

Масса нейтрино: прямые измерения и двойной бета-распад

А.С. Барабаш

НИЦ “Курчатовский институт”, Москва

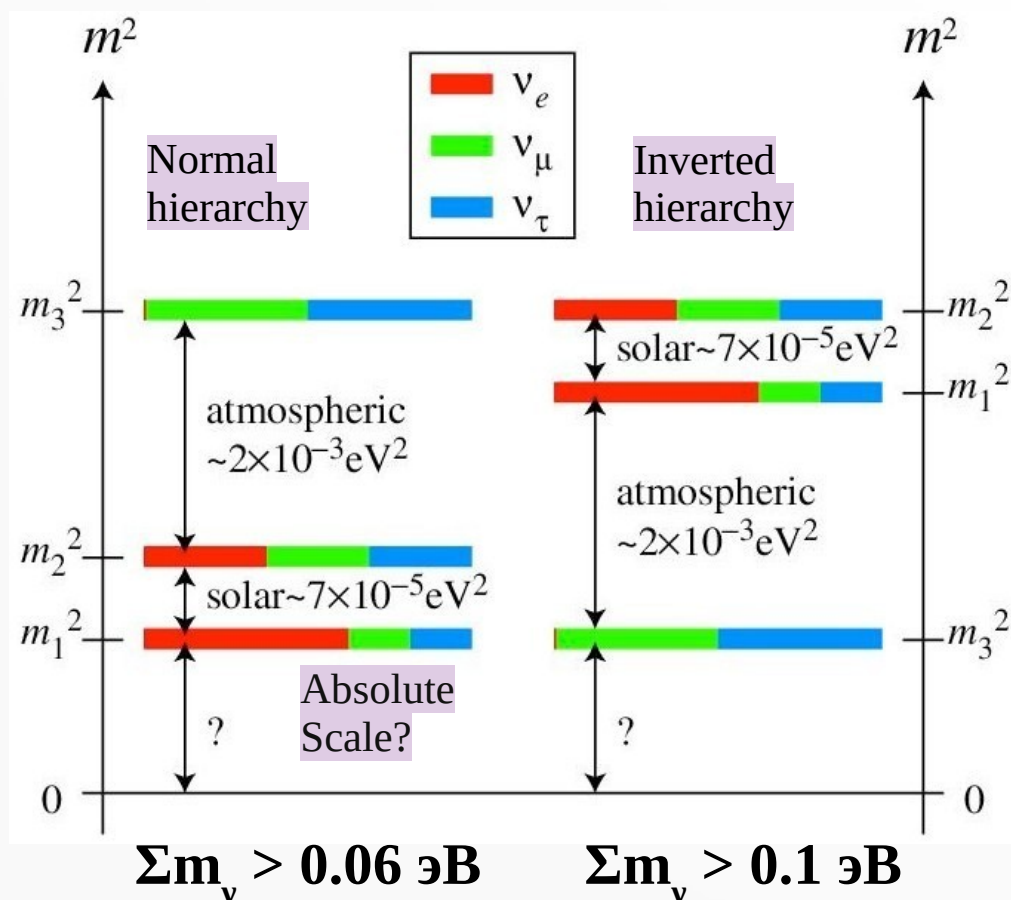
Сессия РАН, 17-21 февраля, 2025 г.

План доклада

- **Введение**
- **Прямые эксперименты по измерению массы нейтрино**
- **Двойной бета-распад**
- **Заключение**

I. Введение

Осцилляционные эксперименты:



Что необходимо прояснить:

1. Иерархия масс (нормальная или обратная)?
2. Абсолютная шкала масс (масса самого легкого нейтрино?)
3. Природа массы нейтрино (дираковская или майорановская?)
4. CP нарушающие фазы в матрице смешивания

Определение массы нейтрино

- Космологические ограничения:

$\Sigma m_\nu < 0.072$ эВ (CMB + DESI) → это прямое указание на «нормальную» иерархию

(модельно зависимо)

- Прямое измерение массы

$\langle m_\beta \rangle < 0.45$ эВ (KATRIN)

(модельно независимо)

- Безнейтринный двойной бета-распад

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.12$ эВ (KamLAND-Zen)

$$m_\beta = \sqrt{\sum_i |U_{ei}^2| m_i^2}$$

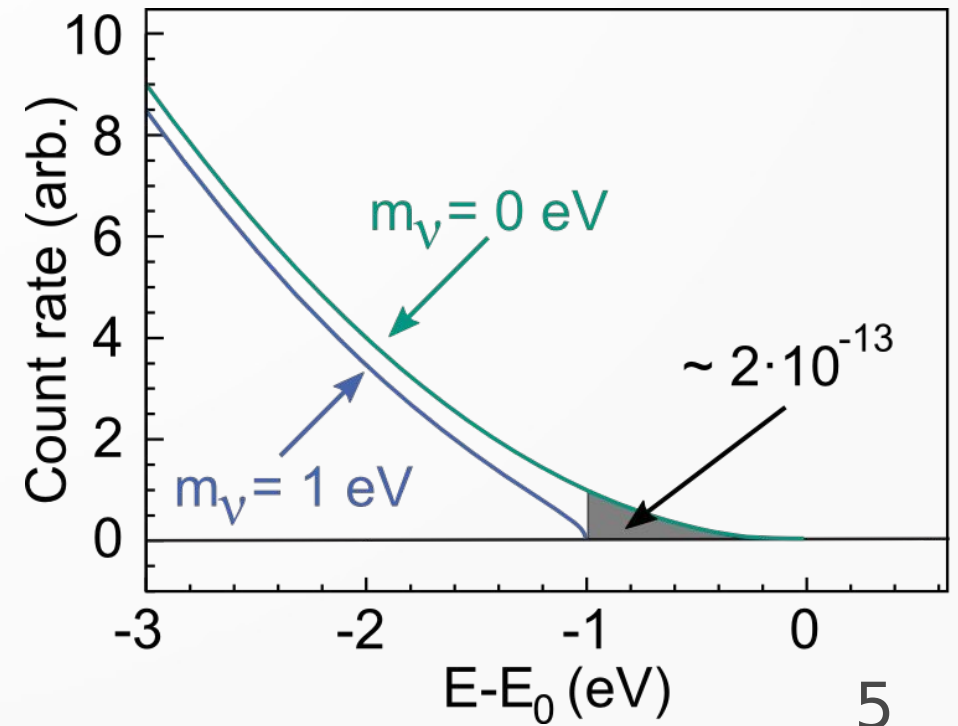
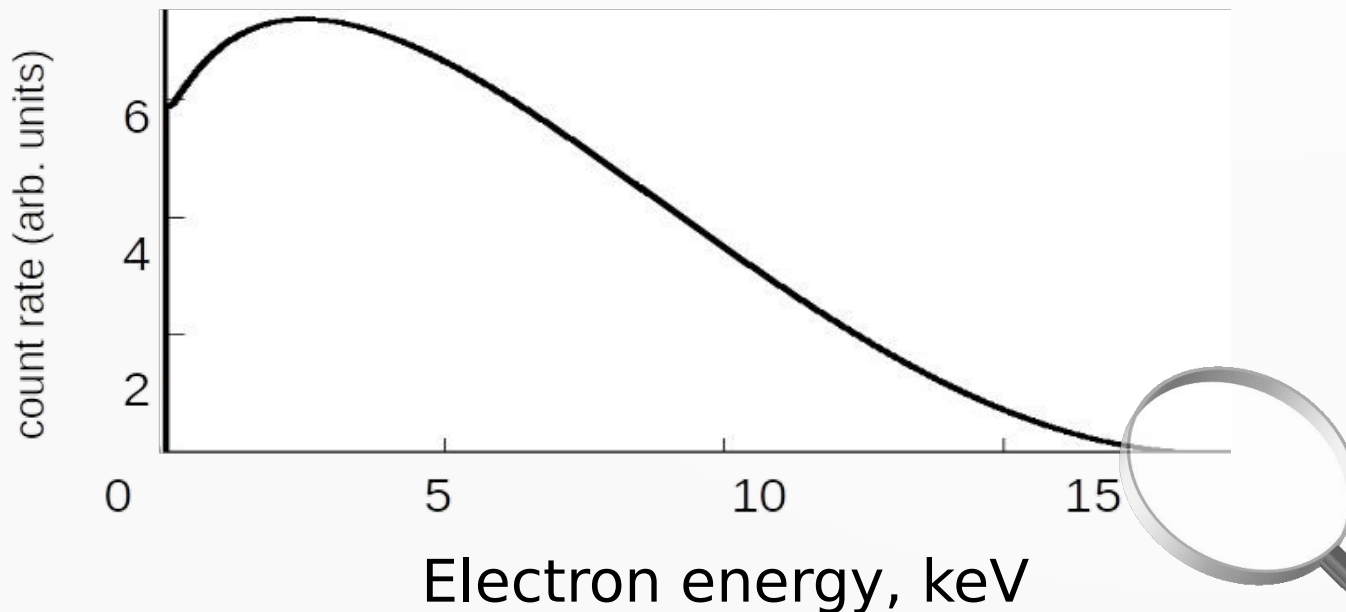
(модельно зависимо)

II. Эксперименты по прямому измерению массы нейтрино

Еще в 1934 г. Энрико Ферми предложил исследовать конечную точку бета спектра для получения информации о массе нейтрино

$$R_\beta(E) \propto (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2}$$

$$m_\nu \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\sum_{i=1}^3 |U_{ei}|^2 \cdot m_i^2}$$



Исследуемые изотопы

- **Тритий (^3H), β^-**

$$E_0 = 18592.01 (7) \text{ эВ}, T_{1/2} = 12.3 \text{ лет}$$

- **Рений (^{187}Rn), β^-**

$$E_0 = 2470.9 (13) \text{ эВ}, T_{1/2} = 4.3 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

- **Гольмий (^{163}Ho), EC**

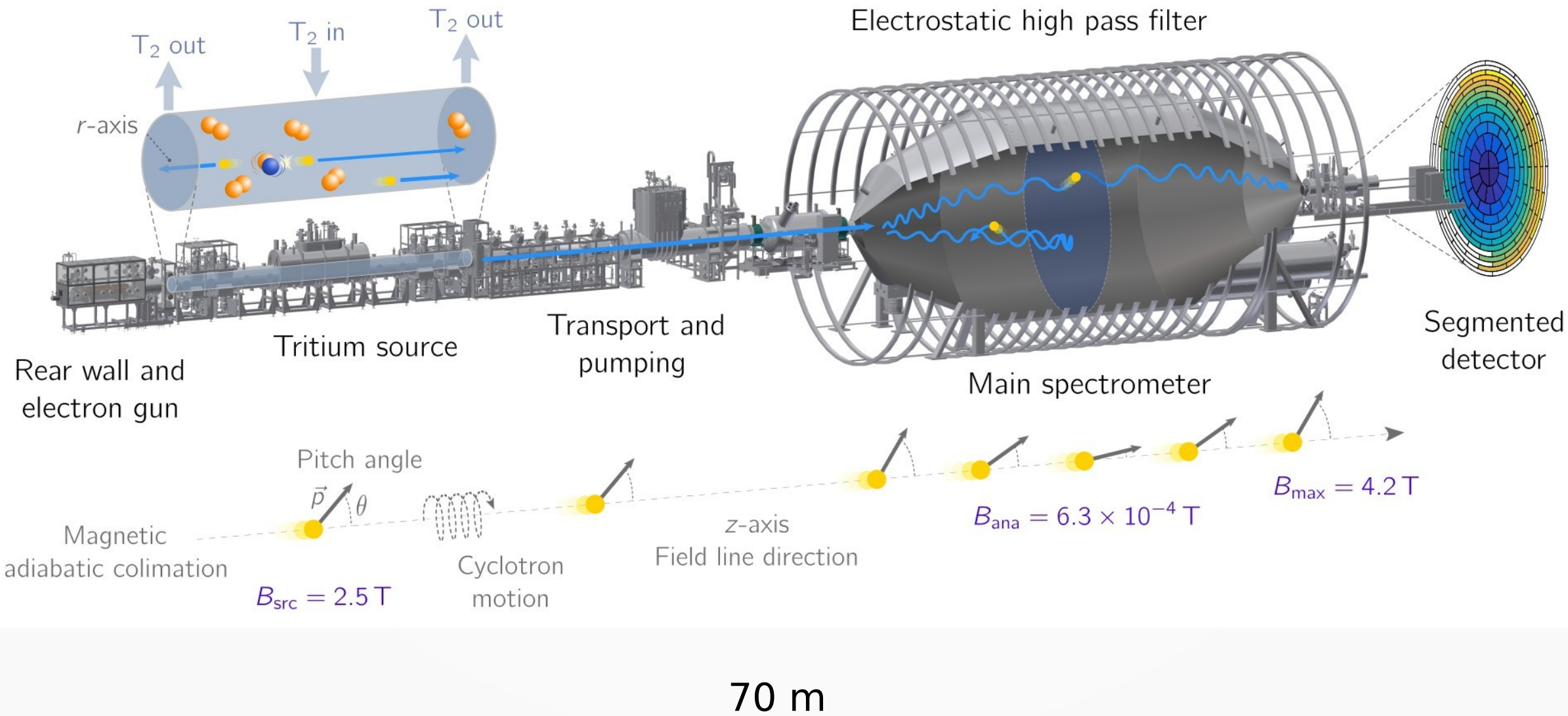
$$E_0 = 2863.2 (6) \text{ эВ}, T_{1/2} = 4570 \text{ лет}$$

Эксперимент KATRIN

KATRIN:
Karlsruhe
Tritium
Neutrino
Experiment

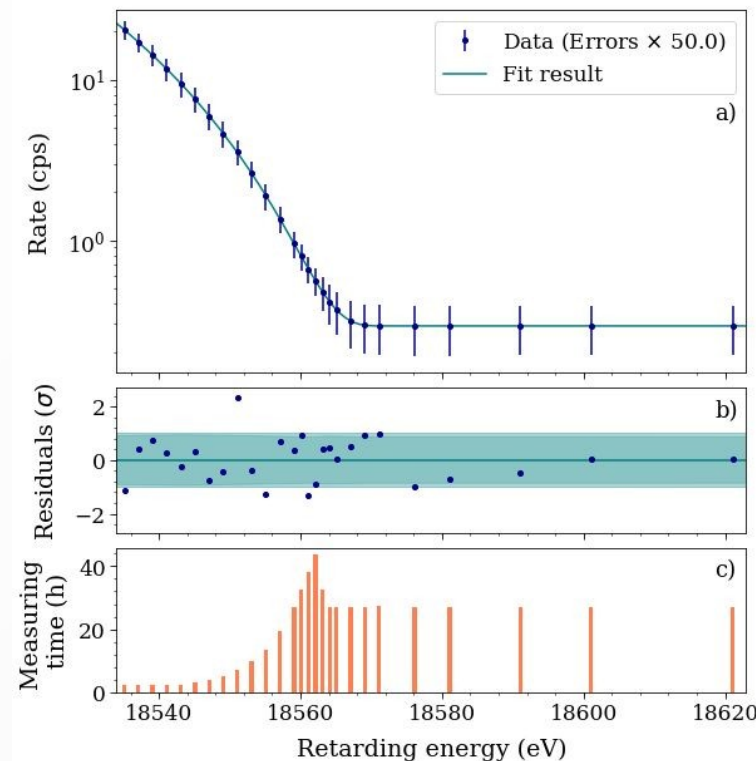
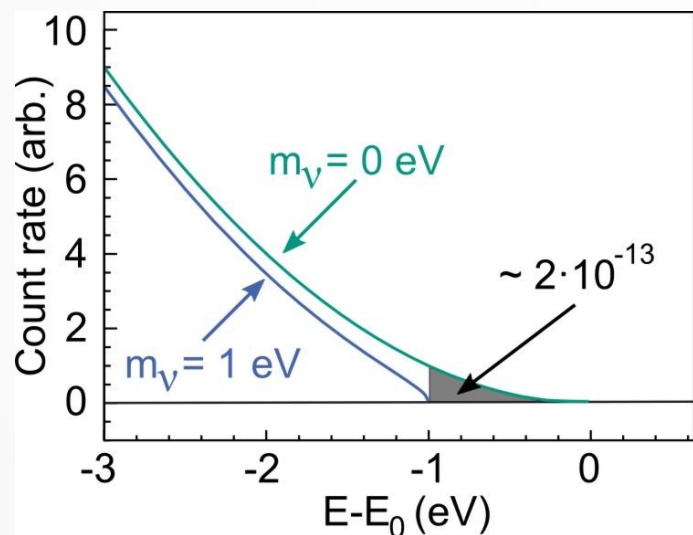


