

Экспериментальные поиски солнечных аксионов.

А.В. Дербин

*Петербургский институт ядерной физики, Гатчина
НИЦ Курчатовский институт*



Содержание

1) Появление аксиона, константы связи, ограничения и указания, солнечные аксионы

WWPQ-аксион, KSVZ- и DFSZ-аксионы, масса и $g_{A\gamma}$, g_{Ae} , и g_{AN} , аномальная прозрачность для γ -квантов, охлаждение б.к. Примаковские, комптоновские и тормозные аксионы. Монохроматические 14.4 кэВ, 478 кэВ, 5.5 МэВ аксионы, Конверсия $A \rightarrow \gamma$, CAST, IAXO,

2) Аксиоэлектрический эффект для солнечных аксионов

g_{Ae} , Si-детектор, BGO-сцинтиллятор, BGO-болометр, другие детекторы частиц ТМ, массивные реликтовые аксионы

3) Распад $A \rightarrow 2\gamma$, конверсия в поле ядра $A+Z \rightarrow Z+\gamma$ и комптоновская конверсия $A+e \rightarrow e+\gamma$ в Bogexino

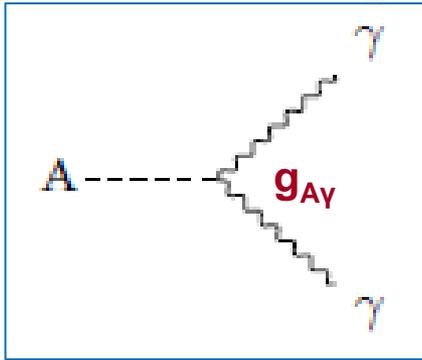
Результат 2025 г. на полных данных Bogexino

4) Резонансное возбуждение ядерных уровней

g_{AN} , ${}^7\text{Li}$, ${}^{57}\text{Fe}$, ${}^{83}\text{Kr}$, ${}^{169}\text{Tm}$ для поиска монохроматических аксионов ${}^{169}\text{Tm}$, ${}^{83}\text{Kr}$, для поиска аксионов с непрерывным спектром

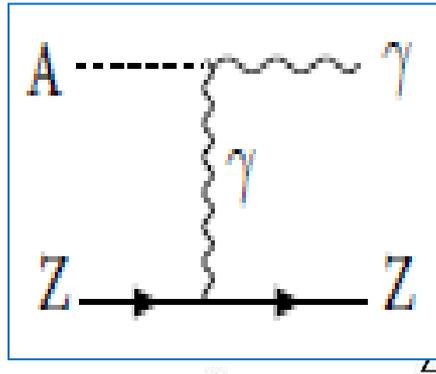
Взаимодействия аксиона

$$A \rightarrow 2\gamma$$

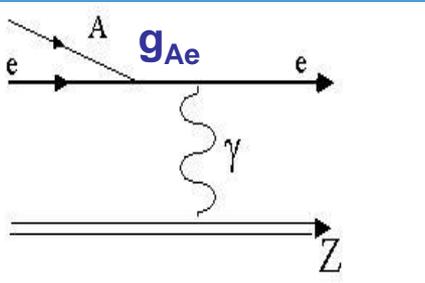


a)

$$A+z \rightarrow z+\gamma$$

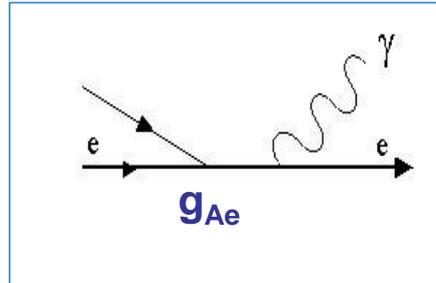


b)



$$A+z \rightarrow z+e$$

c)



$$A+e \rightarrow e+\gamma$$

d)

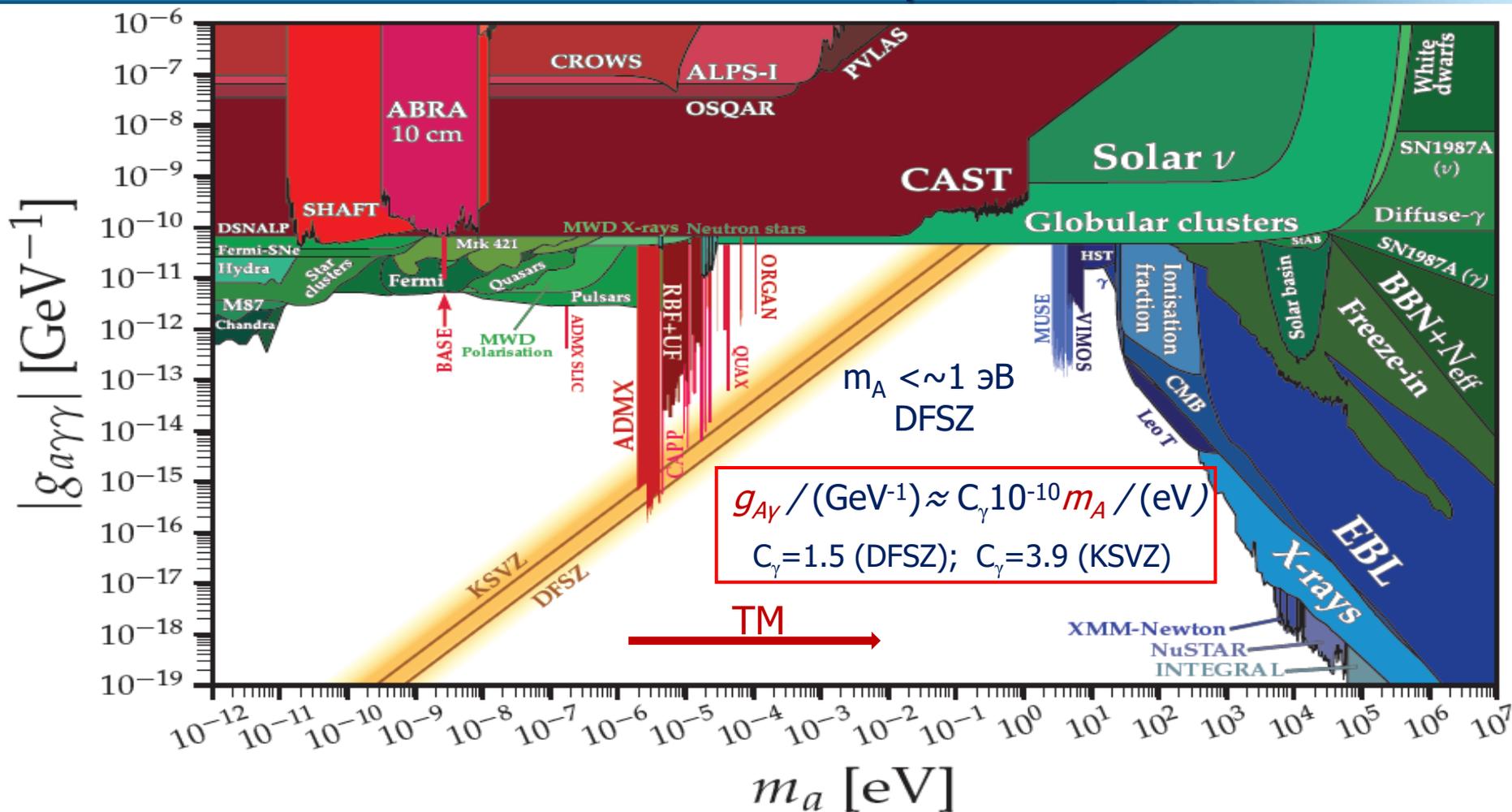
Взаимодействие аксионов ($E > 1$ кэВ) с веществом зависит от констант связи аксиона с фотонами, электронами и нуклонами :

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

• **аксио-электрический**- (c) и **комptonовский** (d) процессы;

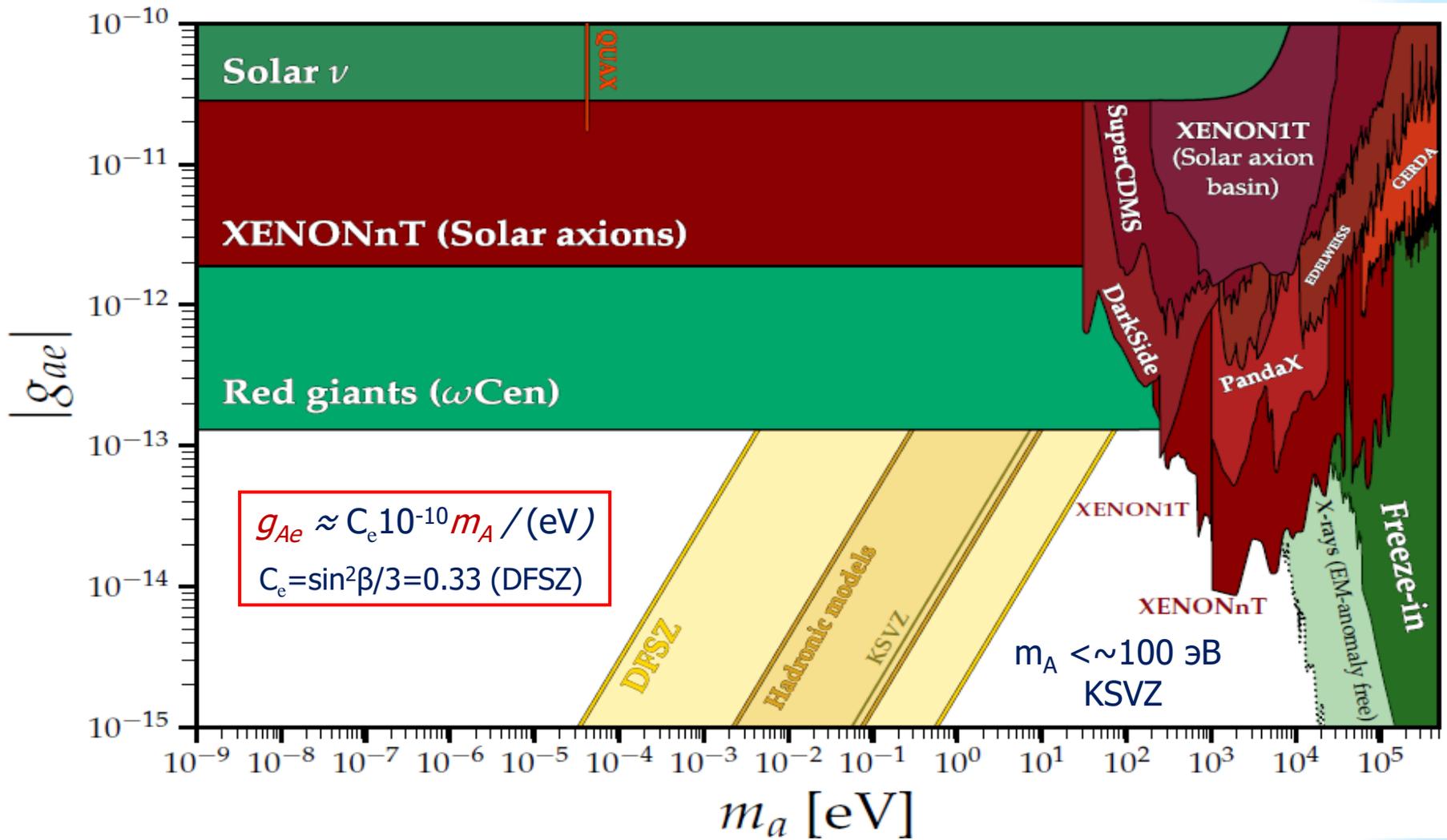
• как псевдоскалярная частица аксион может излучаться и поглощаться в **переходах магнитного типа**

Ограничения на $g_{A\gamma}$, PDG 2025



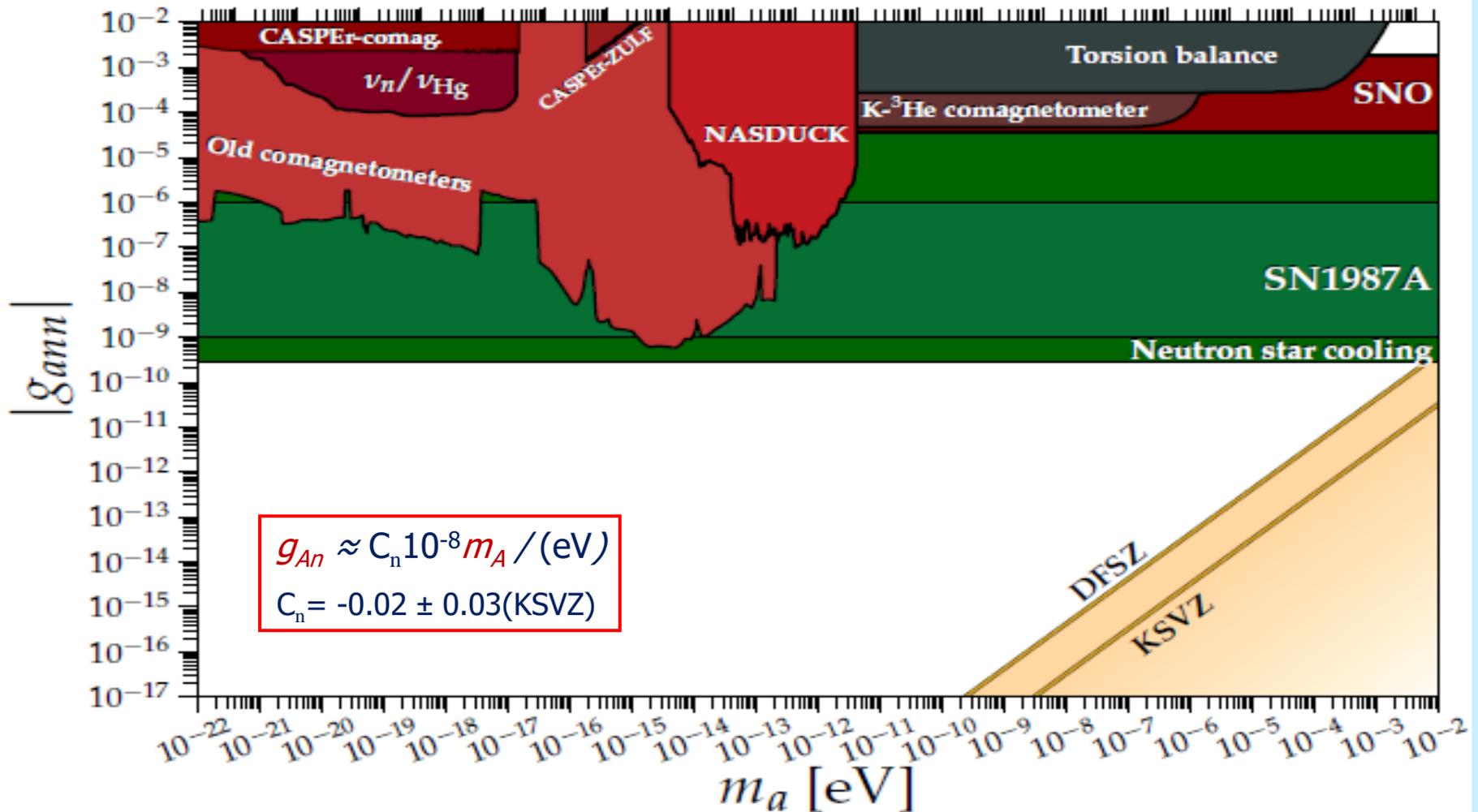
CAST, ADMX, IBS-CAPP - наиболее продвинутые эксперименты по поиску конверсии в фотон в солнечных и реликтовых аксионов в лабораторном магнитном поле. ABRA, SHAFT, BASE, ADMX SLIC, ADMX, RBF+UF, CAPP, QUAX, ORGAN – 100% TM. CROWS, ALPS-I, OSQAR, PVLAS – LSTW. Solar, BF Globular cluster GB, SN1987A.

Ограничения на g_{Ae} , PDG 2025



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

Ограничения на g_{An} , PDG 2025



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 $\tan\beta = V_u / V_d$: $C_{An} = 0.414 \sin^2\beta - 0.160 \pm 0.025$, $C_{An} = -0.435 \sin^2\beta - 0.182 \pm 0.025$.

