

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ СЕЛЕНИДА ЦИНКА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ РЕГИСТРАЦИИ ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА

С.Н. Галкин¹, В.Д. Рыжиков¹, Б.В.Гринев ¹,
Е.Ф. Воронкин¹, А.И.Лалаянц¹, И.А.Бреславский¹
И. Дафинеи², С. Пирро²

¹Институт сцинтиляционных материалов НАНУ, г.
Харьков, Украина,

e-mail: galkin@isma.kharkov.ua,

²Национальный институт ядерной физики, г. Рим,
Италия

e-mail: ioan.dafinei@roma1.infn.it

ПЛАН ДОКЛАДА

- 1. История нейтрино;**
- 2. Актуальность исследований безнейтринного двойного бета-распада;**
- 3. Оценка возможной чувствительности и радиационной чистоты кристаллов ZnSe при их применении в сцинтилляционных болометрах ;**
- 4. Нетипичное поведение кристаллов ZnSe в сцинтилляционных болометрах и возможные причины этого;**
- 5. Перспективы дальнейших экспериментов регистрации безнейтринного двойного бета-распада с применением ZnSe.**

История нейтрино

Паули в 1930 году сделал предположение о существовании элементарной частицы, не имеющей ни массы покоя ни заряда;

В 1934 Энрико Ферми представил теорию слабых взаимодействий, в которой дал название новой частице «нейтрино» (нейтрончик);

В 1953 г. Рейнес и Коуэн впервые зарегистрировали нейтрино вблизи мощного ядерного реактора. Регистрация реакции обратного бета-распада нейтрона дала веские основания считать нейтрино реально существующей;

Наличие осцилляций нейтрино и антинейтрино, зарегистрированные на крупнейшем нейтринном детекторе KamLAND в свою очередь дал основания полагать, что массы нейтрино и антинейтрино, соответственно, не равны нулю.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА

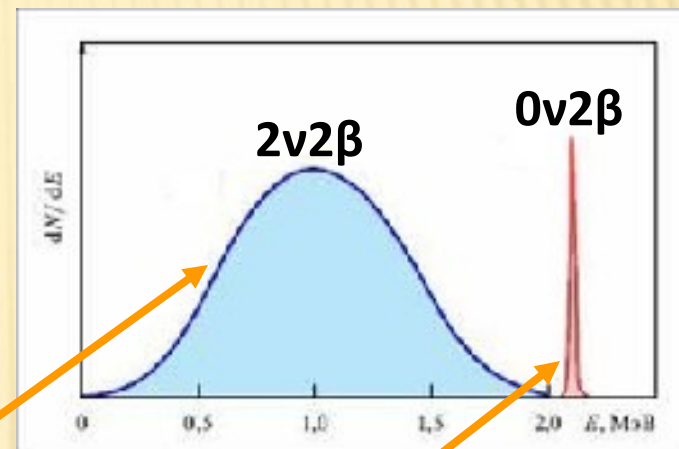
- ✗ **Измерение массы нейтрино может дать ответы на фундаментальные вопросы современной физики:**
 - **Какова природа нейтрино (Майорановская или Дираковская частица)?**
 - **Определение абсолютной шкалы масс нейтрино (возможный интервал 0,002-2,2 эВ);**
 - **Сохраняется ли лептонное число при безнейтринном двойном бета-распаде?**
 - **В дальнейшем это позволит приблизиться к пониманию структуры Вселенной**

ДВОЙНОЙ БЕТА РАСПАД

При выборе объекта исследования

важны:

- величина изотопной распространенности;
- оптические и механические свойства кристалла;
- радиационная чистота



$$T_{1/2}(2\nu 2\beta) \approx 10^{20} \text{ лет}$$

$$T_{1/2}(0\nu 2\beta) \approx 10^{25} \text{ лет}$$

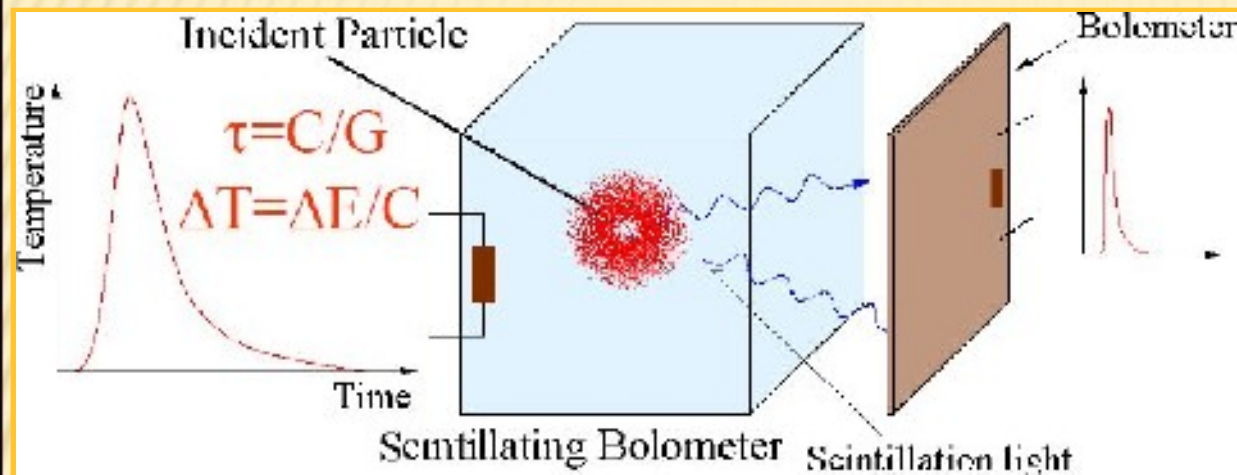
Вероятность **0ν2β** выше т.к. нейтрино появляется только в промежуточном состоянии и энергия его ограничивается лишь условием, чтоб волновая функция не была знакопеременной внутри ядра.

