



*Разработка и испытание прототипа интегрального
детектора электронов β -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

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)

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

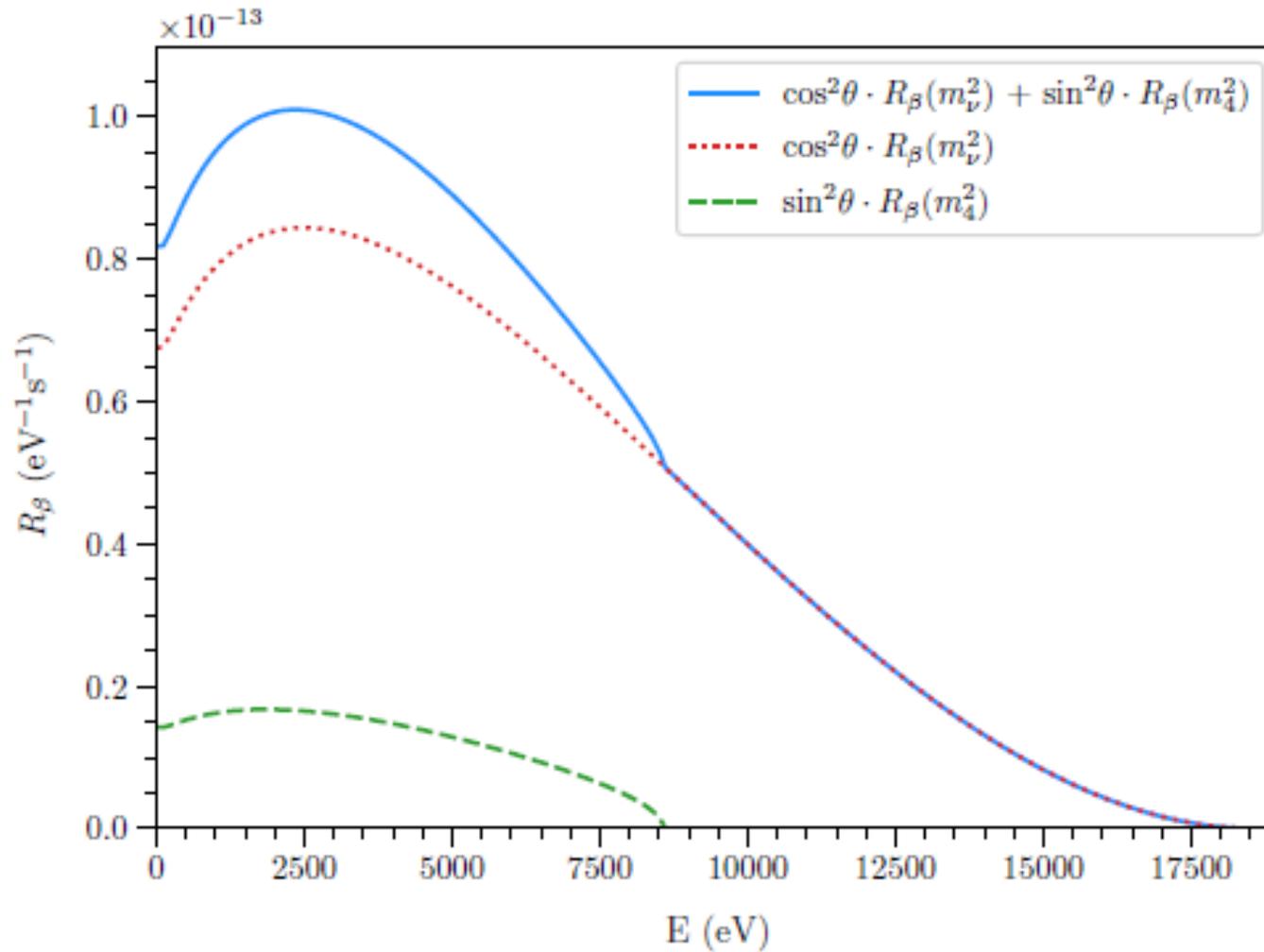
Становится матрицей (4x4) или (6x6)

Соответственно появляются дополнительные члены
в спектре β – 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 β -распада трития в случае примеси 4-го массового состояния