Классификация экспериментов

Регистрация аксионов

Излучение аксионов

	$g_{A\gamma}$	g_{AN}	g_{Ae}
$g_{A\gamma}$	Конверсия аксиона в фотон в магнитном поле и поле ядра IAOXO, CASH Саров	Резонансное поглощение ядрами ^{169}Tm -ПИЯФ, МРІ ^{83}Kr -БНО ИЯИ	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si – ПИЯФ ^{83}Kr -БНО ИЯИ Все детекторы ТМ
g_{AN}	Распад $A \rightarrow 2\gamma$, конверсия в поле ядра ^7Li - 478 кэВ, ^3He – 5.5 МэВ, CNO-2.2 BOREXINO	Резонансное поглощение ядрами ^{57}Fe , ^6Li , ^{169}Tm ПИЯФ, LNGS ^{83}Kr -БНО ИЯИ	А.Э. Э. в атомах, Комптон. процесс Si, Bi-ПИЯФ, LNGS Ar - DarkSide Kr-14.4 кэВ БНО ИЯИ C –комп. BOREXINO
g_{Ae}	Конверсия аксиона в фотон в магнитном поле IAOXO, Саров	Резонансное поглощение ядрами ^{169}Tm -ПИЯФ, МРІ ^{83}Kr -БНО ИЯИ	Аксиоэлектрический эффект в атомах Si – ПИЯФ ^{83}Kr -БНО ИЯИ

~40 публикаций, 14 результатов в *Review of Particle properties Particle Data Group*

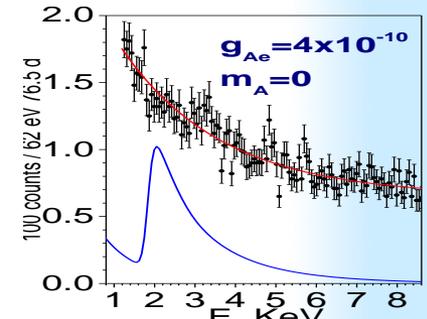
Аксионные эксперименты в ПИЯФ НИЦ КИ

1. Аксиоэлектрический эффект в атомах

Si, Si(Li)-п/п детектор

Bi, BGO – сцинтиллятор, болометр

Kr, Kr – газовый счетчик



2. Резонансное поглощение атомными ядрами

^7Li , мишень,

^{57}Fe , мишень,

^{83}Kr , газовый счетчик,

^{169}Tm , мишень, крио-болометр



3. Распад $A \rightarrow 2\gamma$, Конверсия в поле ядра $A+Z \rightarrow Z+\gamma$ и комптоновская конверсия $A+e \rightarrow e+\gamma$

Borexino, LS- сцинтиллятор, 0.48 и 5.5 МэВ солнечные

DarkSide, DEAP, LXe – одно- и двухфазный

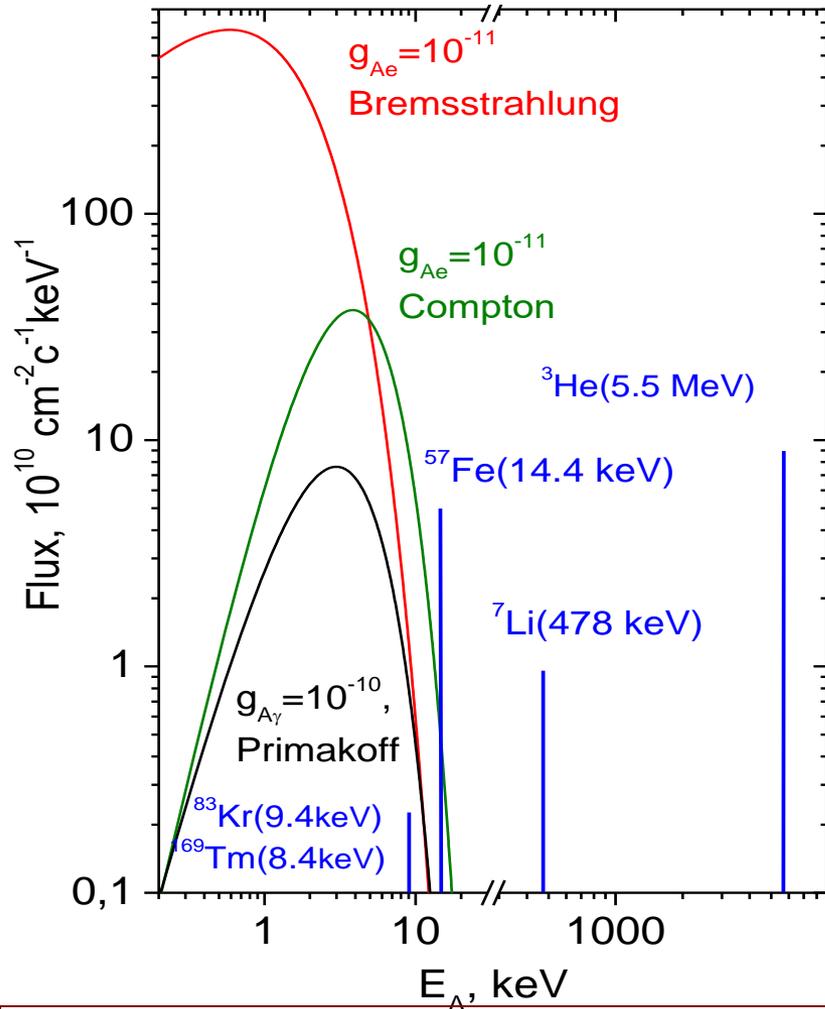
4. Конверсия в лабораторном магнитном поле

IAXO (2014), babyIAXO: конверсия солнечных аксионов

CASH (2025) конверсия аксионов Темной Материи



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



Основные источники солнечных аксионов

1. Реакции пр-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 ($g_{A\gamma}$).

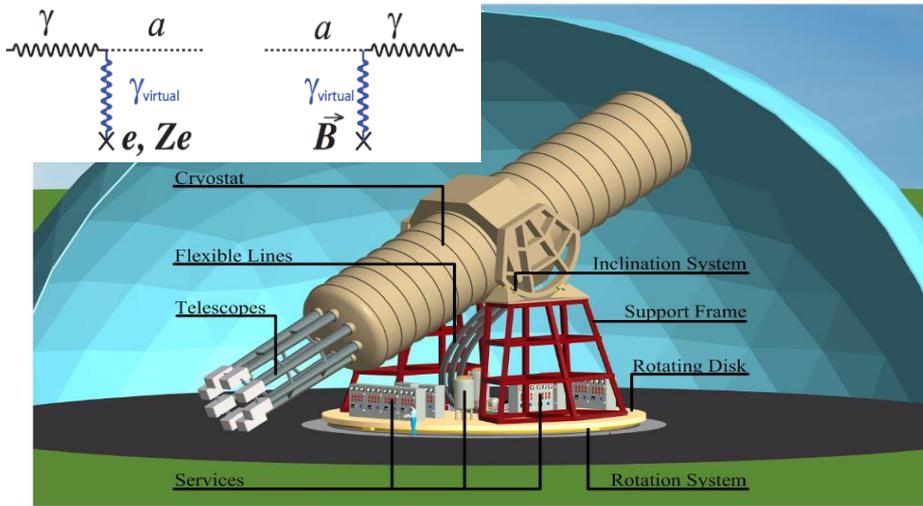
4. Тормозное излучение: $e + Z(e) \rightarrow Z + A$ (g_{Ae})

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

6. Атомные процессы рекомбинация: $e + I \rightarrow I^- + A$ и разрядка: $I^* \rightarrow I + A$. (g_{Ae})

Если аксион существует, Солнце должно быть интенсивным источником аксионов. В звездах 6 основных процессов формирования аксионов. Энергия 1 кэВ – 5.5 МэВ. Поток аксионов превышает поток нейтрино при $g_{A\gamma} \sim 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$ and $g_{Ae} \sim 10^{-11}$. При $E \sim 0.1 \text{ кэВ}$ конверсия плазмонов в аксионы.

IAXO – солнечные, CASH - реликтовые



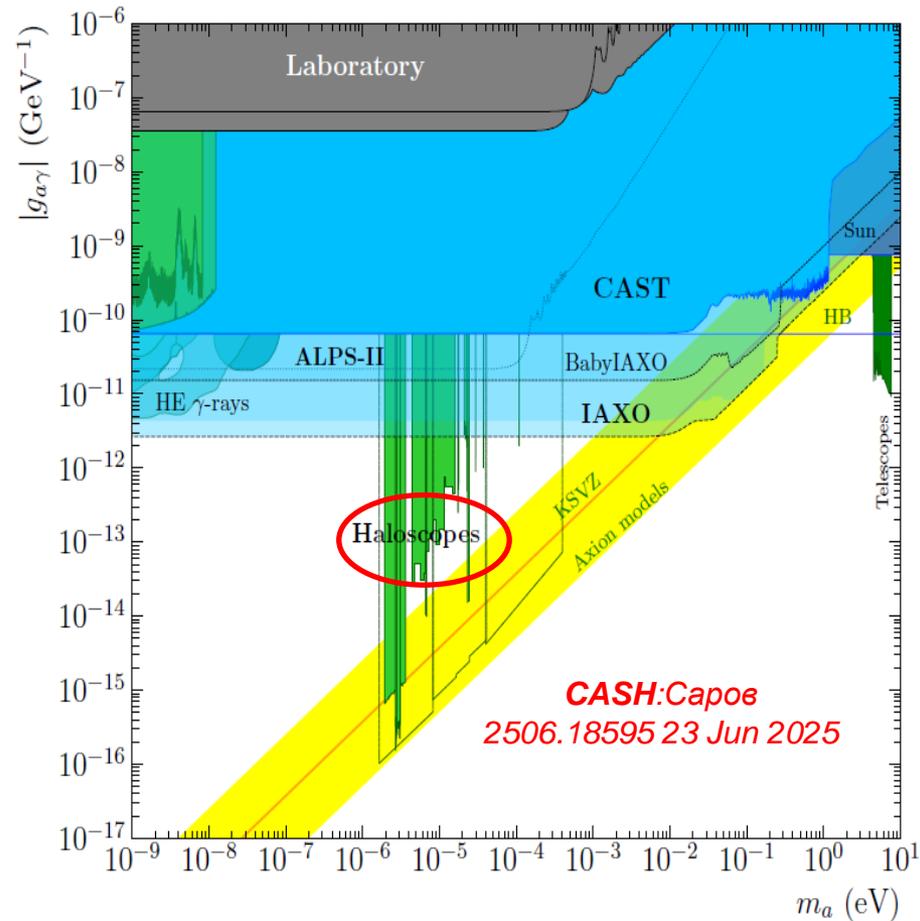
An accurate solar axions ray-tracing response of BabyIAXO



arXiv:2411.13915v1 21 Nov 2024

IAXO collaboration

S. Ahyoune¹, K. Altenmüller², I. Antolín^{2,3}, S. Basso⁴, P. Brun⁵, J. F. Castel², S. Cebrían², D. Chouhan⁶, R. Della Ceca⁴, M. Cervera-Cortés⁷, V. Chernov^{8,9}, M. M. Civitan⁴, C. Cogollos¹⁰, E. Costa¹¹, V. Cotroneo⁴, T. Dafni², A. Derbin¹², K. Desch⁶, M. C. Díaz-Martín⁷, A. Díaz-Morcillo¹³, D. Díez-Ibáñez², C. Díez Pardo¹⁴, M. Dinter¹⁵, B. Döbrich¹⁰, I. Drachnev¹², A. Dudarev¹⁶, A. Ezquerro², S. Fabiani¹¹, E. Ferrer-Ribas⁵, F. Finelli^{17,18}, I. Fleck¹⁴, J. Galán^{2,4}, G. Galanti¹⁹, M. Galaverni^{17,18,20}, J. A. García², J. M. García-Barceló¹⁰, L. Gastaldo²¹, M. Giannotti²², A. Giganon², C. Goblin⁵, N. Goyal²³, Y. Gu², L. Hagge¹⁵, L. Helary¹⁵, D. Hengstler²¹, D. Heuchel¹⁵, S. Hoof^{24,25}, R. Iglesias-Marzoa⁷, F. J. Iguaz²³, C. Iñiguez⁷, I. G. Irastorza^{2,1}, K. Jakovčić²⁶, D. Käfer¹⁵, J. Kaminski⁶, S. Karstensen¹⁵, M. Law²⁷, A. Lindner¹⁵, M. Loidl²⁸, C. Loiseau⁵, G. López-Alegre⁷, A. Lozano-Guerrero¹⁵, B. Lubasandorzhev⁹, G. Luzón², I. Manthos³, C. Margalejo², A. Marín-Franch⁷, J. Marqués², F. Marutzky¹⁵, C. Menneglier²⁹, M. Mentink¹⁶, S. Mertens^{29,30}, J. Miralda-Escudé^{1,31}, H. Mirallas², F. Muleri¹¹, V. Muratova¹², J. R. Navarro-Madrid¹³, X. F. Navick⁵, K. Nikolopoulos^{3,32}, A. Notari^{1,33}, A. Nozik^{8,9}, L. Obis², A. Ortiz-de-Solórzano², T. O'Shea², J. von Oy², G. Pareschi⁴, T. Papaevangelou⁵, G. Pareschi⁴, K. Pérez²⁷, O. Pérez², E. Picatoste¹, M. J. Pivovarov³⁴, J. Porrón², M. J. Puyuelo², A. Quintana^{2,5}, J. Redondo², D. Reuther¹⁵, A. Ringwald¹⁵, M. Rodrigues²⁸, A. Rubini¹¹, S. Rueda-Teruel⁷, F. Rueda-Teruel⁷, E. Ruiz-Chóliz³⁵, J. Ruiz^{2,36}, J. Schaffran¹⁵, T. Schiffer⁶, S. Schmidt⁶, U. Schneckloth¹⁵, L. Schönfeld^{29,30}, M. Schott⁶, L. Seguí⁷, U. R. Singh¹⁵, P. Soffitta¹¹, D. Spiga⁴, M. Stern²⁷, O. Straniero^{37,38}, F. Tavecchio⁴, E. Unzhakov¹⁵, N. A. Ushakov², G. Vecchi¹¹, J. K. Vogel^{15,39}, D. M. Voronin⁹, R. Ward², A. Weltman^{29,30}, C. Wiesinger^{29,30}, R. Wolf¹⁵, A. Yanes-Díaz², Y. Yu²⁷



CASH:Capov
2506.18595 23 Jun 2025

Длина = 20 м; 8 каналов $d = 0.6$ м
Площадь ~ 2 м²; Поле 5.4 Т; $T \sim 4.5$ К

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

Аксиоэлектрический эффект в атомах и резонансное поглощение ядрами

Две реакции с большим сечением для γ -квантов:

Аксиоэлектрический эффект, поглощение аксионов атомами, является аналогом фотоэффекта. Сечение реакции пропорционально g_{Ae}^2 и σ_{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 $4 \times 10^{-23} \text{ см}^2$ для C и $4 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ для Pb при $E = 10 \text{ кэВ}$

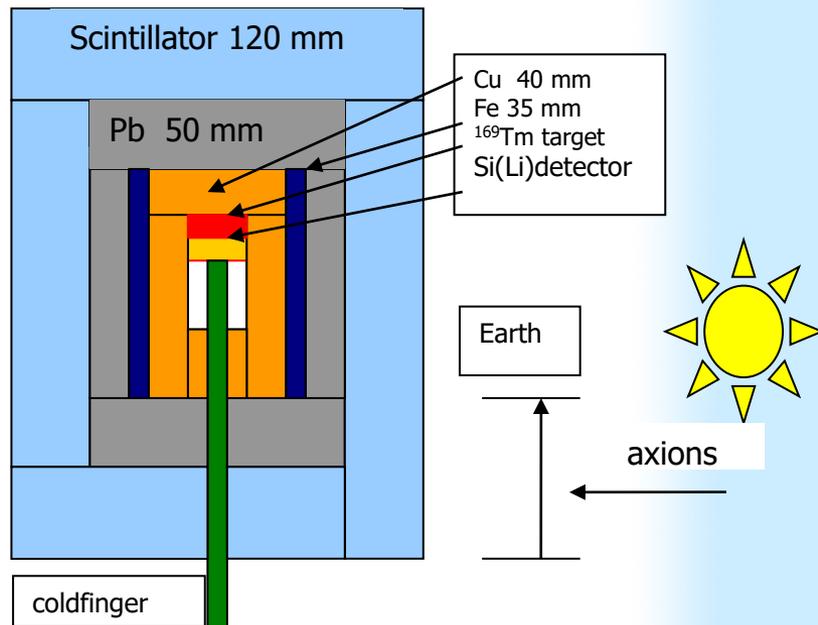
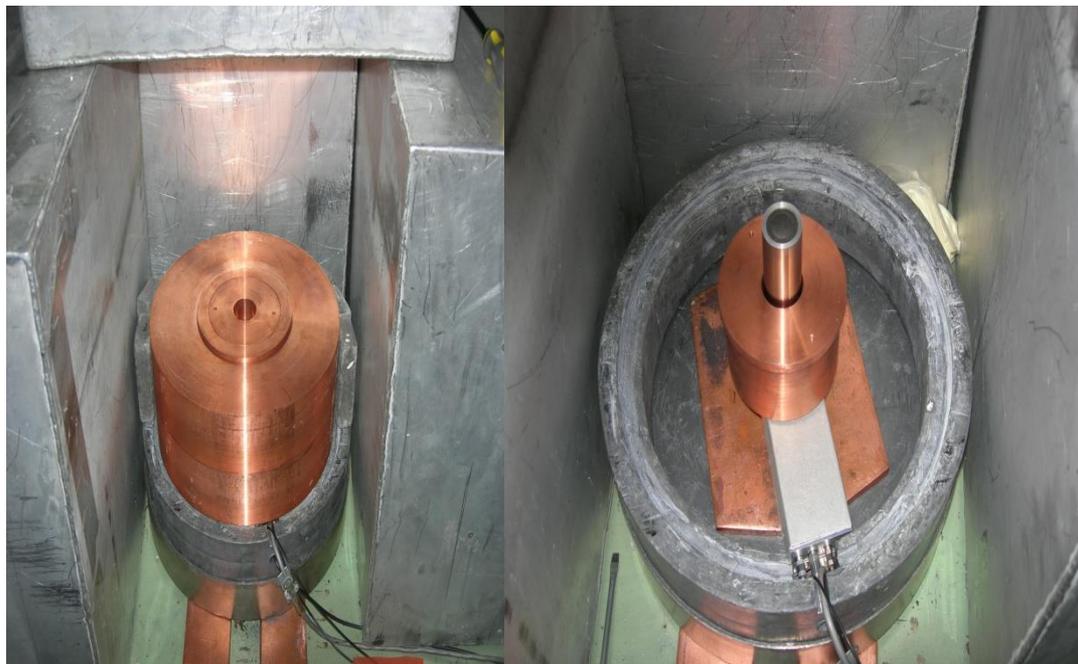
Сечение резонансного поглощения аксионов определяется выражением, аналогичным выражению для γ -лучей и поправленным на отношение ω_A/ω_γ

