

Микрокалориметр «ЕСНо»
и масс-спектрометр «PENTATRAN»
для определения массы нейтрино

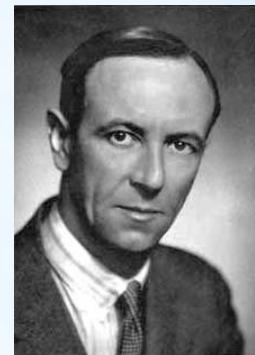
Докладчик: Филянин Павел Евгеньевич

ст.лаборант-исследователь ЛФЭЯ ПИЯФ
аспирант СПбГУ кафедры Ядерно-Физических Методов Исследования

18 апреля 2017

История открытия нейтрино

1914 – Д.Чедвик обнаруживает непрерывный спектр β -частиц
(в отличие от α - и γ -спектров)



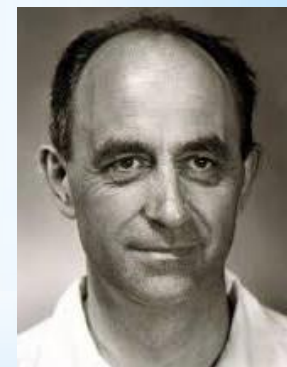
J.Chadwick



W.Pauli

1931 – гипотеза В.Паули о существовании второй не детектируемой частицы при β -распаде

“Сегодня я совершил то, что физик не должен делать никогда.
Я предсказал нечто, что никогда не будет наблюдаться экспериментально”



E.Fermi

1934 – Э.Ферми создает первую теорию β -распада с участием «нейтрино»

1956 – Ф.Райнес и К.Коуэн экспериментально подтвердили существование нейтрино



F.Reines



C.Cowan

Некоторые интересные факты о нейтрино

- Вторая по распространенности частица во Вселенной
- Через 1 см^2 проходит 10^{11} нейтрино в секунду испущенных Солнцем
- В воде длина свободного пробега нейтрино с энергией 5 МэВ 10^{18} метров (100 св. лет)
- 3 различных сорта: e^- , μ^- τ^- -нейтрино
- Нейтрино осциллируют между собой

Нейтрино – одна из самых загадочных и уникальных элементарных частиц

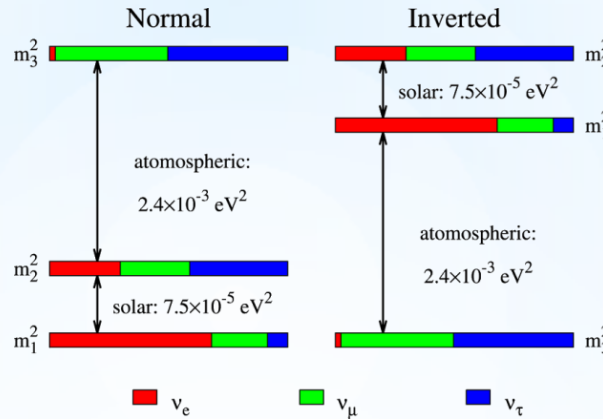
Несмотря на значительные усилия, предпринимаемые физиками (как экспериментаторами, так и теоретиками) на протяжении более чем 80 лет, до сих пор многие вопросы о свойствах нейтрино остаются открытыми

Каковы свойства нейтрино?

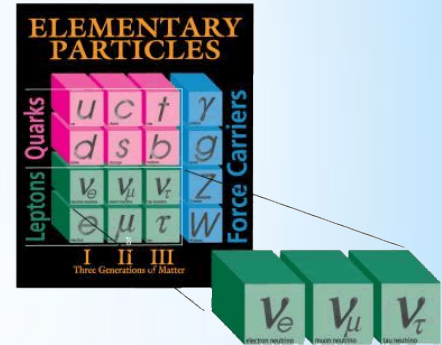
? массы



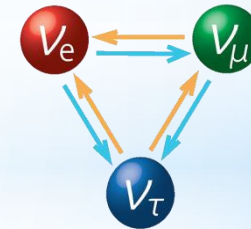
? массовая иерархия



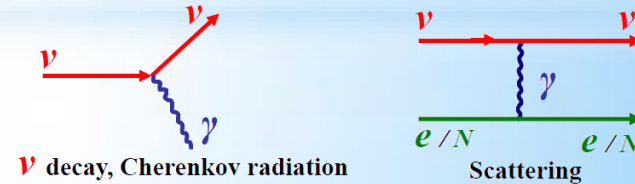
? сколько всего типов различных нейтрино



? характер их превращения друг в друга



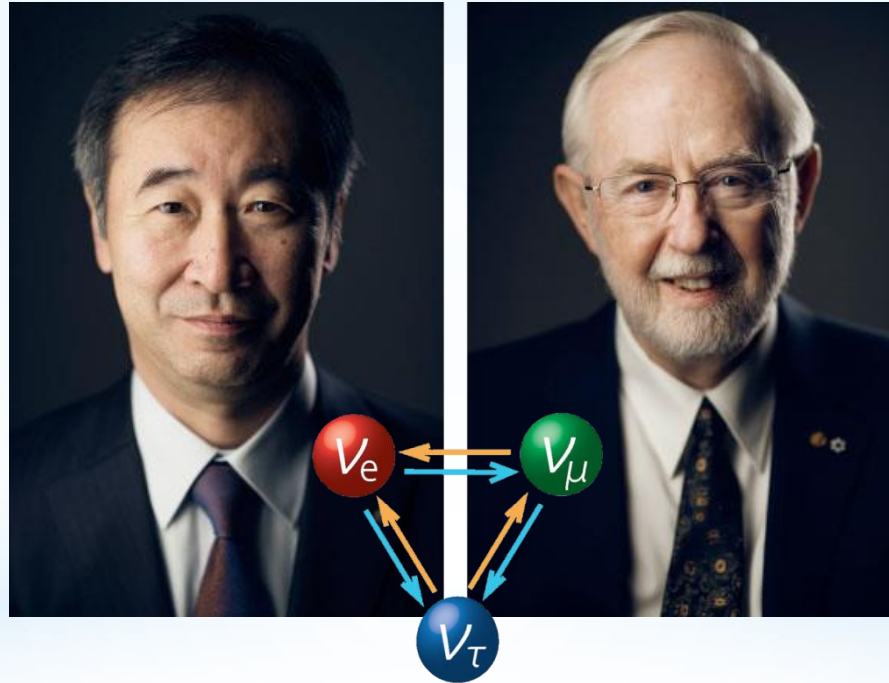
? имеют ли электромагнитные свойства



? дираковские ($\tilde{\nu} \neq \nu$) они или майорановские ($\tilde{\nu} = \nu$)

У нейтрино есть масса!

Нобелевская премия по физике - 2015

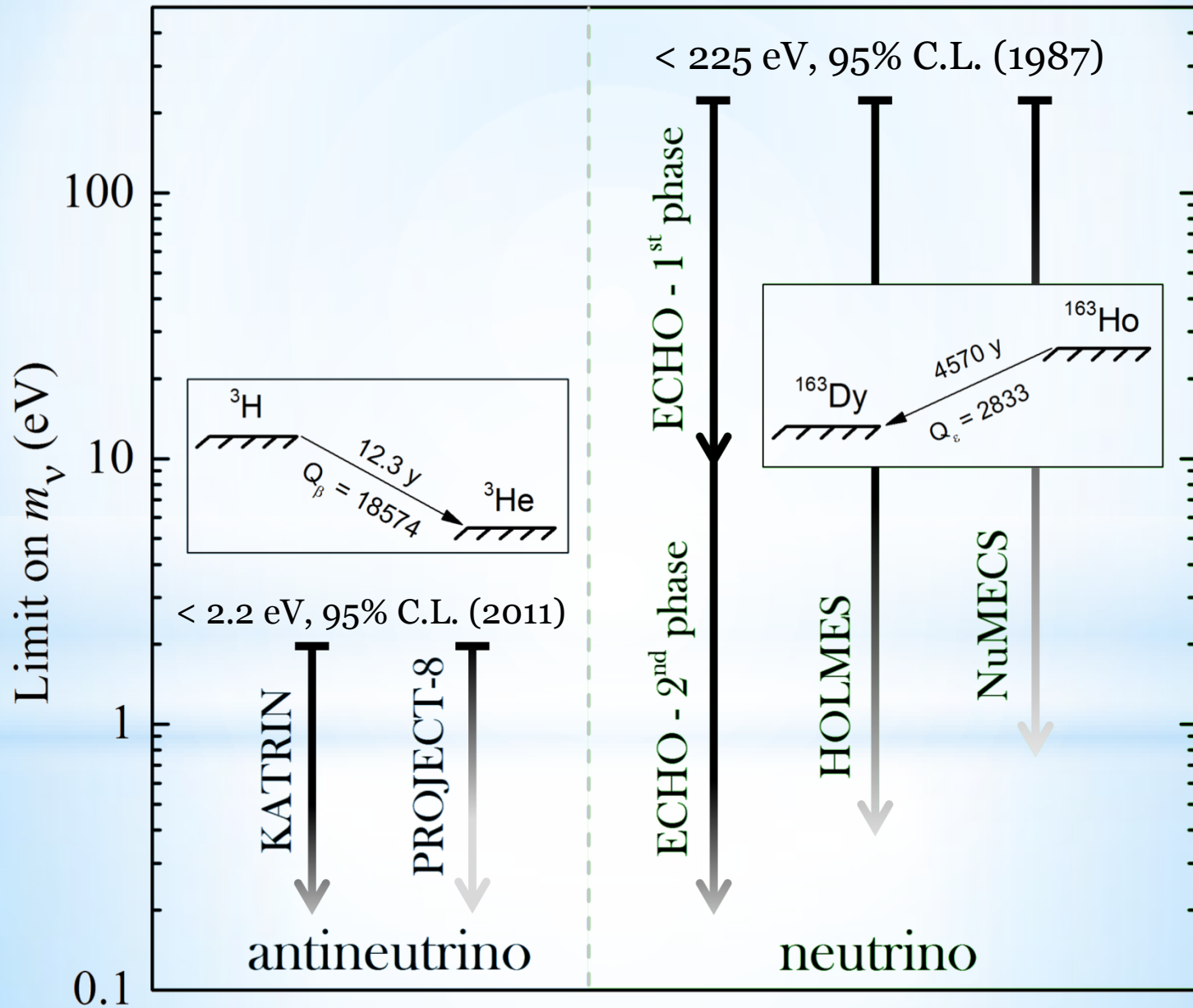


Takaaki Kajita

Arthur B. McDonald

«За открытие нейтринных осцилляций, означающих наличие у нейтрино массы»

Эксперименты по определению массы (анти)нейтрино



Коллаборация ЕСНo (Electron Capture in Holmium)

