

Сцинтилляторы в неускорительной физике элементарных частиц

Д.В. Пода^{1,2,*}, Ф.А. Даневич¹, Р. Бернабей^{3,4}

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *Национальный институт ядерной физики (НИЯФ),
Национальная лаборатория Гран-Сассо, Ассерджи, Италия*

³ *НИЯФ, Римское отделение “Тор Вергата”, Рим, Италия*

⁴ *Физический факультет Римского университета “Тор Вергата”, Рим,
Италия*

* poda@kinr.kiev.ua



Содержание

- **Свойства нейтрино, регистрация гео-нейтрино**
- **Двойной бета-распад**
- **Редкие альфа- и бета-распады**
- **Поиски тёмной материи**
- **Требования к сцинтилляторам**

Нейтринные эксперименты

Проблемы физики нейтрино

- Осцилляции нейтрино * \Rightarrow матрица смешивания нейтрино
- Солнечные нейтрино
- Число лёгких нейтрино?
- Поиск магнитного момента нейтрино *
- Измерения потоков антинейтрино от разных источников
- Нейтрино из глубин Земли (гео-нейтрино)
- Нейтрино сверхвысоких энергий ($> \text{ТэВ}$)

Нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействует с веществом

* эффекты за рамками стандартной модели частиц

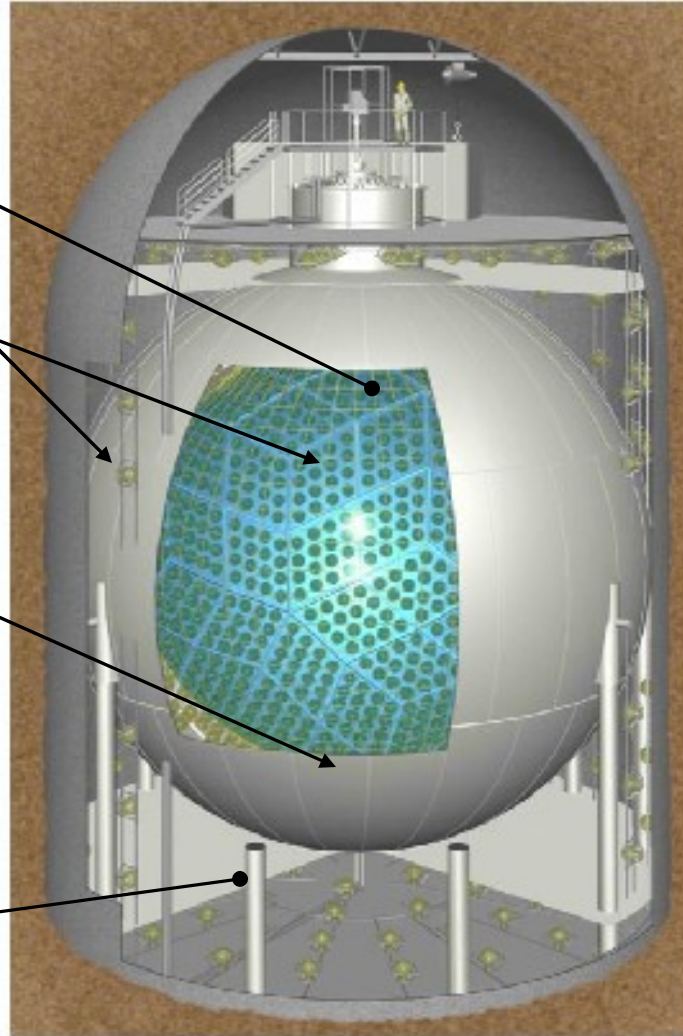
Детектор KamLAND

**ЖС: 20% РС +
80% мин.масло
+ 1.5 г/л РРО**
(1000 тонн, Ø13м)

ФЭУ (≈ 2000 шт)

**Стальной
резервуар**
(Ø18 м)

**Внешний
Черенковский
водный детектор**
(3200 тонн)



**Самый
радиоактивно
чистый ЖС:**
 $^{40}\text{K} \leq 0,6$ мкБк/кг
 $^{232}\text{Th} \leq 0,02$ мкБк/кг
 $^{238}\text{U} \leq 0,1$ мкБк/кг

**Основная цель:
исследование
осцилляций
антинейтрино путем
измерения потока
нейтрино от 56
японских реакторов,
расположенных на
расстоянии <200 км**

Результаты KamLAND

Осцилляции антинейтрино:

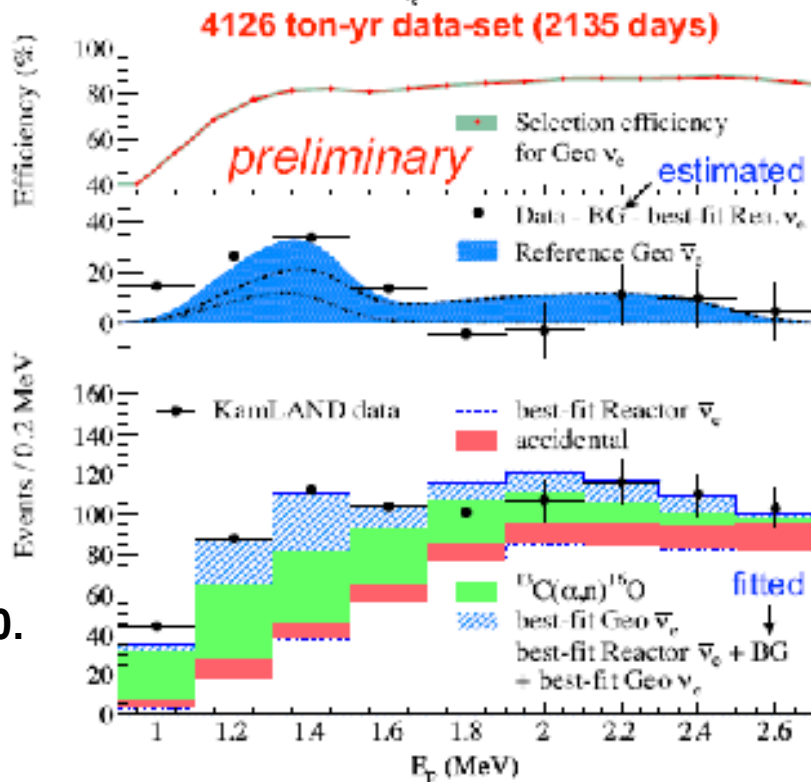
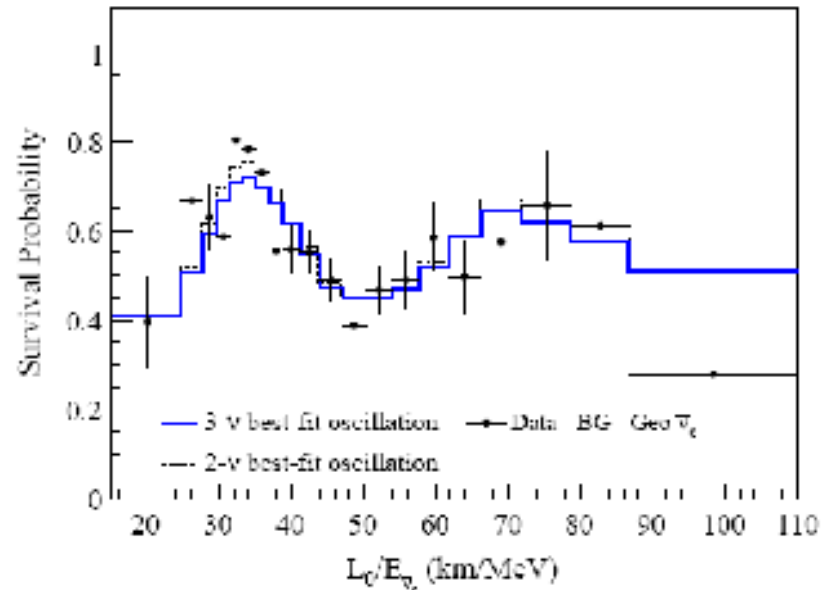
Прецизионное измерение параметров осцилляций нейтрино за время экспозиции 4126 тонн×лет [1,2]

Наблюдения гео-нейтрино:

2005 - Первое "Экспериментальное наблюдение антинейтрино геологического происхождения" [3]

2008 - 73 ± 27 событий ($\sim 2.5\sigma$) [4]

2010 - новый результат с увеличенной статистикой 106 ± 29 событий ($\sim 4\sigma$) [1]



[1] I. Shimizu, Neutrino Geoscience 2010, Oct. 7, 2010.

[2] A. Gando et al., hep-ex/1009.4771v1.

[3] T. Araki et al., Nature 436 (2005) 499.

[4] S. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 221803.

Детектор Borexino

G. Alimonti et al., NIMA 600 (2009) 568.

ЖС высокой р/а чистоты:

$U/Th \geq 10^{-16}$ г/г

$K \geq 10^{-14}$ г/г



2 нейлоновые сферы:

Внутренний резервуар

($\varnothing 8.5$

м, $V=340 \text{ м}^3$) 278 тонн

ЖС (РС + 1.5 г/л PPO)

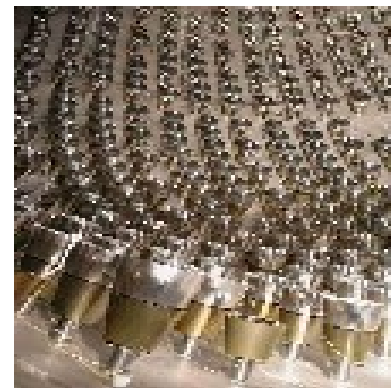
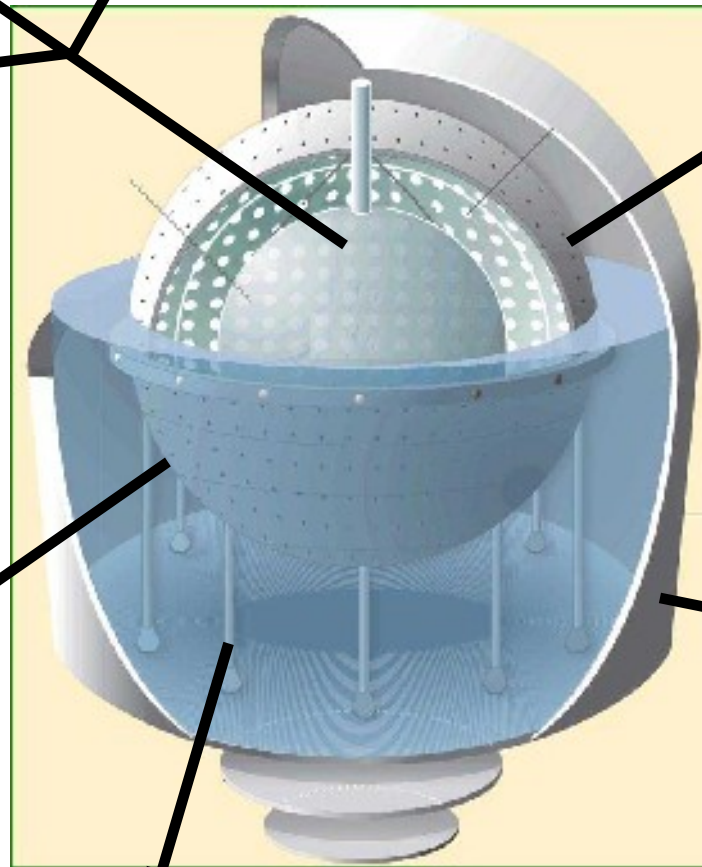
Внутренний буфер

($\varnothing 11.5$ м) РС + DMP

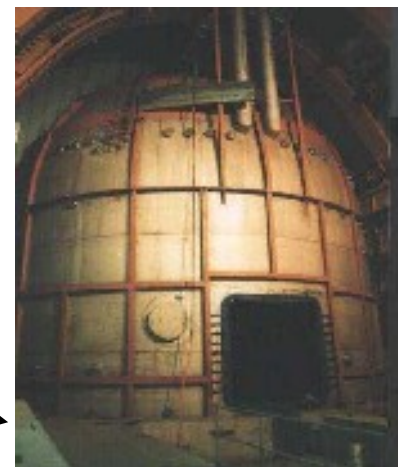


Стальная сфера
($\varnothing 13.7$ м, $V=1340 \text{ м}^3$)