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

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

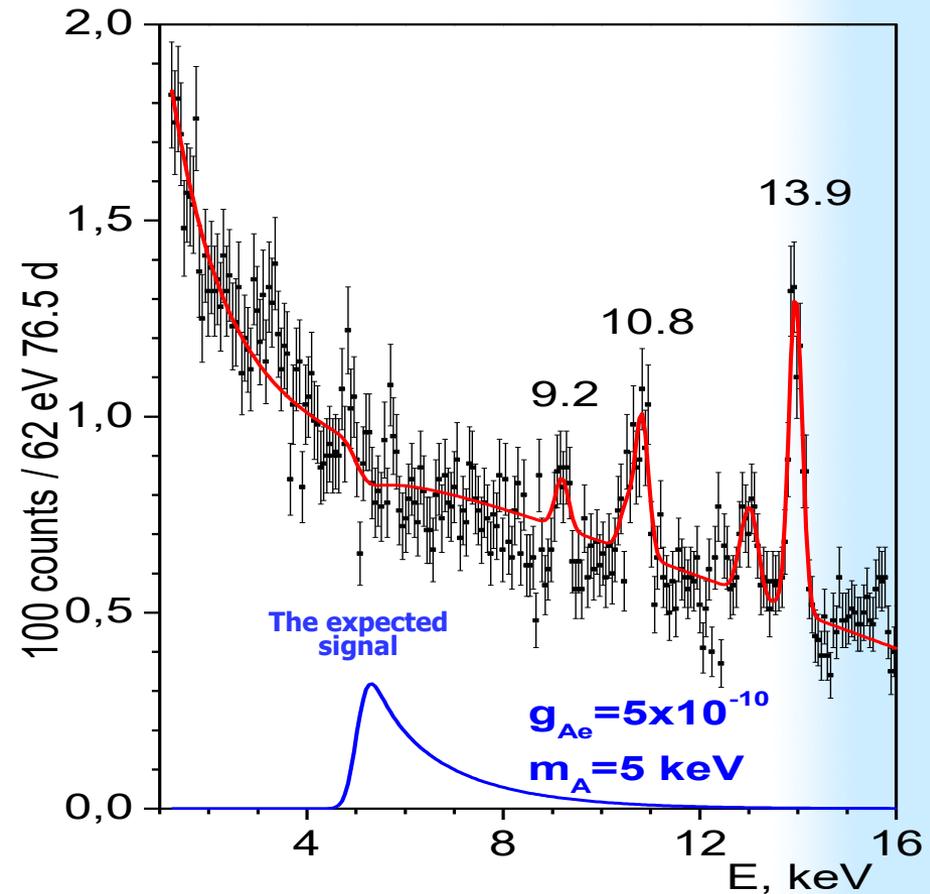
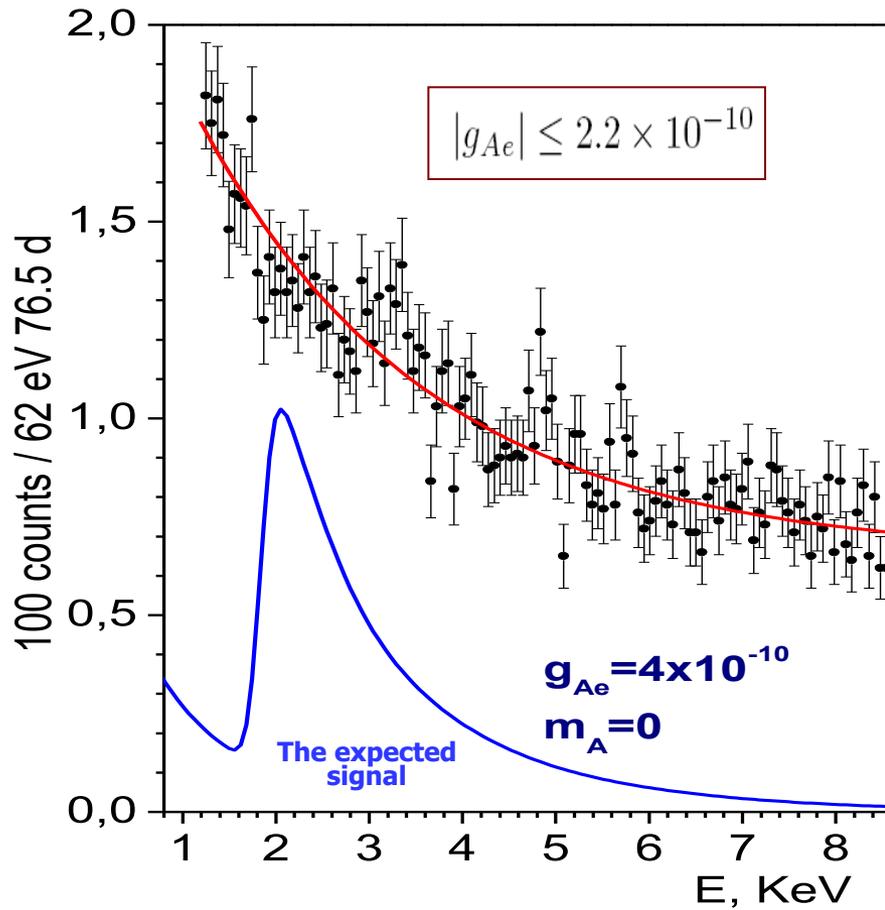
Высокая чувствительность к константам g_{Ae} и g_{AN} , g_{Ay} может быть достигнута с относительно небольшим детектором.

Si(Li)-детектор внутри низкофоновой установки Аксиоэлектрический эффект



Впервые вычислен ожидаемый спектр для аксиоэлектрического эффекта для аксионов с массой (0-10 кэВ), имеющих непрерывный энергетический спектр (примаковские аксионы (g_{Ag}) и комптоновские и тормозные (g_{Ae})). 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 $g_{Ae} = 5 \times 10^{-10}$.

Детекторы темной материи и двойного бета-распада CUORE (TeO_2), XMASS (Xe), EDELWEISS (Ge), XENON (Xe), LUX (Xe), PANDAX (Xe)



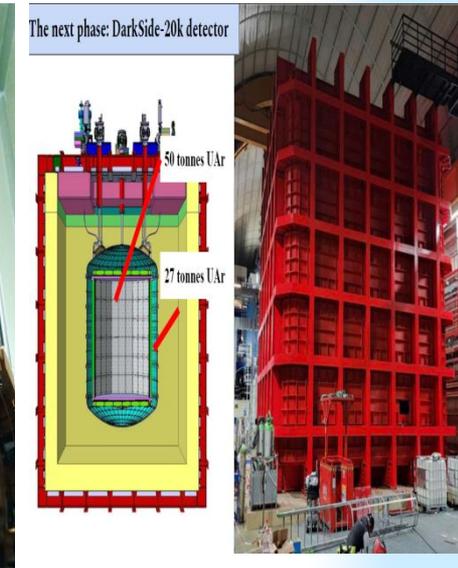
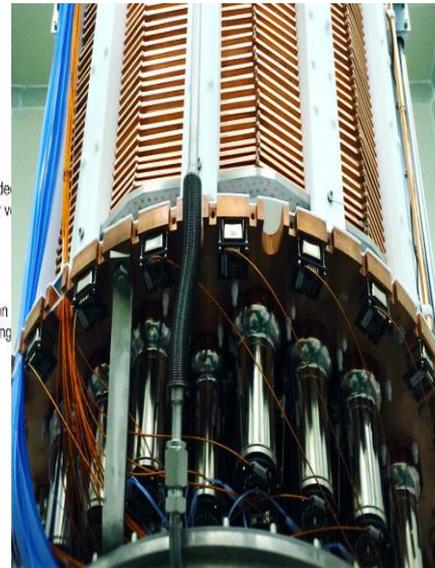
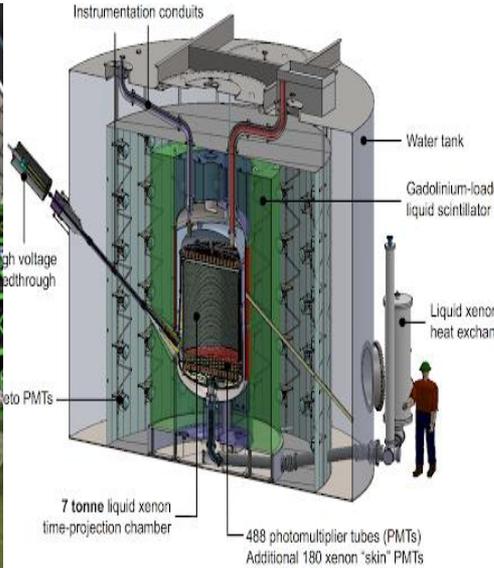
*Cuore $2\beta\nu$ 740 kg TeO_2
 LNGS*



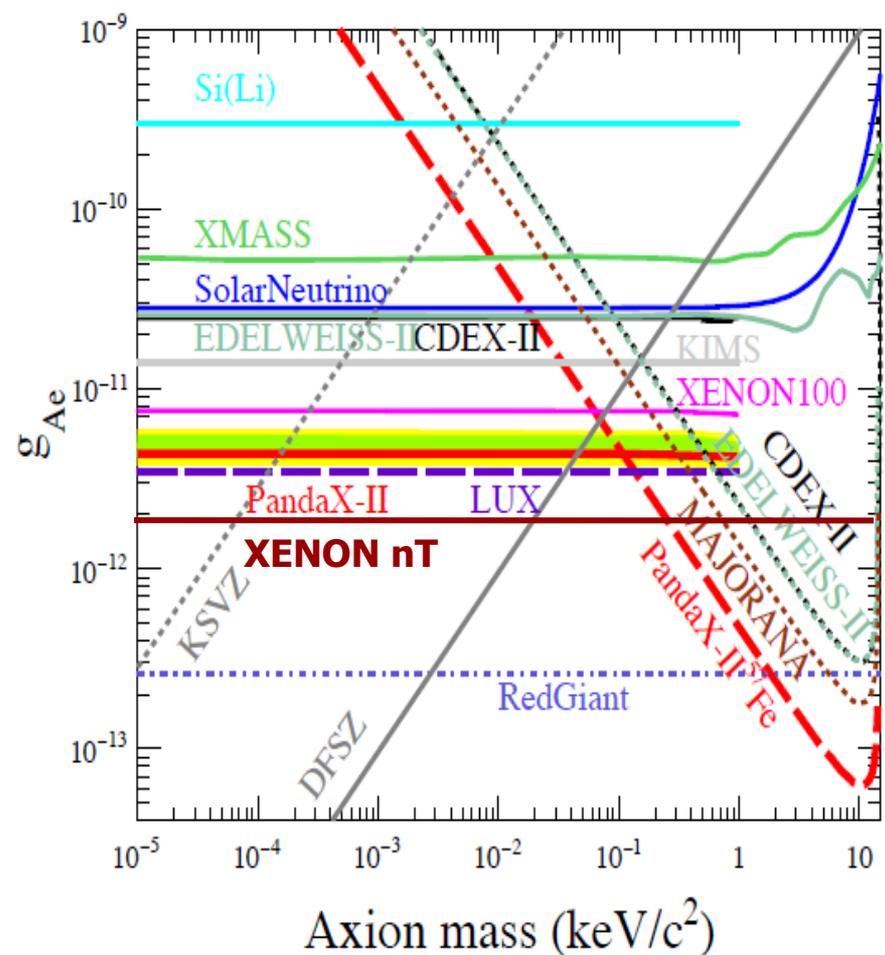
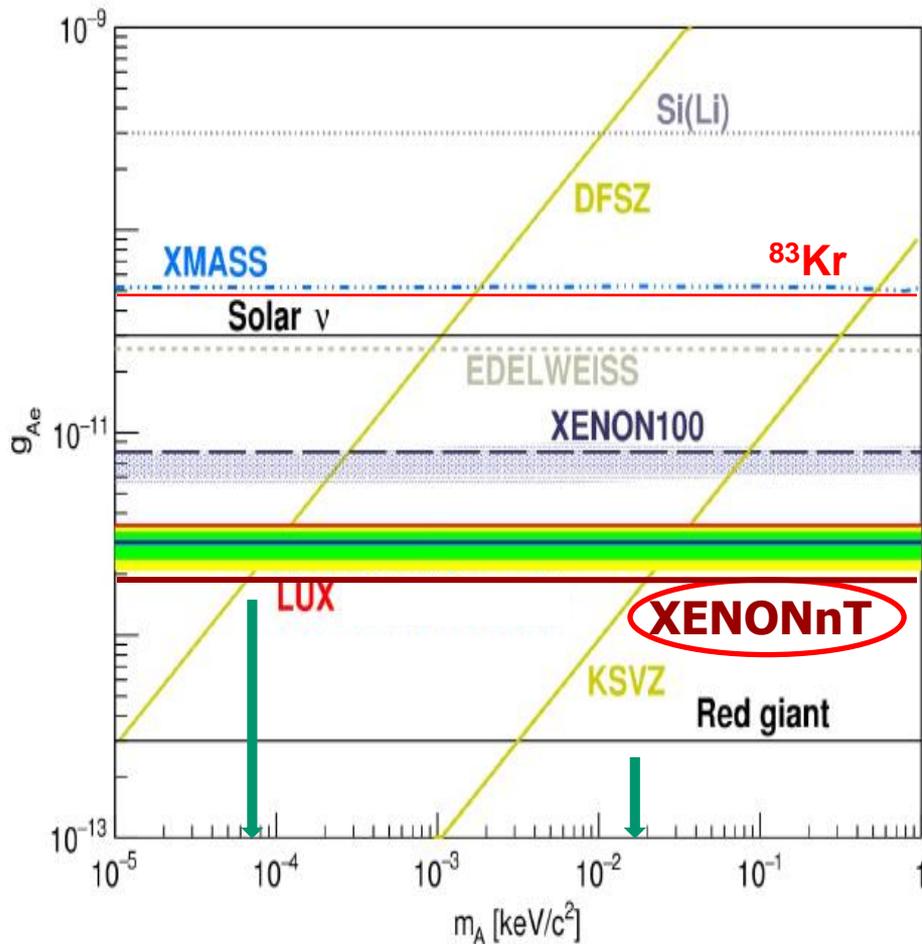
*XMASS DM 800 kg Xe
 Kamioka*



*Edelweiss DM Ge
 bolometer Modane*



Xenon DM 3.3 t Xe LNGS LUX DM 370 kg LZ 7t LXe Sanford PANDAX, 4 t LXe DS20K LAr



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 HB дает пределы на g_{Ae} и ММ-ν. Аксионы с энергией 14.4 кэВ испускаются в М1-переходе при разрядке первого ядерного уровня ^{57}Fe , который возбуждается за счет высокой T Солнца.

