



В.М. Лобашев и эксперимент КАТРИН



Н.А. Титов
Институт ядерных исследований РАН
пр-т 60-летия Октября 7а, Москва 117312
и проект КАТРИН



Как Лобашев выбирал задачи и подходил к их решению.

1. В 1973 году В.М. переехал из Гатчины в Троицк где всего лишь в весьма отдаленной перспективе должна была появиться «каонная фабрика»:

«Я боялся остановиться»

2. Эксперименты В.М. растягивались на десятилетия:

«Я понял почему Эйнштейн говорил, что научился логике у Достоевского:

«Додумывать до конца»

3. Молодым сотрудникам ИЯИ:

«Вы должны стараться прыгнуть выше головы»

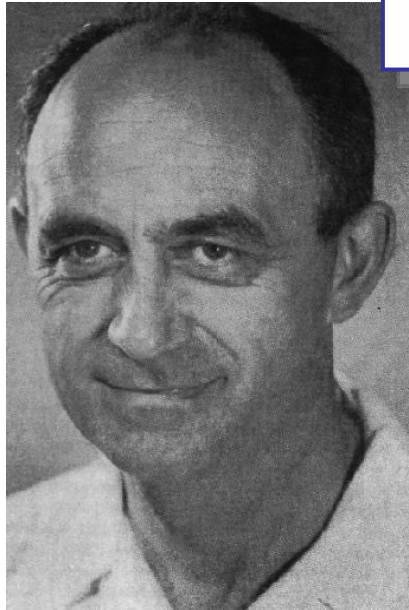
1934: Массу нейтрино можно определить из спектра β -распада

Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I¹).

Von E. Fermi in Rom.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 16. Januar 1934.)

E. Fermi, Z. Physik 88 (1934)



Enrico Fermi

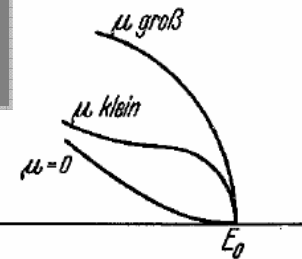
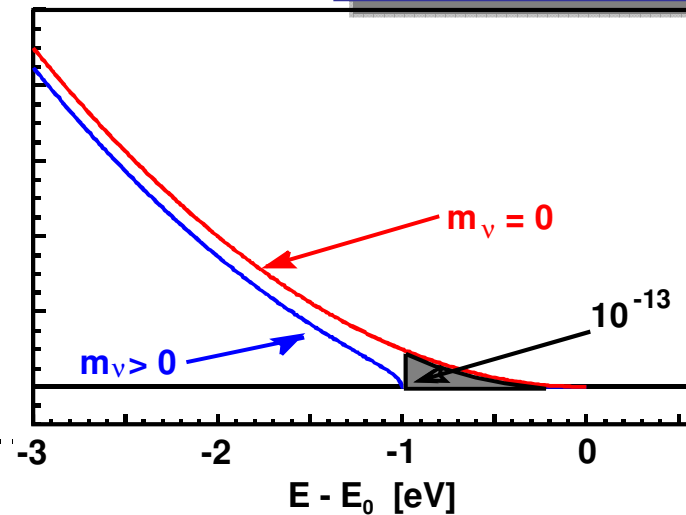
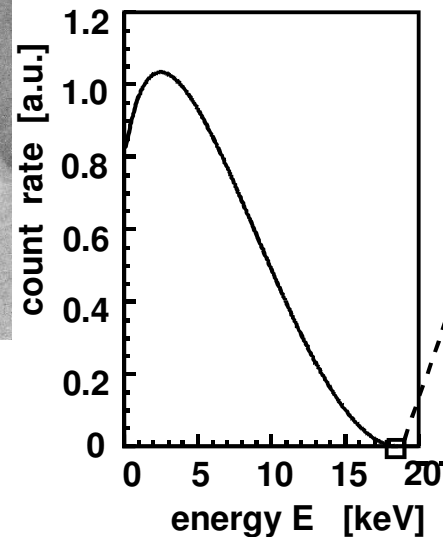


Fig. 1.





1948: Первый успешный эксперимент с тритием



Бруно Понтекорво

Bruno Pontecorvo

$$m_\nu < 1 \text{ кеВ}/c^2$$

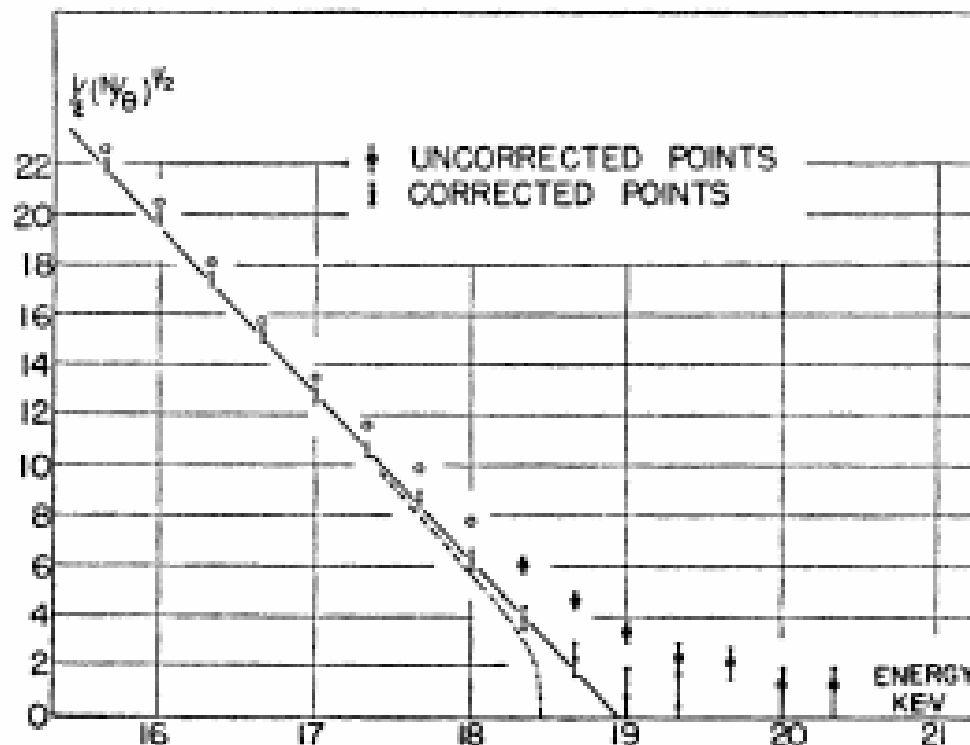


FIG. 2. "Kurie" plot of the end of the H^3 spectrum. The theoretical curve (shown dotted) corresponding to a finite neutrino mass of 500 eV (or 1 keV —see text) has been included for comparison.

Hanna G.C. and Pontecorvo B., Phys. Rev. 75 (1949) 983



1981:эксперимент Любимова - Третьякова

Estimation of the neutrino rest mass from measurements of the tritium β spectrum

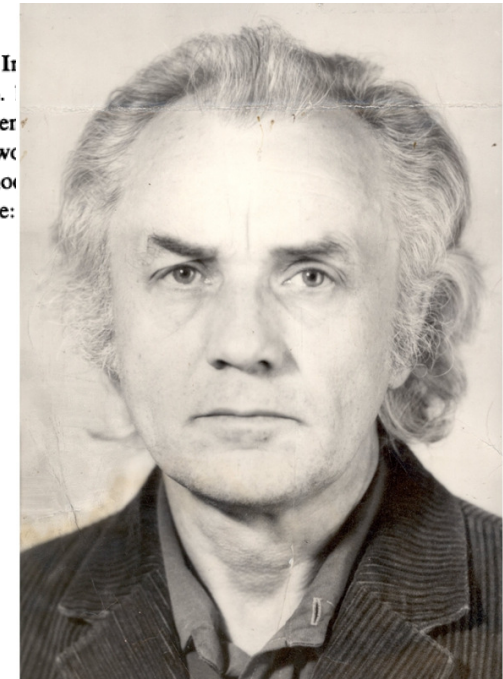
V. A. Lyubimov, E. G. Novikov, V. Z. Nozik, E. F. Tret'yakov, V. S. Kozik, and N. F. Myasoedov

Institute of Theoretical and Experimental Physics
(Submitted 22 May 1981)
Zh. Eksp. Teor. Fiz. **81**, 1158–1181 (October 1981)

Measurements of the tritium β spectrum near the end point and the analysis of the results are described. In comparison with our earlier study [E. F. Tret'yakov *et al.*, Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. **40**, No. 10, p. 1763 (1976) and as reported at the Aachen 1976 Neutrino Conference (p. 663)], the statistical accuracy has been greatly improved and a more rigorous measurement technique has been used. All data obtained in the two studies have been analyzed. In determining the confidence interval for the antineutrino rest mass, the method of mathematical modeling is used. For the rest mass of $\bar{\nu}_e$ a lower limit is obtained for the first time: $14 \leq m_{\bar{\nu}_e} \leq 46$ eV. The value $E_0 = 18\,577 \pm 13$ eV is obtained for the energy of tritium β decay.