20 поддерживающих опор



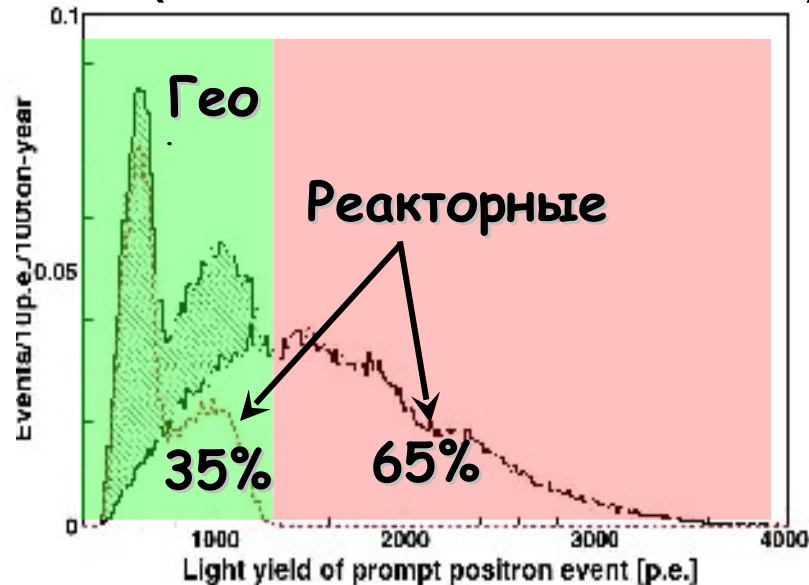
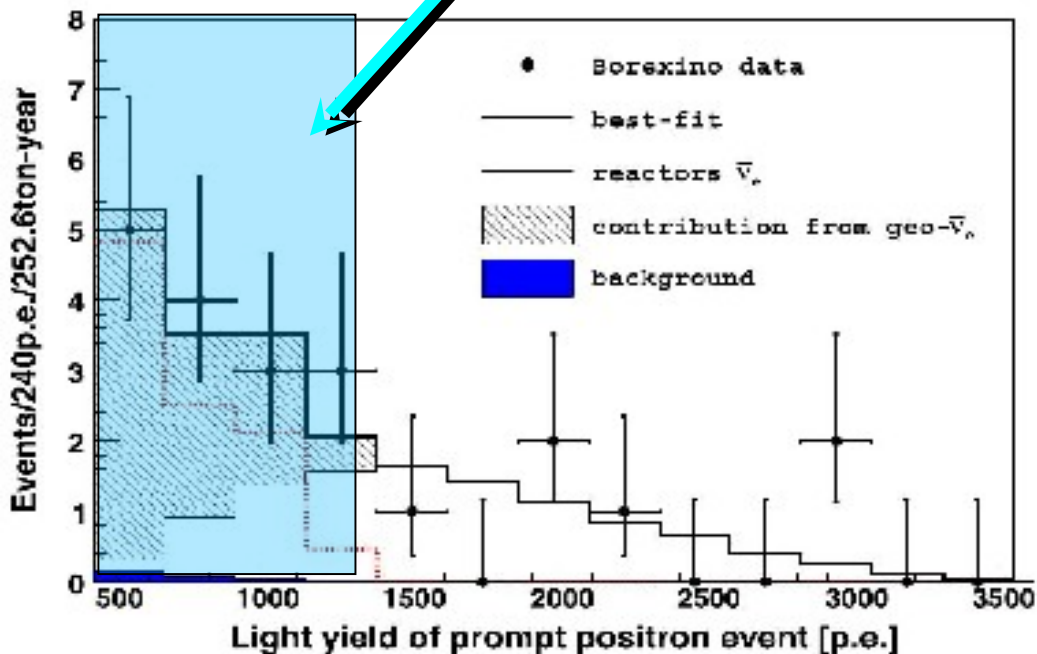
2212 8" ФЭУ



Водный резервуар
($\varnothing 18$ м, $V=2400 \text{ м}^3$)
Защита от γ и н.
Черенковский
детектор (мюонная
защита) 208 ФЭУ

Результаты BOREXINO (200 из 485 дней)

В окне гео-нейтрино $E < 1300$ p.e.:



$$N_{\text{geo}} = 9.9^{+4.1}_{-3.4} \left(\begin{smallmatrix} +14.6 \\ -8.2 \end{smallmatrix} \right) \text{ СОБЫТИЙ}$$

$$N_{\text{react}} = 10.7^{+4.3}_{-3.4} \left(\begin{smallmatrix} +15.8 \\ -8.0 \end{smallmatrix} \right) \text{ СОБЫТИЙ}$$

Впервые зарегистрировано гео-нейтрино (4.2σ) [1]

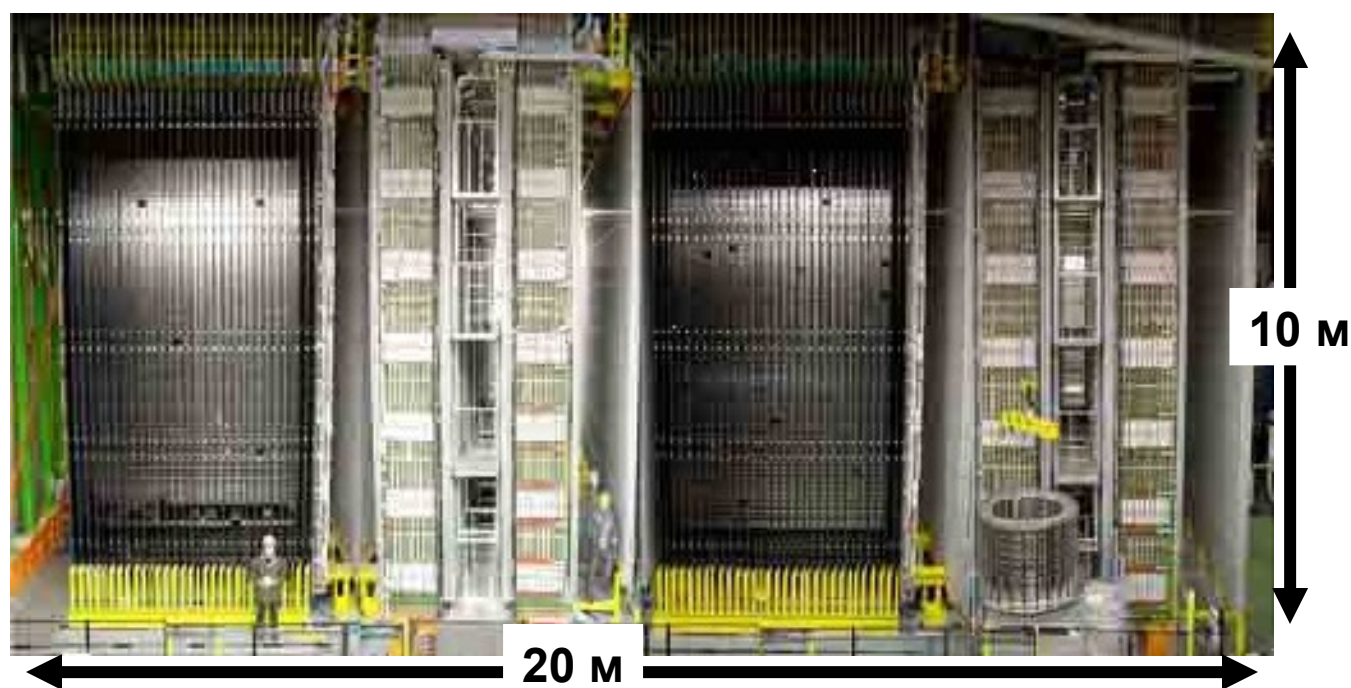
Первое обнаружение исчезновения электронного анти-нейтрино в эксперименте с длинной базой 1000 км (2.9σ) [1]

Впервые измерено поток солнечных нейтрино от ${}^7\text{Be}$ (862 кэВ); регистрация низкоэнергетических нейтрино от ${}^8\text{Be}$ (2.8 МэВ) [2]

[1] P. Bellini et al., Phys. Lett. B 687 (2010) 299.

Courtesy V.V. Kobychев, NPAE-2010

[2] M. Pallavicini et al., Nucl. Instr. Meth. A, doi:10.1016/j.nima.2010.06.067.



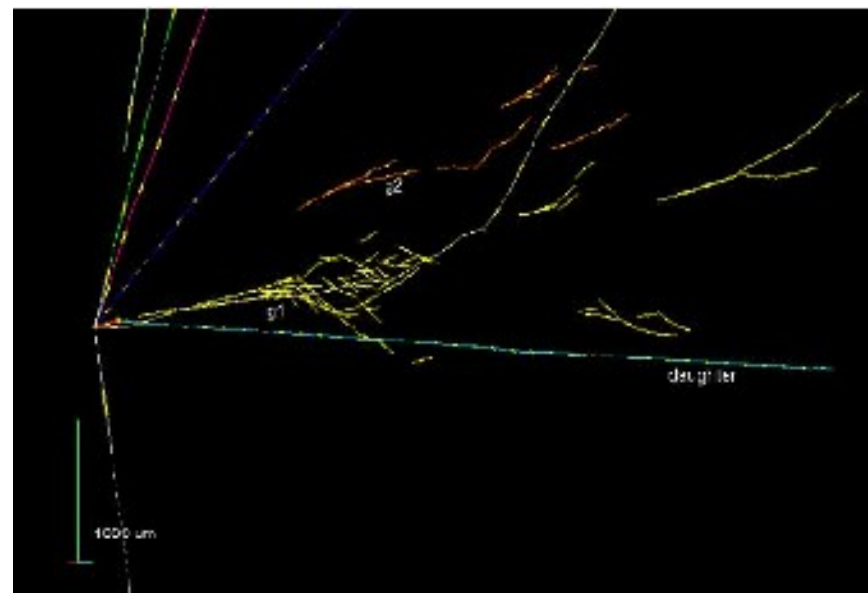
OPERA



**Основная цель:
поиск переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$**

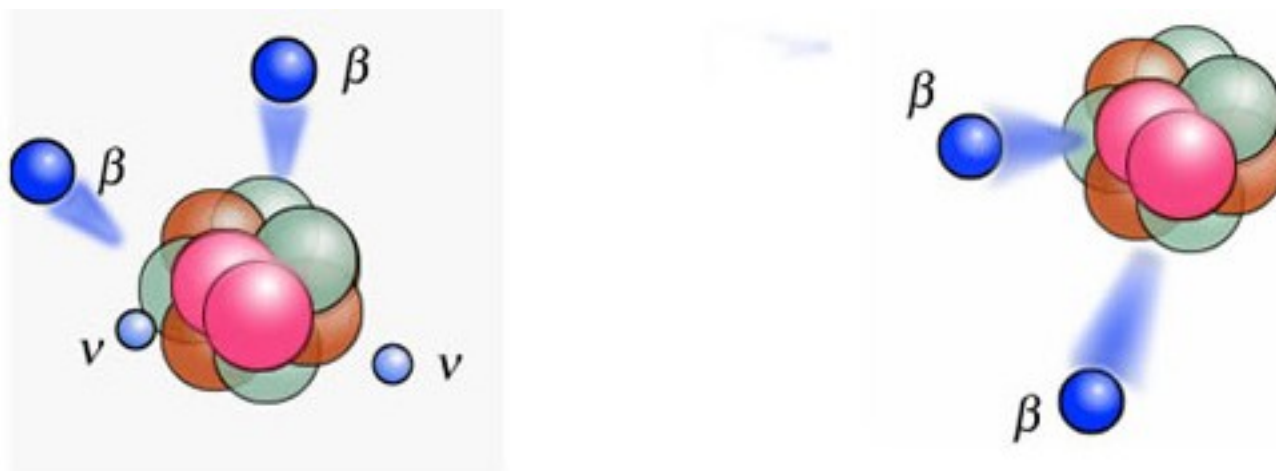
- 150036 свинцовых пластин прослоенных эмульсионной плёнкой (1250 тонн)
- **2×31 стенок стриповых сцинтилляционных детекторов**
- набор данных с 2007 г.

Впервые зарегистрировано тау-лептонное нейтрино:



[1] *N. Agafonova et al.*, PLB 691 (2010) 138.