	Q	i.a.
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.271	0.19
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.479	8.9
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.533	34.5
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2.228	5.64
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.802	7.5
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2.013	11.8
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3.034	9.6
$^{98}\text{Zr} \rightarrow ^{98}\text{Mo}$	3.350	2.8
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.995	9.2
$^{78}\text{Ge} \rightarrow ^{78}\text{Se}$	2.040	7.8
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3.367	5.6

Варианты болометрических сцинтилляторов: CdWO_4 ; ZnWO_4 ;
 CaMoO_4 ; CaF_2 ; **ZnSe** ; PbMoO_4 ; SrMoO_4 ; и.т.п.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО БОЛОМЕТРА

Идея: использовать сцинтилляционный кристалл в качестве болометра и измерять 2 величины: энергию излучения и свет. Так появляется возможность дискриминировать разные виды излучений и частиц

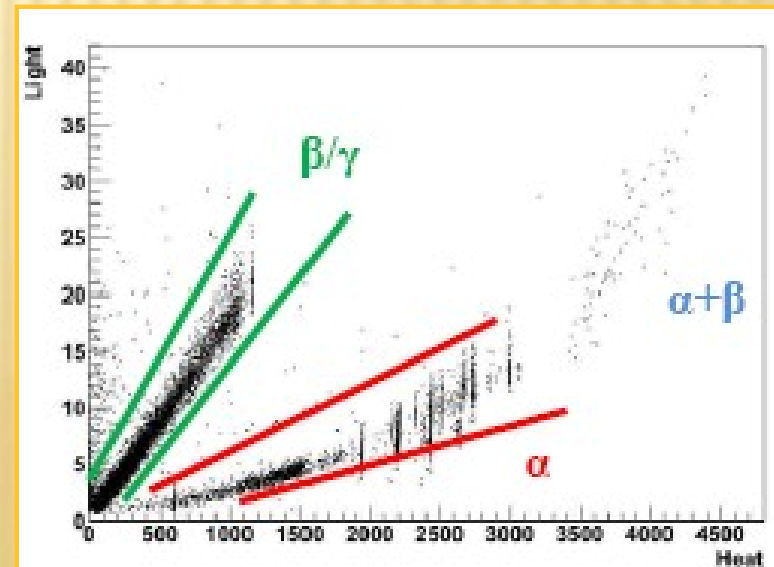


C-теплоемкость;
G-масса кристалла;

$$\Delta T(t) = \frac{\Delta E}{C} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Преимущества:

- Дает возможность уменьшить действие фона;
- Источник = детектор;
- Возможность использовать большую массу;
- Хорошее энергетическое разрешение (0,2-0,5% при 2,5Мэв);



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАДИАЦИОННОЙ ЧИСТОТЫ КРИСТАЛЛОВ ZNSE ПРИ ИХ ПРИМЕНЕНИИ В СЦИНТИЛЯЦИОННЫХ БОЛОМЕТРАХ

$$\sum |\tau_{1/2}^{0\nu}| \approx \epsilon \cdot \frac{i.a.}{A} \sqrt{\frac{M t_{meas}}{\Delta E \cdot bkg}}$$

i.a. -распространенность изотопов;

ε – эффективность детектирования;

A-атомная масса; **M**-масса детектора(кг);

t-время проведения эксперимента(лет);

ΔE - энергетическое разрешение;

