Сцинтилляторы для поиска 2β-распада атомных ядер

Федор Даневич

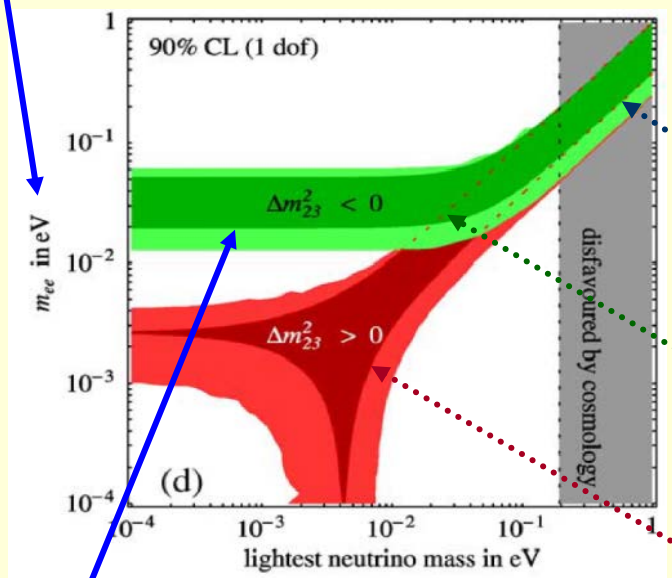
Институт ядерных исследований НАН Украины

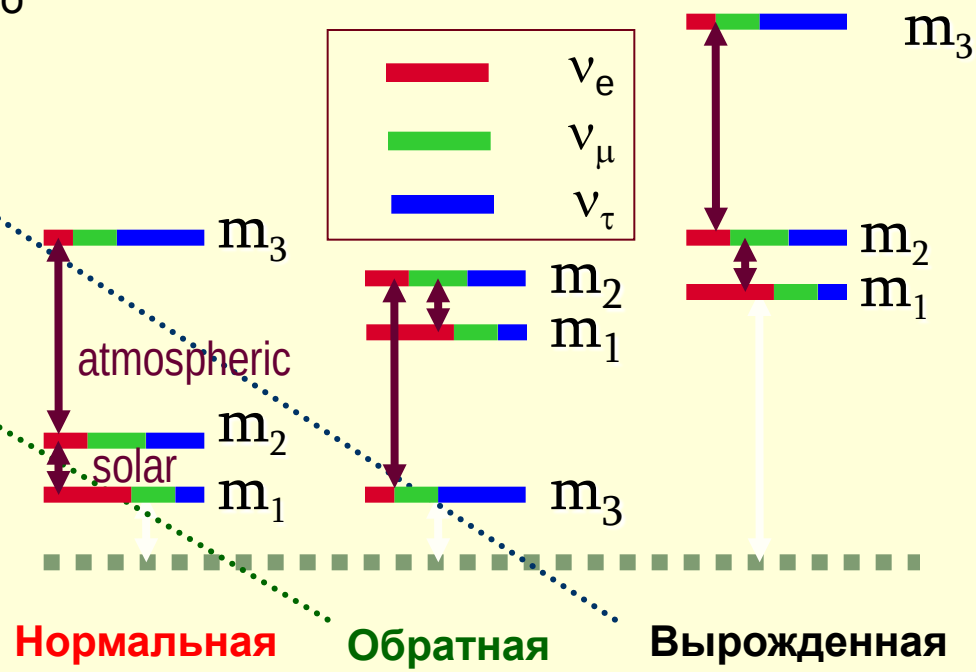
http://lpd.kinr.kiev.ua

- вступление: зачем искать 2β-распад?
- преимущества сцинтилляторов
- криогенные сцинтилляционные болометры
- выводы

0ν2β распад и свойства нейтрино

$\langle m_\nu \rangle = |\Sigma m_j U_{ej}^2|$ – эффективная майорановская масса нейтрино, m_j – массовые состояния нейтрино, U_{ej} – матричные элементы матрицы смешивания между массовыми и наблюдаемыми ароматами нейтрино





- **Наблюдение 0ν2β распада будет свидетельствовать о нарушении лептонного числа, майорановской природе нейтрино, что будет фундаментальным открытием нового типа материи**
- **Отсутствие 0ν2β-распада на уровне массы нейтрино $\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.01-0.02 эВ позволит установить нормальную схему массовых состояний нейтрино**

Состояние исследований

- Двухнейтринный $2\beta^-$ распад наблюден в 11-ти ядрах (^{48}Ca, ^{76}Ge, ^{82}Se, ^{96}Zr, ^{100}Mo, ^{116}Cd, ^{128}Te, ^{130}Te, ^{136}Xe, ^{150}Nd and ^{238}U) с периодами полураспада $T_{1/2} \sim 10^{19} - 10^{24}$ лет

- Безнейтринный $2\beta^-$ распад не обнаружен. В наиболее чувствительных экспериментах установлены лишь пределы (^{76}Ge, ^{82}Se, ^{100}Mo, ^{116}Cd, ^{128}Te, ^{130}Te, ^{136}Xe) на уровне $T_{1/2} > 10^{23} - 10^{25}$ лет $\Rightarrow$ $\langle m_\nu \rangle < 0.3 - 3$ эВ

- Сообщение H.V.Klapdor-Kleingrothaus *et al* о наблюдении $0\nu2\beta$ распада в ^{76}Ge с $T_{1/2} \sim 2 \times 10^{25}$ лет $\Rightarrow$ $\langle m_\nu \rangle = 0.3$ эВ (?)

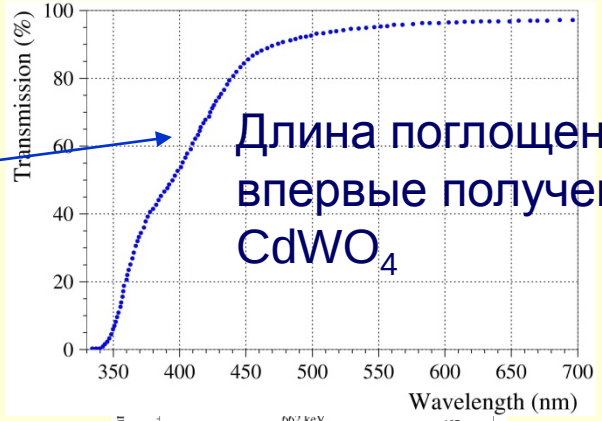
- Несколько крупномасштабных (десятки – сотни кг обогащенных изотопов) в стадии сооружения или разработки с чувствительностью к $0\nu2\beta$ распаду на уровне $T_{1/2} \sim 10^{26}$ лет $\Rightarrow$ $\langle m_\nu \rangle \sim 0.05$ эВ

$^{106}CdWO_4$

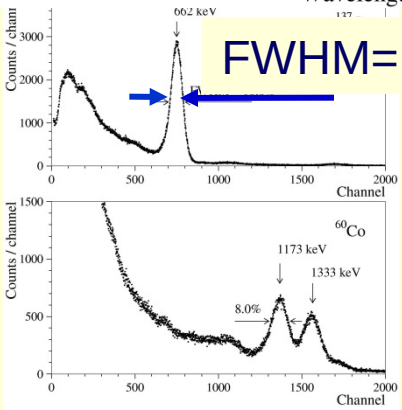
66% ^{106}Cd, 2.66×10^{23} ядер ^{106}Cd

Буля $^{106}CdWO_4$, 231 г (87.2%)
Суммарные потери ^{106}Cd = 2.3%

$^{106}CdWO_4$ сцинтиллятор 215 г



Длина поглощения 60 см впервые получена для $CdWO_4$



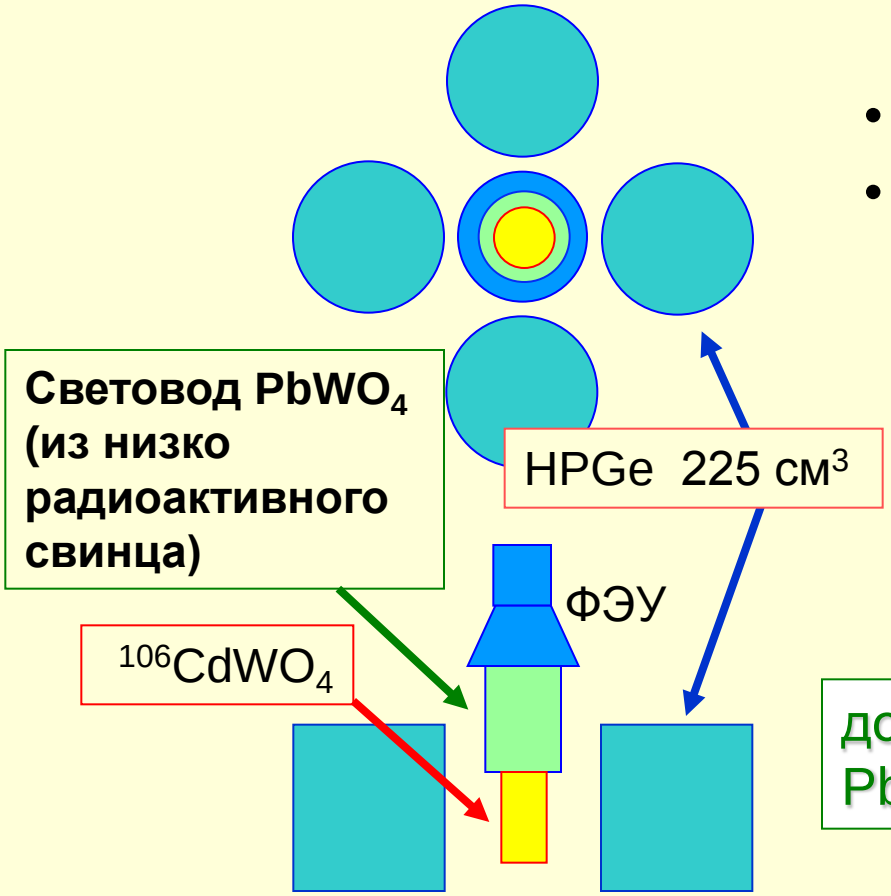
FWHM=10%

Высокие оптические и сцинтилляционные свойства получены благодаря глубокой очистке исходных материалов и росту кристалла методом Чохральского с низким градиентом температуры

Новые ограничения на 2β процессы в ^{106}Cd на уровне $T_{1/2} \approx 10^{19} - 10^{21}$ р

P. Belli et al., NIMA 615 (2010) 301; P. Belli et al., PRC 85 (2012) 044610

Поиск 2β-распада ^{106}Cd со сцинтиллятором $^{106}CdWO_4$ в совпадениях с 4-х кристальным HPGe γ детектором

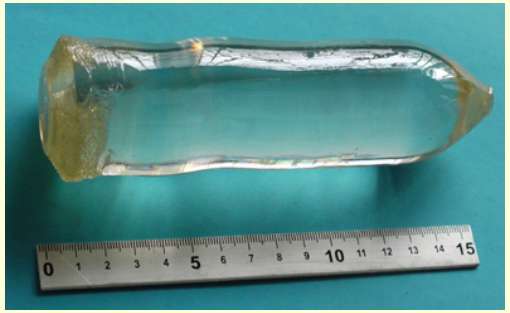


- Эффективность регистрации ~ (3–8)%
- Фон – несколько отсчетов за год

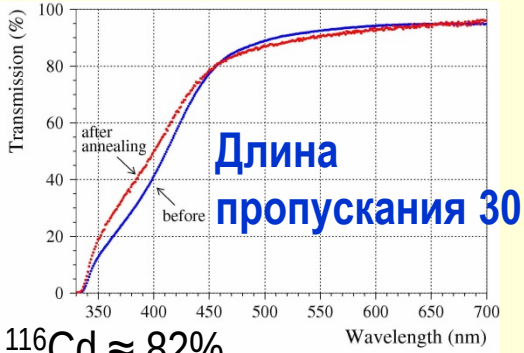
Чувствительность к 2ν εβ$^+$ и 2β$^+$
^{106}Cd: $T_{1/2}$ ~ 10^{20} – 10^{21} лет
Теория: 2ν2K 10^{20} – 5×10^{21} лет
2νεβ$^+$ 8×10^{20} – 4×10^{22} лет

