



*Разработка и испытание прототипа интегрального  
детектора электронов  $\beta$ -распада трития на основе  
цилиндра Фарадея.*

*А.И. Берлев, С.В. Задорожный, В.И. Парфенов, В.И.Разин,*

*Н.А.Титов\*, И.И.Ткачев, В.Г.Чернов*

*Институт ядерных исследований*

*Российской академии наук*

*Москва*

\* [titov@inr.ru](mailto:titov@inr.ru)

## Стерильные нейтрино с массой в диапазоне кэВ



- Стерильное нейтрино с массой в диапазоне нескольких кэВ стало лидирующим кандидатом на роль темной материи
- Отсутствие взаимодействия с обычной материей, за исключением гравитации и смешивания с левыми нейтрино в массовой матрице, хорошо согласуется с наблюдаемыми свойствами темной материи.
- Масштаб массы порядка кэВ особенно интересен, поскольку он заполняет пробел между тяжелыми "холодными" и более легкими "горячими" кандидатами на роль частиц темной материи, предлагая уникальное решение некоторых проблем, с которыми сталкиваются модели холодной темной материи в малых космологических масштабах.

M.Drewes et al., A White Paper on keV Sterile Neutrino Dark Matter, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2017, 01, 025

S.Dodelson and L.M.Widrow,  
Sterile-neutrinos as dark matter,"  
*Phys. Rev. Lett.* 1994, 72, 17

# Если стерильные нейтрино смешиваются с активными



PMNS-матрица (матрица Понтекорво — Маки — Накагавы — Сакаты)

$$\begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu'_1 \\ \nu'_2 \\ \nu'_3 \end{bmatrix}$$

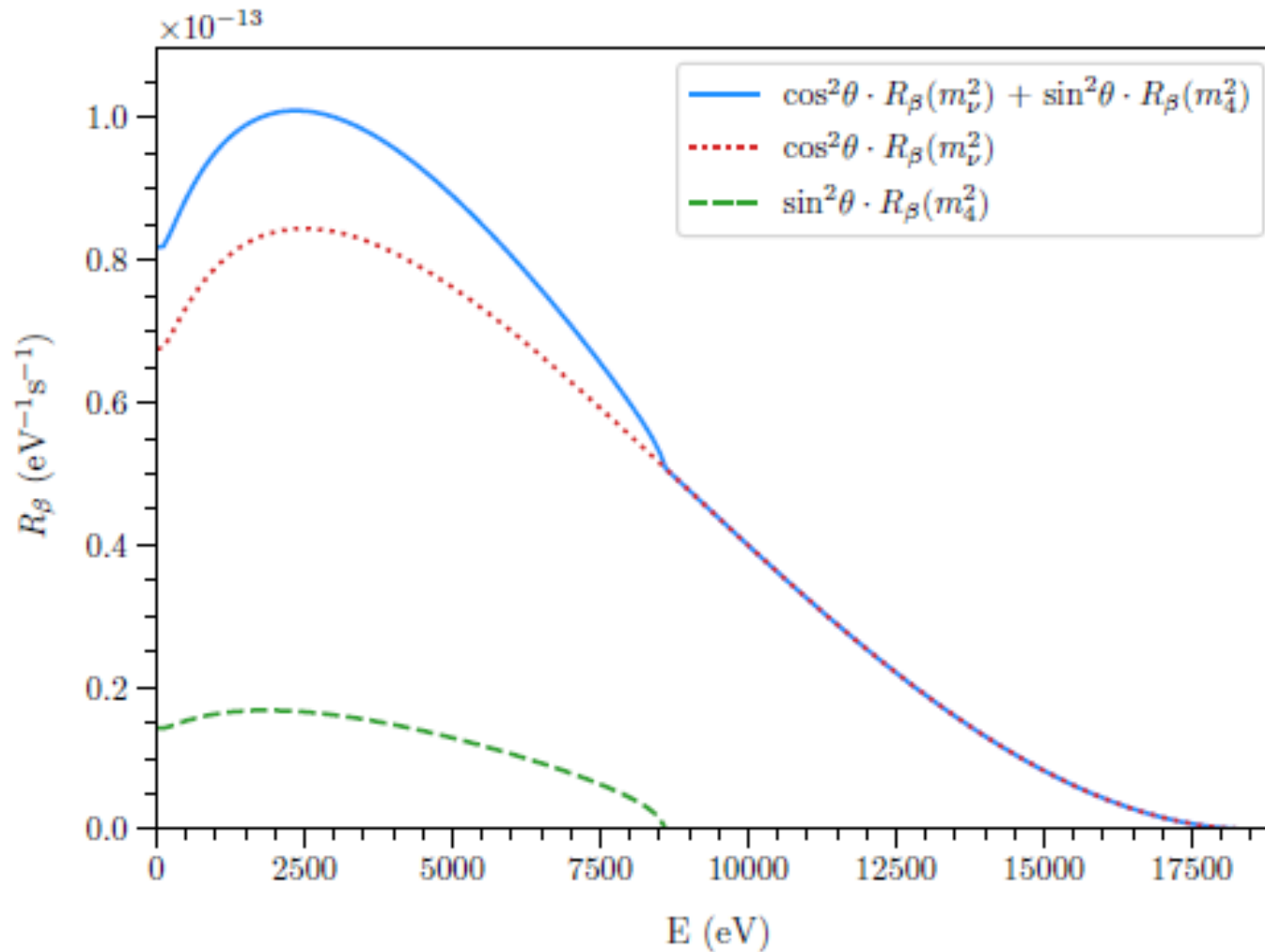
Становится матрицей (4x4) или (6x6)

Соответственно появляются дополнительные члены  
в спектре  $\beta$  – распада трития

$$\frac{d^2 N}{dE dt} = A \cdot \underbrace{F(E, Z + 1)}_{\text{ф-я Ферми}} \cdot \underbrace{p \cdot (E + m)}_{\text{Фазовый объем электрона}} \cdot \sum_j W_j \epsilon_j \cdot \underbrace{\left( \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot \sqrt{\epsilon_j^2 - m_i^2} \cdot \Theta(\epsilon_j - m_i) \right)}_{\text{Фазовый объем нейтрино}}$$