Эксперимент КАТРИН

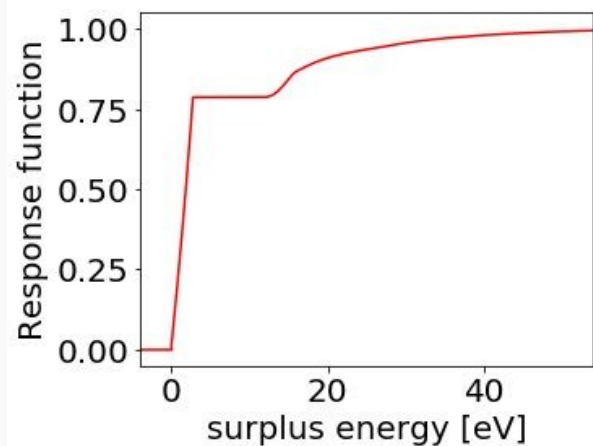


Эксперимент КАТРИН

Beta spectrum: $R_\beta(E; m^2(\nu_e), E_0)$



Experimental response: $f(E - qU)$

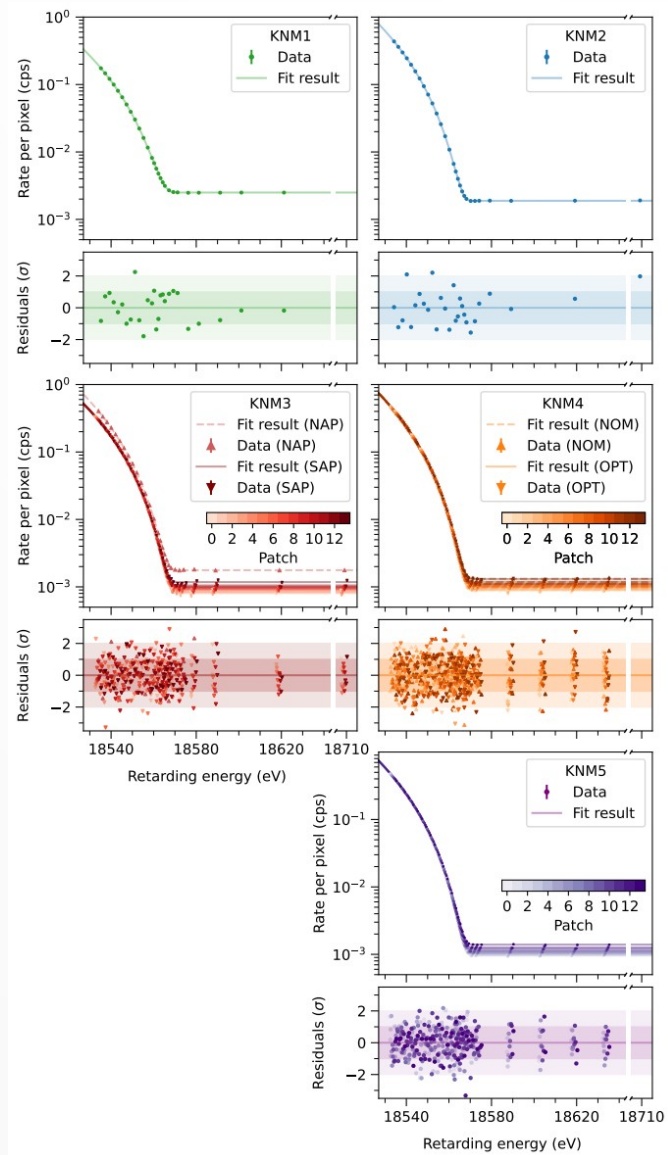


Calibration with electron gun and ^{83m}Kr conversion electrons

$$R(qU) = A \cdot \int_{qU}^{E_0} R_\beta(E; m_\nu^2, E_0) \cdot f(qU, E) dE + R_{bg}$$

- 2-3 hour scans, O(100) scans per campaign
- Stack data points with the same measurement conditions
- Analysis window: $[E_0 - 40 \text{ eV}, E_0 + 135 \text{ eV}]$

KATRIN spectra



Последние результаты (259 дней измерений за 5 компаний)

259 дней измерений (март 2019 - июнь 2021)

1757 β -сканов (**36 миллионов** зарегистрированных электронов)

Калибровочные измерения с ^{83m}Kr и электронной пушкой

Сдвинутый “анализирующий” электрод (подавление фона ~ **в 2 раза**)

$$m_{\nu}^2 = -0.14_{-0.15}^{+0.13} \text{ eV}^2 \quad \rightarrow \quad m_{\nu} < 0.45 \text{ eV (90 \% CL)}$$

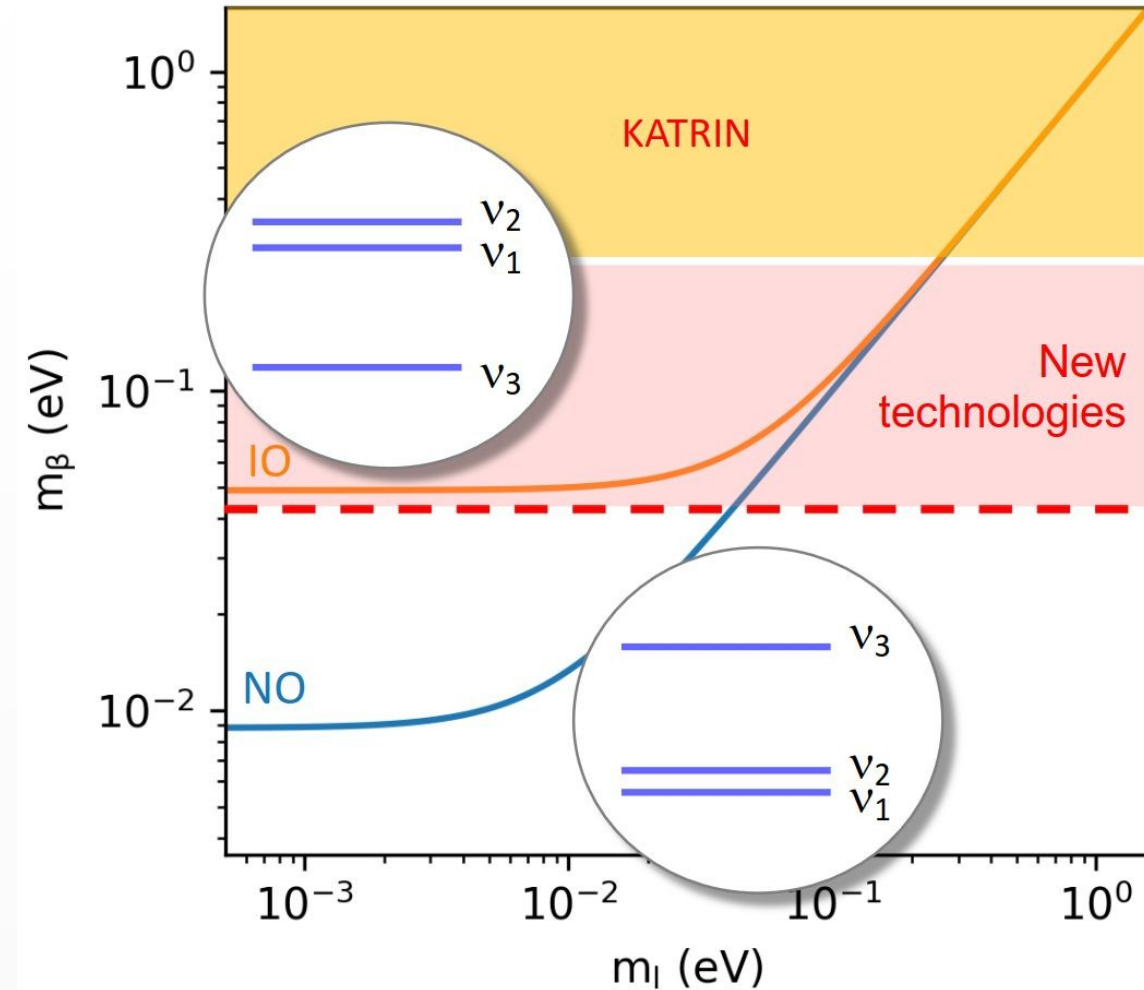
Q value: $(18575.0 \pm 0.3) \text{ eV}$

(Lokhov-Tkachev method)

$(18575.78 \pm 0.02) \text{ eV []}$

Планы на будущее

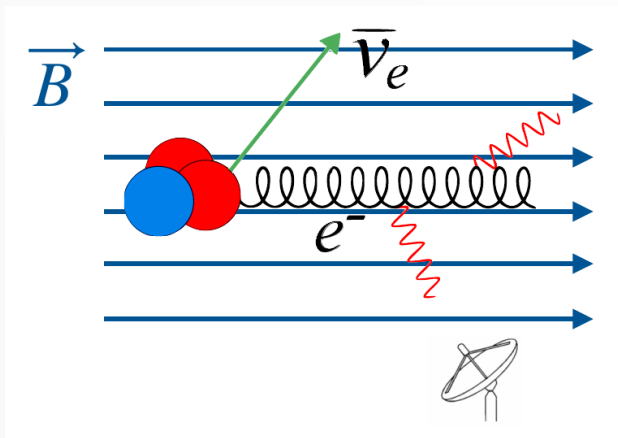
- Набрать **1000** дней измерений до конца **2025 г.** → **< 0.3 эВ**
- **2026-2027** – поиск стерильных нейтрино (TRISTAN+KATRIN)
- **2027-2035** - R&D по созданию **KATRIN++** → **0.045 эВ**
- (атомарный тритий, снижение фона, дифференциальный метод измерения энергии электронов, новые детекторы, ...)



Project 8

(3H)

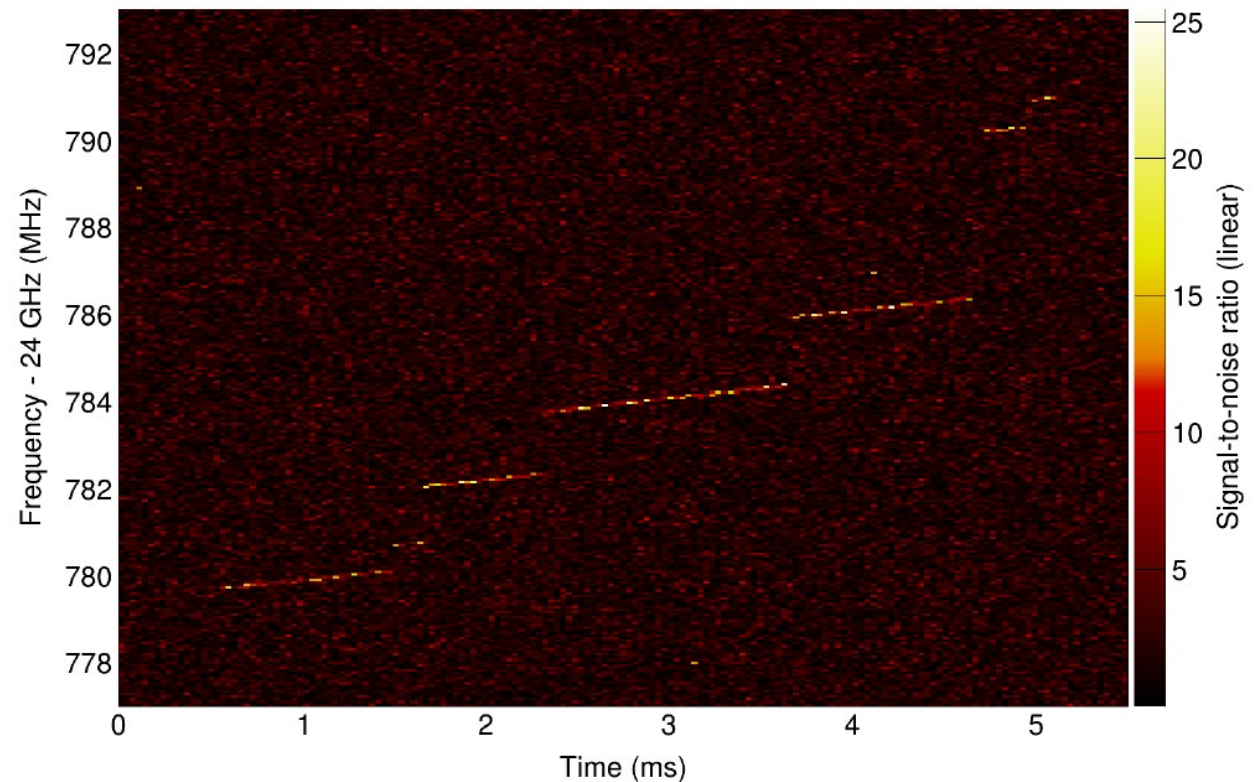
Новый метод: Cyclotron Radiation Emission Spectroscopy (CRES)



B. Monreal and J.A. Formaggio,
Phys. Rev. D 80, 051301 (2009)

$$2\pi f(E_\beta) = \frac{eB}{E_\beta + m_e} = \frac{eB}{\gamma m_e}$$

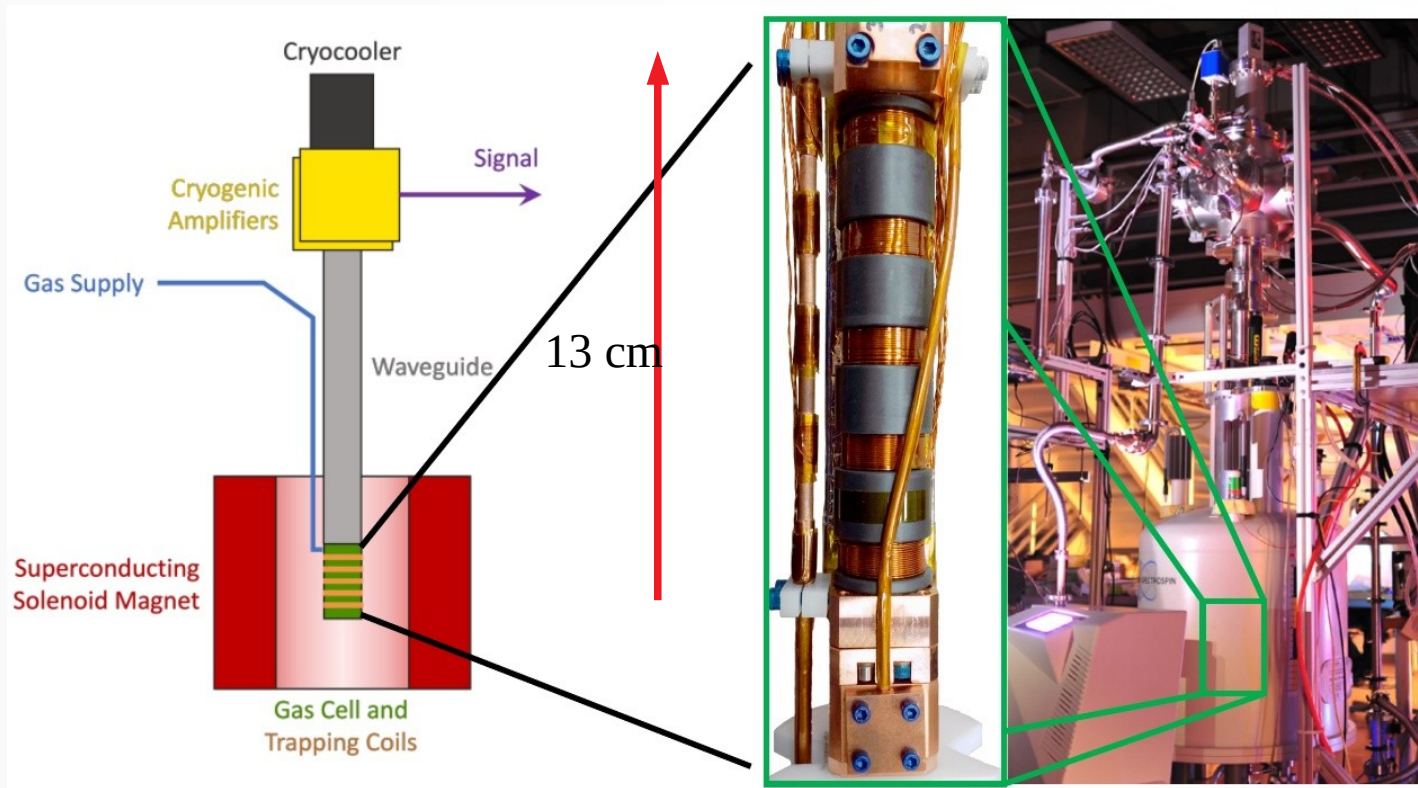
Энергетическое разрешение $\frac{\Delta E}{m_e} = \frac{\Delta f}{f}$