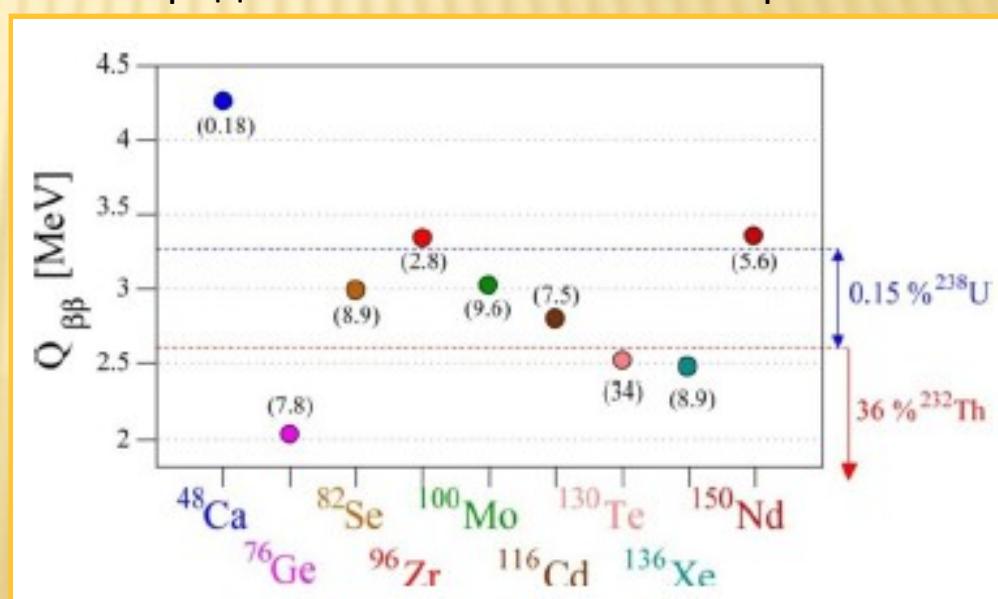
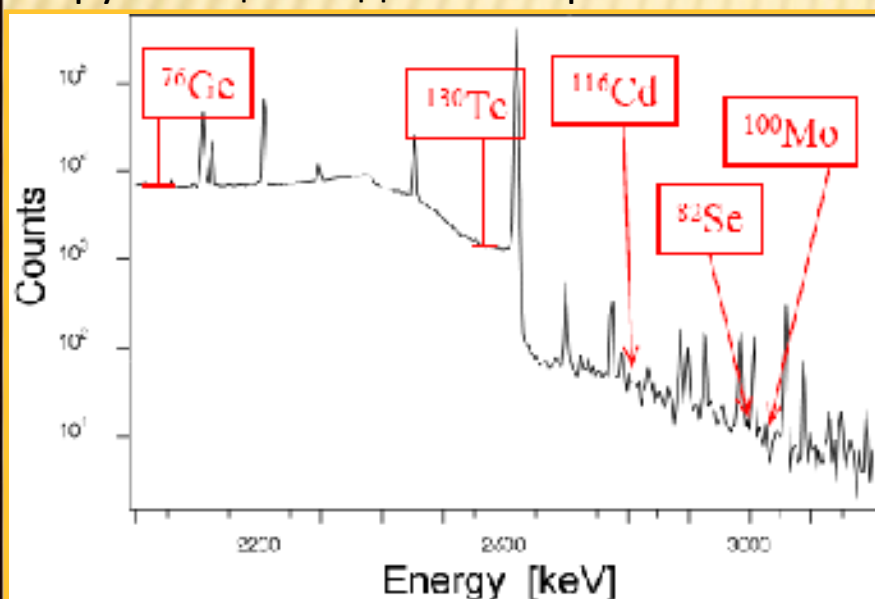
bkg -фон(с/кэВ/кг/лет)

Источники фона:

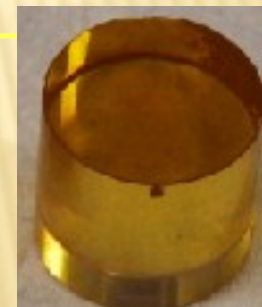
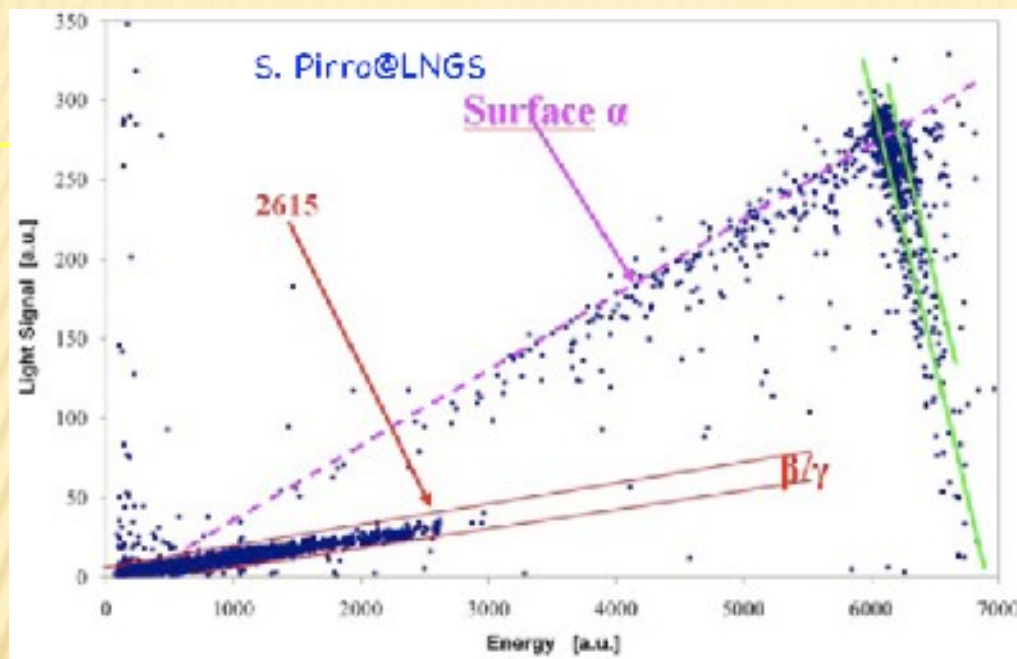
- Внешние примеси → свинцовый экран, выбор изотопа с энергией >2615кэВ;
- внутренние примеси → отчистка материала от радиационных примесей;
- μ частицы → проведение экспериментов на глубине ≈ 3200м;
- Поверхностные примеси – основной источник фона → сцинтиляционные болометры;

Окружающий подземный фон

Распределение элементов по энергиям



Эксперименты с необогащенным ZnSe



Эффективность регистрации α частиц более 97% (без светового детектирования);

