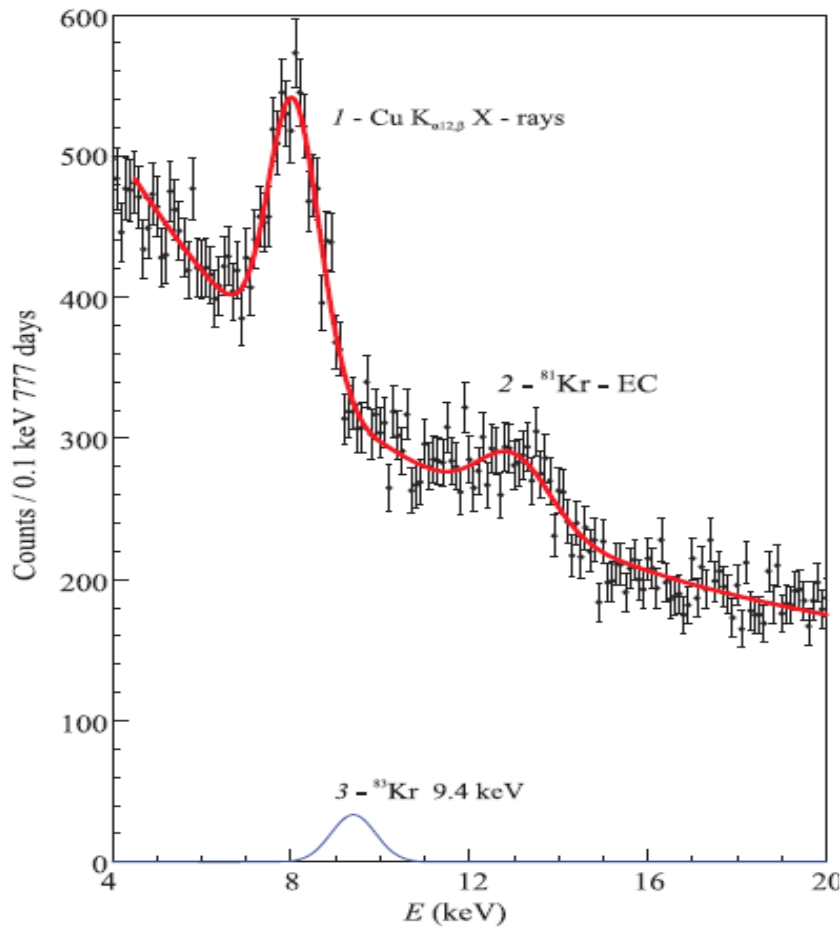


Проведен поиск резонансного возбуждения первого ядерного уровня ядра  $^{83}\text{Kr}$  (99.9%) аксионами, образующимися на Солнце в результате эффекта Примакова. В результате получены новые ограничения  $|g_{A\gamma}(g_{AN}^3 - g_{AN}^0)| \leq 8.02 \times 10^{-16}$  и  $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.3 \times 10^{-17}$ , которые в модели адронного аксиона соответствует новому ограничению на массу аксиона  $m_A \leq 12.7(\times 32) = 406$  эВ для 95% у.д.



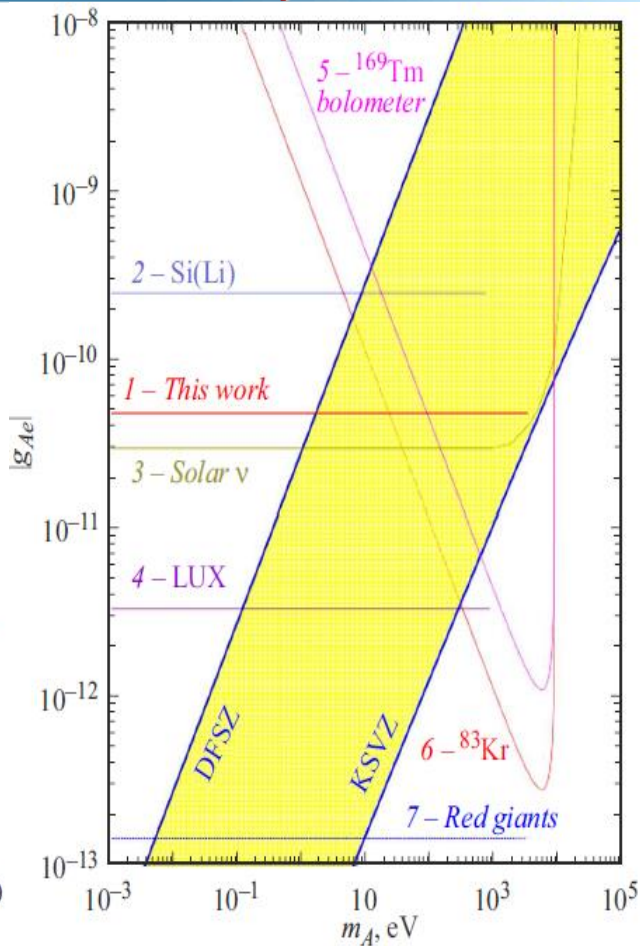
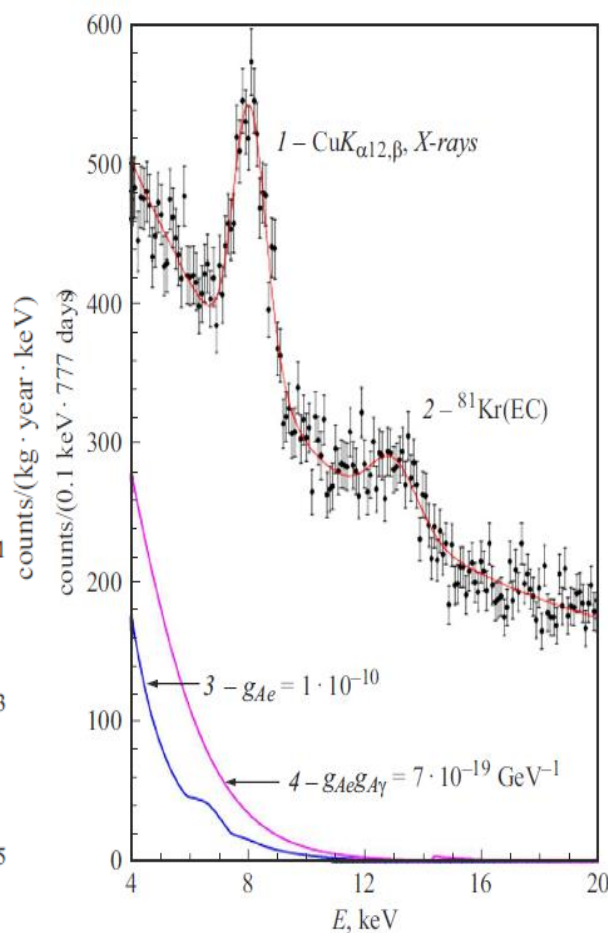
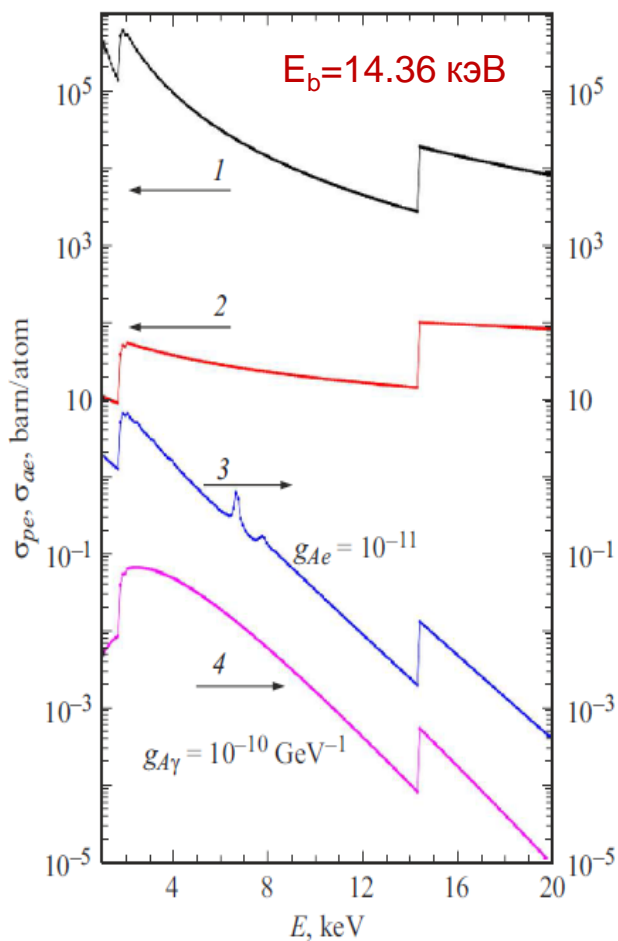
# Ограничения на константу связи аксиона с электроном

$$g_{AN} \times g_{Ae}$$



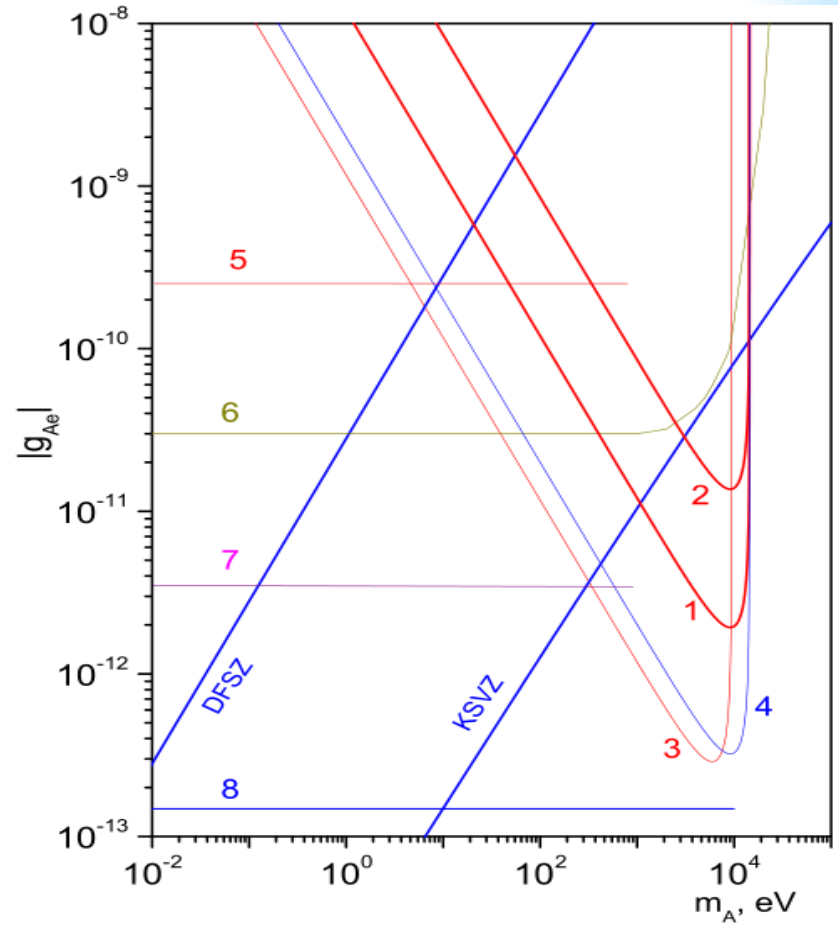
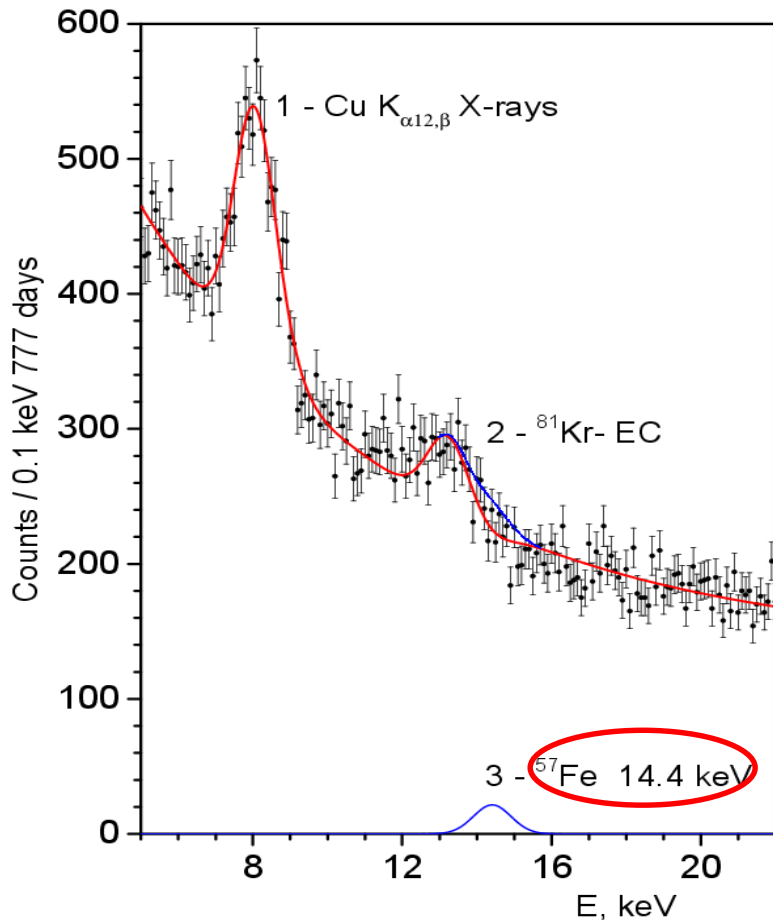
В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с электроном и нуклонами  $|g_{Ae}(g_{AN}^3 - g_{AN}^0)| \leq 1.50 \times 10^{-17}$  (90% у.д.), которое соответствует новым ограничениям на массу аксиона  $m_A \leq 320$  эВ и  $m_A \leq 4.6$  эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

