

---

# Masse des Elektronenneutrinos

Felix Braig  
Seminar Präzisionsexperimente der Teilchenphysik  
6. Juni 2014

RADIO-SCHWEIZ AG. **RADIOGRAMM - RADIOGRAMME** RADIO-SUISSE S.A.

SBZ1311 ZHW UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGOILL 56 14 1310  
 PLC 00253 ✓

Erhalten - Reçu **„VIA RADIOSUISSE“** Befördert - Transmis

von - de	Stunde - Heure	NAME - NOM	nach - à	Stunde - Heure	NAME - NOM
NEWYORK	15	PAULI		7 4	15 VI. 56 --1 10

**Brieftelegramm**

LT

NACHLASS  
 PROF. W. PAULI

PROFESSOR W PAULI  
 ZURICH UNIVERSITY ZURICH

*Per Post* ①

NACHLASS  
 PROF. W. PAULI

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED  
 NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY  
 OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX  
 TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

FREDERICK REINES AND CLYDE COWN  
 BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

Nr. 20 6500 X 100 3/54

Quelle: <http://www.spektrum.de/alias/teilchenphysik/katrin-die-feinwaage-fuer-neutrinos/1190736>

# Inhaltsverzeichnis

---

## Grundlagen



- Neutrinooszillationen
- Das Neutrino im Standardmodell
- Anforderungen an das Experiment

## Bestimmung der Neutrinomasse



- Methoden der Massenbestimmung
- Das Experiment KATRIN

## Ausblick



# Inhaltsverzeichnis

---

## Grundlagen



- Neutrinooszillationen
- Das Neutrino im Standardmodell
- Anforderungen an das Experiment

## Bestimmung der Neutrinomasse



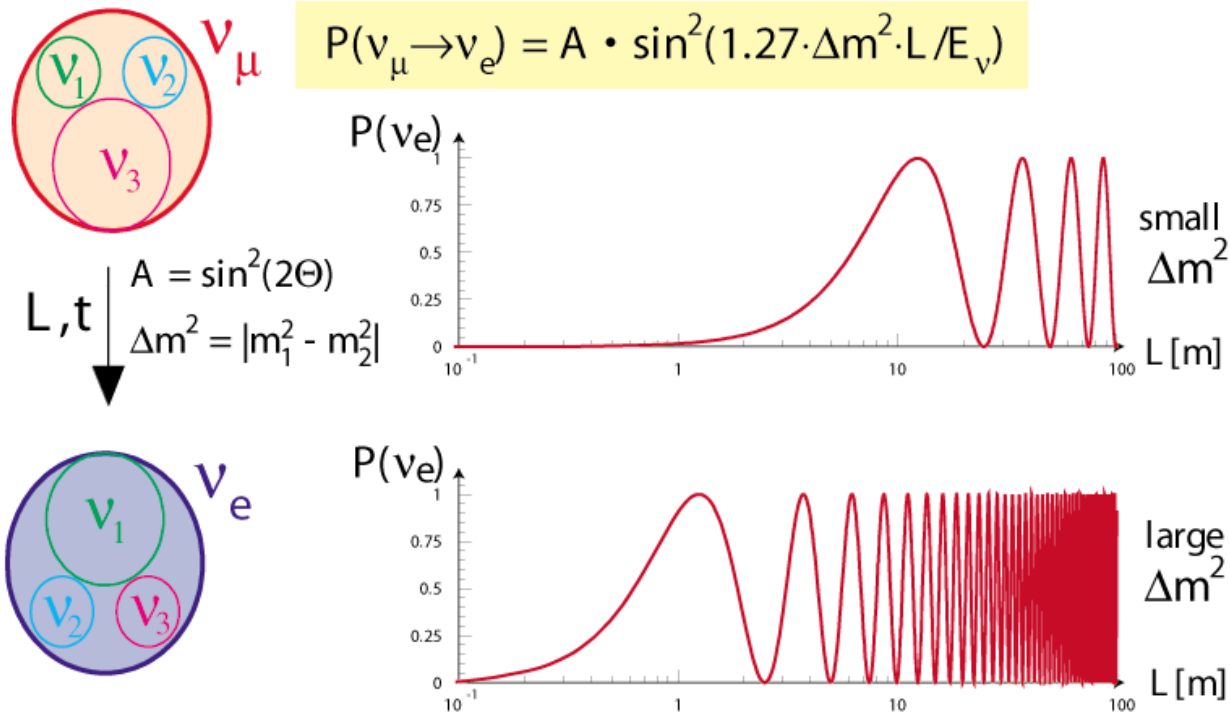
- Methoden der Massenbestimmung
- Das Experiment KATRIN

