

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Bestimmung der Neutrino-Masse



Inhalt

- Motivation
- Möglichkeiten zur Neutrinomassebestimmung
- Theoretische Überlegung
- Katrin-Experiment
Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment
- Zusammenfassung

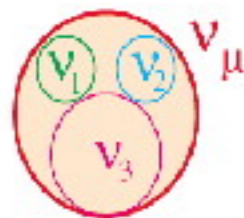
Neutrinos

- Energie- und Impulserhaltung beim β -Zerfall verletzt (L. Meitner und O. Hahn)
- 1930 postuliert W. Pauli das Neutrino um Energie- und Drehimpulserhaltung zu retten
- von E. Fermi Neutrino genannt
- 1956 experimentell von Reines und Cowen entdeckt



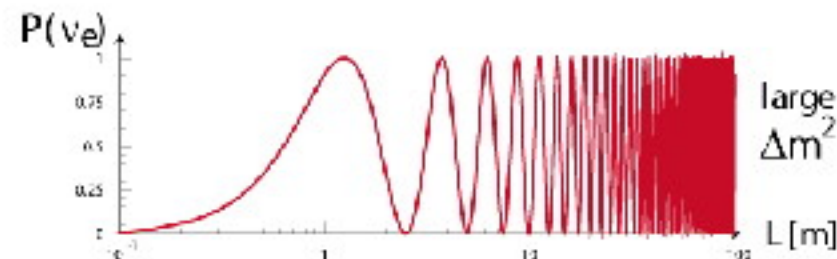
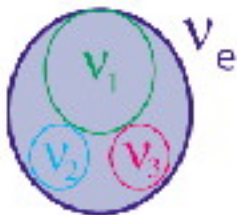
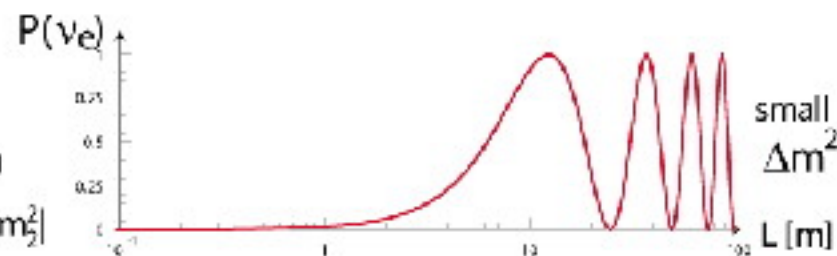
Neutrinooszillation

Solares Neutrino Defizit wird durch N.o. erklärt



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = A \cdot \sin^2(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot L / E_\nu)$$

$$L, t \quad \begin{cases} A = \sin^2(2\Theta) \\ \Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2| \end{cases}$$



$$P = P(\Delta m^2) ; \Delta m^{2ij} = |m_i^2 - m_j^2| \quad \rightarrow \quad m_i \ll \Delta m^2$$

Oszillation liefert Untergrenze: $m_\nu \ll (0.04 - 0.07) \text{ eV}$

Konsequenzen

Teilchenphysik

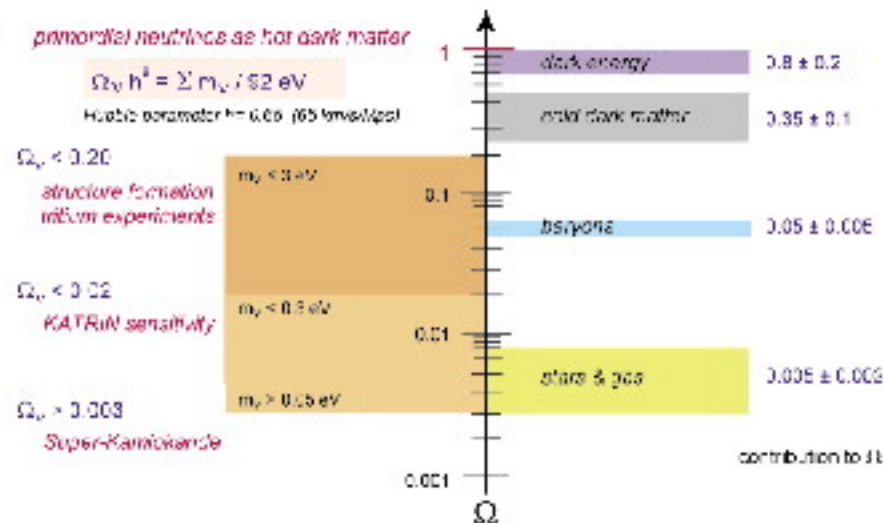
- Im SM ist die Neutrinomasse per Definition null
- SM beschreibt keine Neutrinomischung
- Wichtig für Verständnis von Fermionenmasse
- Erste Hinweise auf Physik nach dem SM
- Erweiterung des SM wird nötig
- Bestimmung der Masse → Einschränkung der Erweiterungen
- „hierarchisch“ oder „fast degeneriert“
 $m_1 \ll m_2 \ll m_3$ oder $m_1 \sim m_2 \sim m_3$

Konsequenzen

Kosmologie

Neutrinomasse wichtig für viele Szenarios

Kandidat für Heiße Dunkle Materie HDM



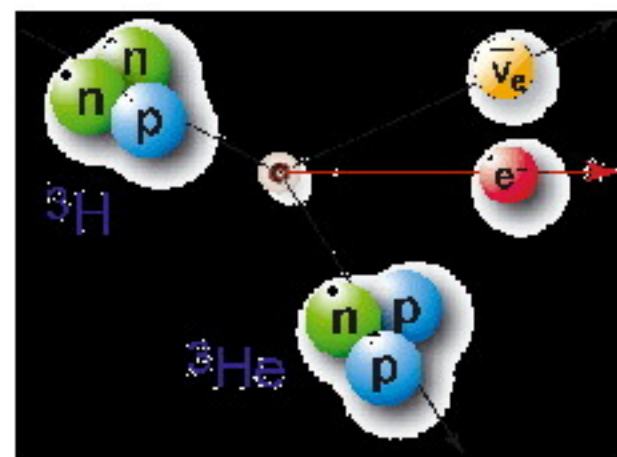
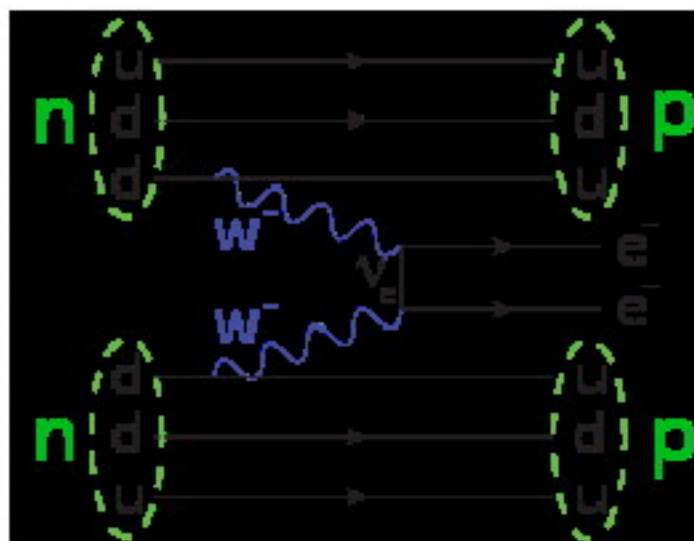
Selbst bei kleiner Masse
leisten Neutrinos auf
Grund Ihrer hohen Zahl
einen Beitrag zur
Gesamtenergie

$$0.003 < \Omega_\nu < 0.25$$

Rückschlüsse auf großskalige Evolution des Universums
Wichtiger Parameter zur Auswertung der CMBR