Двойной бета-распад (2β)



**Регистрация безнейтринного 2β -распада
будет фундаментальным открытием
в физике элементарных частиц**

- Нейтрино идентично антинейтрино
(частица Майорана)
- Масса нейтрино
- Лептонный заряд не сохраняется

Сцинтилляторы $ZnWO_4$: 2β -распад Zn и W

Ограничения на
 2β -распад

$^{64,70}Zn$ и $^{180,186}W$:

$T_{1/2} \geq 10^{17} - 10^{21}$ лет [1]



ИСМА
0,12 кг



ИСМА
0,7 кг

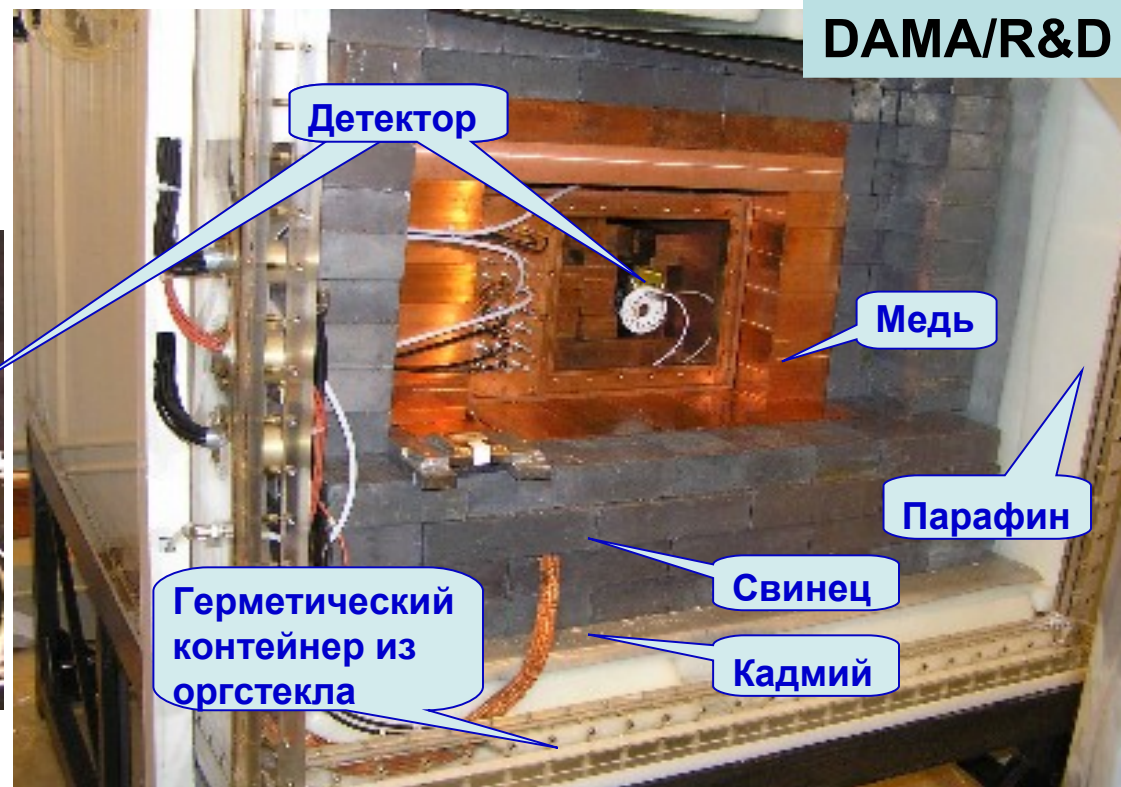


ИСМА
0,14 кг



ИНХ
0,24 кг

Низкофоновая установка



[1] P. Belli et al., Phys. Lett. B 658 (2008) 193; Nucl. Phys. A 826 (2009) 256.

[2] P. Belli et al., Nucl. Instr. Meth. A, doi:10.1016/j.nima.2010.10.027.

Сцинтиллятор $^{106}\text{CdWO}_4$: 2β -процессы в ^{106}Cd

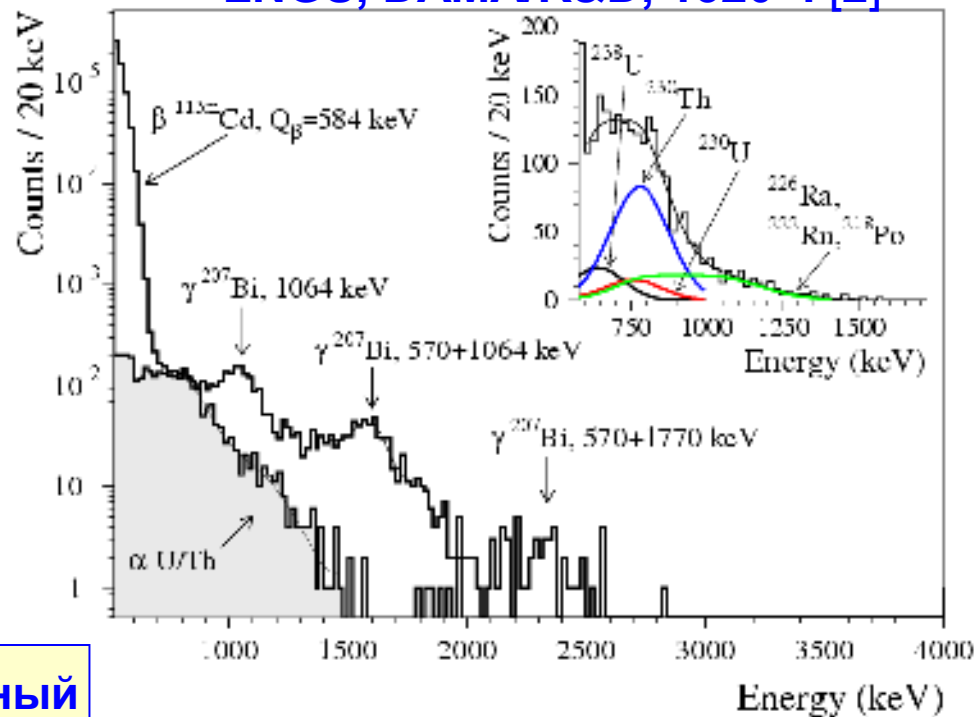
- Обогащение ^{106}Cd – 66%
- Невозвратные потери – 0,3%
- Рекордные оптические свойства (длина поглощения – 60 см)

Буля $^{106}\text{CdWO}_4$ (231 г) [1]
ИНХ (Новосибирск, РФ)



Это четвёртый в мире сцинтилляционный кристалл из обогащённого изотопа

LNGS, DAMA/R&D, 1320 ч [2]



$$T_{1/2} (2\beta, ^{106}\text{Cd}) \geq 10^{20} \text{ лет} [2]$$

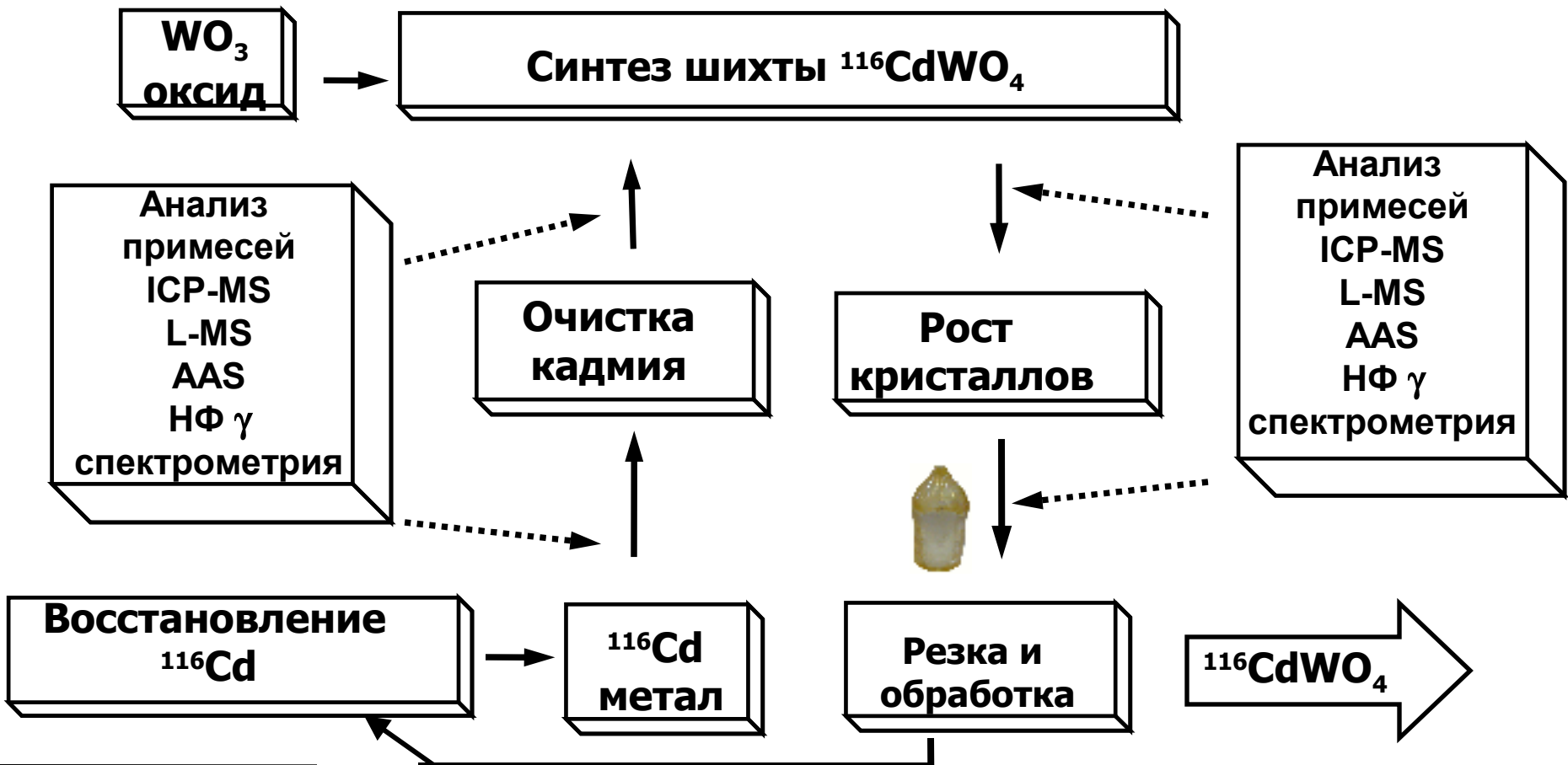
[1] P. Belli et al., Nucl. Instr. Meth. A 615 (2010) 301.

[2] P. Belli et al., report at NPAE-2010, Kyiv, 07-12 June 2010.

Поиск 2 β -распада ^{116}Cd

$^{116}\text{CdWO}_4$ – сцинтилляционный детектор 2 β -распада ^{116}Cd [1]

Разработка сцинтилляторов
 $^{116}\text{CdWO}_4$ из изотопно-обогащённого сырья [2]:



[1] F.A. Danevich et al., Phys. Rev. C 68 (2003) 035501.