PRL 114 (2015) 162501

C ^{83m}Kr ΔE (FWHM) = 1.7 эВ

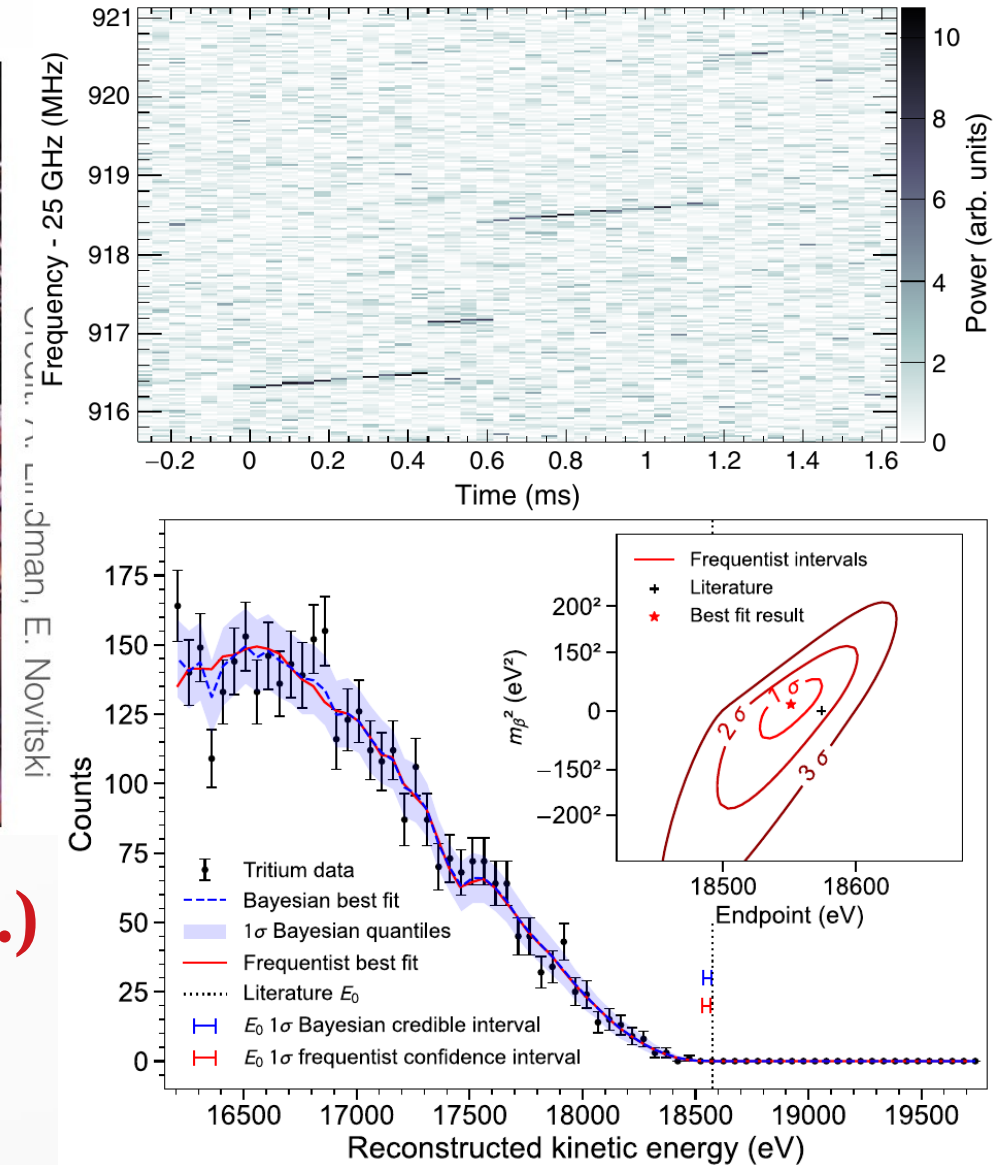
Project 8, Phase II



82 дня измерений $\rightarrow m_\nu < 152$ эВ (90% C.L.)

(0 событий для $E > Q$)

PRL 131 (2023) 102502, PRC 109 (2024) 035503



Project 8. Phase III and IV

- Phase III (в стадии реализации):

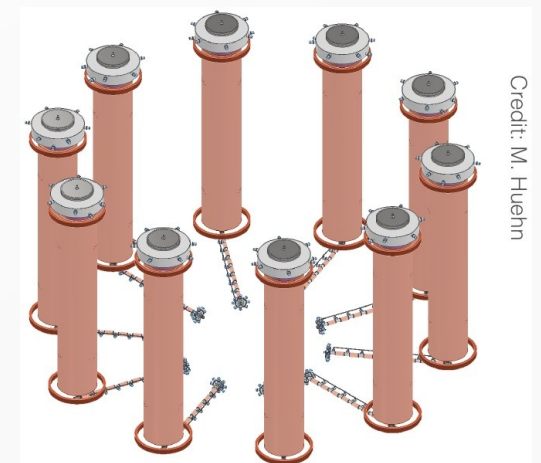
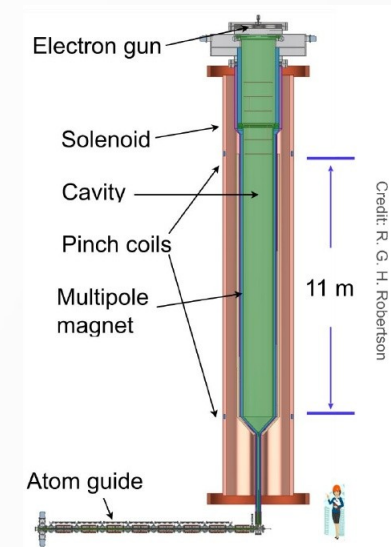
CRES + T₂ (либо атомы трития)

Цель: $m_\nu < 0.2$ эВ

- Phase IV (x10 Phase III)

CRESS + T

Цель: $m_\nu < 0.04$ эВ



Другие предложения с тритием

- **QTNM — Quantum Technologies for Neutrino Mass**

(атомарный источник трития, высокое разрешение, высокоэффективный CRES, карта магнитного поля с точностью < 1 микроТ, ...)

Демонстратор — 2025 г.

Цель: $m_\nu \sim 0.01-0.05$ эВ (2030-2040 г.г.)

- **PTOLEMY**

Основная цель — регистрация

реликтовых нейтрино: $\nu_e + {}^3\text{T} \rightarrow {}^3\text{He} + e^-$

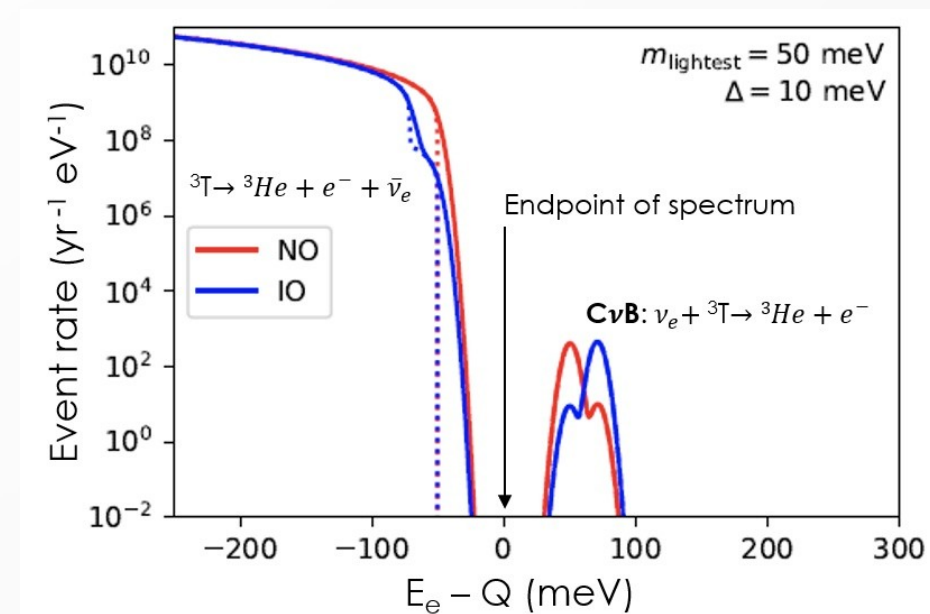
(атомарный источник, CRES, фильтры,

микрокалориметры — везде R&D)

2025 г. - полномасштабный прототип в

Гран Сассо (Италия)

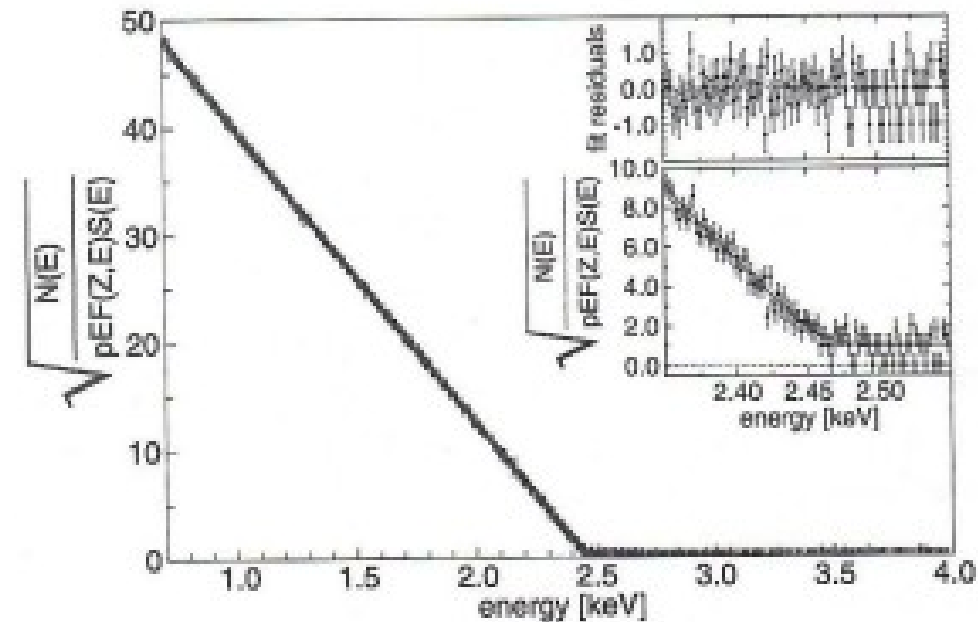
$m_\nu \sim 0.1$ эВ (~ 2030 г. с 1 микрограммом трития)



Для 100 г трития

Эксперименты с Re-187

- **^{187}Re** : $E_0 = 2470.9 (13) \text{ эВ}$, $T_{1/2} = 4.3 \cdot 10^{10} \text{ лет}$, распространенность – 63%
- Микро-калориметры [на основе кристаллов из металлического **Re (1.5 mg)** или из **AgReO₄ (0.25x8 \approx 2.2 mg)**]
- Mibeta и MANU: **< 15 эВ** и **< 26 эВ** (2004 г.)
- MARE-1, MARE-2: планировалось довести чувствительность до **$\sim 2\text{-}3 \text{ эВ}$** ($\sim 5 \cdot 10^4$ отдельных кристаллов) и, в дальнейшем, до **$\sim 0.2 \text{ эВ}$** .
- Последние ~ 8 лет активности в этом направлении нет



Эксперименты с ^{163}Ho (электронный захват)



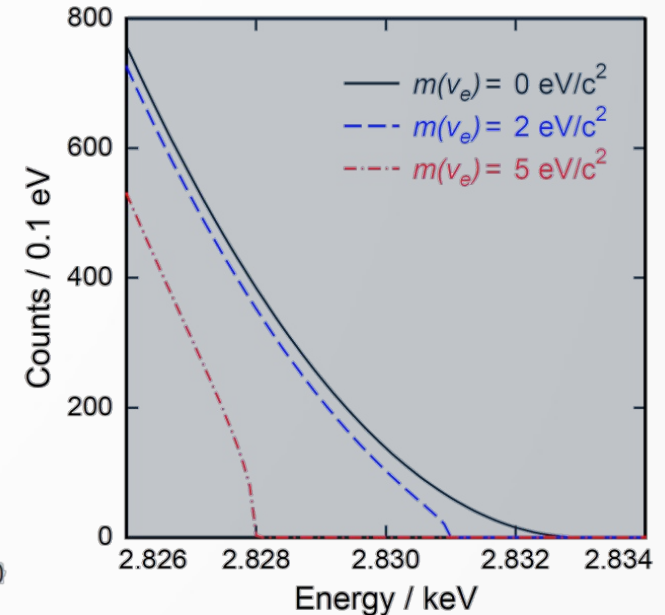
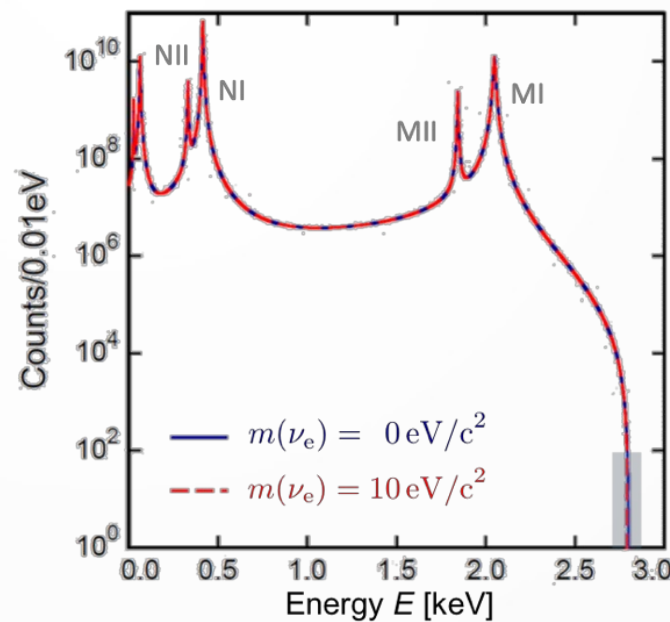
Источник = детектор

(измерение E_c калориметром)

- $Q = (2863.2 \pm 0.6) \text{ эВ}$
- $T_{1/2} = 4570 \text{ лет}$
- Первые эксперименты в **1984-1987 г.г.** ($m_\nu < 225 \text{ эВ}$). После **2010** **новый всплеск интереса**

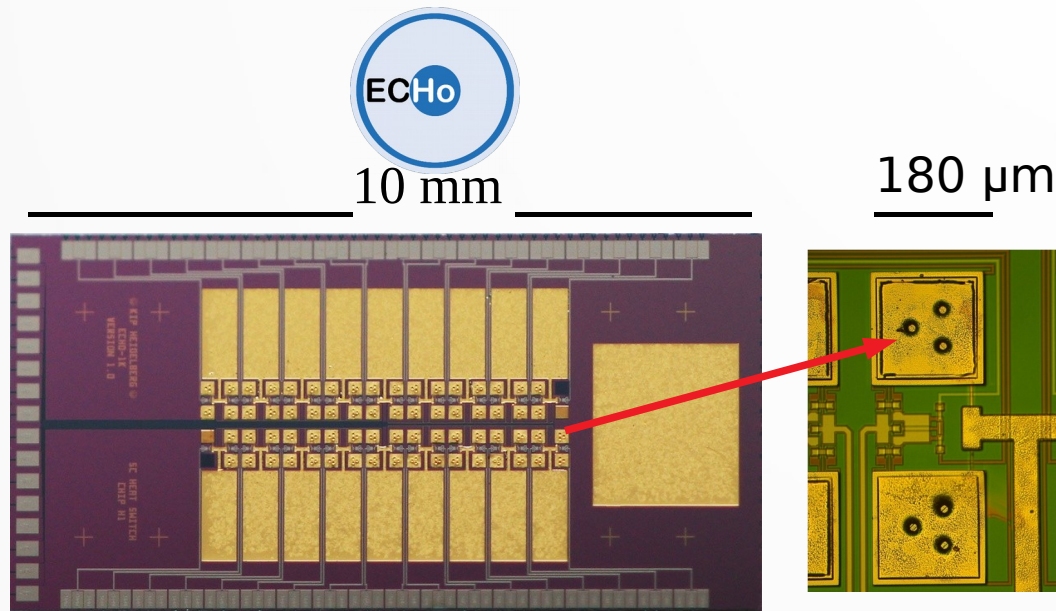
A. De Rujula, Nucl.Phys. B 188 (1981) 414.