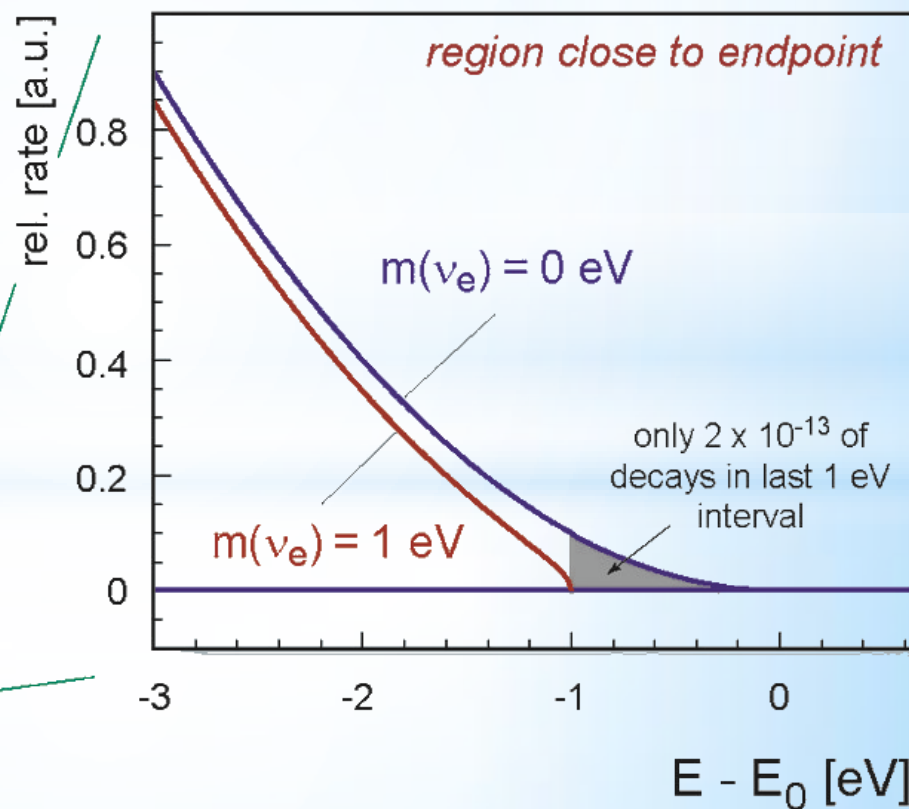
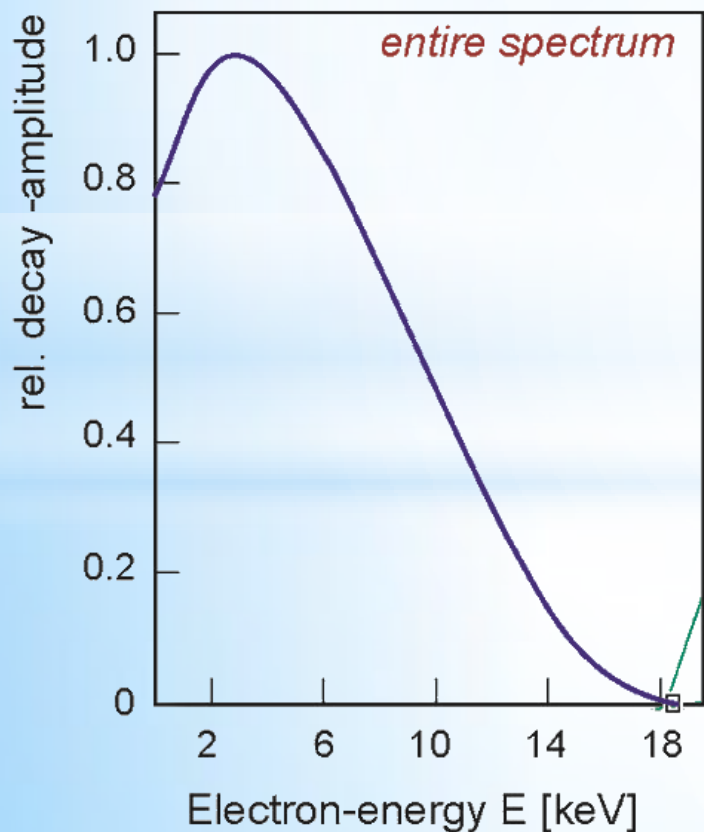
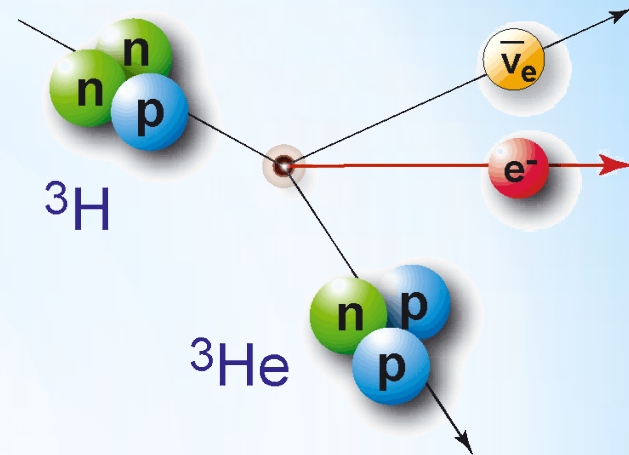
- **Department of Nuclear Physics, Comenius University, Bratislava, Slovakia**
Fedor Simkovic
- **Department of Physics, Indian Institute of Technology Roorkee, India**
Moumita Maiti
- **Institute for Nuclear Chemistry, Johannes Gutenberg University Mainz, Germany**
Christoph E. Düllmann, Holger Dorrer, Klaus Eberhardt, Christoph Mokry, Petra Thörle-Pospiech
Jörg Runke, Fabian Schneider
- **Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungary**
Zoltán Szúcs
- **Institute of Nuclear and Particle Physics, TU Dresden, Germany**
Kai Zuber
- **Institute for Physics, Johannes Gutenberg-Universität, Germany**
Tom Kieck, Pascal Naubereit, Klaus Wendt
- **Institute for Theoretical and Experimental Physics Moscow, Russia**
Mikhail Krivoruchenko
- **Institute for Theoretical Physics, University of Tübingen, Germany**
Amand Fäßler
- **Kirchhoff-Institute for Physics, Heidelberg University, Germany**
Christian Enss, Andreas Fleischmann, Clemens Hassel, Sebastian Kempf, Mathias Wegner, Loredana Gastaldo
- **Max-Planck Institute for Nuclear Physics Heidelberg, Germany**
Klaus Blaum, Sergey Eliseev, Yuri Novikov, Alexander Rischka, Rima Schüssler, Pavel Filianin
- **Petersburg Nuclear Physics Institute, Russia**
Yuri Novikov, Sergey Eliseev, Pavel Filianin
- **Physics Institute, University of Tübingen, Germany**
Josef Jochum, Stephan Scholl
- **Saha Institute of Nuclear Physics, Kolkata, India**
Susanta Lahiri

Определение массы нейтрино

1) Масса электронного антинейтрино в распаде ${}^3\text{H}$

Q -значение: 18 590.6(32) эВ

$T_{1/2} = 12.32(2)$ лет



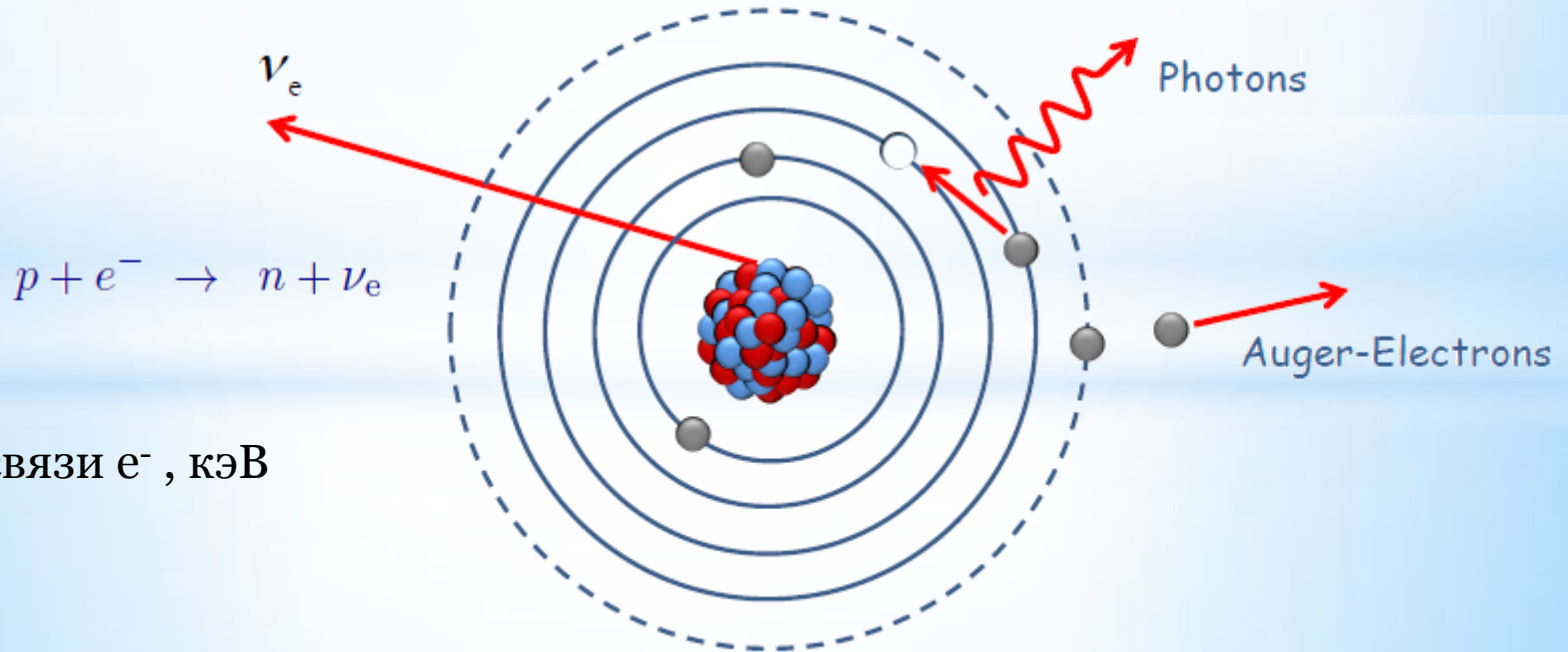
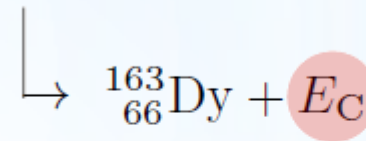
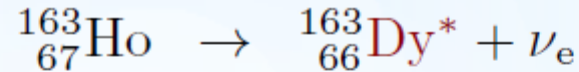
Определение массы нейтрино

2) Масса электронного нейтрино в распаде ^{163}Ho

Q-значение: 2 833(32) эВ *

$T_{1/2} = 4570(25)$ лет

* S.Eliseev *et al.*, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 062501