Интегральный метод регистрации

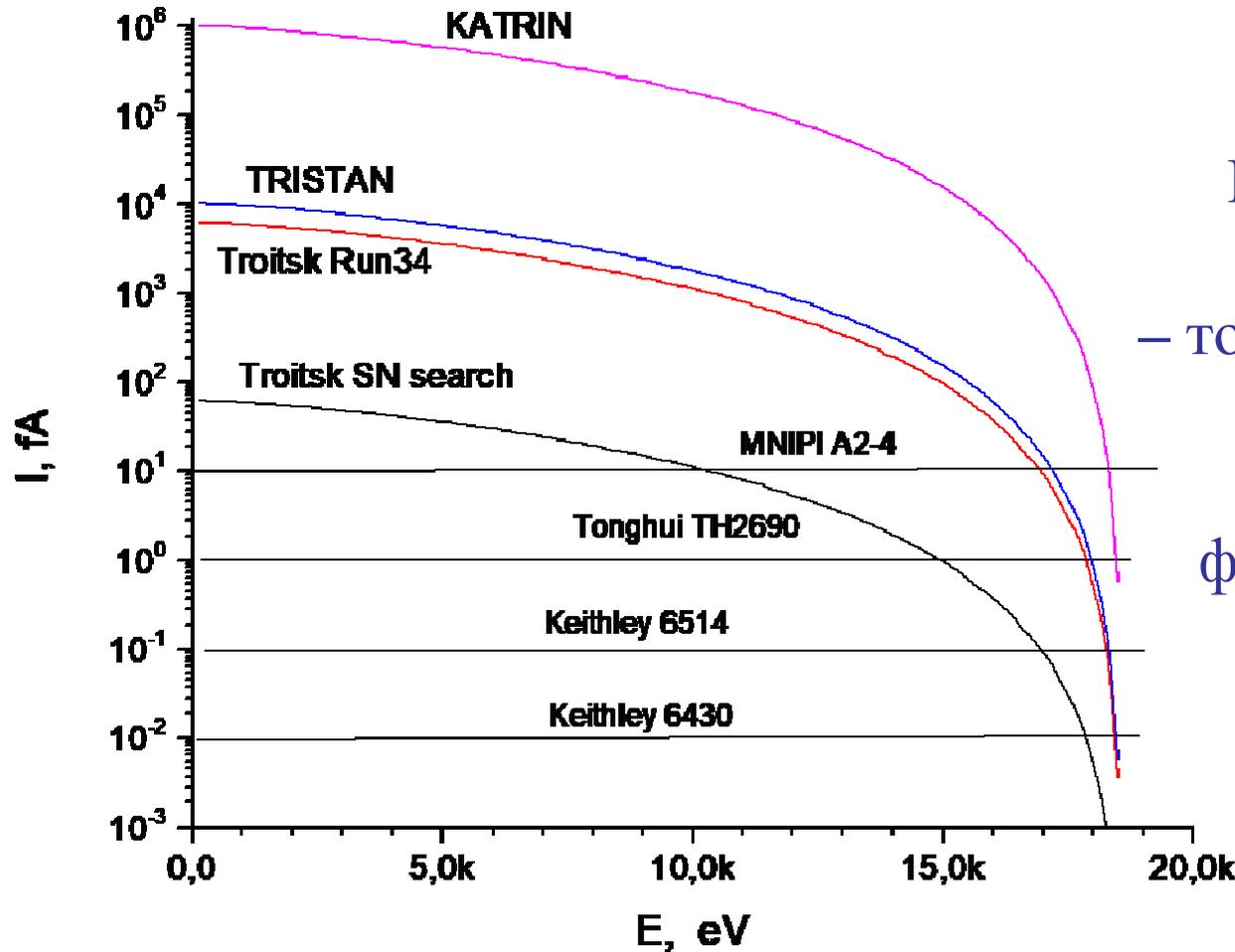


Наиболее интенсивные существующие источники трития установок «Троицк ню-масс» и КАТРИН позволяют изучать спектры β -распада при скорости счета до $10^8 \dots 10^{10}$ электрон/с. В счетном, спектрометрическом режиме регистрация таких потоков невозможна и на практике приходится снижать интенсивность источника 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}Ta Physics Letters 1967. 25, 104

Parity non-conservation in the gamma β - decay of ^{41}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

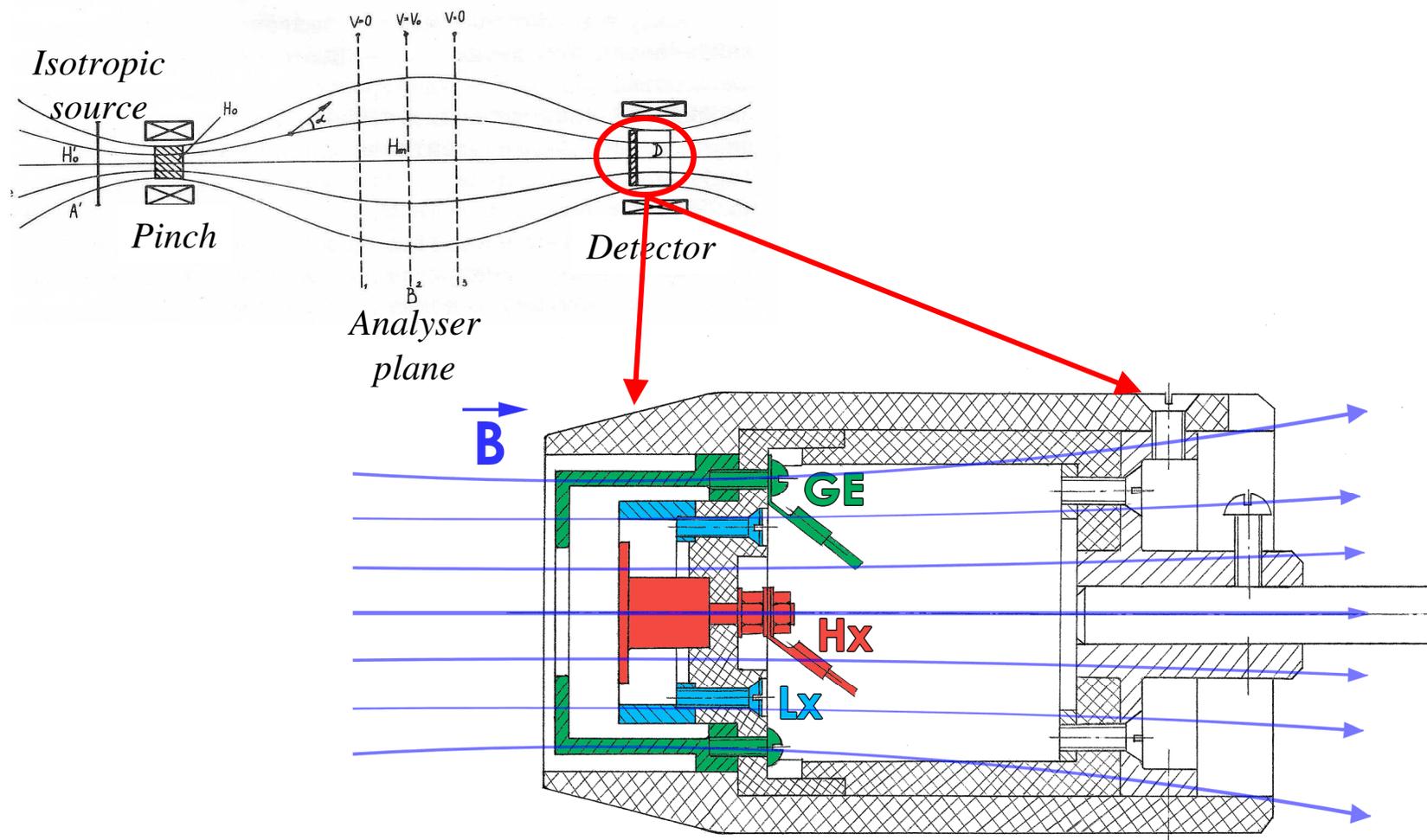
Выбор детектора



Цилиндр Фарадея в качестве детектора был выбран по нескольким соображениям:

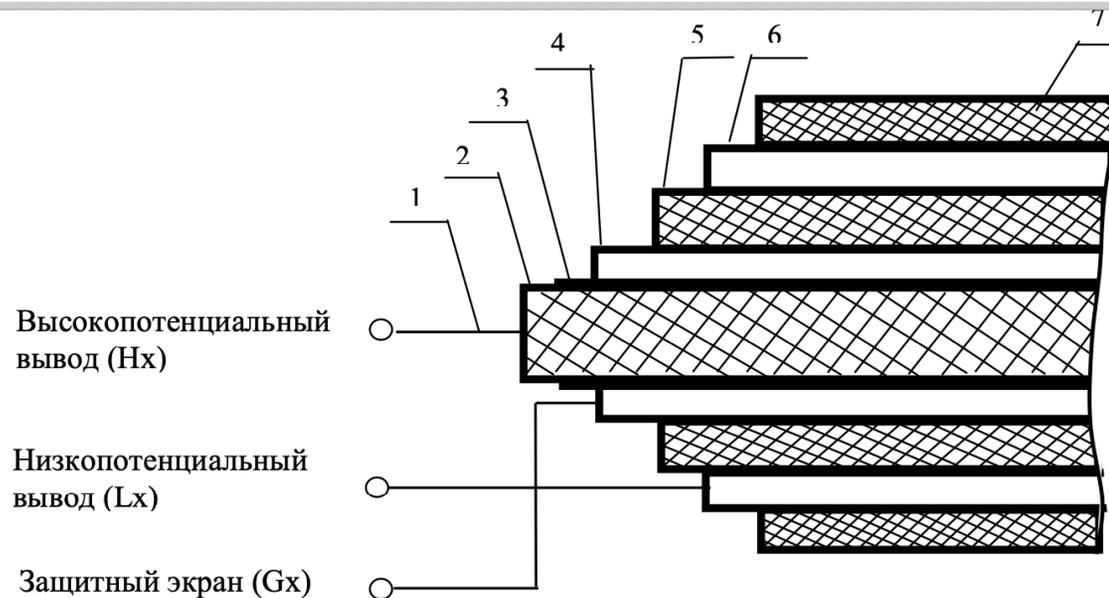
- В металле не приходится ожидать накопления зарядов, образования объемного заряда и искажения внутреннего электрического поля и, как следствие, дрейфа эффективности регистрации.
- Изменение потенциала детектора при изменении загрузки пренебрежимо мало по сравнению с энергией регистрируемых частиц и 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