A. De Rujula and M. Lusignoli, Phys. Lett. B 118 (1982) 429



Эксперименты ECHo и HOLMES

Метод: низкотемпературные калориметры с имплантированным ^{163}Ho и с возможностью масштабирования для достижения чувствительности ~ 0.1 эВ.



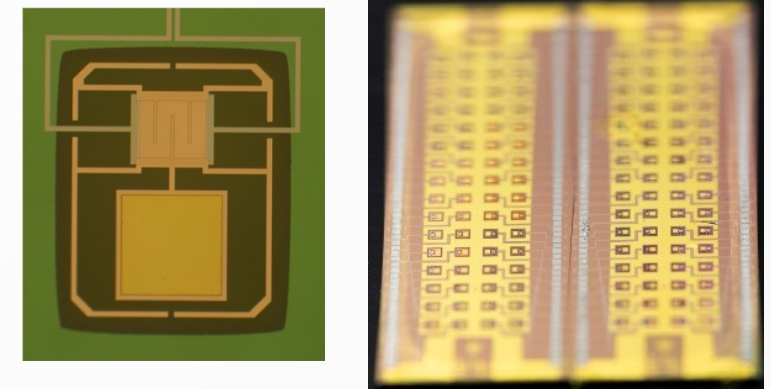
ECHo-1k

ECHo-100k

Magnetic Metallic
Calorimeters MMCs
60-100 детекторов
1-5 Бк(^{163}Ho)/детектор
 $\Delta E_{\text{FWHM}} < 10$ эВ
 $\rightarrow m_{\nu} \approx 20$ эВ

MMCs
12000 детекторов
10 Бк(^{163}Ho)/детектор
 $\Delta E_{\text{FWHM}} < 5$ эВ
 $\rightarrow m_{\nu} \approx 1.5$ эВ

HOLMES



200 μm

Transition Edges Sensors TESs
1000 detectors
300 Bq(^{163}Ho)/pixel
 $\Delta E_{\text{FWHM}} \approx 1$ эВ
 $\rightarrow m_{\nu} \approx 2$ эВ

Последние результаты ЕСНО и HOLMES

- ЕСНО-1к ($1.26 \cdot 10^8$ распадов):

$$m_\nu < 19 \text{ эВ}$$

$$Q = (2862.1 \pm 1.7) \text{ эВ}$$

- HOLMES (52 детектора, $7 \cdot 10^7$ распадов):

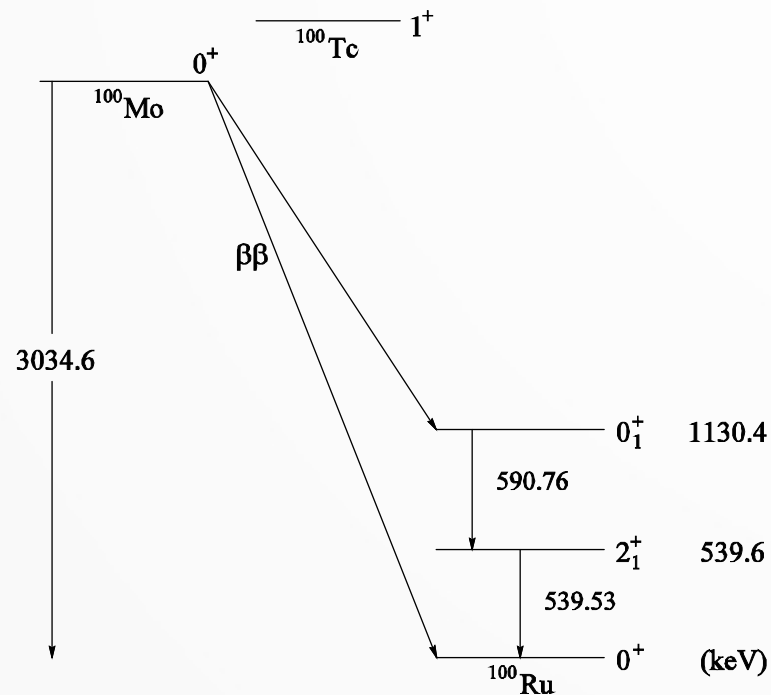
$$m_\nu < 28 \text{ эВ}$$

$$Q = 2848^{+11}_{-6} \text{ эВ}$$

- Sub-eV эксперимент \rightarrow **0.1-0.2 эВ** (10 лет измерений) \rightarrow создается коллаборация (ЕСНО, HOLMES, BeEST, NIST, LANL,...)



II. Двойной бета-распад



$$Q_{\beta\beta} = 3.033 \text{ MeV}$$

Впервые был рассмотрен в 1939 г. -
W.H. Furry, Phys. Rev. 56 (1939) 1184



35 кандидатов:

$$W \sim Q^5 (0\nu); W \sim Q^7 (0\nu\chi^0)$$

$$W \sim Q^{11} (2\nu)$$

Чем интересны эксперименты по 2β -распаду? \Rightarrow

- Несохранение лептонного числа ($\Delta L=2$)
- Природа массы нейтрино (**Dirac or Majorana?**).
- Абсолютная шкала масс (величина или предел на m_1).
- Тип иерархии (нормальная, обратная).
- **CP** нарушение в лептонном секторе.

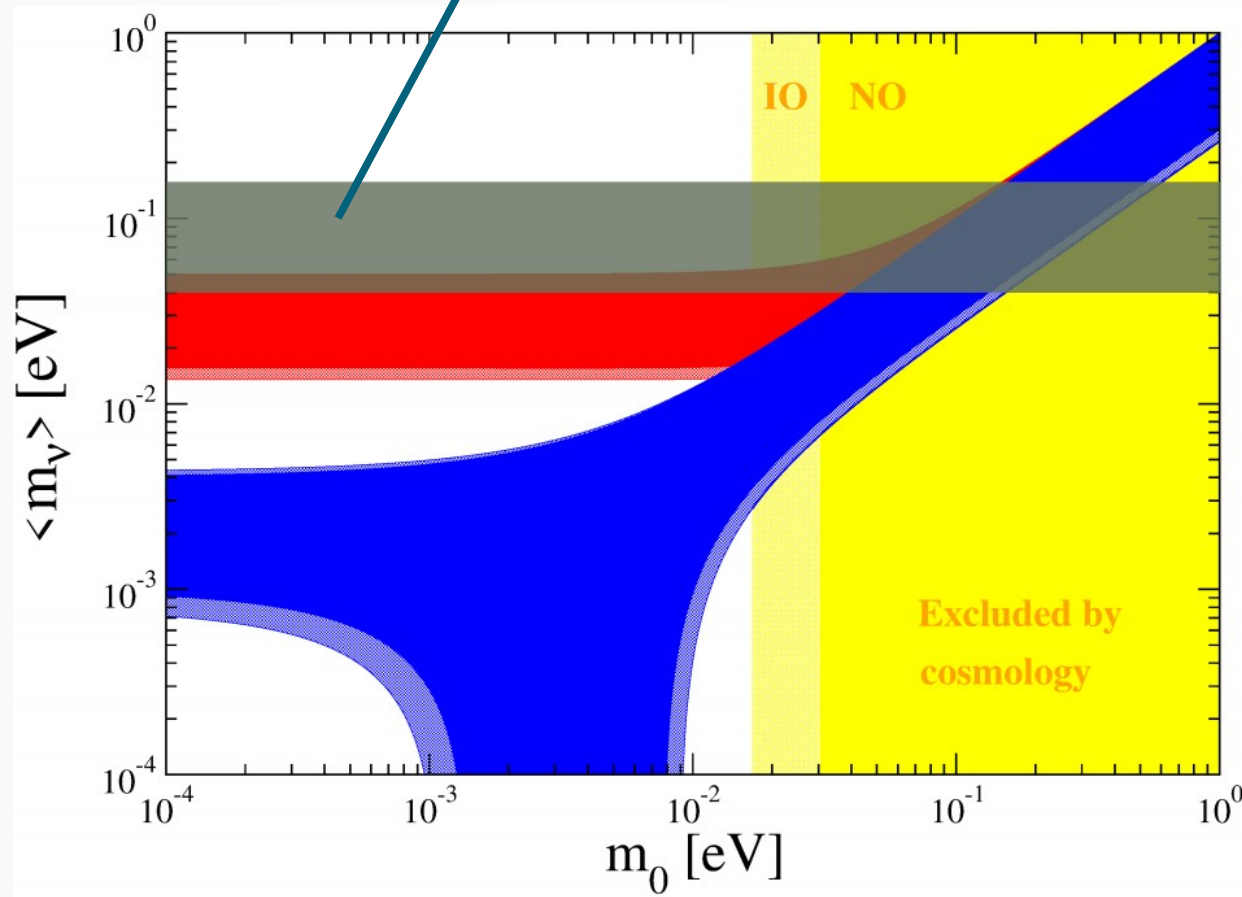
Лучшие современные пределы на $\langle m_\nu \rangle$

Ядро	$T_{1/2}$, лет; 90% CL	$\langle m_\nu \rangle$, эВ	Эксперимент
^{136}Xe	$> 3.8 \cdot 10^{26}$	$< 0.028-0.122$	KamLAND-Zen
^{76}Ge	$> 1.9 \cdot 10^{26}$	$< 0.077-0.175$	GERDA+Majorana + LEGEND-200
^{130}Te	$> 3.8 \cdot 10^{25}$	$< 0.07-0.240$	CUORE
^{82}Se	$> 4.64 \cdot 10^{24}$	$< 0.263-0.545$	CUPID-0/Se
^{100}Mo	$> 3.0 \cdot 10^{24}$	$< 0.21-0.61$	AMoRE-I

Консервативный предел: $\langle m_\nu \rangle < 0.12 \text{ eV}$

Двойной бета-распад и порядок нейтринных масс

KamLAND-Zen 2β



Inverted ordering (IO):

$$\langle m_\nu \rangle = 14-50 \text{ meV}$$

(Будет проверено в 2β -экспериментах следующего поколения)

Normal ordering (NO):

$$\langle m_\nu \rangle = 0-30 \text{ meV}$$

Предельный случай $\rightarrow \langle m_\nu \rangle = 1-4 \text{ meV}$

$$\beta: \langle m_\nu \rangle < 0.45 \text{ eV (KATRIN)}$$

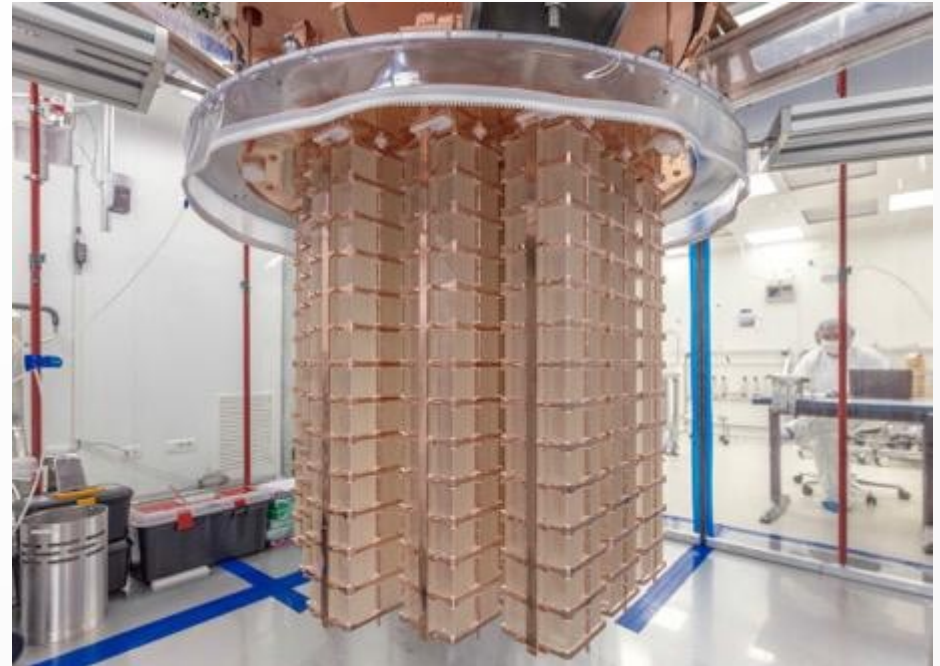
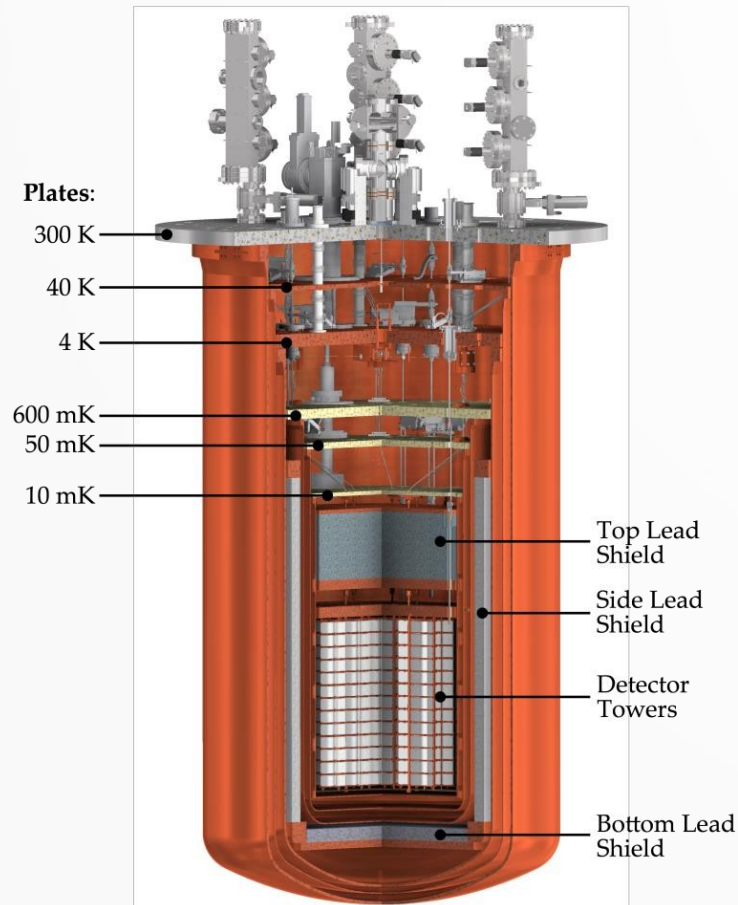
$$2\beta: \langle m_\nu \rangle < 0.12 \text{ eV}$$

$$\Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV (PLANCK'2018)}$$

$$[\Sigma m_\nu < 0.072 \text{ eV (CMB + DESI)}]$$

Глобальный анализ - NO ($3-3.5\sigma$); NO - $\Sigma m_\nu > 0.06 \text{ eV}$, IO - $\Sigma m_\nu > 0.1 \text{ eV}$