# Ограничения на $g_{Ae}$ и $g_{A\gamma}$ из аксиоэлектрического эффекта на атомах Kr : $g_{Ae} \times g_{Ae}$ и $g_{A\gamma} \times g_{Ae}$



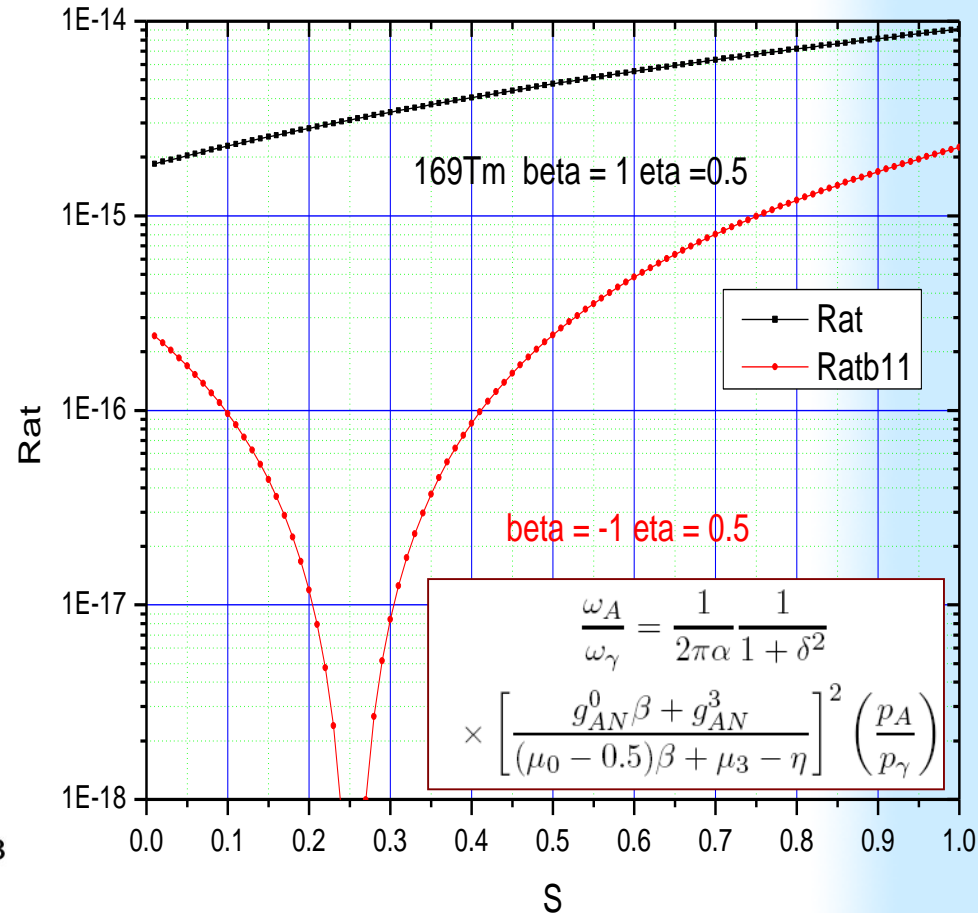
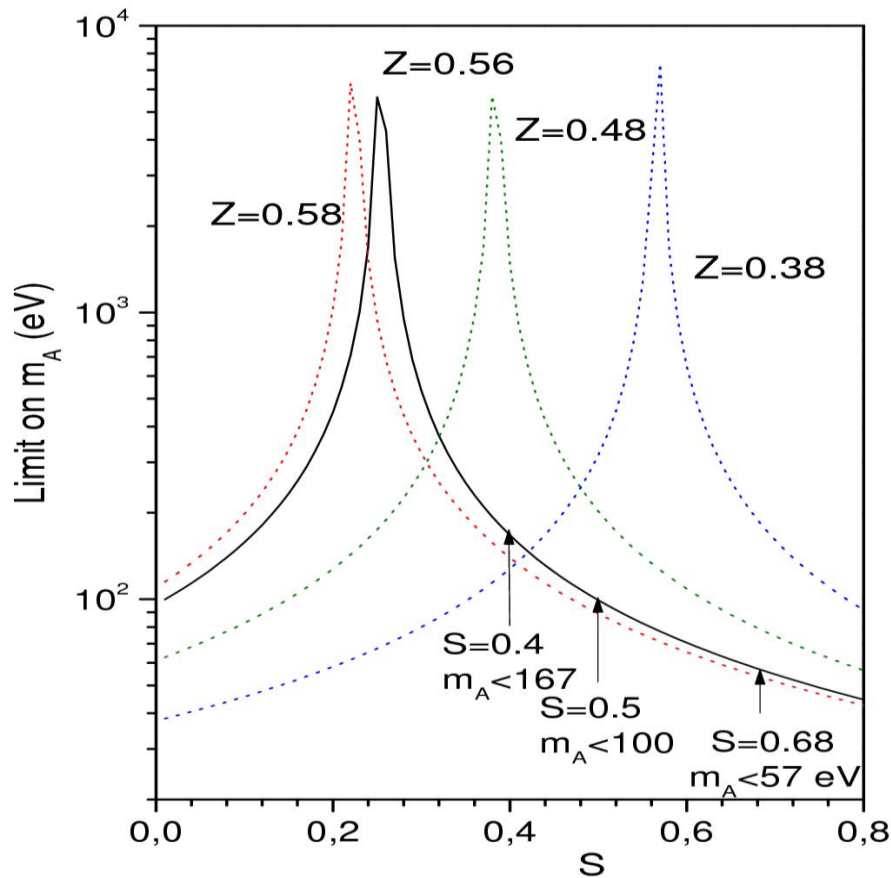
Проведен поиск аксиоэлектрического эффекта в атомах криптона для солнечных аксионов. В результате получены новые ограничения на константу связи аксиона с электроном  $|g_{Ae}| \leq 4.9 \times 10^{-11}$  и на произведение констант связи с электроном и фотоном  $|g_{Ae} g_{A\gamma}| \leq 1.6 \times 10^{-19} \text{ ГэВ}^{-1}$ , все для 90% у.д. Исключены массы  $> 2$  эВ (DFSZ).

# Поиск А.Э. эффекта для $14.4 \text{ кэВ } ^{57}\text{Fe}$ аксионов $g_{AN} \times g_{Ae}$



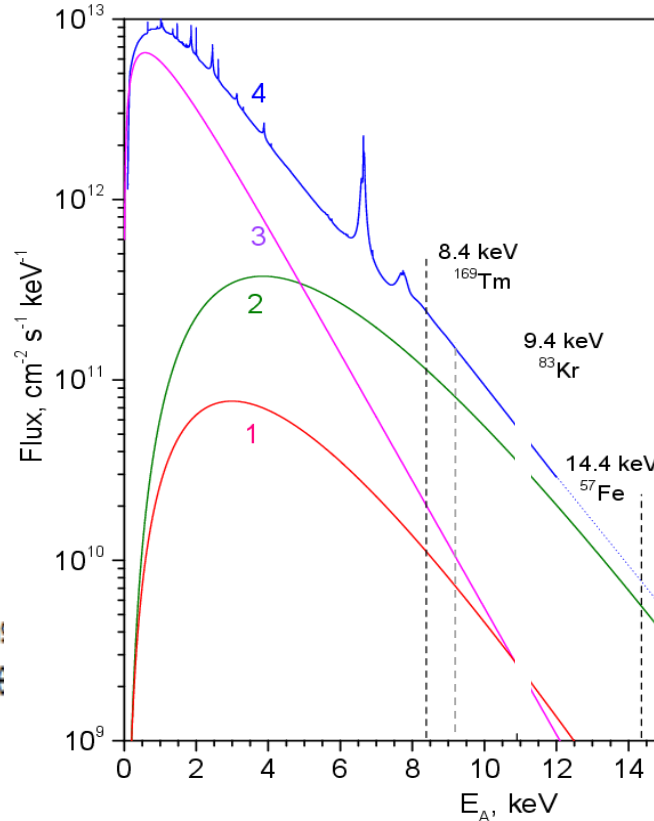
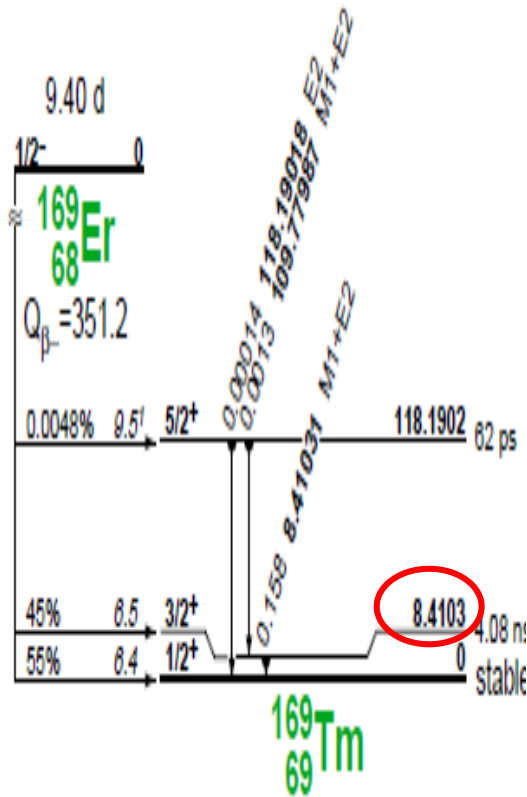
Выполнен поиск аксионов с энергией  $14.4 \text{ keV}$ , возникающих в ядерном  $M1$ -переходе изотопа  $^{57}\text{Fe}$  на Солнце, с помощью аксиоэлектрического эффекта в атомах  $\text{Kr}$ . В результате установлен новый верхний предел на произведение константы связи аксиона с электроном и эффективной константы связи с нуклонами:  $|g_{Ae} g_{AN}^{\text{eff}}| \leq 3.2 \cdot 10^{-16}$  для 90% у.д. (1-DFSZ  $m_{A'} < 30$ , 2-KSVZ, 3- $^{83}\text{Kr}$ , 4-Edelweiss, 5-Si(Li), 6- $\nu$ , 7-LUX, 8-RG)

# $^{83}\text{Kr}$ : пределы на $m_A$ в зависимости от $S$ и $z$



Отрицательное значение параметра  $\beta$ , вместе с широкими интервалами возможных значений  $S$  и  $z$ , приводит к большой неопределенности в ожидаемой вероятности испускания аксиона в переходе  $M1$  9,4 кэВ в ядре  $^{83}\text{Kr}$ , и это является серьезным недостатком при поиске таких аксионов. Полученный предел на массу аксиона сильно зависит от точных значений параметров  $S$  и  $z$ . Это не относится к другому ядру- $^{169}\text{Tm}$ .

# Резонансное поглощение ядрами $^{169}\text{Tm}$



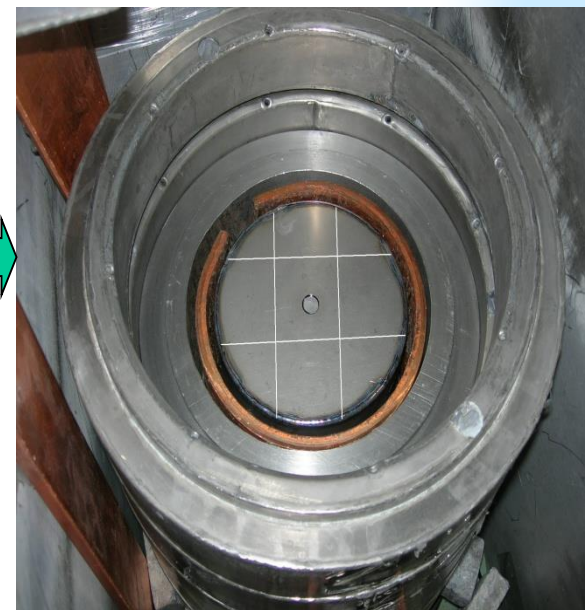
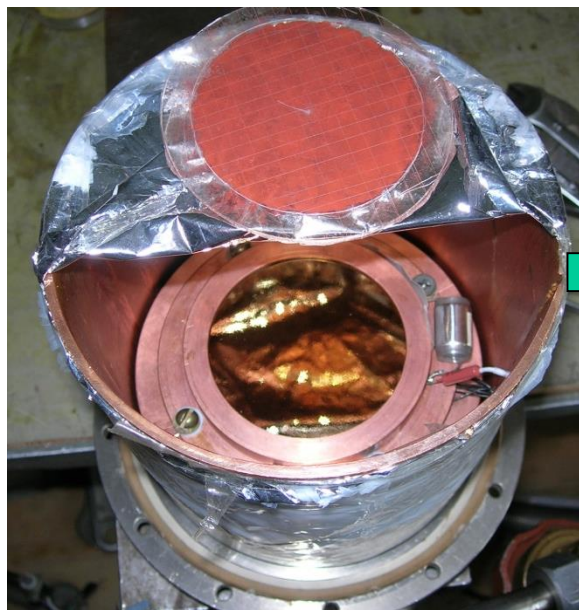
$$R_A = \pi \sigma_0 \gamma \Gamma \frac{d\Phi_A}{dE_A} (E_A = 8.4) \left( \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \right),$$

$$\frac{\omega_A}{\omega_\gamma} = \frac{1}{2\pi\alpha} \frac{1}{1+\delta^2} \left[ \frac{g_{AN}^0 \beta + g_{AN}^3}{(\mu_0 - 0.5)\beta + \mu_3 - \eta} \right]^2 \left( \frac{p_A}{p_\gamma} \right)^3$$