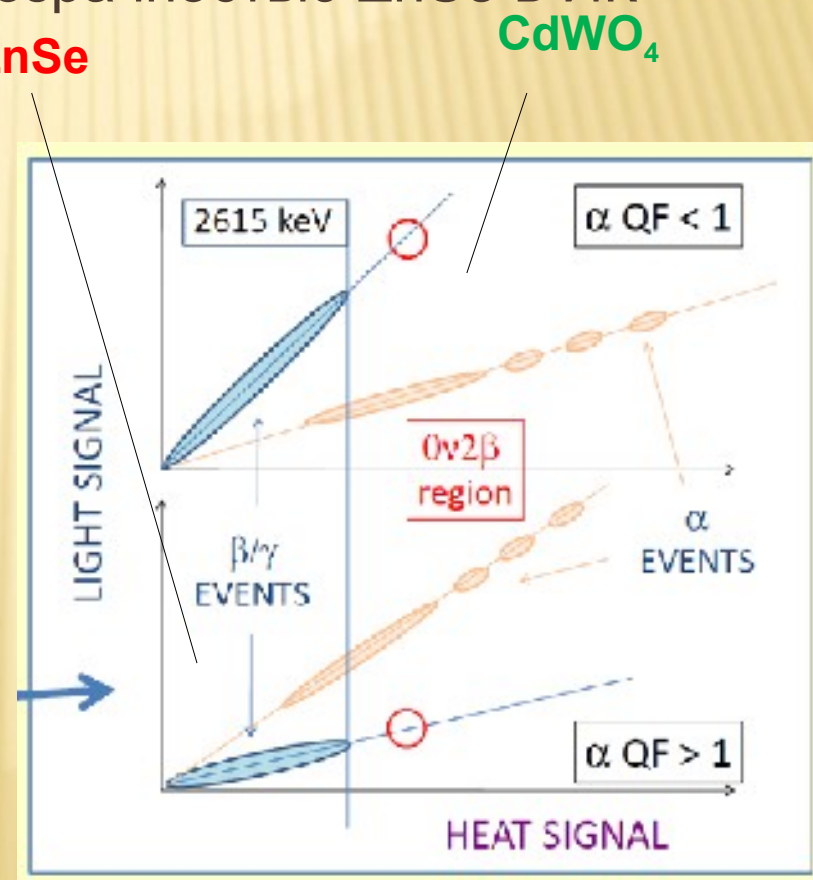
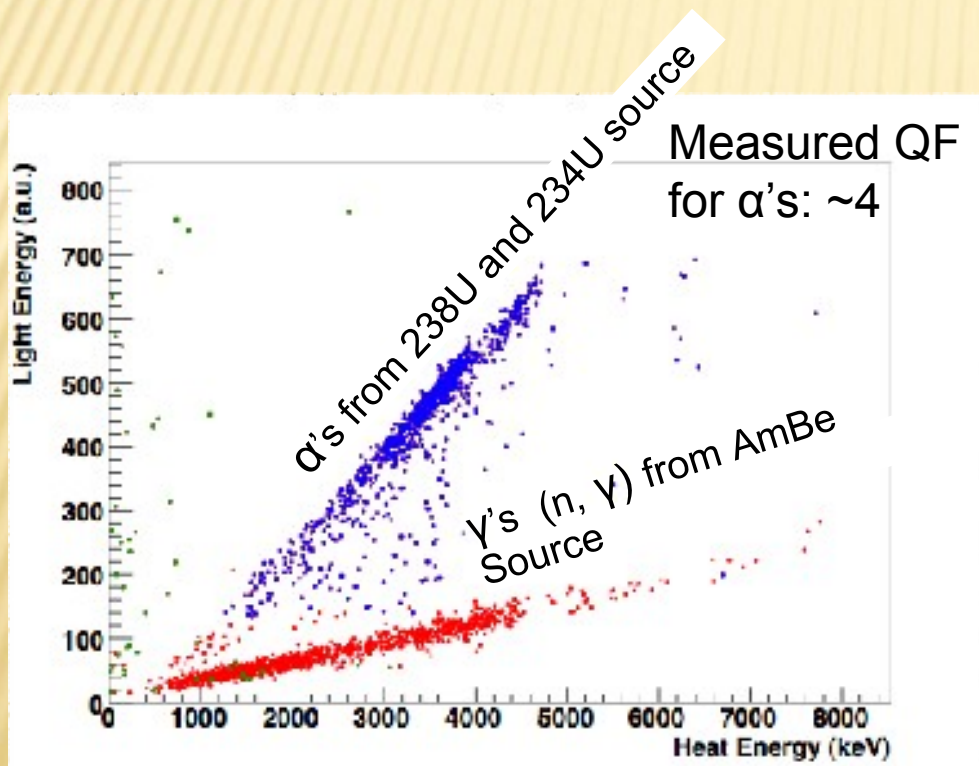
Высокая радиационная чистота (на порядок выше, чем у оксидных сцинтилляторов);

Имеет большой выход сцинтилляционного сигнала;