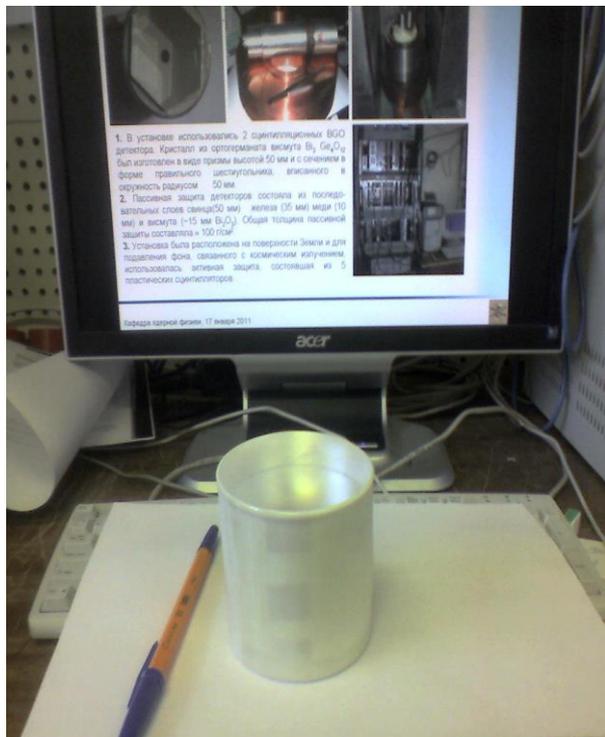
Солнечные аксионы с энергией 478 кэВ и 5.5 МэВ Установка с BGO сцинтилляционными детекторами

$$\Phi_{A0}(7Be) \cong 0.1 \times \Phi_{v7Be} (g_{AN}^0 + g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3$$

$$\cong 5 \times 10^8 (g_{AN}^0 + g_{AN}^3)^2$$

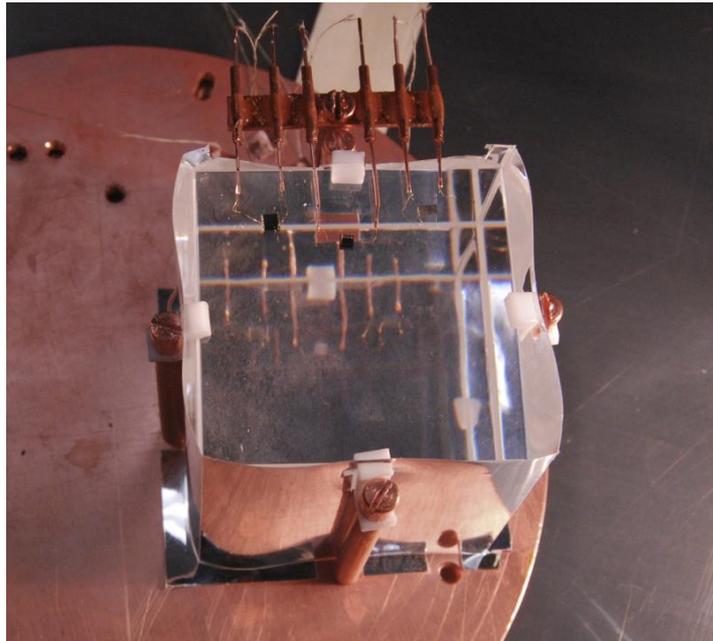
$$\Phi_{A0}(pd) \cong 0.54 \times \Phi_{vpp} (g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3$$

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

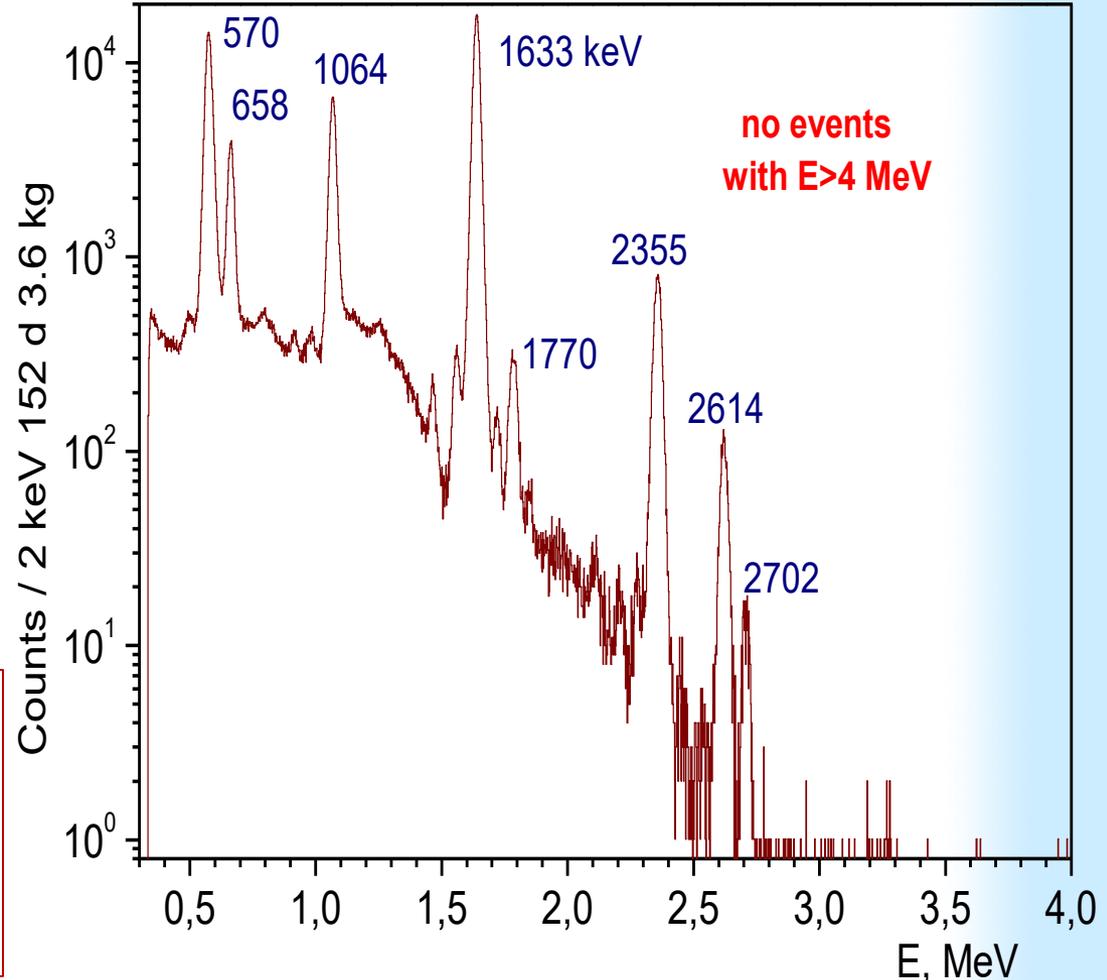


Ожидаемый поток солнечных аксионов может быть выражен в терминах потоков $7Be$ - и pp -нейтрино. Потоки зависят от g_{AN} . Мы предложили искать а.э. эффект на атомах Bi , используя кристаллы BGO . Пассивная защита детектора состояла из слоев Pb , Bi и Cu . Активное вето состоящее из 5 пл. сцинтилляторов размером. В *Borexino* выбраны три новых реакции для обнаружения аксионов.

Низкотемпературный BGO-болометр



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 γ -линии связаны с распадами ^{207}Bi . Ограничения на поток и сечение 5,5 МэВ аксионов основаны на отсутствии событий выше 4 МэВ.

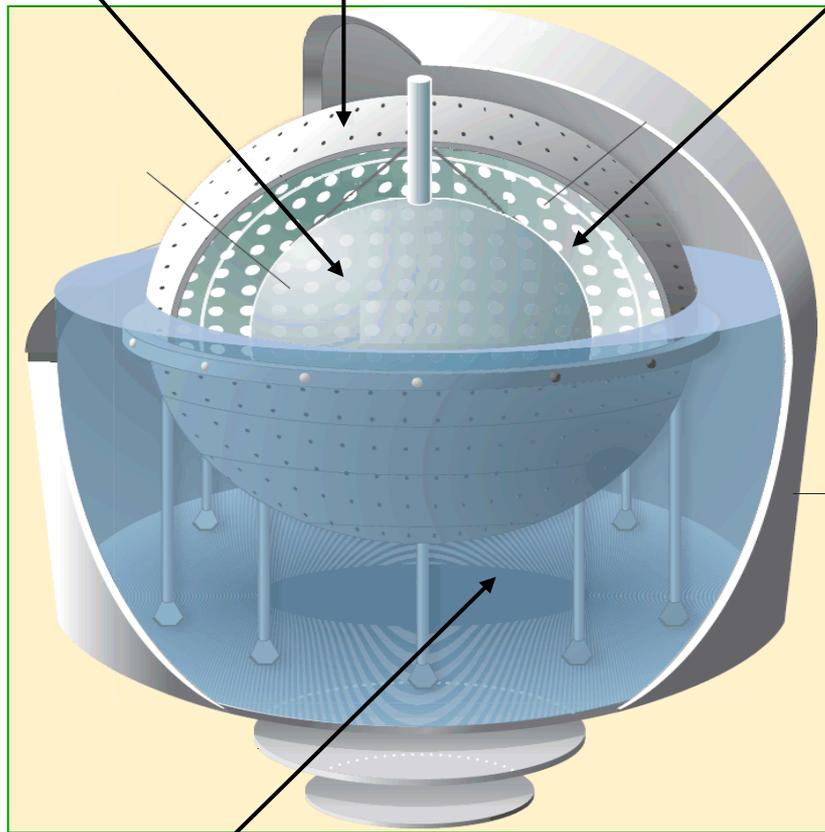


Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

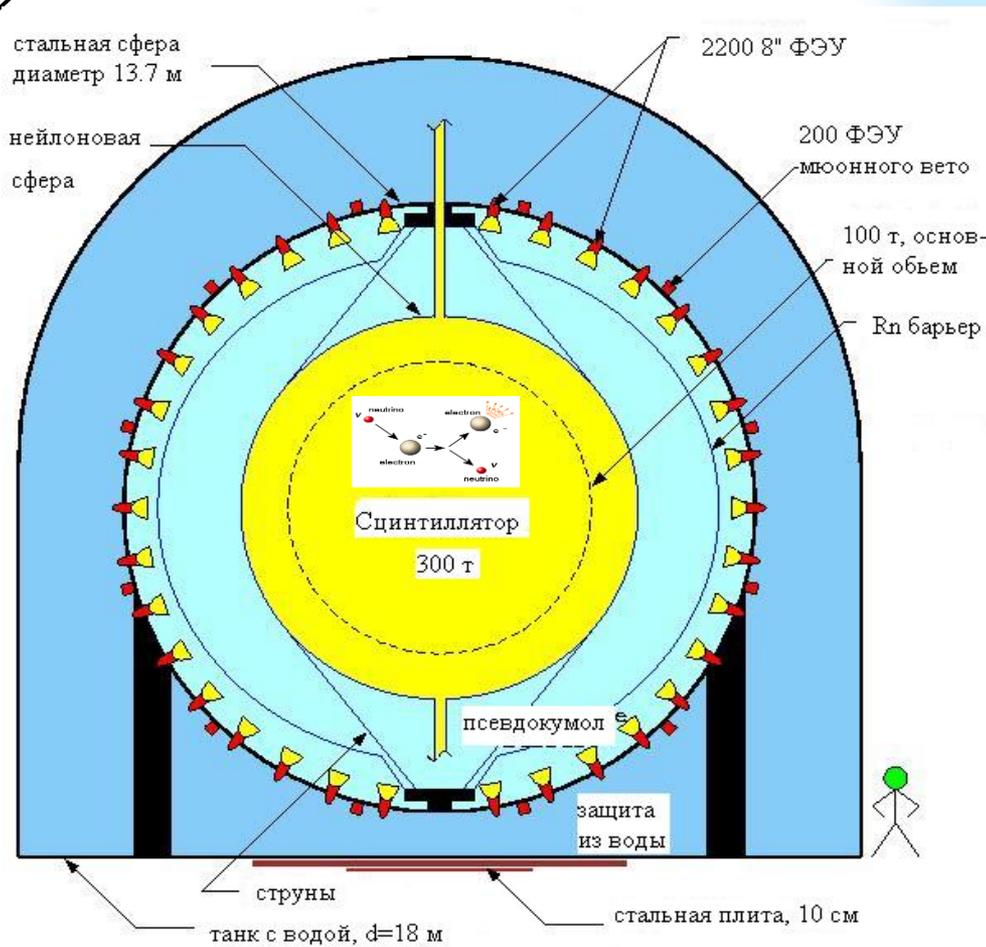
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

Стальная сфера (R=6,85 м)
- 2212 8" ФЭУ;
- 1350 м³ PC+DMP (5,0 г/л)

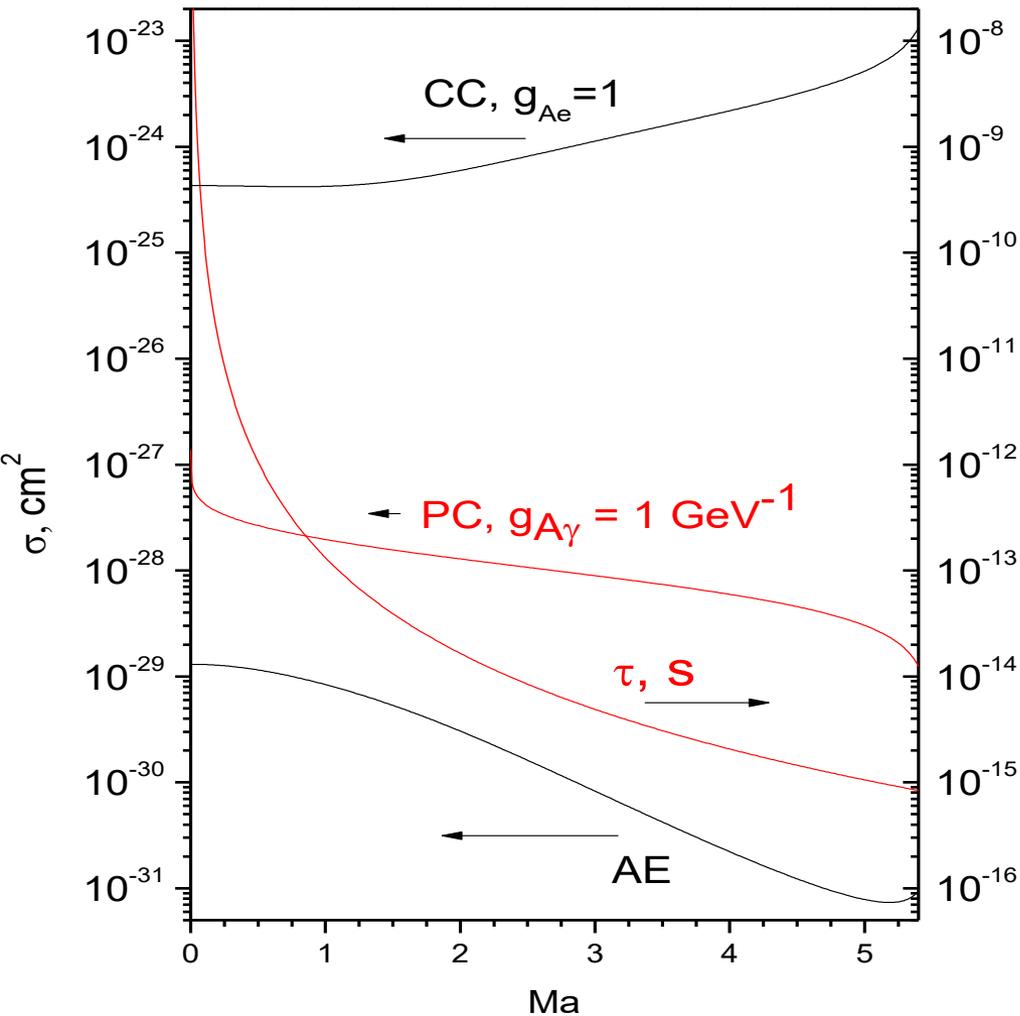
Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



Регистрация в Borexino через константы g_{Ae} и $g_{A\gamma}$



1. Комptonовская конв.: $A + e \rightarrow \gamma + e$.
 электрон и γ регистрируются
 Сечение имеет сложный вид,
 Полное σ для 5.5 МэВ аксионов
 $\sigma_{CC} \approx g_{Ae}^2 \times 4.3 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ при $m_A < 1 \text{ МэВ}$

2. Аксиоэлектрический эффект:
 $A + e + Z \rightarrow Z + e$.
 Аналог фотоэффекта
 Сечение для атома углерода и $E_A = 5.5$
 МэВ $\sigma_{AE} \approx g_{Ae}^2 \times 1.3 \times 10^{-29} \text{ cm}^2$