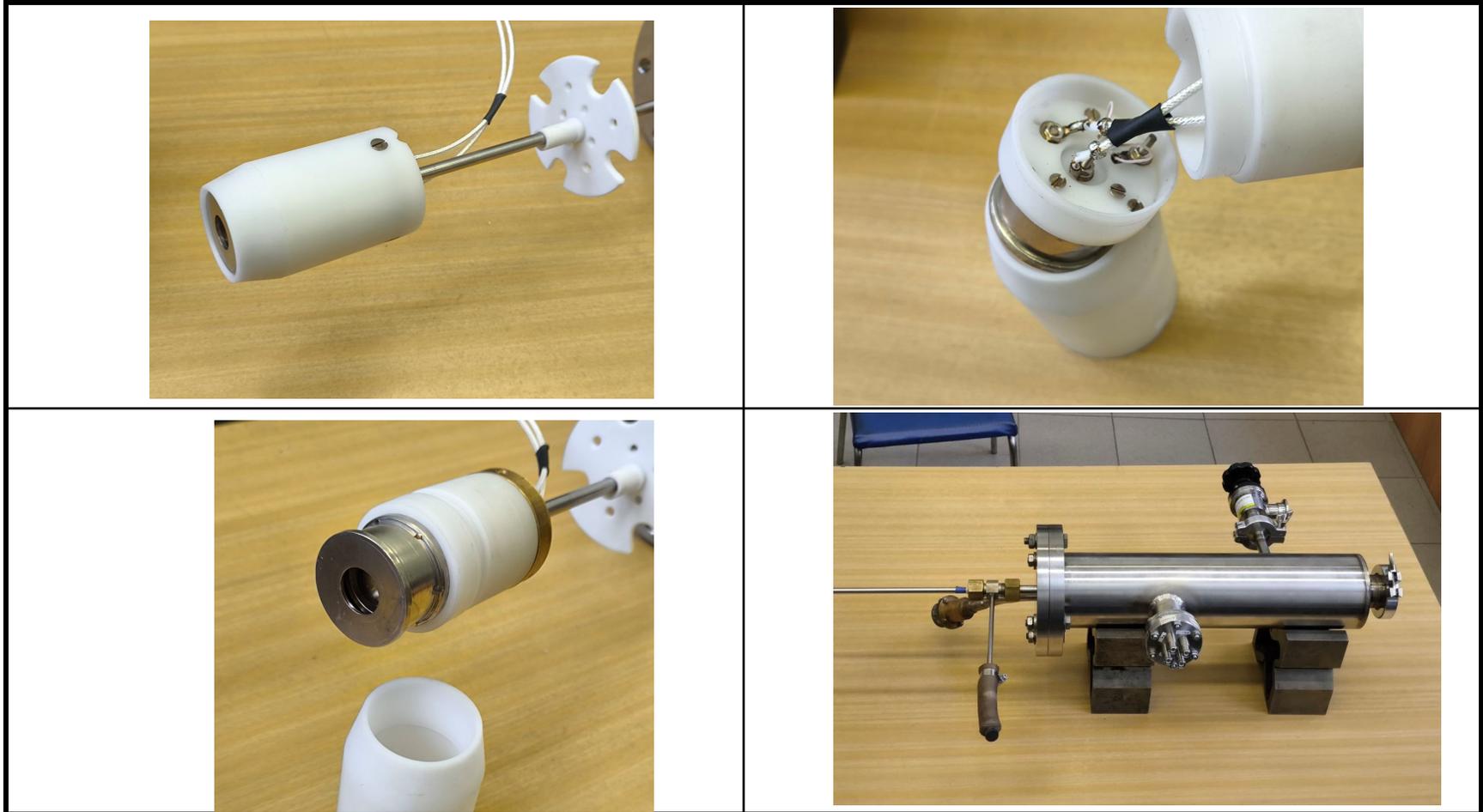
Выбор кабеля

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

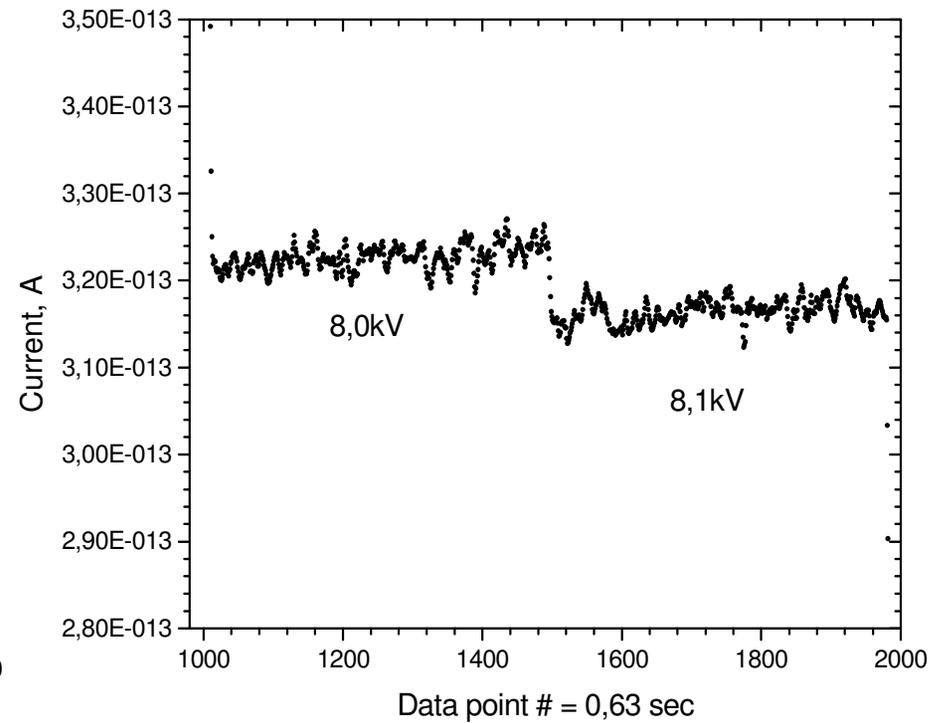
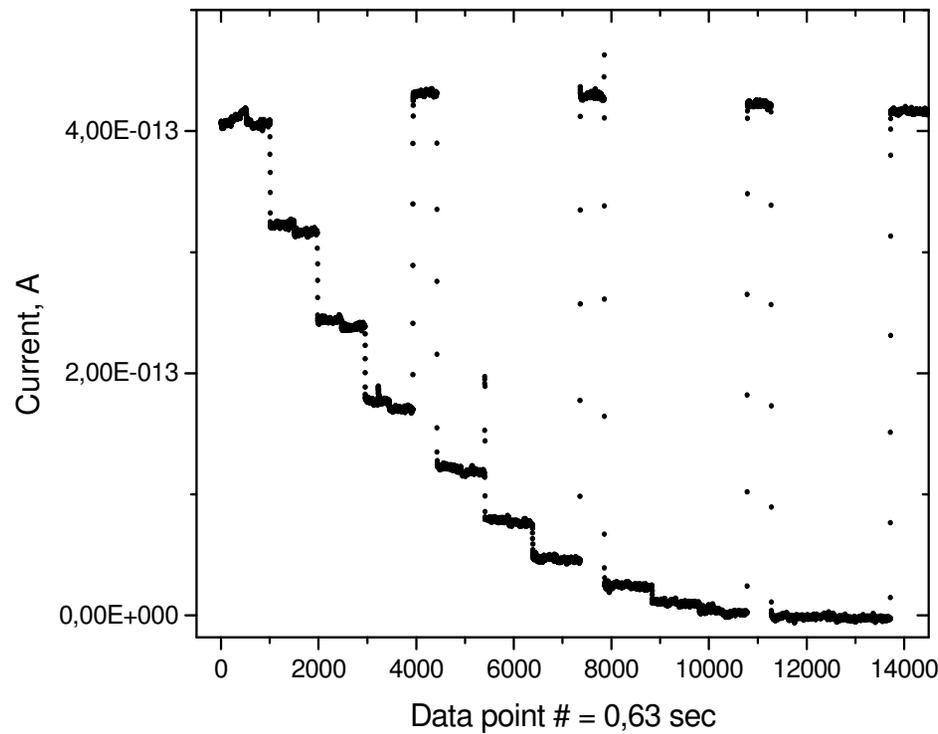


- 1 – центральная жила;
 - 2 – изоляция;
 - 3 – графитовый слой;
 - 4 – первый проводящий слой;
 - 5 – изоляция;
 - 6 – второй проводящий слой;
 - 7 – изоляция;
- (Нх), (Lx), (Gx) – цепи подключения источников сигнала.