доклад Ирины Тупициной о разработке $PbWO_4$ из археологического свинца

Поиск 0ν2β распада ^{116}Cd со сцинтилляторами $^{116}CdWO_4$

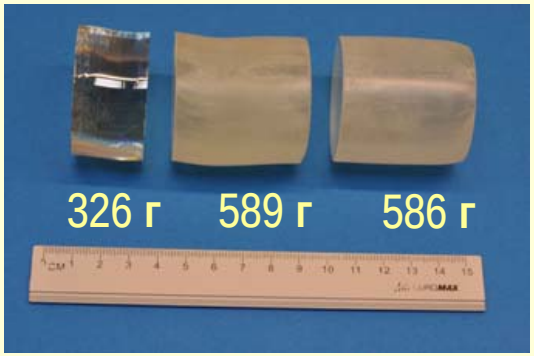


1868 г (87% шихты) обогащение ^{116}Cd ≈ 82%

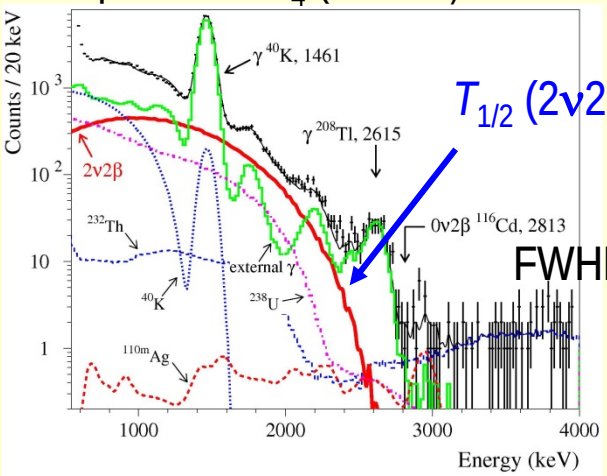


Длина пропускания 30 см

Сборка детектора



Спектр $^{116}CdWO_4$ (1.16 кг) за 7593 ч



$T_{1/2}$ (2ν2β) = 2.5(5)×10^{19} **л**

FWHM ≈ 4% @ 2.8 **МеВ**

В октябре 2012 детектор был усовершенствован с целью снижения фона, идет набор данных, ожидаемая чувствительность за 5 лет:

$T_{1/2}$ ~ (0.5 - 1.5) × 10^{24} **л** → $\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.4 - 1.4 **еВ**

A.S. Barabash et al., JINST 06, (2011) P08011; Proc. NPAE-2012, Sep 03–07, Kyiv, Ukraine

Возможность получения радиоактивно чистых сцинтилляторов $^{116}CdWO_4$ перекристаллизацией

Планируется измерение в сцинтилляционной моде

Измерения в качестве криогенного сцинтилляционного болометра

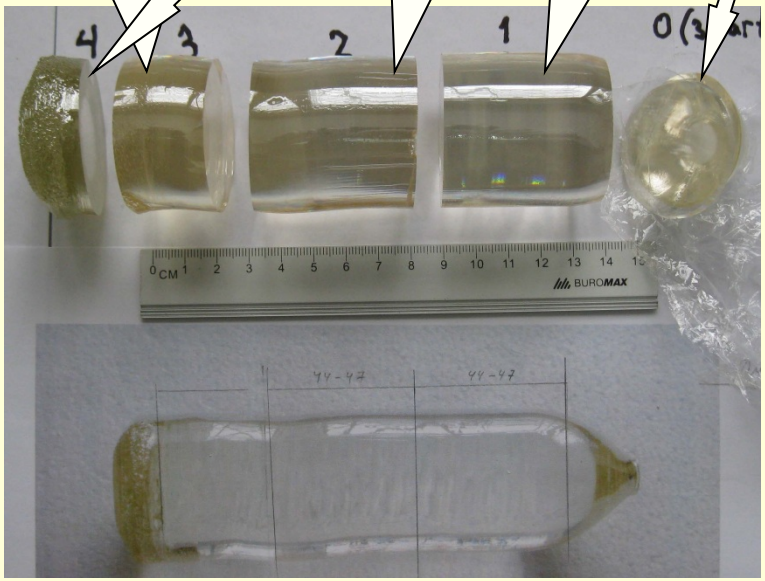
Активность ^{228}Th **(мБк/кг)**

10(2)

0.07(1)

0.04(1)

Остаток после роста



При перекристаллизации можно ожидать значительного снижения примеси тория благодаря очень низкой сегрегации (сегрегация радия еще ниже)

D.V. Poda *et al*., proc. LUMDETR 2012

Дальнейшие шаги

Если процесс будет обнаружен в экспериментах с чувствительностью

$\langle m_\nu \rangle \sim 0.05$ эВ $\Rightarrow T_{1/2} \sim 10^{26}$ лет $\Rightarrow$

- лептонное число не сохраняется
- схема, массовых состояний – инвертированная
- нейтрино – массивная частица Майораны

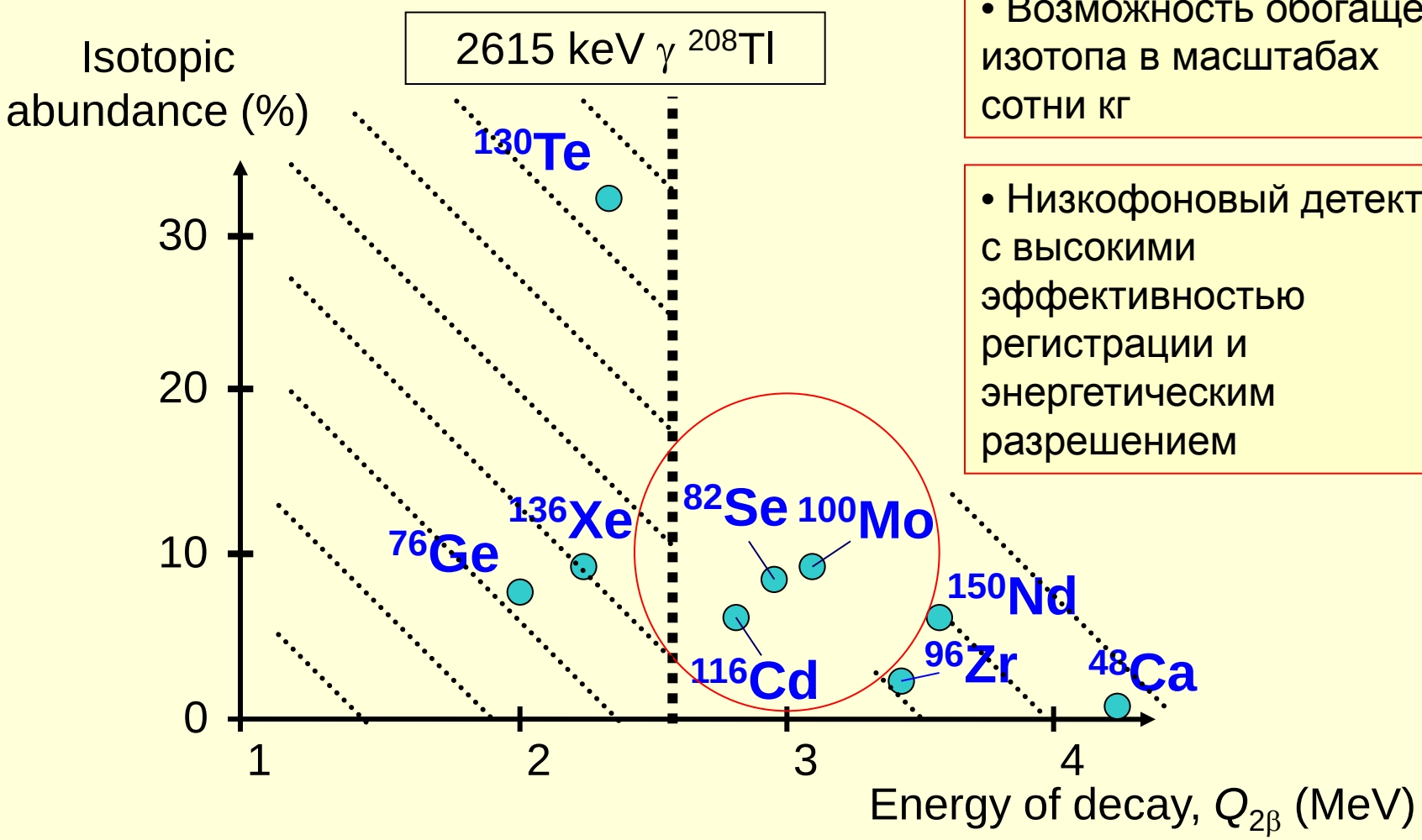
Чтобы определить схему массовых состояний нейтрино,

достаточно *не увидеть* $0\nu 2\beta$*-распад* с массой нейтрино

$\langle m_\nu \rangle \sim 0.01 - 0.02$ эВ $\Rightarrow T_{1/2} \sim 10^{27} - 10^{28}$ лет

Наиболее “перспективные” 2β ядра

с точки зрения эксперимента с $T_{1/2} \sim 10^{27}$ лет:



- Возможность обогащения изотопа в масштабах сотни кг

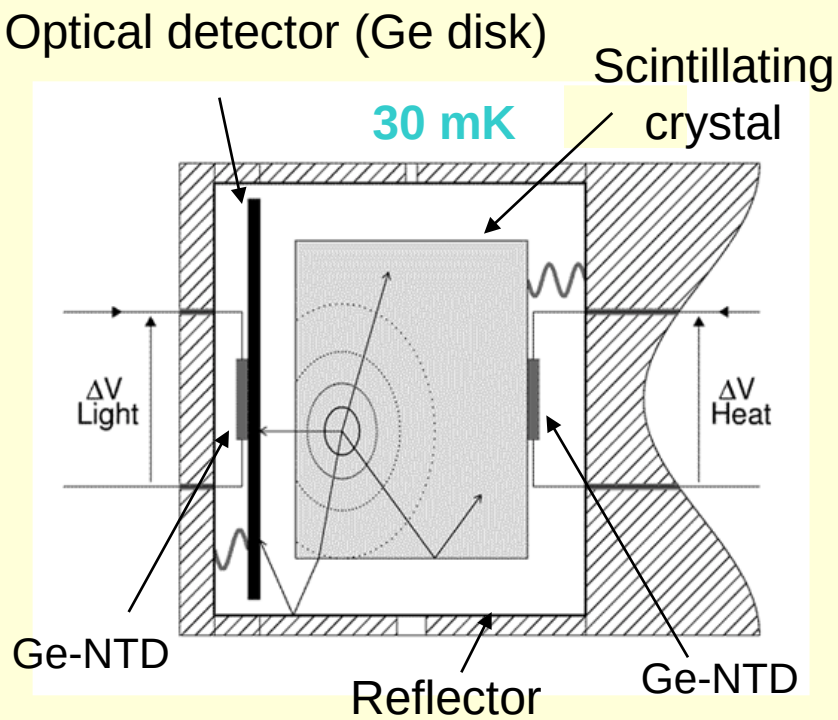
- Низкофоновый детектор с высокими эффективностью регистрации и энергетическим разрешением