Möglichkeiten

- Neutrinoflugzeit aus Supernovae
- Doppelter β -Zerfall ($0\nu\beta\beta$)
- Kinematik des einfachen β -Zerfalls



Neutrinoflugzeit

Geschwindigkeit für masselose Teilchen: $v=c$ sonst: $v<c$

Für zwei Neutrinos gleichen Ursprungs und unterschiedlicher Energie gilt dann:

$$T \approx \frac{L}{c} \left(1 + \frac{m_\nu^2}{2 \cdot E^2} \right) \quad \rightarrow \quad m_\nu^2 = \frac{2 \cdot c \cdot \Delta t}{L} \left(\frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right)^{-1}$$

Supernova 1987a:

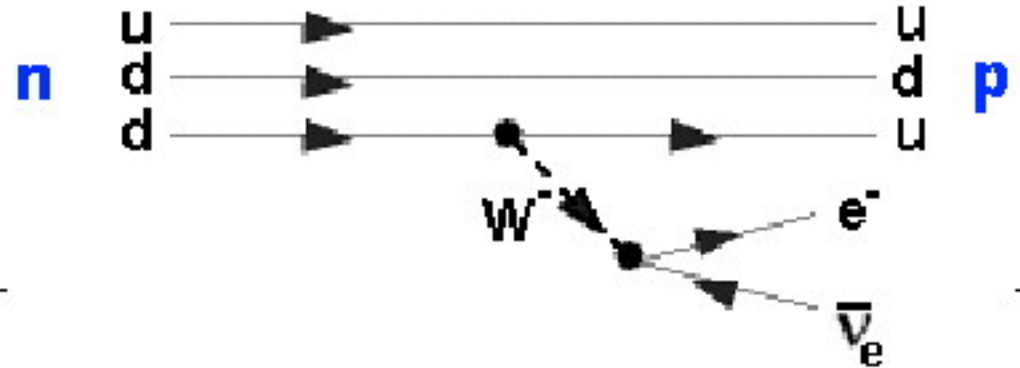
48.000 ± 5.000 Parsec entfernt (157.000 ± 16.000 Lichtjahre)

$\approx 10^{22}$ Neutrinos emittiert / 29 Neutrinos nachgewiesen / $\Delta t \approx 10s$

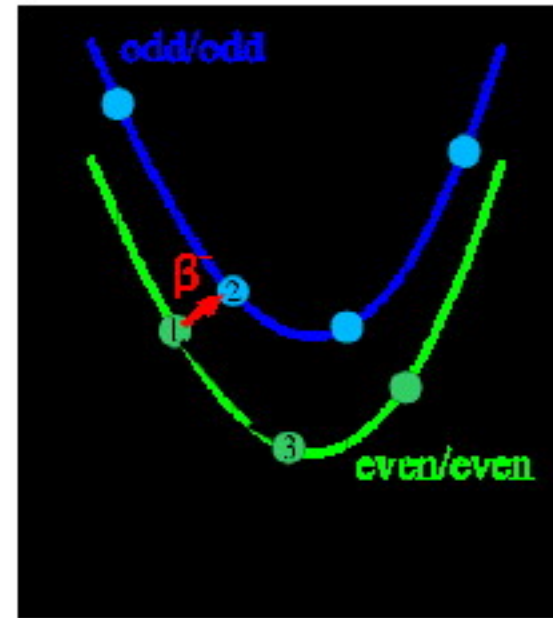
- $m_\nu < 5.7$ eV 95% C.L.

β -Zerfall

- β -Zerfall: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

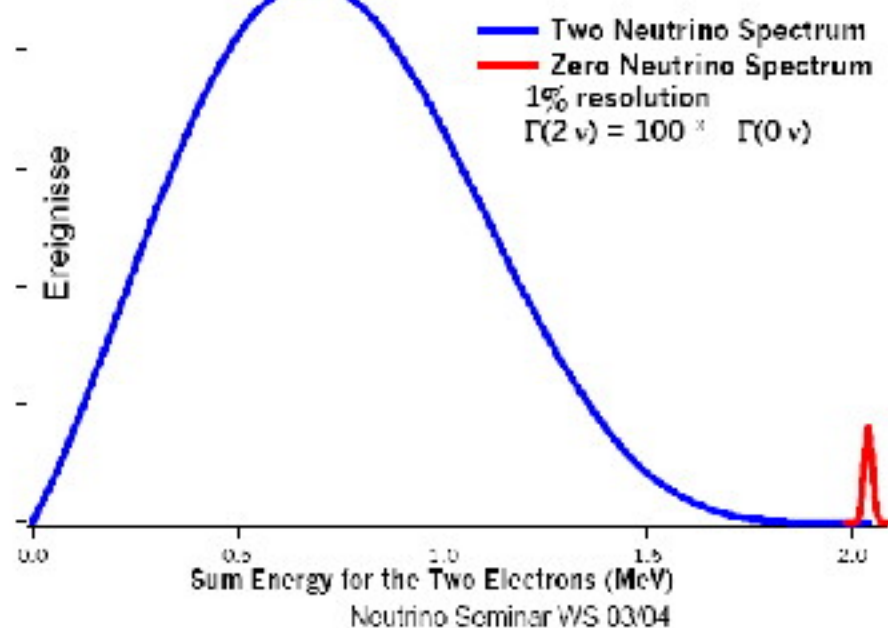
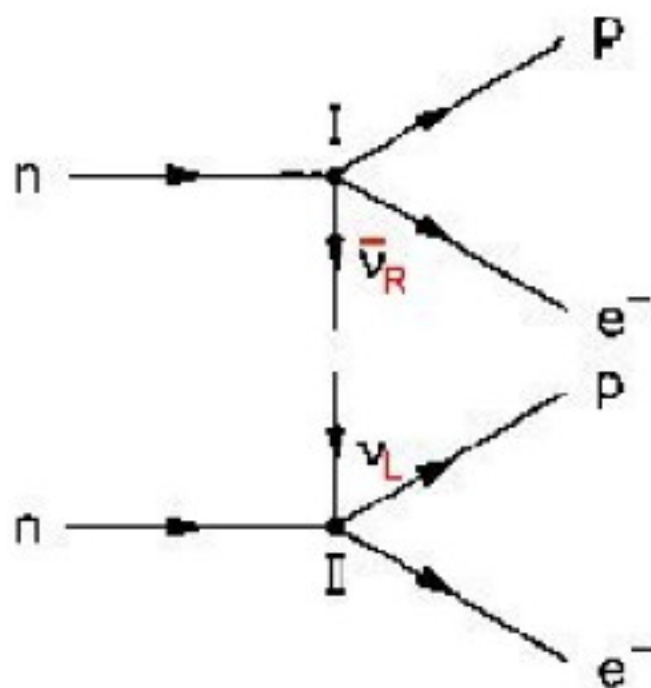


- Doppelter β -Zerfall ($2\nu\beta\beta$)
 $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$



Doppelter β -Zerfall ($0\nu\beta\beta$)

Neutrinoloser doppelter β -Zerfall:



Kinematik des β -Zerfalls

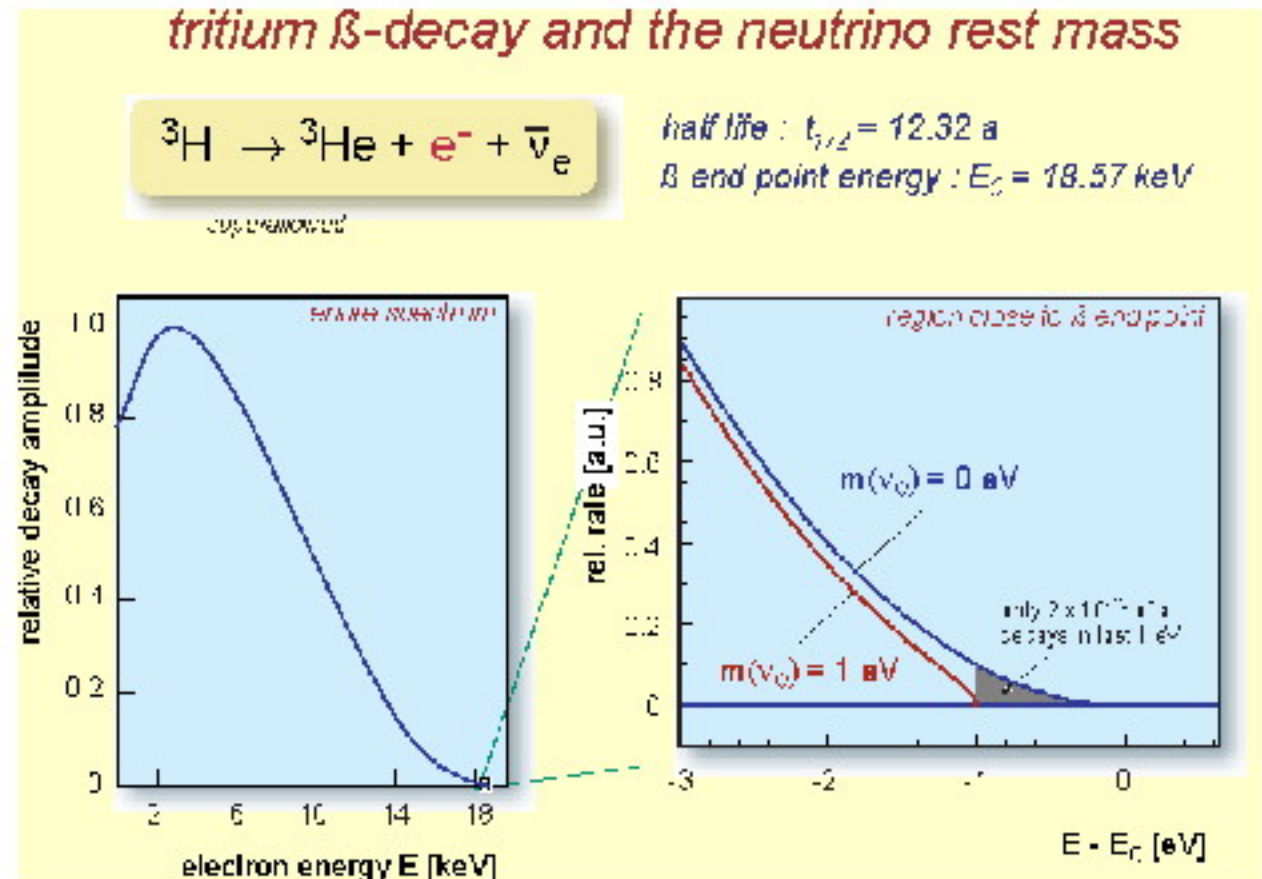
Tritium β -Zerfall

Vorteile:

- Niedrige Endpunktenergie von 18,6 keV
- Verhältnismäßig kurze Halbwertszeit von 12,3 a
- WW der β -Elektron beim Austritt mit Kern und Hülle ist leicht zu berechnen
- geringe inelastische Streuung der β -Elektronen da Z klein ist
- β -Zerfall ist ein supererlaubter Zerfall (Spiegelkerne)

Kinematik des β -Zerfalls

- Messung des Endpunktes
- Nur sehr wenige Ereignisse
- Sehr kleine Energiedifferenz
- Daher der große Aufwand
- Das Spektrum wird „integral“ gemessen



$$\frac{dN}{dE} = C \times F(Z, E) p(E + m_e c^2) (E_0 - E) [(E_0 - E)^2 - m_\nu^2]^{\frac{1}{2}} \Theta(E_0 - E - m_\nu)$$

Herausforderung

- Zählrate geht gegen null
- erste Versuche in den 1990ern
 - Russia (Troitsk nr Moscow): $m_\nu < 2.5 \text{ eV}$ 95% C.L.
 - Mainz: $m_\nu < 2.2 \text{ eV}$ 95% C.L.
- Braucht eine Größenordnung besser
- Sub eV Auflösung bei keV Energien