Энергии связи e^- , кэВ

$B_K = 53.8$

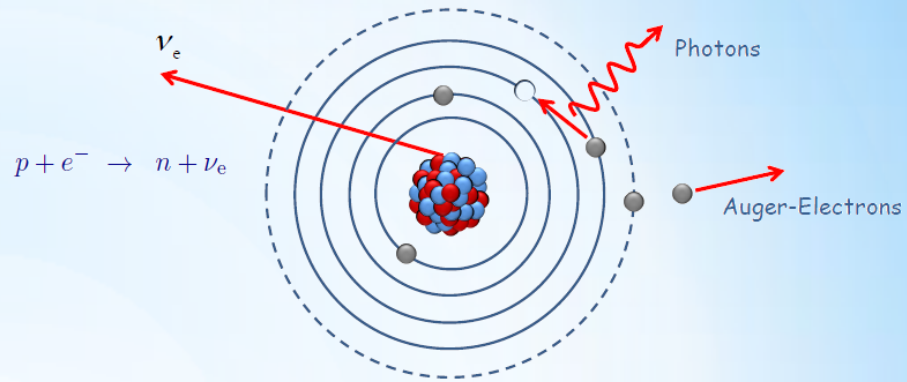
$B_{L1} = 9.05$

$B_{M1} = 2.05$

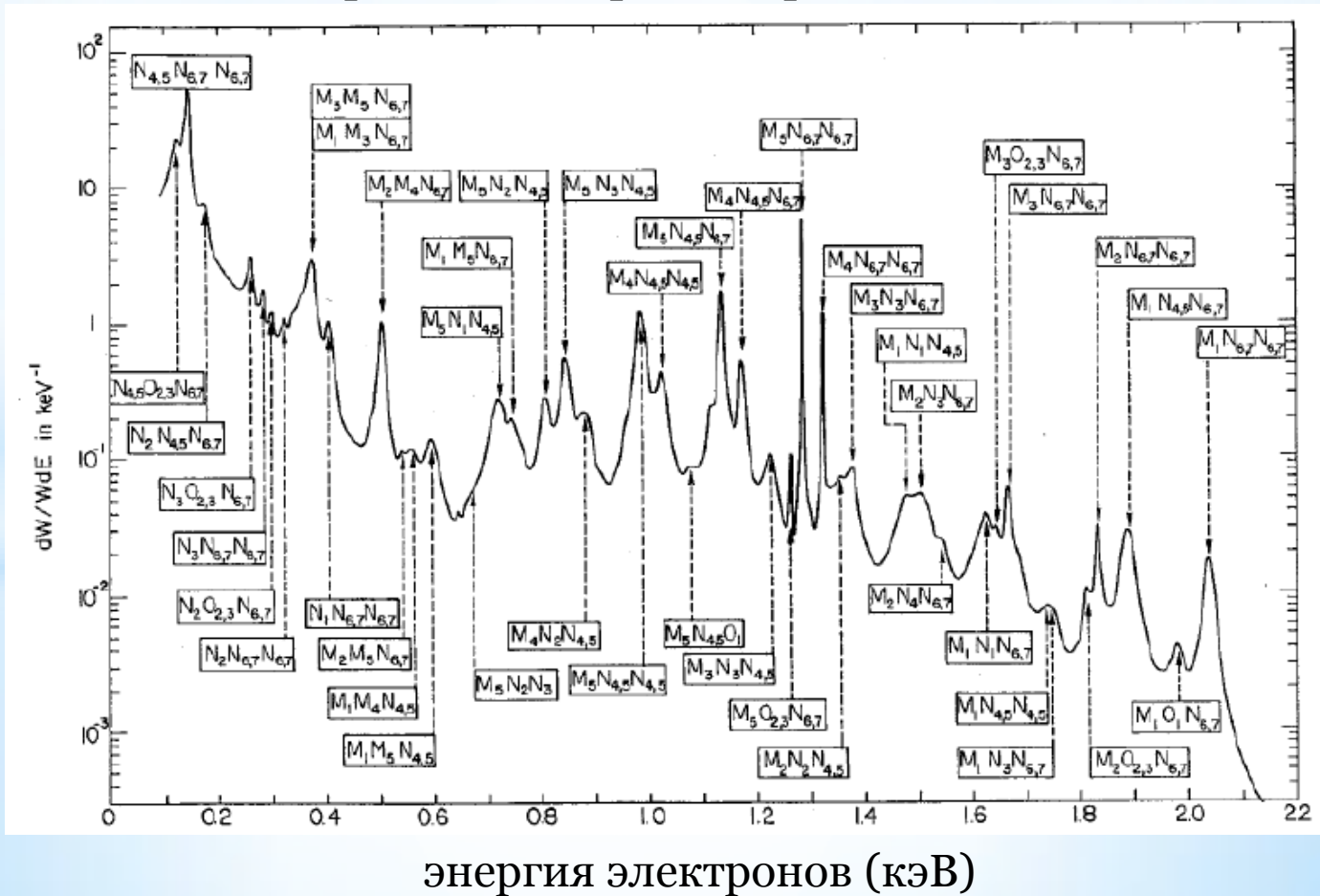
$B_{N1} = 0.41$

Определение массы нейтрино

2) Масса электронного нейтрино в распаде ^{163}Ho

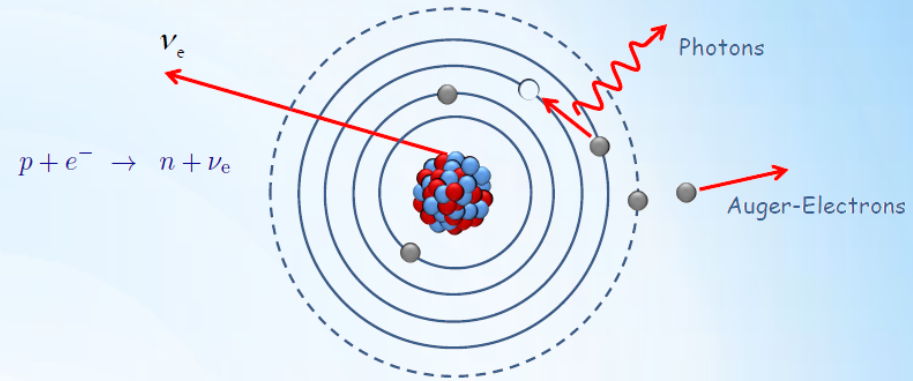


Спектр Оже-электронов в распаде ^{163}Ho

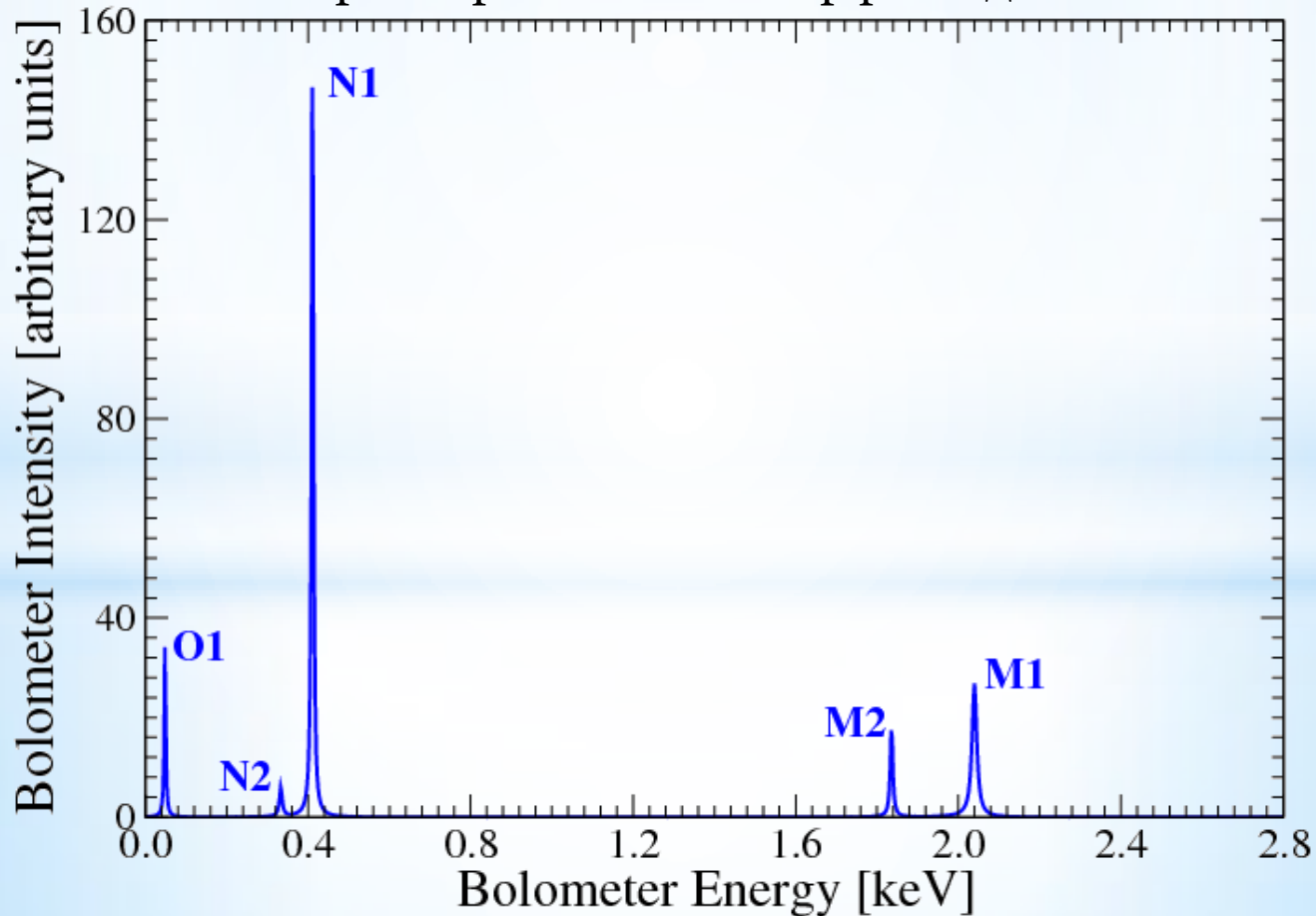


Определение массы нейтрино

- 2) Масса электронного нейтрино
в распаде ^{163}Ho

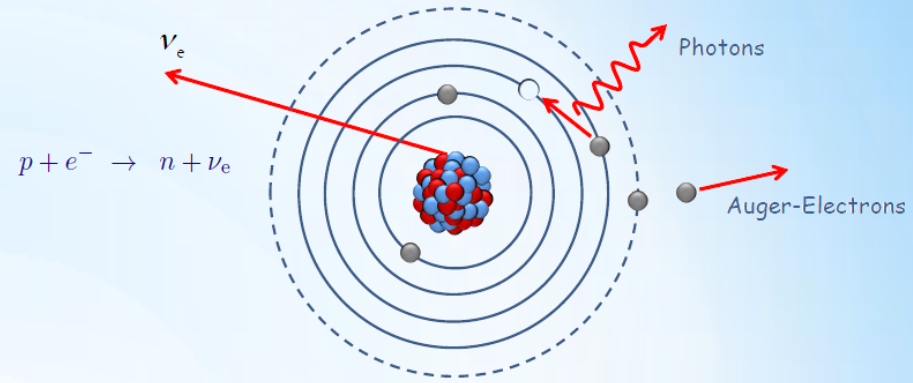


Калориметрический спектр распада ^{163}Ho

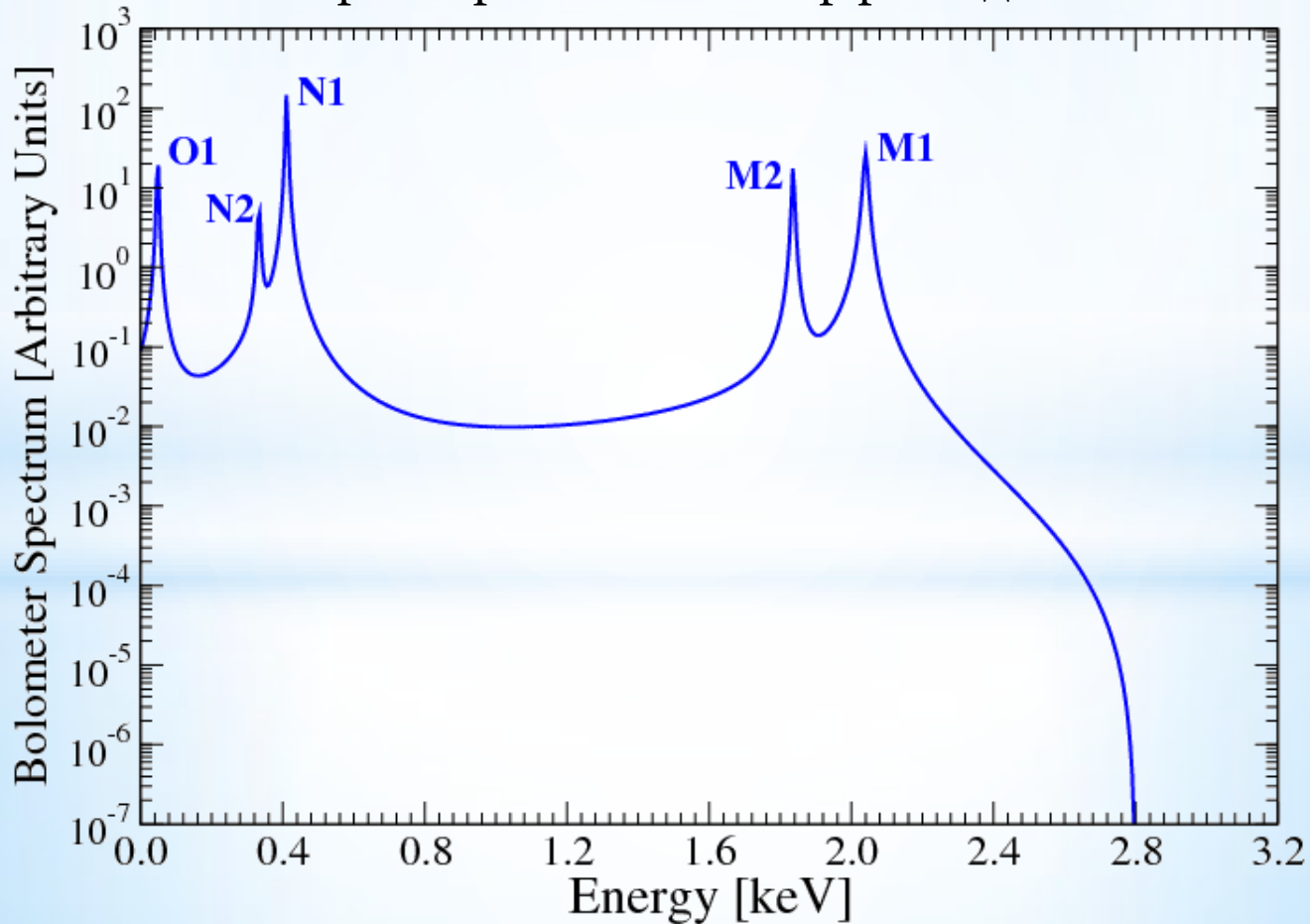


Определение массы нейтрино

- 2) Масса электронного нейтрино
в распаде ^{163}Ho

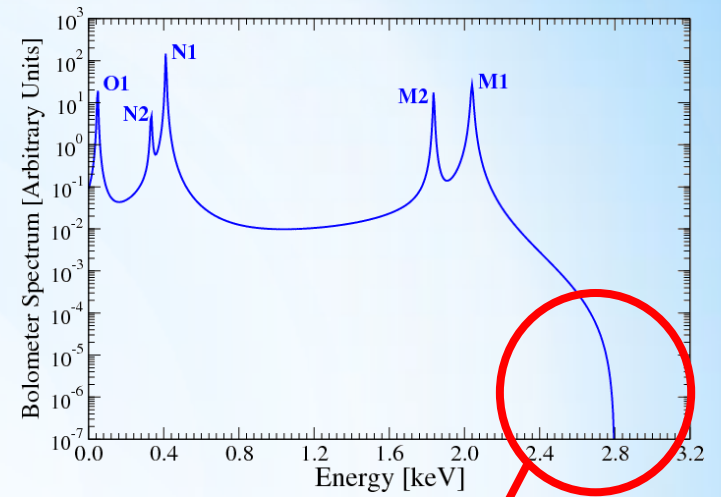


Калориметрический спектр распада ^{163}Ho