$^{169}\text{Tm}$  имеет нечетное число нуклонов и неспаренный протон, в одночастичном приближении значения  $\beta$  и  $\eta$  можно оценить как  $\beta \approx 1,0$  и  $\eta \approx 0,5$ . В отличие от солнечных аксионов  $14,4 \text{ кэВ } ^{57}\text{Fe}$  и  $9,4 \text{ кэВ } ^{83}\text{Kr}$ , неопределенность  $S$  и  $z$  не изменяет существенно полученные ограничения

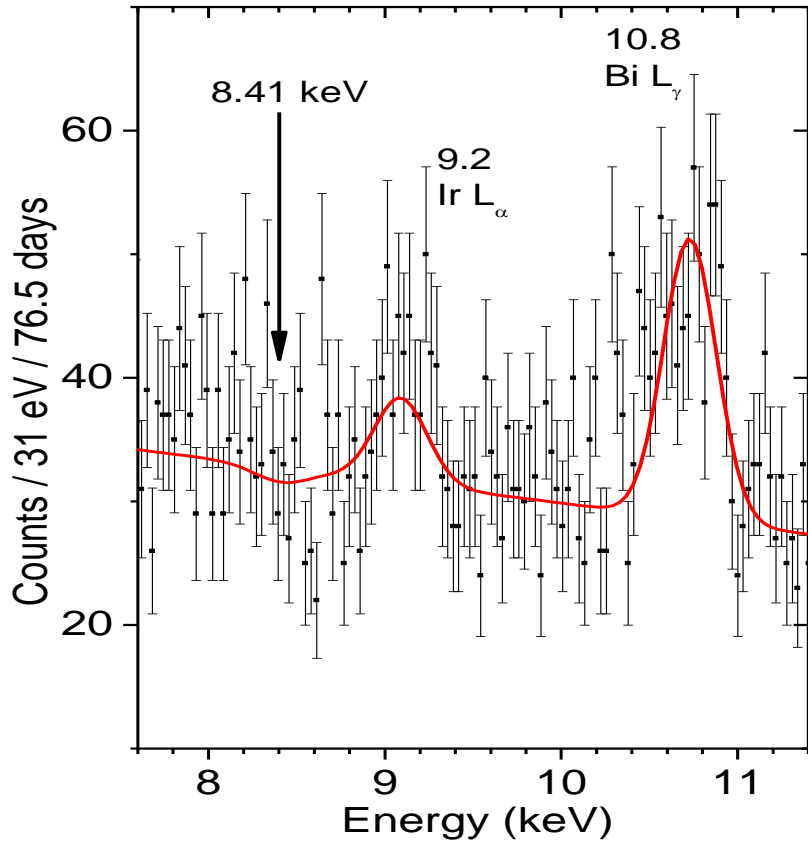
$\text{Tm}$  имеет один стабильный изотоп. Поглощение аксионов  $A + ^{169}\text{Tm} \rightarrow ^{169}\text{Tm}^* \rightarrow ^{169}\text{Tm} + \gamma(8.41 \text{ keV})$ , ведет к возбуждению уровня ( $3/2^+$ ) с энергией 8.41 кэВ. Поток примакровских аксионов при этой энергии всего в 7 раз меньше чем в максимуме. Уровень  $8.41 \text{ keV}$  разряжается  $M1$ -переходом с примесью  $E2$ -перехода  $\delta_2 = 0.11\%$ . Коэффициент электронной конверсии составляет  $e/\gamma = 263$ , максимальное сечение поглощения  $\gamma$ -квантов  $2.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ . Принципиальное отличие перехода  $M1$  в ядре  $^{169}\text{Tm}$  от аналогичных переходов в ядрах  $^{57}\text{Fe}$  и  $^{83}\text{Kr}$  состоит в том, что это преимущественно протонный переход. Это особенно важно для поиска  $KSVZ$ - аксионов, константа связи которых с нейтроном мала. Кроме того, отношение  $\omega_A/\omega_\gamma$ , которое может обращаться в нуль для нейтронных переходов, для протонного перехода отлично от нуля.

# Si(Li)-детектор и Tm-мишень внутри низкофоновой установки



Первоначально поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами  $^{169}\text{Tm}$  был выполнен с использованием детектора  $\text{Si}(\text{Li})$  и мишени  $\text{Tm}$ . Ожидаемая скорость счета аксионов пропорциональна  $R \sim (g_{\text{Ay}} \times g_{\text{AN}})^2$  для аксионов Примакова и  $R \sim (g_{\text{Ae}} \times g_{\text{AN}})^2$  для комптоновских и тормозных аксионов. Для поиска квантов с энергией  $8,41 \text{ кэВ}$  использовался планарный  $\text{Si}(\text{Li})$ -детектор с диаметром чувствительной области  $66 \text{ мм}$  и толщиной  $5 \text{ мм}$ . Детектор устанавливался на медной пластине толщиной  $5 \text{ см}$ , которая защищала детектор от внешней радиоактивности. Детектор и держатель помещались в вакуумный криостат и охлаждались до температур жидкого азота. Мишень  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  массой  $2 \text{ г}$  равномерно наносилась на подложку из оргстекла диаметром  $70 \text{ мм}$  на расстоянии  $1,5 \text{ мм}$  от поверхности детектора. Внешняя пассивная защита из слоев меди, железа и свинца подгонялась под криостат и устраняла внешний радиоактивный фон примерно в  $500$  раз. Установка располагалась на поверхности земли и была собрана из пяти пластиковых сцинтилляторов размером  $50 \times 50 \times 12 \text{ см}^3$  от космических лучей и быстрых нейтронов.

# $^{169}\text{Tm}$ : Результаты поиска резонансного поглощения



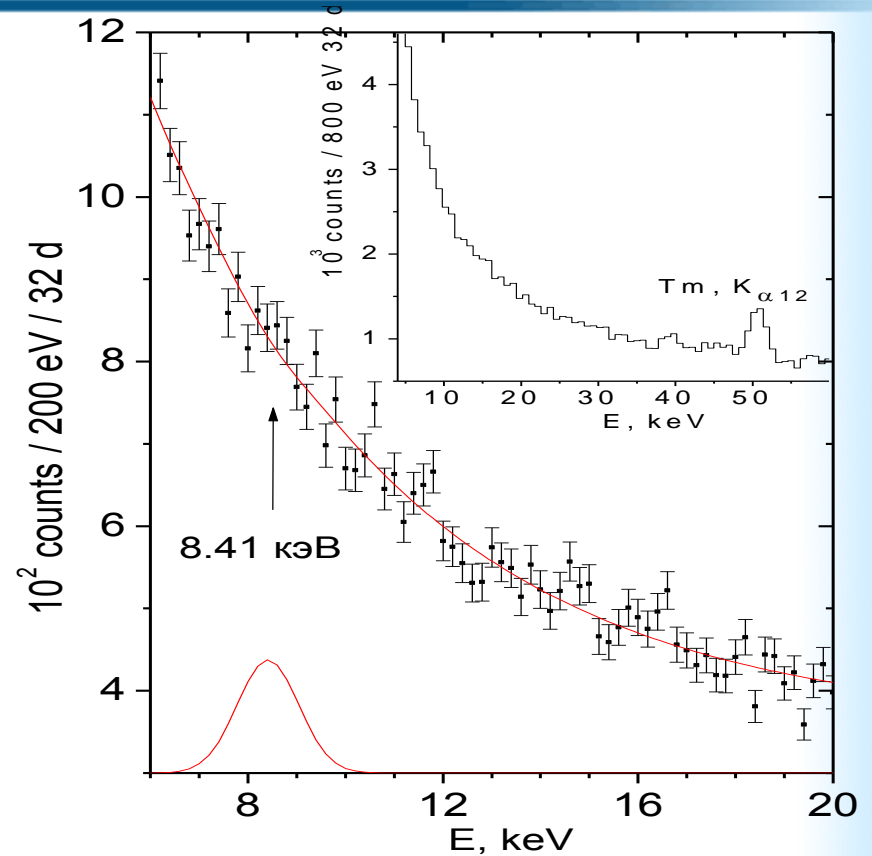
Спектр, измеренный  $2 \text{ cm}^2$   $\text{Si(Li)}$ -детектором в области 7.6-11.4 кэВ. Ограничения на константы связи аксина с фотонами и нуклонами:

$$g_{A\gamma} \cdot |(g_{AN}^0 + g_{AN}^3)| \leq 9.2 \times 10^{-13}$$

$$g_{A\gamma} m_A \leq 1.36 \times 10^{-14}$$

$$m_A \leq 191 \text{ eV}$$

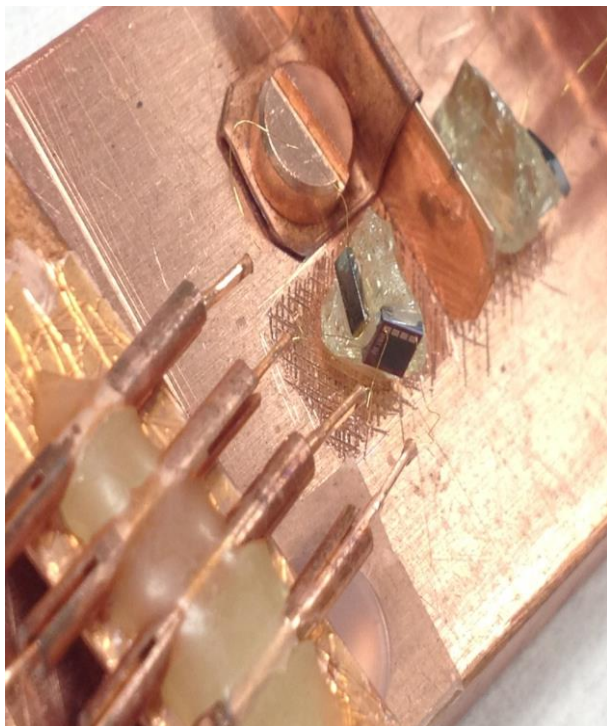
$$g_{Ae} \times |(g_{AN}^0 + g_{AN}^3)| \leq 2.1 \times 10^{-14}$$



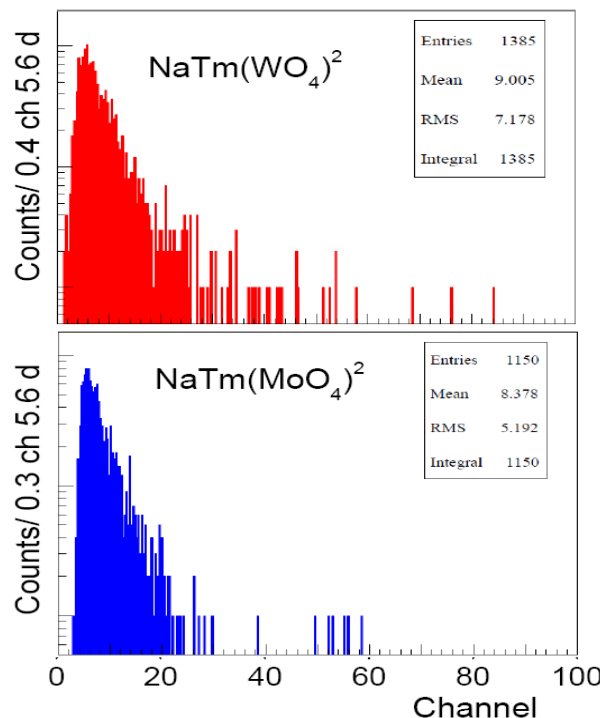
Спектр  $34 \text{ cm}^2$   $\text{Si(Li)}$ -детектора, измеренный с  $^{169}\text{Tm}$  мишенью. Ограничения на константы связи аксина с электронами и фотонами:

# Кристаллы $\text{NaTm}(\text{MoO}_4)_2$ и $\text{NaTm}(\text{WO}_4)_2$ как болометры

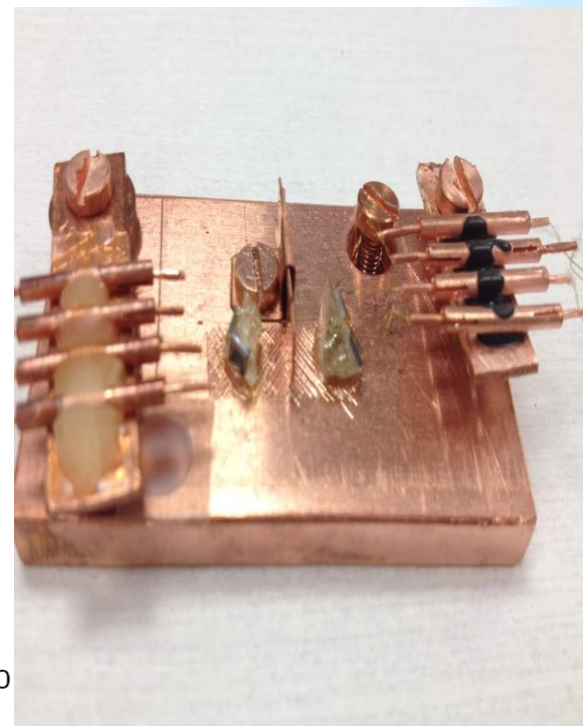
$$(e / \gamma = 260) \times (1 / \epsilon = 20) \times (M / m = 500) \times (B\sigma_s / B\sigma_b = 1)^{0.5} = 2.5 \times 10^6$$



Кристаллы внутри криогенной установки



Спектры фононных сигналов за 135 ч.