$\Delta E/E \approx 1 \text{ eV}/18,57 \text{ keV}$

und extrem geringer Hintergrund

➔ KATRIN



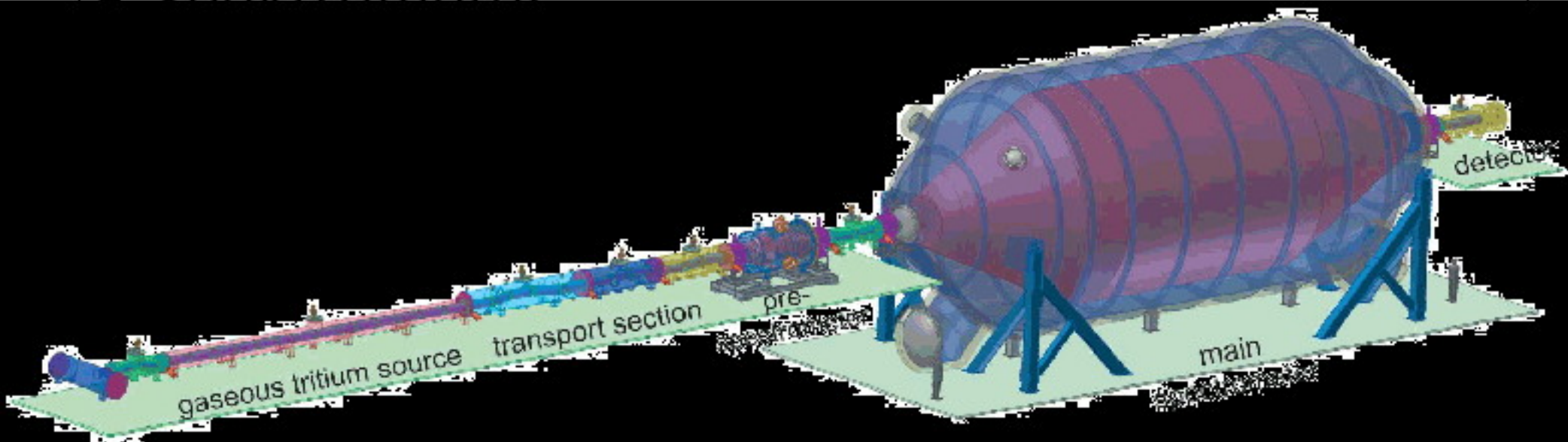
KATRIN

- Aufbau
- Funktionsweise
- Messsimulation
- Sensitivität



Aufbau

- Tritiumquelle
- Transport
- Spektrometer



Tritium Quelle

Windowless Gaseous Tritium

- Sehr kalt (27 K)
- Hohe Isotopenreinheit > 95%

- Hohe Luminosität

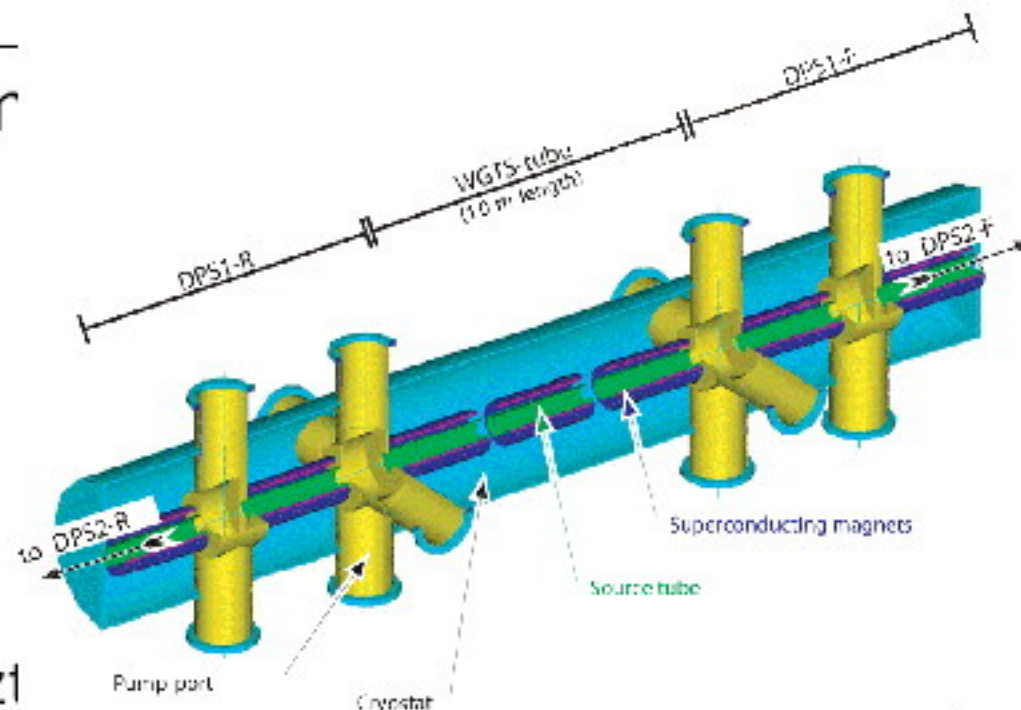
Zerfall $9.5 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$

Raumwinkel von 2π genutzt

Teilchenfluss \sim Querschnittsfläche A

- Adiabatischer Transport der Zerfallselektronen
 $B=3.6 \text{ T} \rightarrow$ Zyklotronbewegung Richtung Spektrometer
- Hohe Stabilität der Basisparameter

$\Delta T=30 \text{ mK}$ $\Delta p=10^{-6} \text{ mbar}$



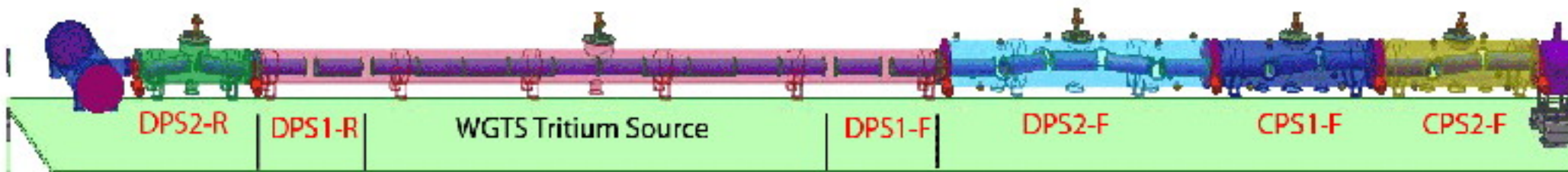
Transport

Hintergrund durch Tritiumzerfall $< 10^{-3}$ Ereignisse s^{-1}

Tritiumfluss um Faktor 10^{11} unterdrücken

Tritiumpartialdruck $< 10^{-2}$ mbar

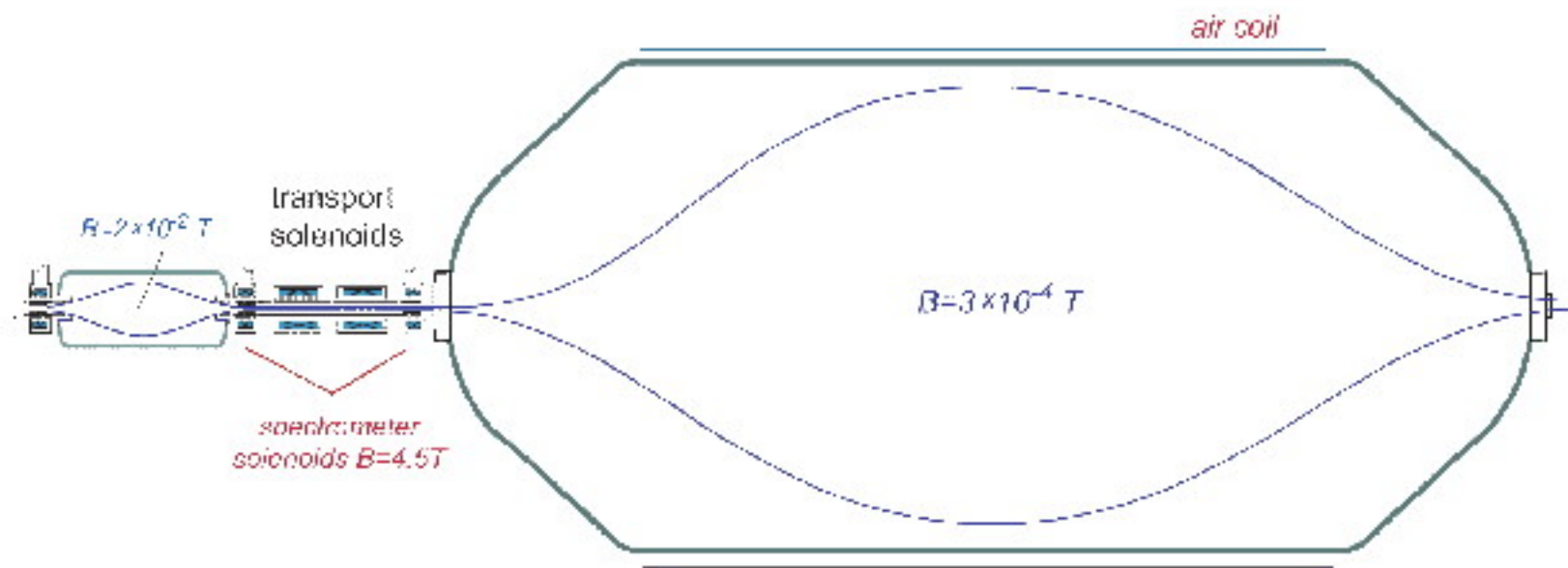
- Differential pumping section
Turbomolekularpumpen verringern den Fluss um 10^4
- Cryogenic pumping sections
Adsorption von Tritium auf Argoneis bei 4,5 K