Е.Ф.Третьяков



В.А. Любимов

7.07.1929 - 18.12.2012

$14 < m_{\bar{\nu}_e} < 46$ eV
Вселенная замкнута ?!



1983: Электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией Эксперимент «Троицк ню-масс»



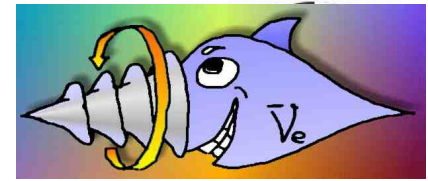
Петр Ефимович Спивак
24.03.1911 - 30.03.1991



Владимир Михайлович Лобашев
29.07.1934 – 3.08.2011



*“Great minds think alike”
Mainz Neutrino Mass Experiment*



*Robert B. Moore
Physics Department,
McGill University
Montreal, Canada*



Ernst Otten



*Jochen Bonn
7.04.1944 – 27.08.2012
Physics Institute
Johannes Gutenberg University
Mainz, Germany*

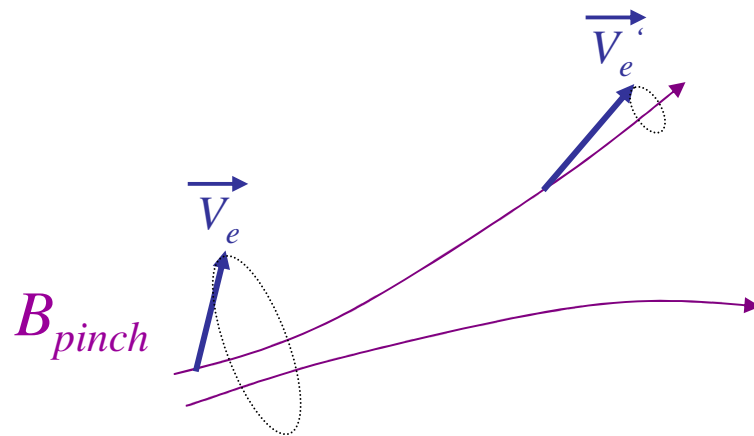


Электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией Принцип работы



Движение частиц в медленно меняющемся магнитном поле происходит *адиабатически*, сохраняется (первый) *адиабатический инвариант*

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

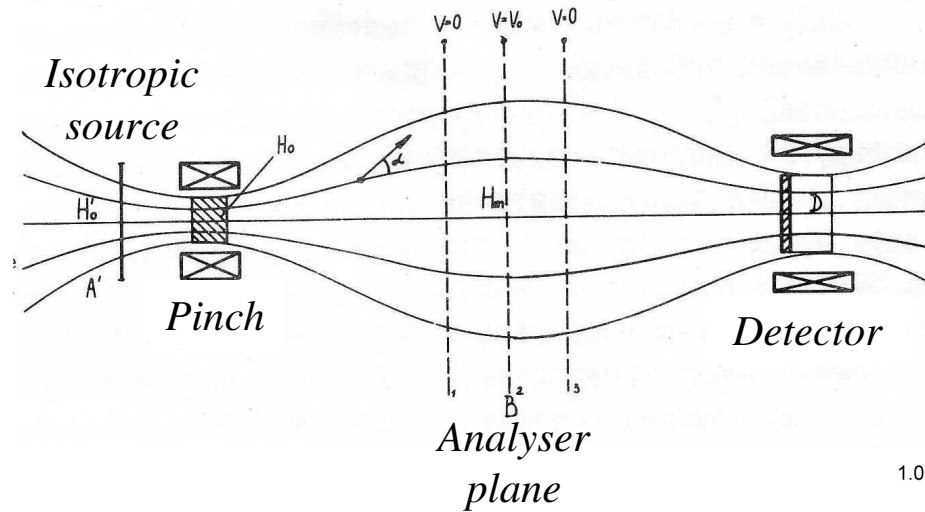


$$B_{analyser} \ll B_{pinch}$$

При переходе в слабое магнитное поле
вектор скорости частиц
выстраивается вдоль направления
магнитного поля

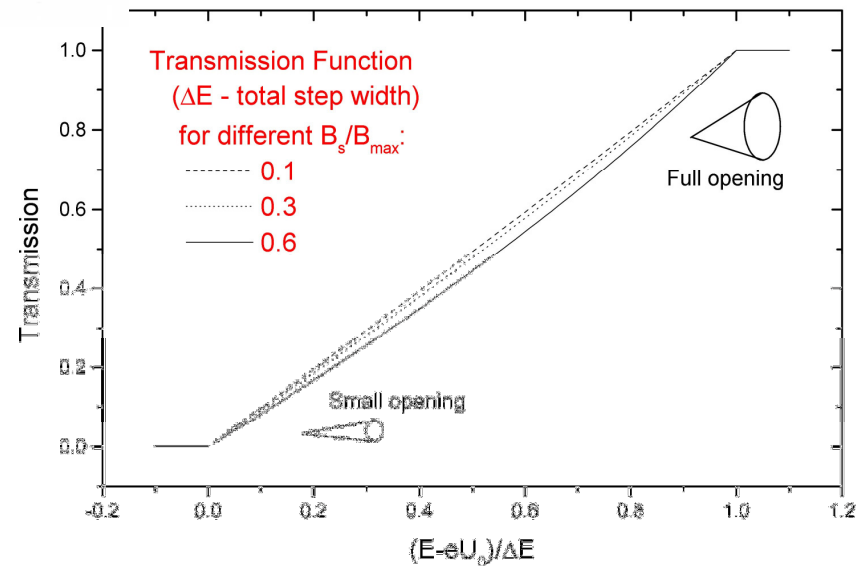


Электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией Принцип работы



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

Высокое
разрешение спектрометра
не зависит
от размера источника





Электростатический спектрометр с магнитной адиабатической коллимацией Фундаментальные основы



Критерий адиабатичности ε :

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

где r_H , ω_H – радиус и частота Ларморовской прецессии

Адиабатический инвариант сохраняется экспоненциально:

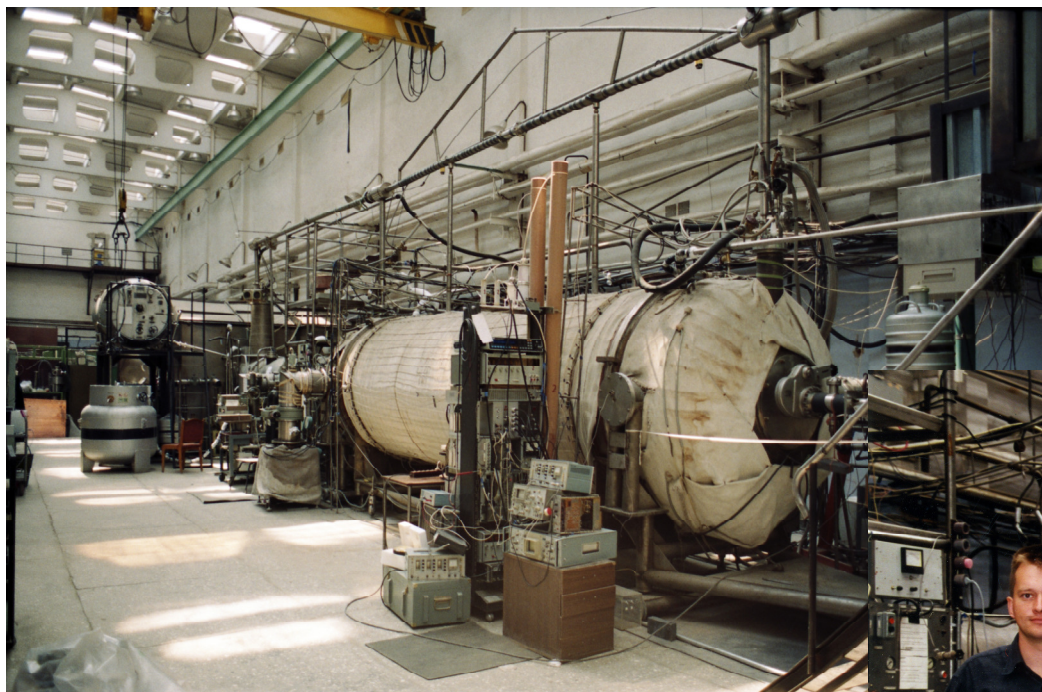
$$\frac{\Delta\mu}{\mu} \sim e^{-\frac{1}{\varepsilon}}$$

Л.А. Арцимович, Р.А. Сагдеев Физика плазмы для физиков. Атомиздат, 1979

**При соблюдении критерия адиабатичности разрешение спектрометра
не зависит от радиуса и кривизны траектории!**



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

Первые данные
опубликованы в 1994г:

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



Н.А.Титов «В.М.Лобашев и эксперимент КАТРИН»

Конференция «Лобашеву-80» 23 октября 2014, Троицк, Россия



2003: завершение сбора данных по массе электронного антинейтрино.



ELSEVIER

Nuclear Physics A719 (2003) 153c–160c



www.elsevier.com/locate/npe

The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN

V.M. Lobashev^a

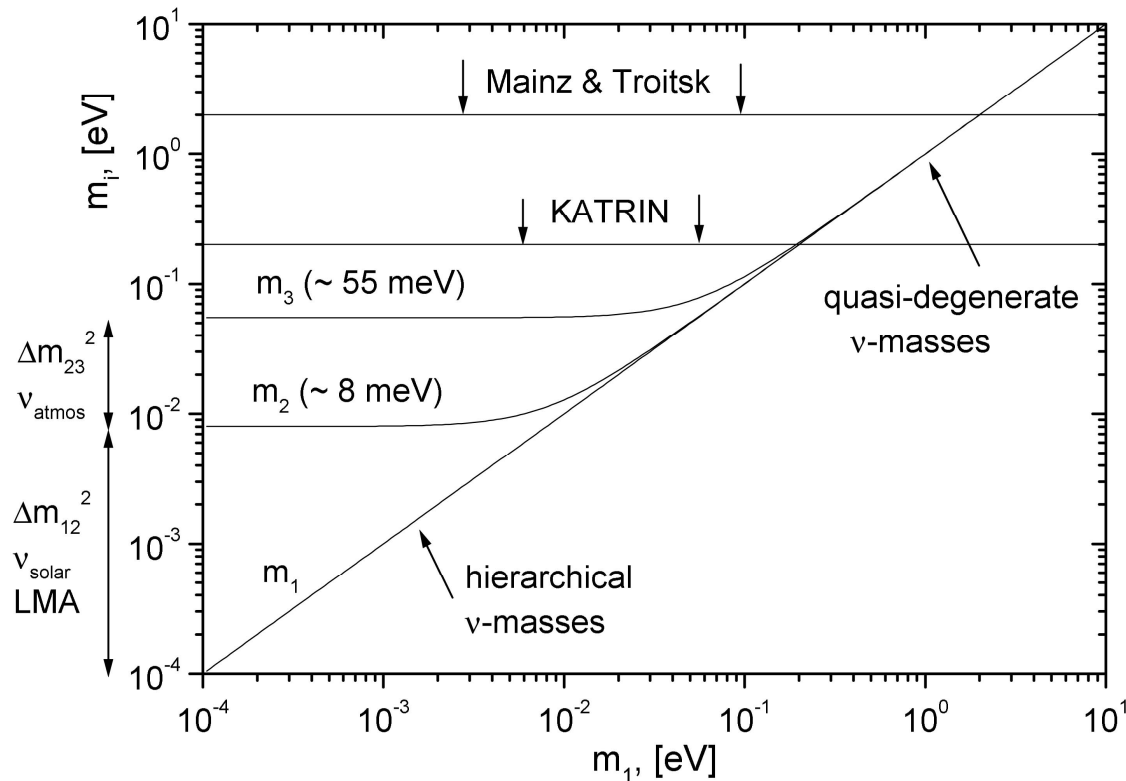
^aInstitute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences 60th October Anniv. prospect 7a, 117312 Moscow, Russia

The updated results of the search for neutrino mass in the tritium beta-decay on the Troitsk nu-mass and Neutrino Mainz set-ups are presented. Both groups give an upper limit for the neutrino mass at 95% $m_\nu < 2.05 \text{ eV}/c^2$ in Troitsk and $m_\nu < 2.2 \text{ eV}/c^2$ in Mainz. Further improvement is limited both by statistic and systematic errors. In order to enter in the cosmologically important sub-electronvolt area the collaboration of groups from Karlsruhe Forschungszentrum, Mainz, Troitsk et al. proposed a new advanced project KATRIN. The status of the project is presented.



≈1998: Новый проект

Понизить предел на массу нейтрино на порядок



1. Confirms or excludes quasi-degenerate mass regime
2. Tests cosmological neutrino mass evaluation



Forschungszentrum Karlsruhe

Tritium laboratory (license for 40g of Tritium)





2001: Project KATRIN Letter of Intent



Co-spokeperson

Prof. Dr. Guido Drexlin

Karlsruhe Institute of Technology
Institut für Experimentelle Kernphysik



Head of collaboration board

Prof. Dr. Johannes Blümer

Director of the Institute for
Nuclear Physics

Karlsruhe Institute of Technology
and
Head of Astroparticle Physics
Program



Co-spokeperson

Prof. Dr. Christian Weinheimer

Universität Münster
Institut für Kernphysik



Участники КАТРИН



Prof. Dr. Hamish Robertson

Center for Experimental Nuclear Physics and
Astrophysics, CENPA
University of Washington, Seattle, WA, USA



Prof. John Wilkerson

Department of Physics and Astronomy
University of North Carolina, NC, USA

VOLUME 67, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 AUGUST 1991

Limit on $\bar{\nu}_e$ Mass from Observation of the β Decay of Molecular Tritium

R. G. H. Robertson, T. J. Bowles, G. J. Stephenson, Jr., D. L. Wark,^(a) and J. F. Wilkerson
Physics Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545

D. A. Knapp
Physics Division, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550
(Received 6 May 1991)

$$m_{\nu} < 9.3 \text{ eV (95\% c.l.)}$$



Проект КАТРИН



Collaboration:

- 130 scientists
- 5 countries
- 14 institutions



University of Washington



Fachhochschule Fulda
University of Applied Sciences



bmb-f - Förderschwerpunkt
Astroteilchenphysik
Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung