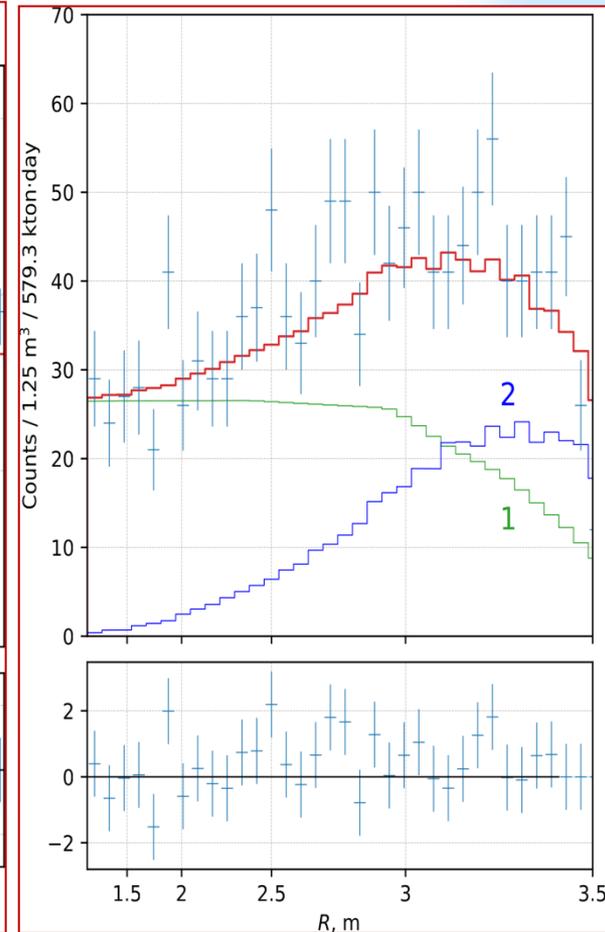
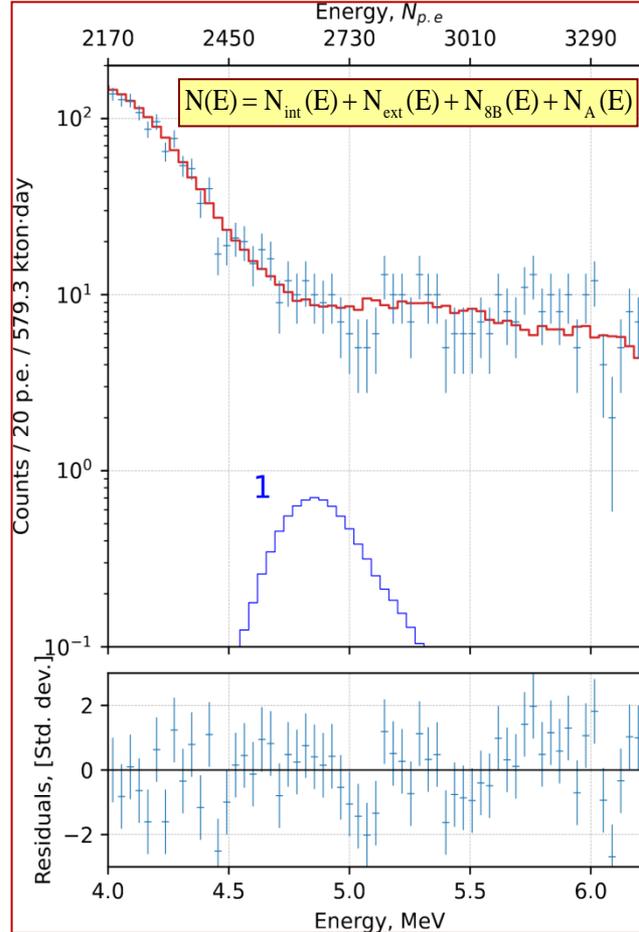
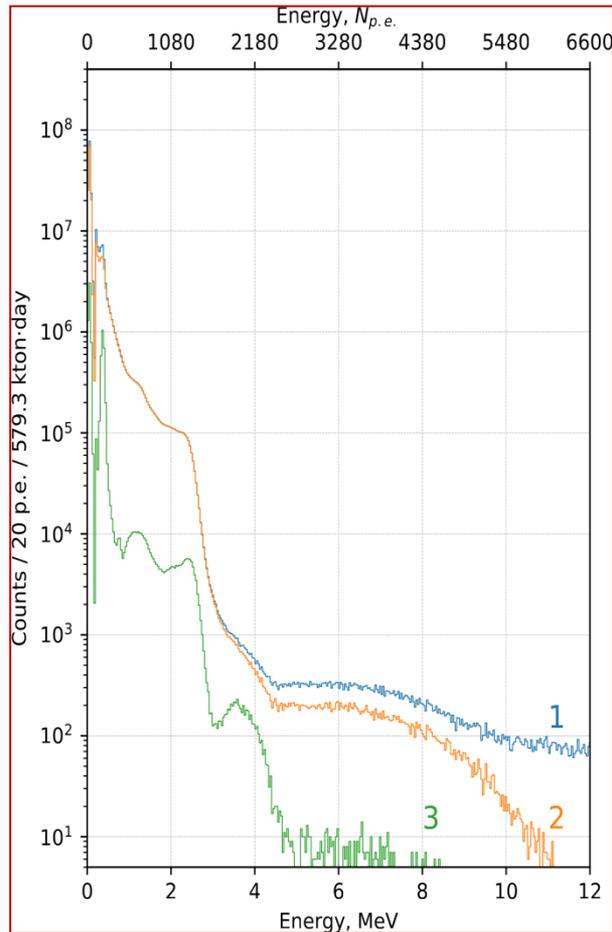
1. Обратная конверсия Примакова:
 $A + Z \rightarrow \gamma + Z$.
 на ядре, $E_\gamma \approx E_A$ и γ регистрируется.
 Полное σ для 5.5 МэВ аксионов
 $\sigma_{CC} \approx g_{A\gamma}^2 \times 4.7 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$ при $m_A < 1 \text{ МэВ}$

2. Распад аксиона: $A \rightarrow \gamma + \gamma$.
 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 γ -кванта и от примаковской конверсии на ядрах. Амплитуды реакций зависят от $g_{A\gamma}$.

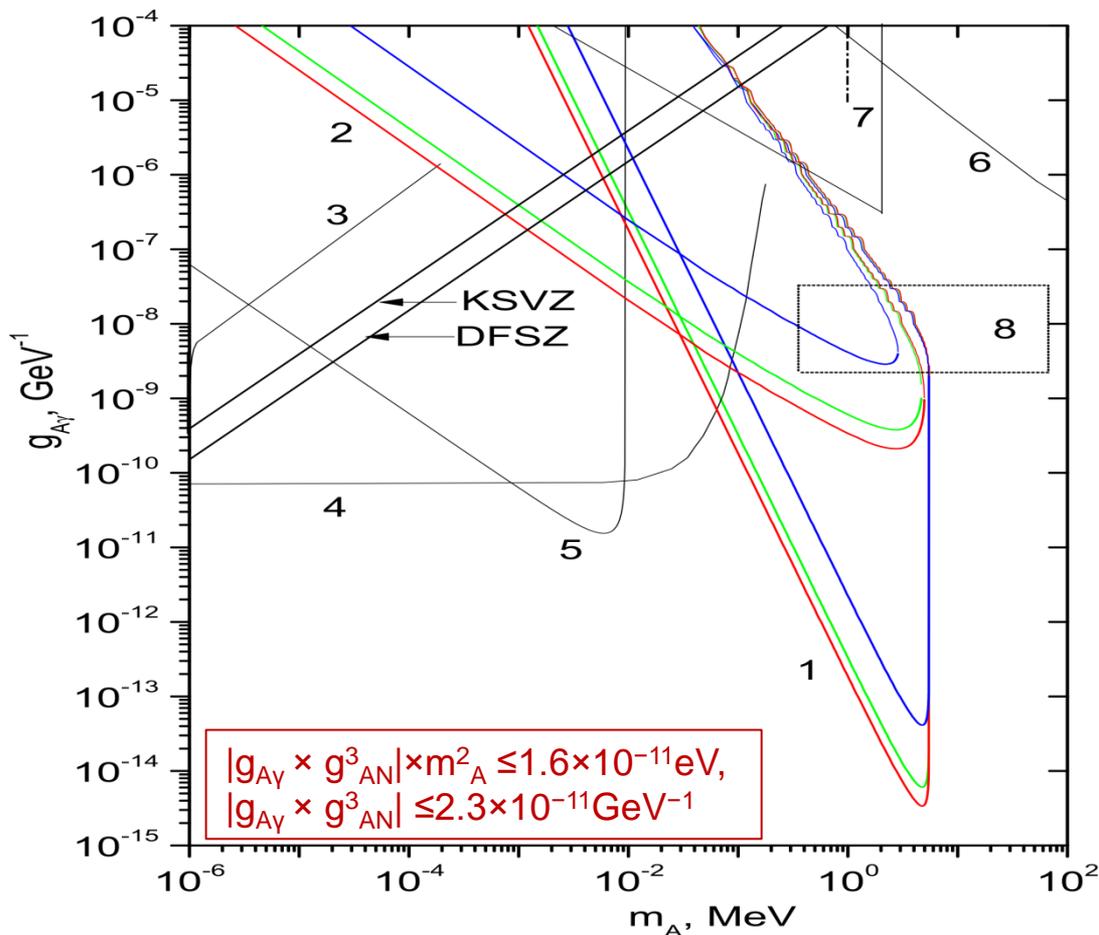
Данные Borexino за 3995 сут. x 145 т

(arXiv:2504.191356 27 Apr 2025)



Обработан полный набор данных Борексино за 11 лет живого времени. Отбор данных с целью получения максимальной чувствительности к искомым реакциям. Интересно, что существенный вклад в фон внесли солнечные 8В-нейтрино. Спектр подгонялся суммой 4-х основных компонент внутреннего и внешнего фона и спектра от 8В-нейтрино, с учетом радиальной зависимости всех компонент фона. Показана функция отклика для аксиоэлектрического эффекта.

Исключенные области для $g_{A\gamma}$ и m_A

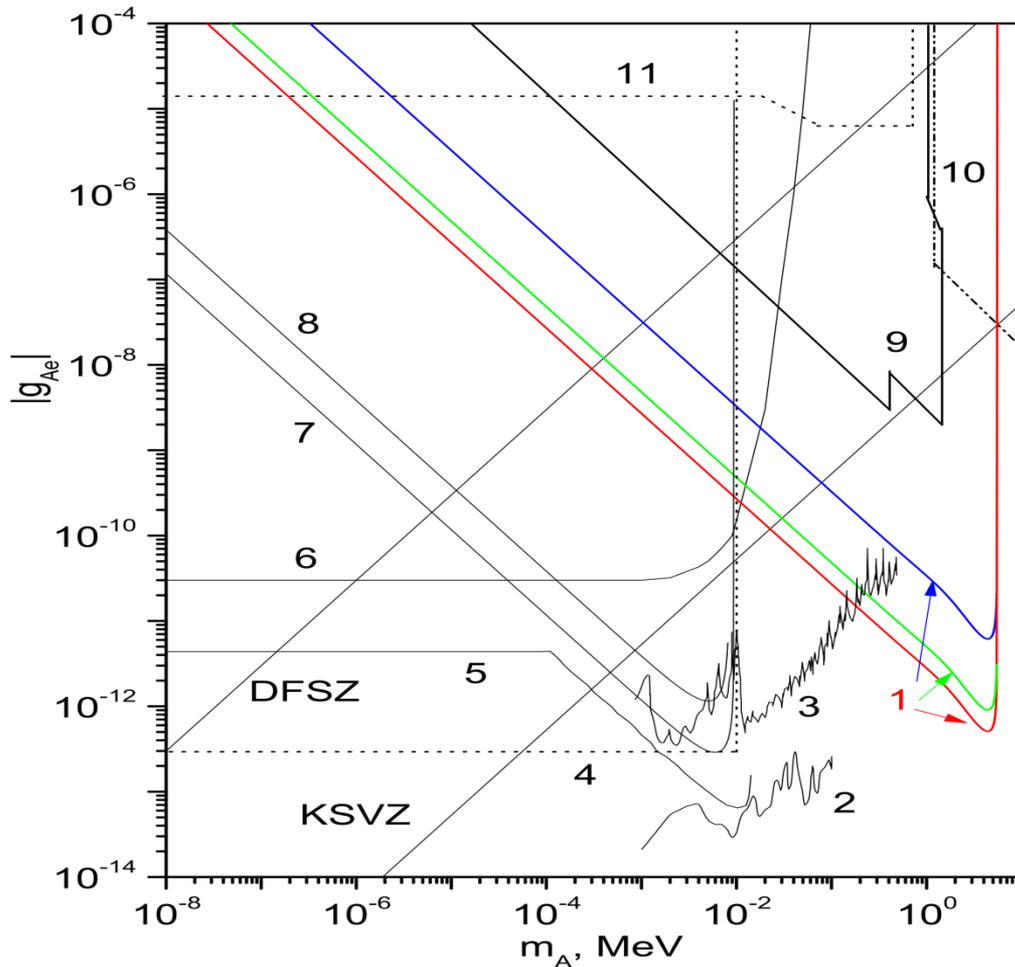


- 1 – Borexino: $A \rightarrow 2\gamma$ распад
 - 2 – Borexino: $A + Z \rightarrow Z + \gamma$ конверсия
 - красная - DFSZ, $\tan \beta = 140$,
 - зеленая - KSVZ,
 - синяя - DFSZ, $\tan \beta = 0.25$
 - 3 – CAST
 - 4 – звезды ГВ
 - 5 - Резонансное поглощение ^{83}Kr , ^{169}Tm
 - 6 - beam-dump
 - 7 – реакторы
 - 8 – SUSY и mirror- модели массивного аксиона.
- Показаны соотношения между g_{Ae} и m_A для DFSZ и KSVZ.

Borexino исключает новую большую область масс аксиона от 10 кэВ до 5 МэВ и констант связи $g_{A\gamma}$ (10^{-15} - 10^{-7}) 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 р/а источниками.

Верхние пределы на g_{Ae} и m_A

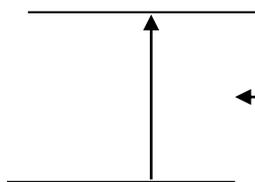
$$(|g_{Ae} \times g_{AN}^3| \leq 1.9 \times 10^{-13})$$



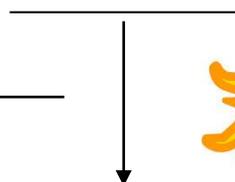
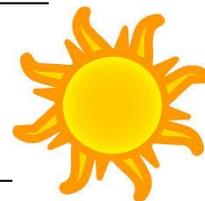
- 1- **Vorexino**: Комптон $A+e \rightarrow e+\gamma$
красная - DFSZ, $\tan \beta = 140$,
зеленая - KSVZ,
синяя - DFSZ, $\tan \beta = 0.25$
- 2 – XENON1T (реликтовые)
- 3 – Edelweiss (реликтовые)
- 4 – Красные гиганты ГВ
- 5 – PandaX-II (релик. + сол.)
- 6 – Солнечные нейтрино
- 7 – ^{83}Kr (Рез. поглощение)
- 8 – ^{169}Tm (Рез. поглощение)
- 9 – реакторные и солнечные нейтринные эксперименты
- 10 - beam-dump
- 11 – распад ортопозитрония

Результаты Vorexino исключают новую большую область масс аксиона (0,01-1) МэВ и констант связи $g_{Ae} \sim (10^{-12}-10^{-9})$. Для адронного аксиона с $m_A=1$ МэВ $g_{Ae} < 4.8 \times 10^{-12}$. На рисунке показаны ограничения на g_{Ae} , полученные в экспериментах с реактором, ускорителем и солнечными аксионами, а также из астрофизических данных.

Резонансное возбуждение ядерных уровней



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



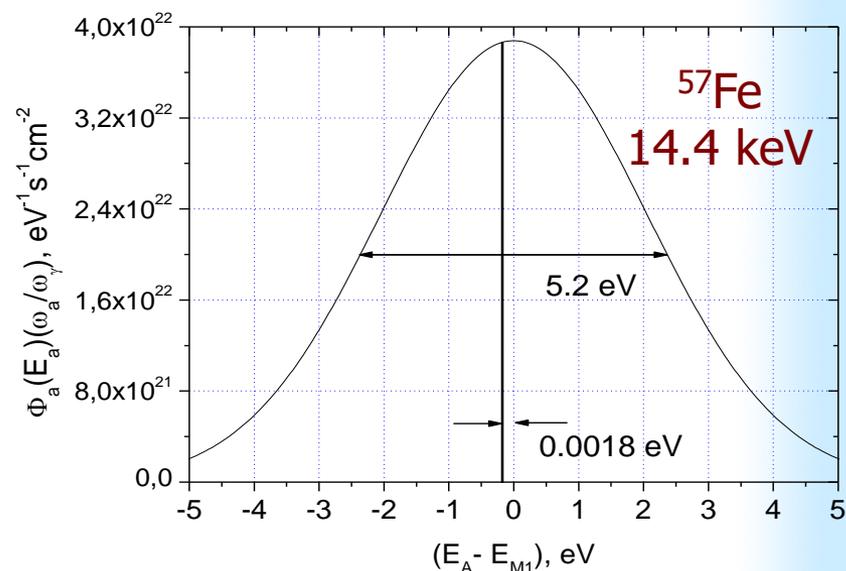
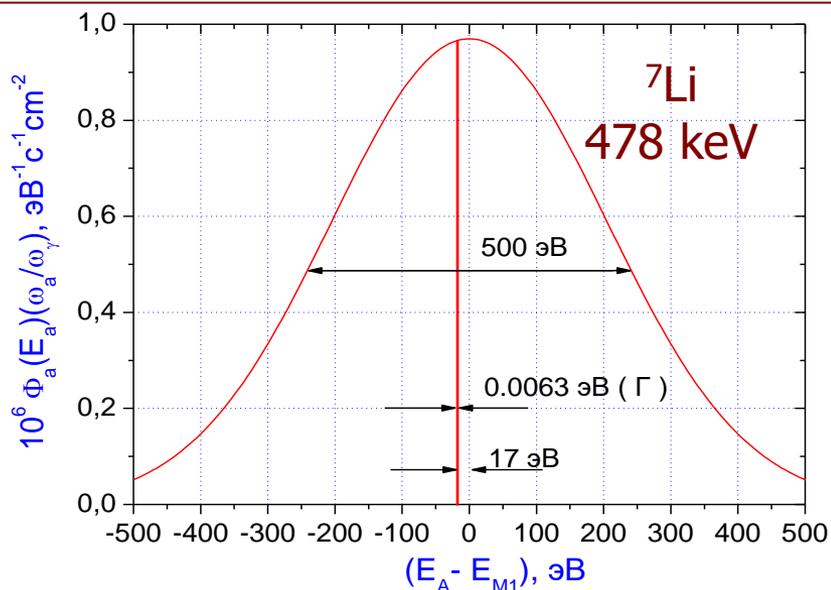
${}^7\text{Li}$, ${}^{57}\text{Fe}$, ${}^{83}\text{Kr}$, ${}^{169}\text{Tm}$