## Ausblick



# Neutrinooszillationen

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

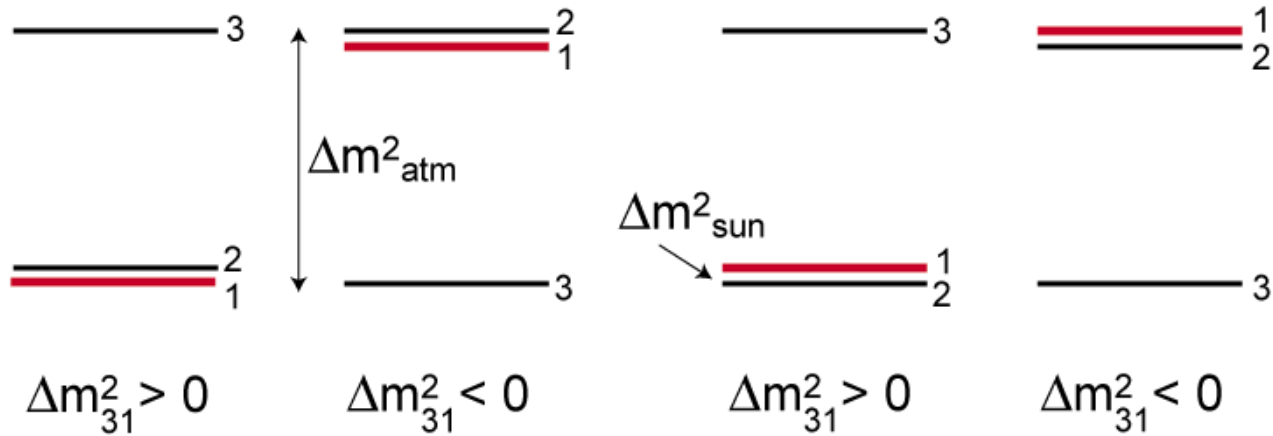


$$\Delta m_{21}^2 = (7.50 \pm 0.20) * 10^{-5} eV^2$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.32^{+0.12}_{-0.08}) * 10^{-3} eV^2$$

Quelle: <http://www-ik.fzk.de/%7Ekatrin/motivation/webfigure1.html>

# Neutrinooszillationen



Normale Hierarchie	Invertierte Hierarchie	Entartete Massen
$0 \approx m_1 < m_2 < m_3$	$0 \approx m_3 < m_1 < m_2$	$0 \ll m_1 \approx m_2 \approx m_3$

$$m \geq \sqrt{m_{atm}^2} = \sqrt{m_{32}^2} = \sqrt{2,32 * 10^{-3} eV^2} \approx 0,04 - 0,07 eV$$