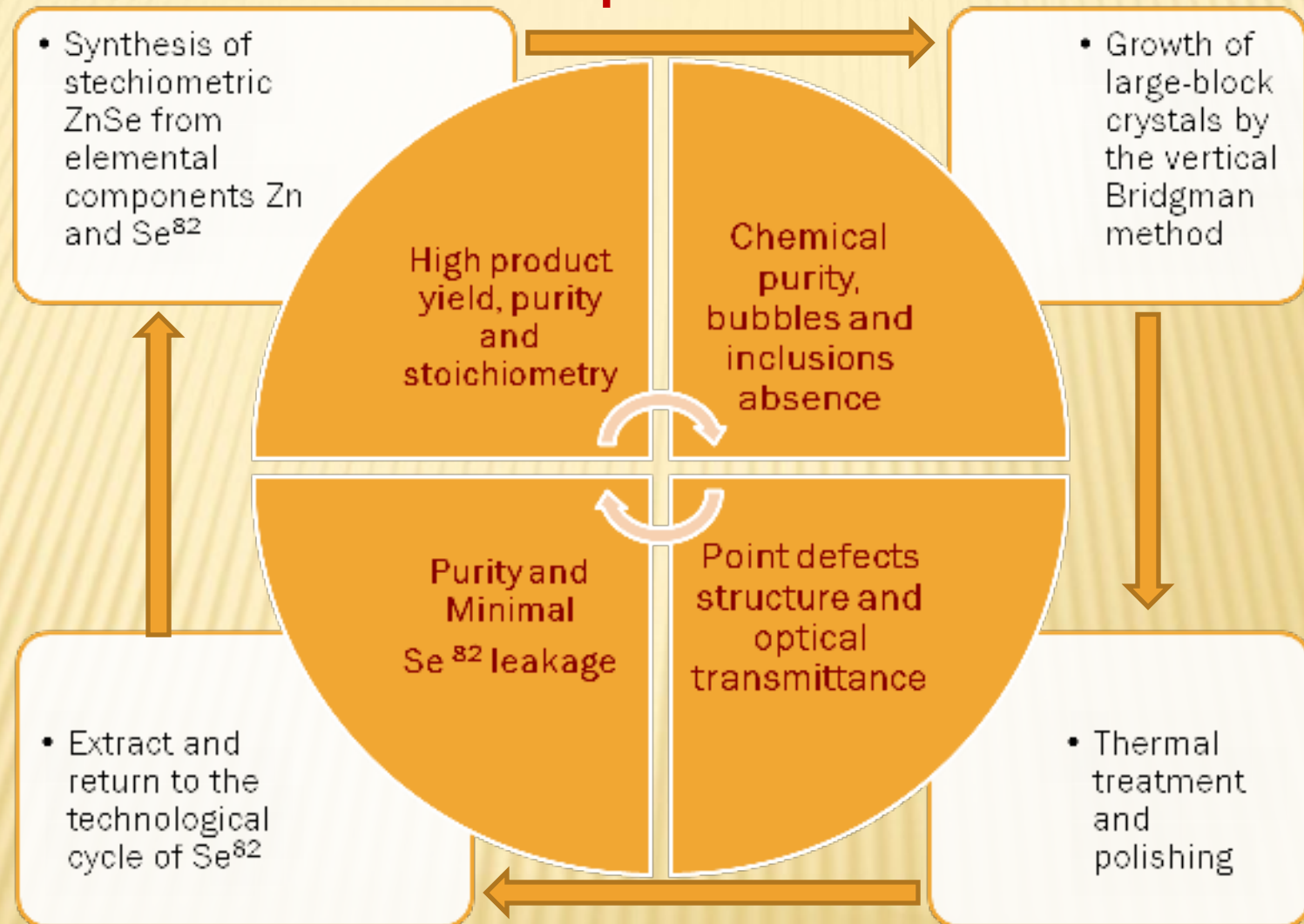
Дискриминация альфа/бета достигает 99,5%, что позволяет достаточно эффективно выделить полезный сигнал

НЕТИПИЧНОЕ ПОВЕДЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ZnSe В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ БОЛОМЕТРАХ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ЭТОГО;

- ZnSe в отличие от оксидных сцинтилляторов имеет «нетипичное» альфа/бета отношение;
- Это можно объяснить высокой прозрачностью ZnSe в ИК диапазоне спектра.