Spektrometer

Tandemanordnung

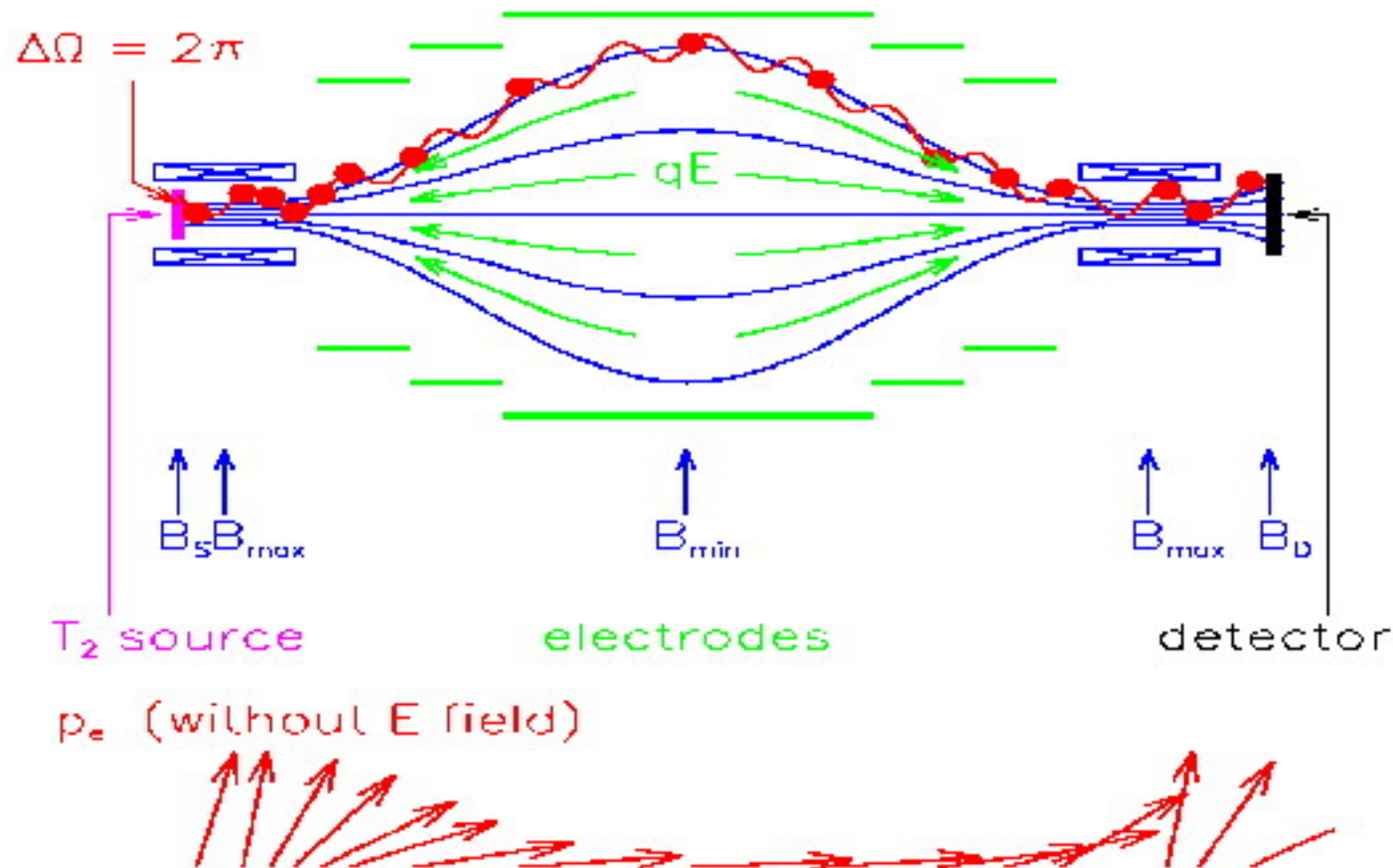
- Beide im MAC-E Modus
- Vorspektrometer als Vorfilter (Flussreduzierung: 10^1)
- Beide sehr ähnlich: Vorspektrometer als Prototyp für das Hauptspektrometer



MAC-E Filter

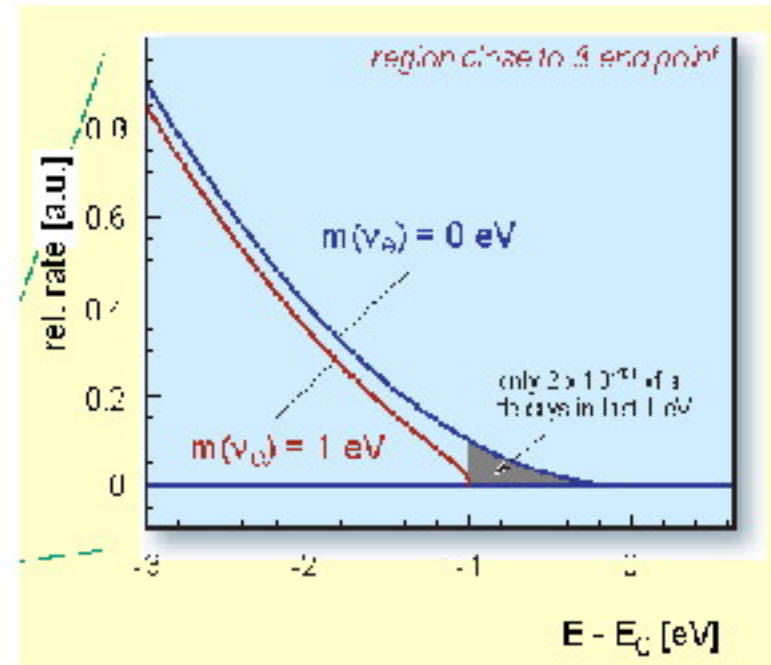
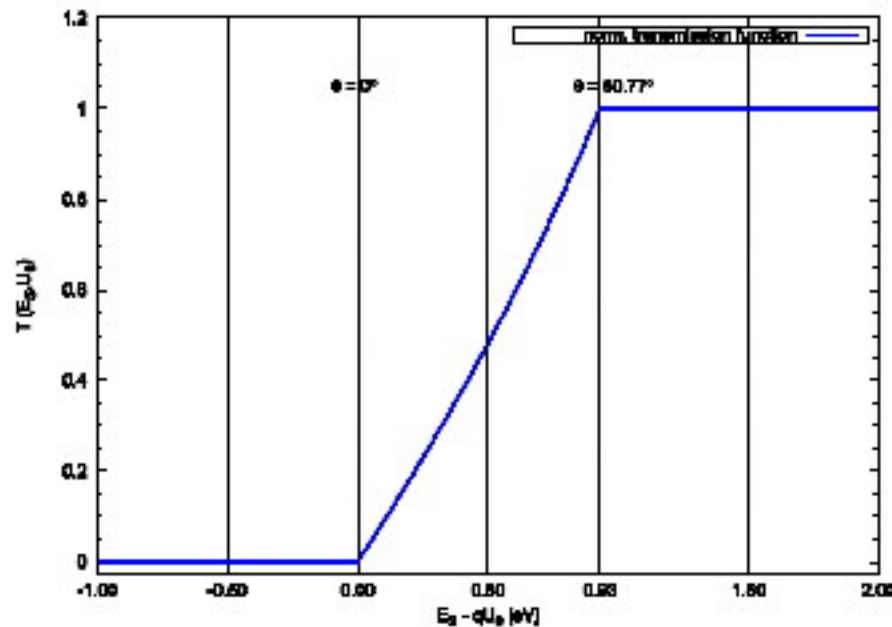


(Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter)



Magnetische Ausrichtung

Transmissionsfunktion



Spektrometer funktioniert als
Integrierender Hoch-Energie Passfilter

Steigung gibt die Energieauflösung



- Hohe Luminosität und niedriger Hintergrund bei hoher Energieauflösung
- Adiabatische Ausrichtung der Elektronen auf Grund des möglichst homogenen Magnetfeldes
- Elektrostatischer Passfilter
- Großer Raumwinkel Ω