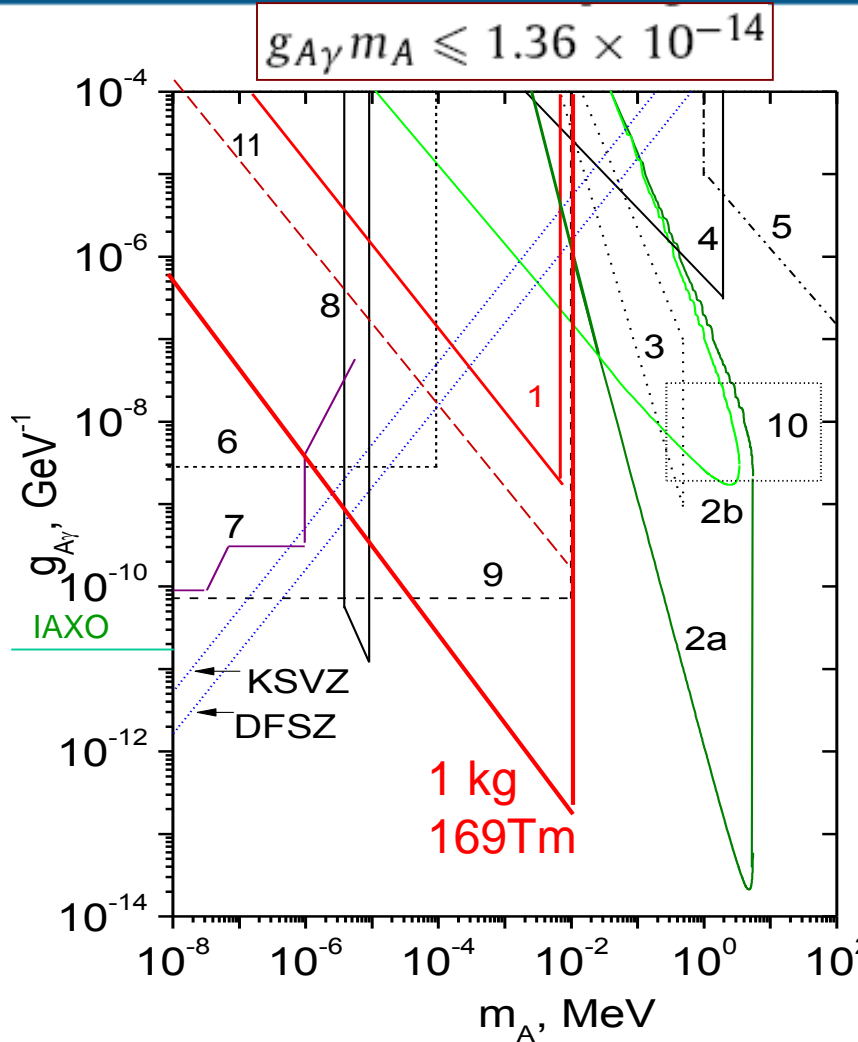


Кристаллы внутри криогенной установки

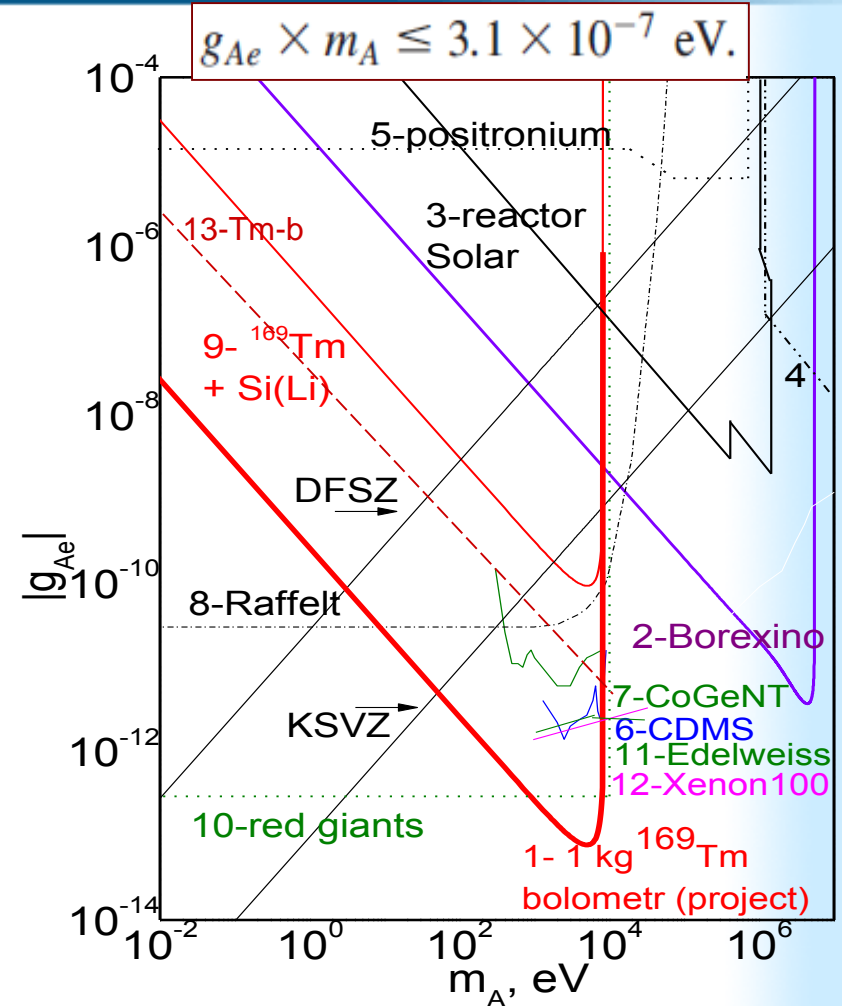
Кристаллы (ИHX СО РАН) были испытаны как болометрические детекторы для поиска резонансного поглощения солнечных аксионов, имеющих непрерывный спектр. Кристаллы были доставлены из ПИЯФ в лабораторию Гран Сассо, смонтированы в криогенной установке вместе с германиевыми термисторами и охлаждены до температуры около 10 мК. Измерены спектры фононных сигналов с 2-х детекторов.



# Ограничения на $g_{A\gamma}$ , $g_{Ae}$ и $m_A$ (мишень=детектор)

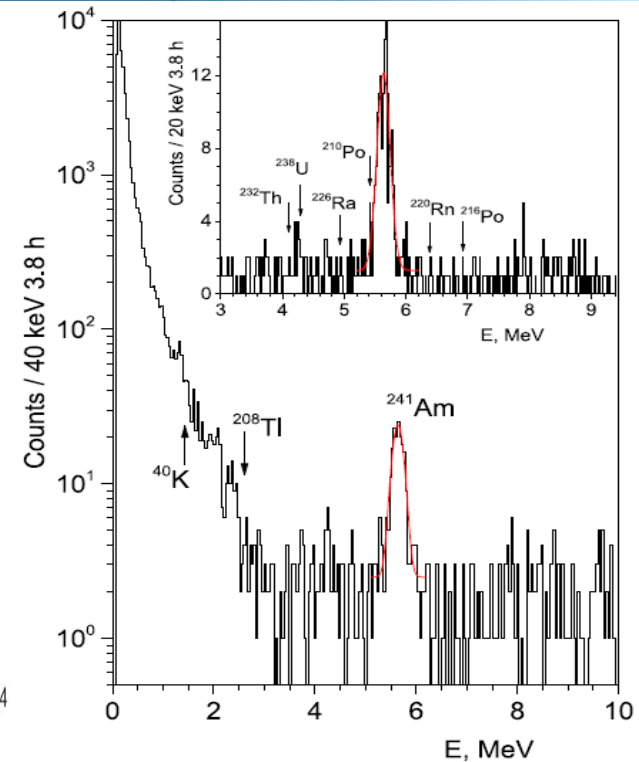
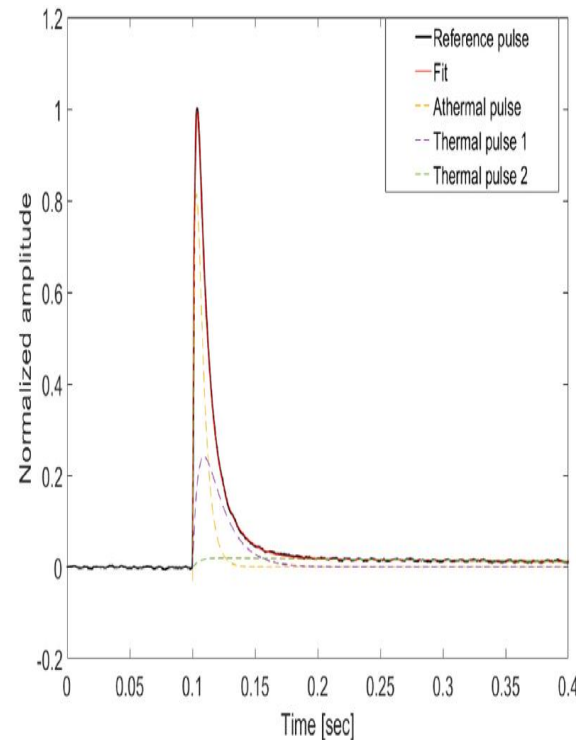


1- The limit on  $g_{A\gamma}$  obtained with  $^{169}\text{Tm}$  target.  
 8-Tm,b. The expected sensitivity of 1 kg Tm bolometer is more than astrophysical limits.



9 – limit on  $g_{Ae}$  obtained with  $^{169}\text{Tm}$  target;  
 13 – 0.2 g  $\text{NaTm}(\text{MoO}_4)_2$  bolometer; 1 – expected sensitivity for 1 kg Tm bolometer.

# $Tm_3Al_5O_{12}$ - новый перспективный болометр для солнечных аксионов: $^{169}Tm + A \rightarrow ^{169}Tm^* (8.4 \text{ кэВ})$



Кристалл  $Tm_3Al_5O_{12}$  внутри медного держателя. Золотые проволочки обеспечивают электрические контакты.

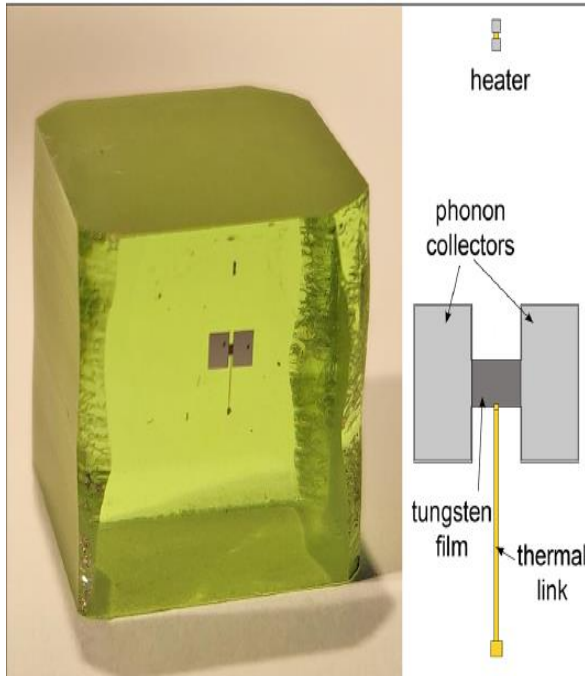
Тепловой импульс при регистрации энергии 1 МэВ в кристалле  $Tm_3Al_5O_{12}$ , охлажденном до  $T = 10 \text{ мК}$ .

Спектр Tm-болометра, измеренный с NTD термистором и результаты подгонки альфа пика  $^{241}Am$ .

ПИЯФ, КИ, ИОФ, МРІ провели исследования свойств тулиевого граната с целью использовать его для поиска резонансного возбуждения 1-го ядерного уровня изотопа  $^{169}Tm$  (8.4 кэВ) солнечными аксионами. Исследована радиационная чистота кристалла, его оптические свойства, получен первый спектр болометрического детектора с термистором NTD. NIM,A949,(2020)

# Новый эксперимент по поиску солнечных аксионов с $Tm_3Al_5O_{12}$ криогенным болометром

Предложен и проведен поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами  $^{169}Tm$ . Новый подход заключается в использовании кристалла  $Tm_3Al_5O_{12}$  как болометрического криогенного детектора. Измерения, проведенные с 8 г кристаллом в течении 6.6 сут. позволили установить новые ограничения на константы связи аксиона с фотонами  $g_{Ay}$  и электронами  $g_{Ae}$ :  $|g_{Ay}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 1.44 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$  and  $|g_{Ae}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 2.81 \times 10^{-16}$ .