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

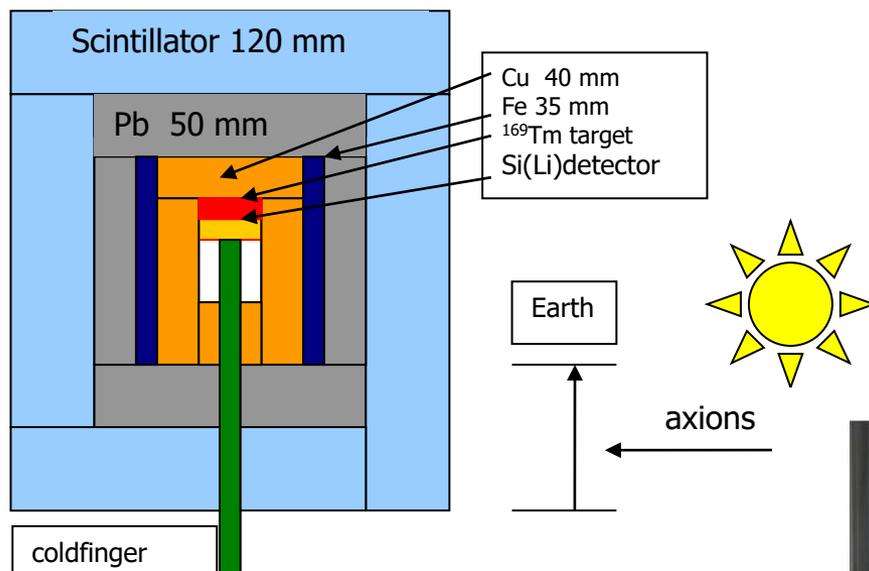
$$g_{AN}^3 = (M_N/2f_A)(C_p - C_n),$$

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

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



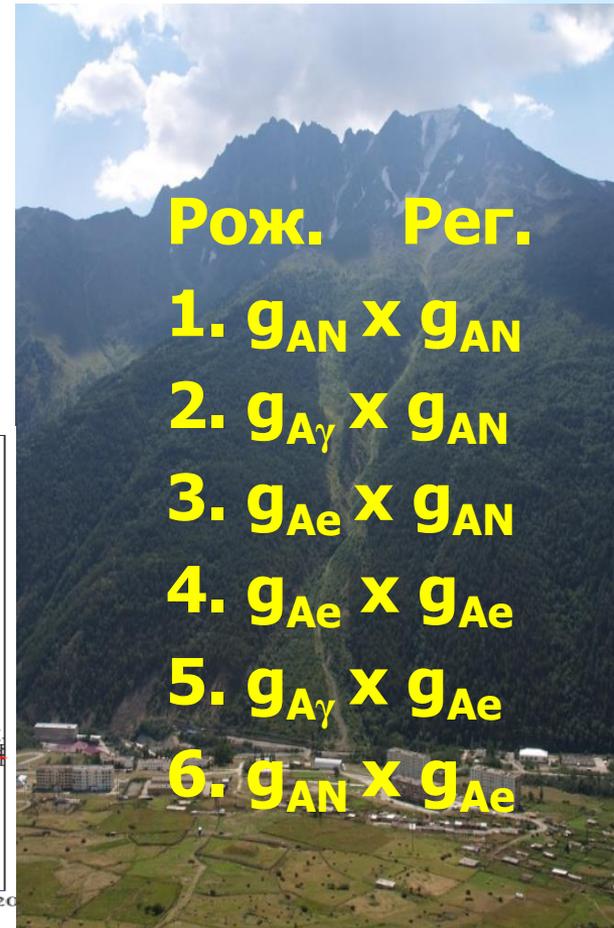
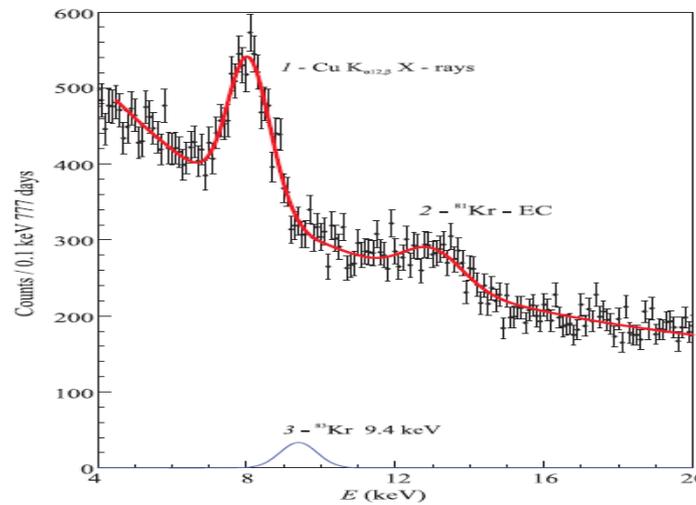
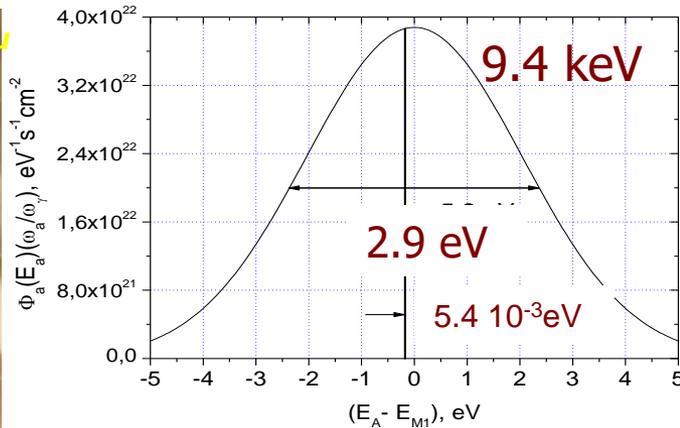
Si(Li)- и Ge-детекторы и ^{57}Fe - и ^7Li -мишени



Si(Li) и HPGe детекторы и ^{57}Fe и ^7Li мишени помещались внутри низкофоновой установки на поверхности Земли, снабженной активной защитой от мюонов и ядерно-активной компоненты космического излучения. Наиболее строгие, на тот момент, ограничения на массу ^7Li - и ^{57}Fe -аксионов.

Поиск солнечных аксионов, излучаемых в M1-переходе ^{83}Kr (9.4 кэВ) + ПКТ – (ИЯИ+ПИЯФ)

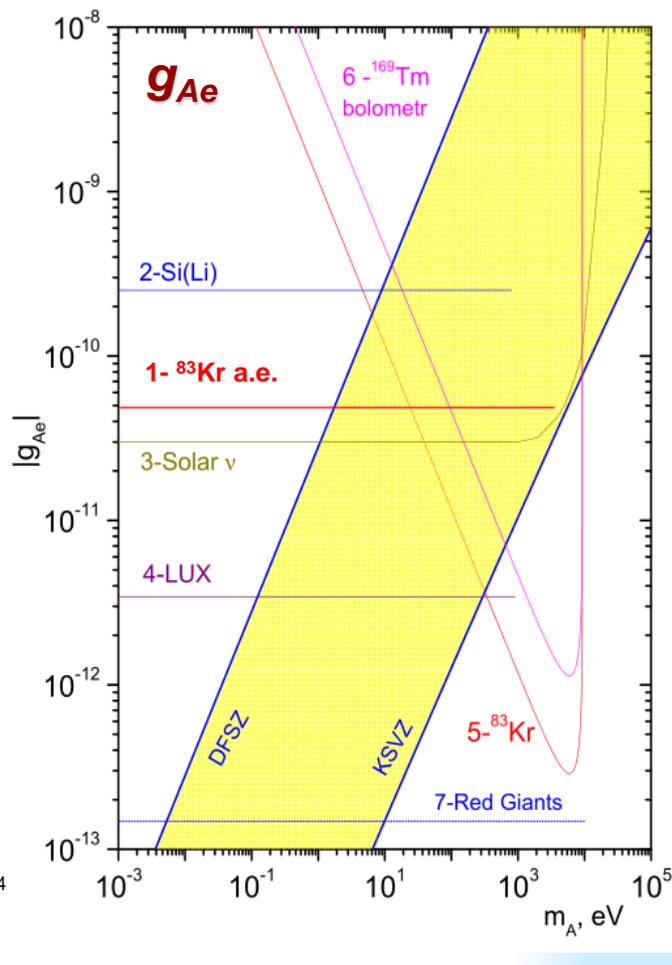
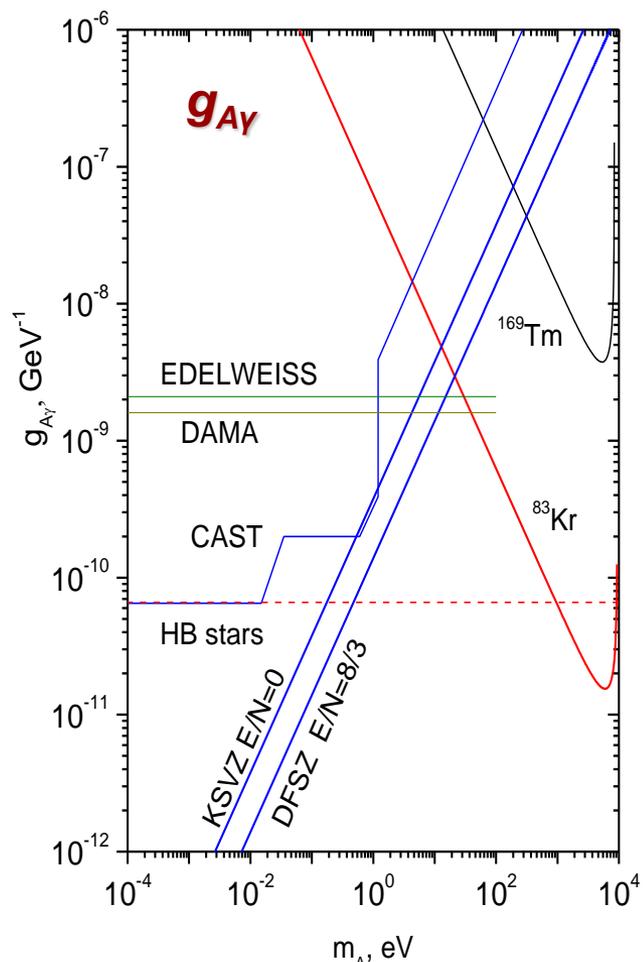
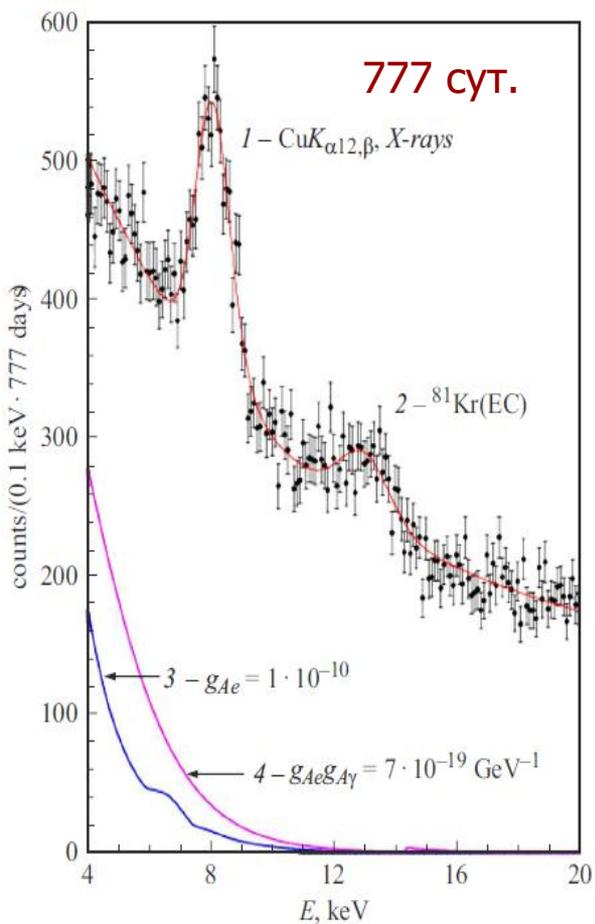
совмещения детектора и мишени



- Рож. Рег.**
1. $g_{AN} \times g_{AN}$
 2. $g_{A\gamma} \times g_{AN}$
 3. $g_{Ae} \times g_{AN}$
 4. $g_{Ae} \times g_{Ae}$
 5. $g_{A\gamma} \times g_{Ae}$
 6. $g_{AN} \times g_{Ae}$

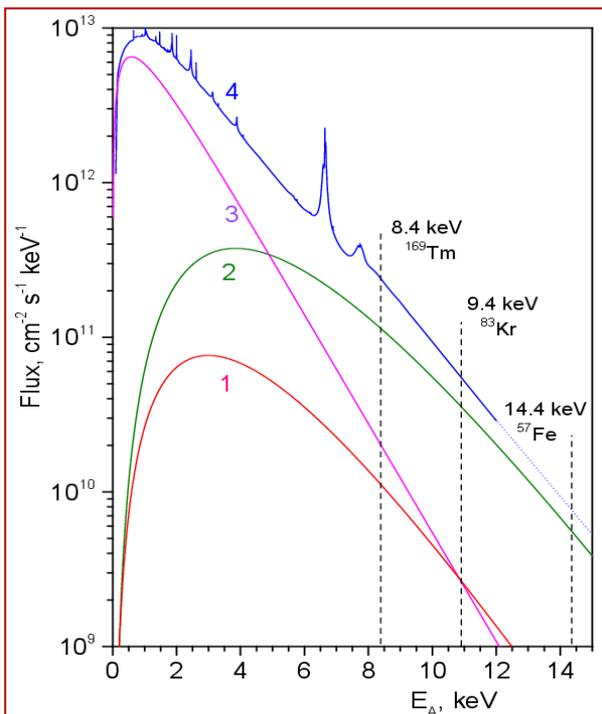
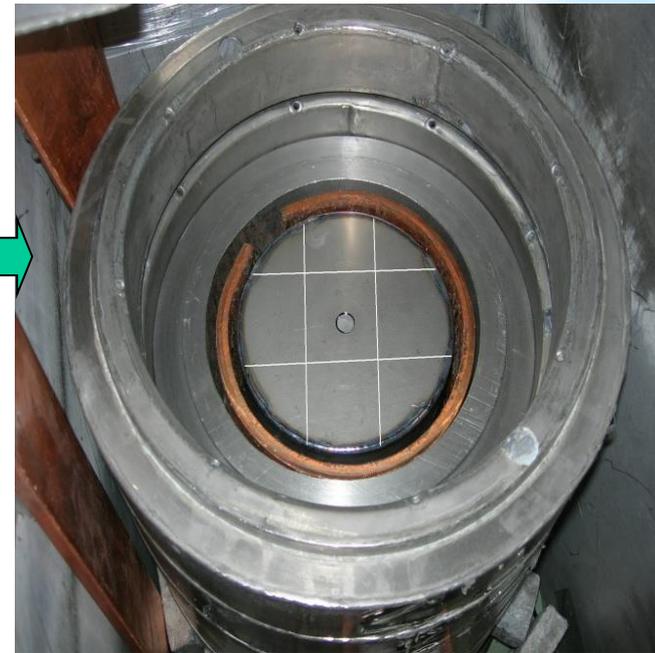
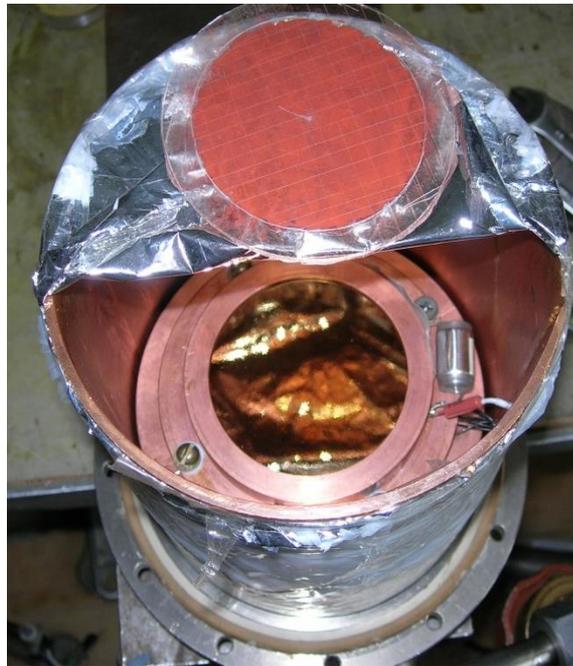
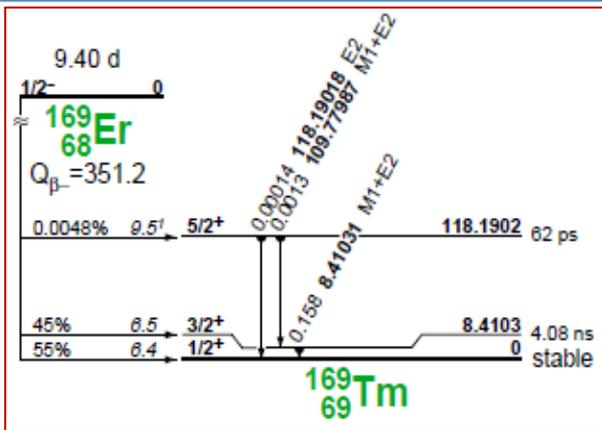
Проведен поиск 9.4 кэВ аксионов, излучаемых в M1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции: $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma$ (9.4 кэВ). Проведён поиск аксионов других типов (примаковских, комптоновских, тормозных, 14.4 кэВ) с помощью резонансного поглощения и аксиоэлектрического эффекта. Для регистрации γ - и ренгеновских квантов и электронов, использовался большой ($d=150, L=600$ мм, 8.8 л) пропорциональный счетчик, заполненная криптоном и размещенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории **Баксанской нейтринной обсерватории**.