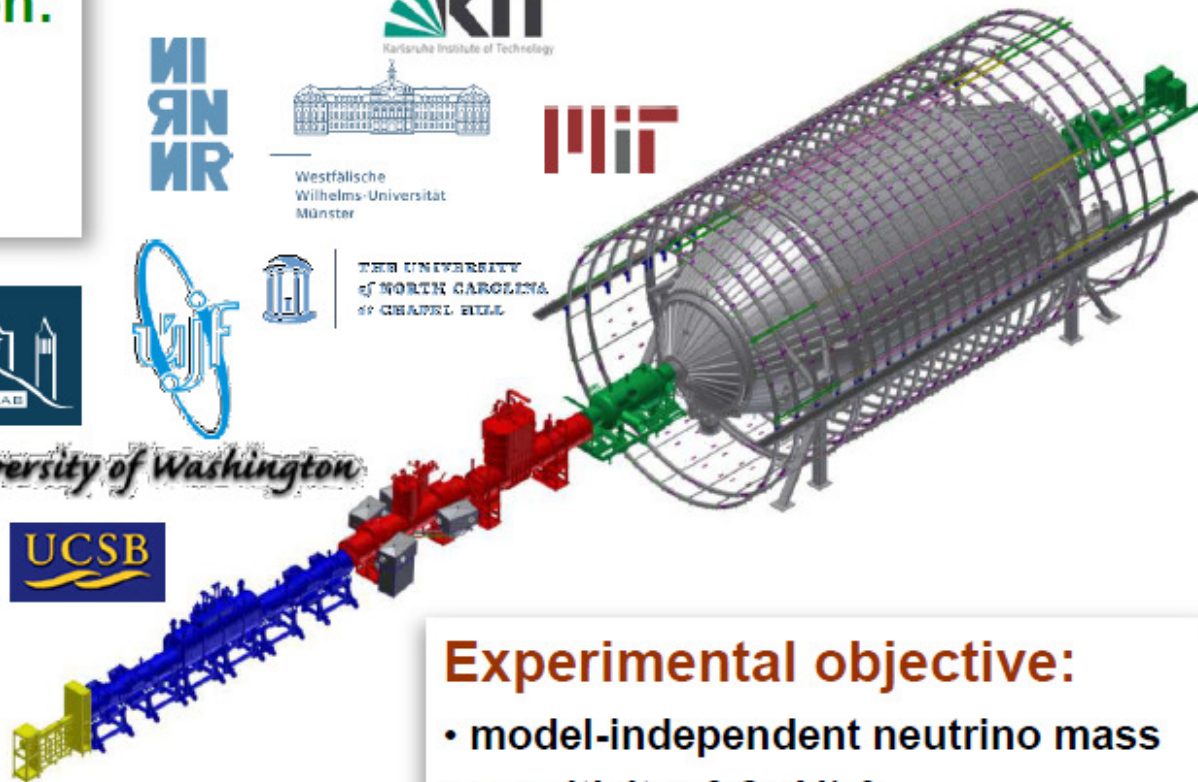
Deutsche
Forschungsgemeinschaft



Westfälische
Wilhelms-Universität
Münster



THE UNIVERSITY
of NORTH CAROLINA
at CHAPEL HILL



Experimental objective:

- model-independent neutrino mass
- sensitivity: $0.2 \text{ eV}/c^2$
- source: gaseous tritium (β -decay)



International project KATRIN



(KArlsruhe TRItium Neutrino experiment)



Spectrometer Ø 10 meters

Resolution $\Delta E = 0,9 \text{ eV}$ (at 18 keV)

Windowless gaseous source Ø 90 mm

Column density $5 \cdot 10^{17} \text{ mol/cm}^2$

Neutrino mass sensitivity

(after 3 years of data taking):

$$m_\nu < 0,2 \text{ эВ/с}^2$$

Необходимо в 100 раз увеличить статистическую точность,
*и в 100 раз улучшить оценку всех систематических
погрешностей !!*



Проблема объемного заряда в источнике



2005: В газовом источнике образуется плазма!

EFFECTS OF PLASMA PHENOMENA ON NEUTRINO MASS MEASUREMENTS PROCESS USING A GASEOUS TRITIUM β -SOURCE

Anatoly F. Nastoyashchii¹, Nikita A. Titov², Igor N. Morozov¹, Ference Glück and Ernst W. Otten

Institute of Physics, Joh. Gutenberg University, 55099 Mainz, Germany

¹ On leave from TRINITI, Troitsk/Russia, on leave from INR, Troitsk/Russia: anast@triniti.ru

FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY VOL. 48 JULY/AUG. 2005

In the paper the ionization state of molecular tritium and electric potentials in a Windowless Gas Tritium Source (WGTS) of tritium β -decay experiment KATRIN are considered. The ionization processes in WGTS are sustained by β -electrons and so-called „secondary electrons”, arising from inelastic and ionization collisions of “primary” β -electrons with tritium molecules. As a result in the WGTS tritium gas volume acts as a low-temperature and slightly ionized gas steady state close to quasi neutrality (the Debye length is small in comparison with the setup characteristic sizes). On the basis of an one-dimensional self-consistent model the WGTS plasma steady state is described and the influence of plasma phenomena on neutrino mass measuring process is discussed. It is found that electric potentials in a main plasma volume can not significantly make worse the measurement process. At the same time the non-equilibrium electron spectrum and fast plasma flow at the end of the tube can result in instabilities which are able to spoil slightly the β -electron spectrum endpoint. This problem must be carefully investigated further. For more reliable conclusions more detailed consideration is required that will include kinetic effects in the WGTS plasma.



Проблема объемного заряда в источнике



Исследование эффектов объёмного заряда в газообразном тритии
как источника искажения β -спектра в эксперименте
по поиску массы нейтрино «Троицк ню-масс».

Physics of Atomic Nuclei **71**, (2008), 427-436

*А. И. Белесев, Е. В. Гераскин, Б. Л. Жуйков, С. В. Задорожный, О. В. Казаченко,
В. М. Коханюк, Н. А. Лиховид, В. М. Лобашев, А. А. Нозик, В. В. Парфёнов, А. К.
Скасырская, Е. А. Судачков, Н. А. Титов, В. Г. Усанов.*

Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук

Эффект мал для «Троицк ν -масс, но
для КАТРИН нужна большая точность

Конверсионные электроны
 L_3 -линии ^{83m}Kr
как пробники
электрического потенциала

В данной работе приведены результаты исследования эффектов накопления объёмного заряда в газовом тритиевом источнике установки «Троицк ню-масс», имеющей целью поиск массы нейтрино. Наблюдалось уширение и сдвиг L_3 -линии конверсионных электронов газообразного источника ^{83m}Kr при совместной циркуляции с тритием. Полученное ограничение на величину флуктуаций потенциала объёмного заряда позволяет получить ограничение на связанный с ним ложный отрицательный квадрат массы нейтрино в эксперименте «Троицк ню-масс» $-0.8 < \Delta m_\nu^2 \leq 0 \text{ эВ}^2$. Обнаружен статистически достоверный сдвиг положения L_3 -линии, дающий указание на то, что в источнике действительно проходят процессы накопления объёмного заряда на уровне, существенном для будущего эксперимента «КАТРИН».



KATRIN status

Inner electrodes of the main spectrometer are installed (2012)