Кристалл  $Tm_3Al_5O_{12}$  в с нанесенным термистором TES, схема которого приведена справа.

Eur. Phys. J. C (2020) 80:376  
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7943-5>

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Experimental Physics

## New limits on the resonant absorption of solar axions obtained with a $^{169}Tm$ -containing cryogenic detector

A. H. Abdelhameed<sup>1</sup>, S. V. Bakhlanov<sup>2</sup>, P. Bauer<sup>1</sup>, A. Bento<sup>1,7</sup>, E. Bertoldo<sup>1</sup>, L. Canonica<sup>1</sup>, A. V. Derbin<sup>2</sup>, I. S. Drachnev<sup>2</sup>, N. Ferreiro Iachellini<sup>1</sup>, D. Fuchs<sup>1</sup>, D. Hauff<sup>1</sup>, M. Laubenstein<sup>3</sup>, D. A. Lis<sup>4</sup>, I. S. Lomskaya<sup>2</sup>, M. Mancuso<sup>1</sup>, V. N. Muratova<sup>2</sup>, S. Nagorny<sup>5</sup>, S. Nisi<sup>3</sup>, F. Petricca<sup>1</sup>, F. Proebst<sup>1</sup>, J. Rothe<sup>1</sup>, V. V. Ryabchenkov<sup>6</sup>, S. E. Sarkisov<sup>6</sup>, D. A. Semenov<sup>2</sup>, K. A. Subbotin<sup>4</sup>, M. V. Trushin<sup>2</sup>, E. V. Unzhakov<sup>2,a</sup>, E. V. Zharikov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Max-Planck-Institut für Physik, 80805 Munich, Germany

<sup>2</sup> NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia

<sup>3</sup> INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy

<sup>4</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

<sup>5</sup> Physics Department, Queen's University, Kingston, ON K7L 3N6, Canada

<sup>6</sup> NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

<sup>7</sup> Departamento de Física, Universidade de Coimbra, P3004 516 Coimbra, Portugal

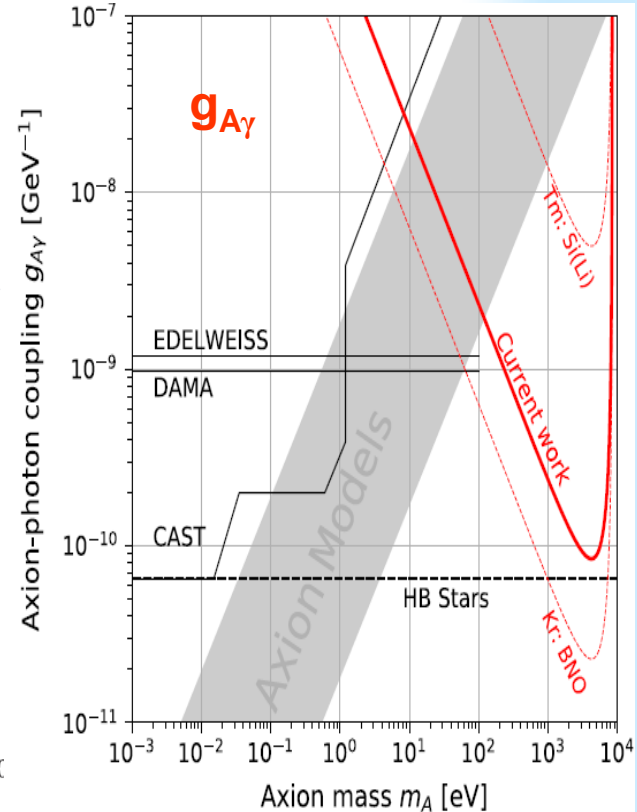
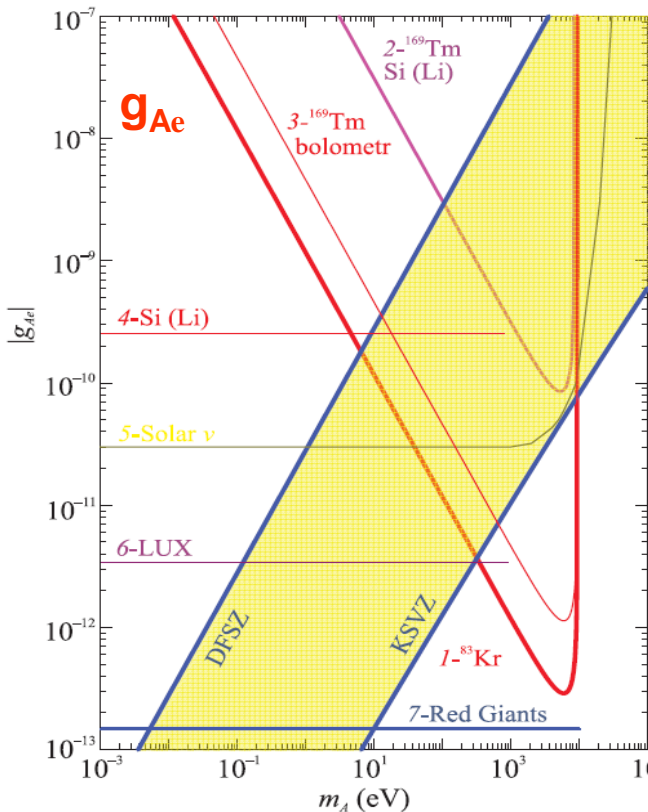
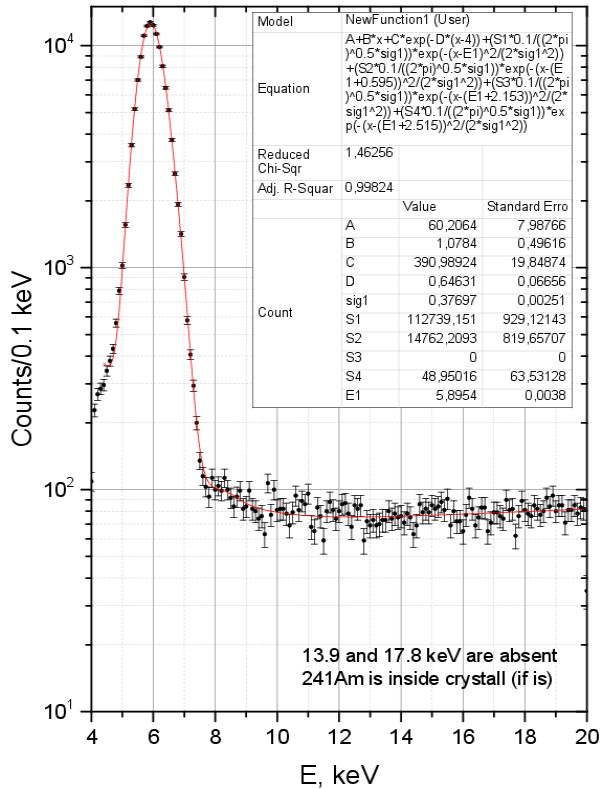
# Первые результаты, полученные с $Tm_3Al_5O_{12}$

Новые пределы, из измерений с TES на константы связи аксиона

$$|g_{Ae}| \times |g^3_{AN} + g^0_{AN}| \leq 2.8 \times 10^{-16} \Rightarrow |g_{Ae} \times m_A| \leq 4.6 \times 10^{-9} \text{ eV}$$

$$|g_{A\gamma}| \times |g^3_{AN} + g^0_{AN}| \leq 1.4 \times 10^{-14} \Rightarrow |g_{A\gamma} \times m_A| \leq 2.3 \times 10^{-7}$$

8 ± 6.6 сут. фон



Верхние пределы на  $g_{Ae}$  и  $g_{A\gamma}$  в сравнении с результатами других экспериментов и астрофизическими ограничениями. Измерения на поверхности Земли, верхний предел на число аксионных событий  $S_{lim}=128$ . Пока уступает результатам  $^{83}Kr$ , но  $\omega_A/\omega_\gamma \ll 0$ .

# Поток и CR 8.4 кэВ $^{169}\text{Tm}$ -солнечных аксионов

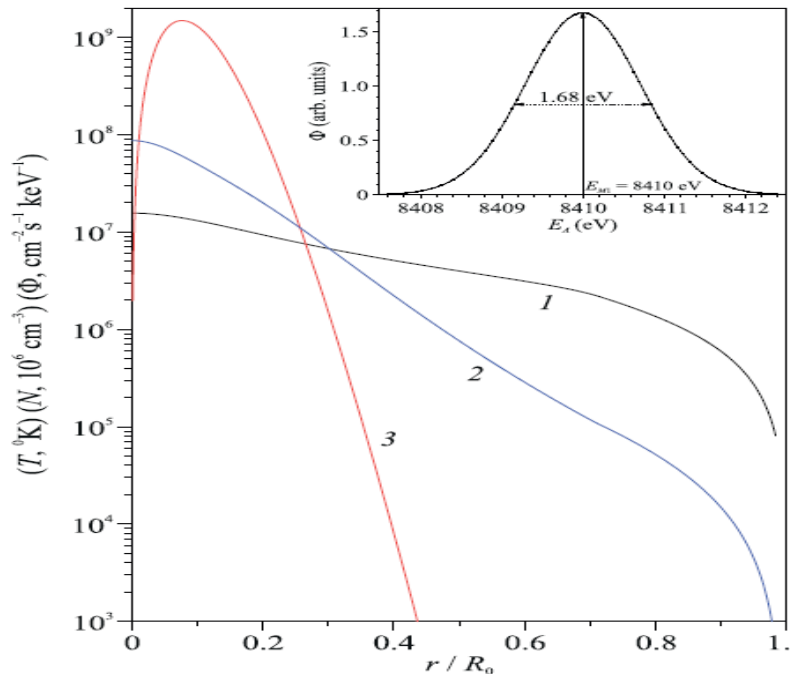
Письма в ЖЭТФ, том 118, вып. 3, с. 154 – 158

© 2023 г. 10 августа

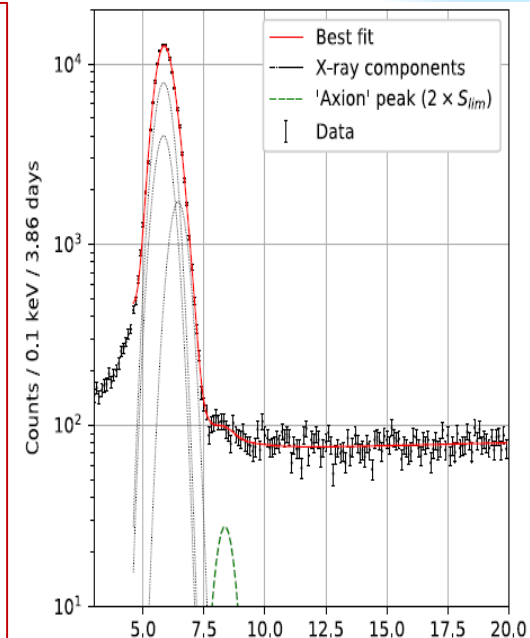
## Поиск солнечных аксионов с энергией 8.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе ядер $^{169}\text{Tm}$

А. В. Дербин<sup>1)</sup>, И. С. Драчнев, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 188300 Гатчина, Россия