Quelle: <http://www-ik.fzk.de/%7Ekatrin/motivation/index.html>

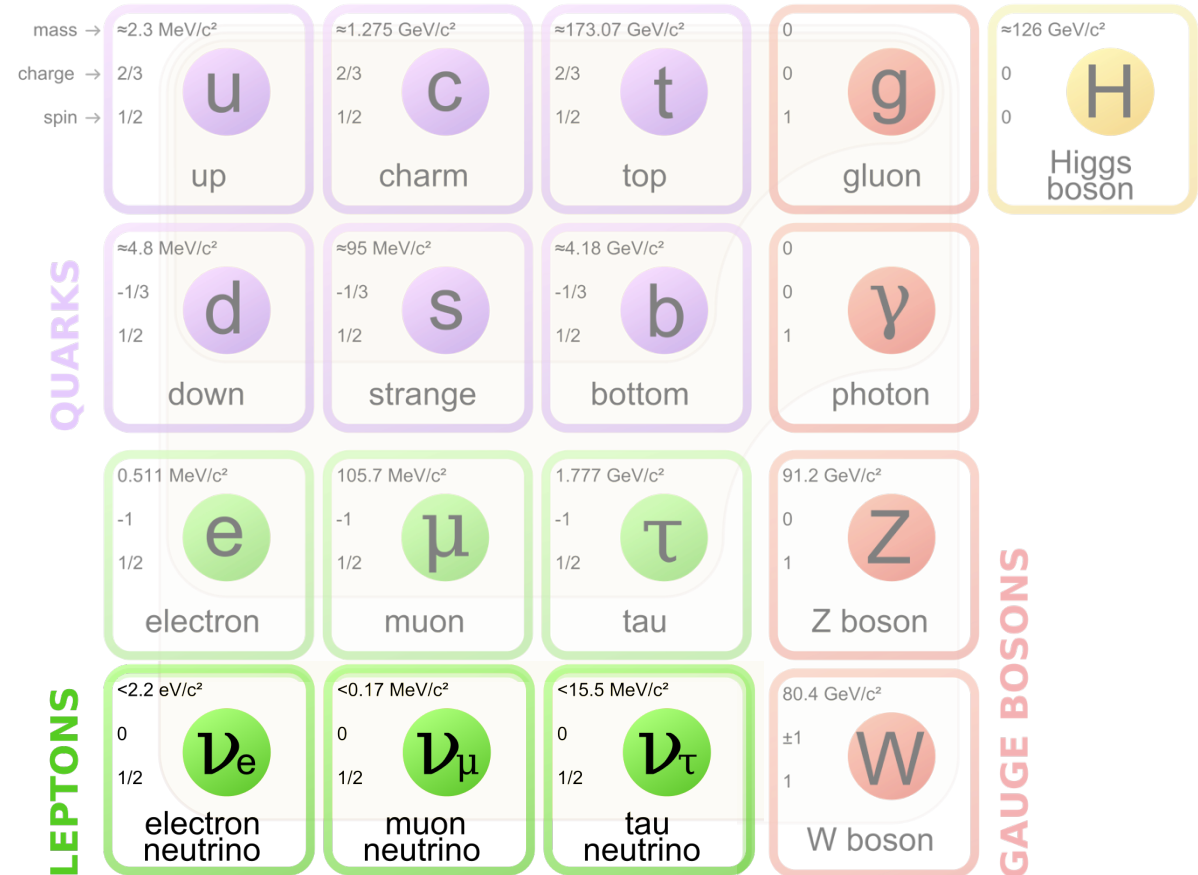
# Das Neutrino im Standardmodell

Standardmodell:

- Neutrinos ursprünglich masselos
- alle Fermionen Dirac-Teilchen
- Ausnahme Neutrinos

⇒ Suche nach neutrinolosem Doppel-Betazerfall

⇒ Zerfall verletzt Leptonenzahlerhaltung (Majorana Teilchen)



Quelle: Fermilab, Office of Science, United States Department of Energy, Particle Data Group

# Anforderungen an das Experiment

---

- Nach Top-Quarks-Masse: Neutrinos als einzige Teilchen im Standardmodell mit unbekannter Masse
- Das Standardmodell vervollständigen, d.h. 4 Parameter (Neutrinomassen, CP-Phase)

⇒ Sensitivität im sub-eV/c<sup>2</sup>



# Inhaltsverzeichnis

---

## Grundlagen



- Neutrinooszillationen
- Das Neutrino im Standardmodell
- Anforderungen an das Experiment