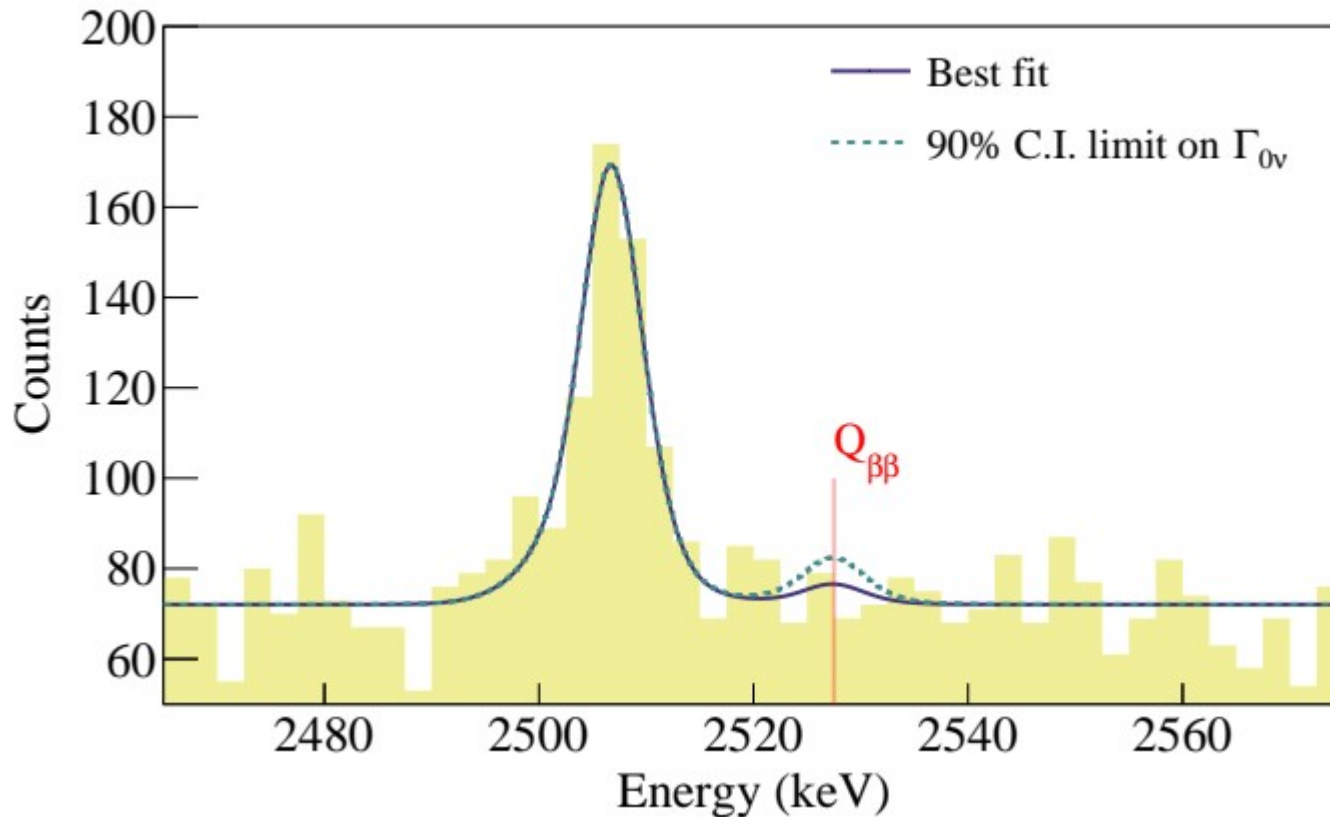
Current experiments: 1. CUORE (Gran Sasso, Italy)



988 TeO₂ crystals
741 kg (206 kg ¹³⁰Te)
T = 10 mK

Start of measurements - 2017

Recent CUORE result



Data: 2039.0 kg·yr TeO₂
(567.0 kg·yr ¹³⁰Te)

$B = (1.42 \pm 0.02) \cdot 10^{-2} \text{ c/keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{yr}$

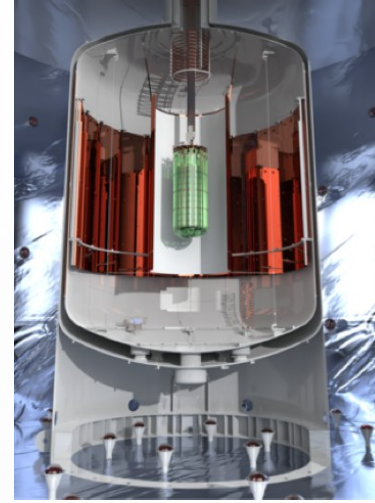
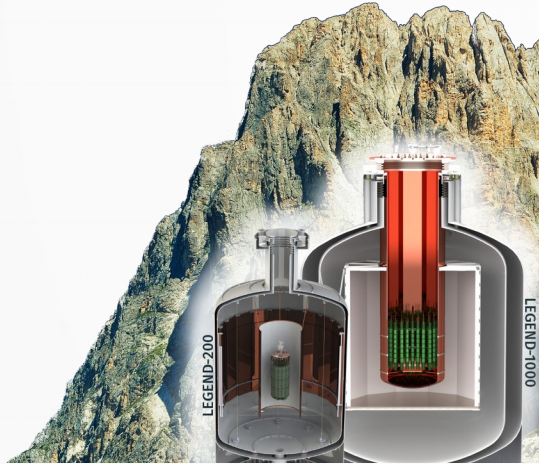
$\Delta E = (7.540 \pm 0.024) \text{ keV}$ at 2615 keV line

$$T_{1/2}(0\nu) > 3.8 \cdot 10^{25} \text{ yr}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 70\text{-}240 \text{ meV}$$

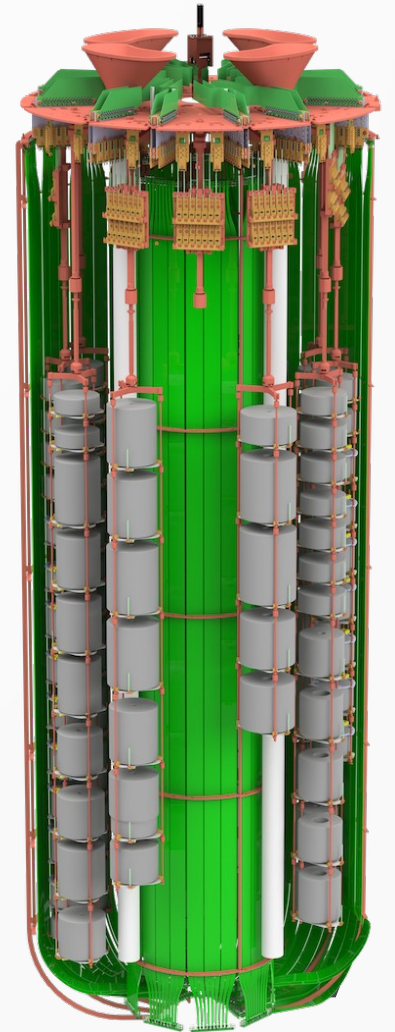
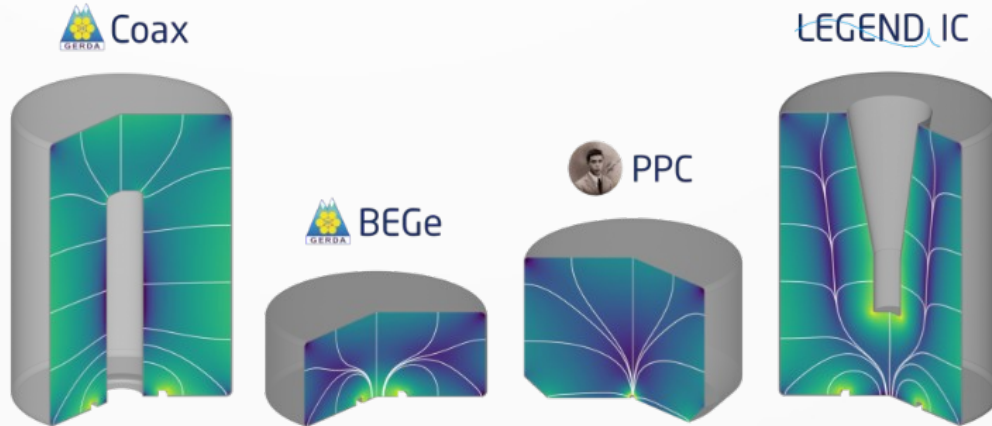
$$T_{1/2}(2\nu) = 9.323^{+0.052}_{-0.037} \cdot 10^{20} \text{ yr}$$

Current experiments: 2. LEGEND-200 (Gran Sasso, Italy)



Installed first **142 kg**
of HPGe detectors
(**130 kg** operational)

Finally it will be **~ 200 kg**
of HPGe detectors



LEGEND-200: first result

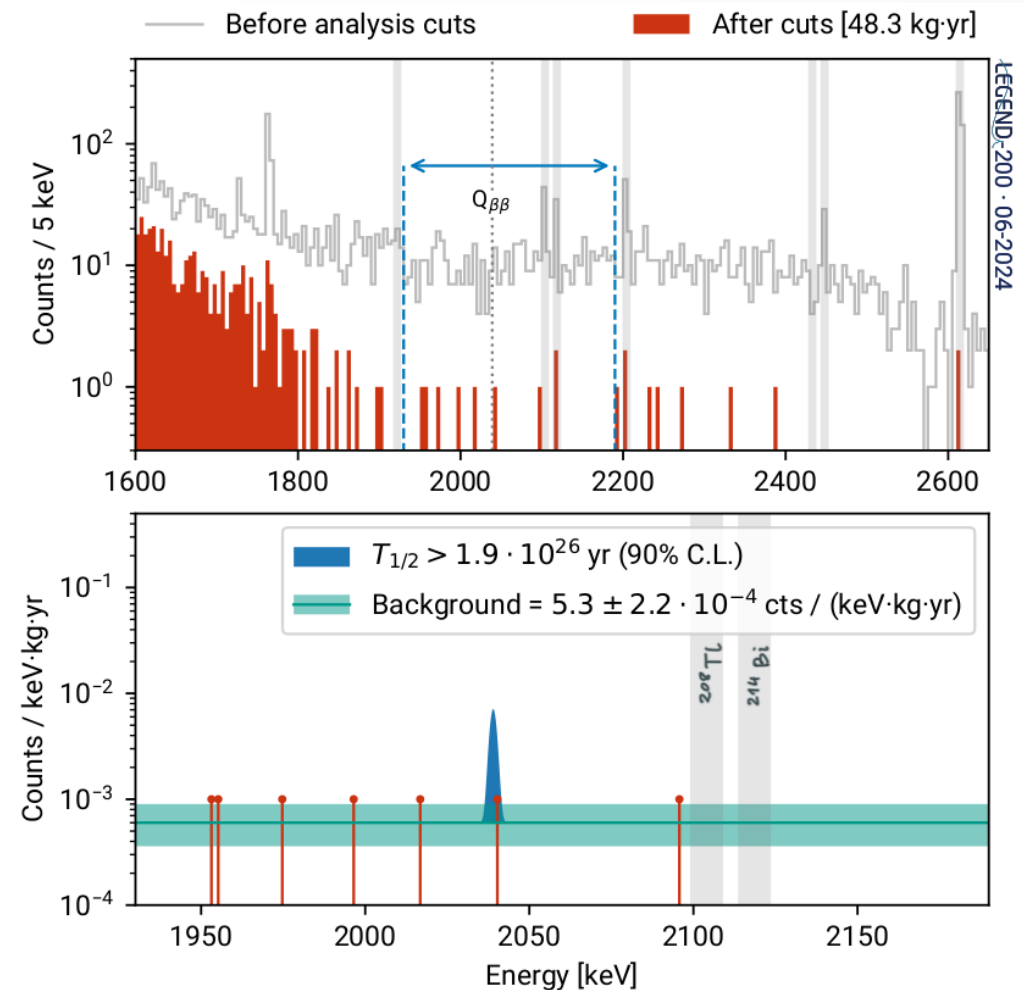
- Data: **76.2 kg·yr**
- **[GOLDEN]** $0\nu\beta\beta$ data set: **48.3 kg·yr**
- Blind analysis
- **BI = $(5.3 \pm 2.2) \cdot 10^{-4}$ c/keV·kg·yr**
- **GERDA + MAJORANA + LEGEND-200**

combine fit:

$$T_{1/2} > 1.9 \cdot 10^{26} \text{ yr (90\% C.L.)}$$

$$[\langle m\nu \rangle < 0.077\text{-}0.175 \text{ eV}]$$

Main goal is to reach sensitivity $\sim 10^{27}$ yr
($\sim 34\text{-}90$ meV)

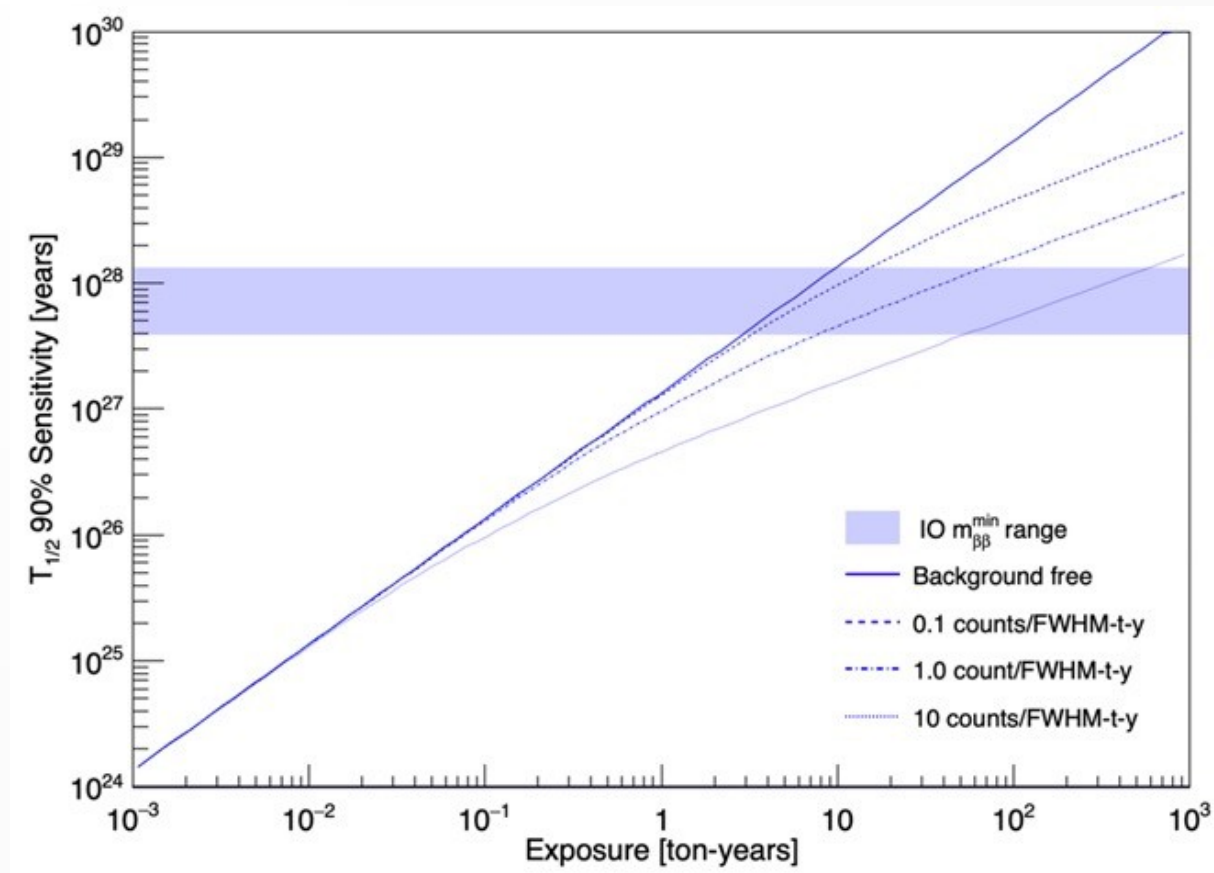
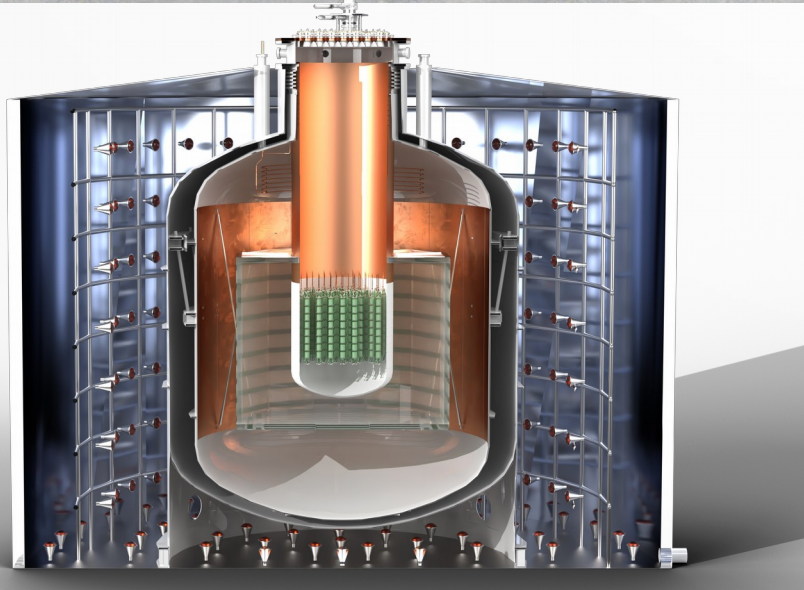
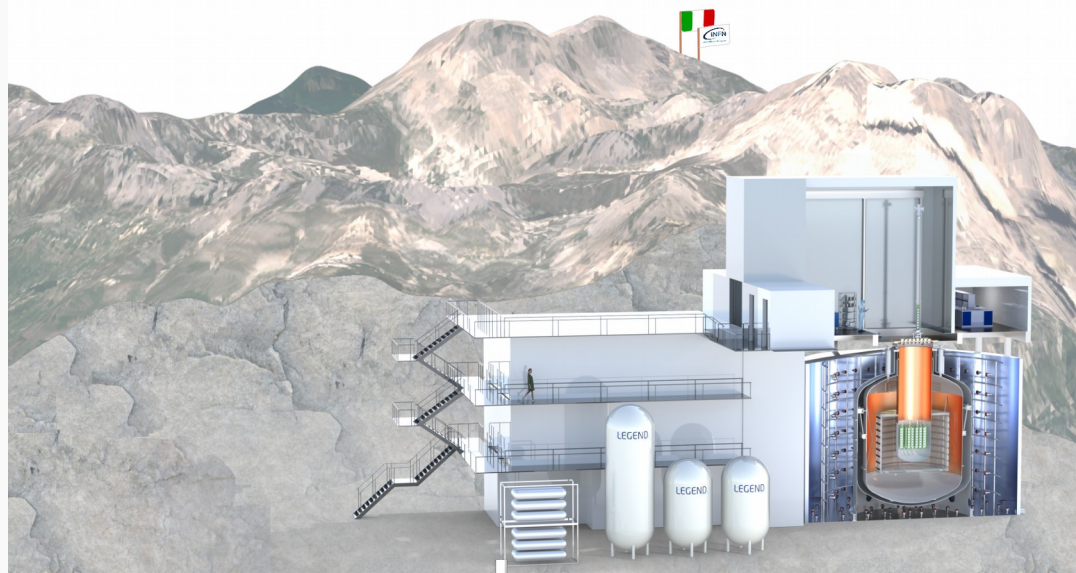