Ограничения на g_{Ae} и g_{Ay} из резонансного поглощения $g_{Ay, Ae} \times g_{AN}$ и а.э. эффекта на атомах Kr : $g_{Ae} \times g_{Ae}$ и $g_{Ay} \times g_{Ae}$



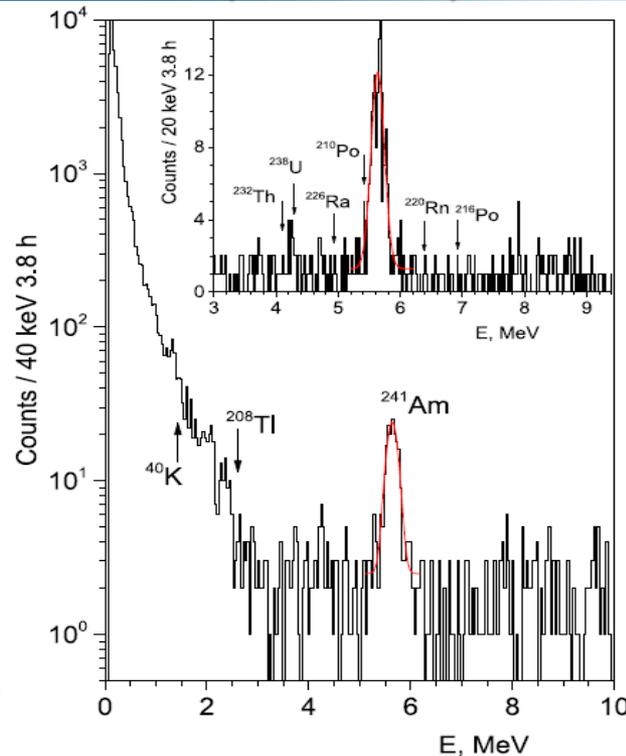
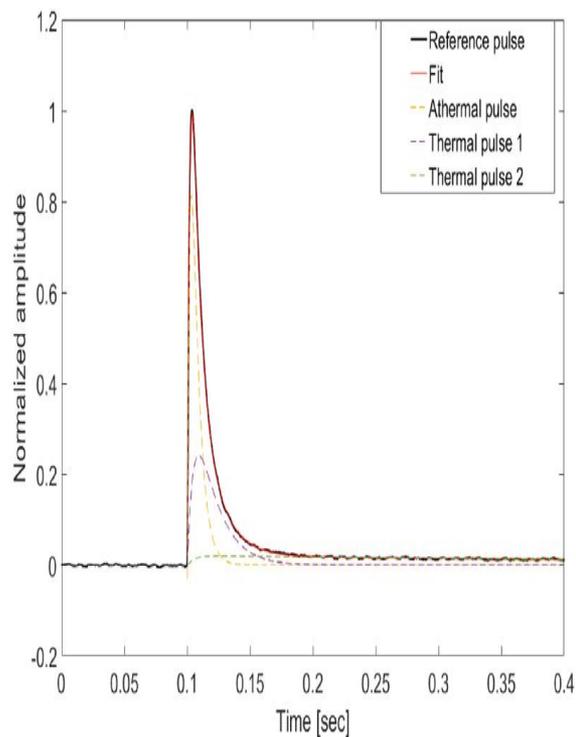
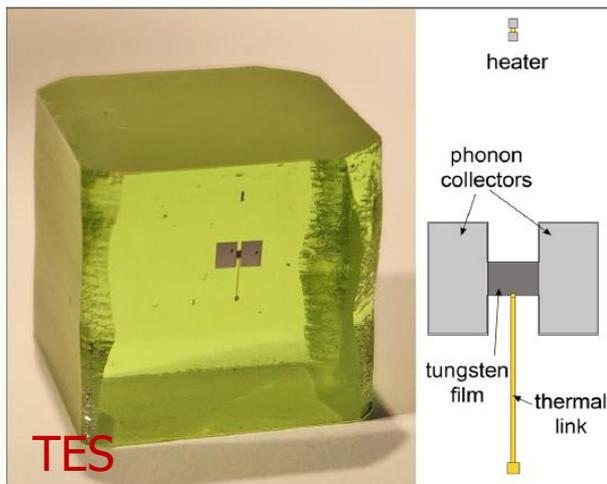
Проведен поиск рез. поглощения и а.э. эффекта в атомах криптона для солнечных аксионов различных типов. Получены новые ограничения на константы связи $|g_{Ay}(g^3_{AN} - g^0_{AN})| \leq 8.0 \times 10^{-16} \text{ ГэВ}^{-1}$ и $|g_{Ae}(g^3_{AN} - g^0_{AN})| \leq 1.5 \times 10^{-17}$ и $|g_{Ae}| \leq 4.9 \times 10^{-11}$ и на произведение констант связи с электроном и фотоном $|g_{Ae} g_{Ay}| \leq 1.6 \times 10^{-19} \text{ ГэВ}^{-1}$, все для 90% у.д. Ограничения на g_{Ay} более строгие чем астрофизические, для $m_A \sim \text{кэВ}$. Исключены новые значения масс аксиона в DFSZ- KSVZ-моделях.

^{169}Tm новый перспективный изотоп – р-переход 8.4 кэВ.



Принципиальное отличие перехода $M1$ в ядре ^{169}Tm от аналогичных переходов в ядрах ^{57}Fe и ^{83}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 ω_A/ω_γ , которое может обращаться в нуль для нейтронных переходов, для протонного перехода отлично от нуля. Первоначально поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{169}Tm был выполнен с использованием детектора $\text{Si}(\text{Li})$ и мишени Tm . Затем был изготовлен Tm -содержащий сцинтиллятор, болометры на основе фольфраматов и молибдатов. Тулиевый гранат.

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



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 РАН, МРИ 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. 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 $|g_{Ae}(g_{0AN}+g_{3AN})| \leq 2.81 \times 10^{-16}$

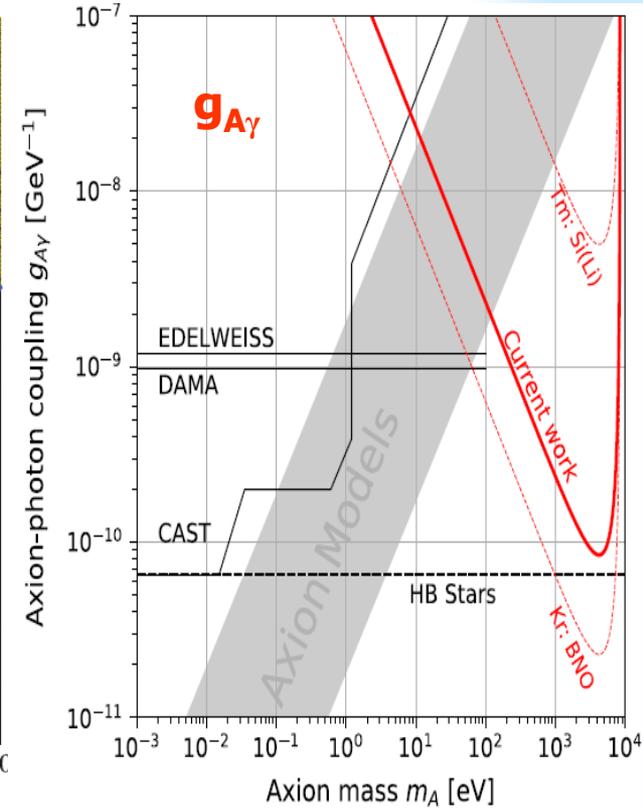
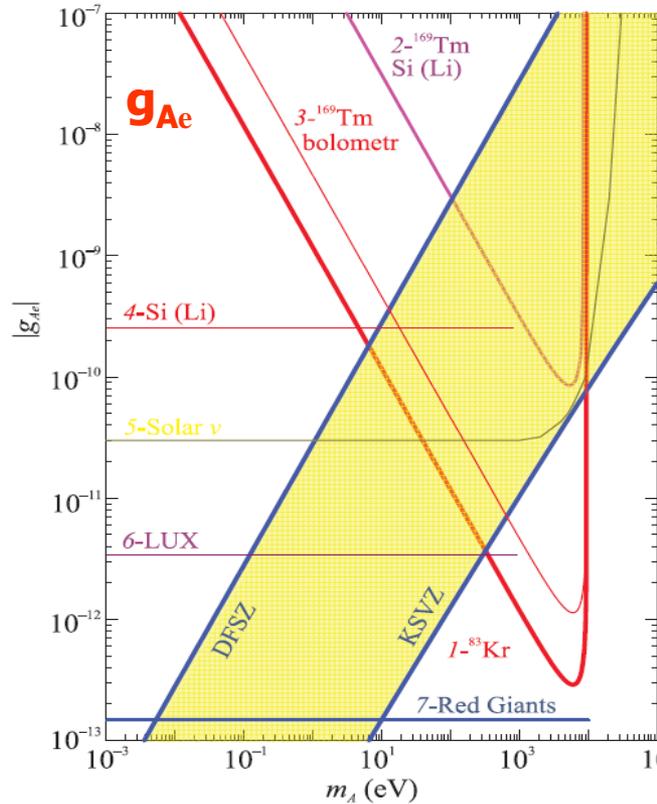
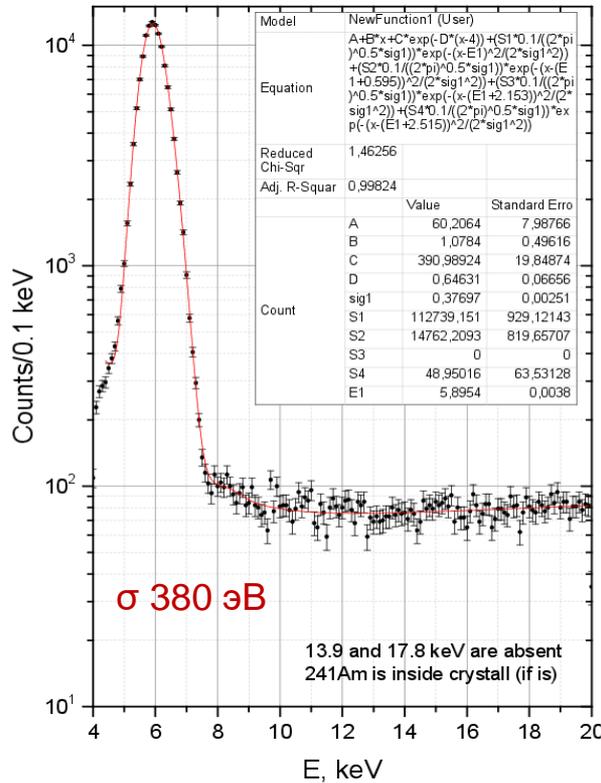
Первые результаты, полученные с $Tm_3Al_5O_{12}$

Новые пределы, измерений с термистором TES при 10 мК, на константы связи:

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

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

8 ± 6.6 сут. фон



Верхние пределы на g_{Ae} и $g_{A\gamma}$ в сравнении с результатами других экспериментов и астрофизическими ограничениями. Близко к астрофизическим ограничениям в области масс около 1 кэВ. Пока уступает результатам ^{83}Kr , но это р-переход $\omega_A/\omega_\gamma \ll 0$.

Поток и скорость счета 8.4 кэВ ^{169}Tm -солнечных аксионов

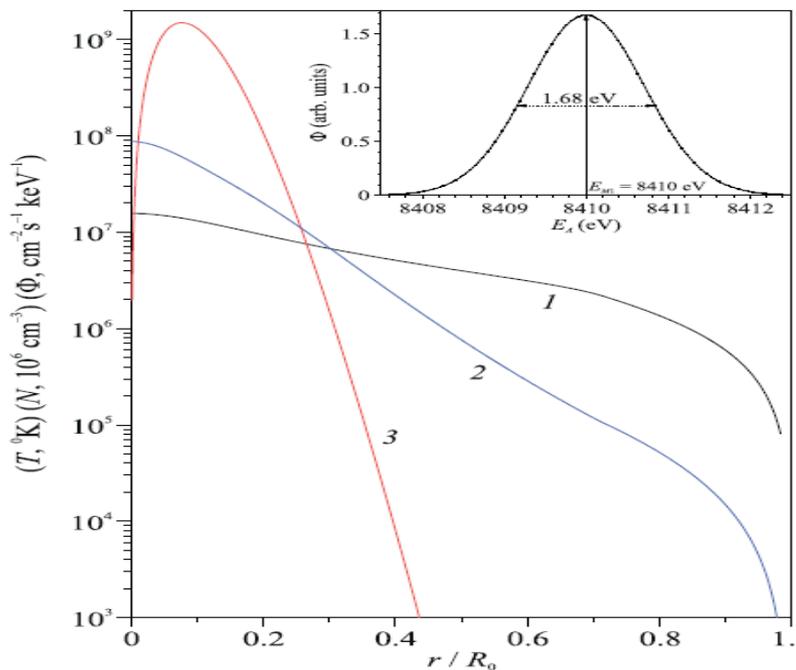
Письма в ЖЭТФ, том 118, вып. 3, с. 154 – 158

© 2023 г. 10 августа

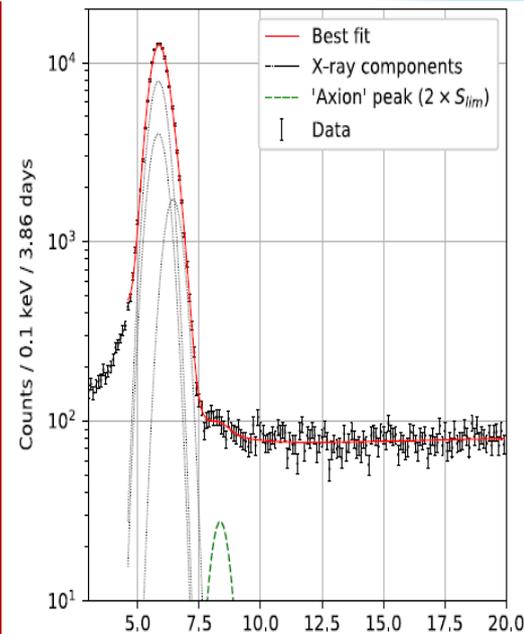
Поиск солнечных аксионов с энергией 8.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{169}Tm

А. В. Дербин¹⁾, 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 , K , кривая 1) и концентрации атомов ^{169}Tm (N , в единицах 10^6 см^{-3} , кривая 2) в зависимости от радиуса r . Поток аксионов из слоя $r^2 dr$ для значения $w_A/w_Y = 4 \times 10^{-14}$ 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.

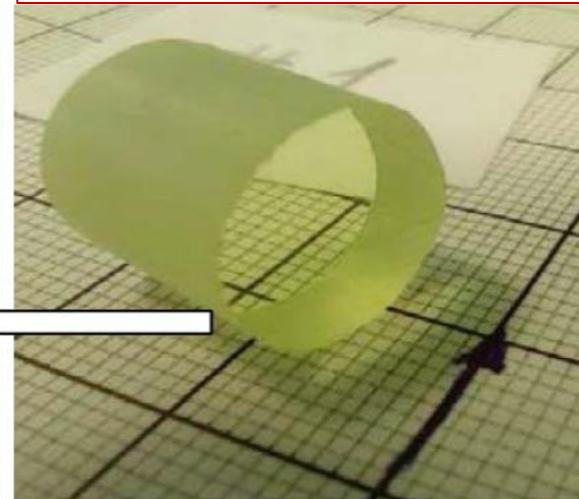


Впервые выполнен поиск резонансного возбуждения 1-го ядерного уровня ^{169}Tm с энергией 8.4 кэВ солнечными аксионами с энергией 8.4 кэВ, потоки которых были вычислены. Для регистрации использовался болометр на основе тулиевого граната. В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона 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 KSVZ-аксиона это наиболее строгое лабораторное ограничение.

Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ в криогенной установке НГТУ

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

$Tm_3Al_5O_{12}$ ИОФ
им. А.М. Прохорова, кристаллы
 $m=10$ г, $d=12$ мм, $h=12$ мм



Продолжена работа по созданию болометров в РФ. Криогенная установка в НГТУ. Создание болометрической техники необходимо для широкого класса задач, требующих рекордного разрешения и низкого порога: аксионы, 2β -распад, нейтринная физика, редкие процессы. С новыми кристаллами в подземной лаборатории чувствительность к g_{Ay} и g_{Ae} будет сравнима с результатами ^{83}Kr -эксперимента. Важно, для ^{169}Tm отсутствует неопределенность в ЯМЭ. **Новый проект ряда институтов** по поиску конверсии $A \rightarrow \gamma$ реликтовых аксионов с массой ~ 50 мкэВ в фотоны в лабораторном магнитном поле с использованием детектора, работающего в однофотонном режиме, который разработан в НГТУ.