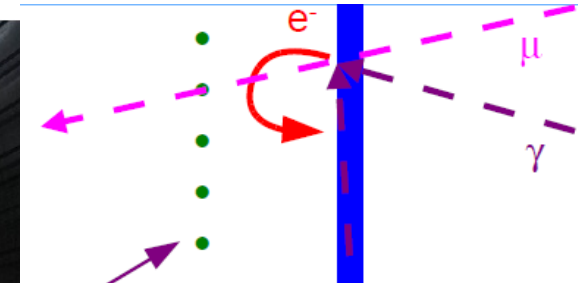
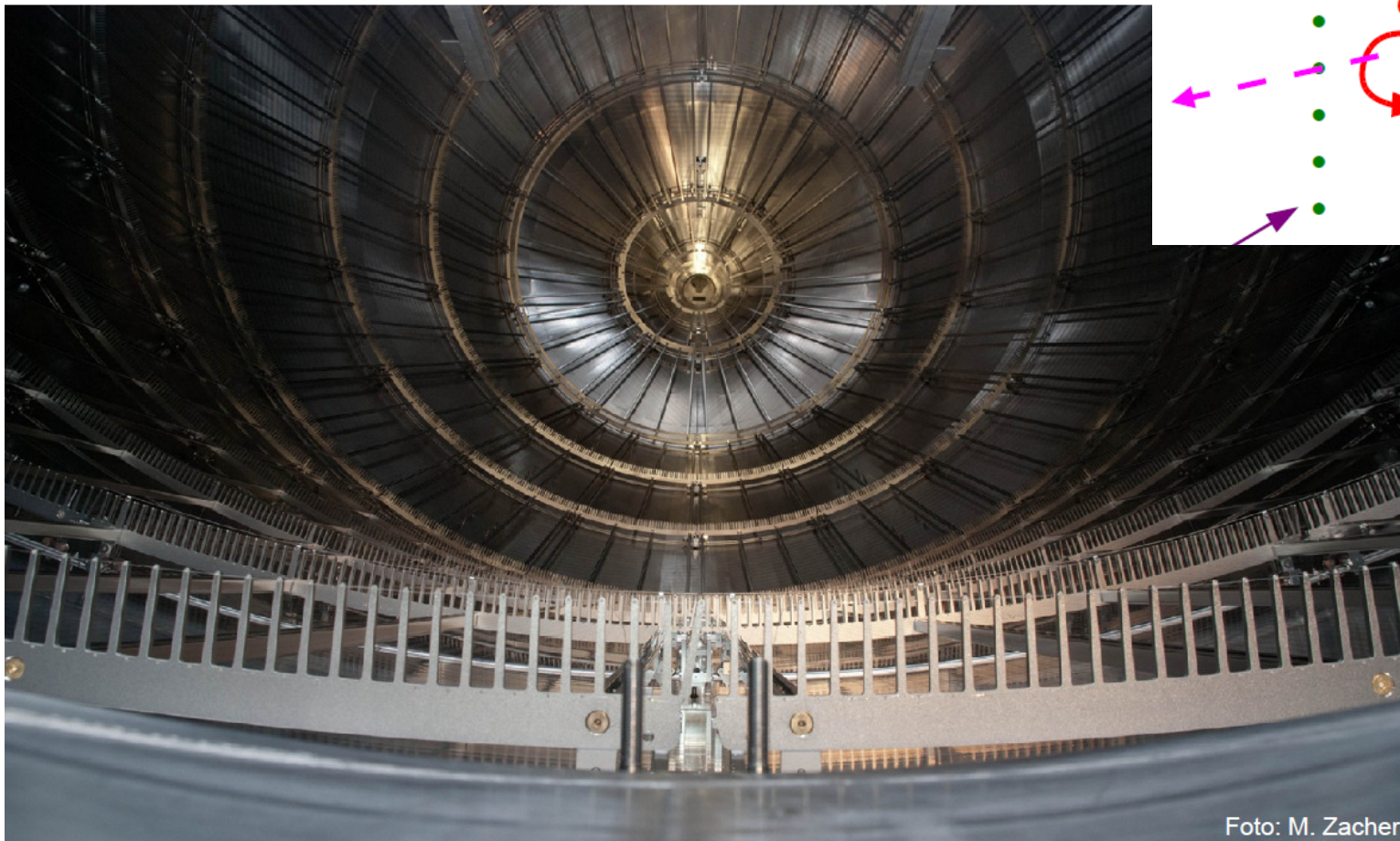


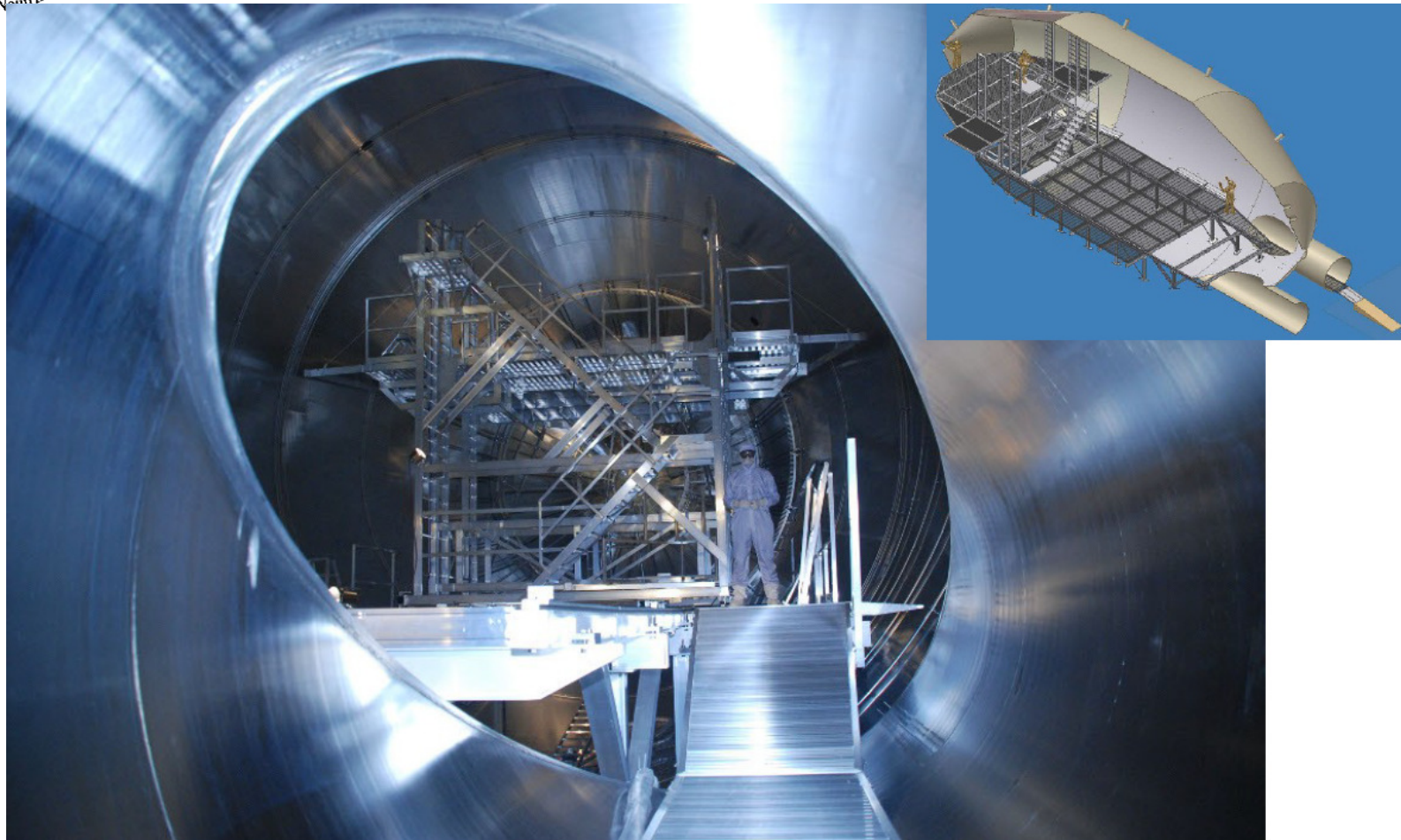
Foto: M. Zacher

<http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d736480/95-TRP-5210-S3-CWeinheimer.pdf>