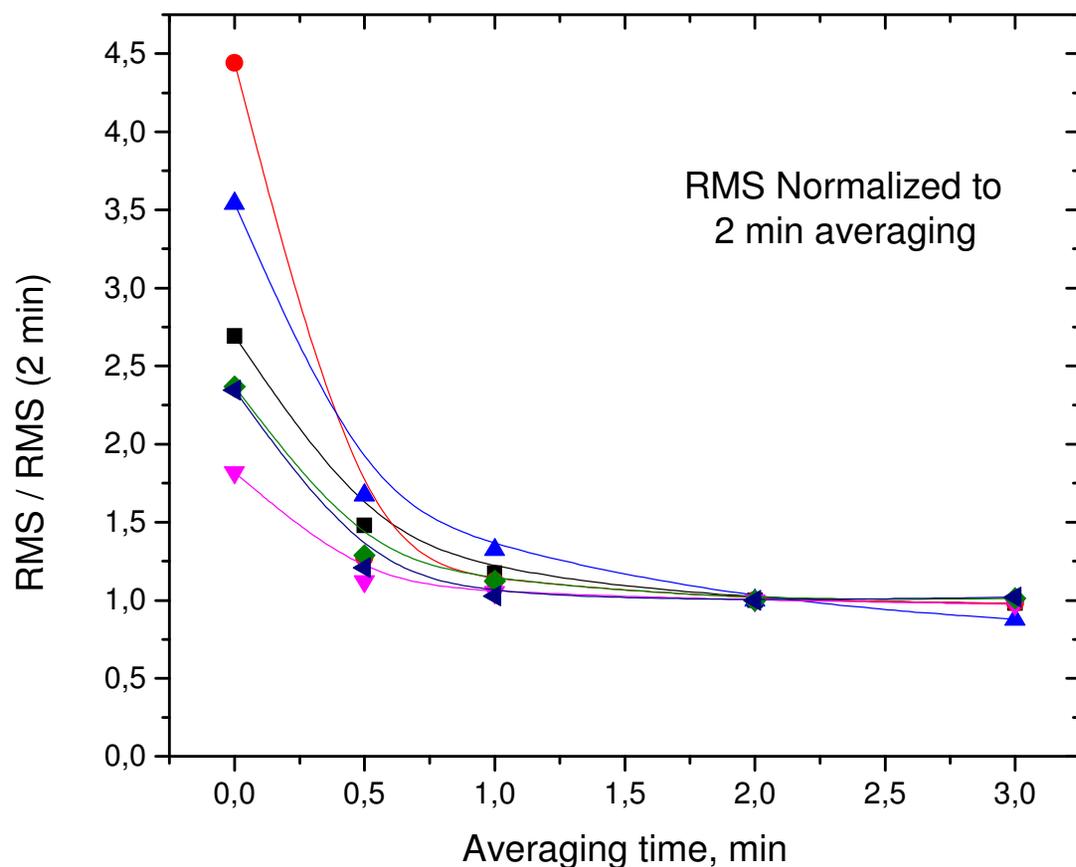
Интегральный детектор



Переходной процесс ≈ 4 сек



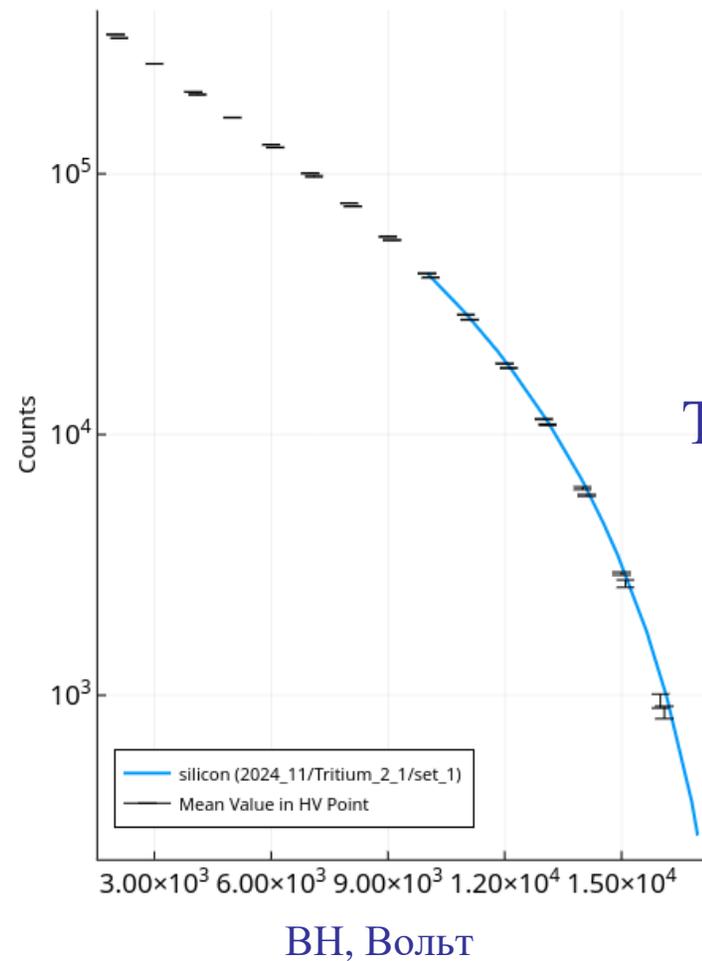
Подавление не-Пуассоновского шума (выбор продолжительности измерений одной точки спектра)