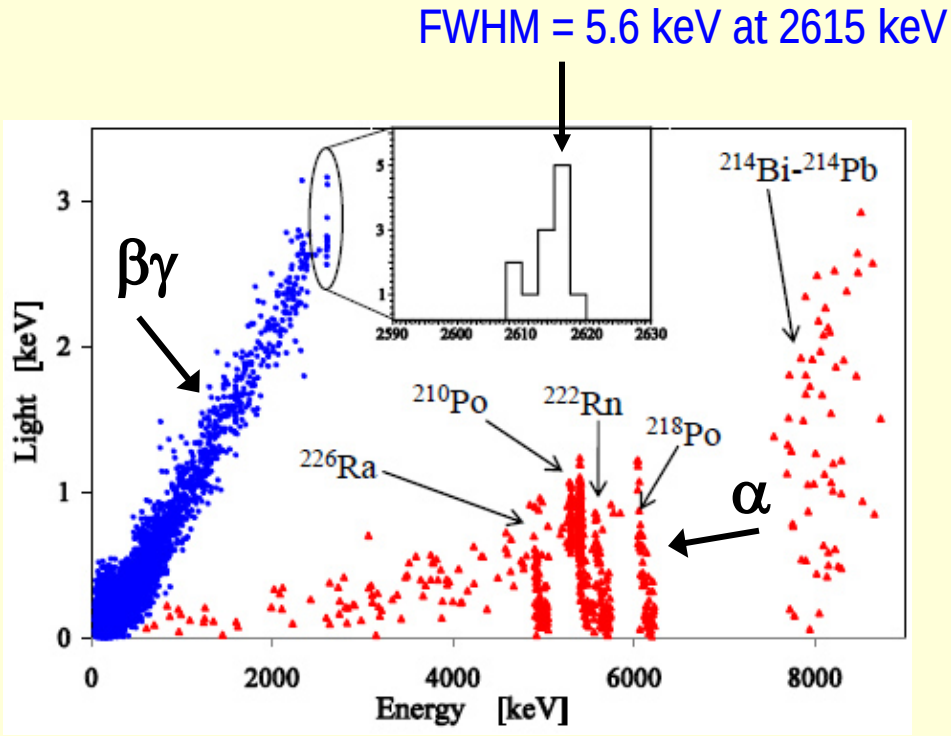
Что значит $T_{1/2} \sim 10^{27}$ лет?

Ядро	$T_{1/2} \Rightarrow \langle m_\nu \rangle = 0.02$ эВ	Детектор	Количество 2β ядер в 1 тонне детектора	$N_{2\beta}$
^{82}Se	**(0.4 – 5) $\times 10^{27}$ л**	**Zn^{82}Se**	**4.1 $\times$ 10^{27}**	**32 – 3**
^{100}Mo	**(0.3 – 1.3) $\times 10^{27}$ л**	**Zn^{100}MoO$_4$**	**2.6 $\times$ 10^{27}**	**27 – 6**
^{116}Cd	**(0.9 – 1.4) $\times 10^{27}$ л**	**^{116}CdWO$_4$**	**1.7 $\times$ 10^{27}**	**6 – 4**

$N_{2\beta}$ – количество событий $0\nu2\beta$ распада в детекторе массой 1 тонна в течение 5 лет измерений с эффективностью регистрации 90%

Низкотемпературные сцинтилляционные болометры



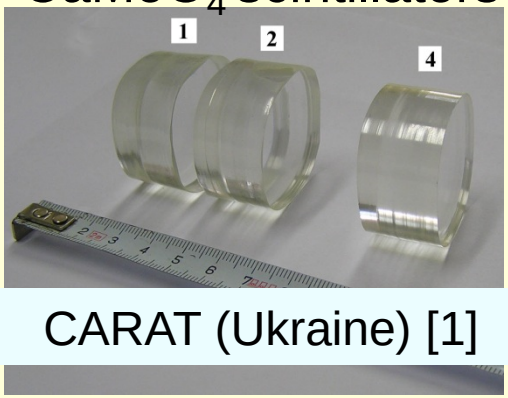


L. Gironi *et al.*, JINST 5 (2010) 11007

- **Высокое энергетическое разрешение ~ 5-7 кэВ (0.3%)**
- **Низкий фон благодаря разделению между β и α (~99.9%)**

Проект AMoRE

$CaMoO_4$ scintillators



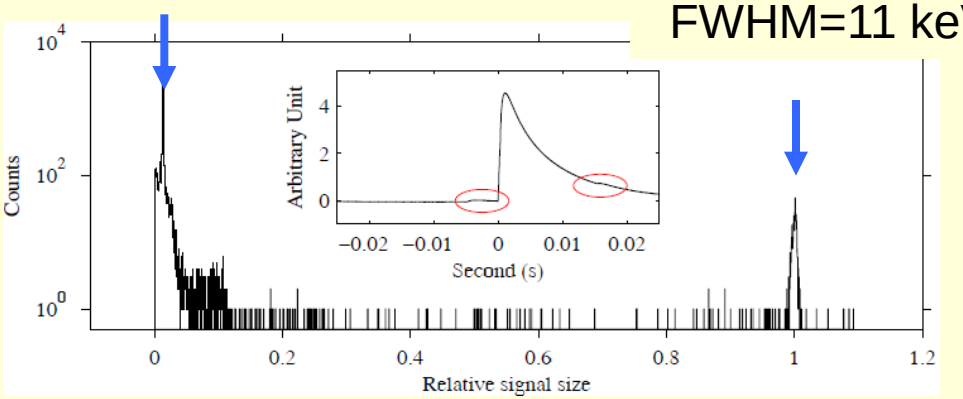
CARAT (Ukraine) [1]

$^{40}Ca^{100}MoO_4$ 0.55 kg
FOMOS (Russia)

криогенный сцинтилляционный болометр с $CaMoO_4$ [2]

γ ^{241}Am
FWHM=1.7 keV

α ^{241}Am
FWHM=11 keV



Чувствительность за 5 лет измерений с 100 кг $^{40}Ca^{100}MoO_4$
$T_{1/2} \approx 3 \times 10^{26}$ л, $\langle m_\nu \rangle$ **~ 0.05 эВ** [3]

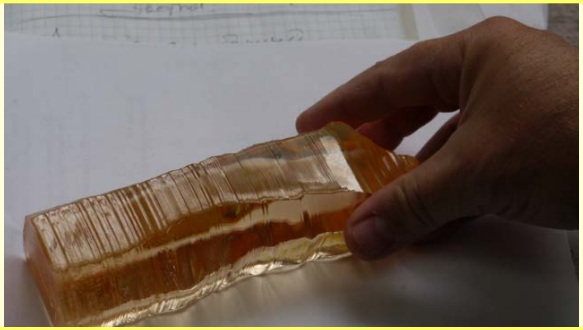
Недостаток: 2ν2β-распад ^{48}Ca

[1] A.N. Annenkov et al., NIMA 584 (2008) 334
[2] S.J. Lee et al., APP 34(2011)732
[3] S.K. Kim et al., MEDEX 2011

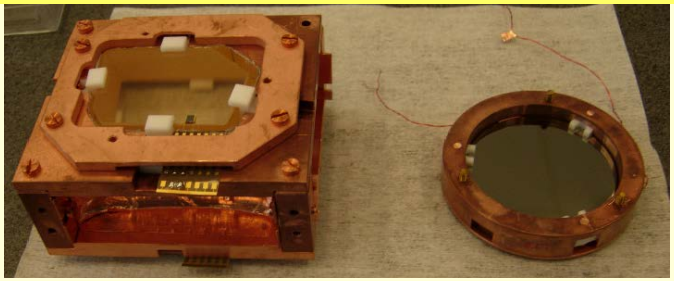
Криогенные сцинтилляционные болометры $ZnMoO_4$ проект LUMINEU

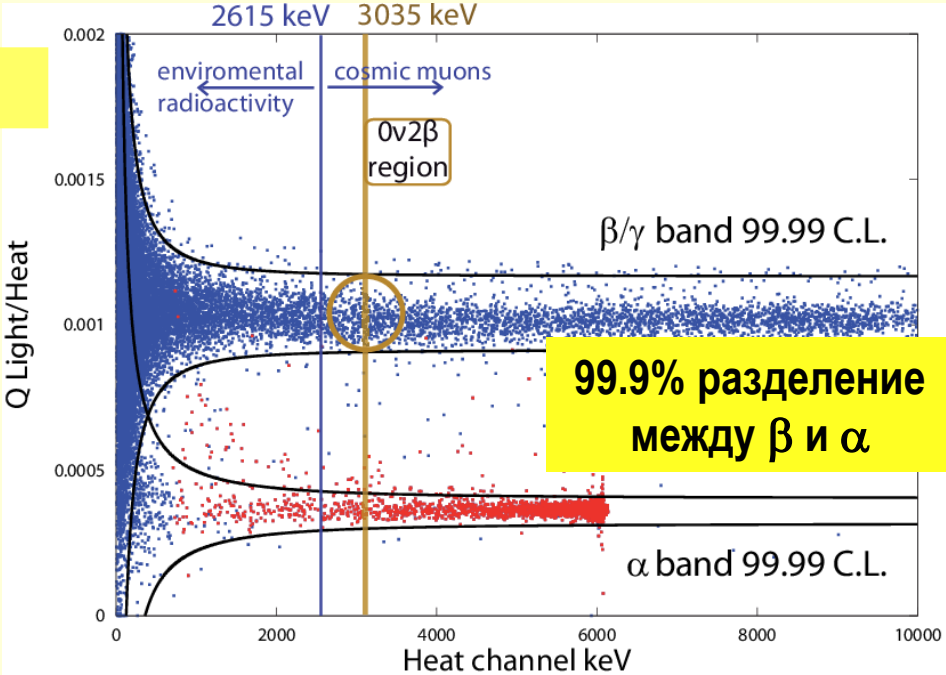
^{100}Mo

$ZnMoO_4$ **массой ~1 кг, ИНХН (Новосибирск)**



~ 0.3 **кг кристалл в держателе криостата**





99.9% разделение между β и α

Идет разработка $Zn^{100}MoO_4$ из обогащенного ^{100}Mo

- **Высокое энергетическое разрешение** ~ 5-7 **кэВ** (0.3%)
- **Очень низкий фон ~ несколько отсчетов в год на энергии $Q_{2\beta}$ в 1 т детекторе**

Чувствительность с 800 кг $Zn^{100}MoO_4$ за 5 лет: $T_{1/2} \approx 10^{27}$ лет

$\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.013 – 0.05 эВ

PLB 710 (2012) 318

выводы

$0\nu2\beta$ эксперименты:

- **способны измерить $\langle m_\nu \rangle$ и установить схему массовых состояний нейтрино**
- **определить природу нейтрино (частица Дирака или Майораны)**
- **проверить сохранение лептонного заряда**

Сцинтилляторы, в частности из обогащенных изотопов, успешно используются для исследования 2β-распада