MAC-E Filter

- Energieauflösung gegeben durch: $\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{\min}}{B_{\max}}$
 $\Delta E = 1 \text{ eV} ; E = 20 \text{ keV}$
 $\rightarrow B_{\max} = 6 \text{ T} ; B_{\min} = 0,3 \text{ mT}$
- Begrenzen des Öffnungswinkel durch magnetischen Spiegeleffekt um Elektronen zu unterdrücken, die zu lange in der Quelle waren:
 $\theta_{\max} = 51^\circ ; B_S = 3,6 \text{ T}$ $\sin \theta_{\max} = \sqrt{\frac{B_S}{B_{\max}}}$
- Magnetische Flusserhaltung:

$$\Phi = \int B \, dA = B_S \cdot A_S = B_{\max} \cdot A_{3,\text{eff}} = B_A \cdot A_A$$
 $d_S = 90 \text{ mm} ; A_A = 76 (63) \text{ m}^2$
 \rightarrow Dimension des Tanks: $\varnothing = 10 \text{ m}$, Länge = 23 m

Spektrometer

Tank als äußere Elektrode: 18,4kV

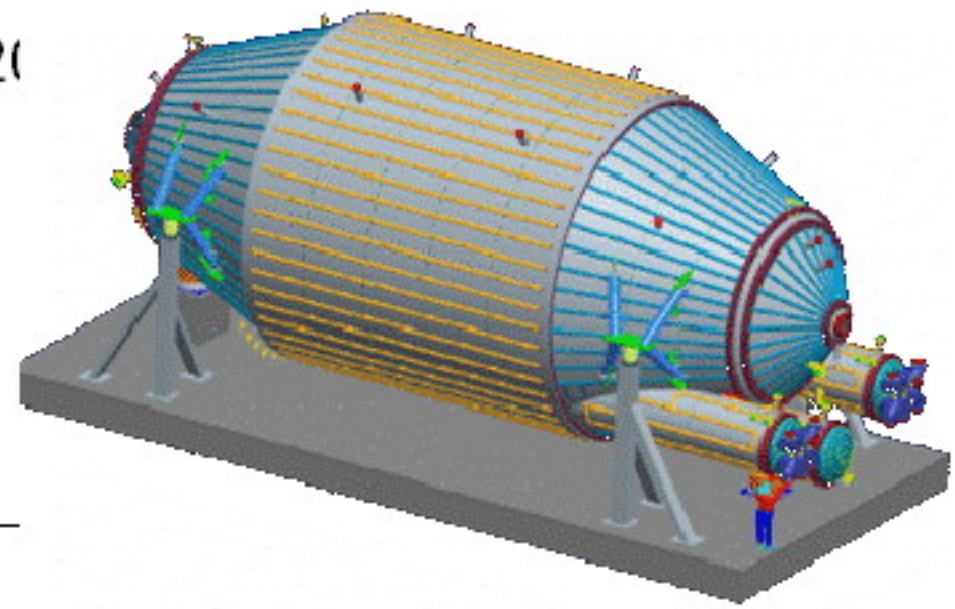
- Benötigt keine komplizierte innere Elektrode
- Weniger Oberfläche im Tank
- Entkopplung des Potential von elektrischem Rauschen

Innere Elektroden

- Negativer als die Hülle zur Hintergrund Reduzierung
 - Verhindert Penningfalle
- Befreit eingesperrte Teilchen

Hauptspektrometer

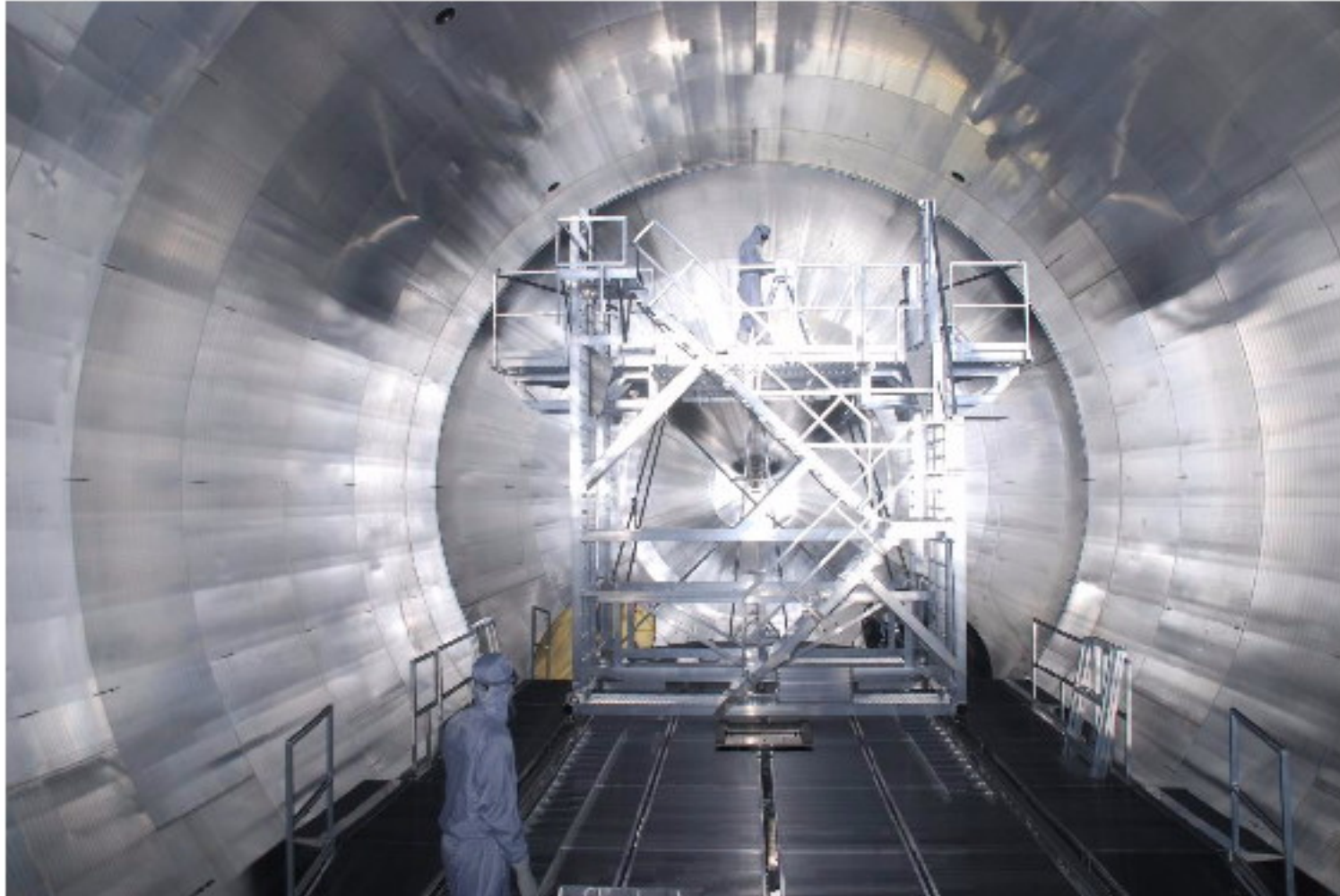
- Technologische Herausforderung:
Größe (1400 m³)
Vakuum (10⁻¹⁰ mbar)
- Status:
Ende 2006 in Karlsruhe eingetroffen
Jetzt in der Montage
Test der el.-mag. Eigenschaften 2007