KATRIN status

Inner electrodes installation



Christian Weinheimer

KATRIN CM XXII, March 2012

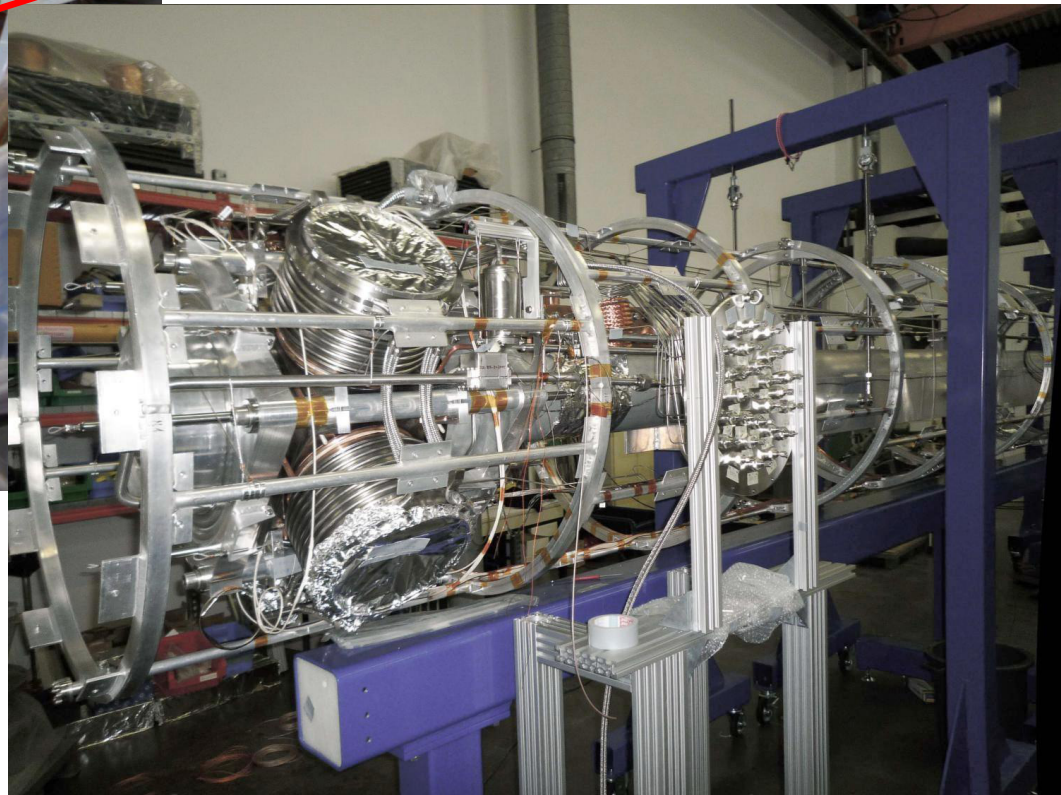
21



WGTS demonstrator (2011)



Thermal stabilization by
two phase (gaseous-liquid)
Ne loop up to 30 mK

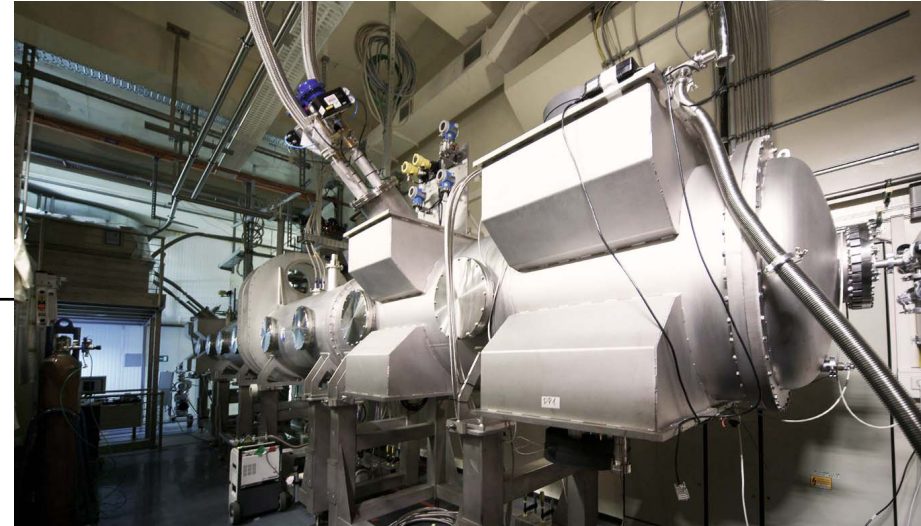
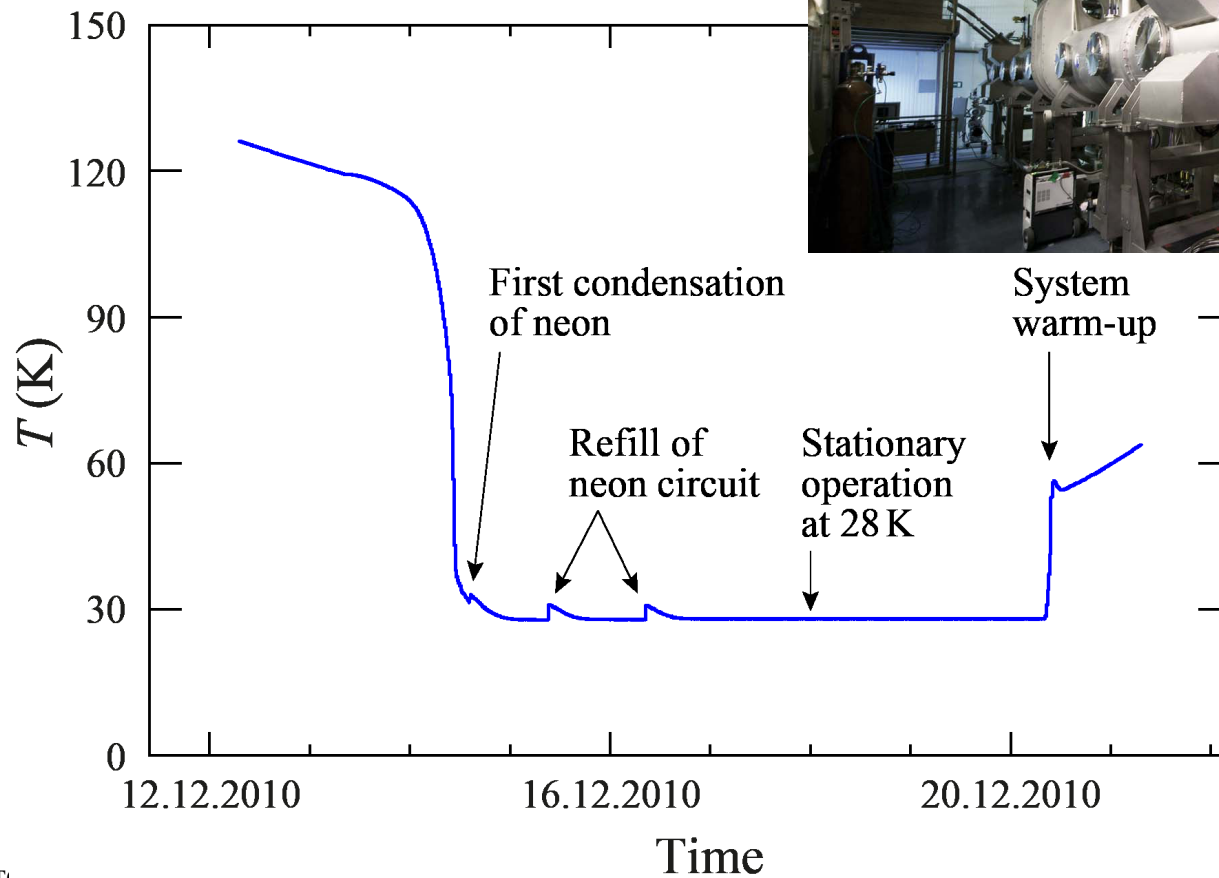




WGTS demonstrator (2011)