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

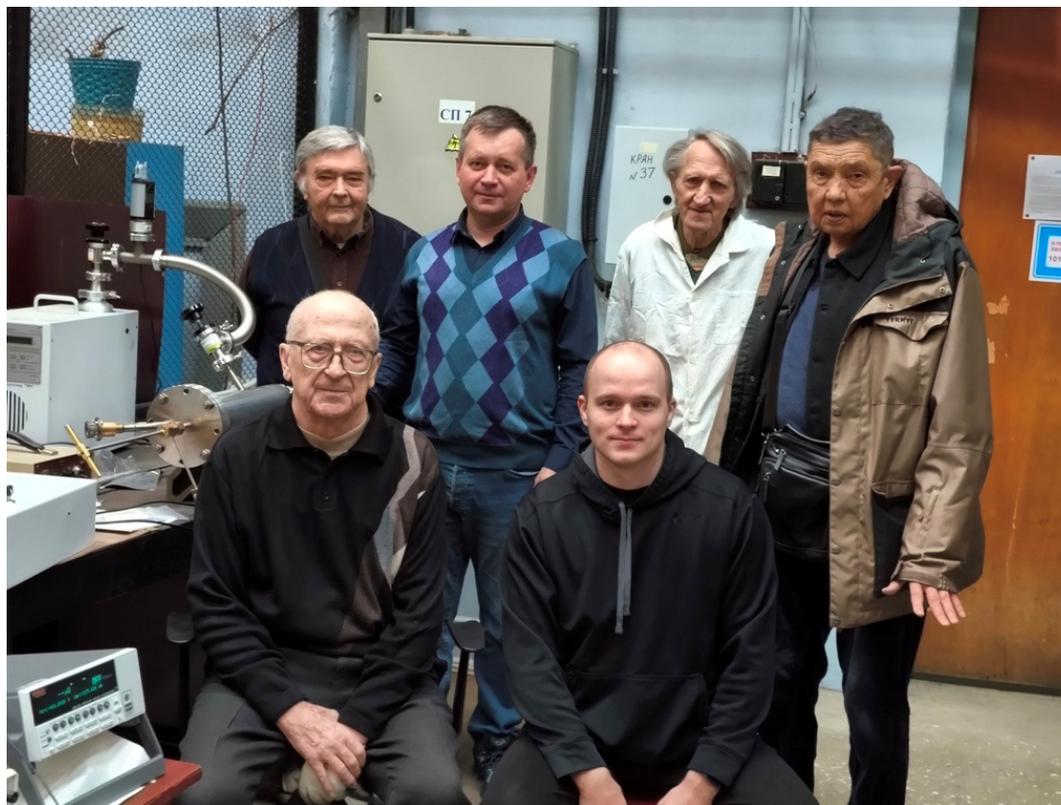


Линия – штатный кремниевый детектор
Точки – цилиндр Фарадея

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

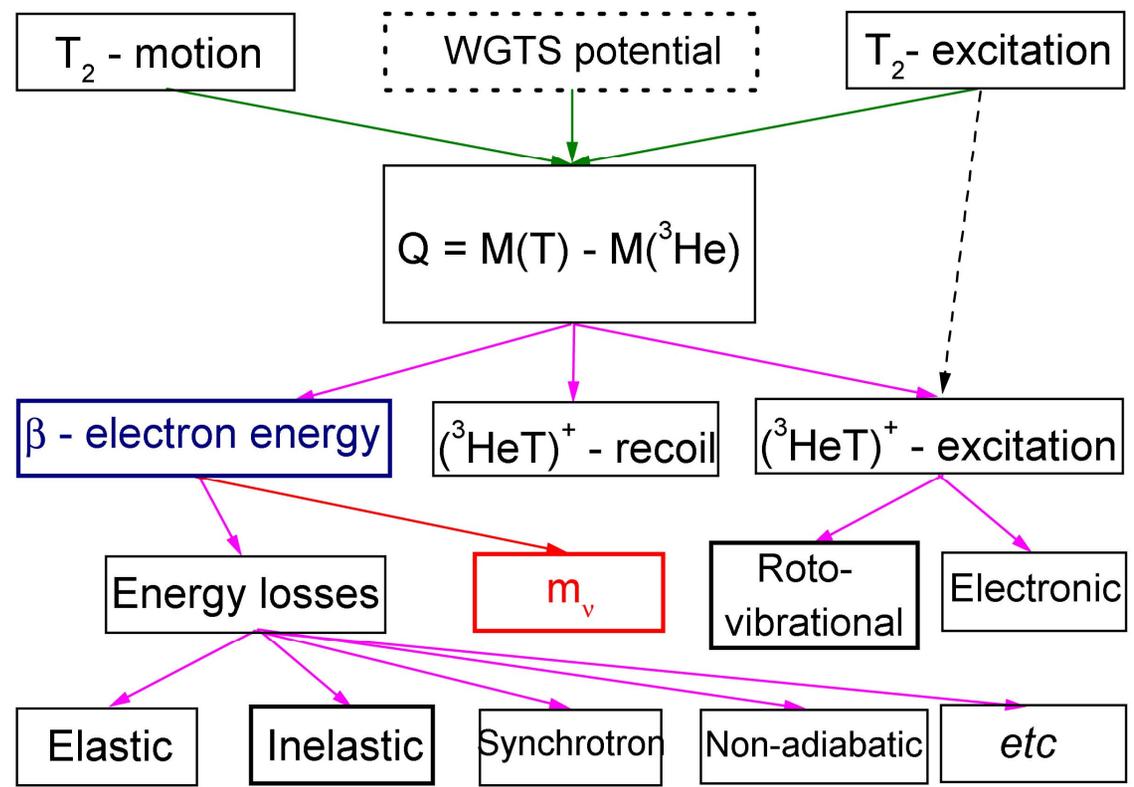
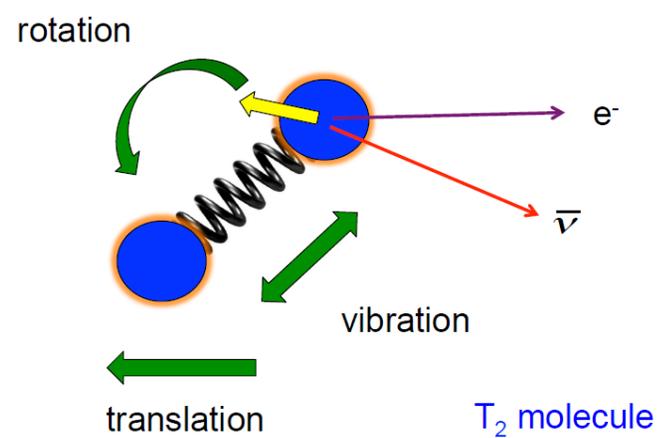


Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 70-летию В.А. Рубакова. 17 - 21 февраля 2025 г Москва



Back-up slides

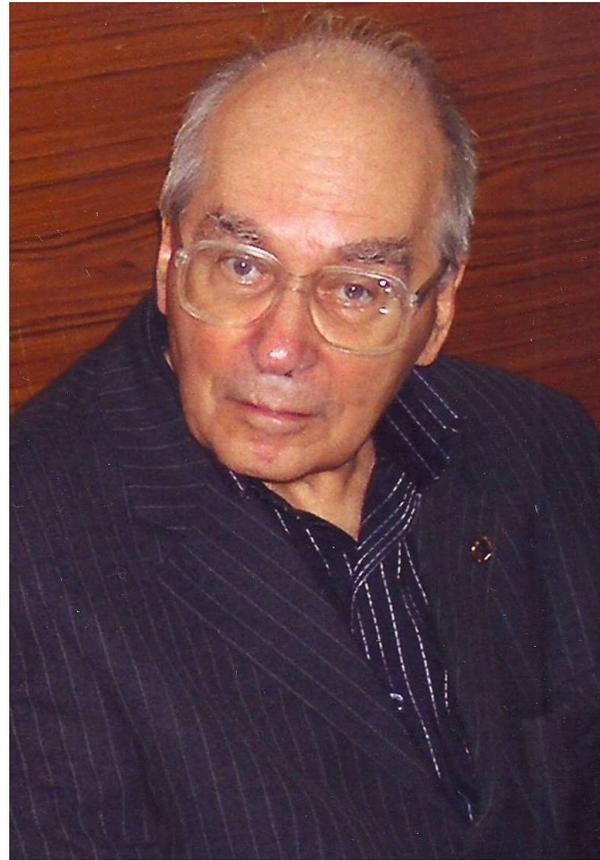
Kinematic experiment - basics



“Troitsk ν -mass” - Founders



Peter Spivak
24.03.1911 - 30.03.1991

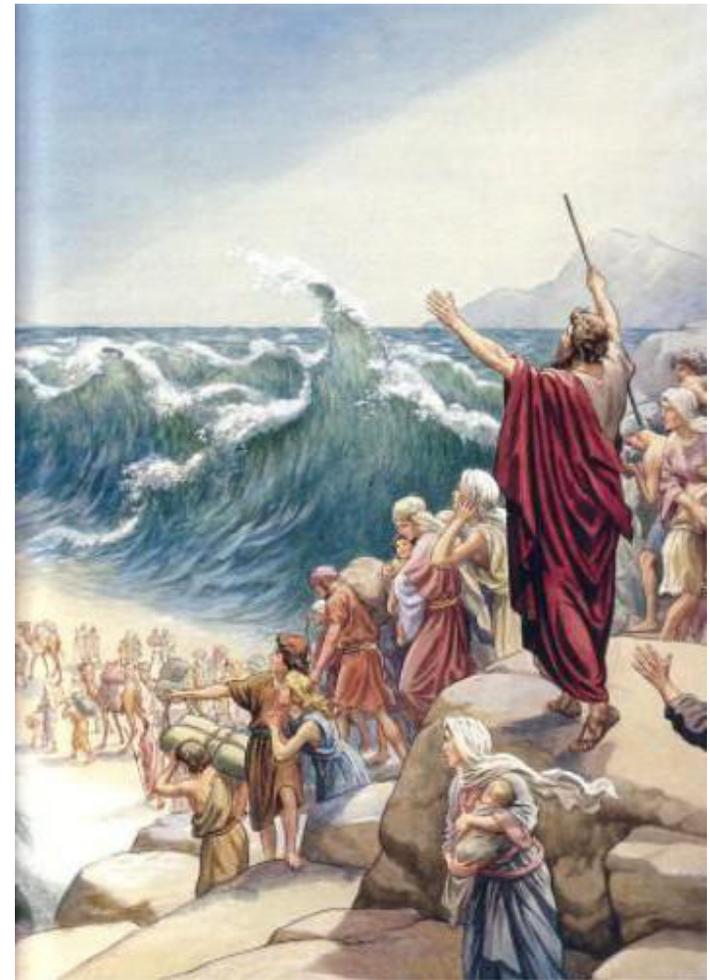


Vladimir Lobashev
29.07.1934 – 3.08.2011



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)