Hauptspektrometer



Spektrometer



Spektrometer

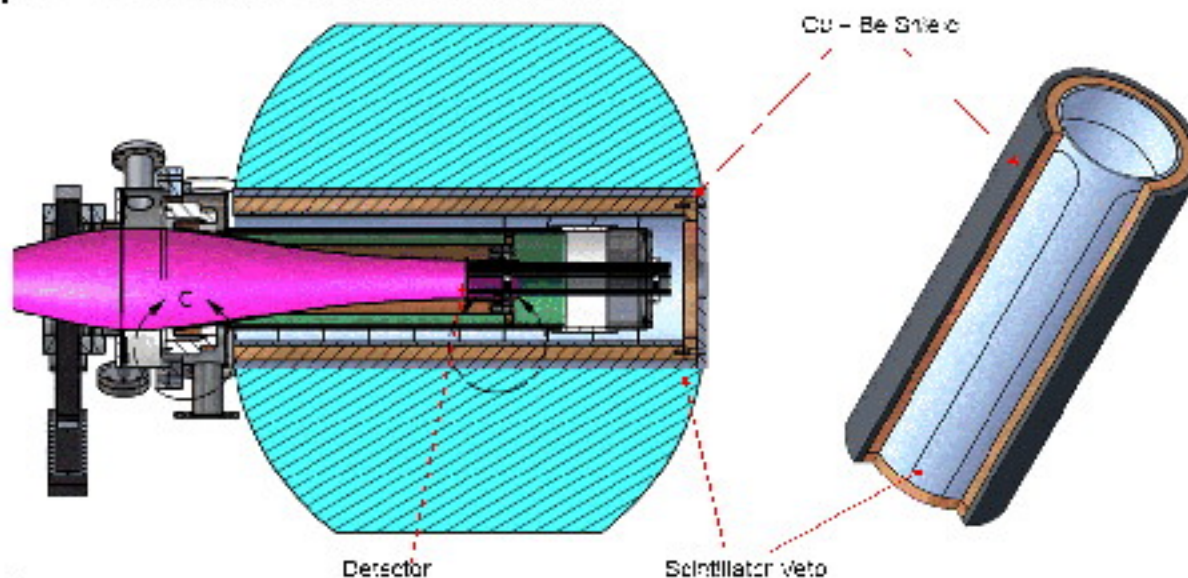


Detector

Focal plane detector (FPD) (Siliziumhalbleiterdetektor)

Elektronenzähler müsste doch reichen? Haben aber

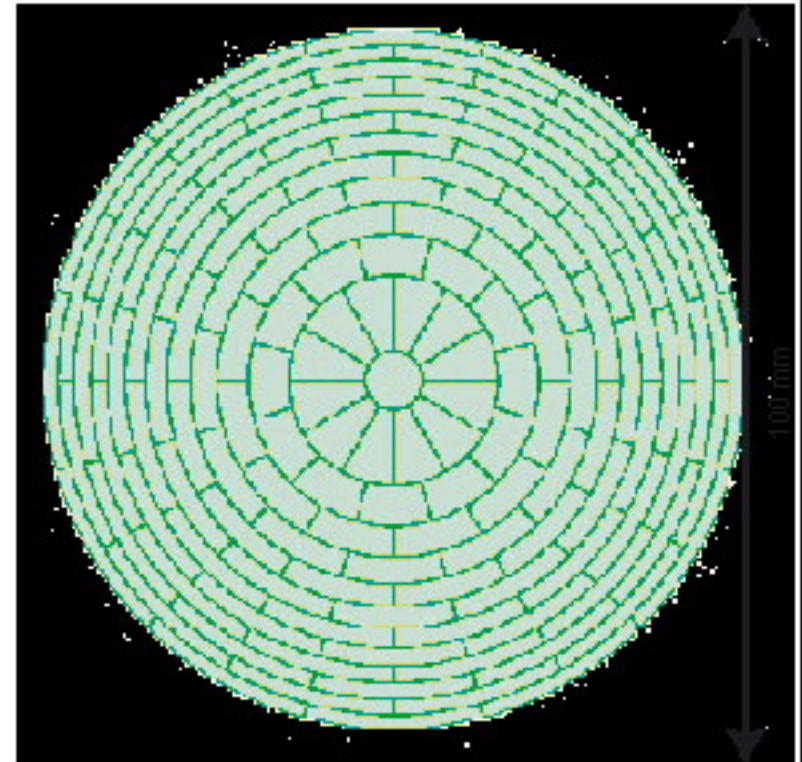
- Ortsauflösung
- Ultra-hohe Energie-Auflösung



Detektor

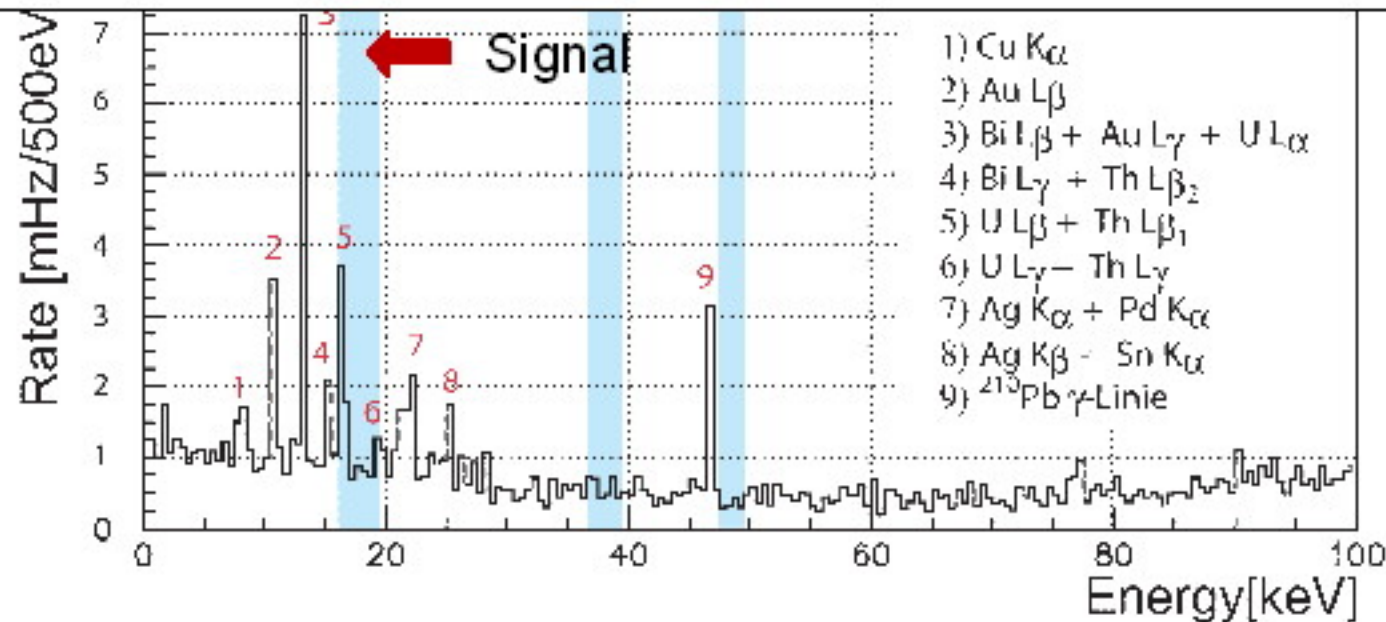
Ortsauflösung

- Vermessung von Inhomogenitäten des Verzögerungspotentials
- Überprüfen der Homogenität der Tritiumquelle
- Unterdrückung von Hintergrund von außerhalb des gewünschten Magnetfeldes