Стадии изготовления кристаллов ZnSe с обогащенным Se^{82}



Picture of scintillation bolometers production



$\text{Zn} + \text{Se} = \text{ZnSe}$
Synthesis at 1200 K in inert atmosphere

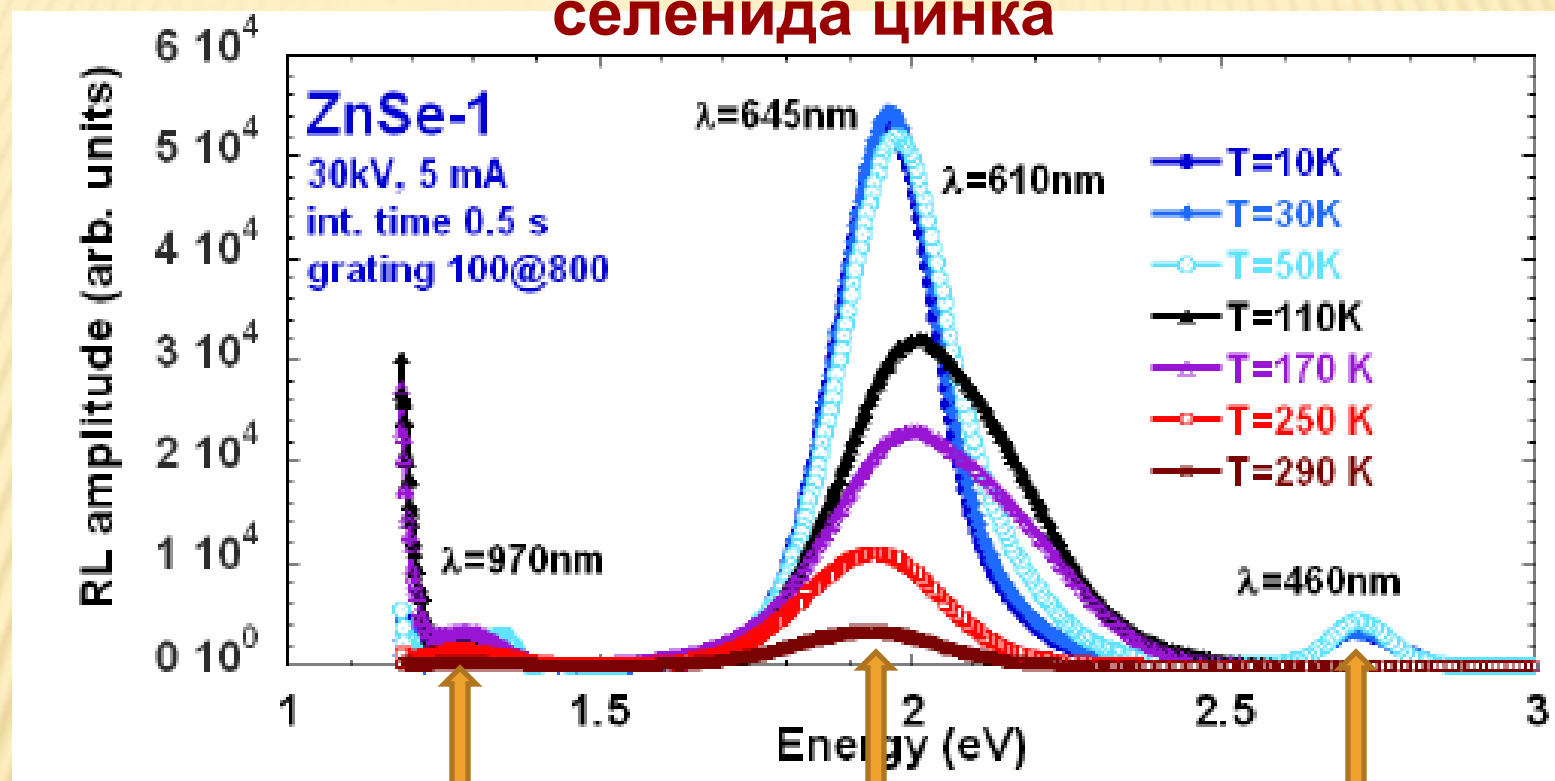


Crystal growth furnaces, graphite crucible and ZnSe ingot



Cutting process and samples of ZnSe scintillators

Температурная зависимость радиолюминесценции селенида цинка