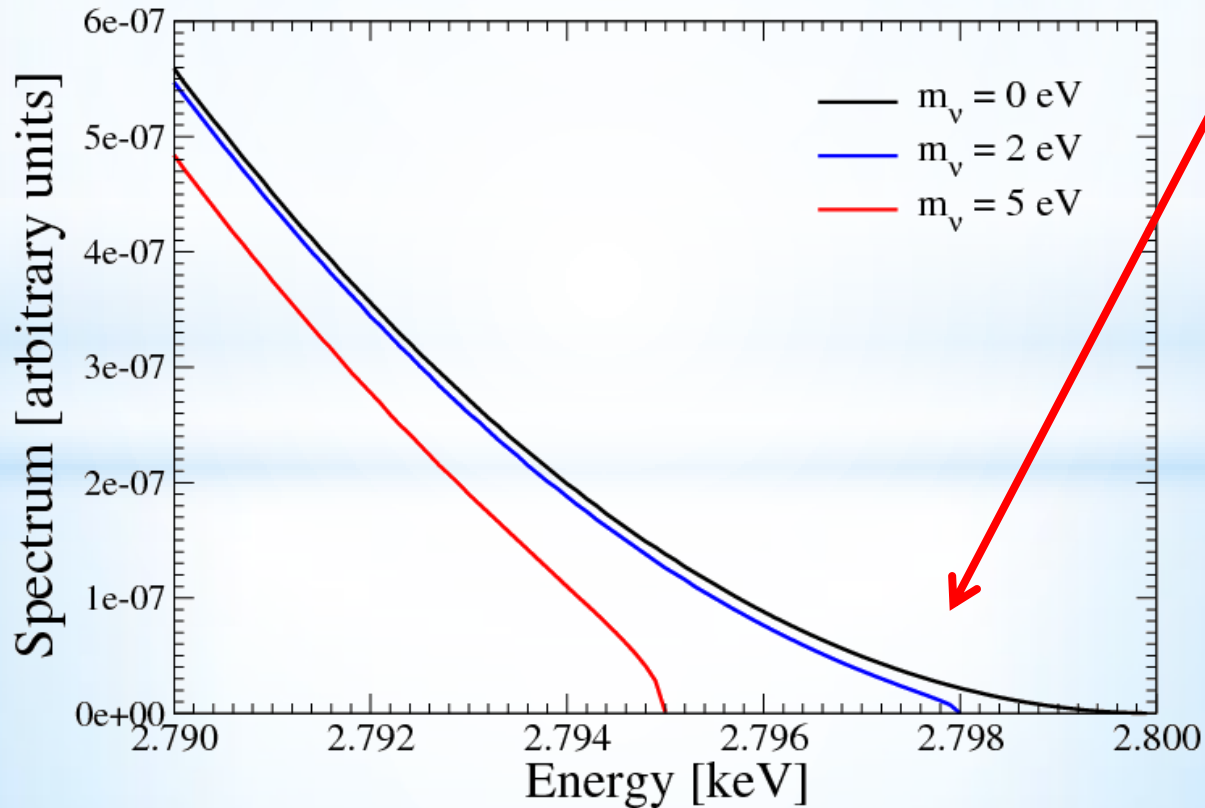


Определение массы нейтрино

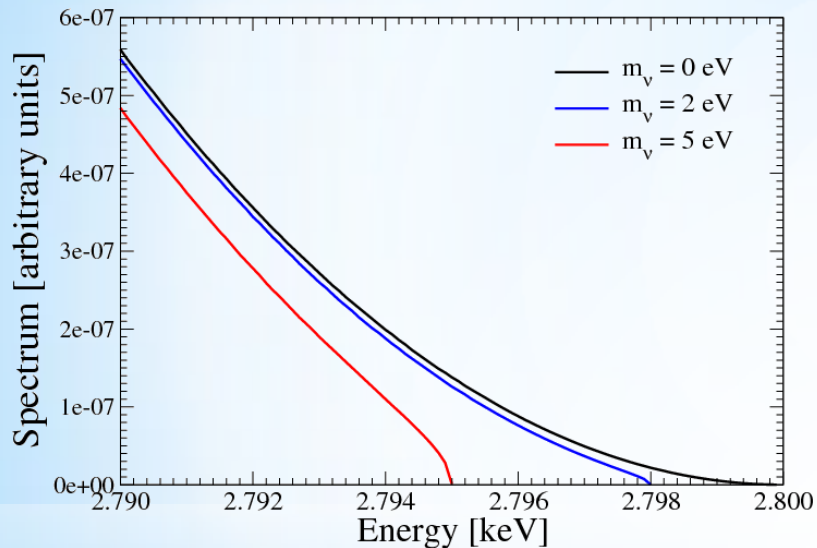
2) Масса электронного нейтрино
в распаде ^{163}Ho



Спектр вблизи граничной энергии



ЭВ чувствительность к m_ν



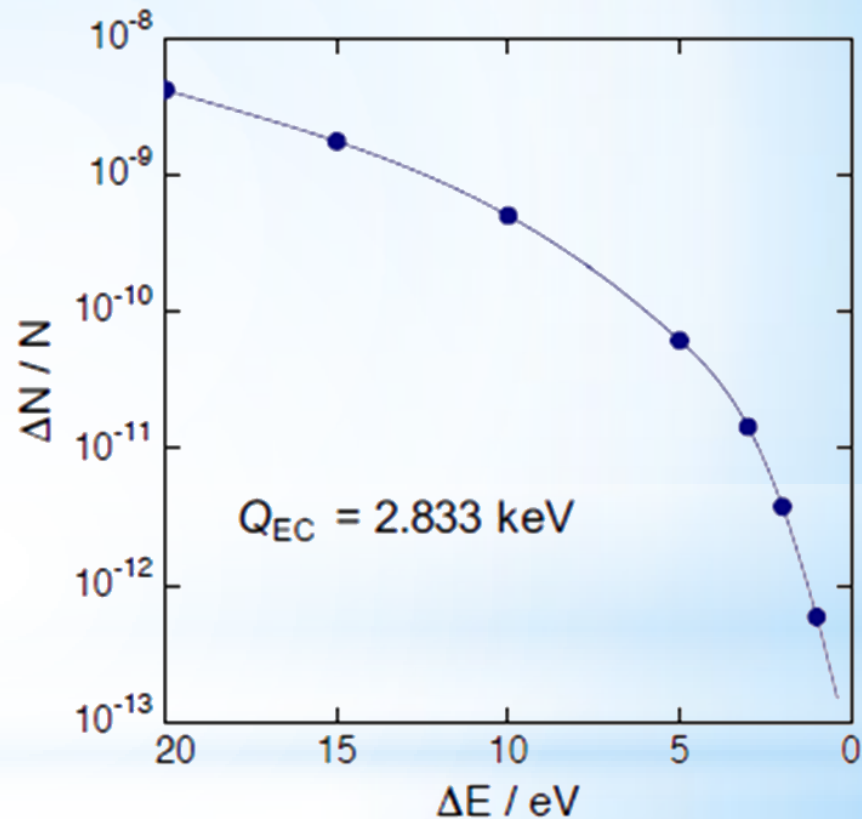
$$T_{1/2} = 4\,570(25) \text{ лет}$$

($2 \cdot 10^{11}$ атомов для 1 Бк)

Q-значение: 2 833(32) эВ *

* S.Eliseev *et al.*, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 062501

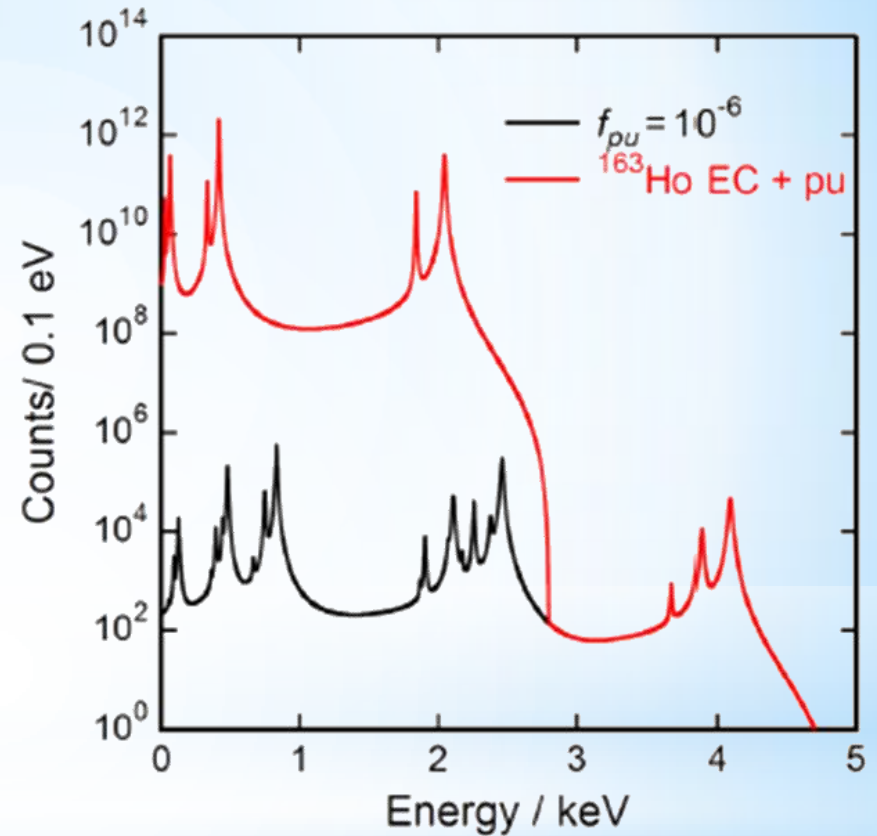
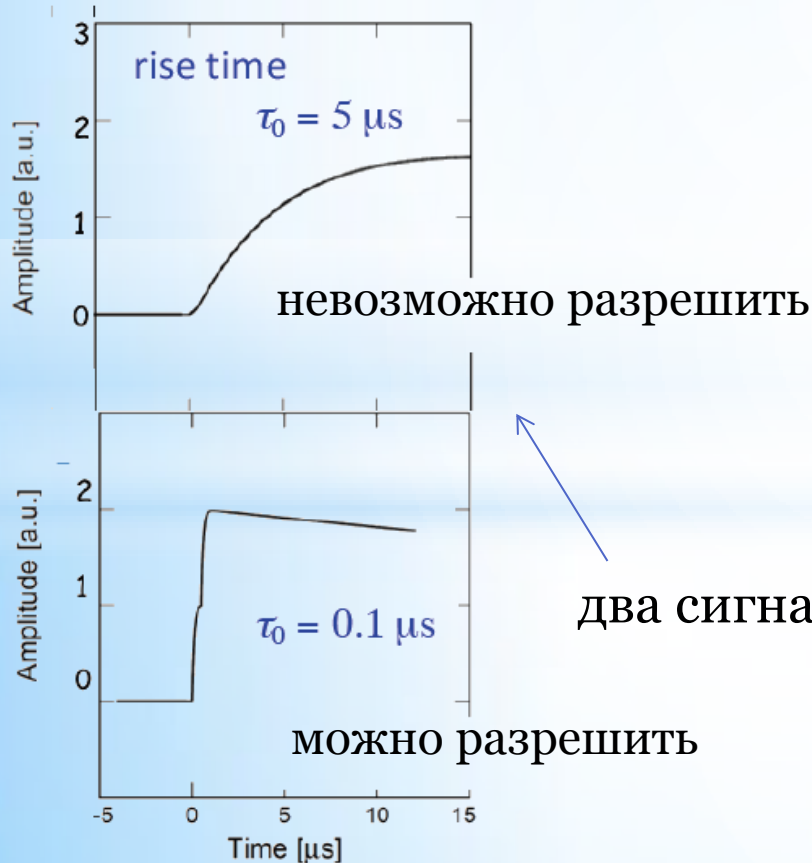
Доля распадов вблизи
граничной энергии спектра



В последнем 1-эВ интервале
всего $6 \cdot 10^{-13}$ распадов \rightarrow
 \rightarrow нужно $>10^{14}$ распадов в
полном спектре