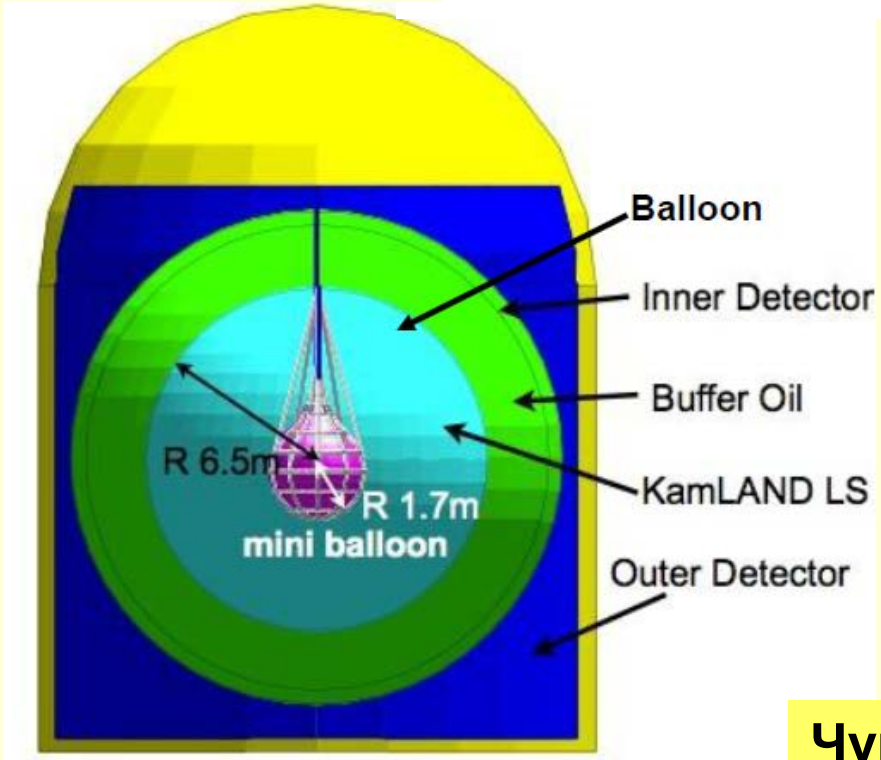
$0\nu2\beta$-эксперимент, способный определить схему массовых состояний нейтрино должен иметь чувствительность (для наиболее «благоприятных» ядер)

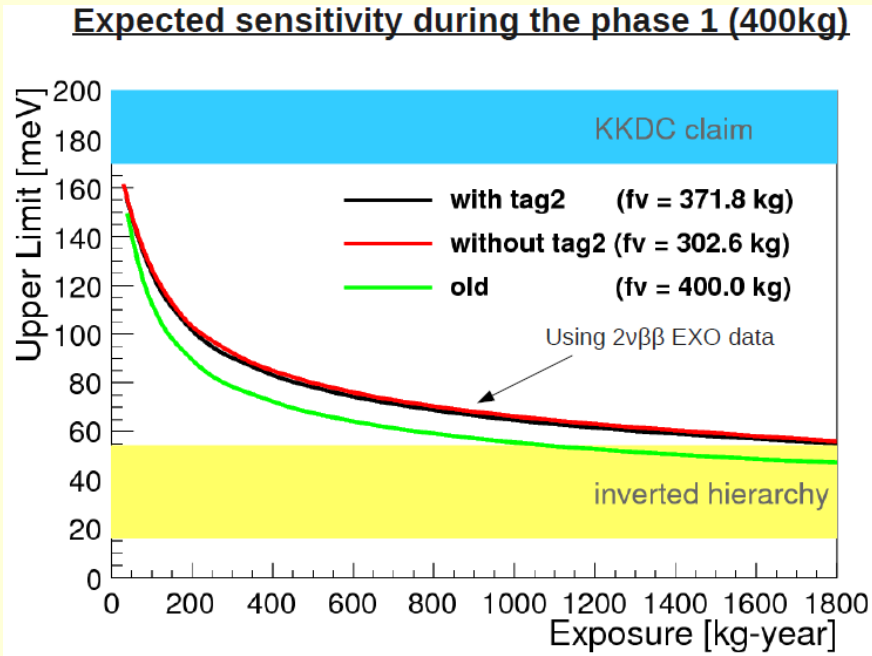
$$T_{1/2} \sim 10^{27} \text{ лет}$$

Криогенные сцинтилляционные болометры позволяют планировать эксперименты с такой чувствительностью

KamLAND-Zen

^{136}Xe





Чувствительность (400 кг) за 5 лет

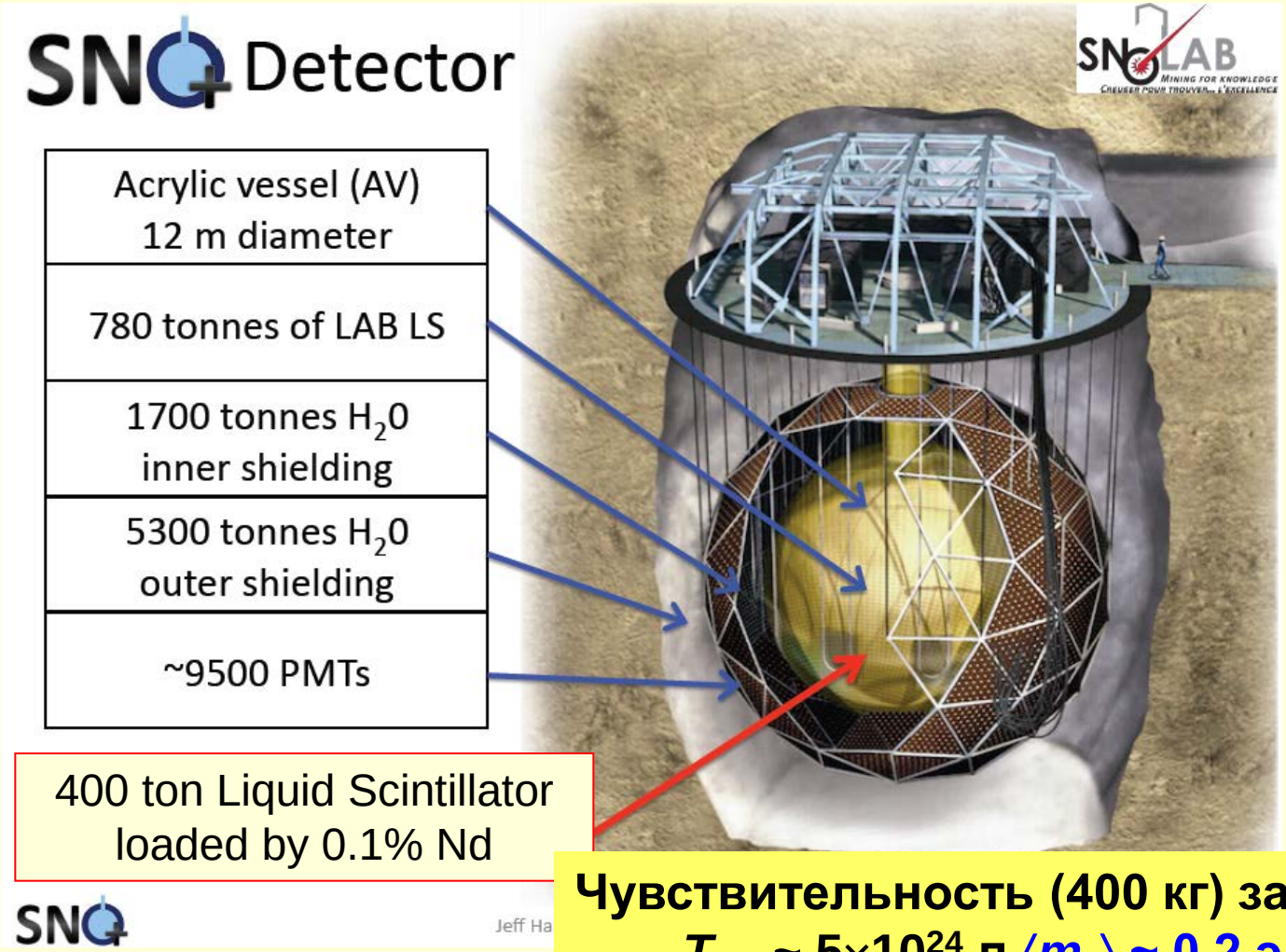
$\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.05 эВ

Низкий фон

Низкое энергетическое разрешение FWHM ~ 11%

Yuri Efremenko, MEDEX 2011, Prague, 14-15 Jun 2011
Alexandre Kozlov, TAUP 2011, Munich, 5-9 Sep 2011

^{150}Nd



Чувствительность (400 кг) за 3 лет
$T_{1/2}$ ~ 5×10^{24} л $\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.2 эВ

Большой объем детектора ⇒ необогащенный Nd
Невысокое энергетическое разрешение ~ 7%
Радиоактивная загрязненность Nd

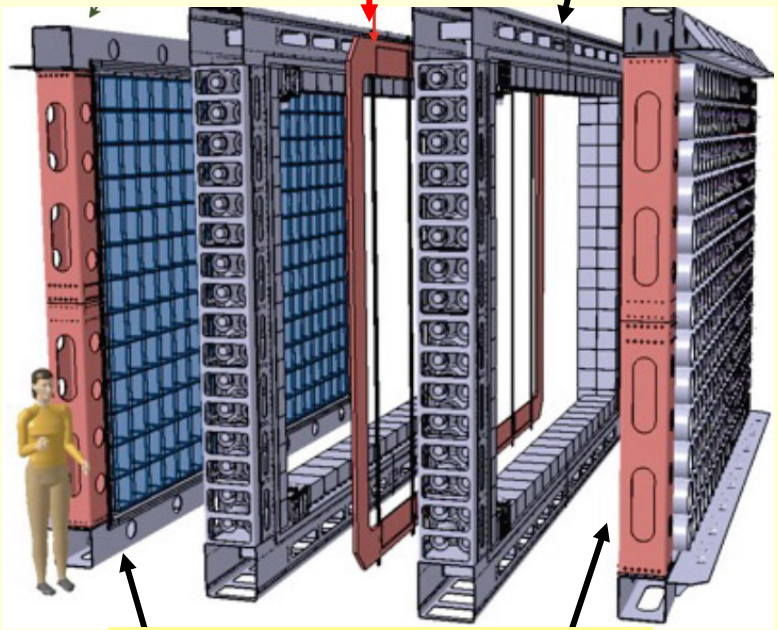
J. Hartnell, TAUP 2011, Munich, 5-9 Sep 2011

SuperNEMO

^{82}Se

- 100 кг обогащенного ^{82}Se в виде фольги, реконструкция треков
- 20 модулей по 5 кг ^{82}Se о очень низкой радиоактивной загрязненностью на уровне μБк/кг

Чувствительность $T_{1/2}$ ~ 10^{26} л ⇒
$\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.1 – 0.05 эВ