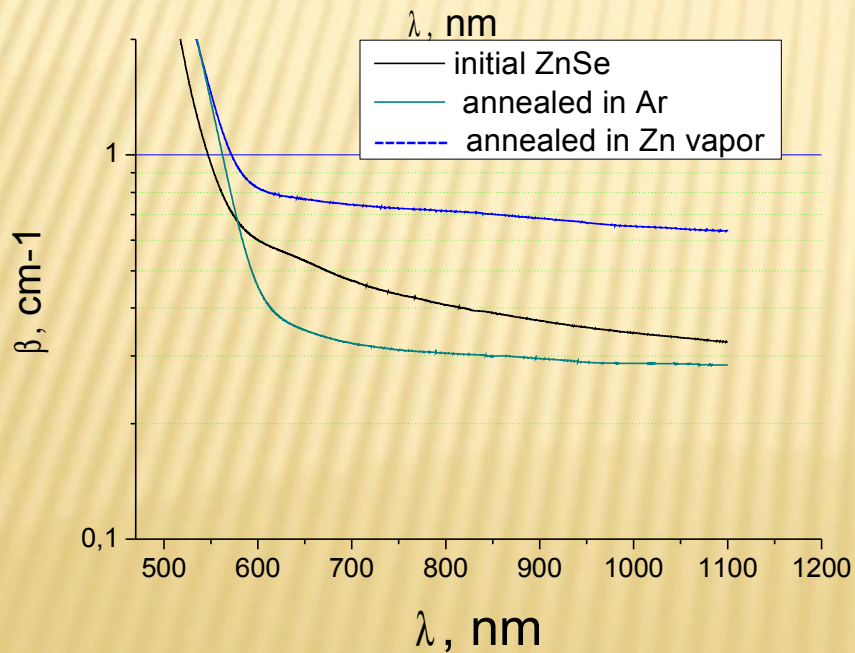
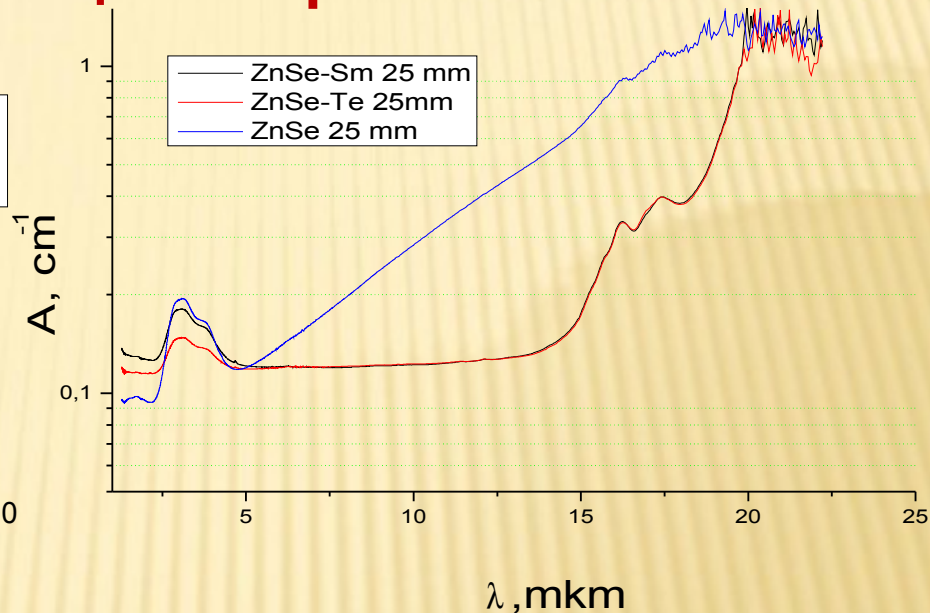
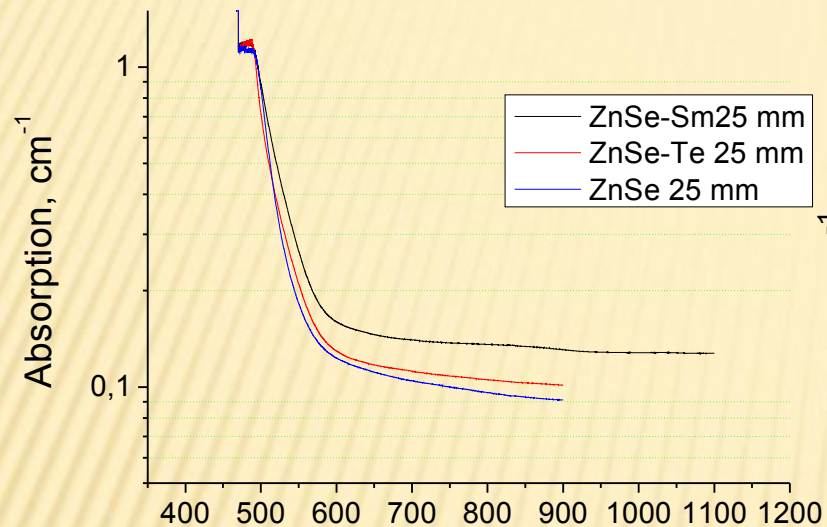


Intracenter
transition $V_{\text{Se}^{++}}$
 $E=1.3 \text{ eV}$

Donor-acceptor
Transition
 $V_{\text{Zn}} \rightarrow \text{donor impurity}$
 $E=1.94 - 1.98 \text{ eV}$

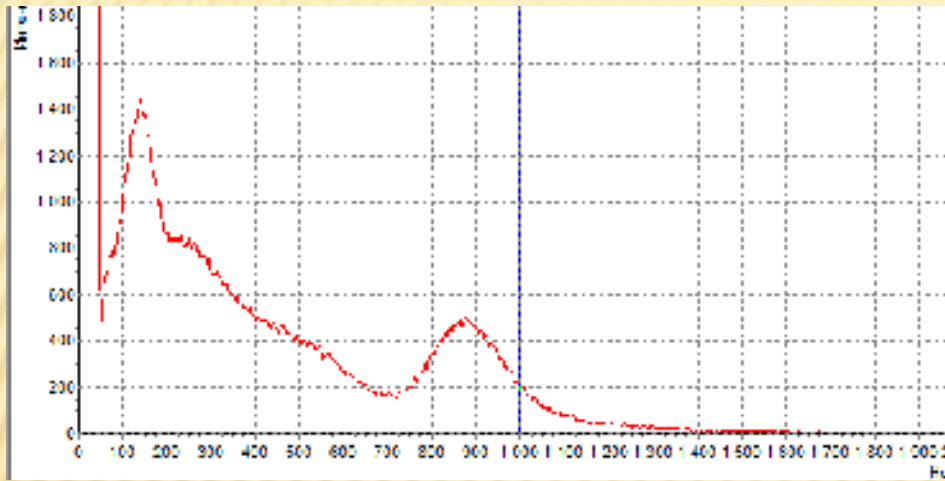
Exciton
luminescence
 $E=2.78 \text{ eV}$