Future experiments

Most developed and promising projects for next generation experiments

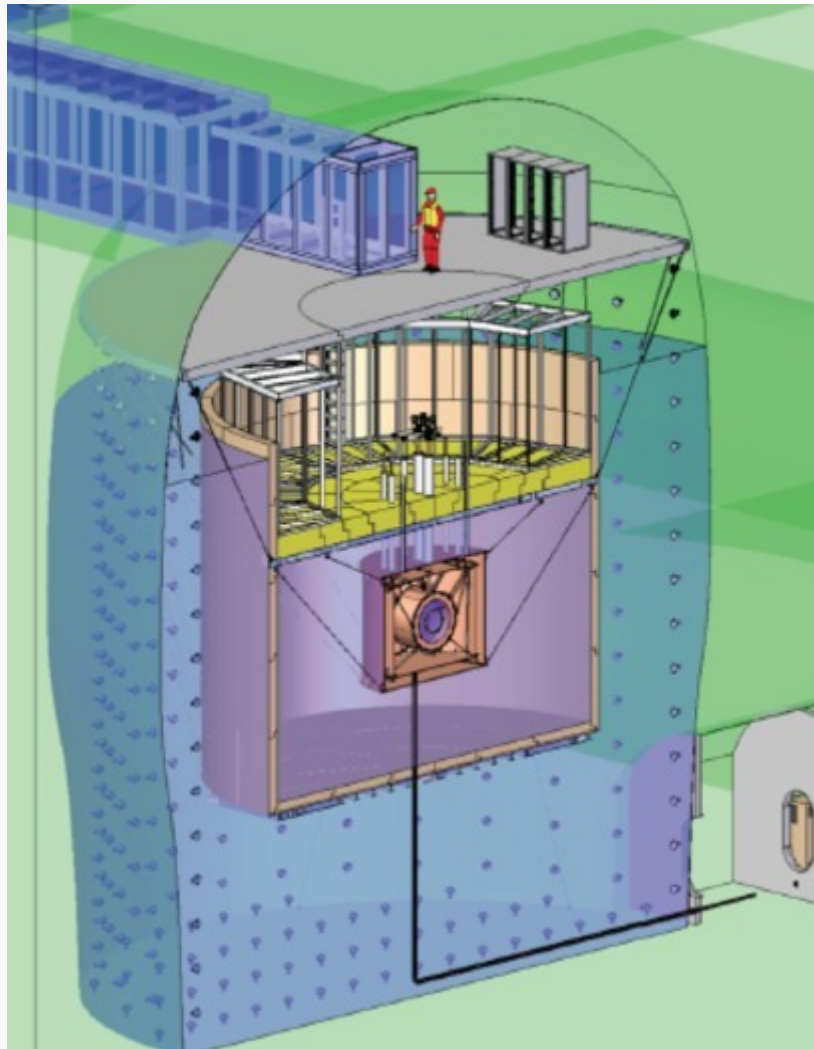
Exper.	Isotope	M, kg	$T_{1/2}$, yr	$\langle m_\nu \rangle$, meV	Status
LEGEND	^{76}Ge	1000	1.6×10^{28}	9.5-19.5	R&D
nEXO	^{136}Xe	5000	1.35×10^{28}	4.7-20.3	R&D
CUPID	^{100}Mo	250	1.8×10^{27}	9-15	R&D
		1000	9.2×10^{27}	4.1-6.5	
KamLAND2-Zen	^{136}Xe	1000	$\sim 2 \times 10^{27}$	12-52	R&D
SNO+-II	^{130}Te	~ 8000	$\sim 10^{27}$	20-40	R&D
AMoRE-II	^{100}Mo	100	5×10^{26}	16-47	R&D
SuperNEMO	^{82}Se	100-140	$(1-1.5) \times 10^{26}$	50-140	R&D
PandaX-III	^{136}Xe	200	$\sim 10^{26}$	65-170	R&D
		1000	$\sim 10^{27}$	20-55	

LEGEND-1000



3σ discovery sensitivity $\langle m_\nu \rangle = 9-21$ meV
($T_{1/2} = 1.3 \cdot 10^{28}$ yr)

nEXO



Overall mass: 5 tonnes, 90% enriched ^{136}Xe

Time Projection Chamber (TPC)

Location: SNOLAB (Canada)

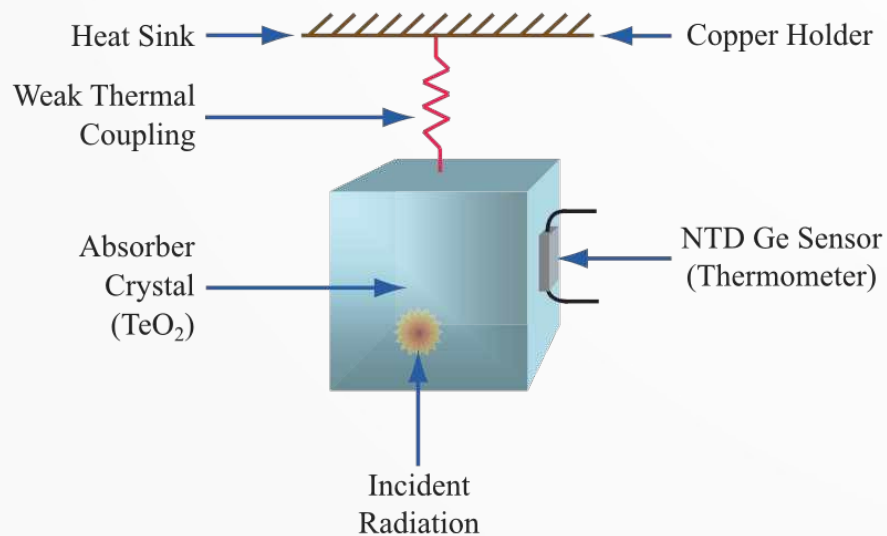
Running time: 10 years

Energy resolution: 2.35% (FWHM)

Sensitivity: $1.35 \cdot 10^{28}$ yr (without Ba)
for 10 years of measurements
 $\langle m \rangle \sim 4.7\text{-}20.3$ meV

CUPID (CUORE upgrade with particle identification)

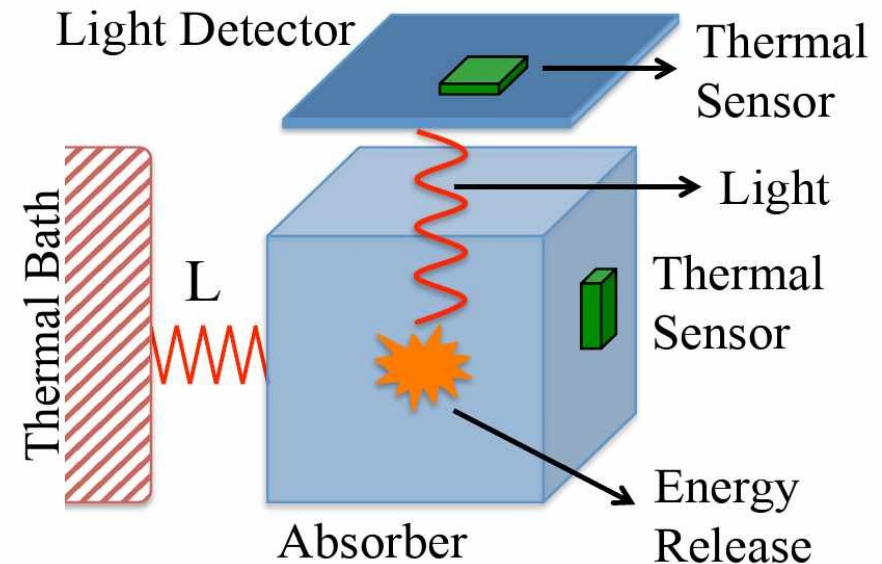
**CUORE ^{130}Te
pure thermal
detector
(bolometer)**



No PID

$$Q = 2527 \text{ keV} < 2615 \text{ keV}$$

**CUPID ^{100}Mo
heat + light
(scintillating
bolometer)**

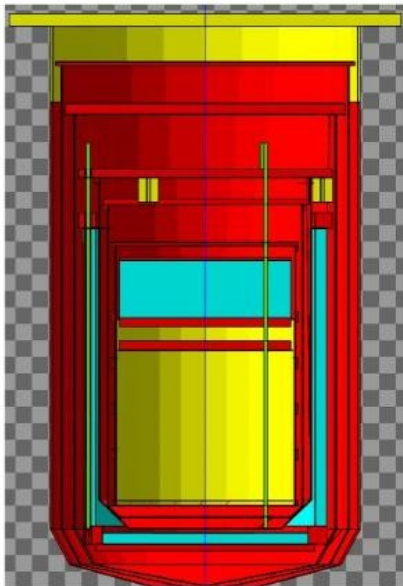


PID

$$Q = 3034 \text{ keV} > 2615 \text{ keV}$$

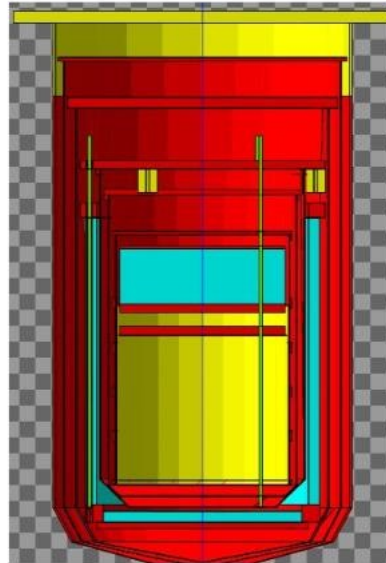
CUPID sensitivity

CUPID Baseline



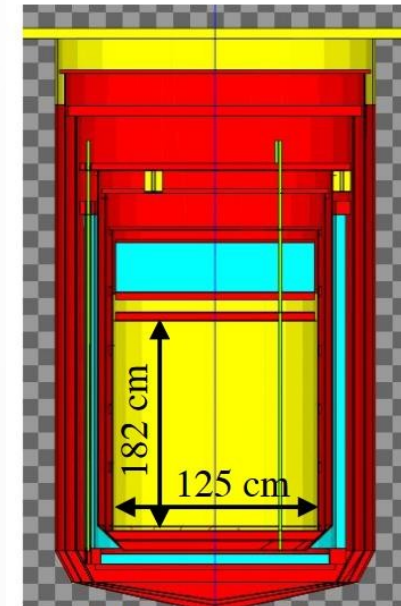
250 kg of ^{100}Mo
CUORE cryostat
Bkg 1×10^{-4} cky
Excl. sensitivity:
 $T_{1/2} > 1.5 \times 10^{27}$ years (IH)

CUPID-reach



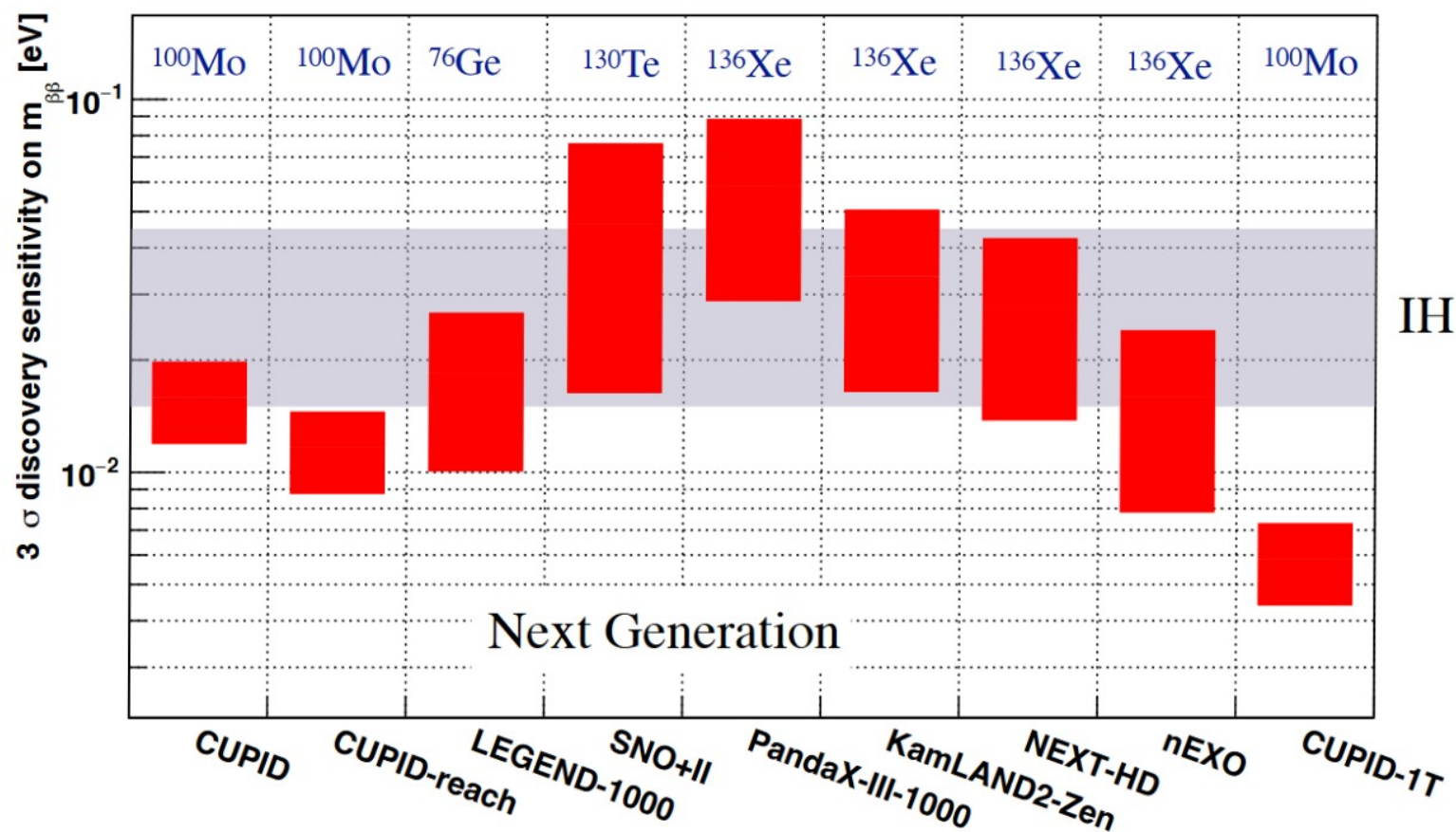
250 kg of ^{100}Mo
CUORE cryostat
Bkg 2×10^{-5} cky
Excl. sensitivity:
 $T_{1/2} > 2.3 \times 10^{27}$ years (IH)

CUPID-1T



1000 kg of ^{100}Mo
New cryostat
Bkg 5×10^{-6} cky
Excl. sensitivity:
 $T_{1/2} > 9.2 \times 10^{27}$ years (NH)

Sensitivity of some future experiments



Methodology from Phys. Rev. **D96**, 053001 (2017)

Parameters from PRD96, 053001 (2017); arXiv:1910.04688

IV. Заключение

I. Прямые измерения массы нейтрино:

- Лучшее ограничение получено в эксперименте KATRIN - < 0.45 эВ
- В ближайшие несколько лет: KATRIN - < 0.3 эВ
- Большая программа будущих экспериментов: KATRIN++, Project 8, QTNM, PTOLEMY
- (планируемая чувствительность $\sim 0.01-0.05$ эВ) – 2030 – 2040 г.г.