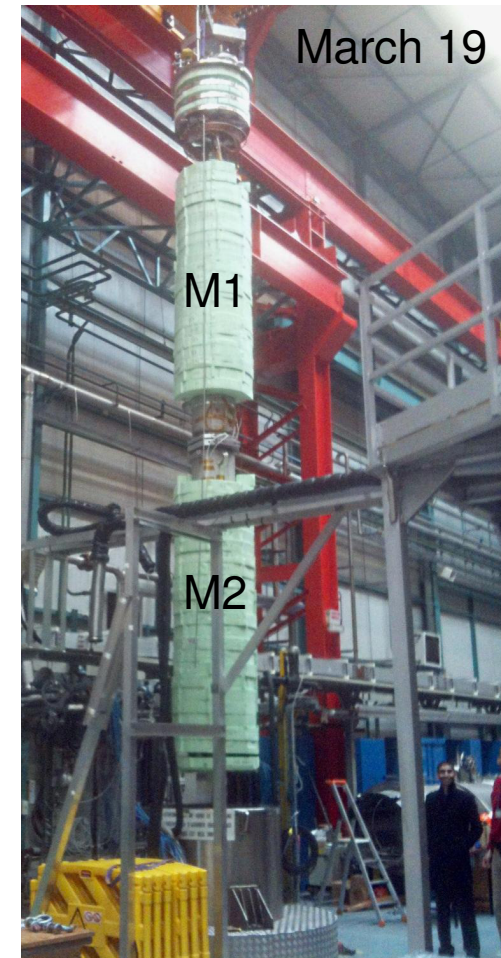


Cool-down of the WGTS-tube



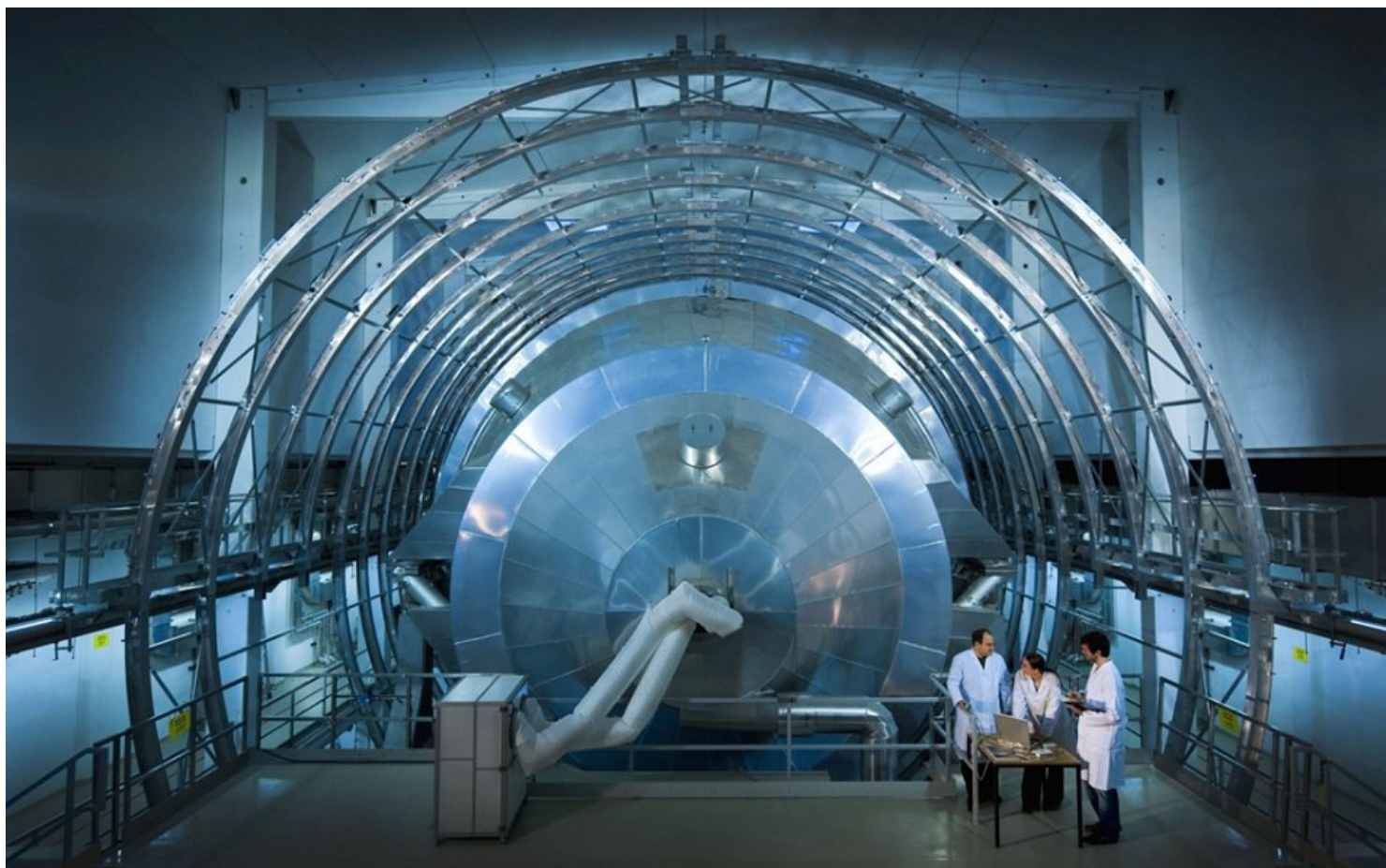


WGTS magnets – cold tests March, 2012





Основной спектрометр Катушки компенсации магнитного Земли





Детектор электронов





Оценка перспектив КАТРИН



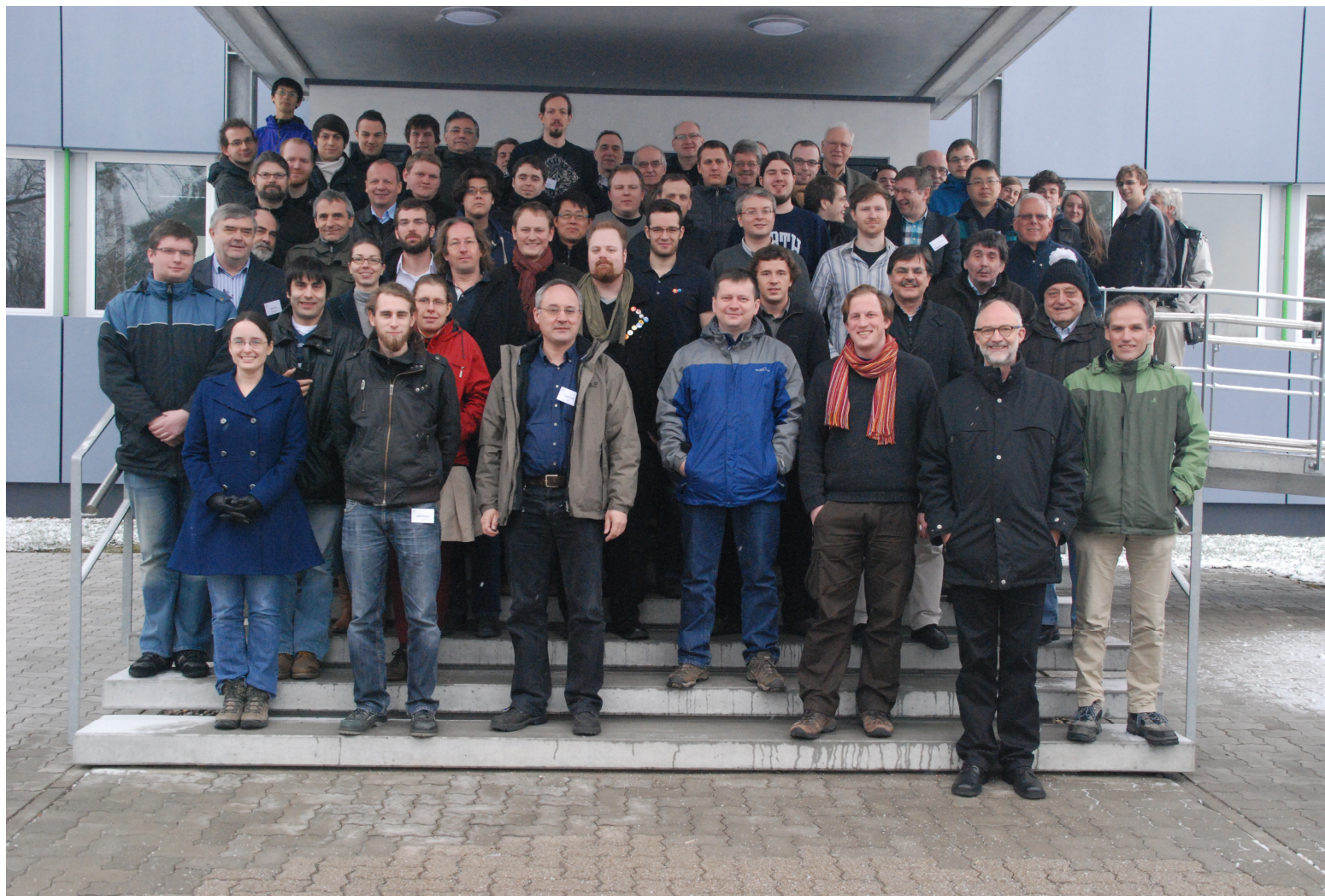
DOE-KATRIN Closeout Bullets: Status Review of the KArllsruhe TRItium Neutrino (KATRIN) experiment July 23-24, 2014

Findings:

- KATRIN is a world class experiment to measure the electron anti-neutrino mass with cosmological and physics relevant precision.
- KATRIN is the only experiment planned anywhere in the world which is capable of measuring a model-independent ν_e mass with a sensitivity of 200 meV (90% C.L. after five calendar years of operation).
- The milestone for the delivery of the WGTS determines the timescale of the critical path to complete the project, with completion of cryogenic and magnets tests planned for May, 2016.