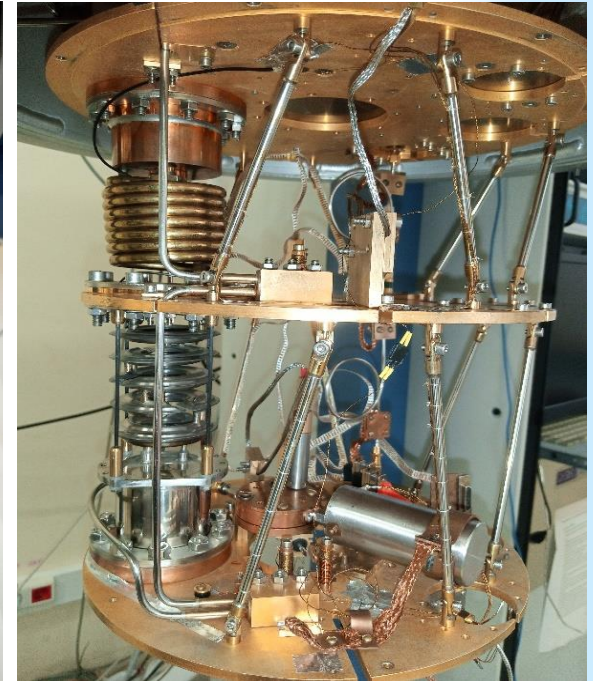
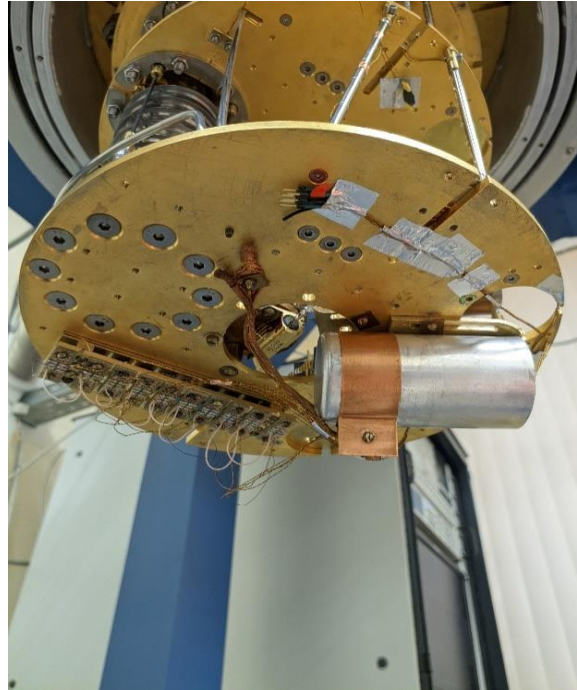
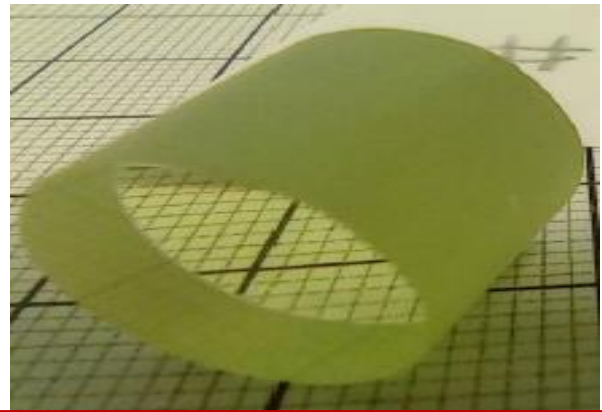
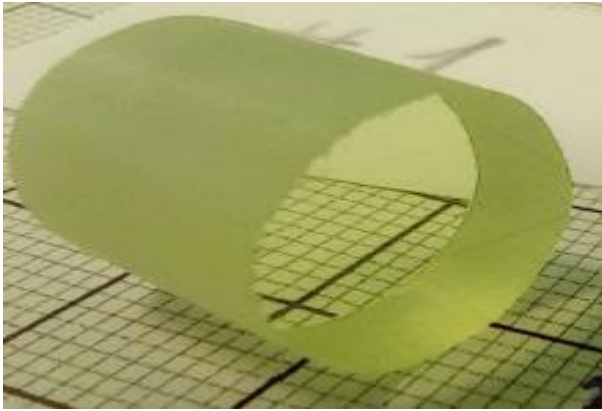
Распределение температуры ( $T$ , К, кривая 1) и концентрации атомов  $^{169}\text{Tm}$  ( $N$ , в единицах  $10^6 \text{ см}^{-3}$ , кривая 2) в зависимости от радиуса  $r$ . Поток аксионов из слоя  $r^2 dr$  для значения  $\omega_A/\omega_\gamma = 4 \times 10^{-14}$  и  $dr = 5 \times 10^{-3} R_\odot$  ( $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ , кривая 3). На вставке показан энергетический спектр солнечных аксионов со средней энергией 8.41 кэВ.



Впервые выполнен поиск резонансного возбуждения 1-го ядерного уровня  $^{169}\text{Tm}$  с энергией 8.4 кэВ солнечными аксионами с энергией 8.4 кэВ, потоки которых были вычислены. Для регистрации использовался болометр на основе тулиевого граната. В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с нуклонами  $|(g_{AN}^3 + g_{AN}^0)| \leq 8.89 \times 10^{-6}$  (90% у.д.), которое соответствует новым ограничениям на массу аксиона  $m_A \leq 115 \text{ эВ}$  и  $m_A \leq 244 \text{ эВ}$  в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона. Для адронного аксиона это наиболее строгое лабораторное ограничение.

# Новые кристаллы $Tm_3Al_5O_{12}$ и криогенная установка в НГТУ

Лаборатория сверхпроводниковой наноэлектроники  
Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева

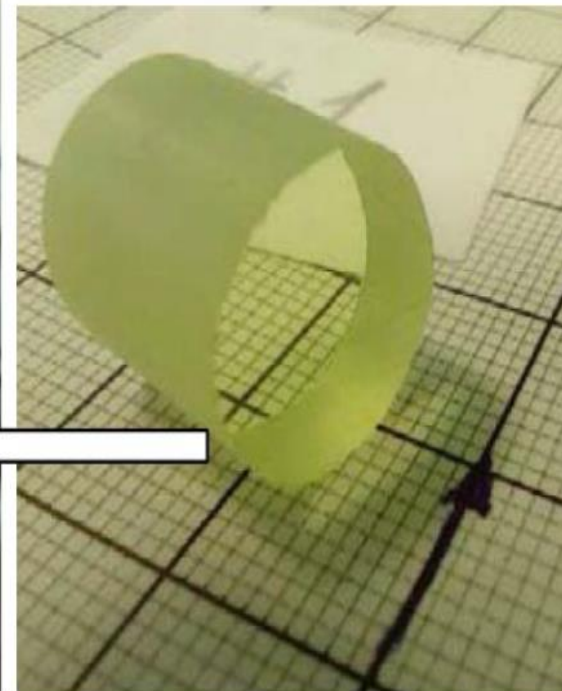
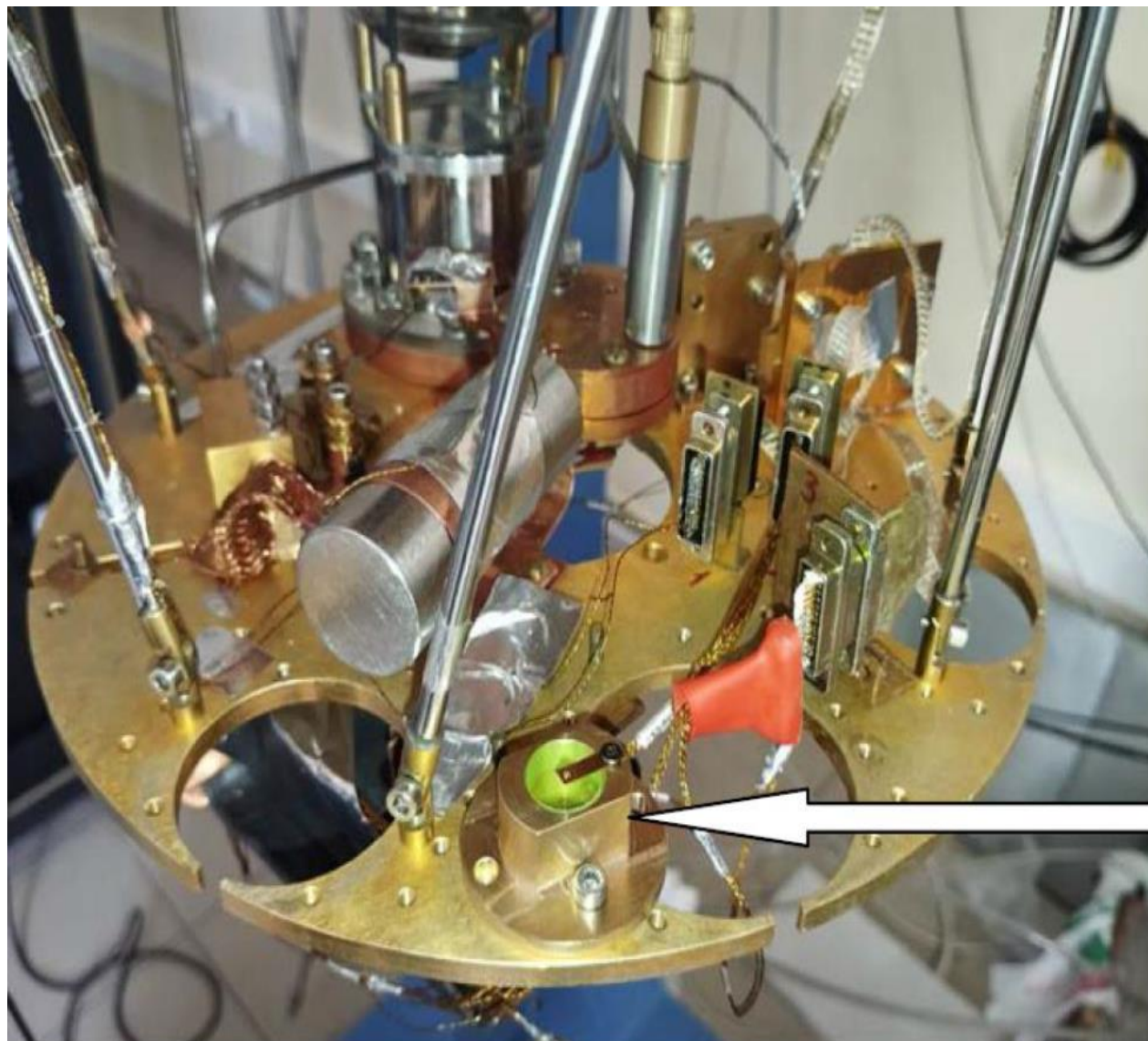


$Tm_3Al_5O_{12}$  кристаллы масса 10 г  
диаметр 12 мм, высота 12 мм

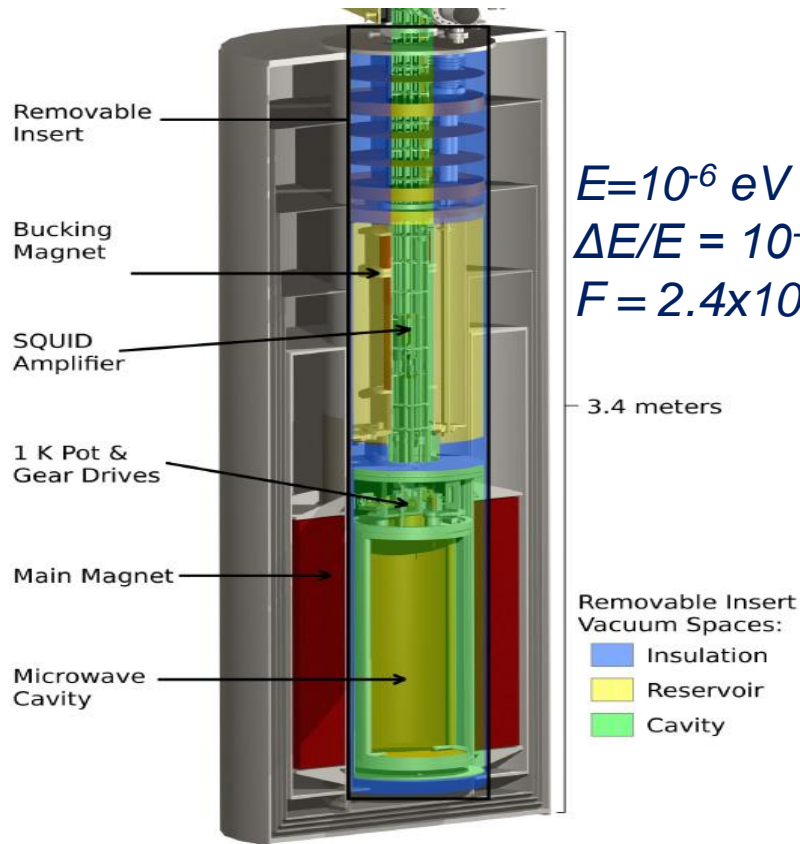
Лаборатория сверхпроводниковой наноэлектроники  
обладает уникальным оборудованием для проведения  
исследований при температурах до 10 мК.

Можно ожидать, что с новыми кристаллами в подземной лаборатории чувствительность к  $g_{Ay}$  и  $g_{Ae}$  будет сравнима с результатами  $^{83}Kr$ -эксперимента. При этом для  $Tm$  отсутствует неопределенность в ЯМЭ, которая может привести к существенному уменьшению вероятности регистрации аксиона в  $Kr$ -эксперименте.

# Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ в криогенной установке НГТУ



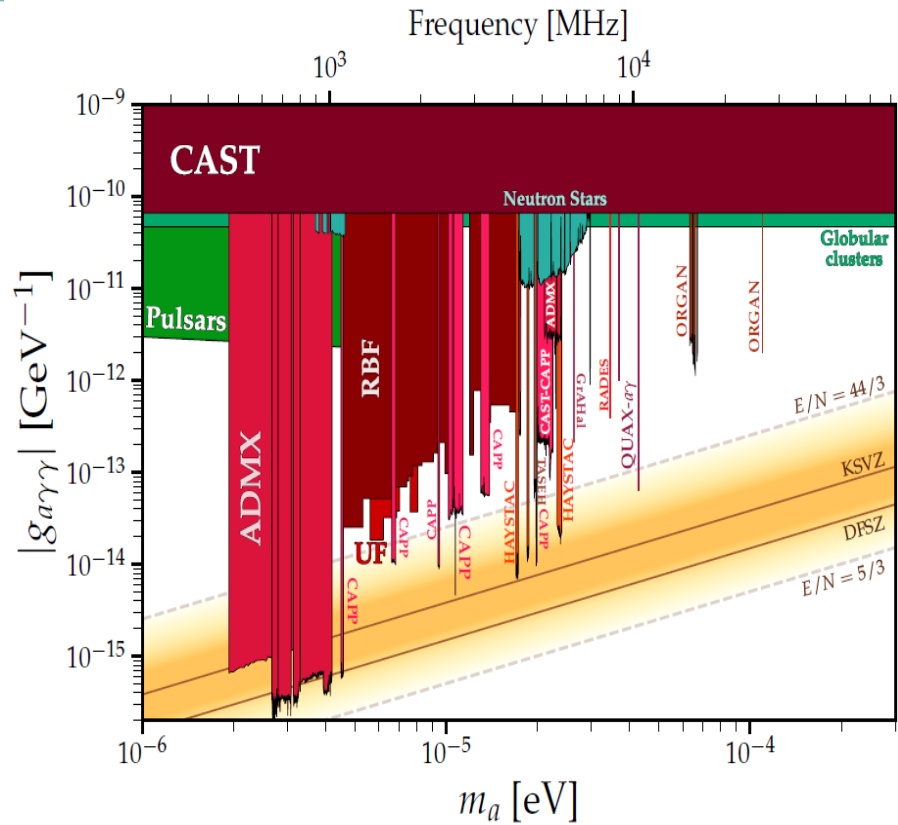
# Поиск реликтовых аксионов $A \rightarrow \gamma$ : ADMX



$$E = 10^{-6} \text{ eV}$$

$$\Delta E/E = 10^{-6}$$

$$F = 2.4 \times 10^8 \text{ Hz}$$

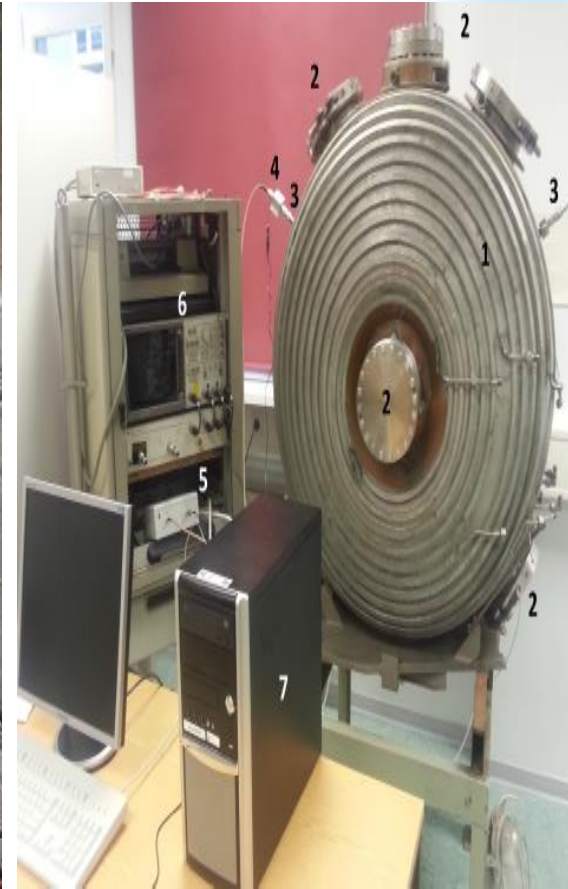


$$P = 3.17 \times 10^{-21} \text{ Watts} \left( \frac{V}{200 \text{ l}} \right) \left( \frac{B}{8 \text{ T}} \right)^2 \left( \frac{f_{nlm}}{.5} \right) \left( \frac{\rho_a}{0.3 \frac{\text{GeV}}{\text{cc}}} \right) \left( \frac{g_\gamma}{0.97} \right)^2 \left( \frac{Q}{100000} \right) \left( \frac{\nu_a}{750 \text{ MHz}} \right)$$

ADMX - микроволновая камера длиной 1 м и диаметром 0,5 м с сильным магнитным полем. Сигнал возникает при совпадении резонансной частоты с массой аксиона. Поиск аксионов осуществляется путем изменения резонансной частоты камеры. ADMX будет тестировать область  $10^{-6} - 10^{-5}$  эВ на уровне, предсказанном моделями KSVZ-DFSZ. Это небольшая часть широкой области  $10^{-6}-10^{-2}$ .

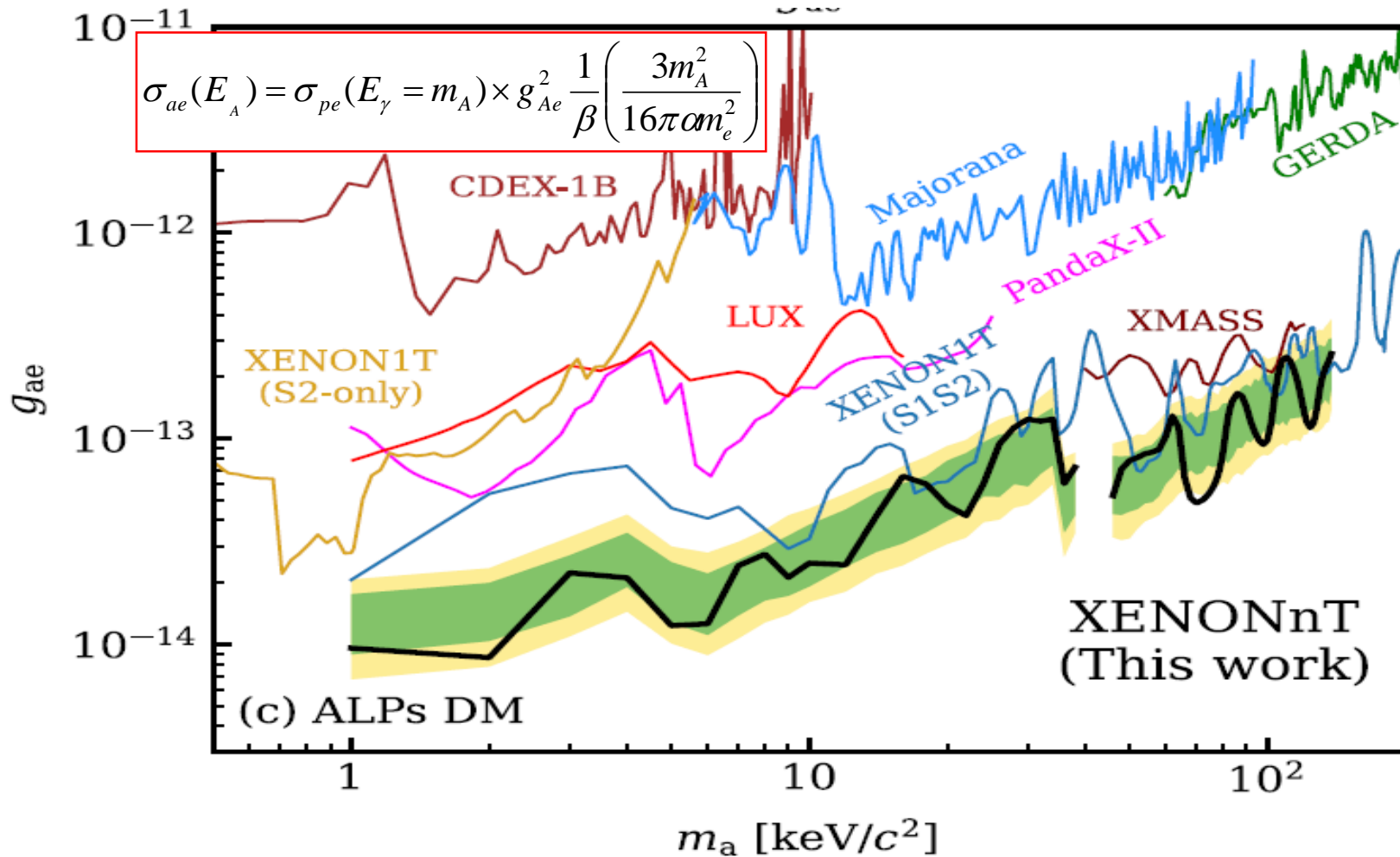


# Резонансные камеры ADMX, ADMXHF, WISPDMX, IBS-CAPP



На частотах ниже 1 ГГц эксперимент ADMX использовал подход галоскопа для исследования аксионной  $(ALP, HP)$  темной материи в диапазоне 460-860 МГц (1,9-3,6) мкэВ. Высокочастотное расширение ADMX-HF запланировано для диапазона 4-40 ГГц (16-160) мкэВ. Эксперимент WISP Dark Matter eXperiment расширяет поиски галоскопа до частиц с массой ниже 1,9 мкэВ, стремясь охватить диапазон 200-600 МГц (0,8-2,5) мкэВ.

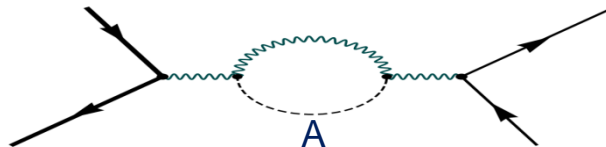
# Поиски а.э. эффекта для реликтовых аксионов



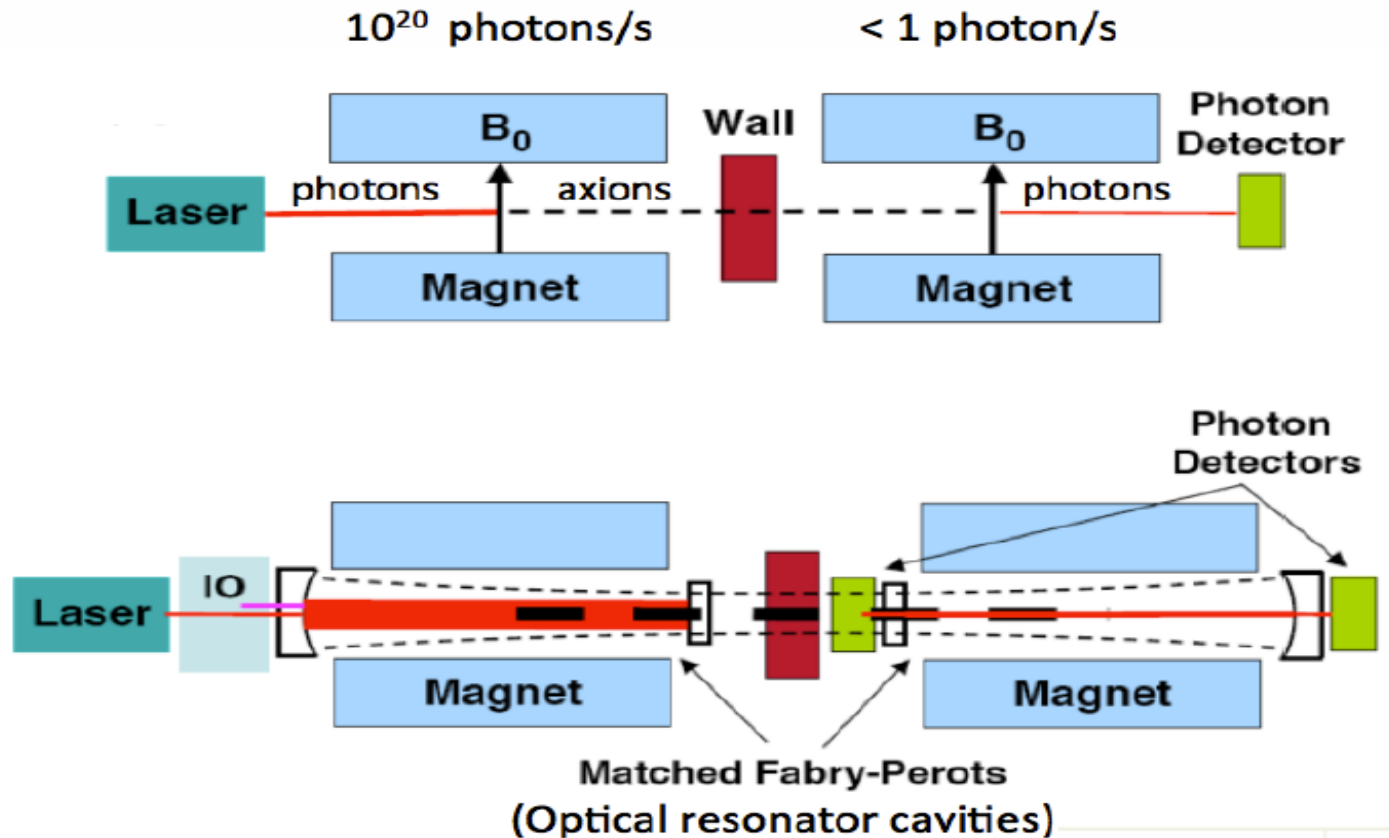
Для нерелятивистских аксионов сечение аксиоэлектрического эффекта пропорционально сечению фотоэффекта для фотонов с энергией равной массе аксиона. ПИЯФ, поиск аксионов ТМ с Si-, и Ge-детекторами.

# Новые методы регистрации реликтовых аксионов

1. Эксперименты с **метаматериалами** из параллельных проводов, индуцирующий эффективную массу фотона, и диэлектрических слоев в магнитное поле для резонансного усиления фотонного сигнала, чувствительны к массам аксиона  $(3-40)10^{-5}$  эВ.
2. Поглощение аксионов при **молекулярных и атомных переходах**, разделенных энергией, равной массе аксиона, может быть чувствительно к  $g_{AN}$  и  $g_{Ae}$  при  $m_A \sim (0.5-20)$  эВ.
3. В области  $m_A \sim (10^{-9} - 10^{-7})$  эВ предлагает использовать охлаждаемый **LC-контур и прецизионную магнитометрию** для поиска осциллирующего электрического тока, индуцированного аксионами  $DM$  в сильном магнитном поле (ABRACADABRA и др., пока не чувствительны к аксионам КХД).
4. Поиск влияния осциллирующего аксионного поля темной материи на прецессию спинов ядер и электронов в присутствии электрического поля используя **методы магнитного резонанса**, которые наиболее чувствительны в диапазоне низких частот, соответствующих масштабу GUT -  $f_A > 10^{15}$  ГэВ или  $m_A < 10^{-9}$  эВ (CASPEr и др.)