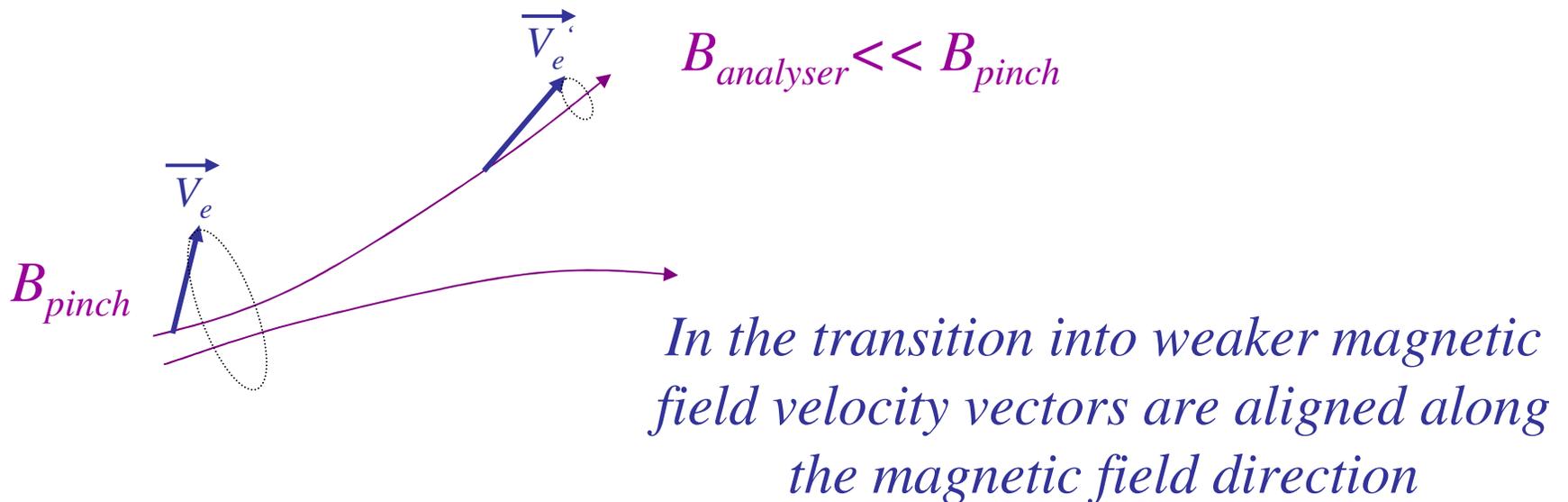
Electrostatic spectrometer with adiabatic magnetic collimation



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 ε :

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

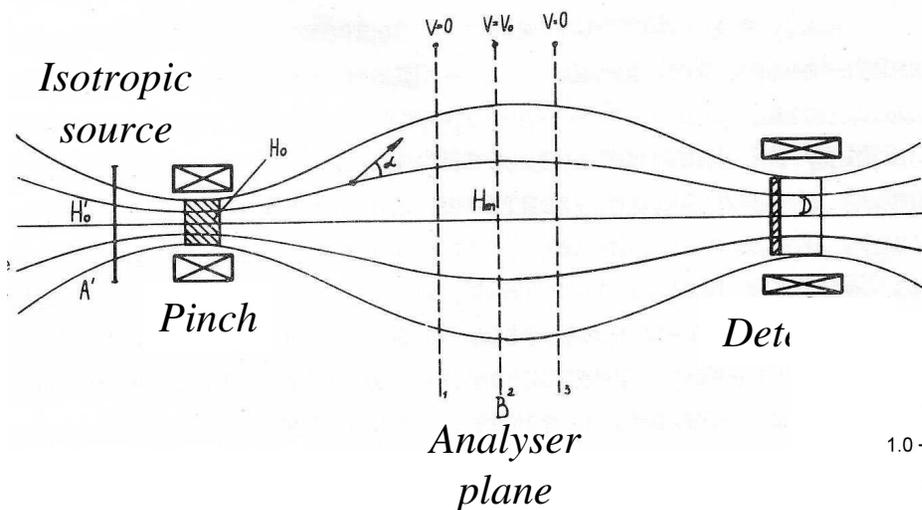
where r_H , ω_H – radius and frequency of the Larmor precession

An adiabatic invariant is preserved exponentially:

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

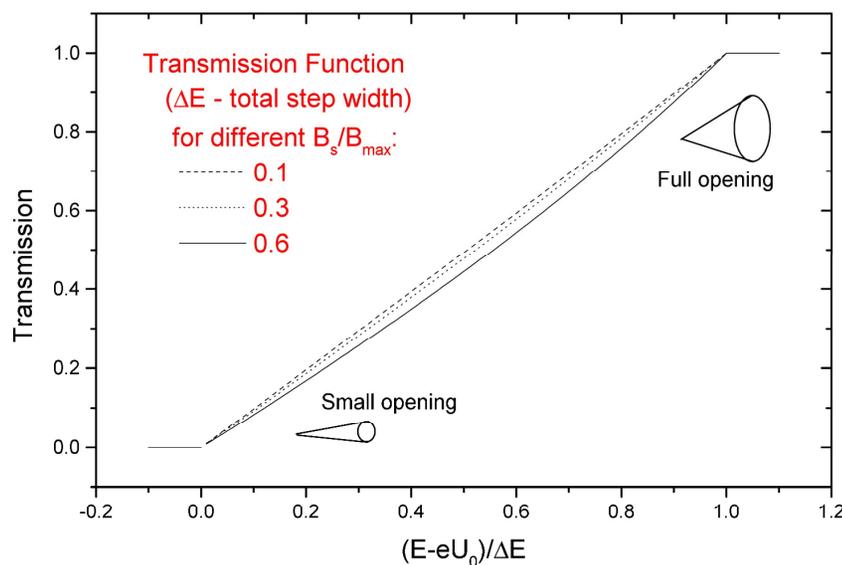
The spectrometer resolution is independent from the trajectory radius and curvature if adiabaticity parameter is small!