Матричный элемент = const      Спектр возбуждения дочернего иона

# Спектр $\beta$ -распада трития в случае примеси 4-го массового состояния



## Интегральный метод регистрации

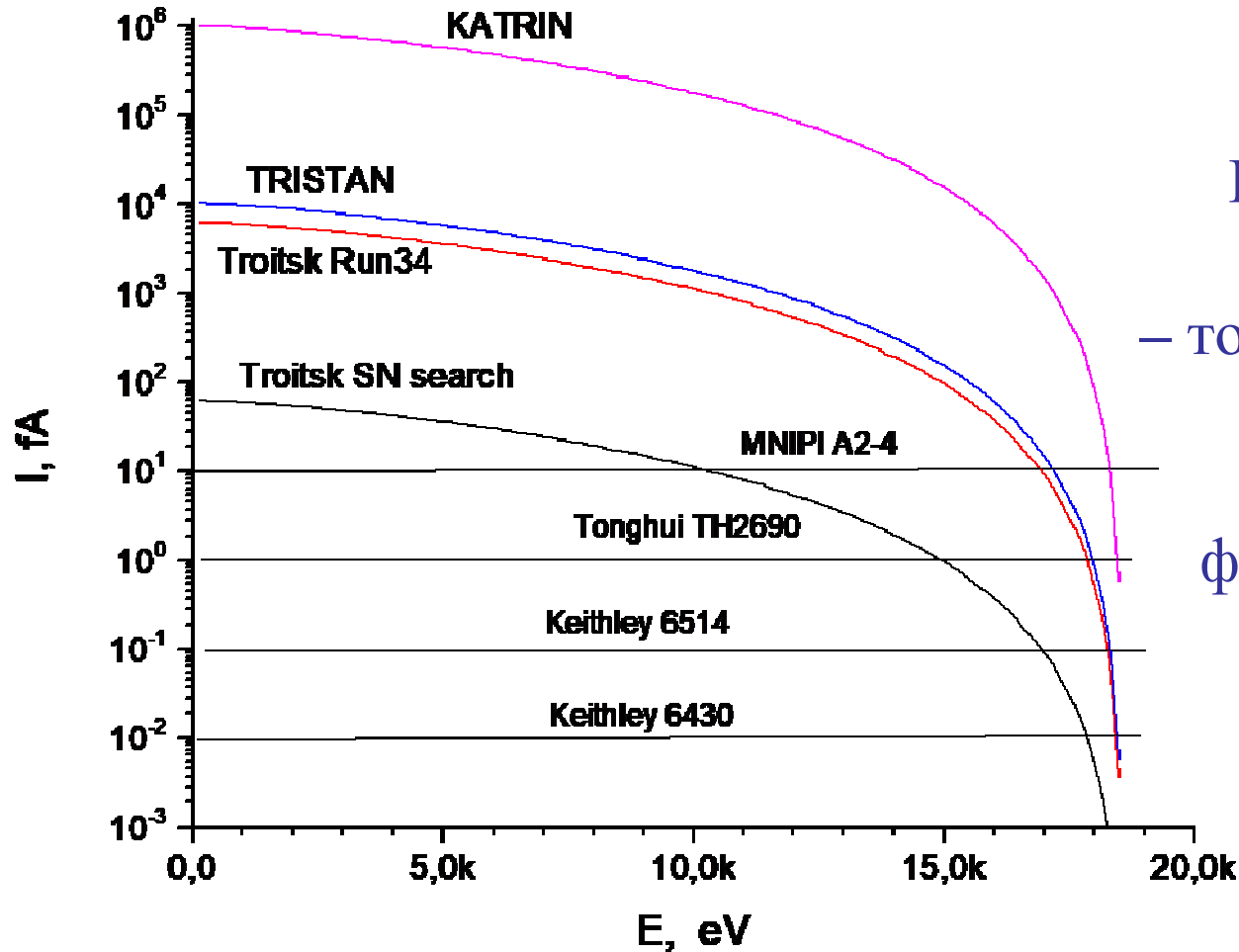


Наиболее интенсивные существующие источники трития установок «Троицк ню-масс» и КАТРИН позволяют изучать спектры  $\beta$ -распада при скорости счета до  $10^8 \dots 10^{10}$  электрон/с. В счетном, спектрометрическом режиме регистрация таких потоков невозможна и на практике приходится снижать интенсивность источника примерно на два порядка. Это ограничение снимается в методе интегральной регистрации, разработанным В.М.Лобашевым.

V.M.Lobashev. Parity non-conservation in the gamma decay of  $^{181}\text{Ta}$  Physics Letters 1967. 25, 104

Parity non-conservation in the gamma  $\beta$ - decay of  $^{41}\text{K}$ . Phys. Letters, 1969, 308. V.M.Lobashev, M.A.Lofovoy, V.A.Nazarenko., L.M.Smotritskii , G.I.Kharkevich

# Интенсивность источников трития «Троицк ню-масс» и КАТРИН



Горизонтальные  
линии  
– точность единичного  
измерения  
современных  
фемтоамперметров

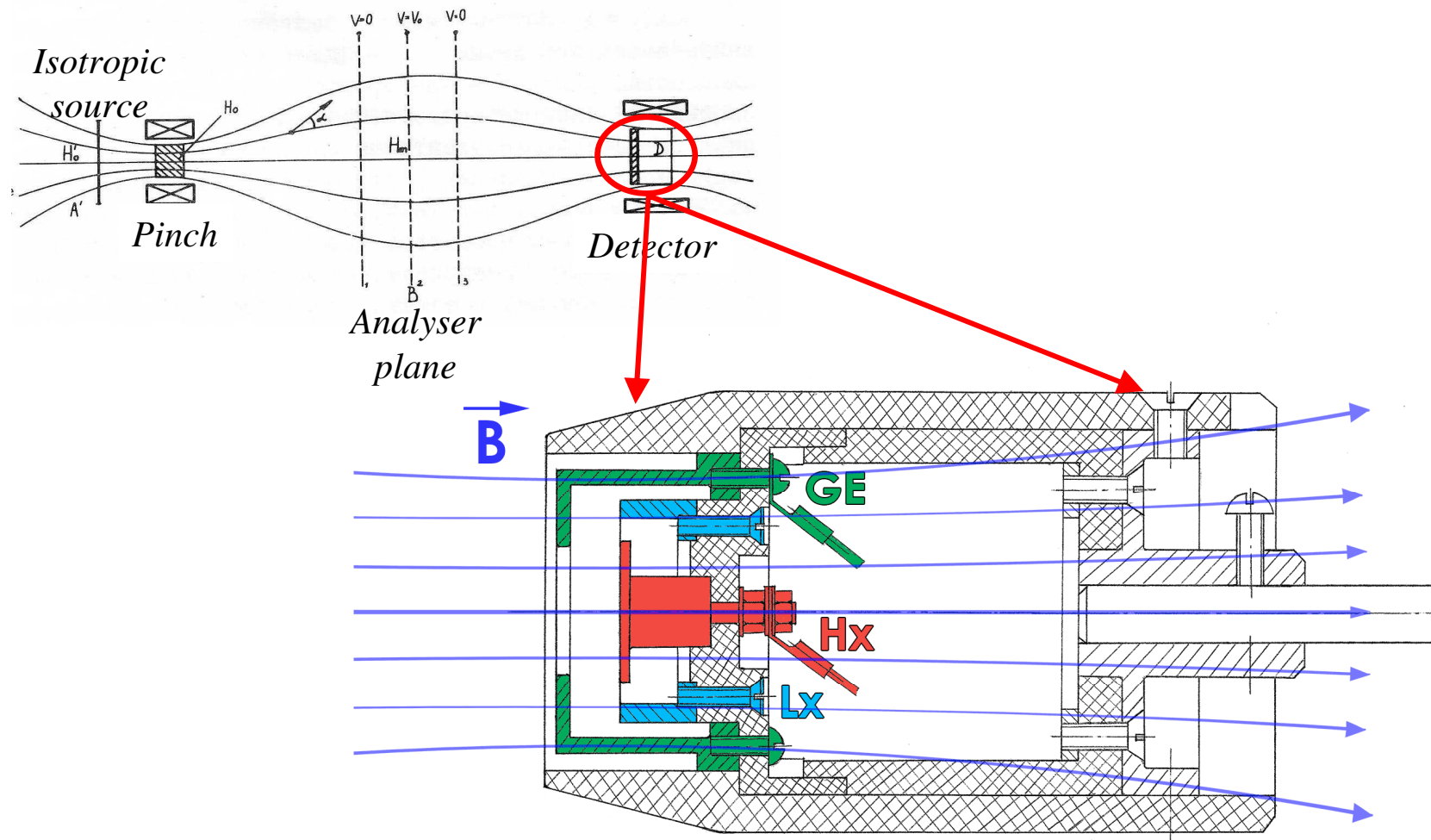
# Выбор детектора



Цилиндр Фарадея в качестве детектора был выбран по нескольким соображениям:

- В металле не приходится ожидать накопления зарядов, образования объемного заряда и искажения внутреннего электрического поля и, как следствие, дрейфа эффективности регистрации.
- Изменение потенциала детектора при изменении загрузки пренебрежимо мало по сравнению с энергией регистрируемых частиц и не должно как-то влиять на электростатику детектора.
- Цилиндр Фарадея прост по конструкции и не требует охлаждения, в том числе, до криогенных температур.