В чем сила КАТРИН?



Н.А.Титов «В.М.Лобашев и эксперимент КАТРИН»

Конференция «Лобашеву-80» 23 октября 2014, Троицк, Россия



Последнее замечание



KIT
is
University of the State of Baden-Wuerttemberg
and
National Research Center of the Helmholtz
Association



Спасибо за внимание



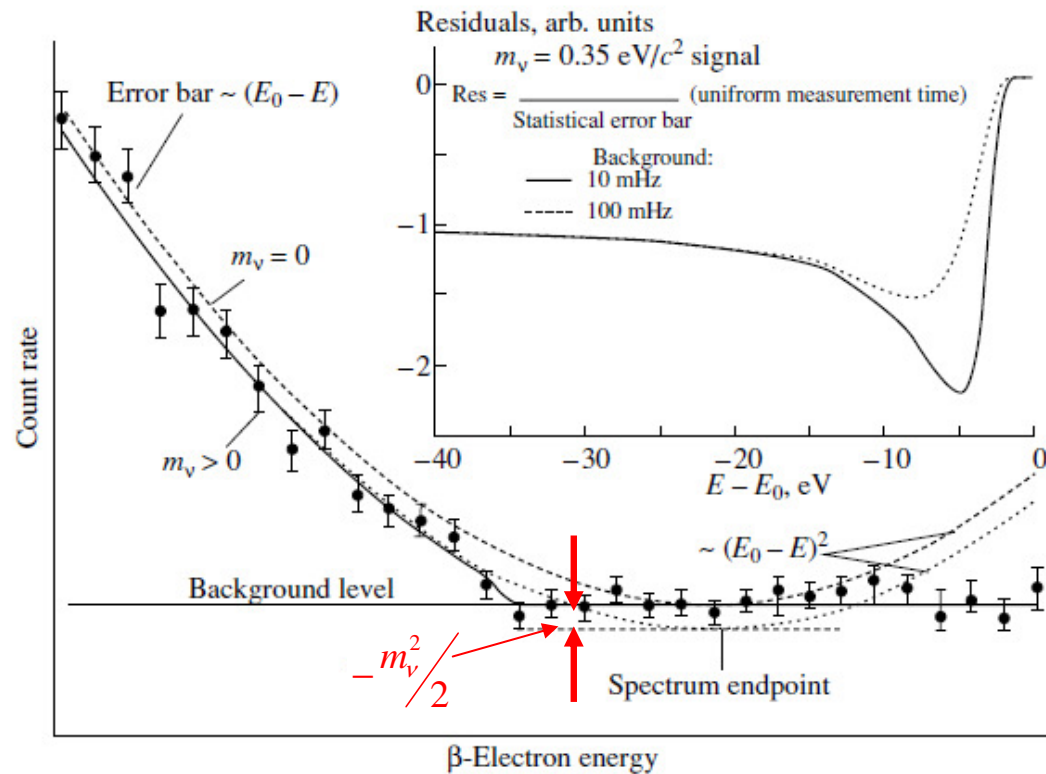
Back up slides



Форма спектра при $m_\nu > 0$



$$\frac{dN}{dE} = K \times F(Z, E) \times p \times E_{\text{tot}} \times (E_0 - E) \times [(E_0 - E)^2 - m_\nu^2]^{1/2}$$



$$\frac{dN}{dE} \sim (E_0 - E)^2 - m_\nu^2 / 2$$



2009: New INR spectrometer on place!



Spectrometer outer diameter 2.75 м, length 8.10 м.

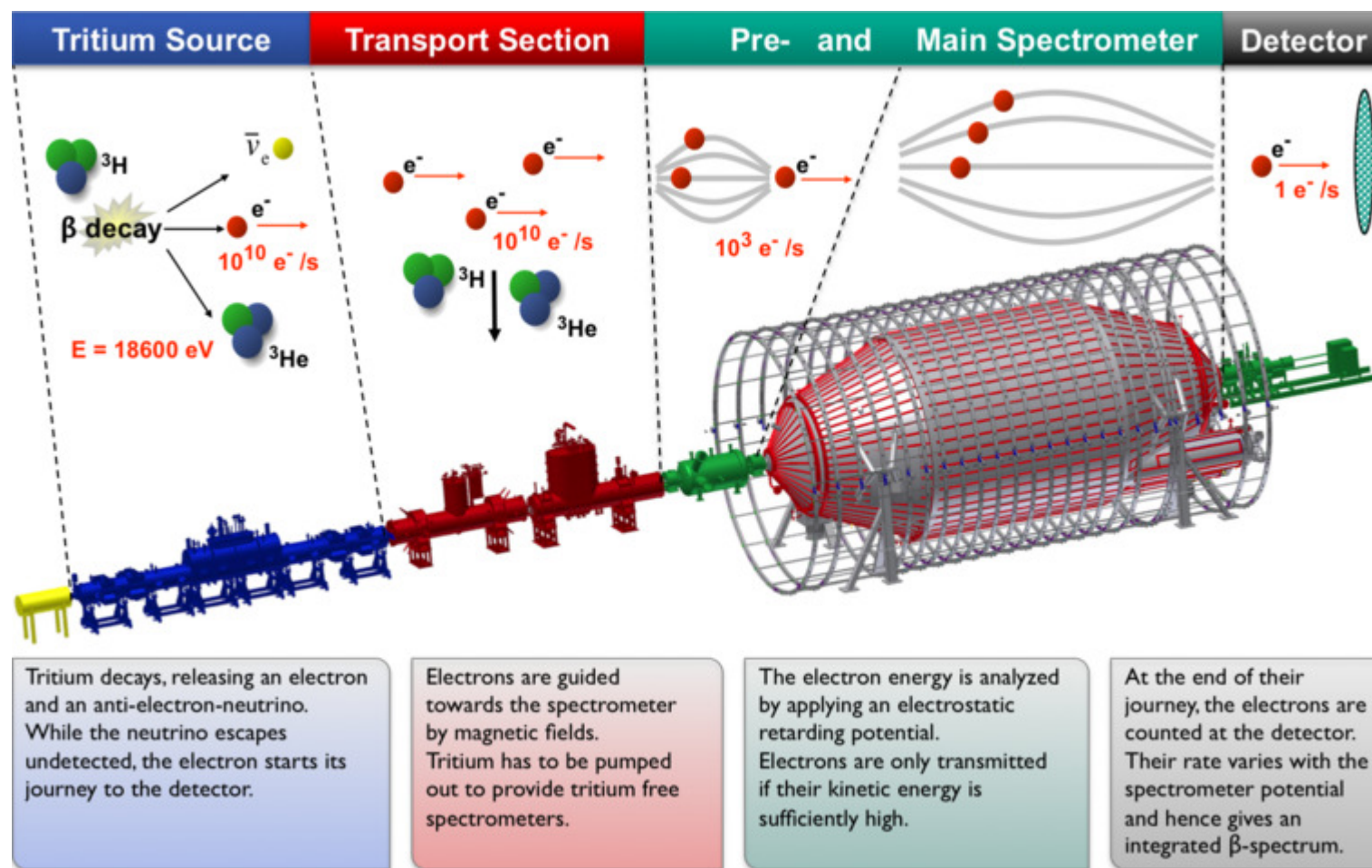
Central electrode diameter 2.20 м.

Spectrometer vessel bake-up at 200C° and chilling up to 10C°
for vacuum better than 10^{-7} Pa.

Stable operation up to 32 kV.



Продолжение поиска массы нейтрино: международный проект КАТРИН в Карлсруэ





Rear Wall subproject Space charge potential control



INR program:

1. Potential shift due to the hydrogen adsorption on the side walls.
2. Tritium plasma simulation with ionized hydrogen
 - “Rear Wall concept” check
 - Plasma transport
 - Ion-electron recombination in the WGTS
 - Ion removal by $E \times B$ drift

Experimental method – observation of the ^{83m}Kr internal conversion line position shift and line width broadening (when ^{83m}Kr and T_2 are circulating together through WGTS)