[2] F.A. Danevich et al., to be submitted to NIMA

Разработка сцинтиллятора $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ для эксперимента по поиску $0\nu 2\beta$ -распада ^{100}Mo

Необходимые условия:

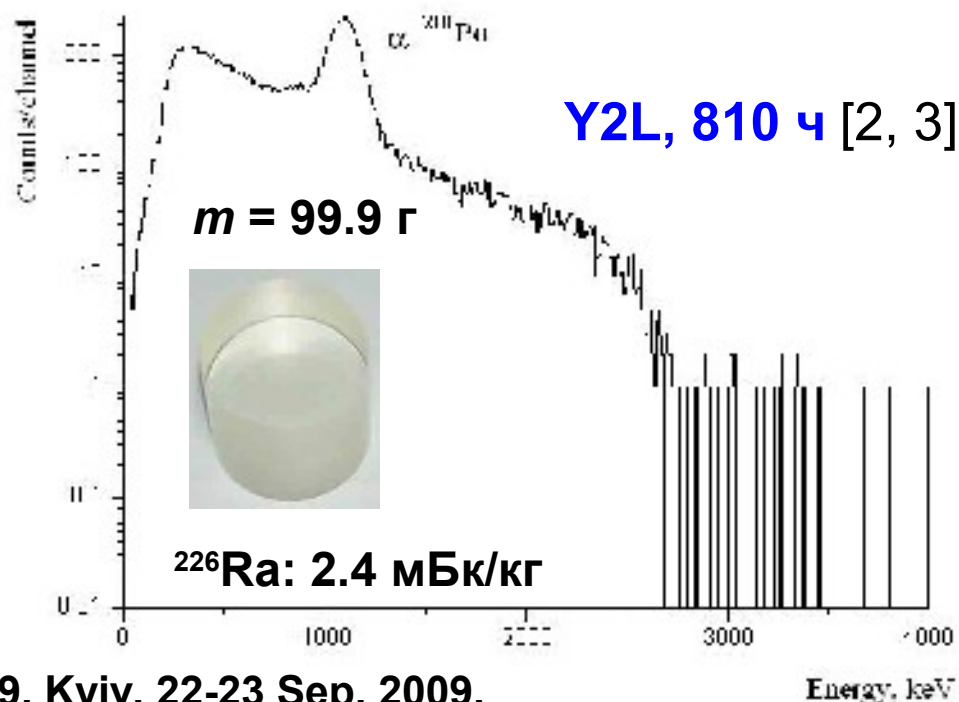
- Обеднение ^{48}Ca (фон от $2\nu 2\beta$ -распада)
- Обогащение $^{100}\text{Mo} \approx 100\%$
- Повышение радиоактивной чистоты (фон от ^{208}Tl и Bi-Po событий)



Буля $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ (0,55 кг) [1]



ОАО «Фомос-Материалс»
(Москва, РФ)

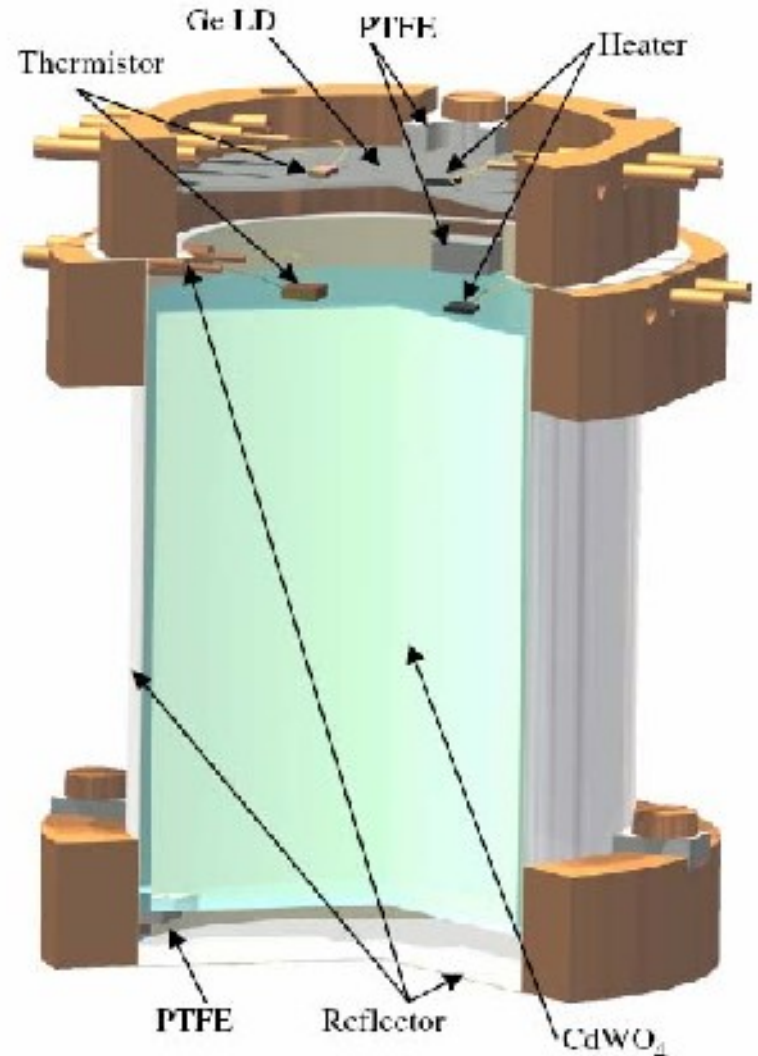
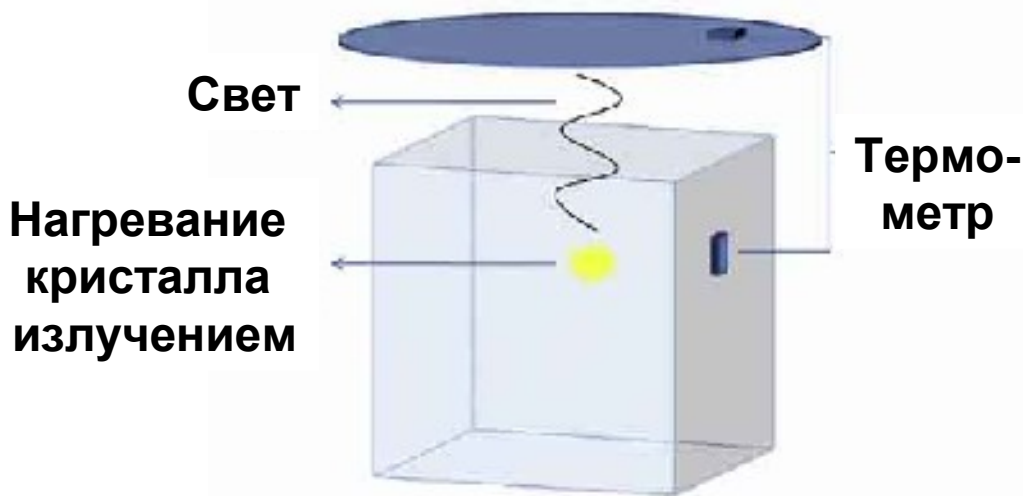


[1] V.N. Kornoukhov, report at RPSCINT-2009, Kyiv, 22-23 Sep. 2009.

[2] H.J. Kim et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 57 (2010) 1475.

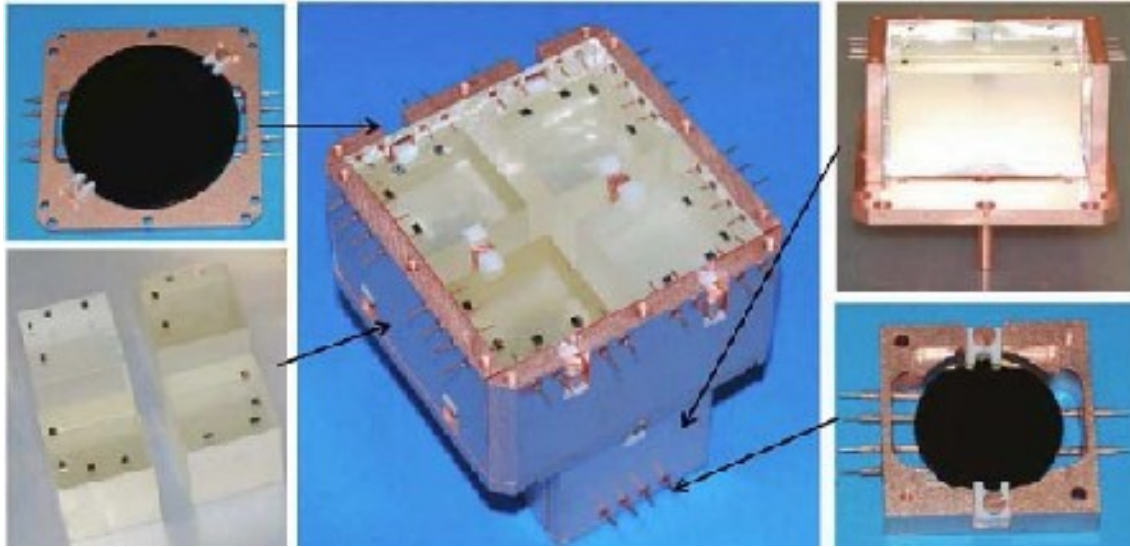
[3] R.S. Boiko et al., report at NPAE-2010, Kyiv, 07-12 June 2010.

Сцинтилляционные болометры для поиска 2β -распада



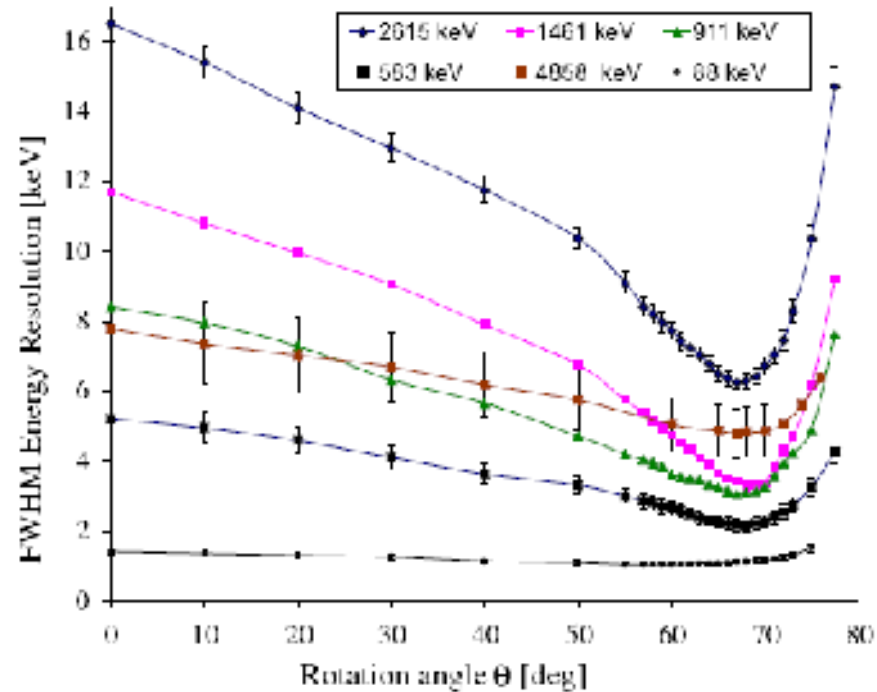
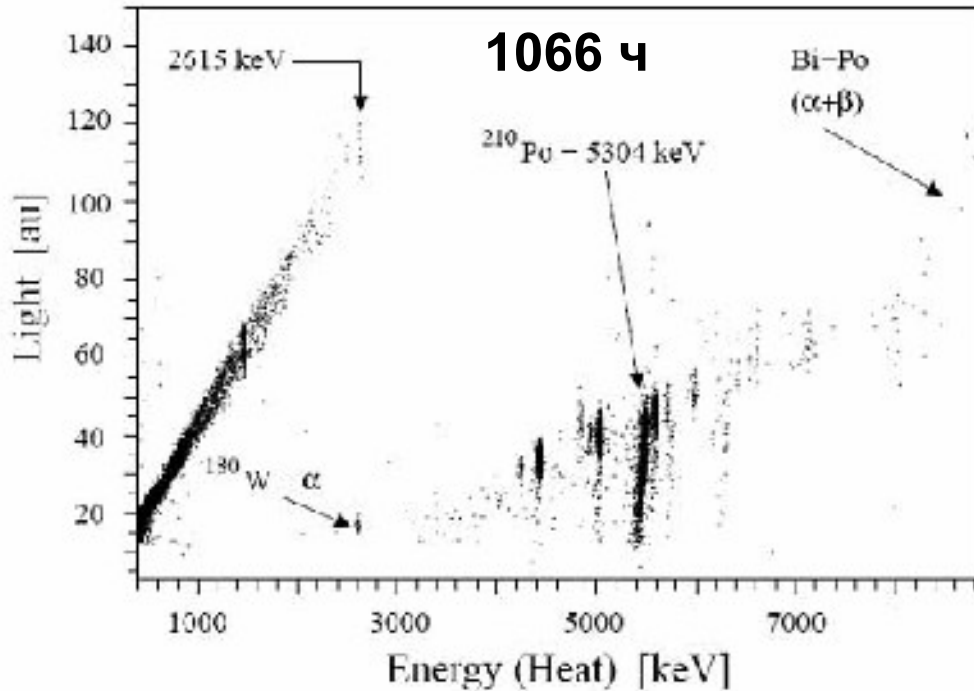
[1] C. Arnaboldi et al., *Astropart. Phys.*, doi:10.1016/j.astropartphys.2010.06.009.

[2] L. Gironi, *Nucl. Instr. Meth. A* 617 (2010) 478.