Detektor

Energieauflösung zur Hintergrundidentifizierung



Evtl. Nachbeschleunigen

Messung

Simulation einer 1 Jahres Messung

Systematische Fehler:

- Variation der Verzögerungsspannung
- inelastische Elektronenstreuung

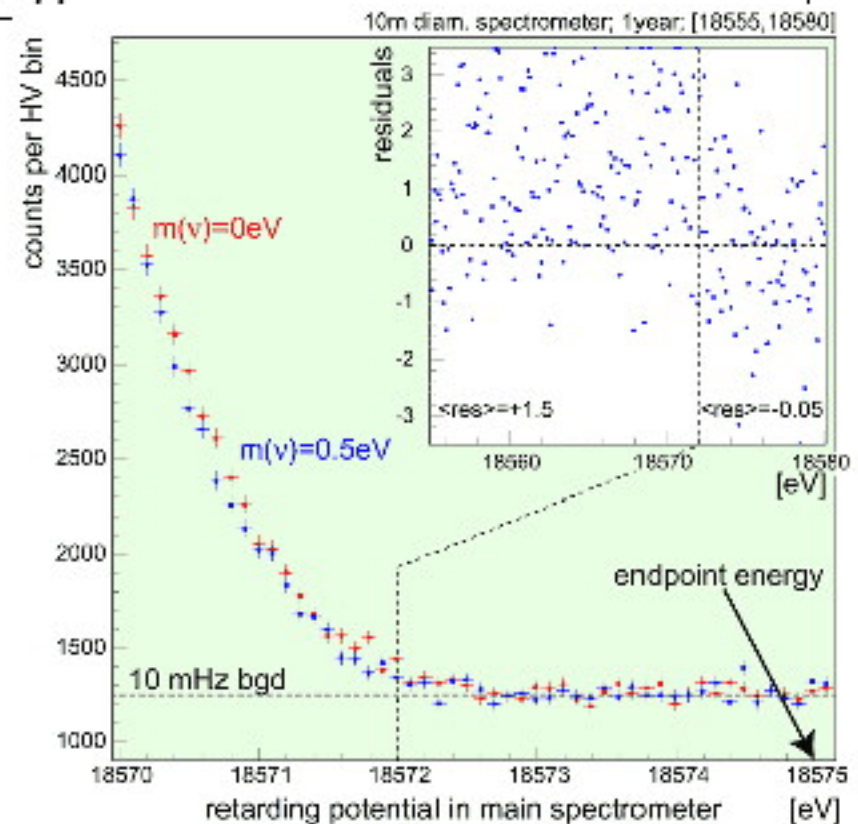
$$\sigma_{\text{sys,tot}} \approx 0.01 \text{ eV}^2, \quad \sigma_{\text{sys,tot}} \leq 0.017 \text{ eV}^2$$

Statistische Fehler:

- Statistischer β -Zerfall
- Reduzierung durch Zeitfensteroptimierung

$$\sigma_{\text{stat}} = 0.018 \text{ eV}^2.$$

Auflösung: 0.2 eV



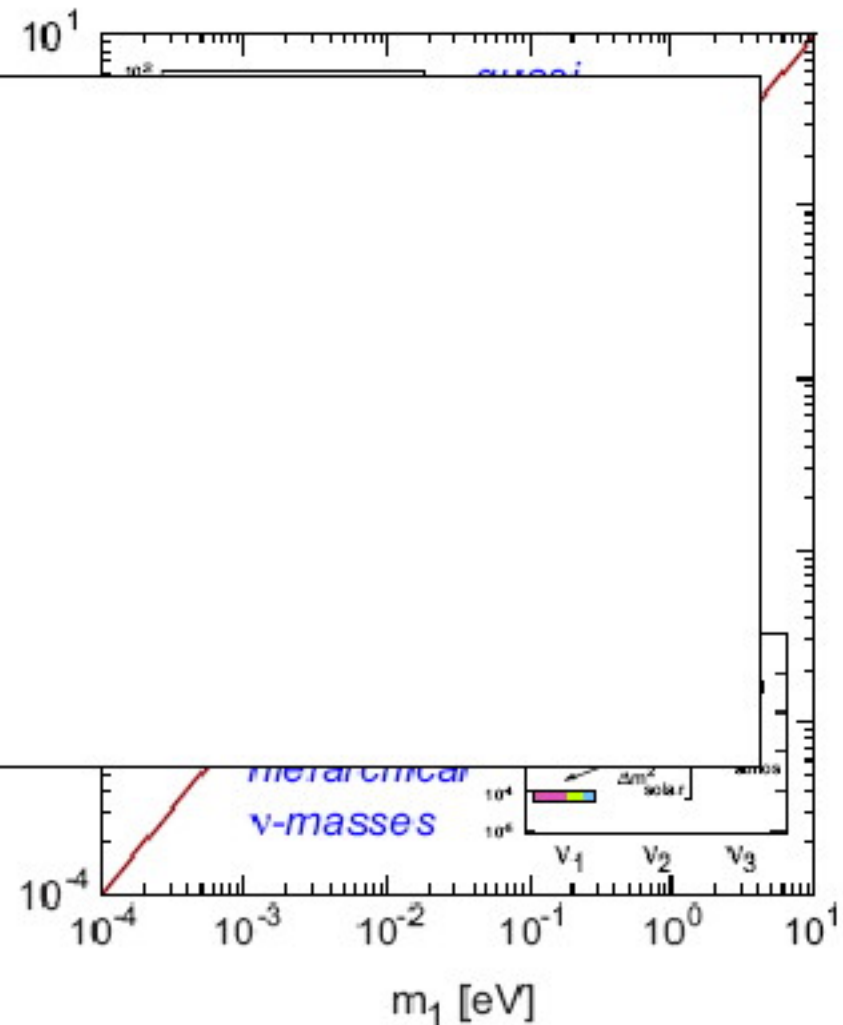
Sensitivität

Entdeckungswahrscheinlichkeit

- $m_\nu = 0.35$ eV 5 sigma
- $m_\nu = 0.30$ eV 3 sigma

Wenn nichts gefunden wird:

Obergrenze für Neutrinomasse bei
0.2 eV mit 90%



Sensitivität

Verbesserte Sensitivität ist zurückzuführen auf

- Größeres Spektrometer (Durchmesser: 7m → 10m)
- Höhere Isotopenreinheit (70% → 95%)
- Größere Tritiumquelle (Durchmesser: 7cm → 9cm)
- Optimierung der Messzeiten und Spannungsintervalle
- Verbesserte Systematik der zugehörigen Experimente
- Verringerung des Hintergrundes (10-1 mHz)

Zusammenfassung

- Neutrinooszillation liefert Hinweise auf Neutrinomasse
 $m_\nu \geq (0.04 - 0.07) \text{ eV}$
- Bisher keine Ergebnisse bei direkter Bestimmung
 $m_\nu < 2.2 \text{ eV}$ 95% C.L.
- Katrin, um eine Größenordnung besser als Vorgänger
 $m_\nu = 0.30 \text{ eV}$ mit 3 sigma
- Messbeginn 2011

Literatur

- KATRIN Design Report 2004
- KATrin Letter of Intent
- <http://www-ik.fzk.de/~katrin/>
- Physics Letters B Volume 460, Issues 1-2;
5 August 1999, Pages 227-235
- <http://qgp.uni-muenster.de/~matpra>
- <http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0304/janitzky2.pdf>

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B63 (1992) 345–358
North-Holland