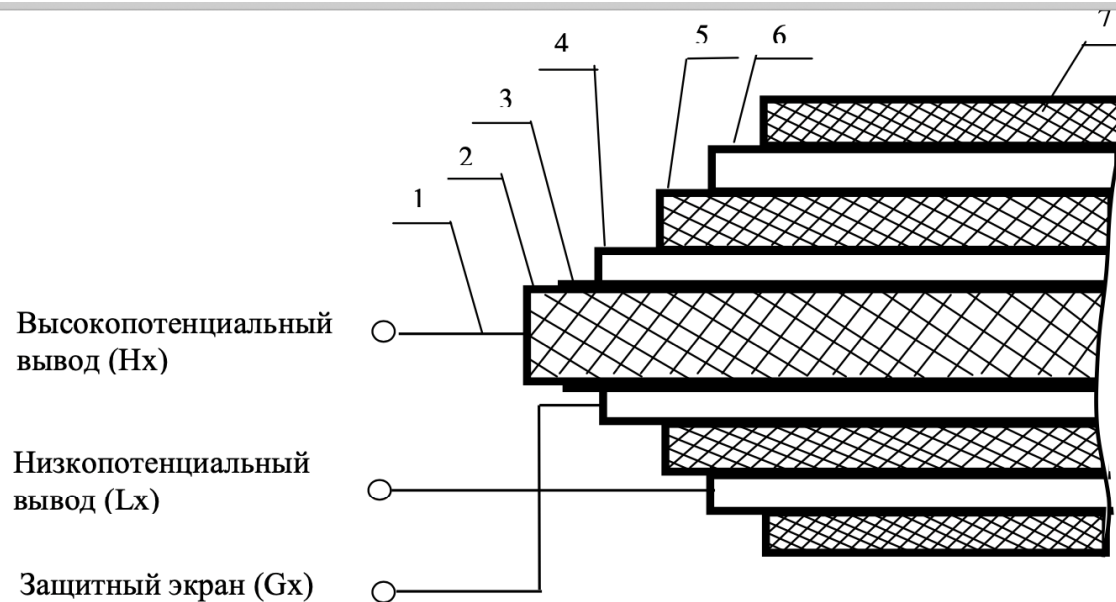
# Схема спектрометра с интегральным детектором





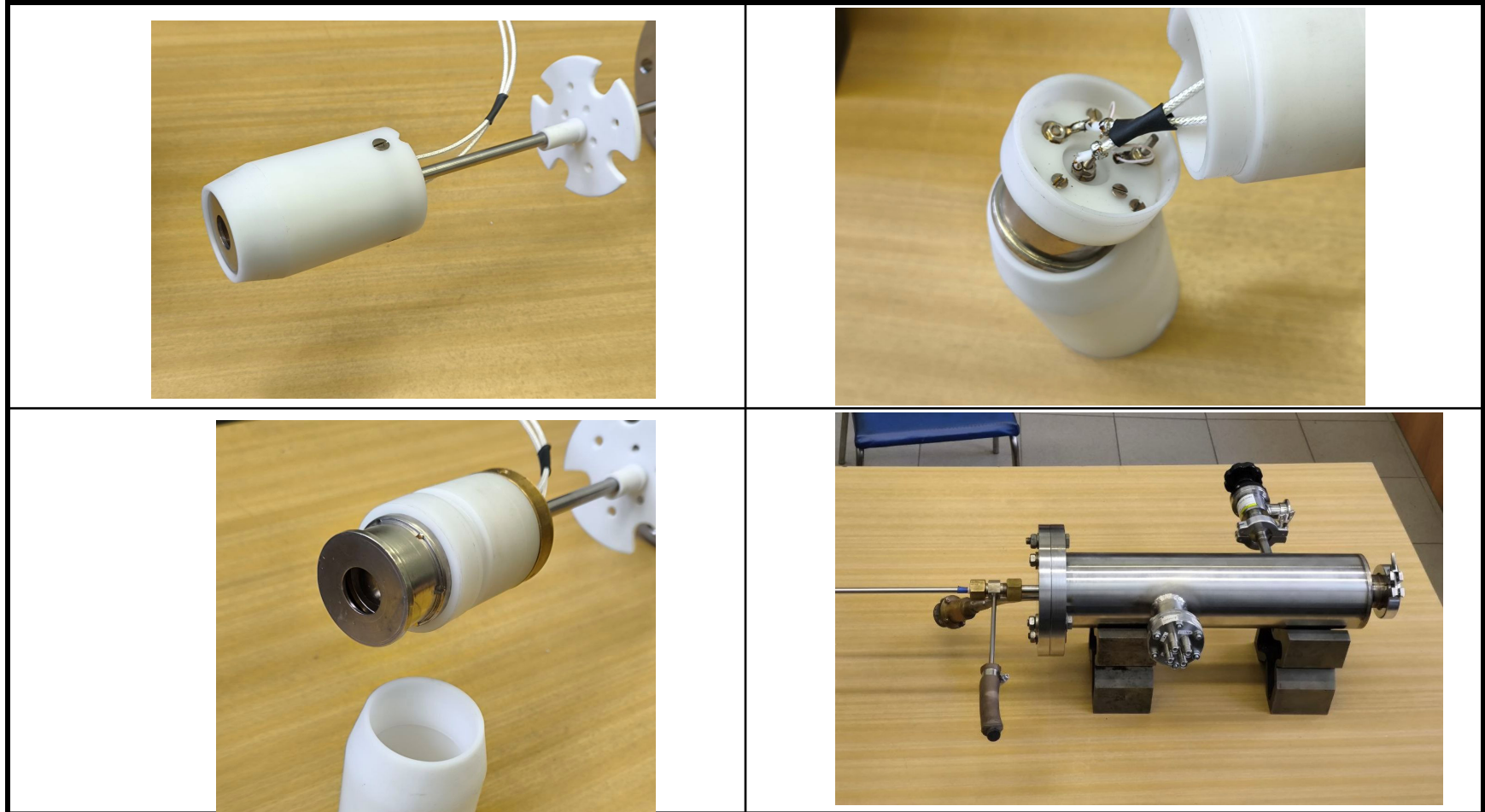
# Выбор кабеля

Триаксиальный кабель пикоамперметра А2-4 МНИПИ  
на основе низкошумящего кабеля АВК-6.  
АВК-6 или РК-50-2 ?