CdWO₄

2 β : ¹¹⁶Cd, ¹⁰⁶Cd,
¹⁰⁸Cd, ¹¹⁴Cd, ¹⁸⁰W, ¹⁸⁶W



[1] *L. Gironi et al.*, arXiv: 0809.5126v1; Opt. Mat. 31 (2009) 1382.

[2] *L. Gironi*, Nucl. Instr. Meth. A 617 (2010) 478.

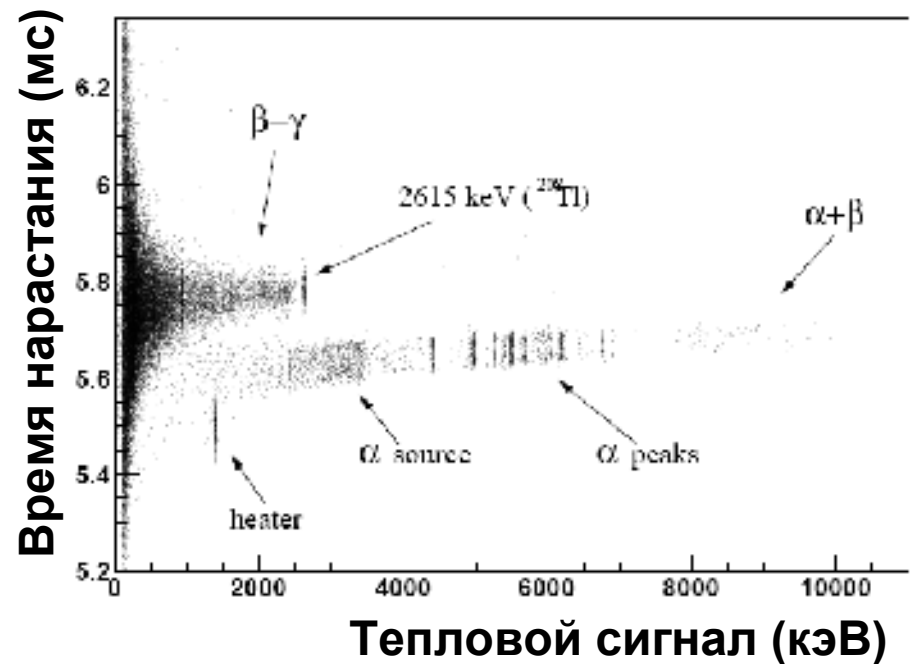
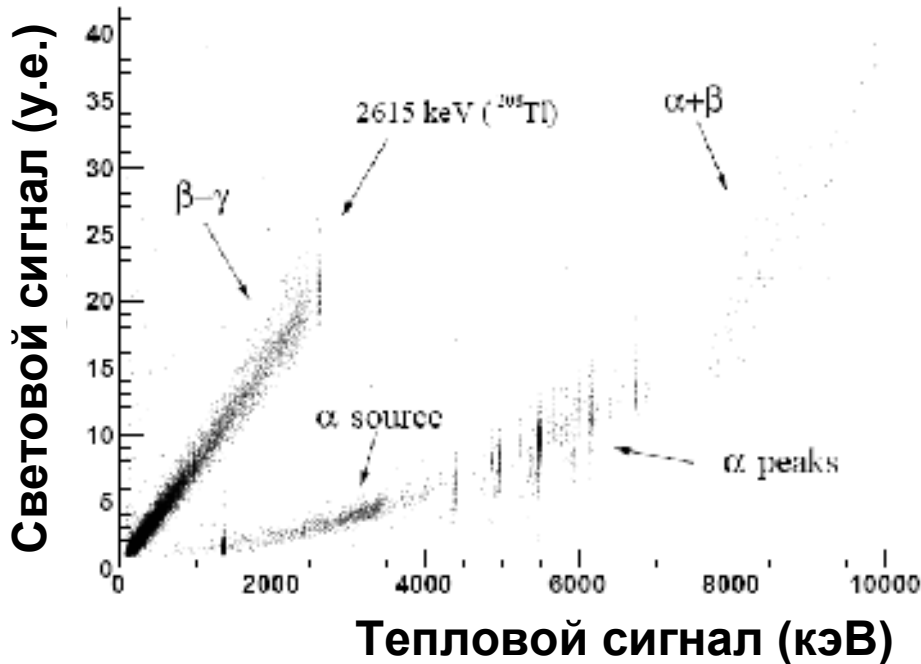
[3] *C. Arnaboldi et al.*, Astropart. Phys., doi:10.1016/j.astropartphys.2010.06.009.

CaMoO₄

2 β : ¹⁰⁰Mo, ⁹⁸Mo, ⁹²Mo, ⁴⁸Ca

В диапазоне 2,7–8 MeV
 α/γ разделение 99,7%

CaMoO₄ (158 г)

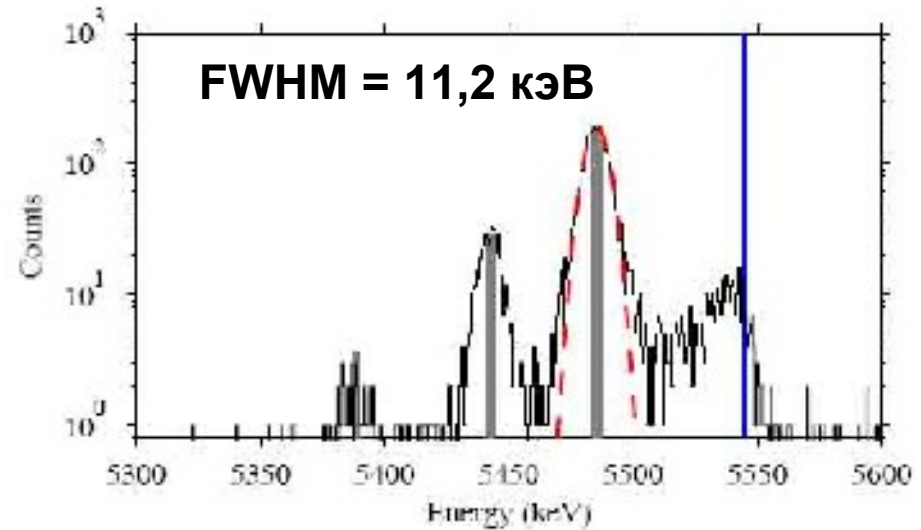
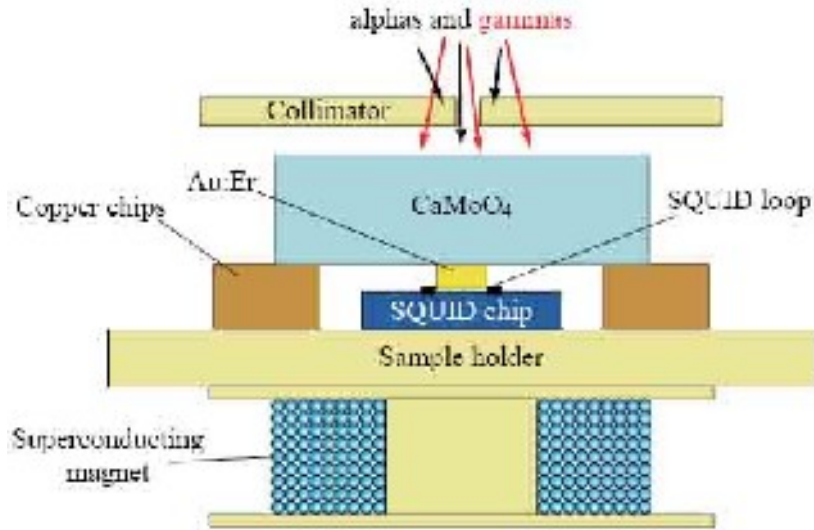


[1] L. Gironi, arXiv: 0911.1061; Proc. 11th Pisa Meeting on Advanced Detectors.

[2] L. Gironi et al., Nucl. Instr. Meth. A 617 (2010) 478.

Низкотемпературный детектор CaMoO_4 коллаборация AMORE (Корея, Россия, Украина)

металлический магнитный калориметр



Перспективы поиска $0\nu 2\beta$ ^{100}Mo

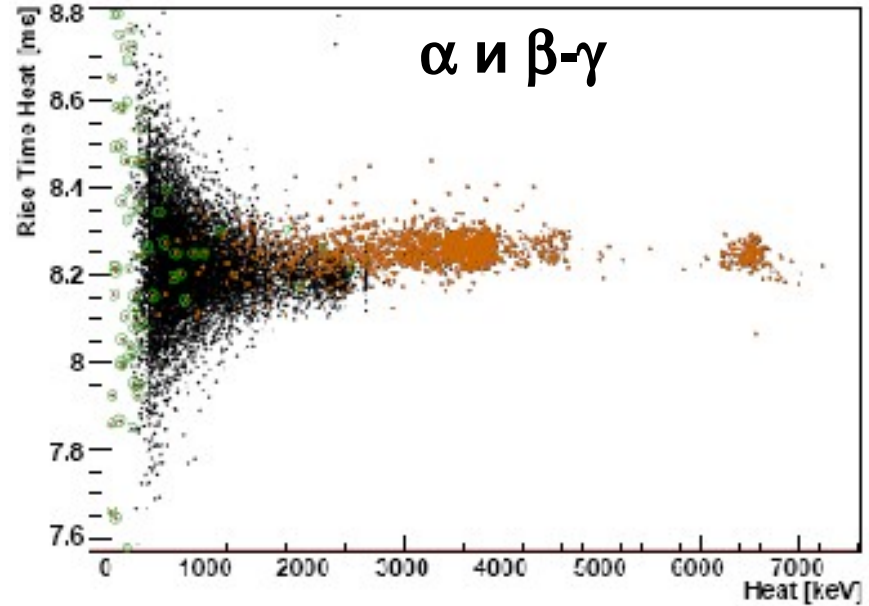
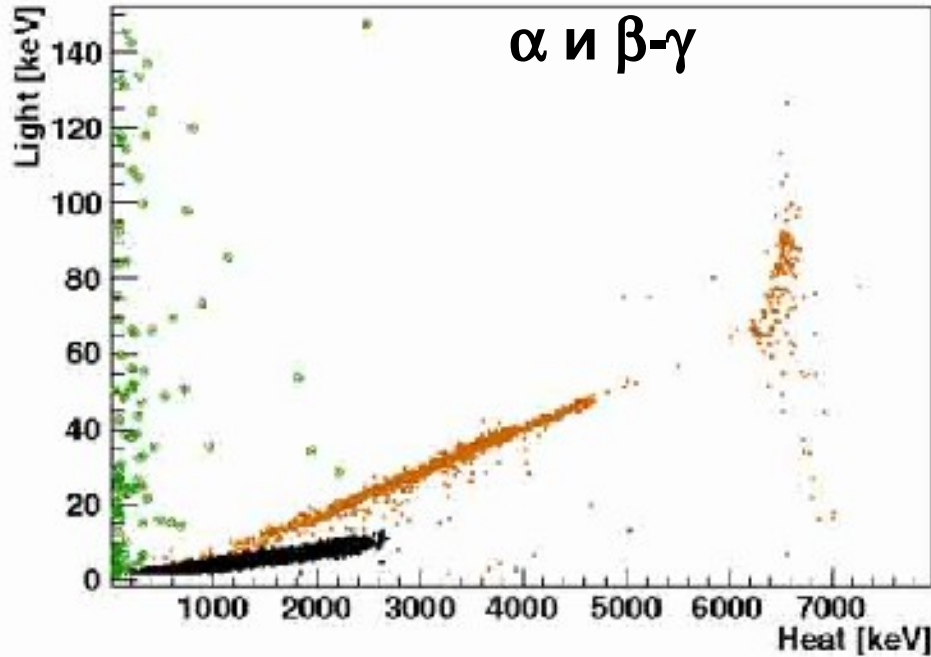
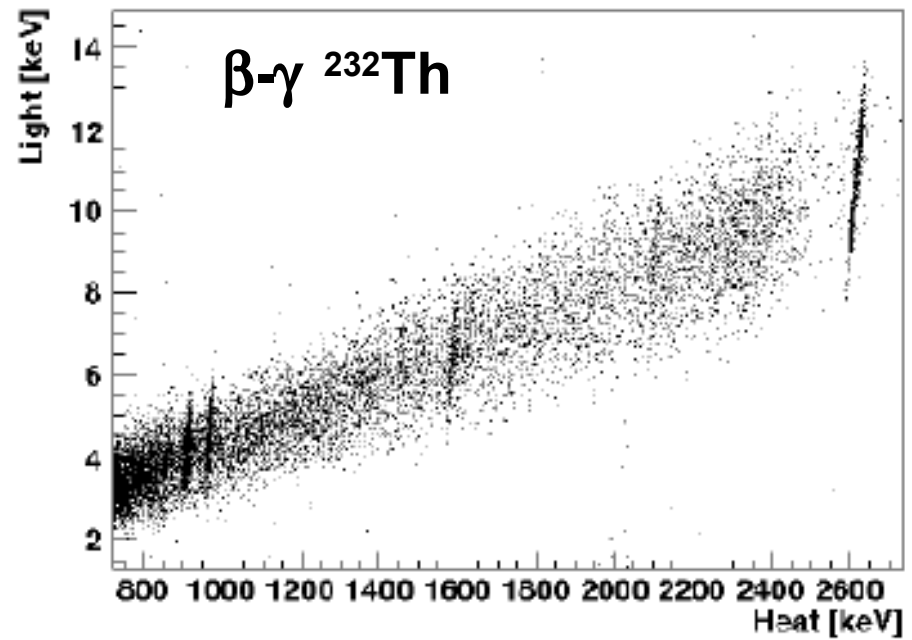
- Разрешение 0.5% FWHM
- 3 года измерений
- 10-100 кг $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$
- Чувствительность на уровне
 $T_{1/2} (^{100}\text{Mo}) \approx 10^{25} - 10^{26}$ лет