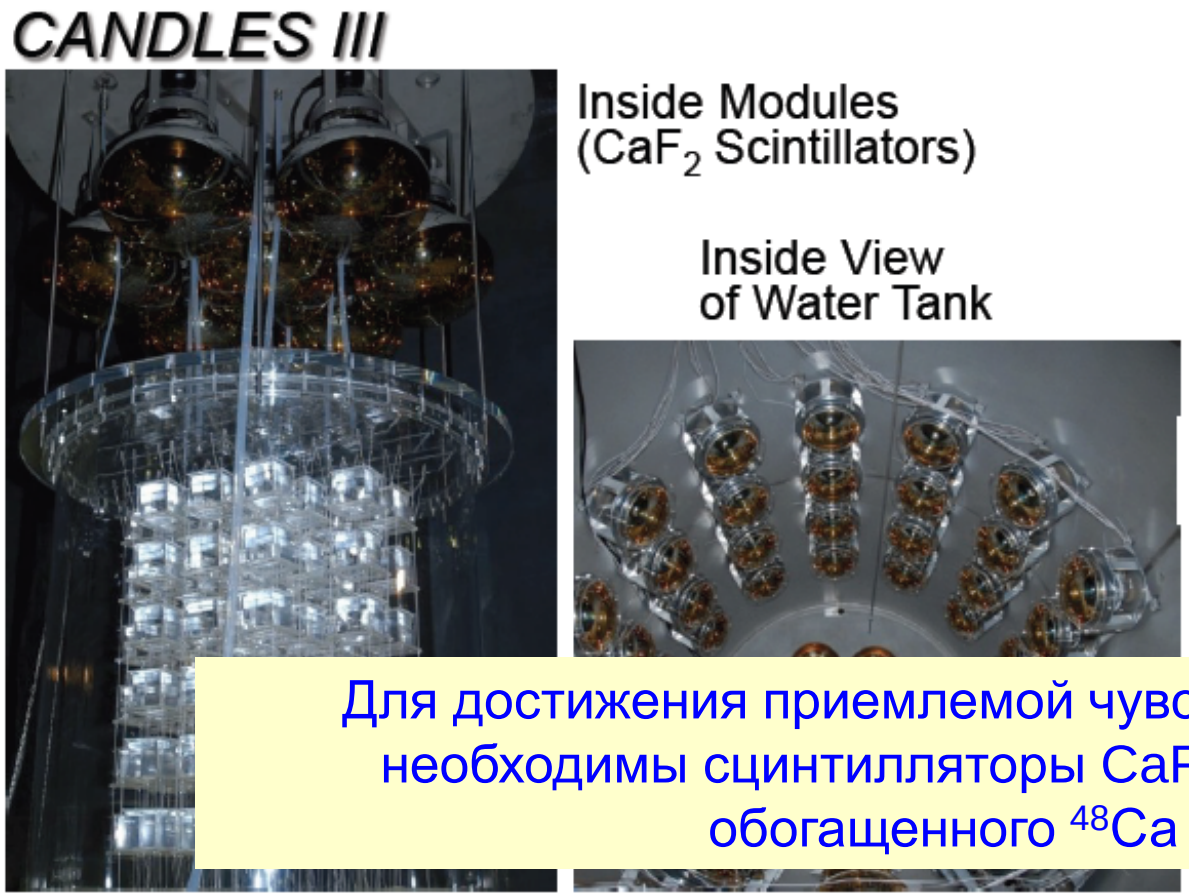


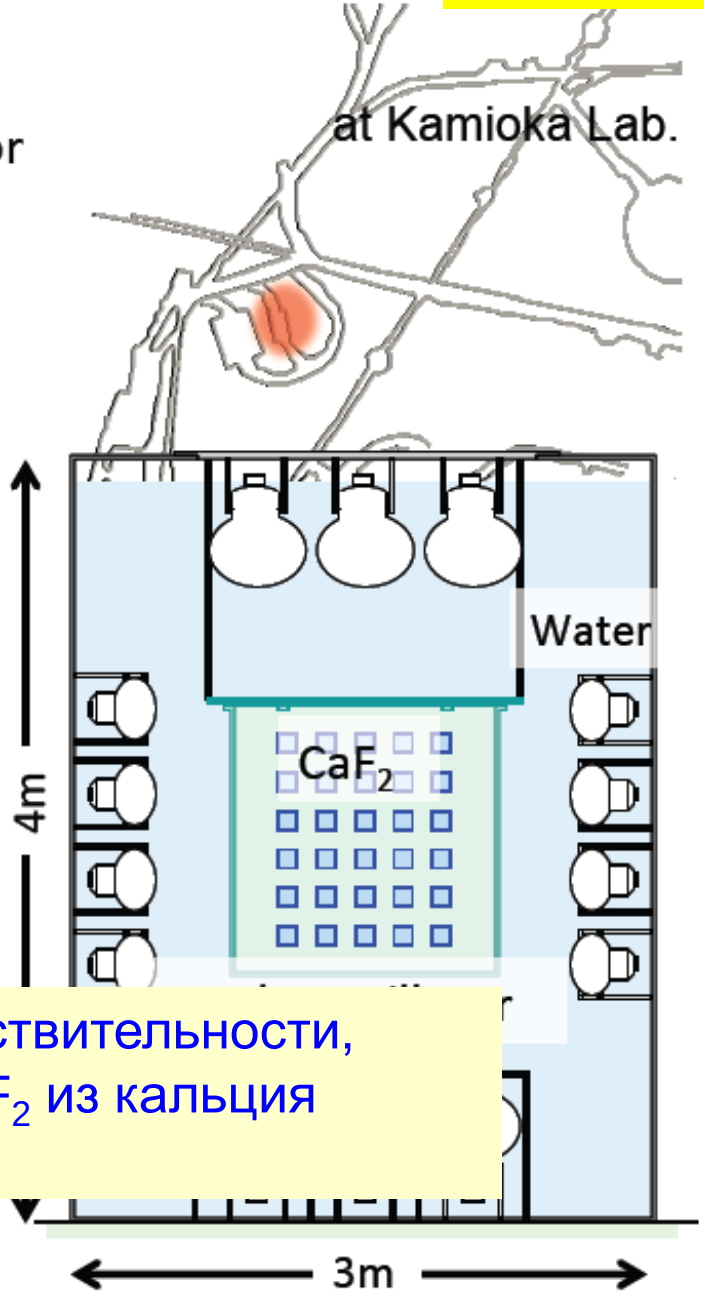
Эксперимент с реконструкцией событий
Удовлетворительное разрешение ≈4%
Низкая эффективность регистрации (≈30%)

CANDLES III

^{48}Ca

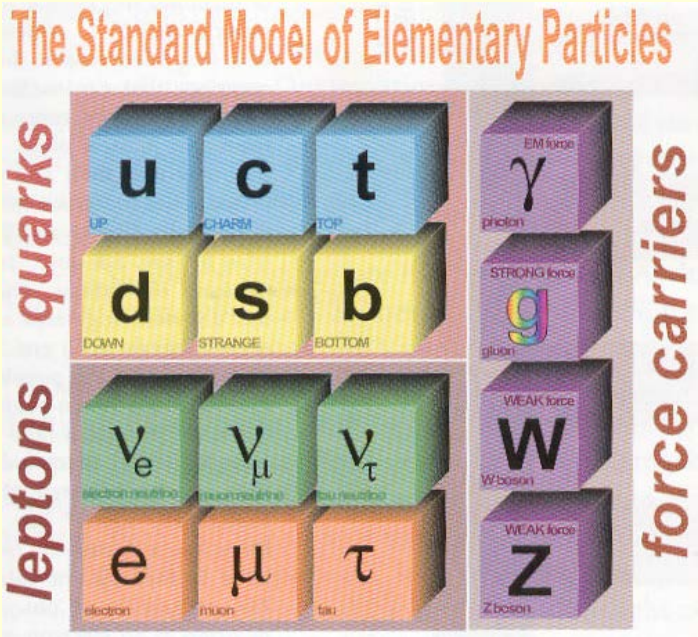
- CANDLES III at Kamioka Lab.
  - 96 CaF_2: 305kg (300 g of ^{48}Ca) + liquid scintillator
  - Measurement started in June 2011.





Для достижения приемлемой чувствительности, необходимы сцинтилляторы CaF_2 из кальция обогащенного ^{48}Ca

Минимальная стандартная модель частиц



Материя состоит из 12 фермионов:

6 кварков (u, d, s, c, b, t)

6 лептонов (e, μ, τ, ν_e, ν_μ, ν_τ,)

Взаимодействия 12 бозонов:

1 γ - электромагнитное

8 глюонов – сильное

3 калибровочных бозонов (W_+, W_-, Z_0) - слабое

Наиболее существенные проблемы МСМ:

Осцилляции нейтрино → ***нейтрино массивно***

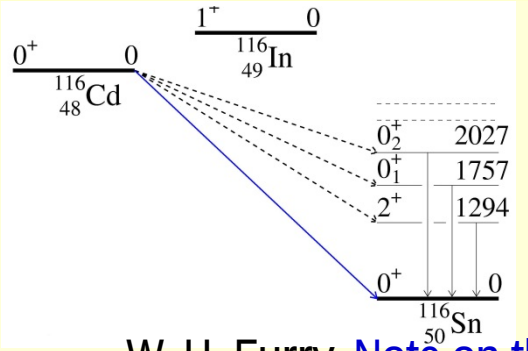
Невидимая материя во Вселенной → ***новые частицы?***

Темная энергия → ***???***

Минимальная стандартная модель частиц нуждается в расширении

2β распад и свойства нейтрино

M. Goeppert–Mayer, Double β–Disintegration Phys. Rev. 48 (1935) 512



G. Racah, Sulla simmetria tra particelle e antiparticelle Nuovo Cimento 14 (1937) 322

W. H. Furry, Note on the Theory of the Neutral Particle, Phys. Rev. 34 (1938) 56

W. H. Furry, On Transition Probabilities in Double Beta-Disintegration, Phys. Rev. 56 (1939) 1184

Нейтрино рассмотренное Майораной тождественно своей античастице:

$$\nu \equiv \bar{\nu}$$

в отличие от нейтрино Дирака

P.A.M. Dirac

E. Majorana, Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone Nuovo Cimento 14 (1937) 171

Безнейтринный двойной β-распад возможен, если нейтрино является частицей Майораны с ненулевой массой, лептонное число не сохраняется

Наиболее “перспективные” 2β ядра

теоретические расчеты

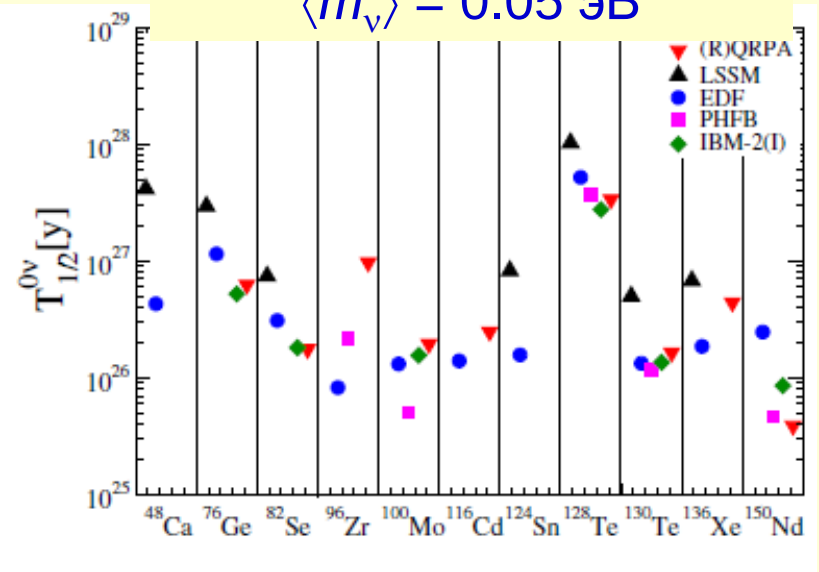
$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} \approx G^{0\nu 2\beta}(Q_{2\beta},Z)|M^{0\nu 2\beta}|^2\langle m_\nu\rangle^2$

$G^{0\nu 2\beta}(Q_{2\beta},Z)$ – интеграл по фазовому пространству

$M^{0\nu 2\beta}$ – ядерный матричный элемент

$\langle m_\nu\rangle = |\Sigma m_j U_{ej}^2|$ – эффективная масса нейтрино Майораны