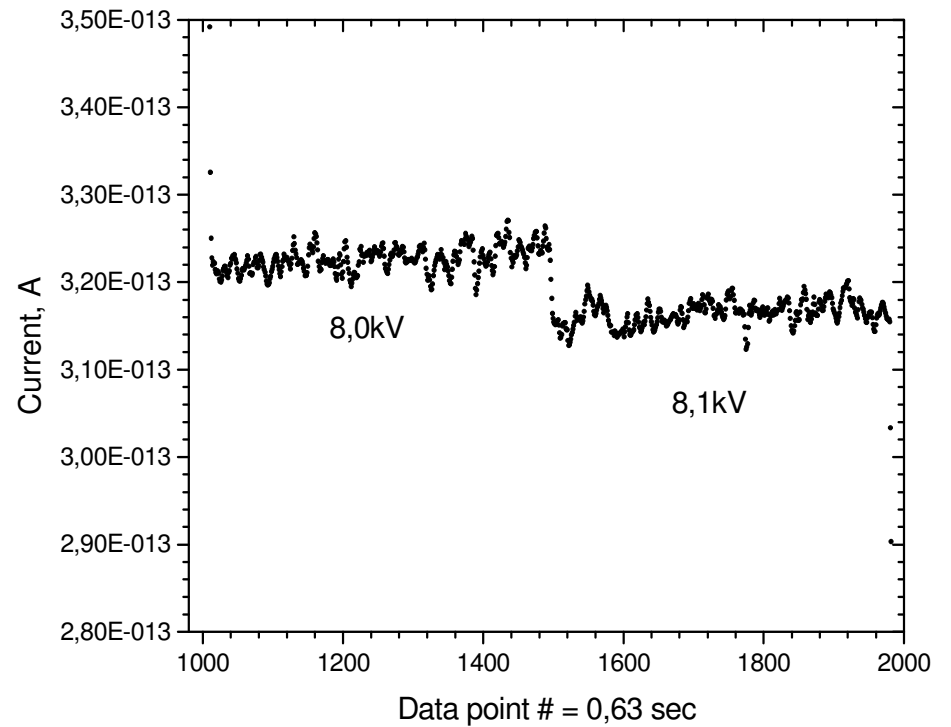
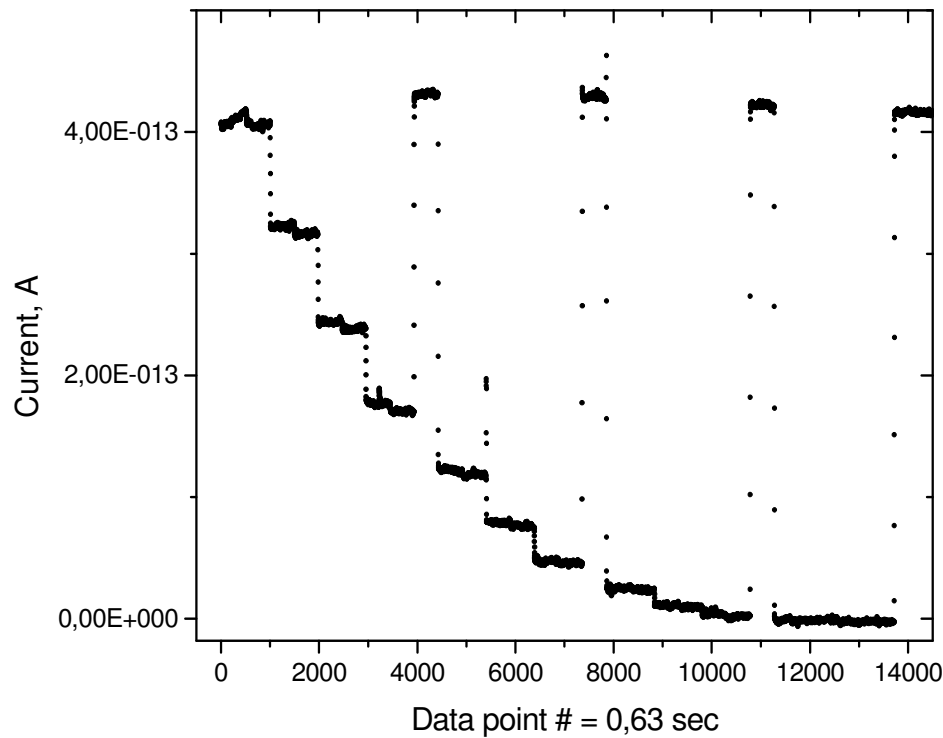


- 1 – центральная жила;
  - 2 – изоляция;
  - 3 – графитовый слой;
  - 4 – первый проводящий слой;
  - 5 – изоляция;
  - 6 – второй проводящий слой;
  - 7 – изоляция;
- (Нх), (Lx), (Gx) – цепи подключения источников сигнала.