ЭВ чувствительность к m_ν

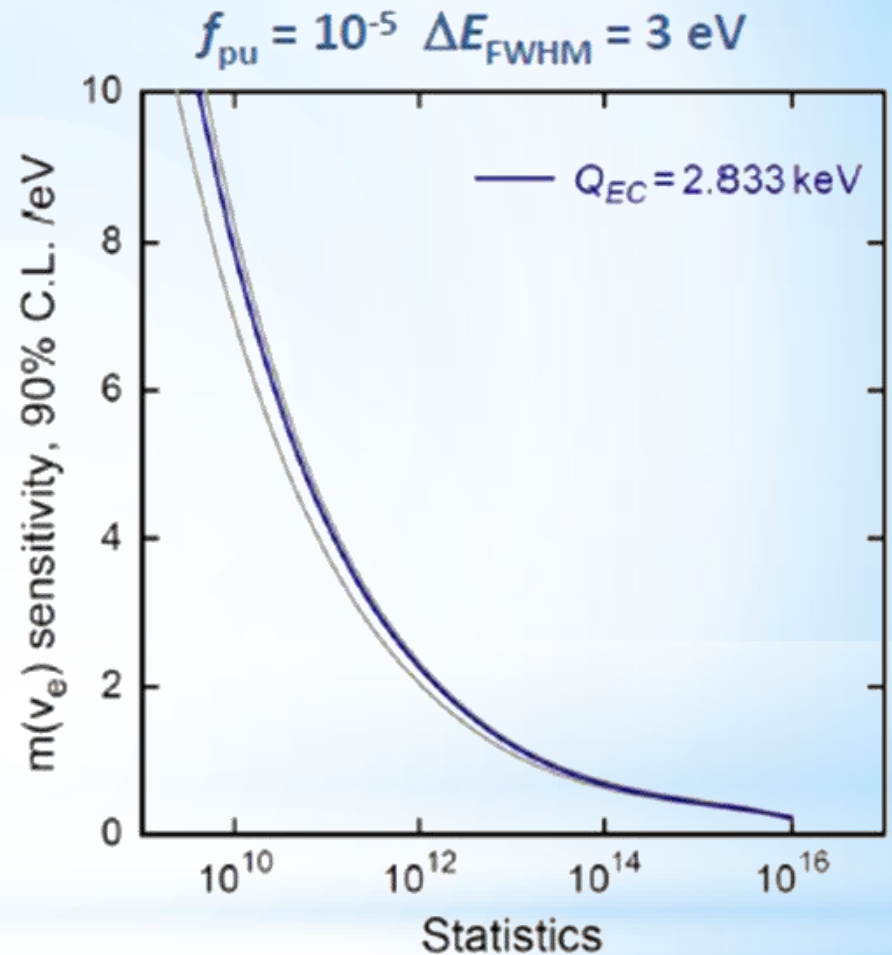
- Для достаточной статистики вблизи граничной энергии нужно $N_{\text{total}} > 10^{14}$ распадов
- Доля не разрешенных наложений $f_{pu} < 10^{-6}$



два сигнала отстоят на 0.5 мкс друг от друга

эВ чувствительность к m_{ν}

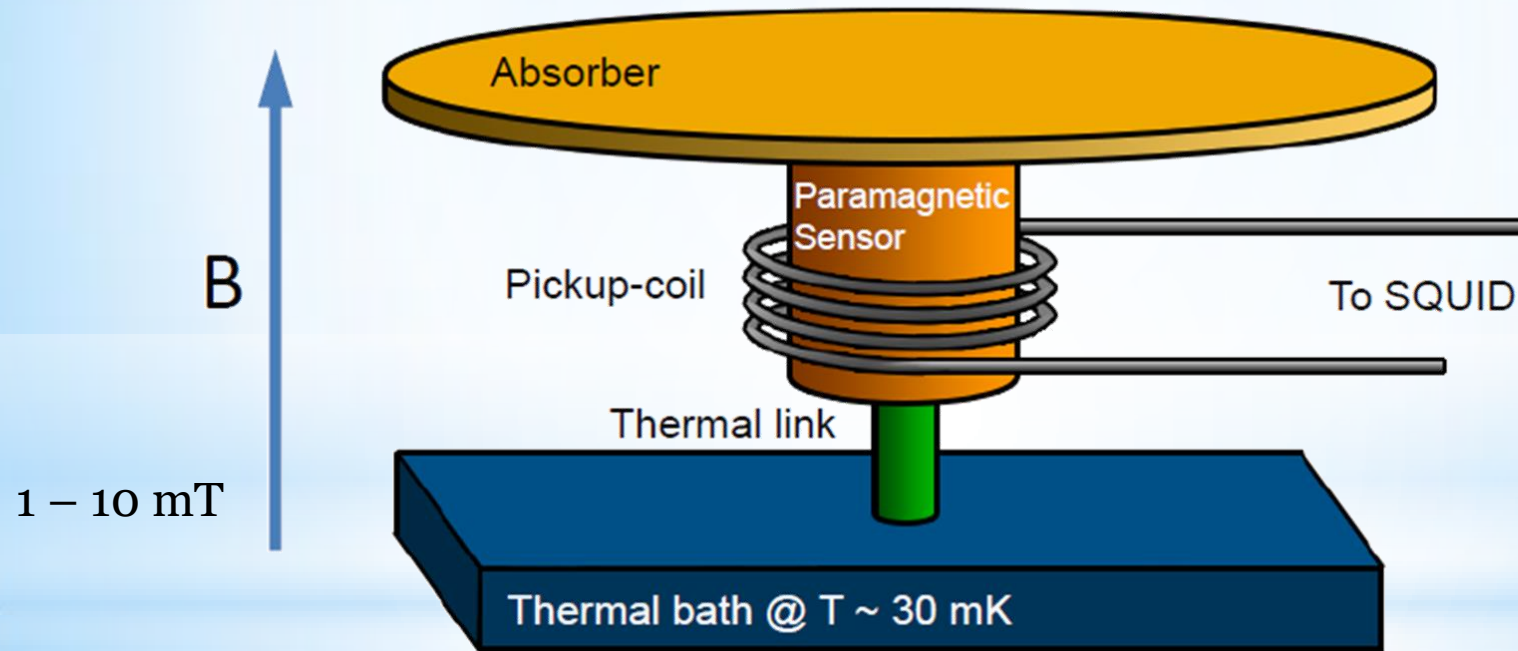
- Для достаточной статистики вблизи граничной энергии нужно $N_{\text{total}} > 10^{14}$ распадов
- Доля не разрешенных наложений $f_{\text{pu}} < 10^{-6}$ ($A = 10$ Бк, $\tau_0 < 100$ нс) \rightarrow $\rightarrow 10^5$ детекторов
- Энергетическое разрешение детектора $\Delta E_{\text{FWHM}} < 3$ эВ



Всем этим требованиям удовлетворяет
Металлический Магнитный Калориметр
(Metallic Magnetic Calorimeter)

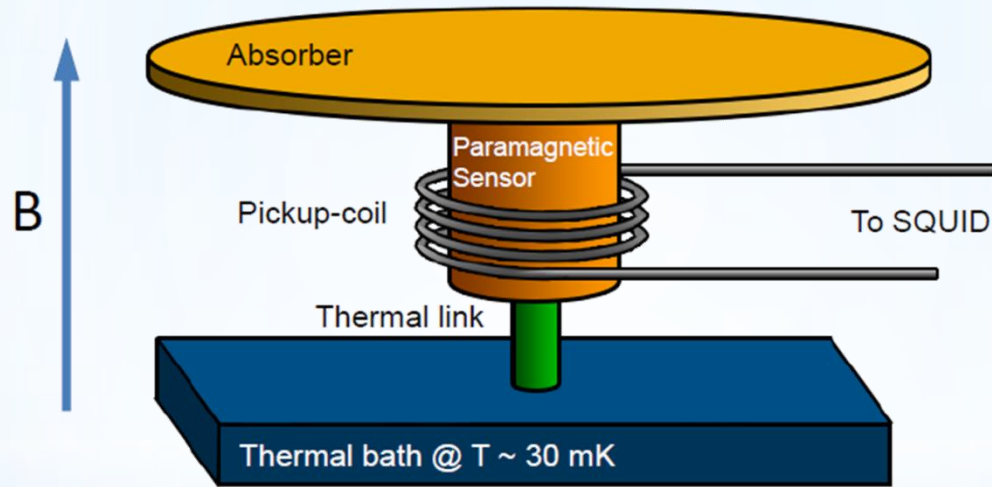
Металлический Магнитный Калориметр: принцип работы

$$\Delta T \sim \Delta M \sim \Delta \varphi \sim \Delta U \sim \Delta E$$

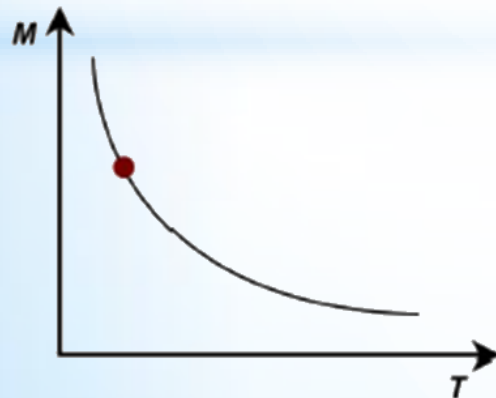


Металлический Магнитный Калориметр: принцип работы

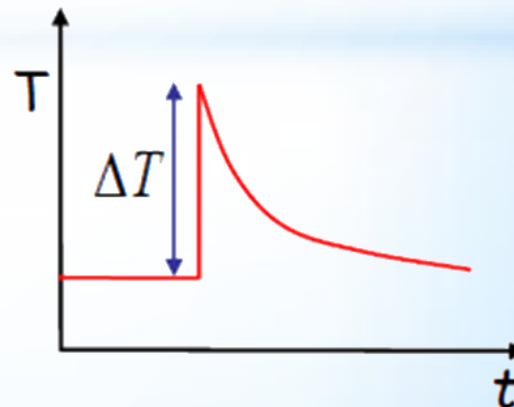
$$\Delta T \sim \Delta M \sim \Delta \phi \sim \Delta U \sim \Delta E$$



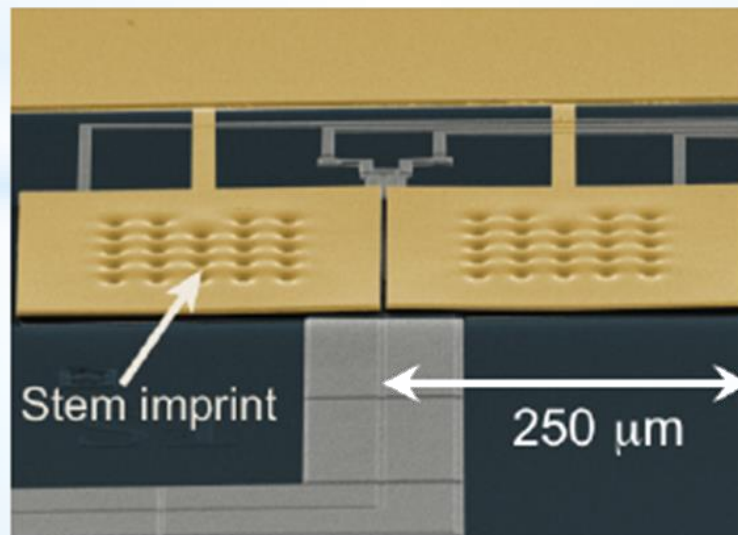
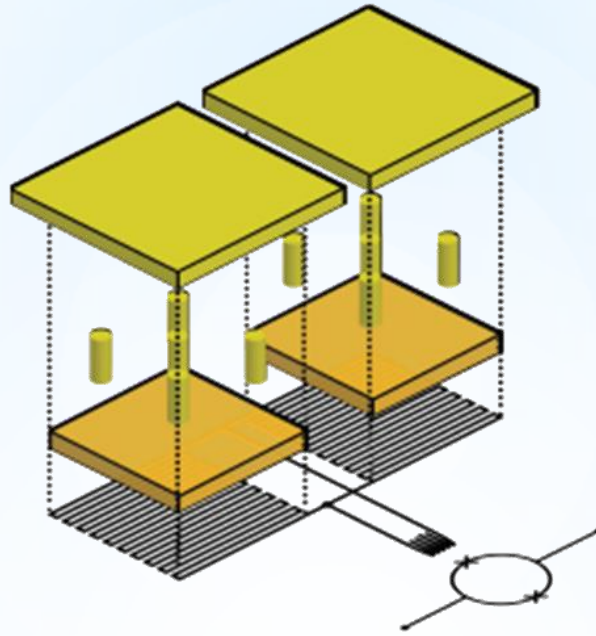
Sensor magnetization