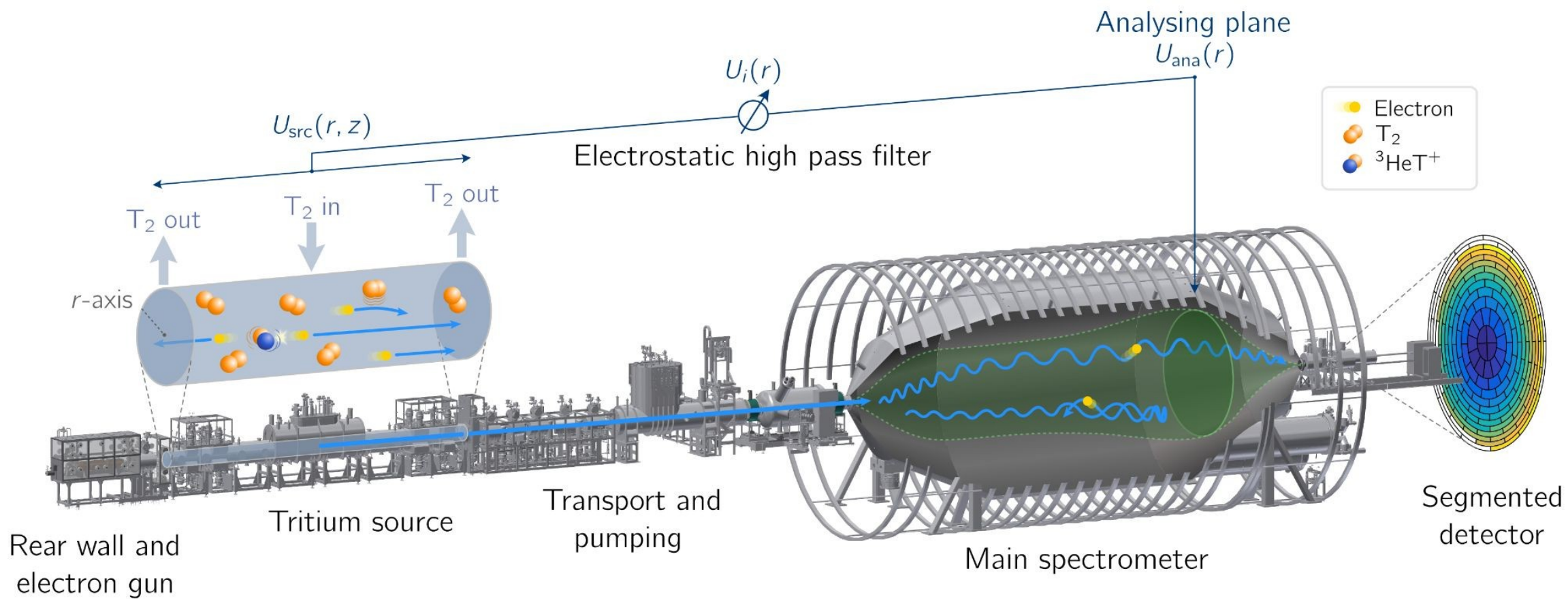
II. Двойной бета-распад:

- Лучшее (консервативное) современное ограничение - $\langle m_\nu \rangle < 0.12$ eV (KamLAND-Zen)
- 2 “больших” эксперимента продолжают набор данных: CUORE, LEGEND-200 ($\langle m_\nu \rangle \sim 0.034-0.09$ eV)
- В 2027-2035 г.г. стартуют эксперименты нового поколения: CUPID, LEGEND-1000, nEXO, AmoRE-II, KamLAND2-Zen, SNO+-II, ...
- Чувствительность к $\langle m_\nu \rangle$ на уровне $\sim 0.01-0.02$ eV будет достигнута в 2035-2040 г.г.

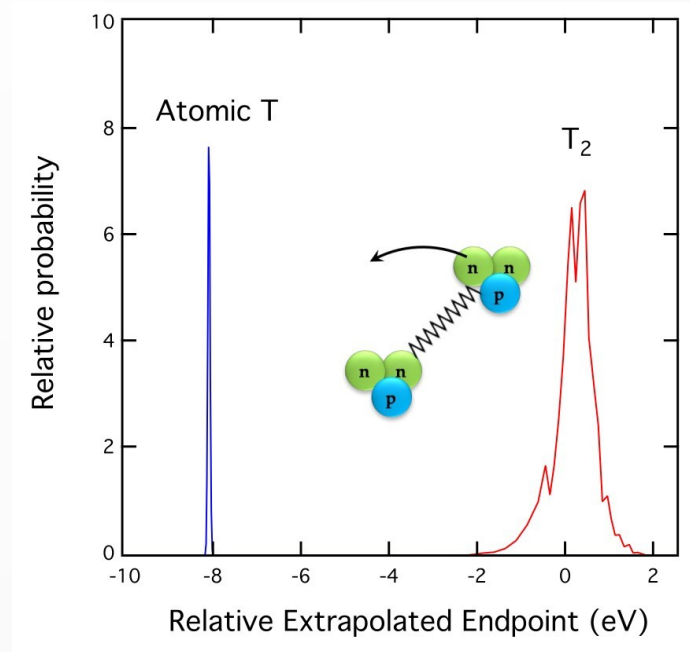
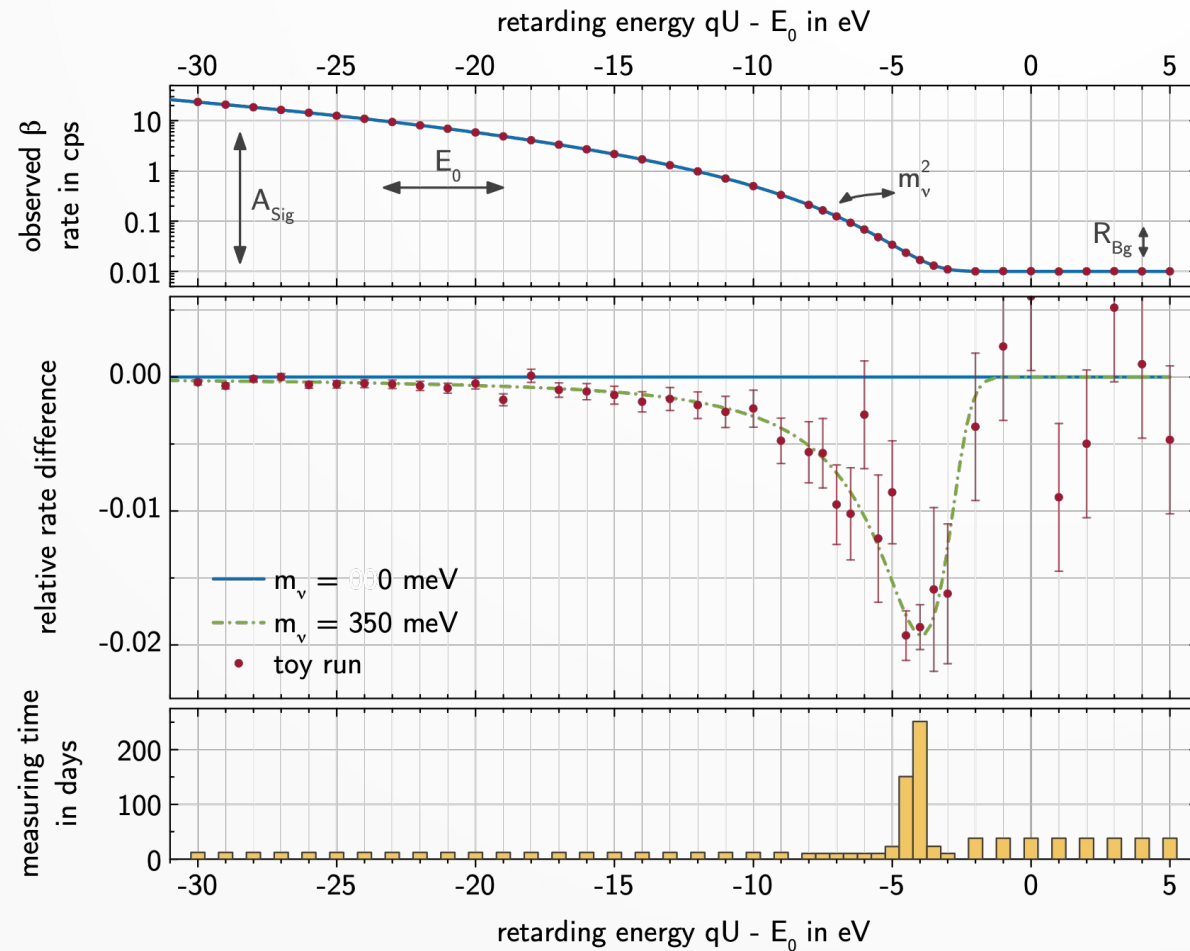
Back-up slides

Экспериментальные методы

- **MAC-E filter** (**M**agnetic **A**diabatic **C**ollimation combined with an **E**lectrostatic Filter)
- **KATRIN**
- **Cyclotron Radiation Emission Spectroscopy (CRES)**
- **PROJECT 8, QTNM**
- **Hybrid spectroscopic techniques (CRES,...)**
- **PTOLEMY**
- **Calorimetry:**
 - - Low-temperature bolometers (^{187}Rn)
- **Mibeta, MANU, MARE**
- **for EC-decay: low-temperature micro-calorimetry** (Metallic magnetic calorimeters (**MMC**) and Transition edge sensors (**TES**))
- **ECHO, HOLMES**

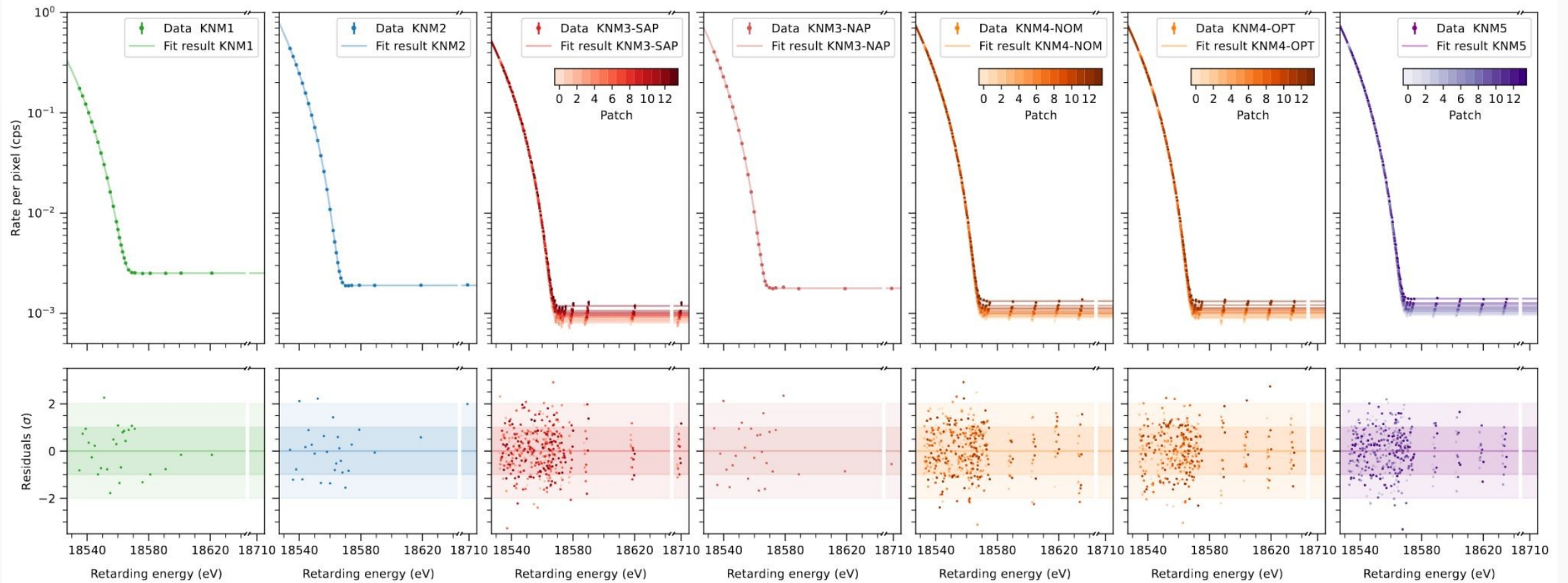


Direct shape measurement of integrated β spectrum

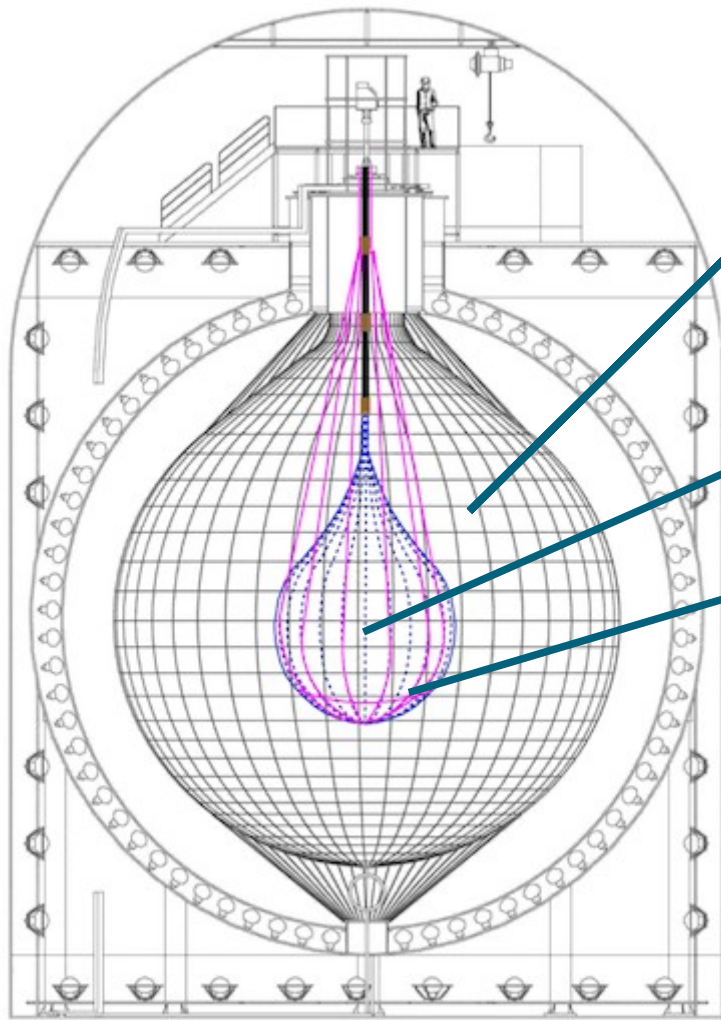








KamLAND-Zen (Kamioka, Japan)



1000-ton pure
Liquid scintillator

745 kg Xe-loaded
Liquid scintillator
(91% enrichment)

Inner balloon (IB)