Заключение и планы

Аксион (и ALPs) одновременно решают CP-проблему сильных взаимодействий и являются хорошо мотивированными кандидатами на темную материю. Основные экспериментальные усилия направлены на поиск конверсии солнечных и реликтовых аксионов в лабораторном магнитном поле.

Поиски аксиоэлектрического эффекта (g_{Ae}) и резонансного поглощения (g_{AN}) для солнечных и реликтовых аксионов с помощью п/п, газовых и болометрических детекторов, а также детекторов нейтрино и темной материи, исключили новую большую область возможных масс и констант связи аксиона и ALPs. Поиски резонансного возбуждения ядерного уровня 8.4 кэВ ядра ^{169}Tm в составе Tm-болометра могут существенно улучшить чувствительность к константам связи KSVZ адронного аксиона.

Создание и развитие **низкотемпературной и болометрической техники**, необходимой для поиска солнечных и реликтовых аксионов, востребовано и будет способствовать развитию исследований в области 2β -распада, нейтринной физики, (мм нейтрино, когерентное рассеяние), поиску темной материи и других редких процессов.

Спасибо за внимание!

В.Н. Муратова «Поиск аксиоэлектрического эффекта в атомах Kг для солнечных аксионов», постер
Е.В. Унжаков «Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов, испускаемых в M1-переходе ядра ^{169}Tm », доклад 03.07.

Доклады на конференции «Ядро-2025»

1. **А.В. Дербин**, Экспериментальные поиски солнечных аксионов,
2. **В.Н. Муратова**, Поиск аксиоэлектрического эффекта в атомах Kr для солнечных аксионов, постер 02.07
3. **Е.В. Унжаков**, Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов, испускаемых в M1-переходе ядра ^{169}Tm , доклад 03.07
4. **И.С. Драчев**, The precision measurement of the electron anti-neutrino spectrum in beta-decay of ^{144}Ce - ^{144}Pr nuclei, доклад 03.07
5. **Д.В. Иванов**, Прецизионные измерения периода полураспада ^{71}Ge , выполненные с целью поиска решения «галлиевой аномалии», постер 02.07
6. **И.С. Ломская**, Поиск корреляций нейтринных событий в детекторе Bogexino с транзиентными астрофизическими явлениями, постер 02.07
7. **Н.В. Нязова**, Поиск тяжелых нейтрино с помощью измерений спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr полупроводниковыми спектрометрами, постер 02.07
8. **М.А. Панкратов**, Спектрометр на основе Si-детекторов для измерения бета-спектров в присутствии интенсивного гамма-фона, постер 05.07
9. **Д.А. Семенов**, Компактный калибровочный источник нейтронов на основе нуклида ^{252}Cf и кремниевого полупроводникового детектора, постер 05.07
10. **М.В. Трушин**, Эпитаксиальные пленки 4H-SiC как детекторы альфа-частиц и осколков деления, постер 05.07

Источники и детекторы аксионов и ALPs



Солнечные аксионы

Конверсия в фотон: Солнечные гелиоскопы: CAST, **IAXO**:
в поле кристалла: Solax, Cosme, DAMA, Edelweiss,

Аксиоэлектрический эффект: **Si**, Ge, Xe, **Bi**, Ar

Комптоновская конверсия: **BOREXINO**, **BGO**, **DEAP**, **DarkSide**

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

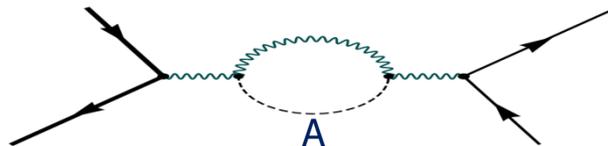
A.E. в Si-, Ge-, Xe-, Bi- (Xenon, XMASS, Edelweiss, LUX)

Лабораторные аксионы

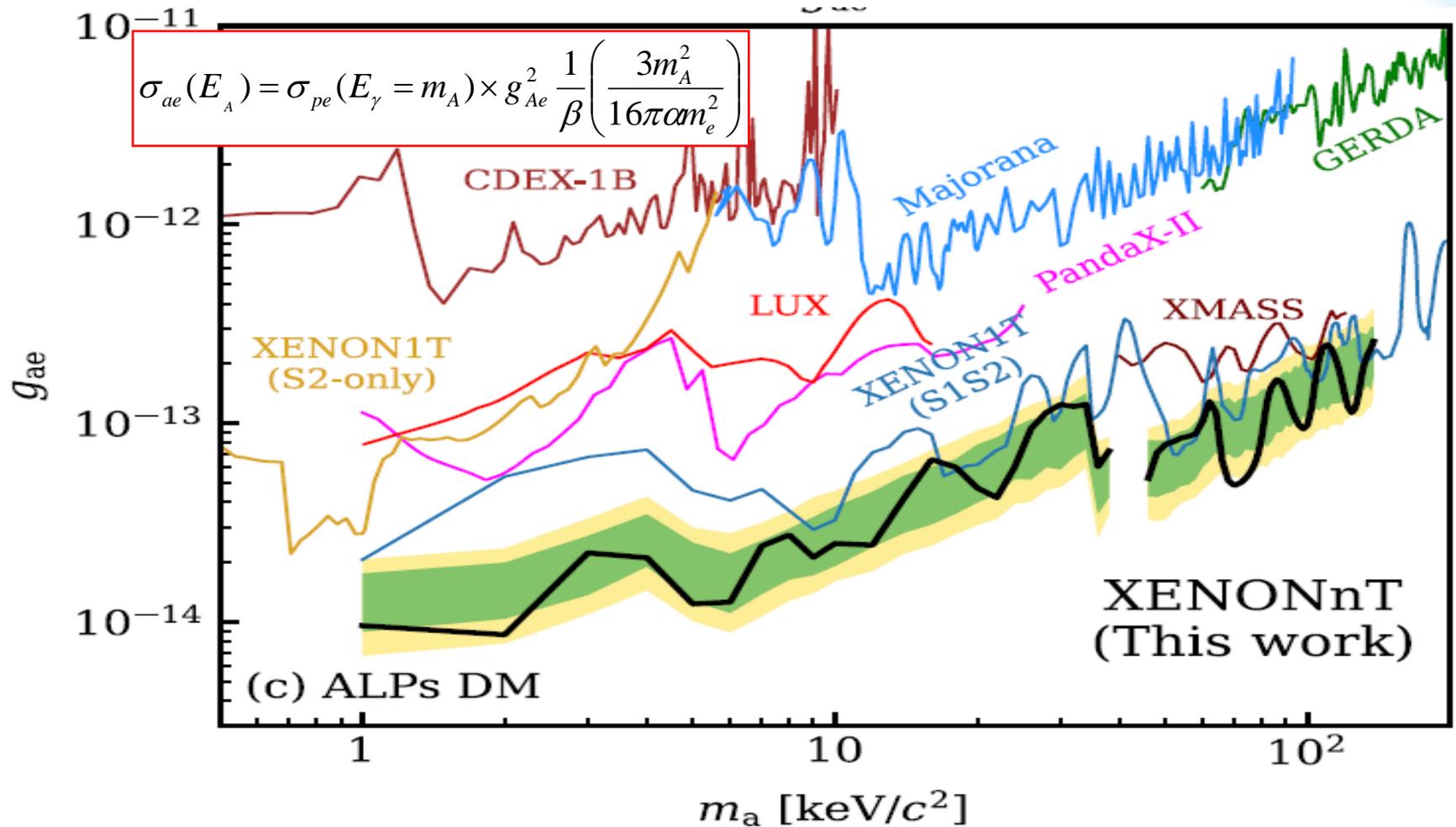
*Реакторы, ускорители, p/a источники,
лазеры “Light shining through walls”, поляризационные
PVLAS, ALPS, OSQAR, CASCADE, ARIADNE*

Новые методы регистрации реликтовых аксионов

1. Эксперименты с **метаматериалами** с периодической структурой, индуцирующей эффективную массу фотона, и диэлектрических слоев в магнитном поле для резонансного усиления фотонного сигнала, чувствительны к массам аксиона $(3-40)10^{-5}$ эВ. РФ – ИТМО.
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.)



Поиски а.э. эффекта для реликтовых аксионов

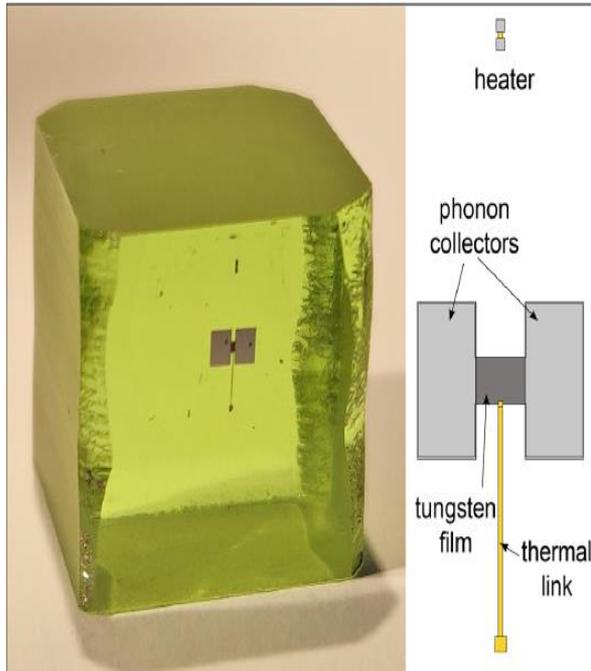


Для нерелятивистских аксионов сечение аксиоэлектрического эффекта пропорционально сечению фотоэффекта для фотонов с энергией равной массе аксиона. ПИЯФ, поиск аксионов ТМ с Si-, и Ge-детекторами. Новые результаты DarkSide.

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 э** кристаллом в течении **6.6 сут.** позволили установить новые ограничения на константы связи аксиона с фотонами g_{Ay} и электронами g_{Ae} :

$$|g_{Ay}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 1.44 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1} \text{ and } |g_{Ae}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 2.81 \times 10^{-16}.$$



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. Abdelhameed¹, S. V. Bakhlanov², P. Bauer¹, A. Bento^{1,7}, E. Bertoldo¹, L. Canonica¹, A. V. Derbin², I. S. Drachnev², N. Ferreiro Iachellini¹, D. Fuchs¹, D. Hauff¹, M. Laubenstein³, D. A. Lis⁴, I. S. Lomskaya², M. Mancuso¹, V. N. Muratova², S. Nagorny⁵, S. Nisi³, F. Petricca¹, F. Proebst¹, J. Rothe¹, V. V. Ryabchenkov⁶, S. E. Sarkisov⁶, D. A. Semenov², K. A. Subbotin⁴, M. V. Trushin², E. V. Unzhakov^{2,a}, E. V. Zharikov⁴

¹ Max-Planck-Institut für Physik, 80805 Munich, Germany

² NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia

³ INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy

⁴ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

⁵ Physics Department, Queen's University, Kingston, ON K7L 3N6, Canada

⁶ NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

⁷ Departamento de Física, Universidade de Coimbra, P3004 516 Coimbra, Portugal

Астрофизические ограничения

Излучение аксионов Солцем

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

Время горения He в звездах Г-В

$$|G_{A\gamma\gamma}| < 6.6 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1} \quad |g_{a\gamma\gamma}| = (2.9 \pm 1.8) \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

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

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

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

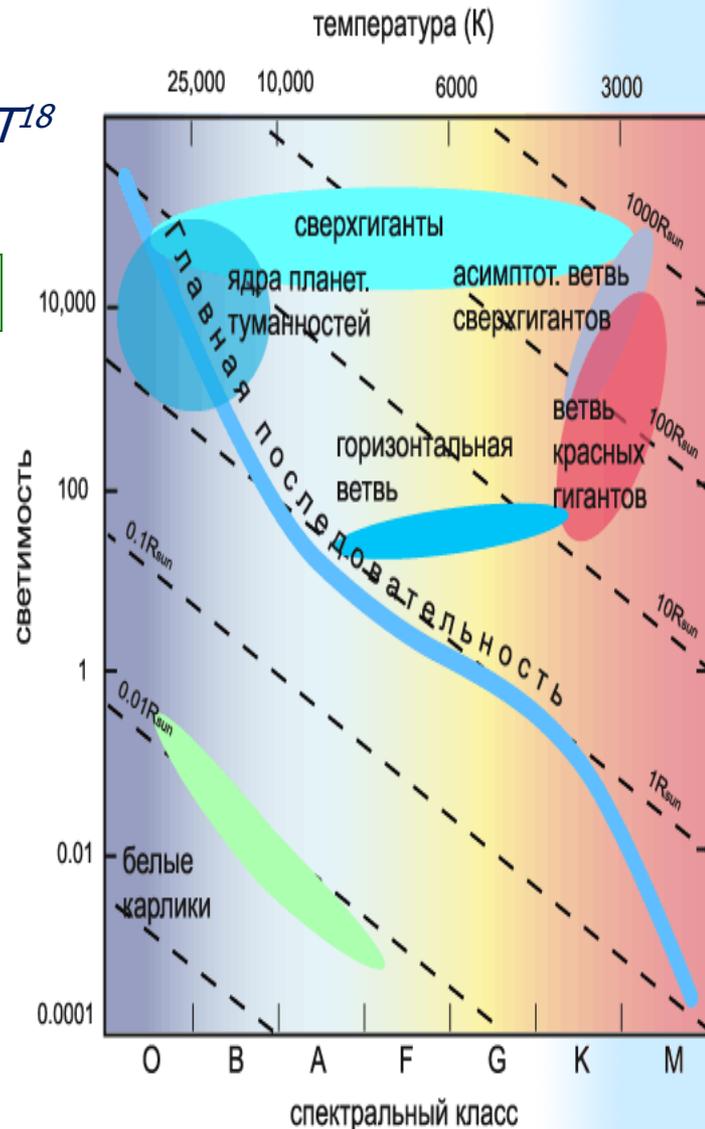
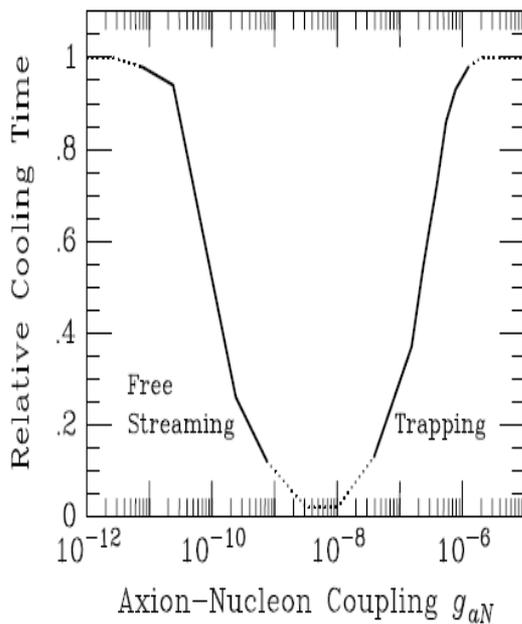
$$2.5 \text{ meV} \lesssim m_A \cos^2 \beta' \lesssim 7.5 \text{ meV}$$

SN1987A и NS остывание

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

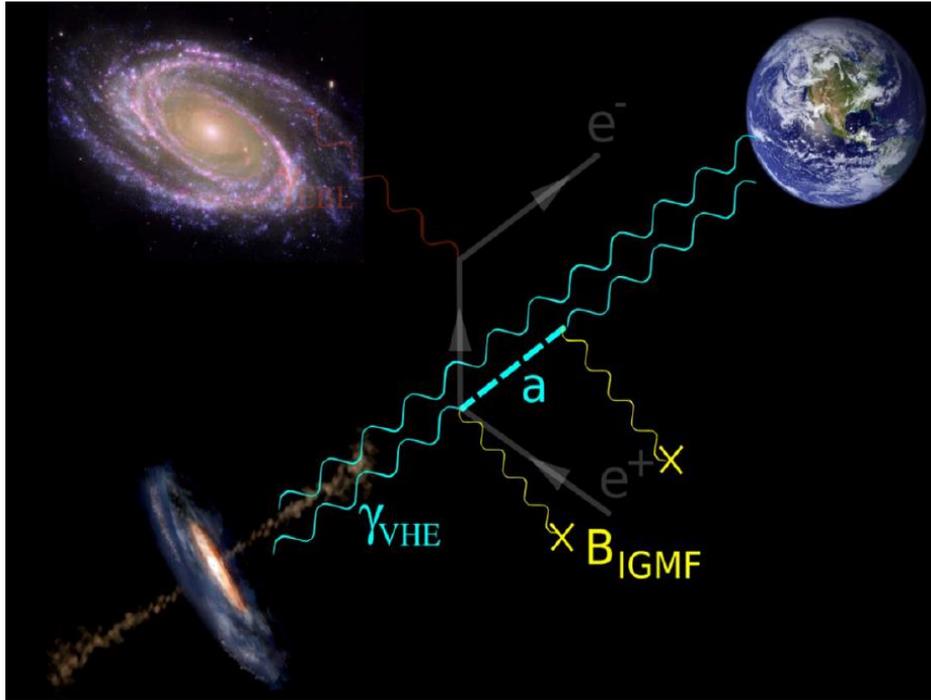
$$|g_{app}| < 1.5 \times 10^{-9}$$

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



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⁻¹.



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 $g_{Ae} = (1-2) \times 10^{-13}$.