Signal shape



Металлический Магнитный Калориметр: принцип работы

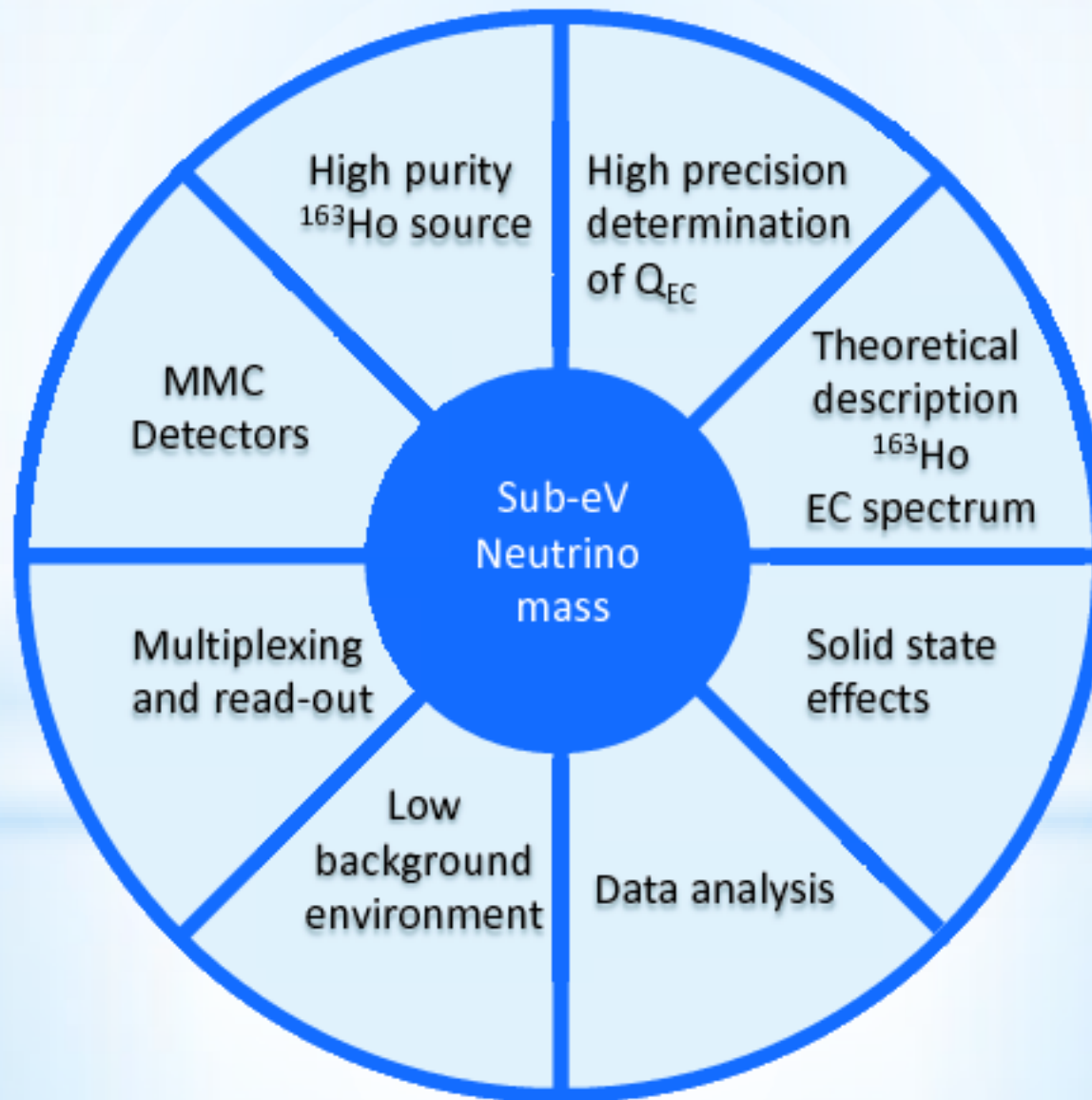


Основные параметры ММС детектора в ЕСНО

характеристика	значение
t° криостата	~ 10 mK
ΔE_{FWHM}	2 эВ @ 6 кэВ
Нелинейность детектора	< 1% @ 6 кэВ
Эффективность детектора	> 99% @ 6 кэВ
Время нарастания сигнала	~ 80 нс
Размер пикселя	250 x 250 x 10 μ m

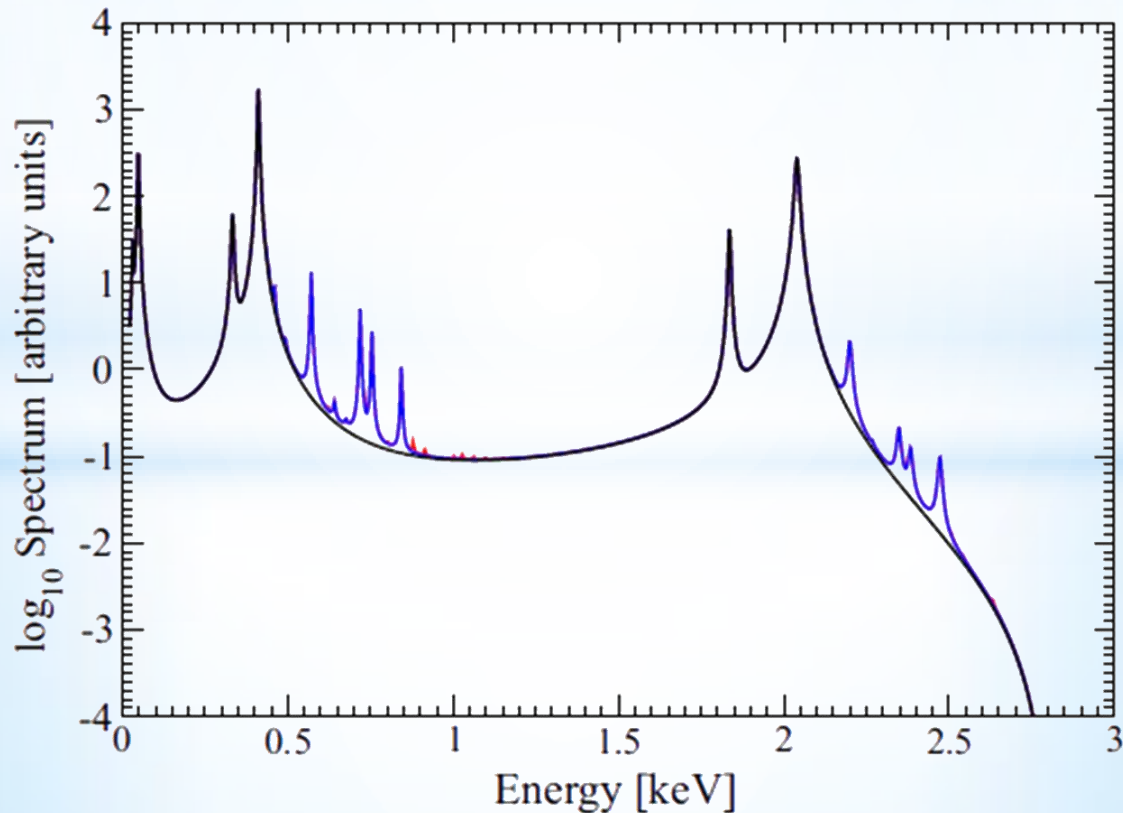
(измерения проводились на ^{55}Mn , K_{α})

Проект ЕСНО: основные трудности на пути к цели



Фитирование полного спектра для определения массы нейтрино

$$\frac{dN}{dE_C} = A(Q_{EC} - E_C)^2 \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2}{(Q_{EC} - E_C)^2}} \sum C_H n_H B_H \phi_H^2(0) \frac{\frac{\Gamma_H}{2\pi}}{(E_C - E_H)^2 + \frac{\Gamma_H^2}{4}}$$

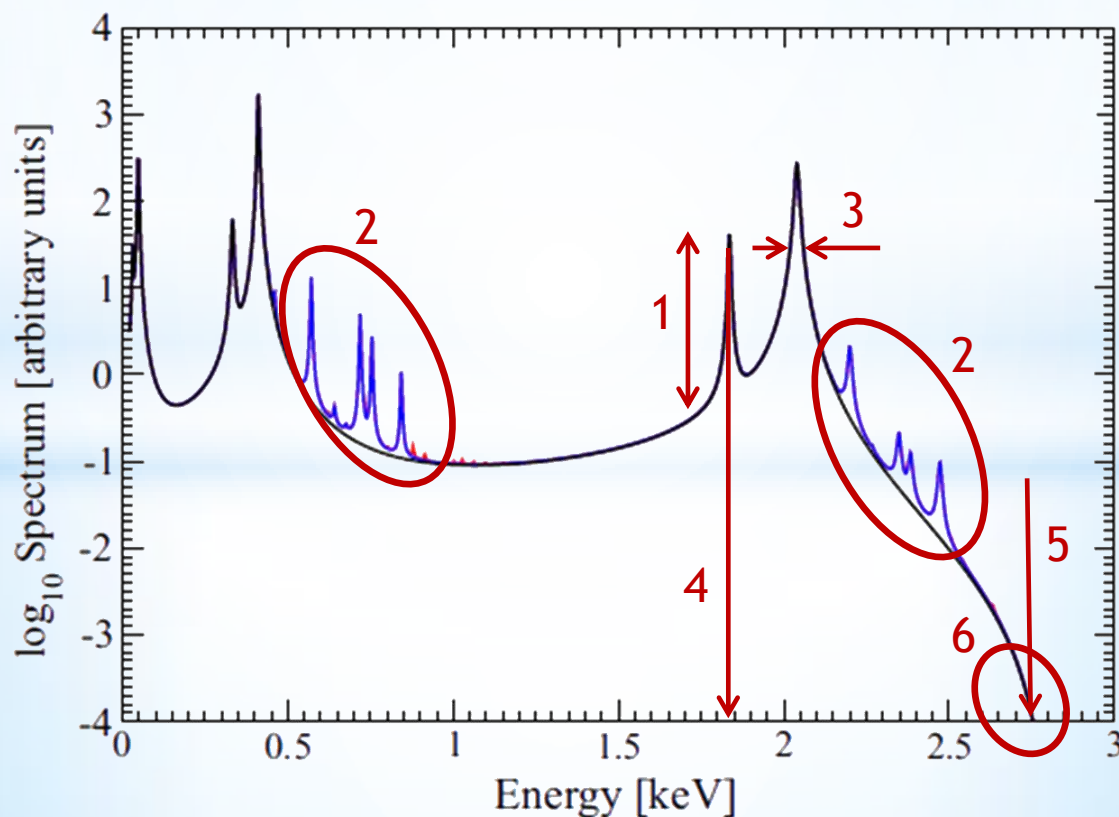


Фитирование полного спектра для определения массы нейтрино

- 1) Атомные волновые функции электронов ~ амплитуды пиков
- 2) Атомные эффекты высших порядков
- 3) Естественные ширины пиков
- 4) Энергии связи электронов ~ положение пиков
- 5) **Граничная энергия спектра**
- 6) Масса нейтрино

Фон

Pile-ups



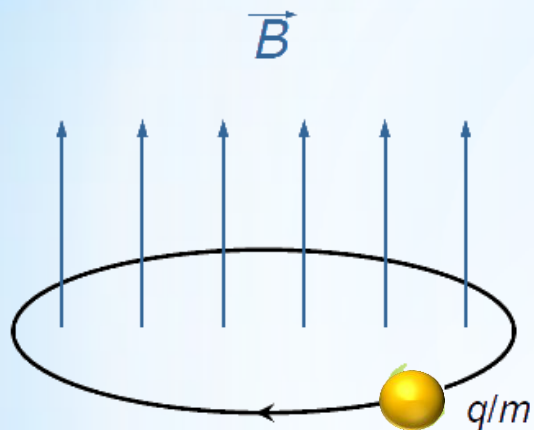
Фитирование полного спектра для определения массы нейтрино

- Граничная энергия спектра –
 - должна быть измерена независимо,
как важнейший из параметров!
- Граничная энергия спектра = разница масс атомов ^{163}Ho и ^{163}Dy
(Q -значение) за вычетом массы нейтрино
- Для достижения эВ чувствительности на m_ν
 Q -значение должно быть измерено с точностью < 1 эВ
- Q -значение с точностью < 1 эВ означает относительную точность определения масс $< 10^{-11}$ → достижимо только ловушками Пеннинга