ZnSe

2 β : ^{82}Se , ^{64}Zn , ^{70}Zn

ООО “Алкор Текнолоджиз”
(Санкт-Петербург, РФ)

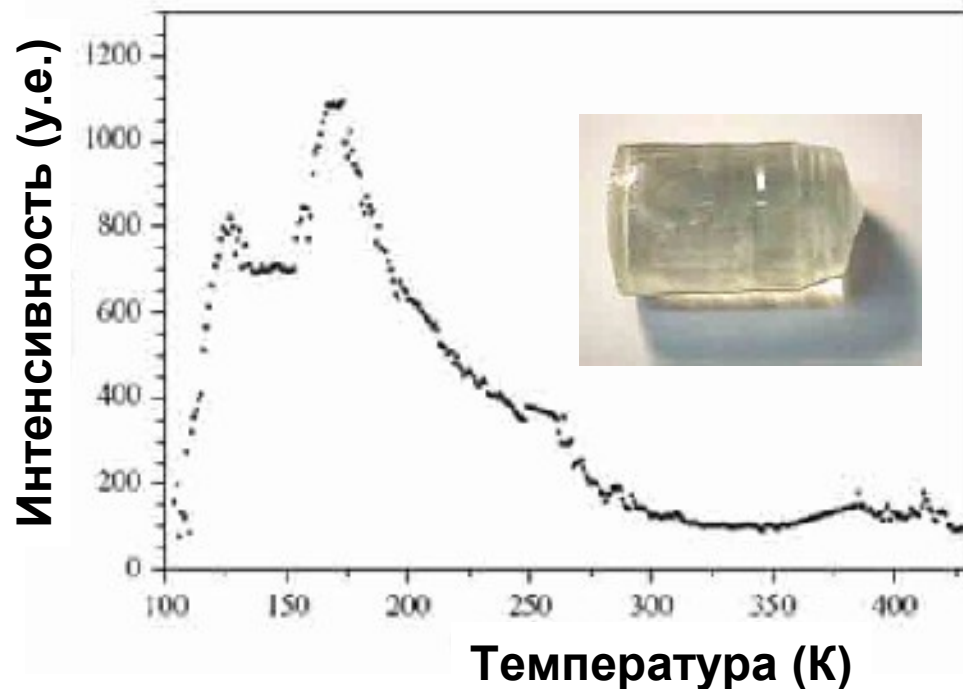
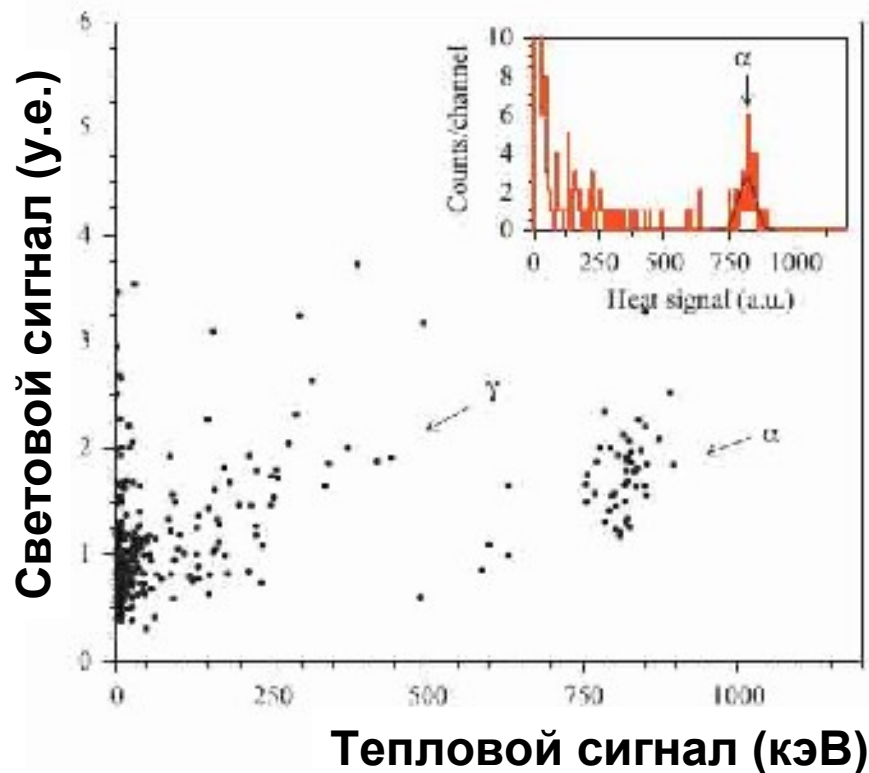
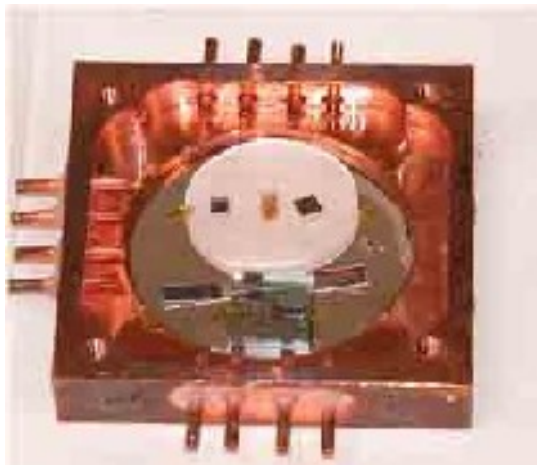


[1] C. Arnaboldi et al., arXiv: 1006.2721v2;
Astropart. Phys. doi:10.1016/j.astropartphys.2010.09.004.



2β : ^{100}Mo , ^{98}Mo , ^{92}Mo

$\text{Li}_2\text{MoO}_4 \text{ } \varnothing 25 \times 35 \text{ mm}$ [1]



[1] O.P. Barinova et al., ICSC-2005, 75-80.

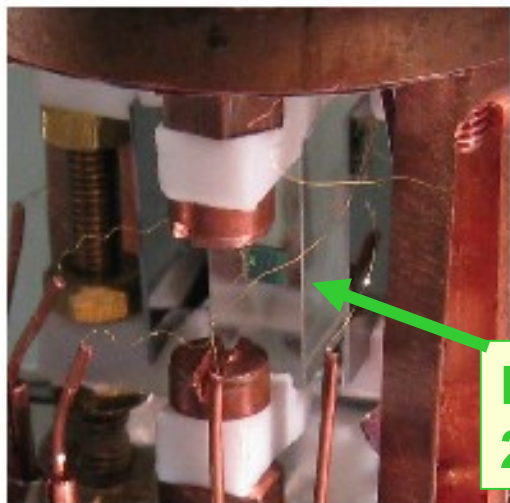
[2] O.P. Barinova et al., Nucl. Instr. Meth. A 607 (2009) 573; 613 (2010) 54.

ZnMoO₄

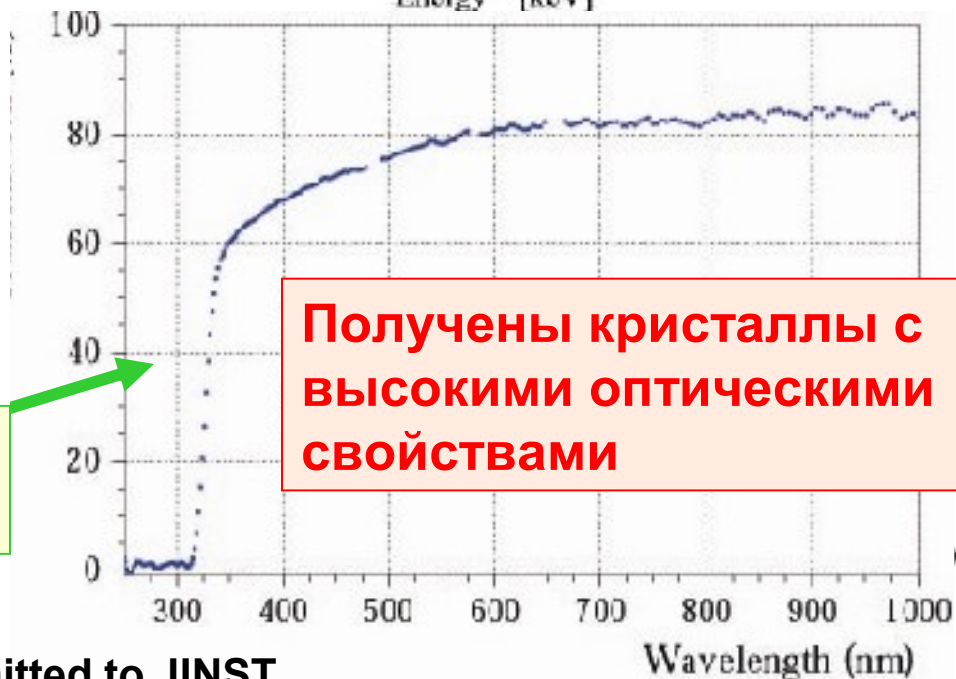
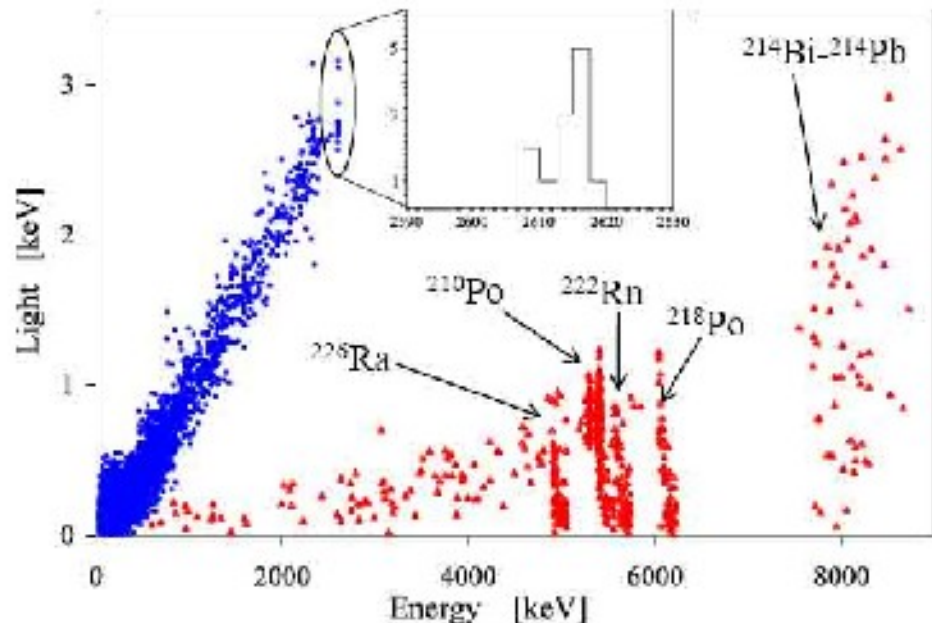
2β: ¹⁰⁰Mo, ^{98,92}Mo, ^{64,70}Zn