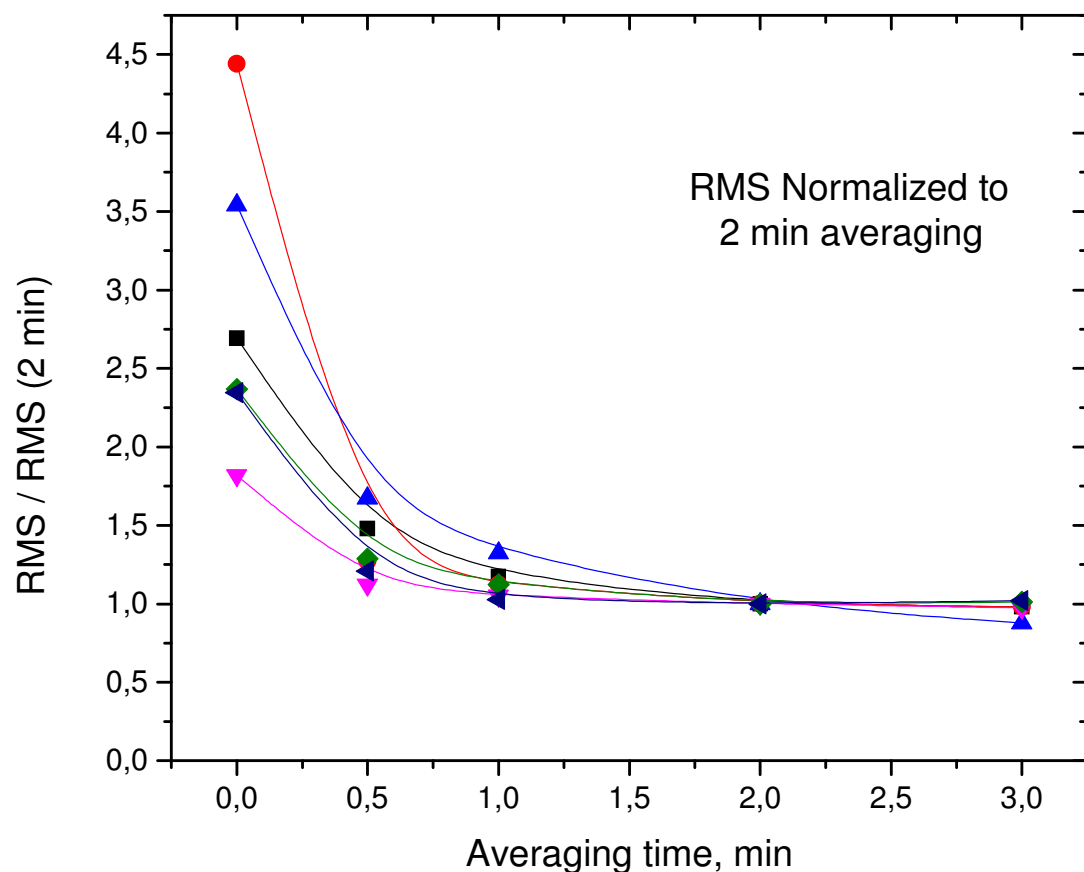
# Интегральный детектор



# Переходной процесс $\approx 4$ сек



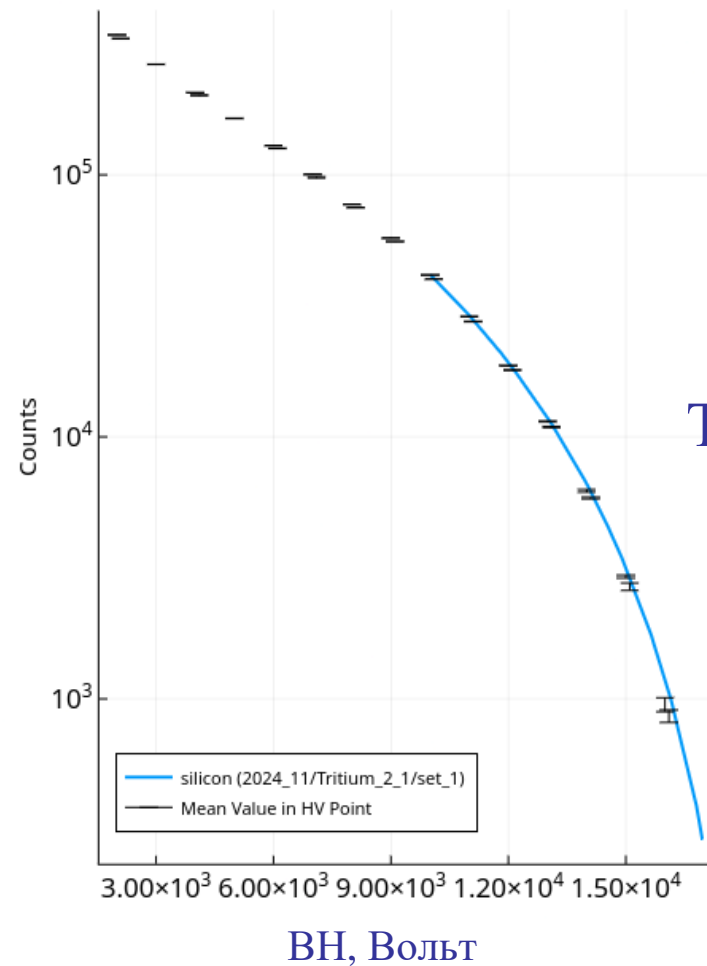
# Подавление не-Пуассоновского шума (выбор продолжительности измерений одной точки спектра)



Усреднение сигнала  
за время  $T$  срезает  
в спектре шумов  
сигнала частоты  
 $f > 1/T$

Допустима  
продолжительность  
измерений одной  
точки спектра  
начиная с 2 минут

# Сравнение кремниевого и интегрального детекторов

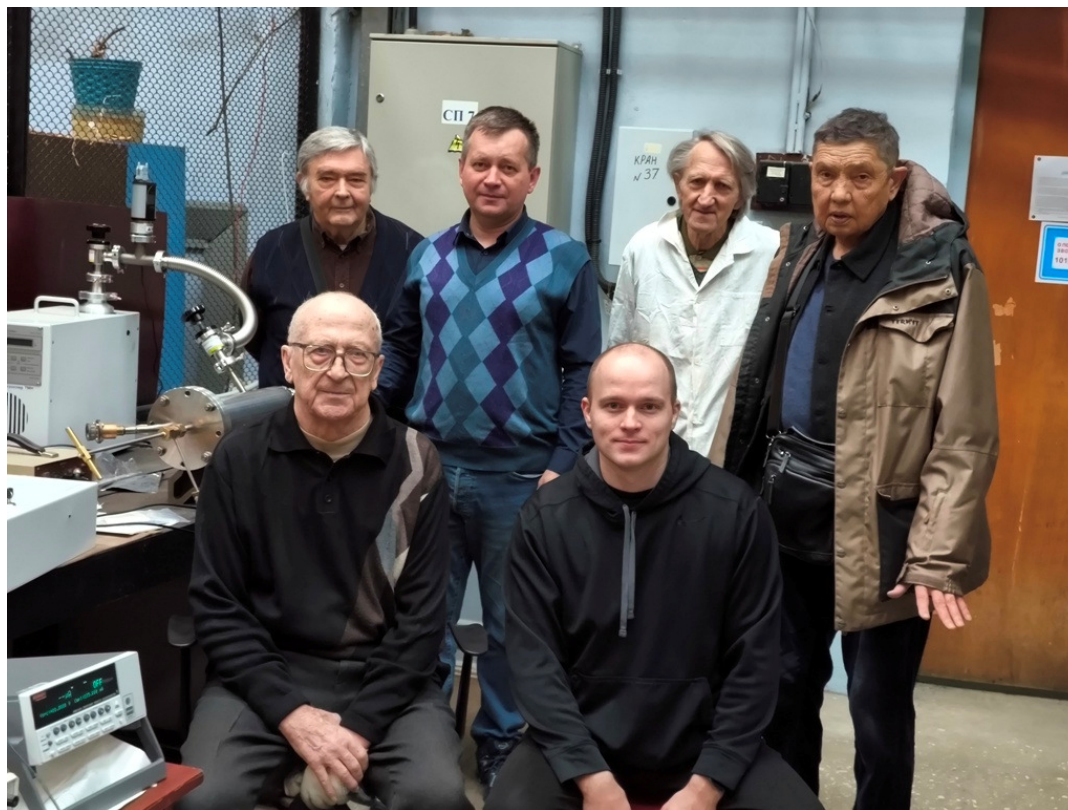


Линия – штатный кремниевый детектор  
Точки – цилиндр Фарадея

# Наши планы



В 2025 году провести одно- двухнедельный сеанс на установке «Троицк ню-масс» для моделирования применения интегрального подхода к поиску стерильных нейтрино в диапазоне масс до 10 кэВ