Electrostatic spectrometer with adiabatic magnetic collimation Principle of operation



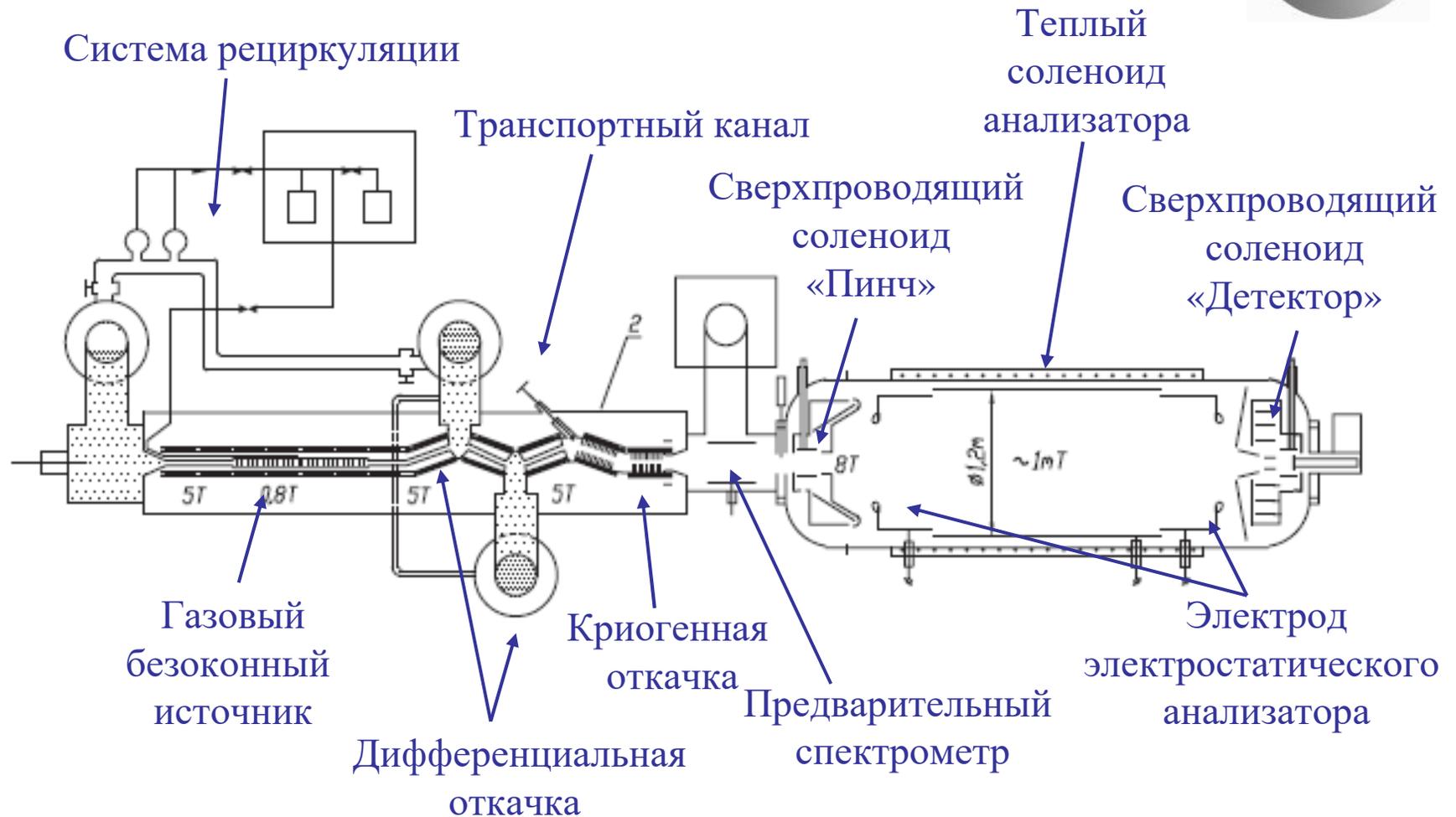
$$\Delta E = |eU_0| \frac{B_{analyser}}{B_{pinch}}$$

**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 ν -масс»



Установка «Троицк ню-масс»



Спектрометр

длина 6,5 м

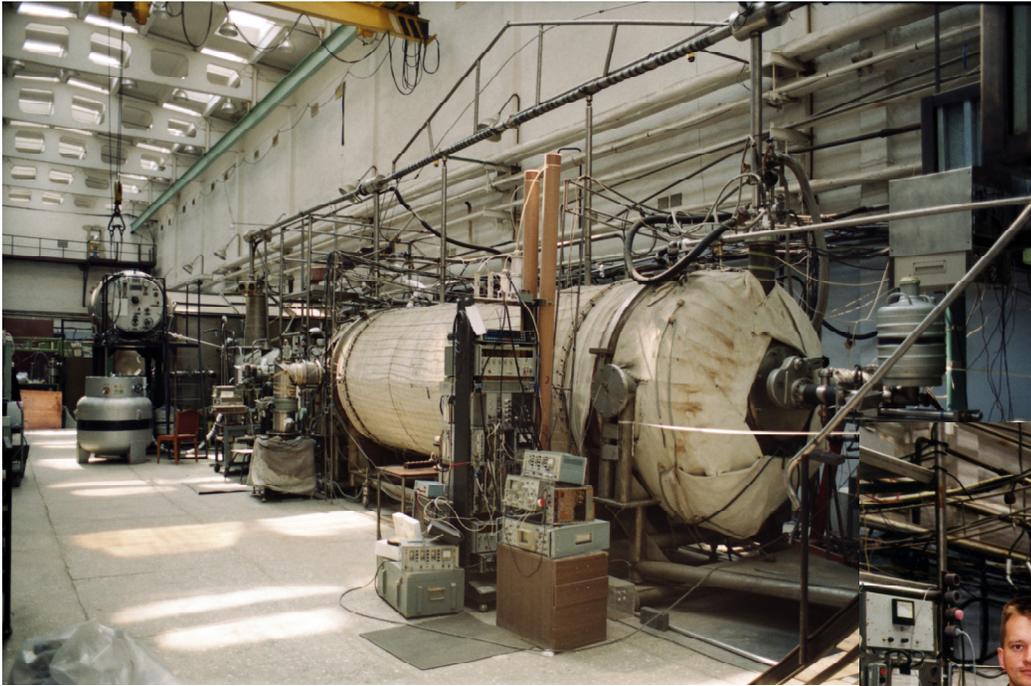
диаметр электрода 1,2 м

разрешение 3,7 эВ

Диаметр источника 20 мм

толщина $1 \cdot 10^{17}$ мол/см²,

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/cm²

Total source activity ≈ 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/c² (90%C.L.)