$\langle m_\nu\rangle$ = 0.05 эВ



В случае обратной схемы ожидается $\langle m_\nu\rangle \approx 0.05$ эВ, что для наиболее перспективных ядер соответствует периодам полураспада $T_{1/2} \approx 10^{26}$ лет

1

Чтобы установить нормальную схему, необходима чувствительность $\langle m_\nu\rangle < 0.02$ эВ $\Rightarrow T_{1/2} \approx 10^{27}$ лет

Requirements to scintillators for 2β experiments

Sensitivity (half-life $T_{1/2}$) of 2β experiments:

$$T_{1/2} \propto \varepsilon \cdot \delta \sqrt{\frac{m \cdot t}{R \cdot BG}}$$

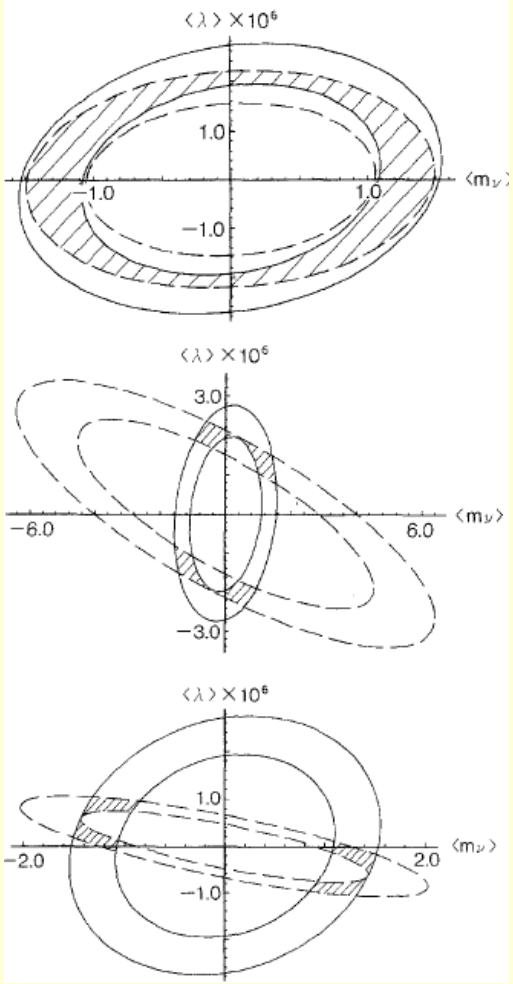
ε – detection efficiency
δ – abundance of candidate nuclei in the detector
m – mass of detector
t – time of measurements
R – energy resolution
BG – background

- Maximal concentration of an isotope of interest
- Very low (ideally zero) radioactive contamination
- High scintillation properties (energy resolution, light yield)
- Diamagnetic properties, single crystals (for scintillation bolometers)
- Minimal lost of enriched isotope
- Large enough volume ~ 10^1 – 10^2 cm^3

Right handed week current contribution

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = C_{mn}^{0\nu}\left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right)^2 + C_{m\lambda}^{0\nu}\langle\lambda\rangle\left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right) + C_{m\eta}^{0\nu}\langle\eta\rangle\left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right) + C_{\lambda\lambda}^{0\nu}\langle\lambda\rangle^2 + C_{\eta\eta}^{0\nu}\langle\eta\rangle^2 + C_{\lambda\eta}^{0\nu}\langle\lambda\rangle\langle\eta\rangle$$

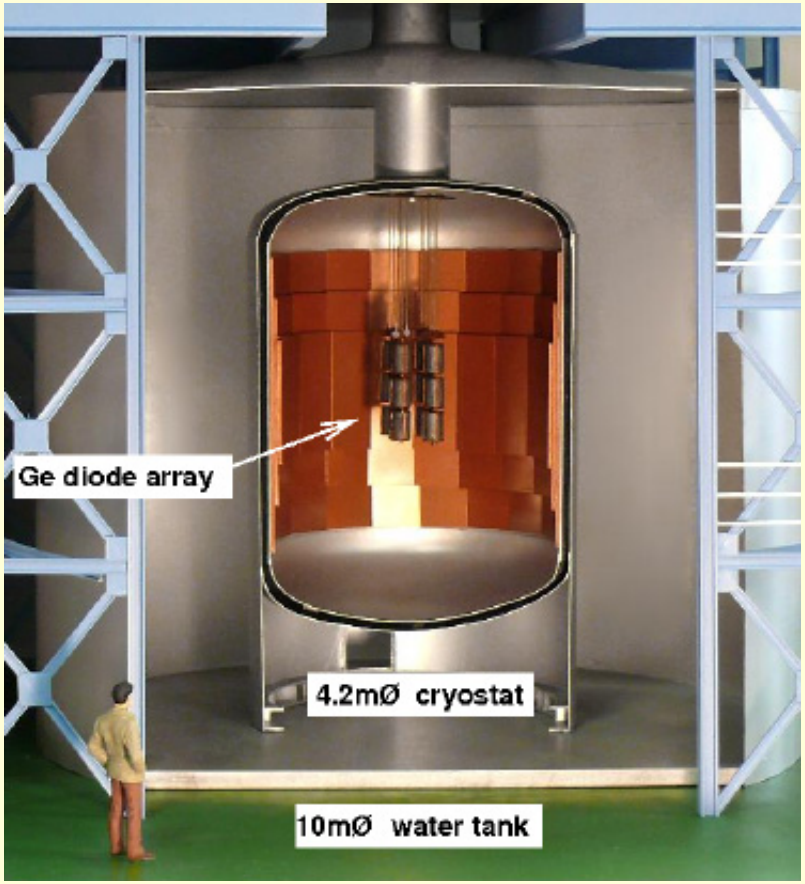
Half-lives for $0\nu\varepsilon\beta^+$ decay depend strongly on whether the decay is dominated by the mass mechanism or right-handed weak current [1]



[1] M. Hirsch et al., Z. Phys. A 347 (1994) 151

GERDA

^{76}Ge



LNGS, Italy

I етап

- ≈ 20 кг збагачених ^{76}Ge HPGe детекторів (H-M & IGEX)
- Очікуваний фон ~0.001 відліків/(рік кг кеВ)

$$T_{1/2} \sim 3 \times 10^{25} \text{ р},$$
$$\langle m_\nu \rangle \sim 0.3 - 0.9 \text{ eB}$$

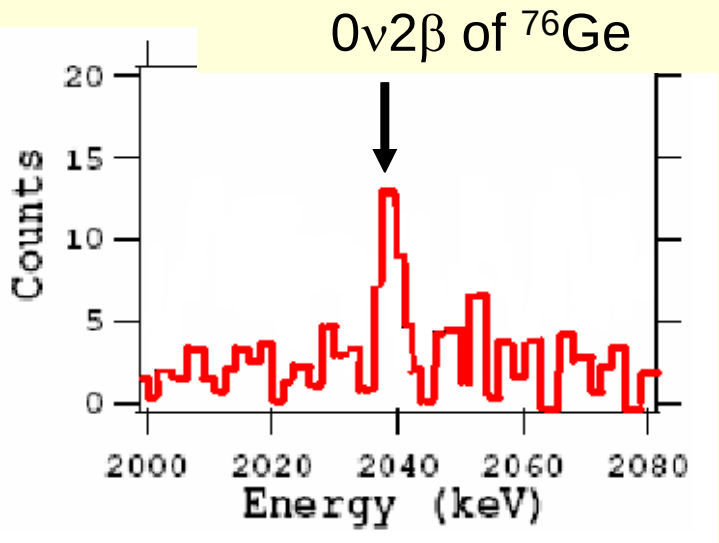
II етап

- Експозиція 100 кг×рік
- Фон ~0.001 відліків/(рік кг кеВ)

$$T_{1/2} \sim 1.5 \times 10^{26} \text{ yr},$$
$$\langle m_\nu \rangle \sim 0.1 - 0.2 \text{ eV}$$

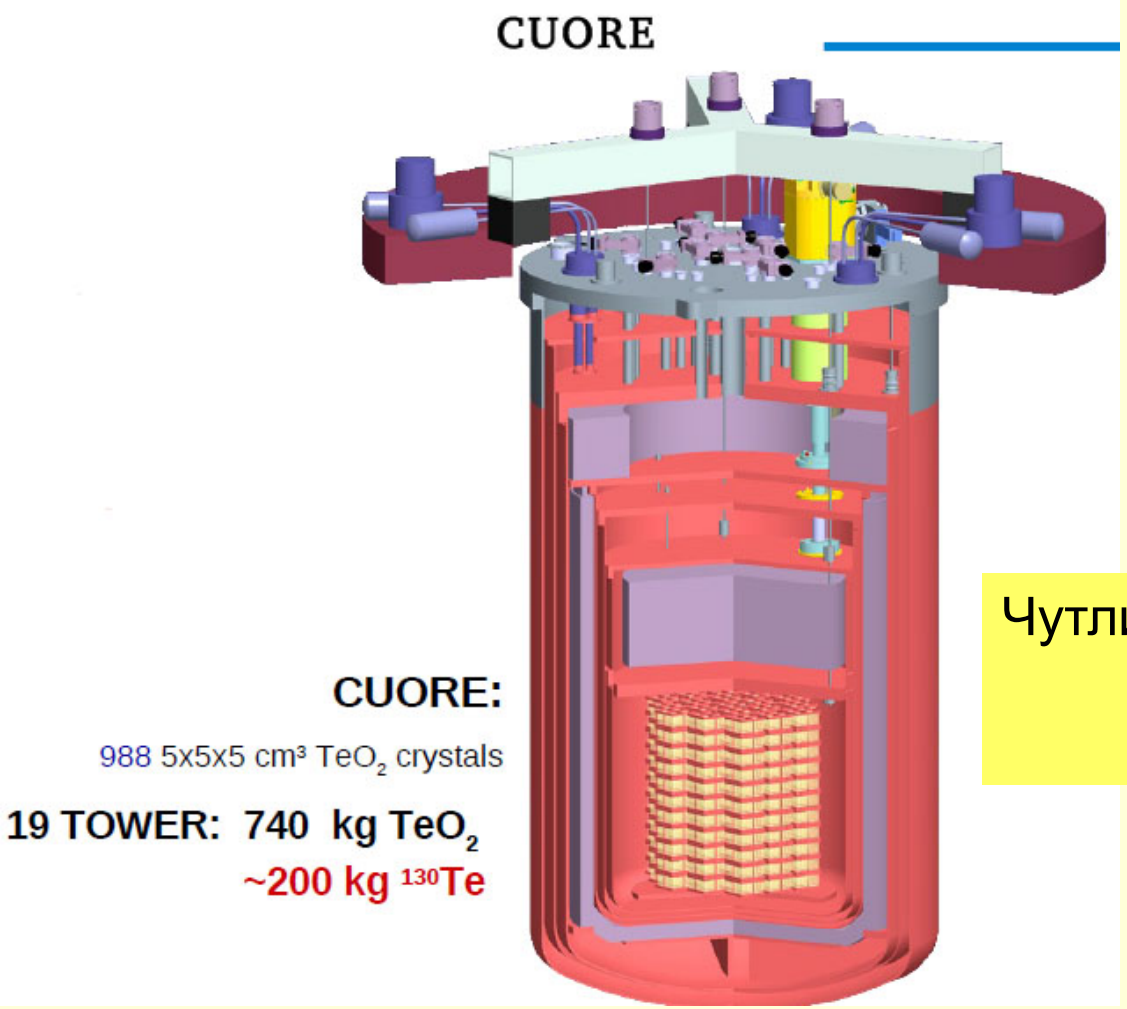
Висока енергетична роздільна здатність (FWHM) 2-3 кеВ (0.1%),
Радіоактивна чистота HPGe
Енергія розпаду менша 2.6 МеВ

Чого ми очікуємо від першого етапу експерименту GERDA?