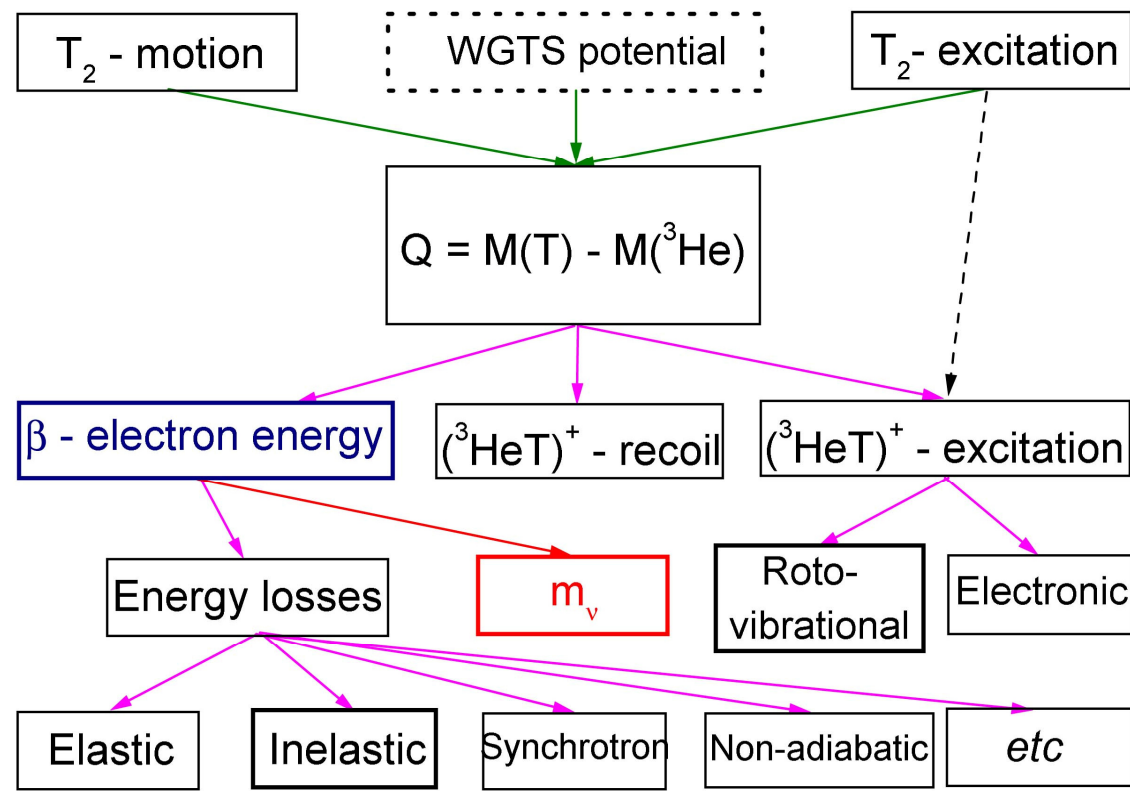
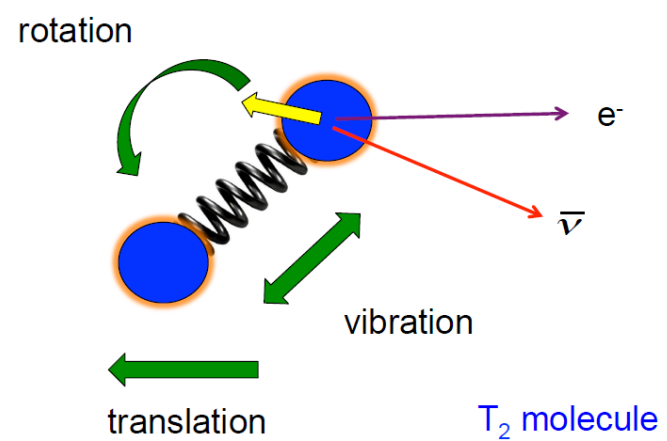


Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 70-летию В.А. Рубакова. 17 - 21 февраля 2025 г Москва



# Back-up slides

# Kinematic experiment - basics





# “Troitsk $\nu$ -mass” - Founders



Peter Spivak  
*24.03.1911 - 30.03.1991*

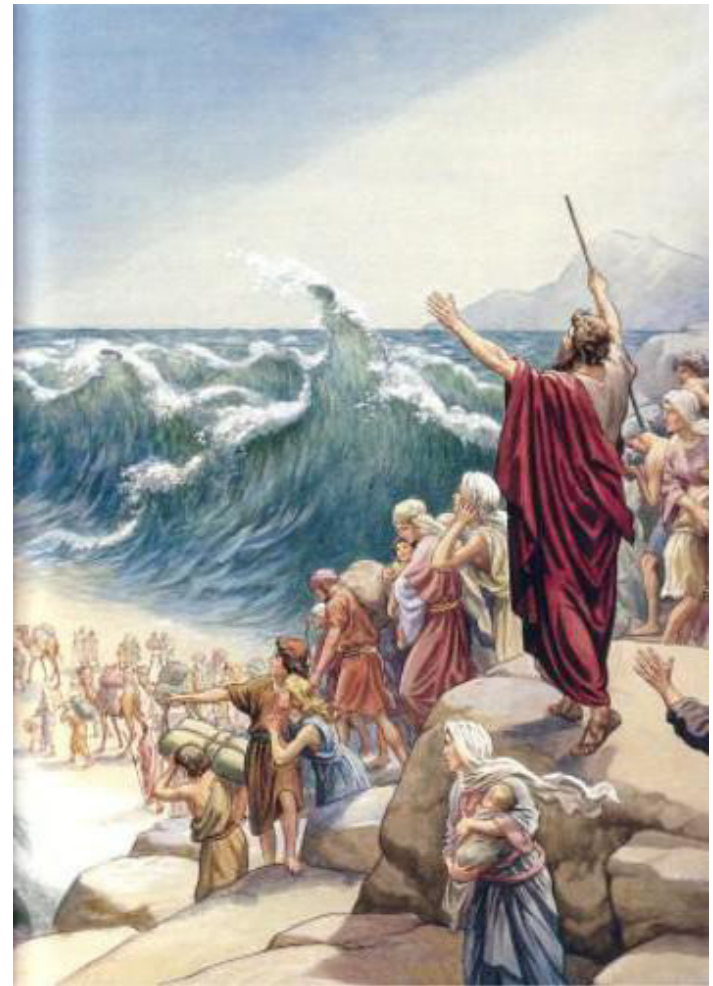


Vladimir Lobashev  
*29.07.1934 – 3.08.2011*



The Founders showed us a way  
we have followed for the last  
40 years:

Spectrometer resolution and  
Tritium source size  
became decoupled by an  
Electrostatic Spectrometer with  
Adiabatic Magnetic Collimation  
(MAC-E Filter)



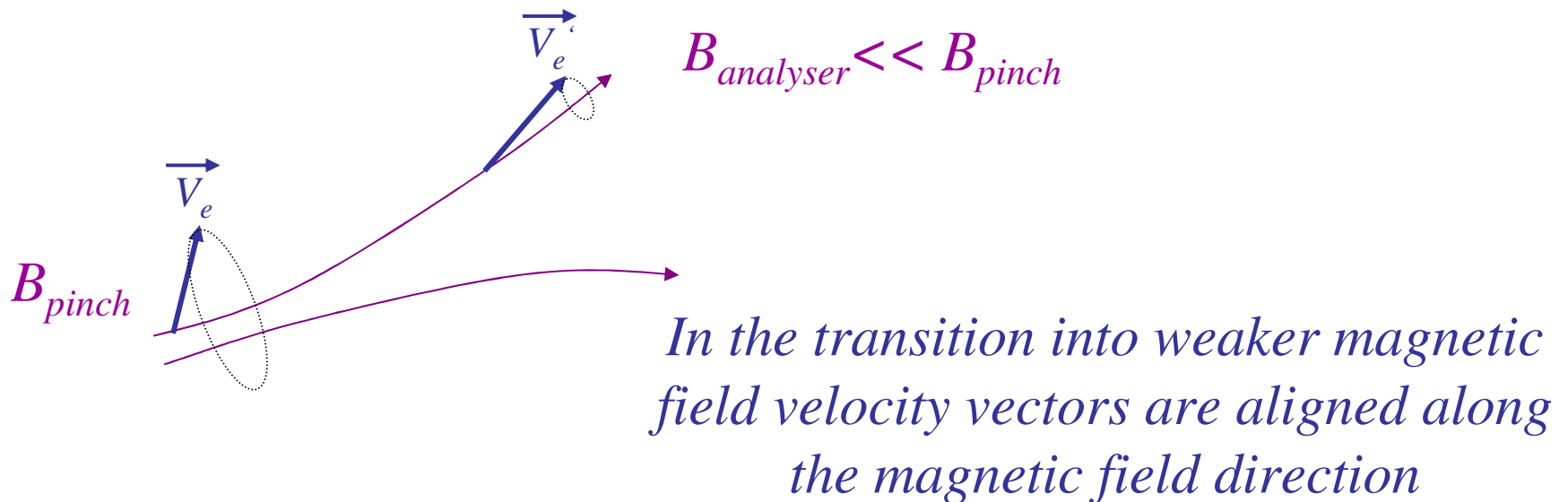
# Electrostatic spectrometer with adiabatic magnetic collimation