## Bestimmung der Neutrinomasse



- Methoden der Massenbestimmung
- Das Experiment KATRIN

## Ausblick



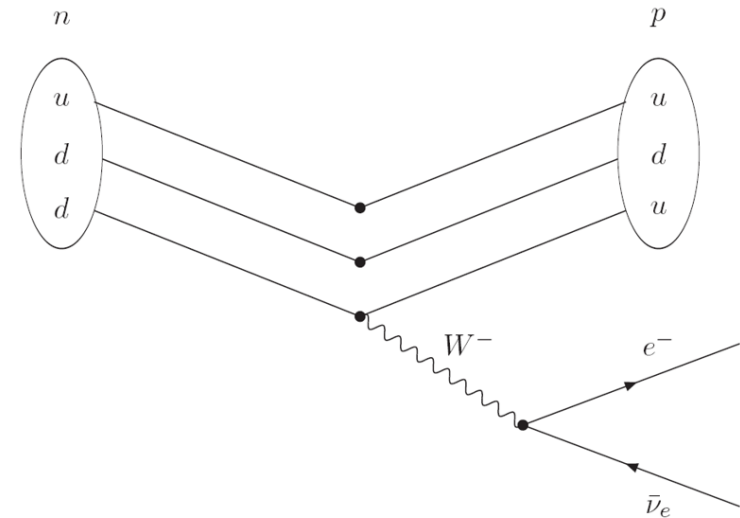
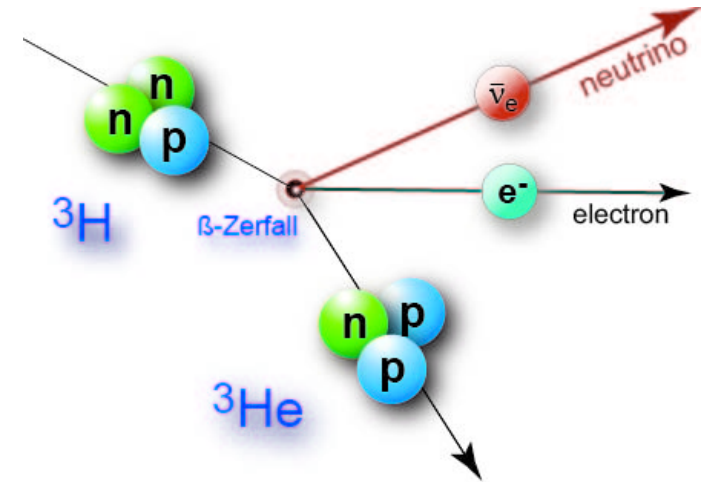
# Der $\beta$ -Zerfall am Beispiel des Tritiums

Warum ist Tritium geeignet?

- Auflösungsvermögen  $R = E/\Delta E$
- Endpunktsenergie 18,6 keV
- $T_{1/2} = 12,3$  a
- einfache elektronische Struktur, kleines Z

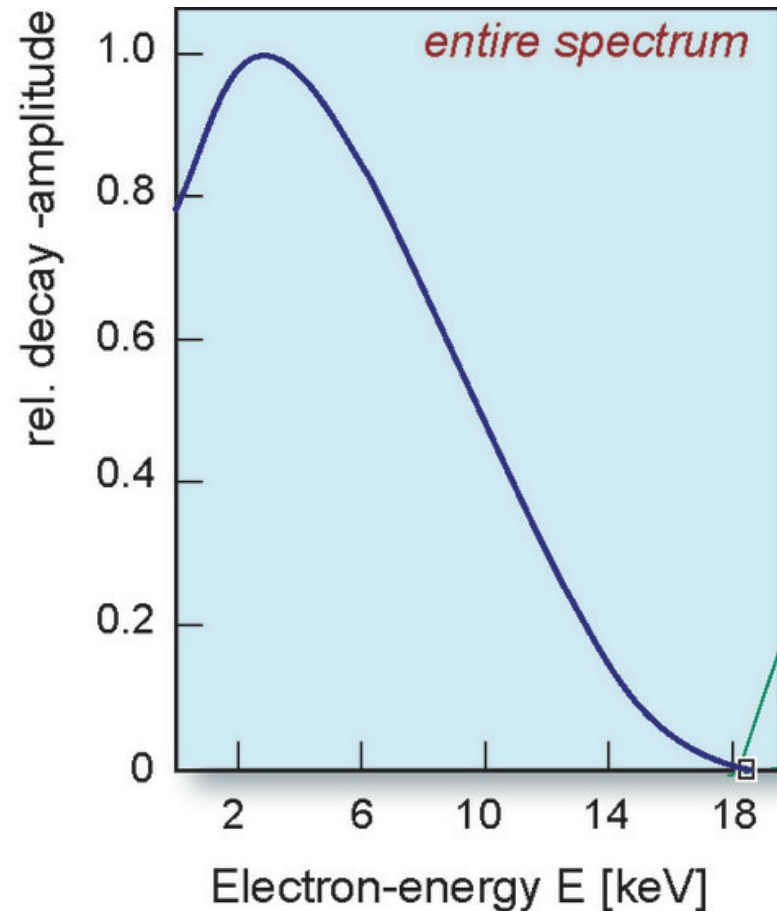
Unterbestimmtes System:

- 3 Tochterteilchen
- 2 Erhaltungsgrößen



Quelle: <http://www-ik.fzk.de/%7Ekatrin/motivation/index.html> & <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/betadecay.html>

# Der $\beta$ -Zerfall am Beispiel des Tritiums



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

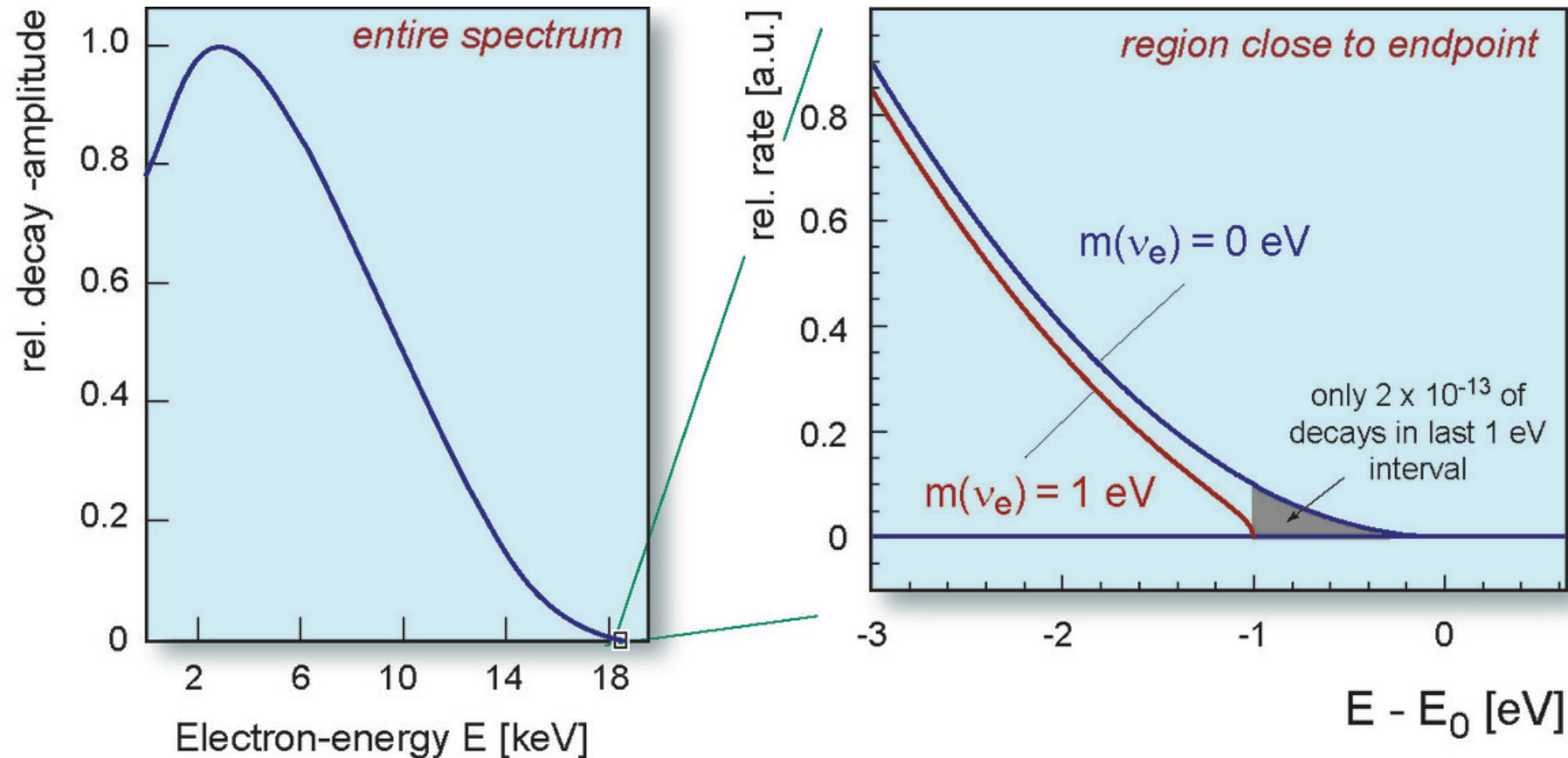
n in Ruhe:  $\vec{p}_p + \vec{p}_e + \vec{p}_\nu = 0$