ICMA
2009



ИНХ
2010

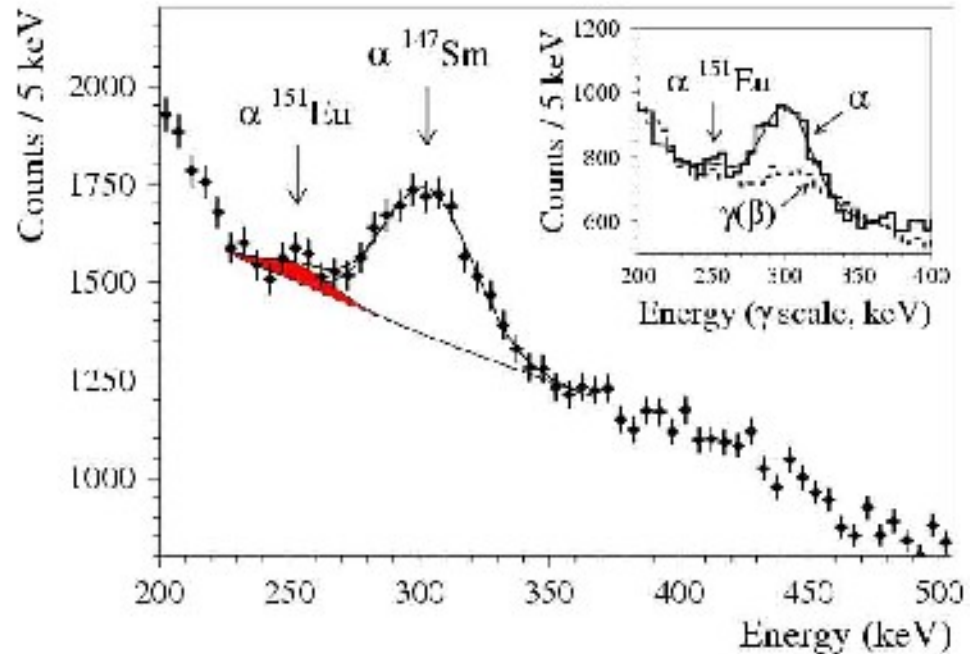
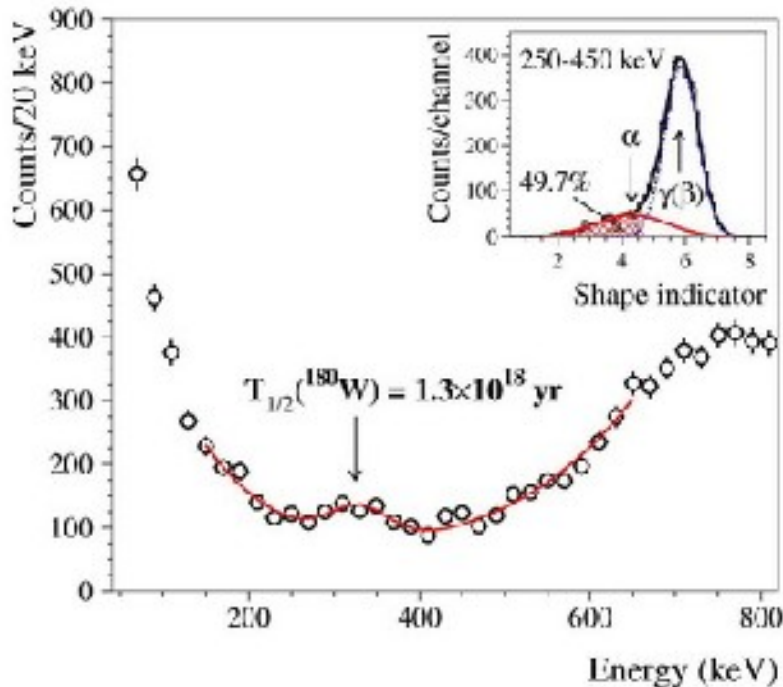


[1] *L. Gironi et al.*, nucl-ex/1010.0103v1; submitted to JINST

[2] *F.A. Danevich et al.*, to be submitted to NIMA

Исследование редких альфа- и бета-распадов

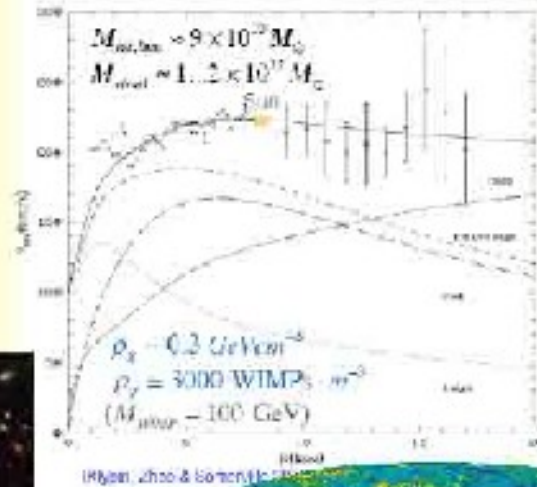
Распад	Сцинтилляционный детектор	Полупериод, лет
α ^{180}W	$^{116}\text{CdWO}_4$, CdWO_4 , CaWO_4 , ZnWO_4	$(1.0-1.8)\times 10^{18}$ [1]
α ^{209}Bi	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	$(1.9\pm 0.2)\times 10^{19}$ [2]
α ^{151}Eu	$\text{CaF}_2(\text{Eu})$	$5^{+11}_{-3}\times 10^{18}$ [3]
β ^{113}Cd	$^{116}\text{CdWO}_4$, CdWO_4	$(8.04\pm 0.05)\times 10^{15}$ [4]



[1] P. Belli et al., doi:10.1016/j.nima.2010.10.027. [3] P. Belli et al., NPA 789 (2007) 15.

[2] P. de Marcillac et al., Nature 422 (2003) 876. [4] P. Belli et al., PRC 76 (2007) 064603.

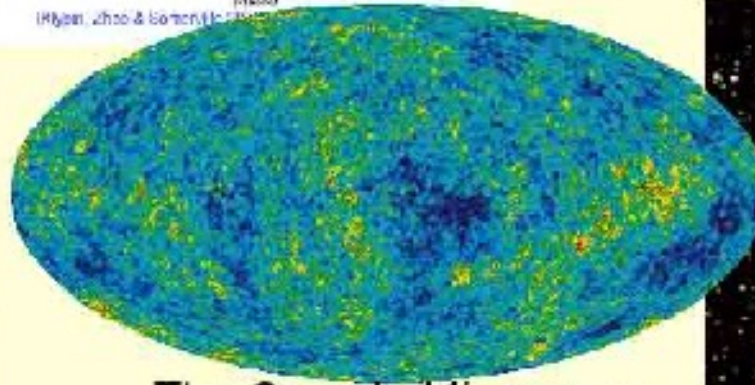
Тёмная материя



- Кривые вращения галактик
- Скорости галактик в кластерах
- Образования структур в ранней Вселенной
- Прямое наблюдение



Galaxy Cluster Abell 1689



The Cosmic Microwave Background temperature fluctuations



The Bullet cluster 1E 0657-56

Природа 95% массы Вселенной неизвестна!

Эксперимент DAMA/LIBRA

В 1996–2002 гг. проводился эксперимент DAMA/NaI со 100 кг NaI(Tl).
С сентября 2003 г. длится эксперимент DAMA/LIBRA в LNGS.



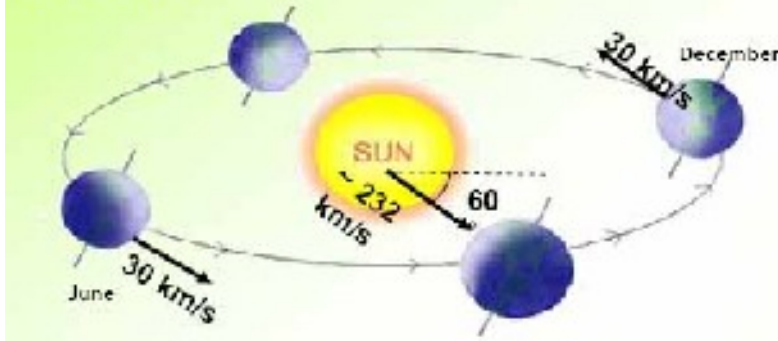
- 25 радиоактивно чистых NaI(Tl) массой 9,7 кг каждый; кристаллы специально разработанные Saint-Gobain (патент)
- Каждый кристалл просматривается двумя ФЭУ (в совпадениях) через световоды Suprasil-B



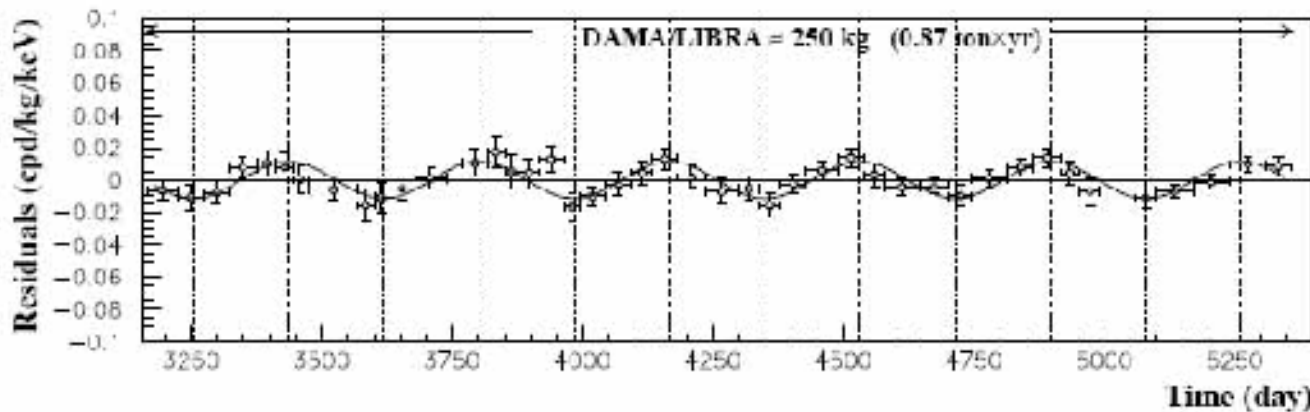
R. Bernabei, NPAE-2010, Kyiv, 07-12 June 2010

Результаты DAMA/LIBRA

Drukier, Freese, Spergel PRD86
Freese et al. PRD88



DAMA/LIBRA за 6 годичных цикла
(экспозиция 0.87 тонн×лет)
подтверждает результаты DAMA/NaI
(7 циклов, 0.29 тонн×лет) **по**
регистрации модуляций сигнала от
тёмной материи



2-6 keV

$\Lambda = (0.0114 \pm 0.0013)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 64.7/79$ **8.8 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 140/80 \Rightarrow P(\Lambda=0) = 4.3 \times 10^{-6}$

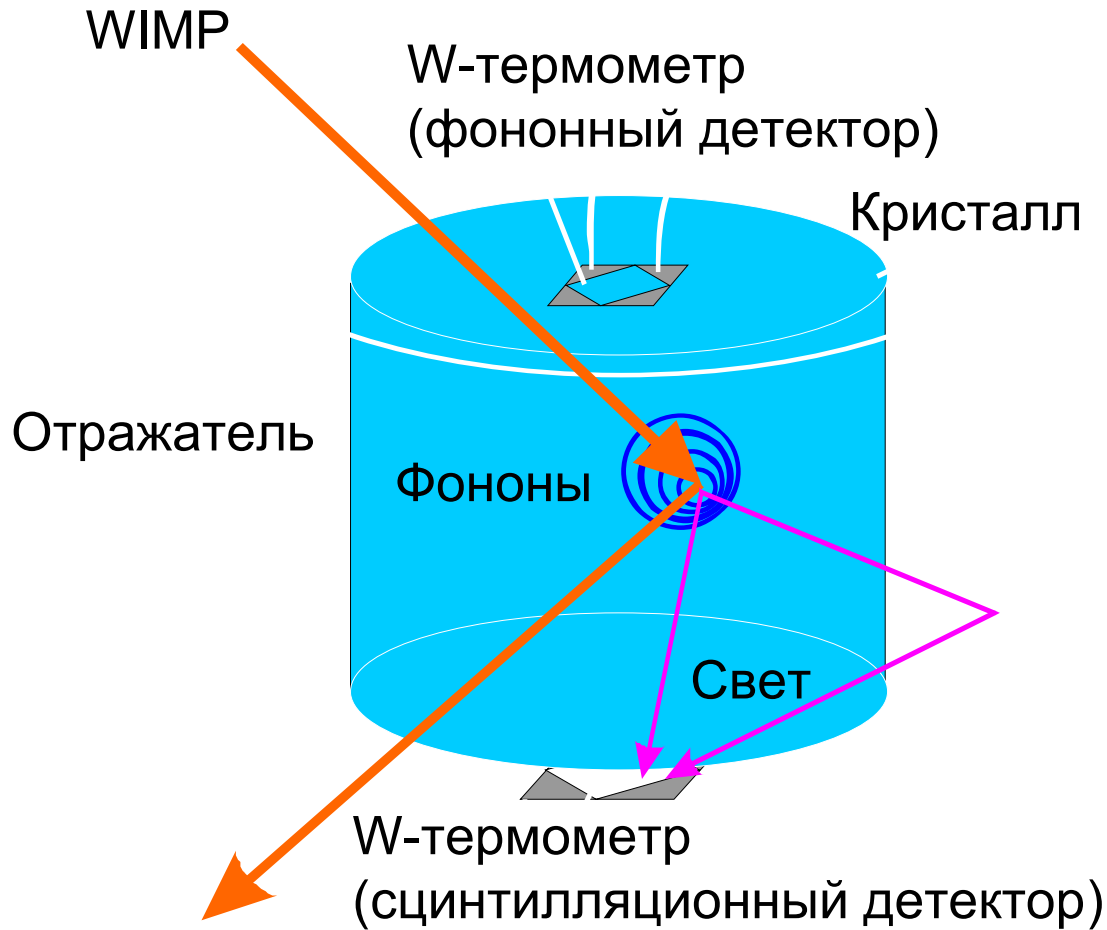
R. Bernabei, NPAE-2010, Kyiv, 07-12 June 2010

[1] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 56 (2008) 333.