## Operating principle

Charged particle in a slowly varying magnetic field moves *adiabatically*,  
*first adiabatic invariant* is a ratio of perpendicular energy to magnetic field value:

$$\mu = \frac{E_{per}}{B} = \frac{E_{tot} \cdot \sin^2 \theta}{B} \cong const$$



# Electrostatic spectrometer with adiabatic magnetic collimation (MAC-E filter) Fundamentals



Adiabaticity parameter  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{|gradB|}{B} r_H \ll 1 \quad \text{or} \quad \varepsilon = \frac{1}{\omega_H} \cdot \left| \frac{\dot{B}}{B} \right| \ll 1$$

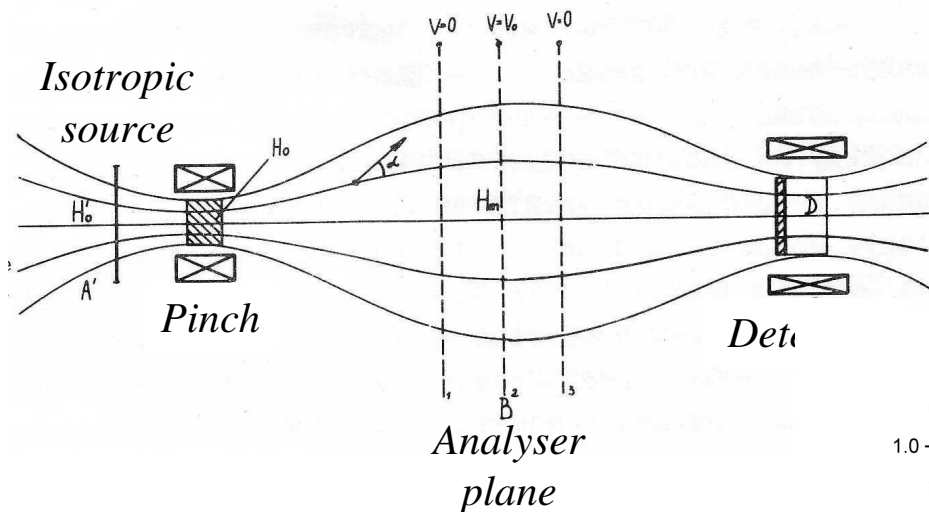
where  $r_H$ ,  $\omega_H$  – radius and frequency of the Larmor precession

An adiabatic invariant is preserved exponentially:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} \sim e^{-\frac{1}{\varepsilon}}$$

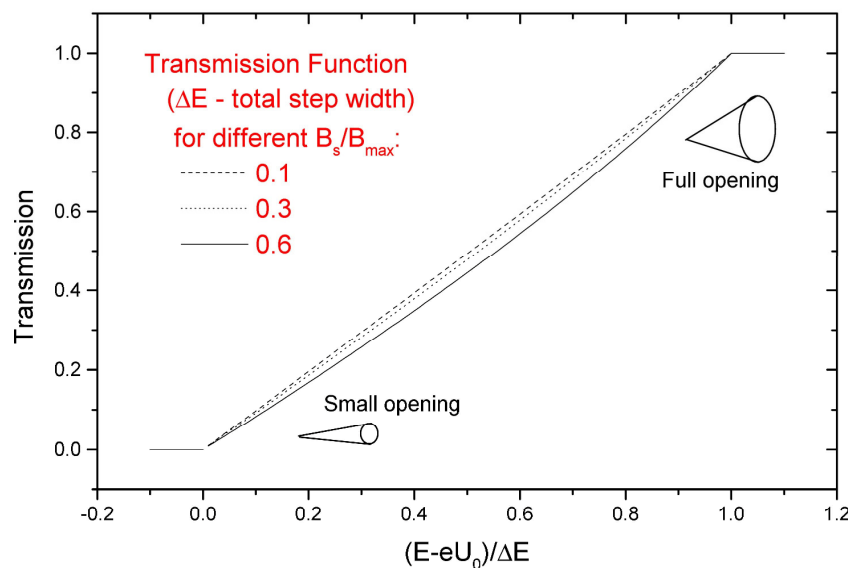
The spectrometer resolution is independent from the trajectory radius and curvature if adiabaticity parameter is small!

# Electrostatic spectrometer with adiabatic magnetic collimation Principle of operation



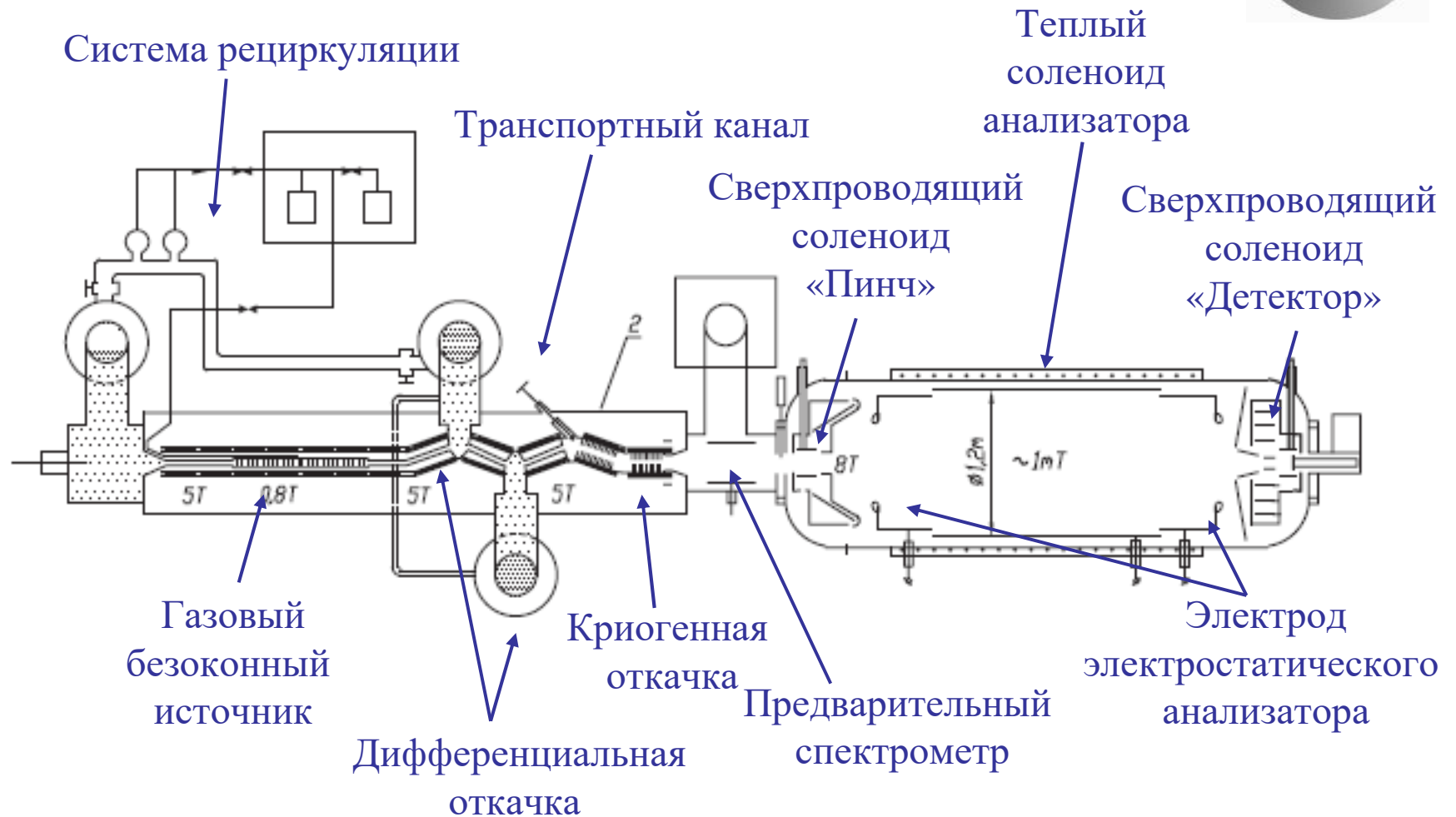
$$\Delta E = |eU_0| \frac{B_{analyser}}{B_{pinch}}$$