Принцип действия ловушки Пеннинга

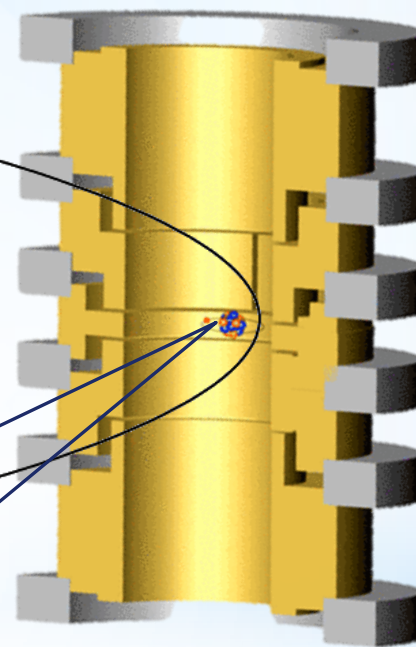
Однородное магнитное поле

Квадрупольное электрическое поле

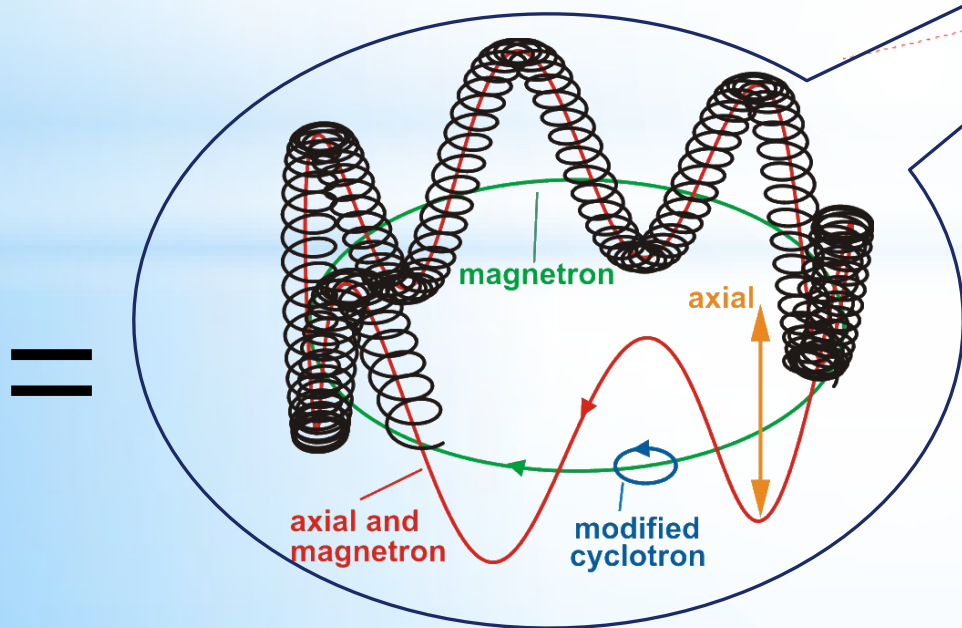


$$v_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} B$$

+



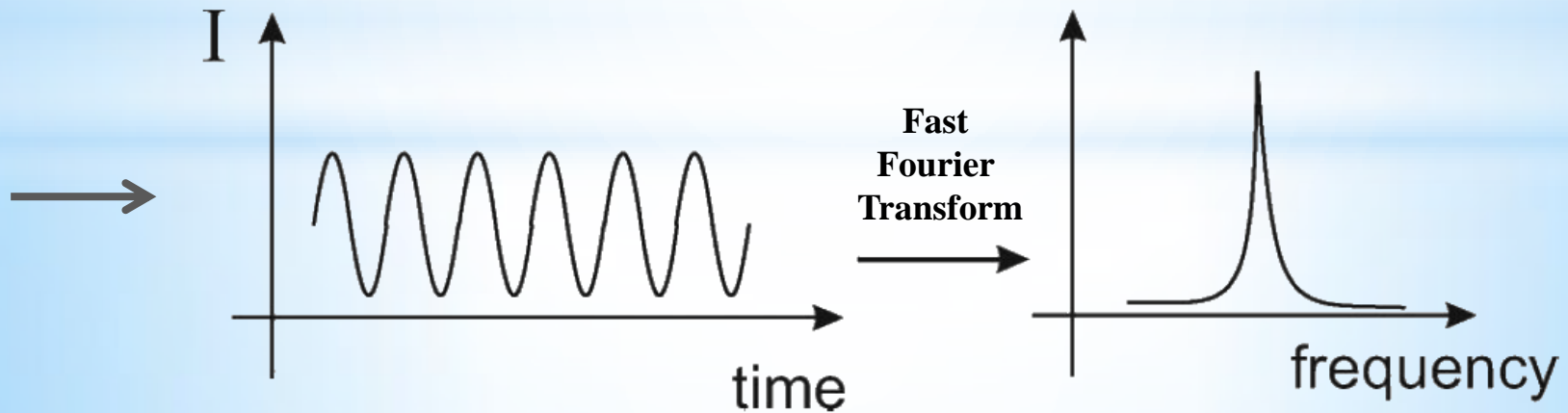
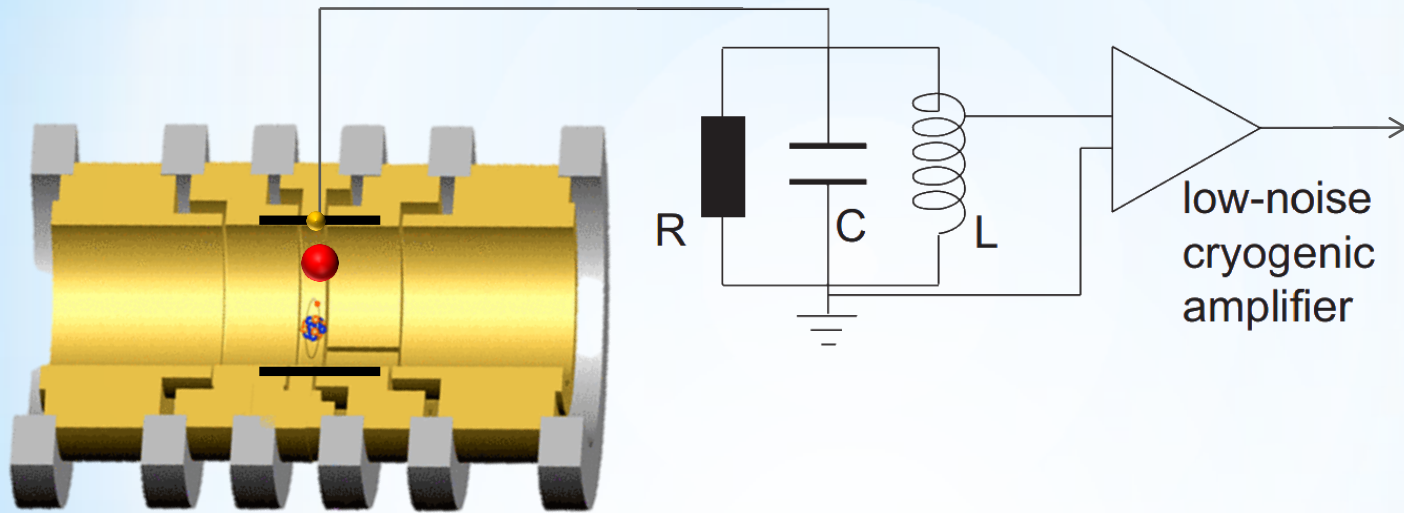
=



$$v_c^2 = v_+^2 + v_-^2 + v_z^2$$

Принцип действия ловушки Пеннинга

Самый точный способ определения частот: метод FT-ICR



Масс-спектрометр «PENTATRAP»

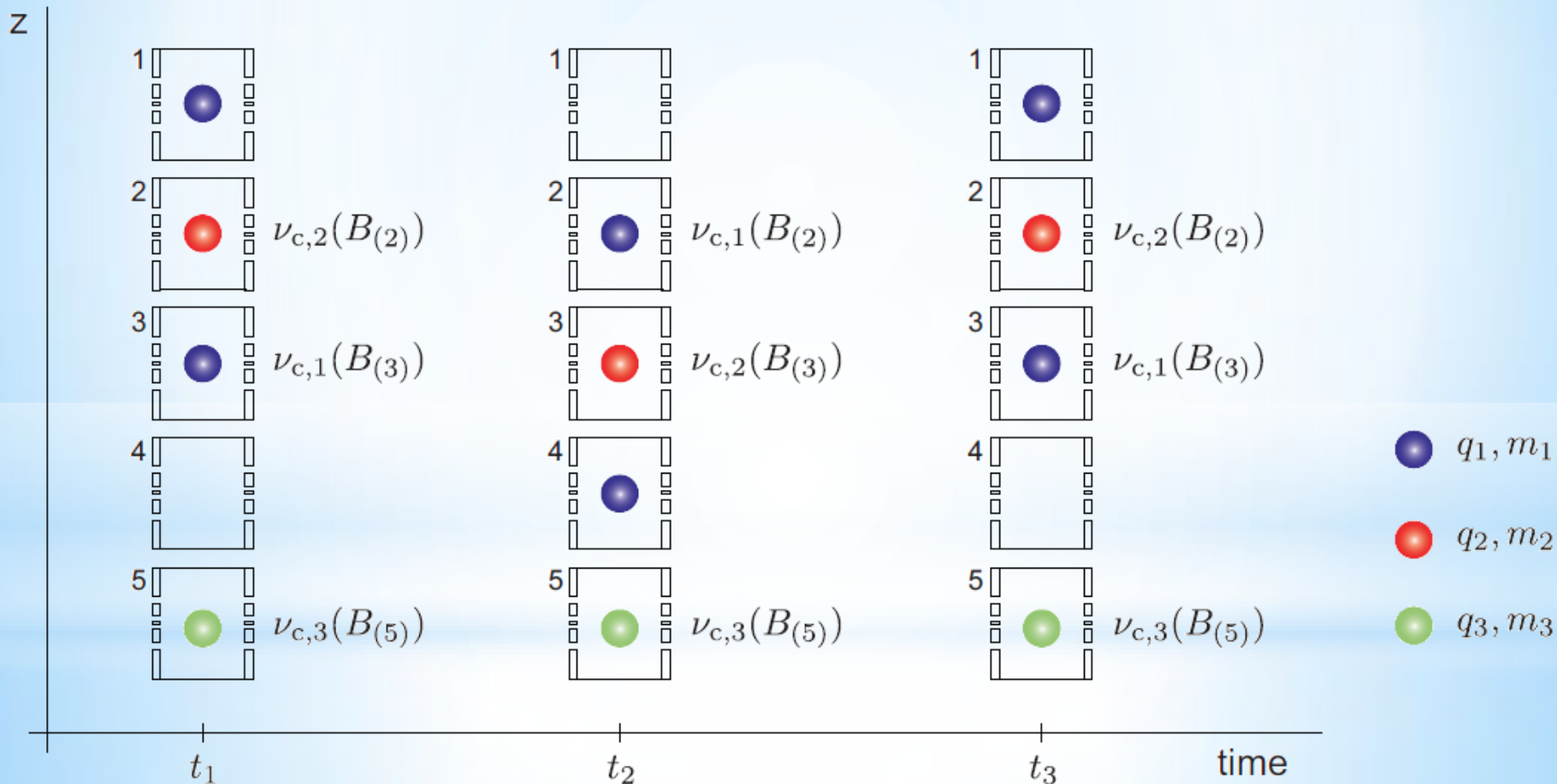
Цель: измерение масс ^{163}Ho и ^{163}Dy
с относительной точностью $< 10^{-11}$

Требования к масс-спектрометру:

- ✓ Стабилизация вибраций, давления и температуры вокруг магнита
- ✓ Однородность магнитного поля $\Delta B/B$ в 1 см^3 : $2 \cdot 10^{-6}$
- ✓ Стабильность магнитного поля $\Delta B/B$: 10^{-8} /час
- ✓ Криогенные температуры (для электроники и резонаторов)
- ✓ Высоко стабильные источники напряжения
- ✓ Допуски на размеры электродов ловушек $5 \text{ }\mu\text{m}$
- ✓ Использование высоко зарядных единичных ионов
- ✓ Высокий вакуум ($< 10^{-14}$ мбар)

Масс-спектрометр «PENTATRAP»

Использование 5-тандемной ловушки и методики «пинг-понга» для минимизации влияний неоднородности и флуктуации магнитного поля

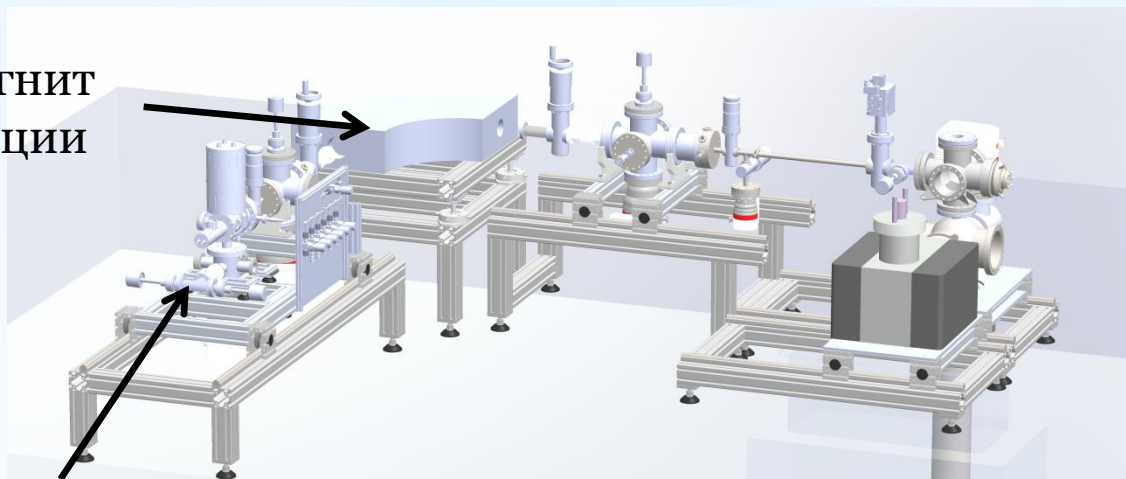


PENTATRAP →

- Относительная точность измерения масс $< 10^{-11}$
- Абсолютная точность измерения разности масс < 1 эВ