CUORE

^{130}Te



Чутливість за 5 років вимірювань

$T_{1/2} \approx 1.6\times10^{26}$ р

$\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.04 – 0.10 eV

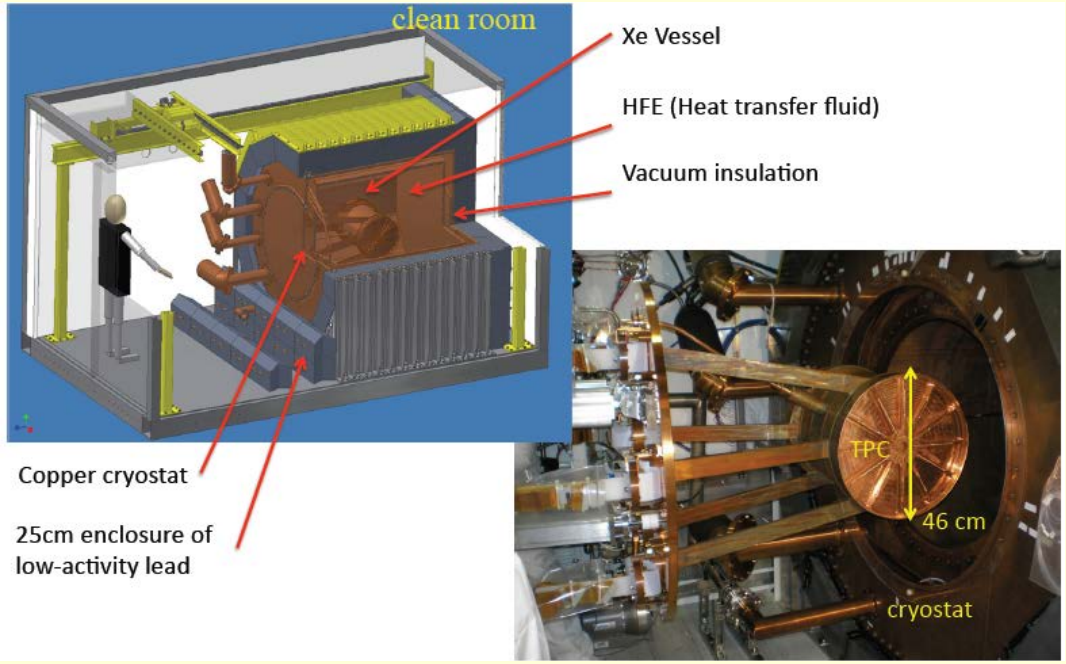
Висока енергетична роздільна здатність ~ 5-7 keV (0.3%)

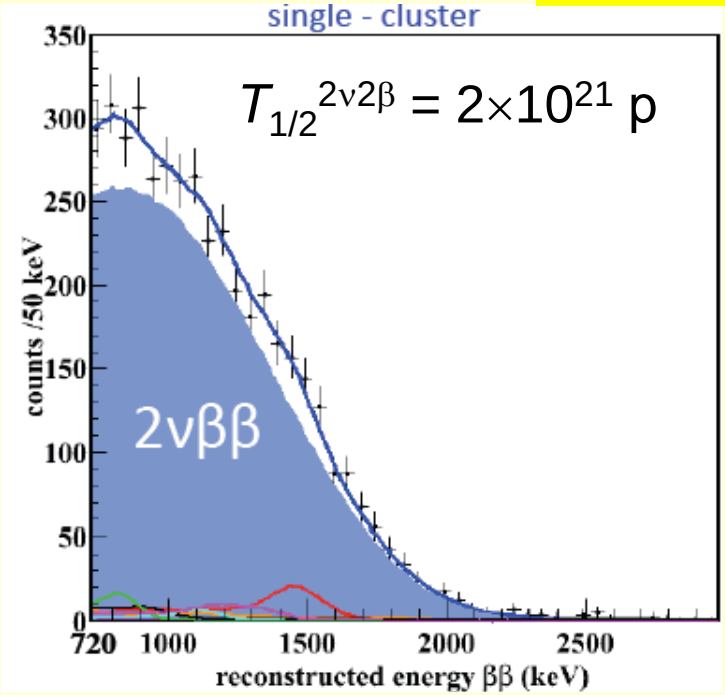
Фон від поверхневої забрудненості кристалів та оточуючих матеріалів

P.Gorla, TAUP 2011

EXO-200

^{136}Xe





Чутливість за 2 роки вимірювань $T_{1/2} \approx 6\times10^{24}$ р

$\langle m_\nu \rangle$ ~ 0.11 – 0.13 eV

Порівняно недороге збагачення, радіочисотота ^{136}Xe

Прийнятна енергетична роздільна здатність ~ 4% на енергії $Q_{\beta\beta}$

Радіоактивна забрудненість деталей установки

arXiv:1108.4193

P.Barbeau, TAUP 2011

Если

процесс будет обнаружен в экспериментах с чувствительностью

$\langle m_\nu \rangle \sim 0.05$ эВ $\Rightarrow T_{1/2} \sim 10^{26}$ лет $\Rightarrow$

- нейтрино – массивная частица Майораны $\Rightarrow$ новый тип материи
- лептонное число не сохраняется
- схема, массовых состояний – инвертированная

Sir Charles Lutwidge Dodgson (“Lewis Carroll”) “Alice's Adventures in Wonderland”

Sir John Tenniel Illustrator of Alice’s Adwentures

Чтобы определить схему массовых состояний нейтрино, достаточно *не увидеть* $0\nu2\beta$-распад с массой нейтрино

$\langle m_\nu \rangle \sim 0.01 - 0.02$ eV $\Rightarrow T_{1/2} \sim 10^{27} - 10^{28}$ yr

Важность энергетического разрешения для 2β экспериментов

«Сцинтилляционное» энергетическое разрешение (FWHM ~ 5% на энергии $Q_{\beta\beta}$) приемлемо до тех пор, пока $0\nu2\beta$-распад не наблюдается…

Для подтверждения наблюдения $0\nu2\beta$-распада необходимо высокое энергетическое разрешение

Актуальність досліджень 2ε, εβ⁺, 2β⁺

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = C_{mn}^{0\nu}\left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right)^2 + C_{m\lambda}^{0\nu}\langle\lambda\rangle\left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right) + C_{m\eta}^{0\nu}\langle\eta\rangle\left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right) + C_{\lambda\lambda}^{0\nu}\langle\lambda\rangle^2 + C_{\eta\eta}^{0\nu}\langle\eta\rangle^2 + C_{\lambda\eta}^{0\nu}\langle\lambda\rangle\langle\eta\rangle$$

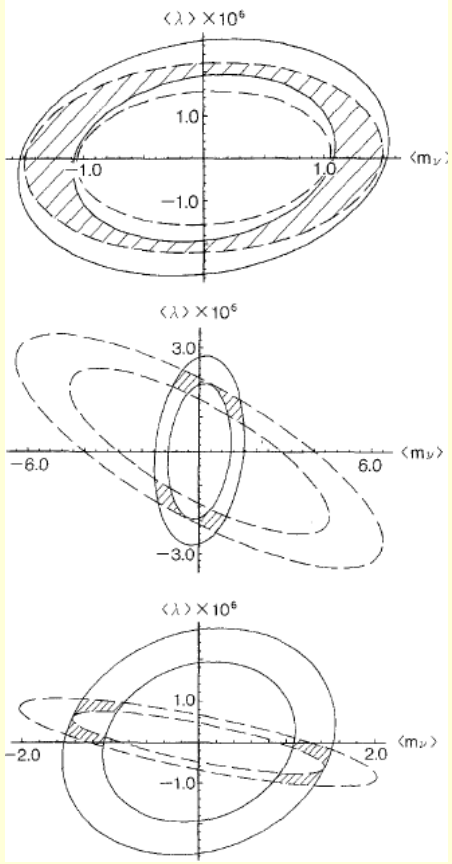
- **Можливий внесок правих токів у слабку взаємодію**

Час життя ядер відносно 0νεβ⁺ розпаду залежить від того, який механізм призводить до 0ν2β розпаду: маса нейтрино чи праві токи у слабкій взаємодії [1]

- **Можливість резонансного безнейтринного подвійного поглинання (0ν2ε)**

- **Ці канали розпаду все не спостережені:**

$$T_{1/2} > 10^{18} - 10^{21}\ \text{р}$$

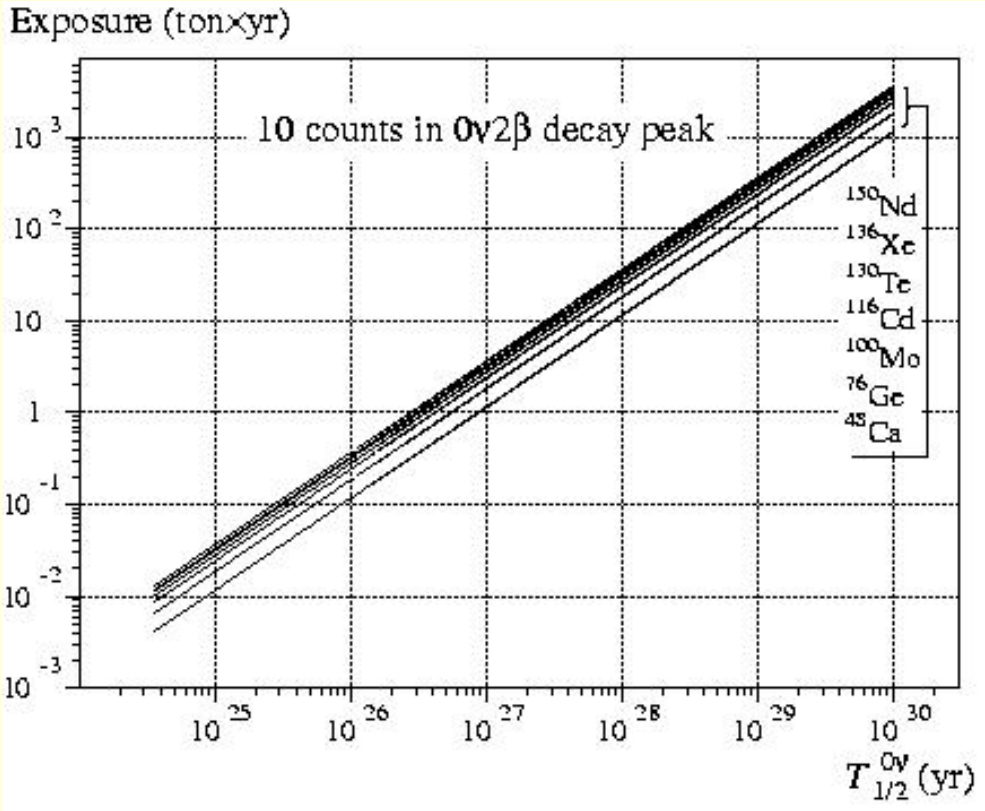


Доповідь В.В.Третяка (резонансні **0ν2ε** процеси)