# “Shining light through the wall” or “Photon regeneration”



*ALPs-II в DESY с магнитом HERA (2408.13218), Gammev в Fermilab с магнитом Tevatron и OSQAR в CERN с магнитом LHC. Длину магнитов планируется увеличить до 100 метров + поляризационные эксперименты.*

# Заключение

**Аксион (и ALPs)** одновременно решают CP-проблему сильных взаимодействий и являются хорошо мотивированными кандидатами на темную материю. Возможно, аномальная прозрачность Вселенной для высокоэнергетических квантов и быстрое остывание звезд являются первыми указаниями на их существование.

В настоящее время проекты **IAXO** и **babyIAXO** предлагают наиболее чувствительный лабораторный эксперимент с солнечными нейтрино к константе связи  $g_{A\gamma}$  для широкого диапазона масс аксиона.

Поиски аксиоэлектрического эффекта ( $g_{Ae}$ ) и резонансного поглощения ( $g_{AN}$ ) для солнечных и реликтовых аксионов с помощью детекторов нейтрино и темной материи исключили новую большую область возможных масс и констант связи аксиона или ALPs. Поиски резонансного возбуждения ядерного уровня 8.4 кэВ ядра  $^{169}\text{Tm}$  в составе Tm-содержащего **боллометра** могут существенно улучшить чувствительность к константам связи адронного аксиона.

# Константы связи аксиона с нуклонами

$$g_{AN}^0 = (M_N/2f_A)(C_p + C_n);$$

$$g_{AN}^3 = (M_N/2f_A)(C_p - C_n),$$

$$C_p^{KSVZ} = -0.47(3) \text{ и } C_n^{KSVZ} = 0.02(3)$$

$$g_{AN}^0 (KSVZ) = -0.45 M_N/2f_A$$

$$g_{AN}^3 (KSVZ) = -0.49 M_N/2f_A$$

$$C_p = (-0.182 \pm 0.025) - 0.435 \sin^2 \beta$$

$$C_n = (-0.160 \pm 0.025) + 0.414 \sin^2 \beta$$

$$C_p^{DFSZ} = -0.617 + 0.435 \sin^2 \beta \pm 0.025$$

$$C_n^{DFSZ} = 0.254 - 0.414 \sin^2 \beta \pm 0.025.$$

$$C_p^{DFSZ} = 0.2712 \text{ и } C_n^{DFSZ} = 0.1248$$

$$\tan \beta = 10,$$

$$g_{AN}^0 (DFSZ) = 0.396 M_N/2f_A$$

$$g_{AN}^3 (DFSZ) = 0.1464 M_N/2f_A$$

$$m_A = 5.69(5) \left( \frac{10^6 \text{ ГэВ}}{f_A} \right) \text{ эВ}$$

$$g_{AN}^0 = -4.03 \cdot 10^{-8} (m_A/1 \text{ эВ}),$$

$$g_{AN}^3 = -2.75 \cdot 10^{-8} (m_A/1 \text{ эВ}).$$

$$M_N/2f_A = 0.939 \text{ (GeV)} m_A / (2 \times 5.69 \times 10^6) = 8.25 \times 10^{-8} m_A \text{ [eV]}$$

-3.71  
-4.04

# Эксперимент с $^{125m}\text{Te}$

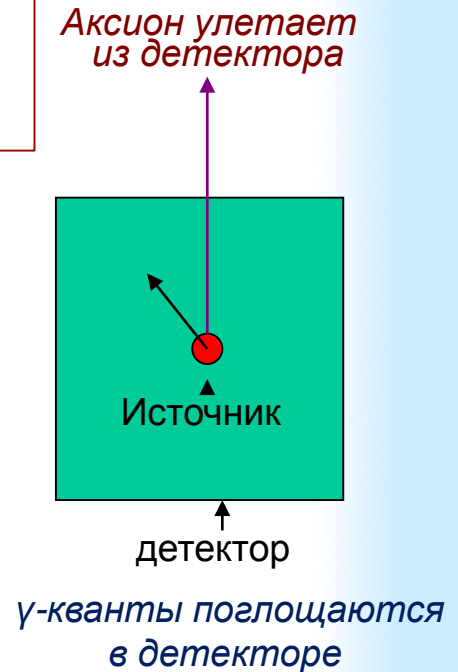
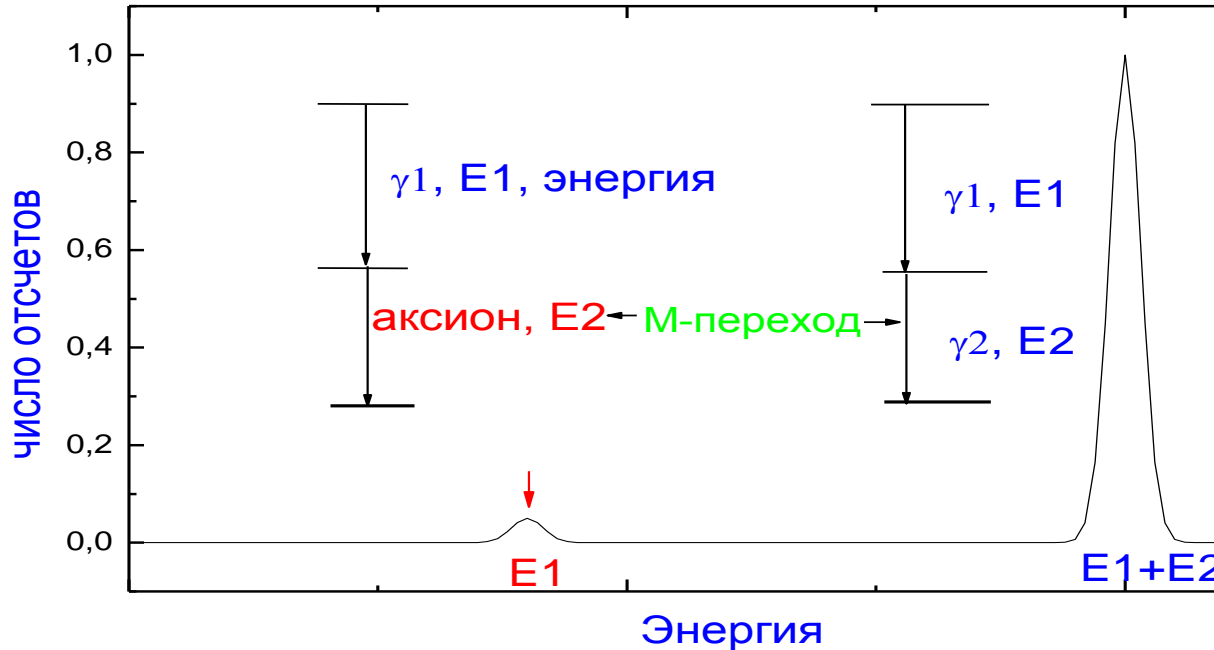
Письма в ЖЭТФ, том 65, вып.8, стр.576 - 580

© 1997г. 25 апреля

## ПОИСК "НЕВИДИМОГО" АКСИОНА, ИЗЛУЧАЕМОГО ПРИ М1-ПЕРЕХОДЕ $^{125m}\text{Te}$

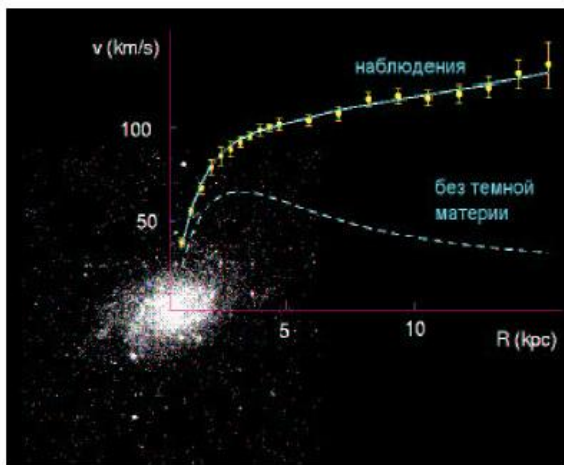
А.В.Дербин<sup>1)</sup>, А.И.Егоров, И.А.Митропольский, В.Н.Муратова, С.В.Бахланов, Л.М.Тухконен

Санкт-Петербургский институт ядерной физики РАН  
188350 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

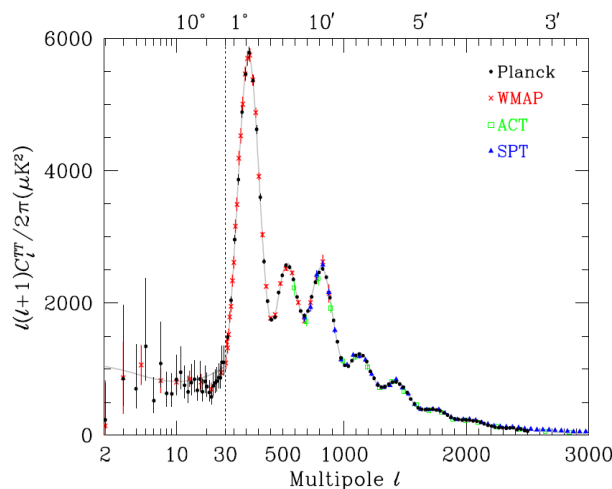


Изомерное ядро  $^{125m}\text{Te}$  распадается на основное состояние, излучая при этом два  $\gamma$ -кванта с энергиями  $E1=109$  кэВ и  $E2=35$  кэВ. «Идеальный» детектор полного поглощения, обладающий 4 $\pi$ -геометрией, регистрирует оба  $\gamma$ -кванта с вероятностью 100%, в измеренном энергетическом спектре будет присутствовать только один мономатический пик с энергией  $E1+E2$  и с шириной определяемой разрешением детектора. Излучение "невидимого" аксиона в переходе с энергией  $E2$ , покидающего детектор без взаимодействия, приведет к появлению пика с энергией  $E1$ .

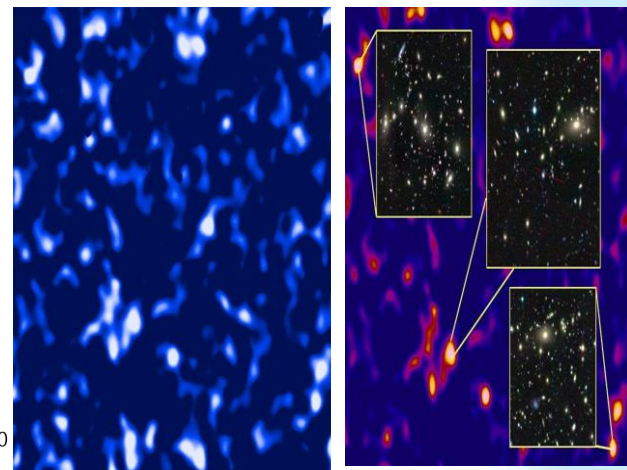
# Свидетельства ТМ (Dark matter)



Спиральные галактики



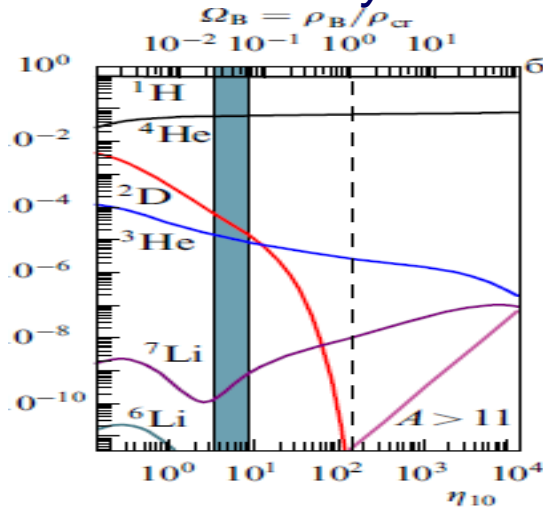
Анизотропия реликтового излучения



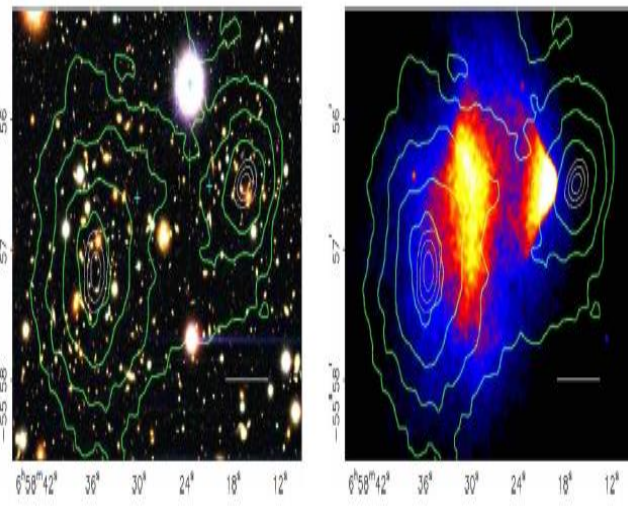
Крупномасштабная структура Вселенной



гр. и микролинзирование



Первичный нуклеосинтез



Столкновение галактик.