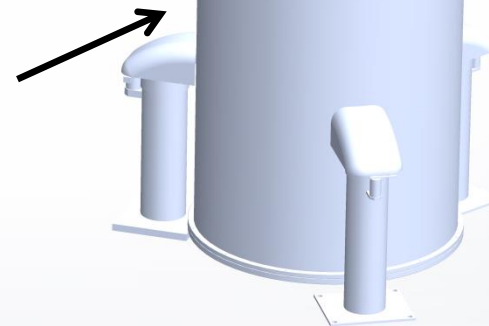
Масс-спектрометр «PENTATRAP»

Поворотный магнит
для масс сепарации

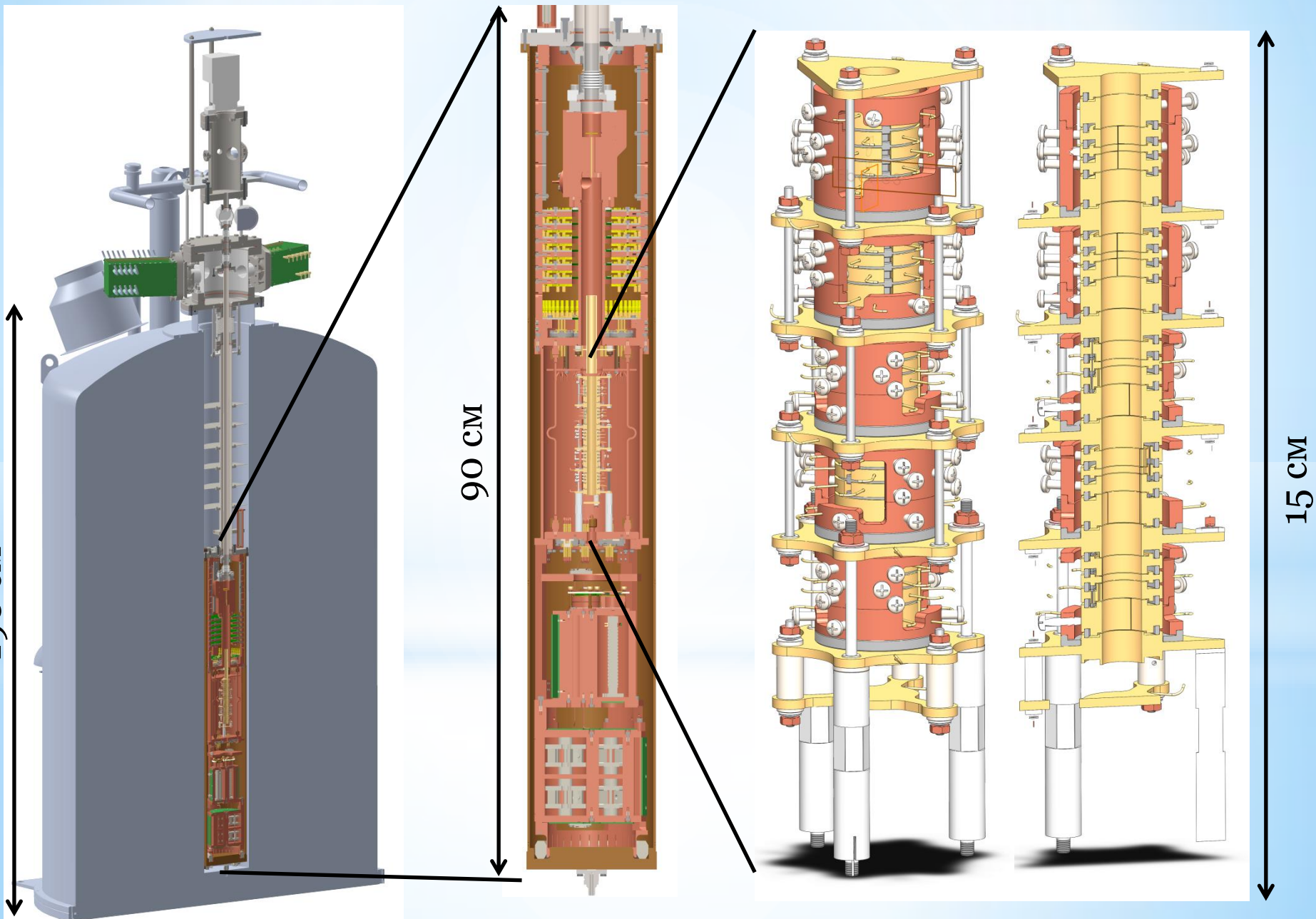


EBIT (Electron Beam Ion Trap)
для производства
высокозарядных ионов

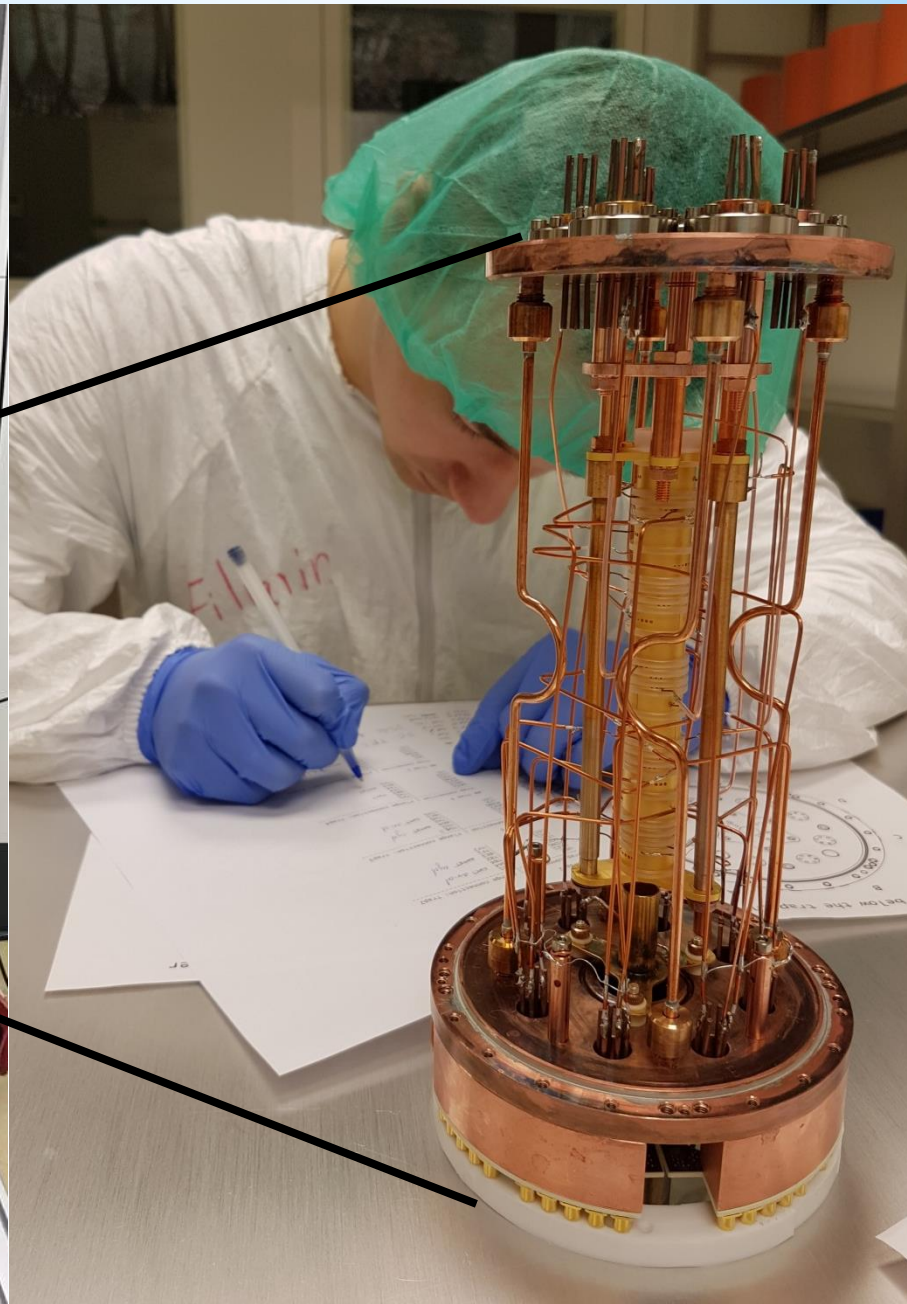
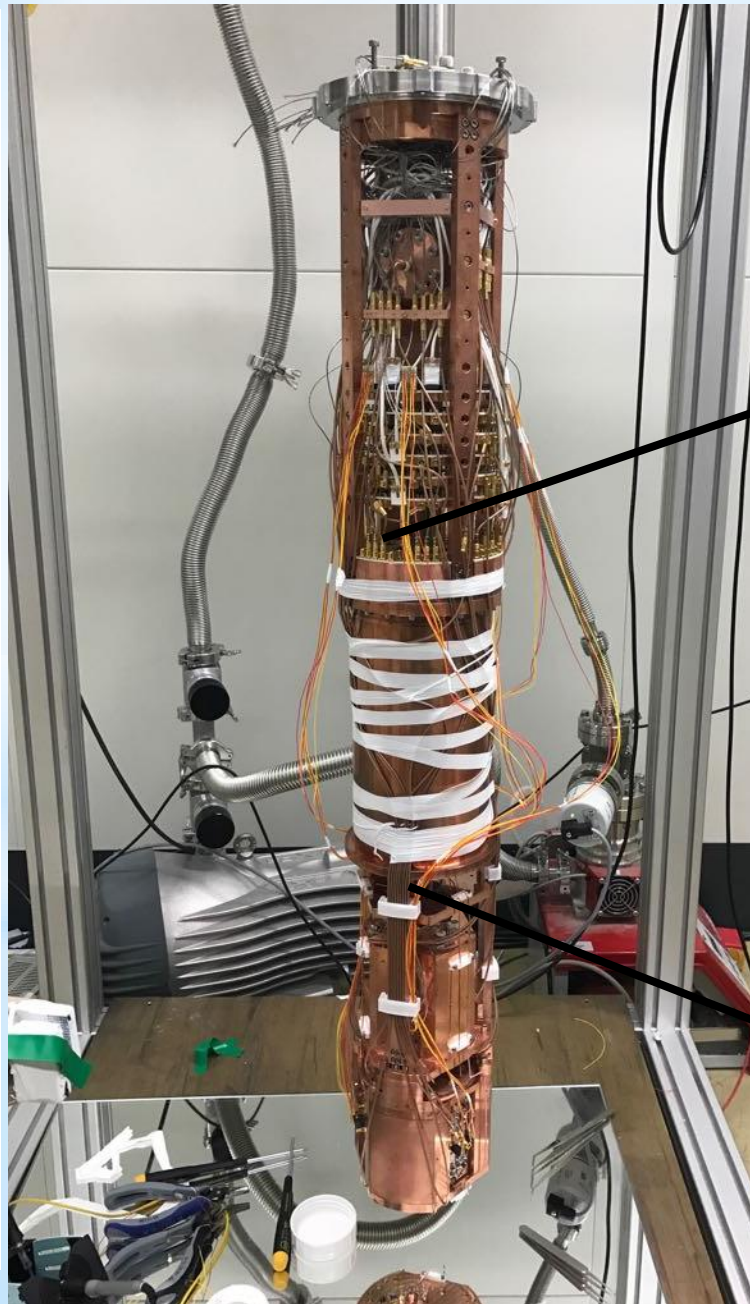
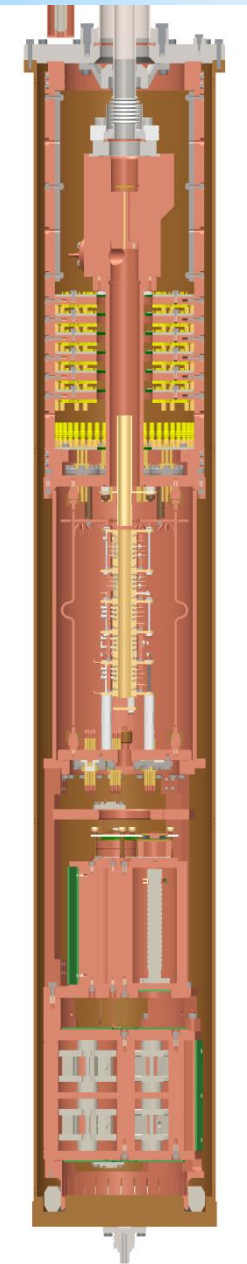
Сверхпроводящий
магнит 7 Тесла



Масс-спектрометр «PENTATRAP 2.0»



Масс-спектрометр «PENTATRAP 2.0»



Масс-спектрометр «PENTATRAP 2.0»

- Май 2017 → запуск PENTATRAP 2.0
- Май – Август 2017 → тестирование с ионами аргона
- Сентябрь 2017 → установка новой версии ловушек
- Конец 2017 → измерение систематических ошибок с ионами ^{187}Re
- 2018 → первые попытки измерения ^{163}Ho - ^{163}Dy



Спасибо за внимание!