Влияние примесей и термообработки на оптическое поглощение кристаллов

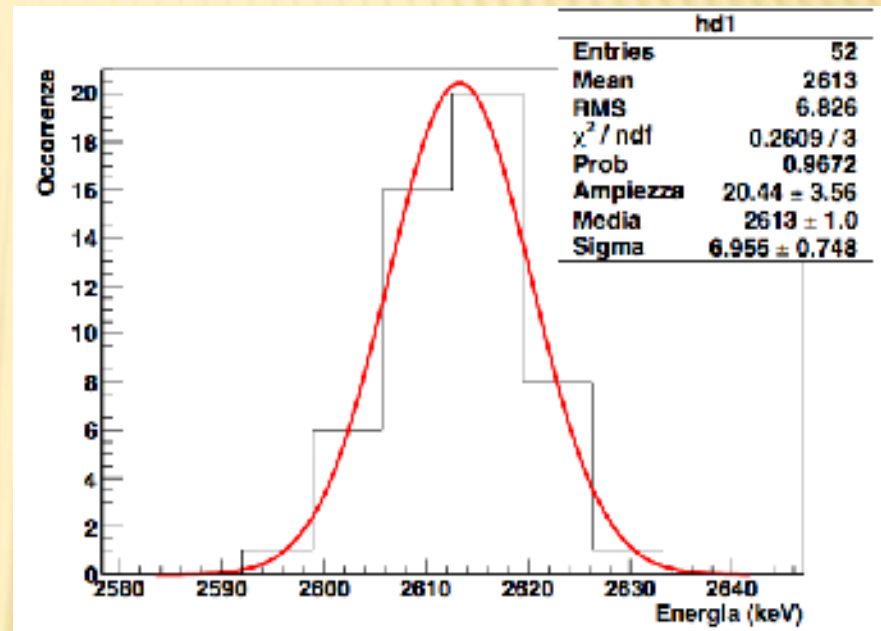


Энергетическое разрешение при разных условиях измерений

The mono-energetic 2615 keV γ line from a ^{232}Th source was used to estimate the resolution.



Spectrometric parameter of undoped ZnSe at 80 K (Am^{241} and Cs^{137} sources)



The measured resolution is 16 keV FWHM, two time worst than in TeO_2 detectors...but the α background is much lower.

Выполненные и планируемые эксперименты по двойному бета-распаду

Nucleus	Detector	EXP	Material	kg y	τ_{12} Limit (y) (90% CL)	$\langle m_\nu \rangle$
⁴⁹ Ca					$> 1.4 \times 10^{22}$	
⁷⁶ Ge	Ge diode	IGEX/HDM		~ 47.7	$> 1.6-1.9 \times 10^{25}$	$< 0.35^*$
⁸² Se	Tracking	NEMO3			$> 2.1 \times 10^{23}$	$< 1.4-2.2$
¹⁰⁰ Mo	Tracking	NEMO3			$> 5.8 \times 10^{23}$	$< 0.8-1.3$
⁹⁶ Zr	Tracking	NEMO3			$> 8.6 \times 10^{21}$	
¹¹⁶ Cd		Solotvina			$> 1.7 \times 10^{23}$	
¹²⁸ Te	Bolometer	Cuoricino	TeO ₂		$> 1.1 \times 10^{23}$	
¹³⁰ Te	Bolometer	Cuoricino	TeO ₂	~ 12	$> 3 \times 10^{24}$	$< 0.19-0.68$
¹³⁶ Xe	Xe scint	DAMA		~ 4.5	$> 1.2 \times 10^{24}$	$< 1.1-2.9$
¹⁵⁰ Nd					$> 1.2 \times 10^{21}$	
¹⁵⁰ Gd					$> 1.3 \times 10^{21}$	

* Existing claim for a **positive result** by part of the same group ($\tau_{1/2} = 1.19 \cdot 10^{25} > 6\sigma$)

Experiment	Isotope	Isotope mass (kg)	$\tau_{1/2}$ (y)	$\langle m_\nu \rangle$	Data taking Start	Status
CUORE	¹³⁰ Te	203	2.1×10^{26}	$0.03 - 0.07^*$	2012	Construction
GERDA I	⁷⁶ Ge	17.9	3×10^{25}	$0.2 - 0.5^*$	2009	Construction
GERDA II	⁷⁶ Ge	40	2.0×10^{26}	$0.07 - 0.2^*$	2011	Funded
Majorana	⁷⁶ Ge	30-60	1.1×10^{26}	$0.1 - 0.3^*$	2011	Funded R&D
EXO-200	¹³⁶ Xe	200	6.4×10^{25}	$0.2 - 0.7^*$	2009	Funded
SuperNEMO	⁸² Se	100	2.1×10^{25}	$0.05 - 0.09^*$	2011	R&D
SuperNEMO	¹⁵⁰ Nd	100	1.0×10^{26}	$0.07 - 0.2^*$	2011	R&D
CANDLES	⁴⁸ Ca	0.5		0.5	2009	Funded R&D
MOON II	¹⁰⁰ Mo	120		$0.09 - 0.13$		R&D
DCBA	¹⁵⁰ Nd	20				R&D
SNO++	¹⁵⁰ Nd	500				R&D
COBRA	¹¹⁶ Cd	420				R&D
COBRA	¹³⁰ Te	420				R&D

Выводы

- Радиационный фон болометров с применением ZnSe реально снизить до 0.001 соб/кэВ/кг/год;
- С применением ^{82}Se планируется провести эксперименты со следующими параметрами:

	^{82}Se weight (kg)	Useful material	Half-life limit (10^{26}y)	Sensitivity to $m_{\beta\beta}$ (meV)
baseline	17.6	56%	2.31	52-65

- Необходима оптимизация характеристик кристаллов с целью повышения чувствительности детектирования бета-частиц.