2011 - start of measurements

**2019 - Xe increase, cleaner
balloon**

Big and pure: no background from external γ -rays, purification of LS, replacement of inner balloon is possible

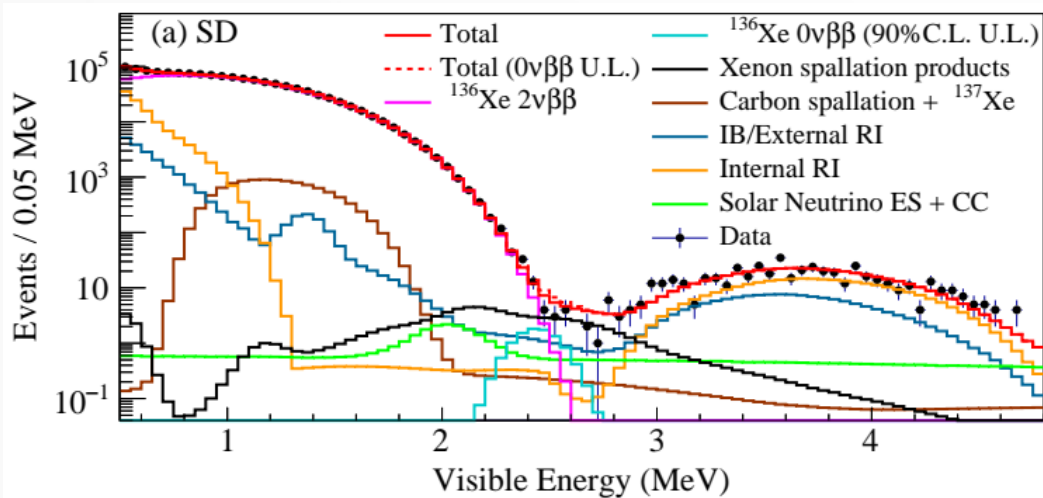
→ High scalability

2011 - 320 kg of Xe; 2013 - 383 kg; 2019 - 745 kg 43

Fit to energy spectra for $0\nu\beta\beta$

$0\nu\beta\beta$ candidate
(sensitive to $0\nu\beta\beta$ signal)

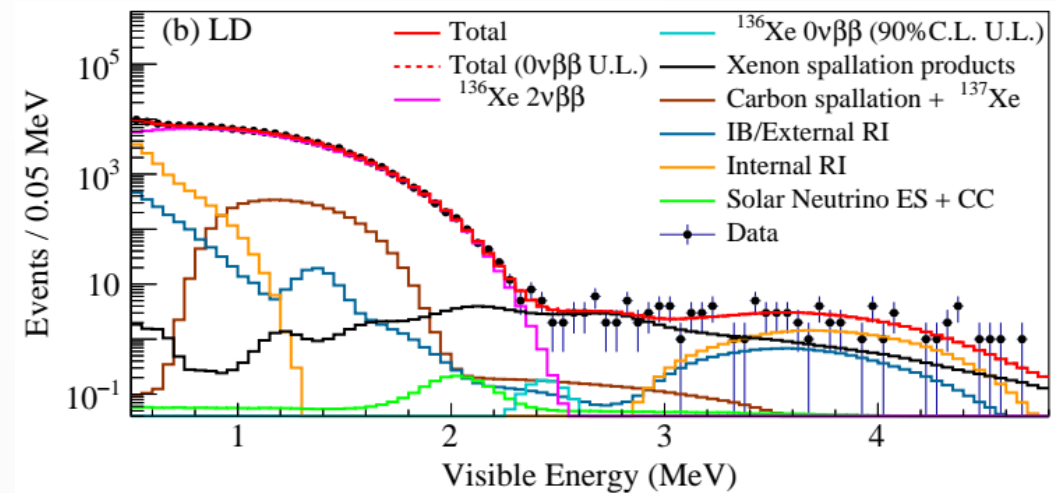
1131 days livetime
 $R < 1.57$ m



$0\nu\beta\beta$ best fit: 0 events
upper limit: < 10 events
at 90% C.L.

Long-lived candidate
(Long-lived BG constraint)

111 days livetime
 $R < 1.57$ m

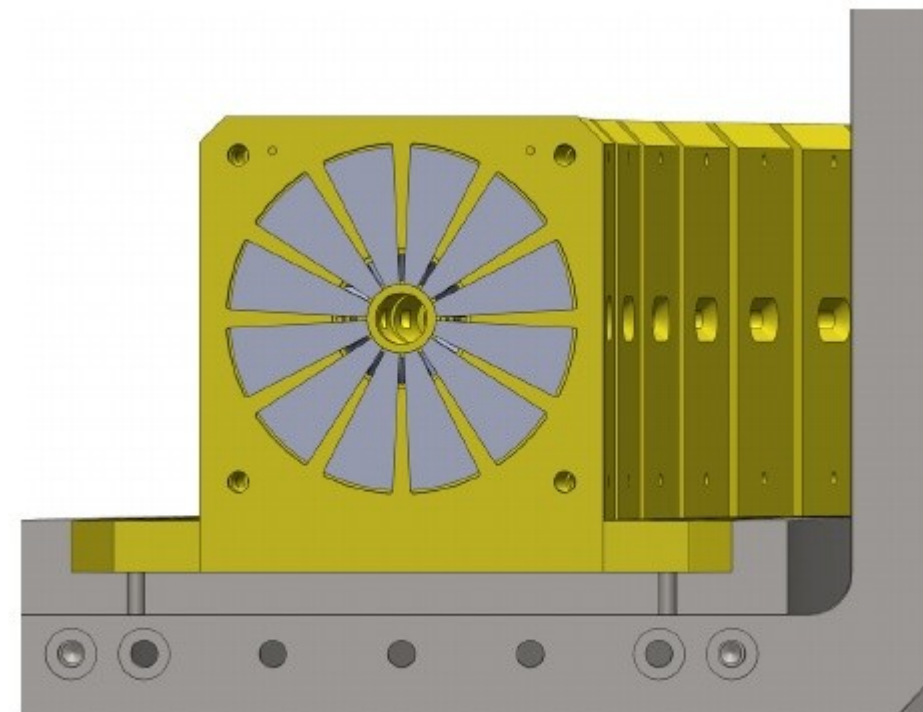
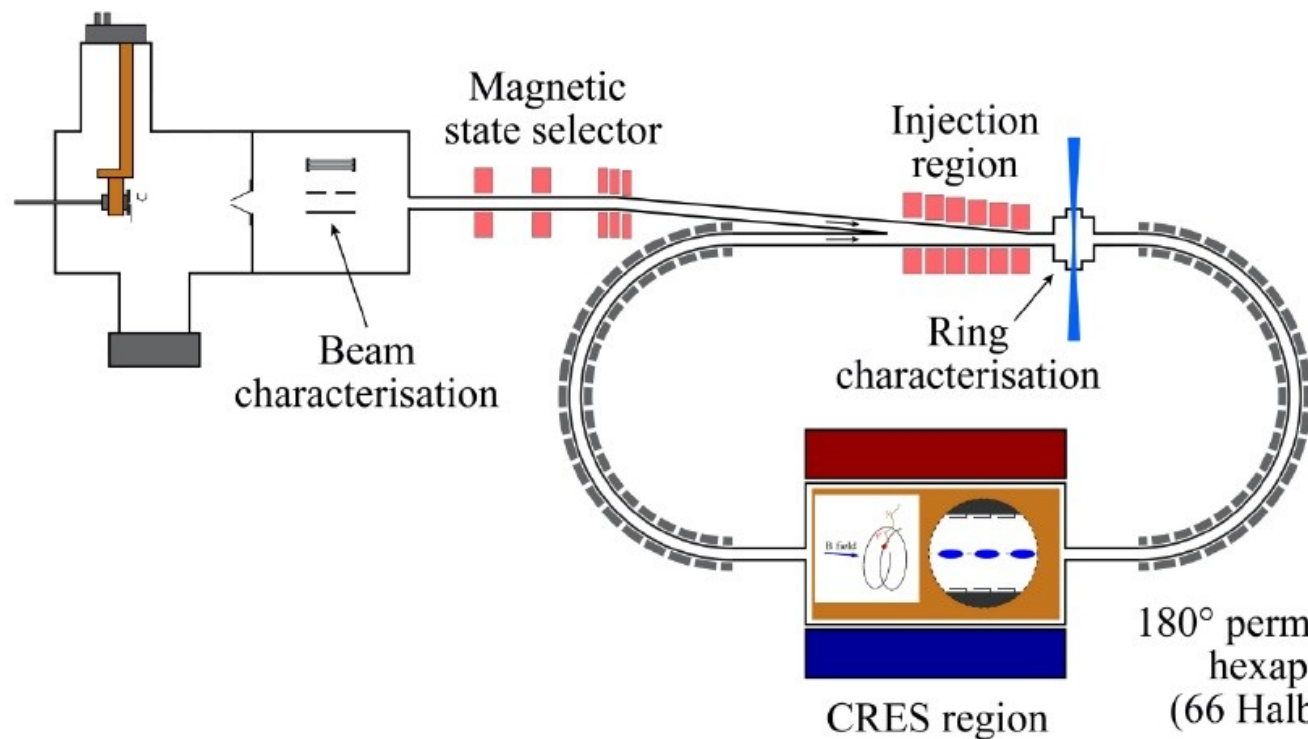


Zen 800 - $T^{1/2}(0\nu) > 3.4 \cdot 10^{26}$ yr

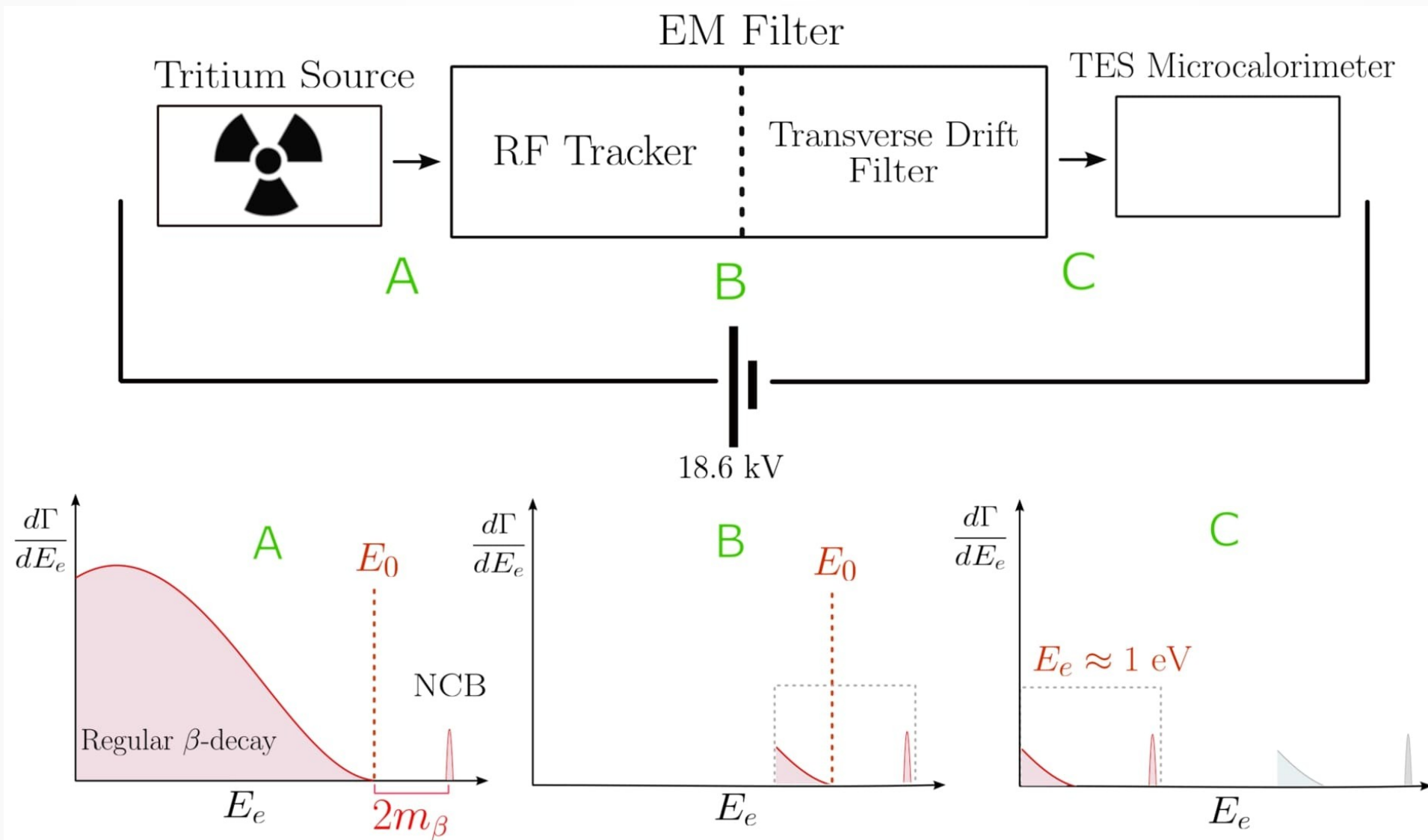
Combind - $T_{1/2}(0\nu) > 3.8 \cdot 10^{26}$ yr \rightarrow
(+ Zen 400) $\langle m_\nu \rangle < (28-122)$ meV

Схема эксперимента QTNM

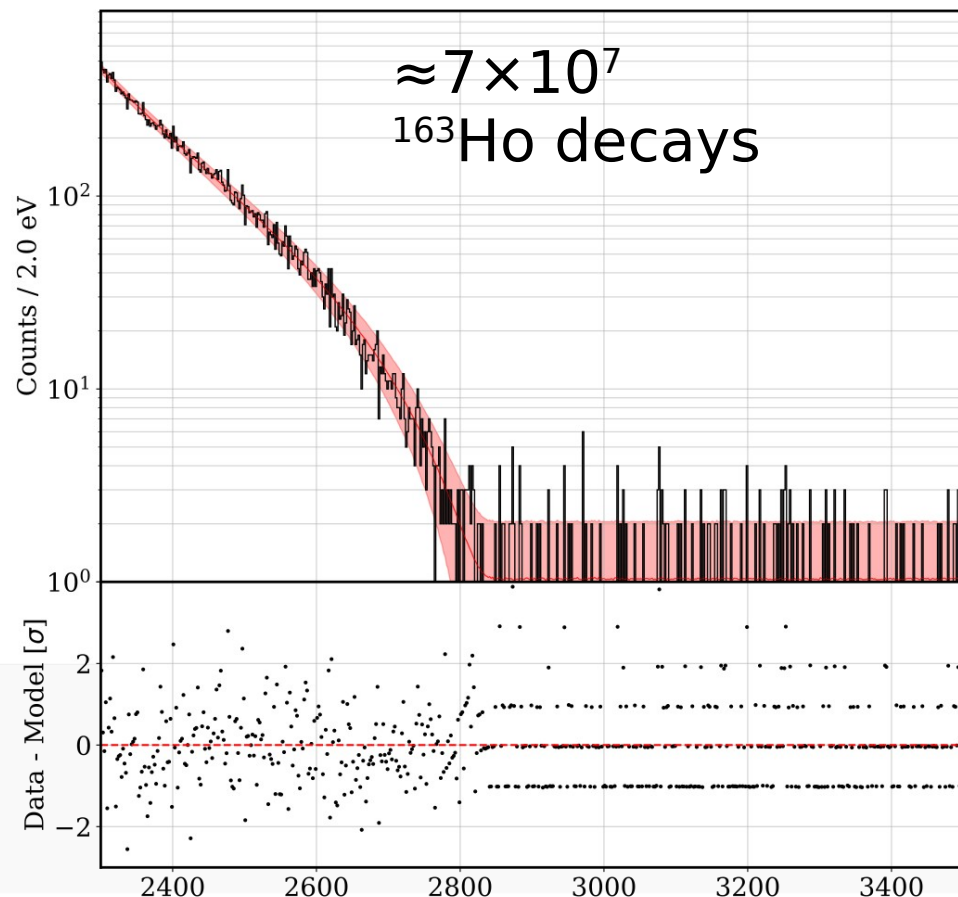
H/D/T atom supersonic beam
discharge source (30 K)



PTOLEMEY



HOLMES



$m\beta < 28 \text{ eV @ 90\% CI}$
 $Q = 2848 + 11 - 6 \text{ eV (only stat error)}$

Ошибки (KATRIN)