[1] M. Hirsch et al., Z. Phys. A 347 (1994) 151

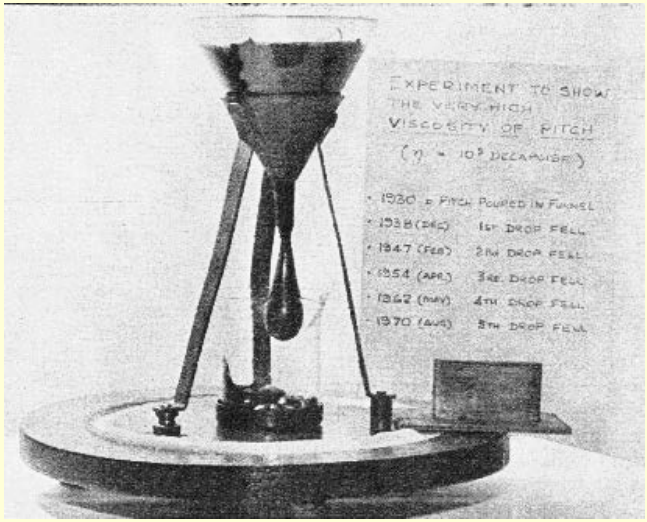
Exposition

Mass of detector 10-100 t
Time of experiments 10-30 years
Detection efficiency → 100%



Y.G. Zdesenko et al., J. Phys. G, 30 (2004) 971

The Pitch Drop experiment

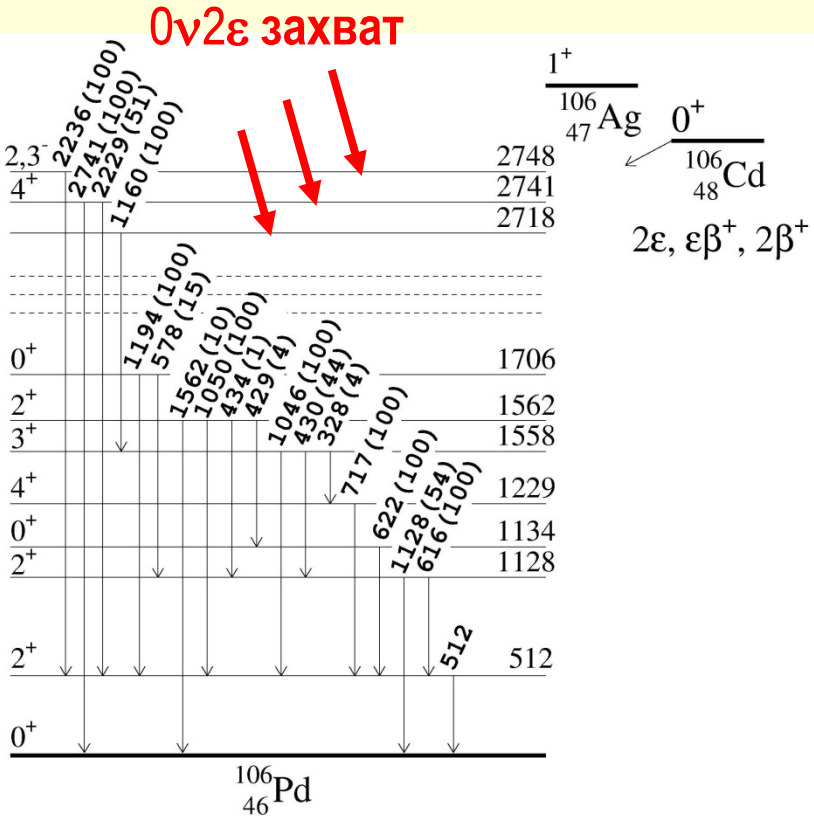


An experiment to study the viscosity of pitch

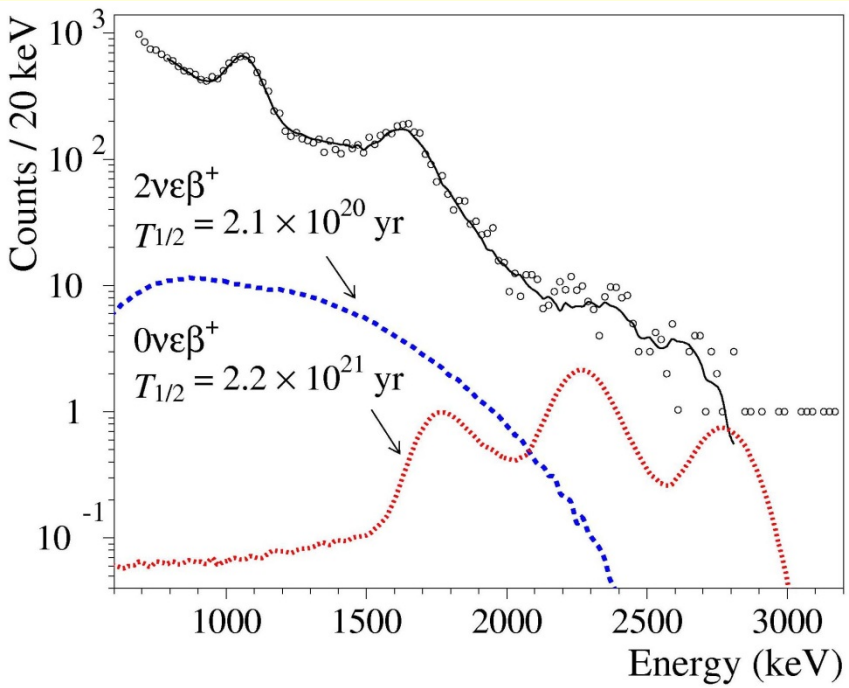
The experiment was started in 1927, the last drop fell in 2000…

Ig Nobel prize in 2005

Поиск 2β распада ^{106}Cd



6590 часов



Новые ограничения на 2β процессы в ^{106}Cd на уровне $T_{1/2} \approx 10^{19} - 10^{21}$ р

P. Belli et al., PRC 85 (2012) 044610

$ZnMoO_4$ crystal scintillators

^{100}Mo

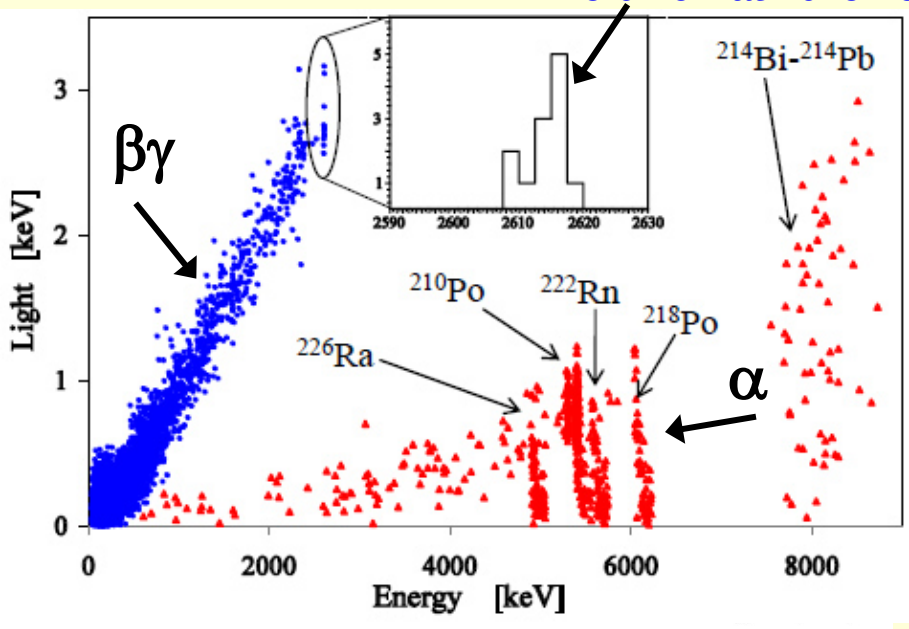
Large $ZnMoO_4$ single crystals were developed for the first time in 2008

2008 (IGP, Moscow, Russia) [1]

2009 (ISMA, Kharkiv, Ukraine) [2,3]

2010 Low-Thermal-Gradient Czochralski (NIIC, Novosibirsk, Russia) [4]

FWHM = 5.6 keV at 2615 keV



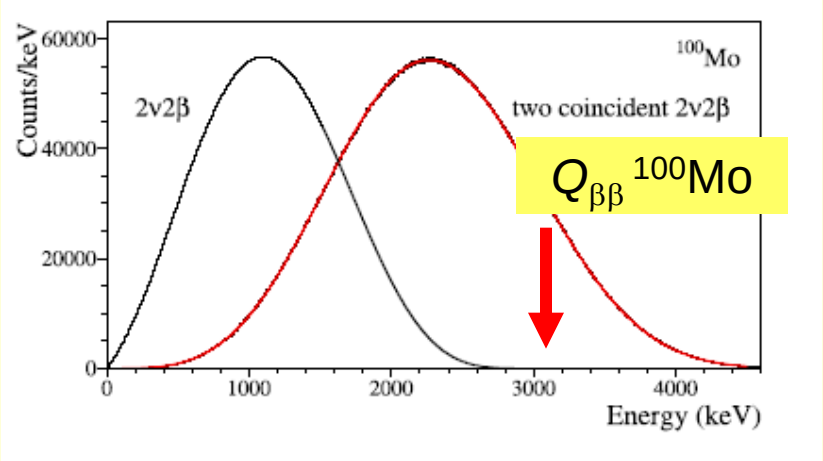
[3] L. Gironi *et al.*, JINST 5 (2010) 11007

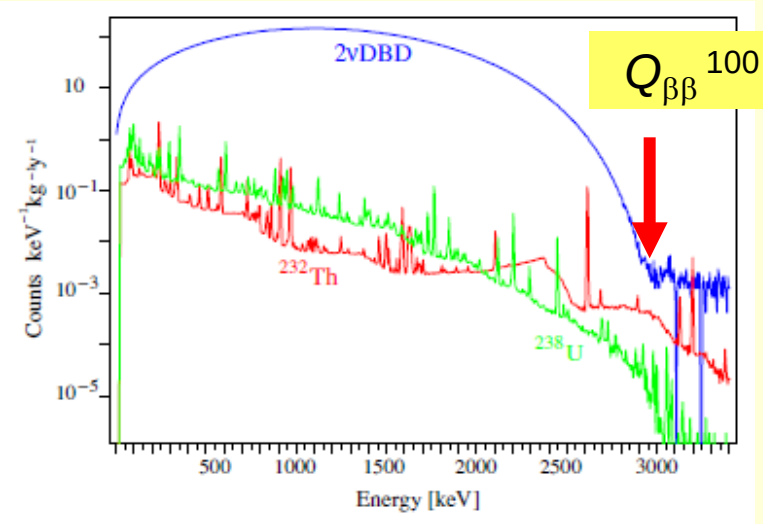
[1] Ll. Ivleva *et al.*, Crystallography Reports, 2008, Vol. 53, No. 6, pp. 1087

[2] L.L. Nagornaya, *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (2009) 2513

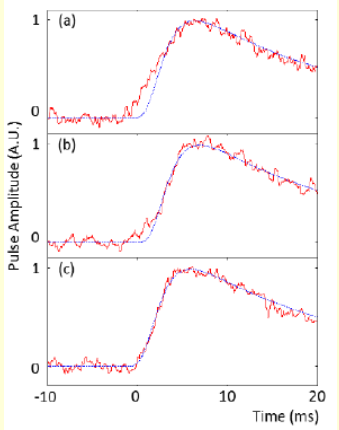
[4] J.W. Beeman *et al.*, J. Beeman et al., PLB 710(2012)318

Случайные совпадения событий 2ν2β распада являются основным источником фона в криогенном 0ν2β эксперименте с ^{100}Mo [1]





Основные источники фона в опыте с $ZnMoO_4$ [2]



Анализ формы случайно совпадающих сигналов

[1] Eur. Phys. J. C 72(2012)1989
[2] APP 35 (2012) 813