**High  
spectrometer resolution  
does not depend  
on the size of the source**



V.M. Lobasev, P.E, Spivak Nucl. Instr. Meth. A240 (1985) 305

# Установка «Троицк $\nu$ -масс»



# Установка «Троицк ню-масс»



Спектрометр

длина 6,5 м

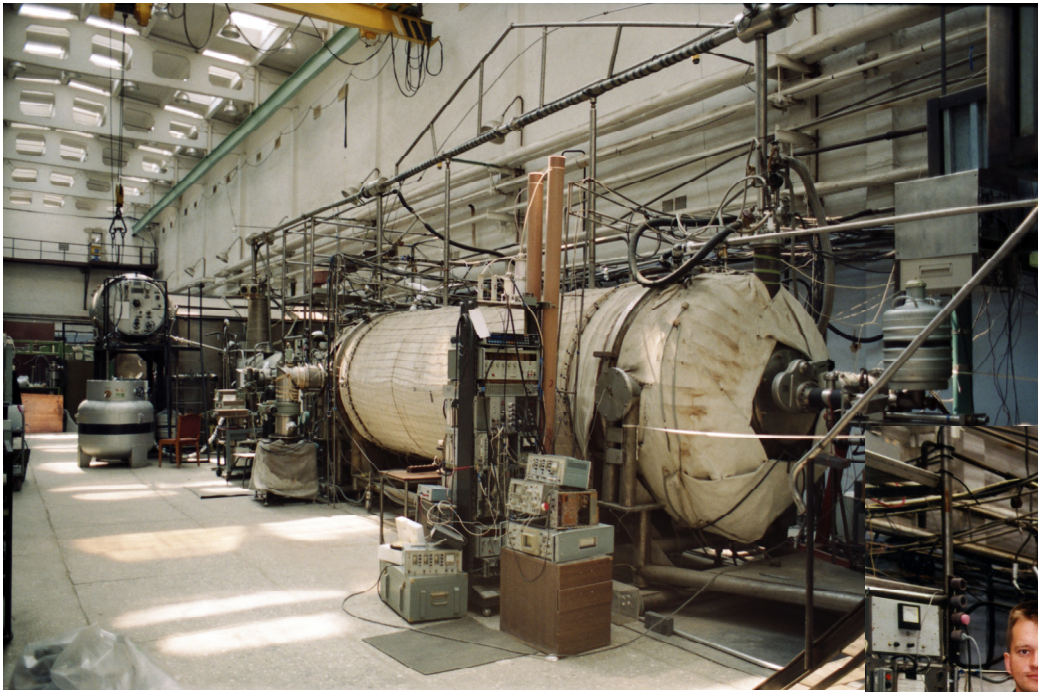
диаметр электрода 1,2 м

разрешение 3,7 эВ

Диаметр источника 20 мм

толщина  $1 \cdot 10^{17}$  мол/см<sup>2</sup>,

активность 0,3 GBk (8 mCi)



Первые данные  
опубликованы в 1994г:

*Paper presented at XXVII Int. Conf. on High Energy Physics  
Glasgow, UK, 20–27 July 1994*

Завершен набора данных в 2003г:

V.M.Lobashev Nucl.Phys. A719 (2003) 153e

**$m_\nu < 2.05 \text{ eV}^2$  (95% C.L.)**

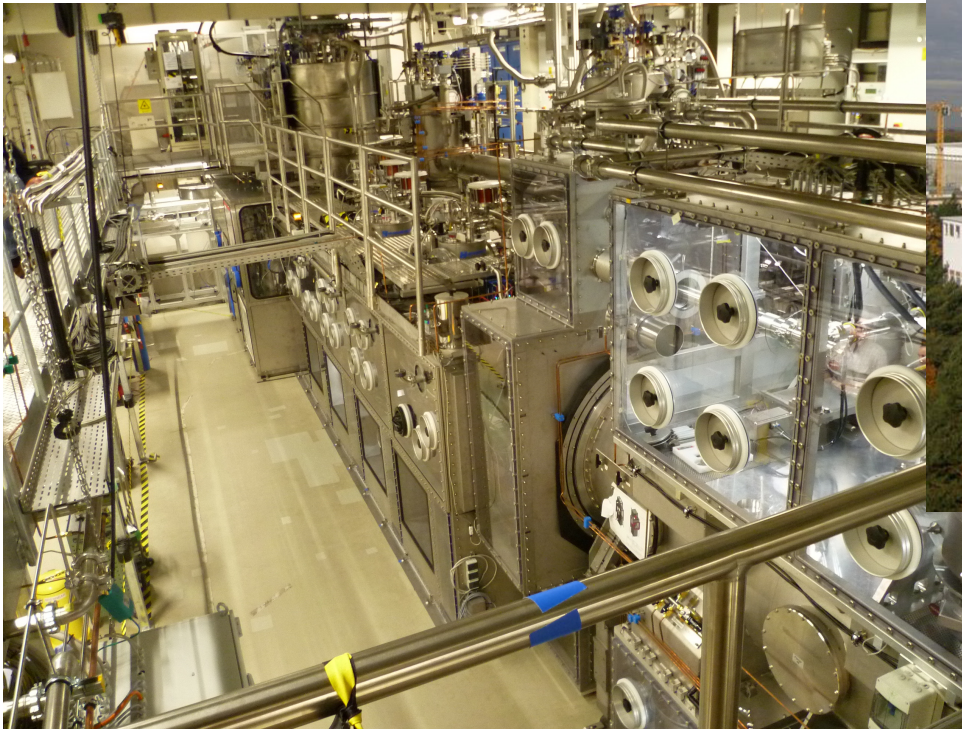


# Karlsruhe Institute for technology (former Forschungszentrum Karlsruhe)



Tritium laboratory with license for 40g of Tritium  
( $3,6 \cdot 10^{14}$  Bq = 10 kCi)

Project KATRIN started at 2001



First Tritium in  
the set-up - 2018



# KATRIN project



## Main parameters

Total installation length 70 m

Spectrometer diameter 10 m

Inner source diameter 90 mm

Source column density  $5 \cdot 10^{17}$  mol/cm<sup>2</sup>

Total source activity  $\approx 30$  GBq (0,8 Ci)

Resolution  $\Delta E = 0.9$  eV at 18 keV

Neutrino mass sensitivity  
(after 3/5 years of data taking):  
 $m_\nu < 0.2$  eV/c<sup>2</sup> (90% C.L.)





Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 70-летию В.А. Рубакова. 17 - 21 февраля 2025 г Москва