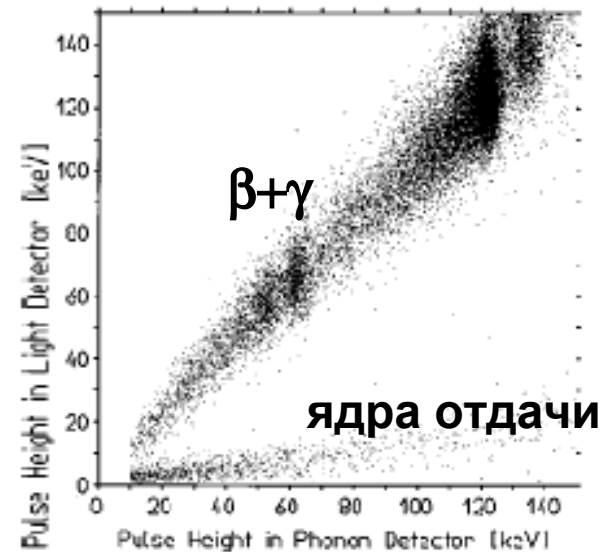
[2] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 67 (2010) 39.

[3] R. Bernabei et al., arXiv:1007.0595 [astro-ph.CO], 13 p.

Сцинтилляционный болометр для поиска тёмной материи (WIMP-частиц)

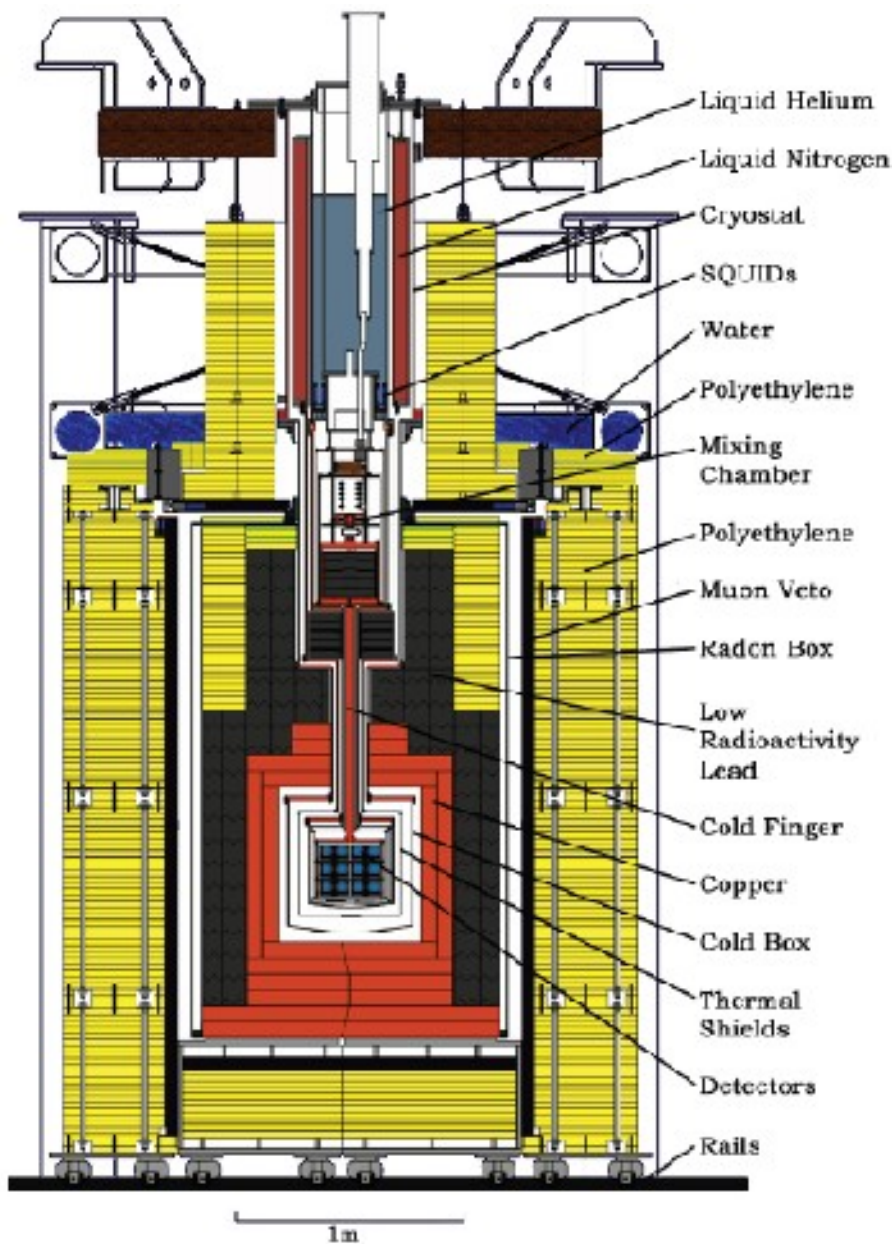


Возможности
идентификации
частиц:



P. Meunier et al,
Appl.Phys.Lett. 75 (1999) 1335

CRESST-II



Courtesy H. Kraus, RPSCINT-2009,
Kyiv, 22-23 Sep. 2009

- [1] I. Bavykina et al., Opt. Mat. 31 (2009) 1382; M. Kiefer et al., Opt. Mat. 31 (2009) 1410.
- [2] G. Angloher et al., Astropart. Phys. 31 (2009) 270.
- [3] R.F. Lang et al., Astropart. Phys. 32 (2010) 318; 33 (2010) 60.



криогенный эксперимент по поиску тёмной материи

Мульти-кристаллический детектор массой ~ 1 т \rightarrow
регистрация взаимодействия WIMP на разных ядрах

Перспективные сцинтилляторы:

CaWO_4 , ZnWO_4 (TM)

CaMoO_4 , CaF_2 (TM, 2β)

CdWO_4 , CdMoO_4 , CaMoO_4 , ZnSe , Li_2MoO_4 , ZnMoO_4 (2β)

MgWO_4 , MgF_2 , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}$ (TM)

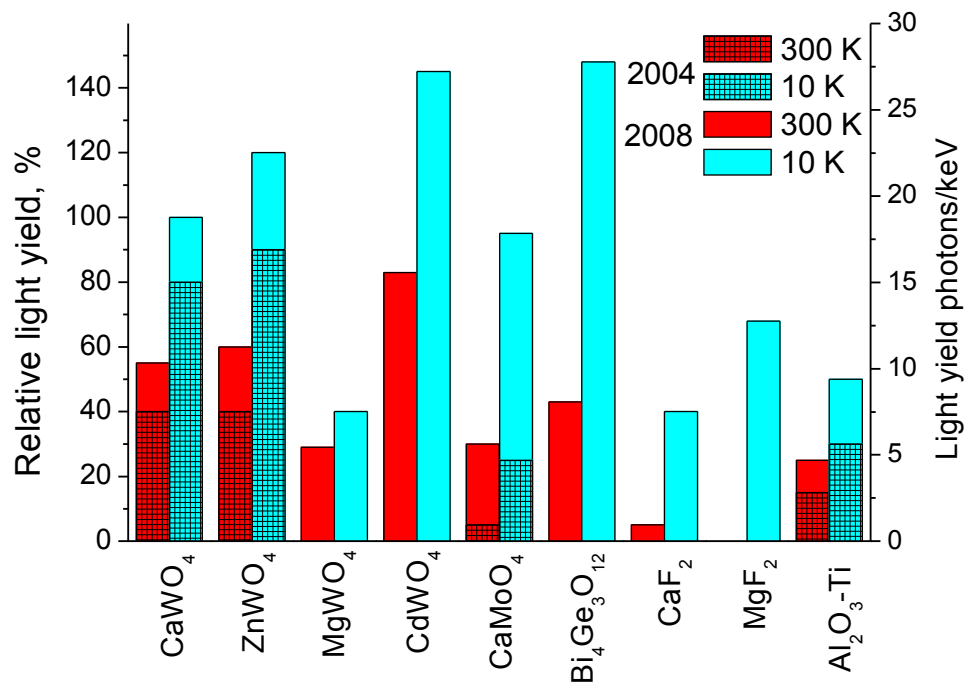
[1] H. Kraus et al., Nucl. Phys. B – Proc. Suppl. 173 (2007) 168; EAS Publ. Ser. 36 (2009) 249.

[2] H. Kraus et al., Proc. 1st Int. Workshop "Radiopure Scintillators for EURECA",
arXiv:0903.1539 [nucl-ex].

[3] V.B. Mikhailik and H. Kraus, Phys. Status Solidi B 247 (2010) 1583.



Сцинтилляторы для EURECA




Световыход нескольких сцинтилляторов уже удовлетворяет требования эксперимента EURECA, однако необходимы дальнейшие улучшения

Важнейшая задача – разработка радиоактивно чистых сцинтилляторов (суммарная активность < 10 мкБк/кг)

Выводы

- Сцинтилляторы широко используются в неускорительных экспериментах в физике частиц (исследование свойств нейтрино, поиски 2β -распада, тёмной материи, редкие α - и β -распады)
- Сцинтилляционные болометры – «второе дыхание» сцинтилляторов: высокое энергетическое разрешение (2-20 кэВ), полное разделение частиц, низкий порог
- Требования к сцинтилляторам: наличие определенных элементов (2β), разные элементы (тёмная материя), максимальный световыход, радиоактивная чистота (суммарная активность ≤ 10 мкБк/кг)

A photograph of a mountain landscape. In the foreground, a paved road curves through a valley with sparse green and brown vegetation. In the background, a large, rugged mountain peak with patches of snow or light-colored rock rises against a blue sky with some clouds. The overall scene is a high-altitude mountain environment.

Фундаментальные исследования в физике элементарных частиц требуют развития существующих и разработки новых сцинтилляторов

R&D p/a чистых сцинтилляторов для криогенных экспериментов по поиску ТМ

Для того, чтобы достичь уровень фона ~ 3 событий/кг/год суммарной активности в сцинтилляторах < 0.01 мБк/кг

Глубокая очистка исходных материалов (вакуумная дистилляция, зонная плавка, перекристаллизация)

Изготовление шихты (высокой чистоты реагенты, лаб-инструменты и вода. Вся химия должна проводиться в чистой комнате, по возможности в атмосфере азота, тщательная защита от воздуха)

Рост кристаллов

Перекристаллизация

Тестирование с использованием γ -, α -, β -сверхнизкофоновой спектрометрии

Измерения кристалл = детектор

Изготовленные кристаллы должны храниться в подземных лабораториях с антинейтронной защитой для защиты от космогенной и нейтронной активации