$$E_p^2 = m_p^2 + p_p^2 \approx m_p^2 \Rightarrow E_e + E_\nu = m_n - m_p = E_0$$

$$E_e = E_0 - \sqrt{m_\nu^2 + p_\nu^2} \Rightarrow E_{\max} = E_0 - m_\nu$$

Quelle: <http://www-ik.fzk.de/%7Ekatrin/motivation/index.html>

# Der $\beta$ -Zerfall am Beispiel des Tritiums



Wahrscheinlichkeit für schnellste Elektronen ungefähr wie 2 Lottogewinne nacheinander!

Quelle: <http://www-ik.fzk.de/%7Ekatrin/motivation/index.html>

# Der $\beta$ -Zerfall am Beispiel des Tritiums

Wo bleibt das Tritium Elektron?

⇒ angeregte Zustände des He3+

70% der Zerfälle zum 1s-Grundzustand

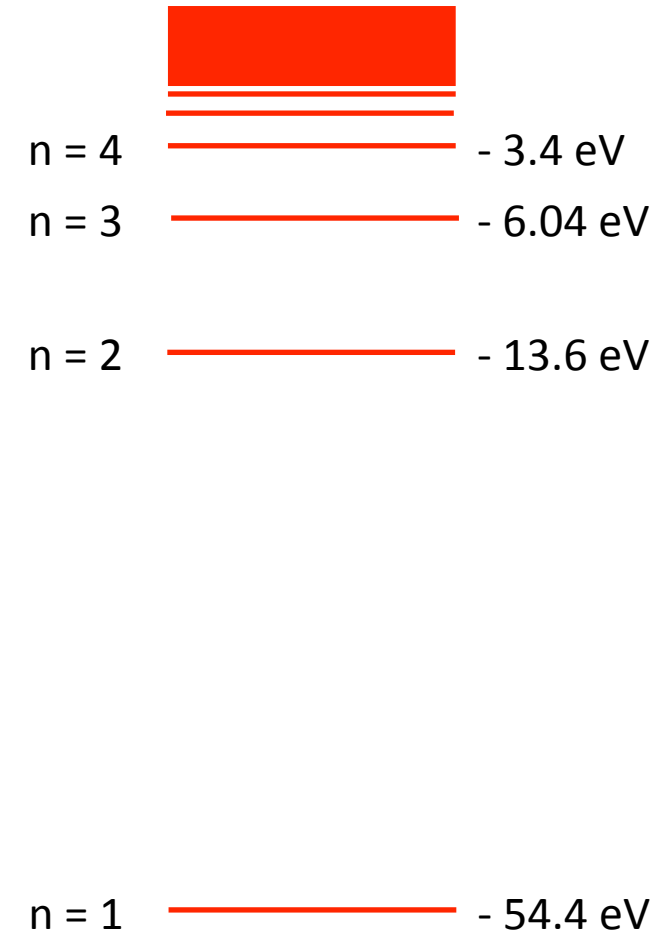
25% zum angeregten 2s-Zustand

5% zu noch höheren s-Zuständen

⇒  $\beta$ -Spektrum Überlagerung einzelner  $\beta$ -Spektren

⇒ nicht messbar, aber berechenbar

He3+ Energieniveaus



# Die Geschichte der Neutrinomassenexperimente

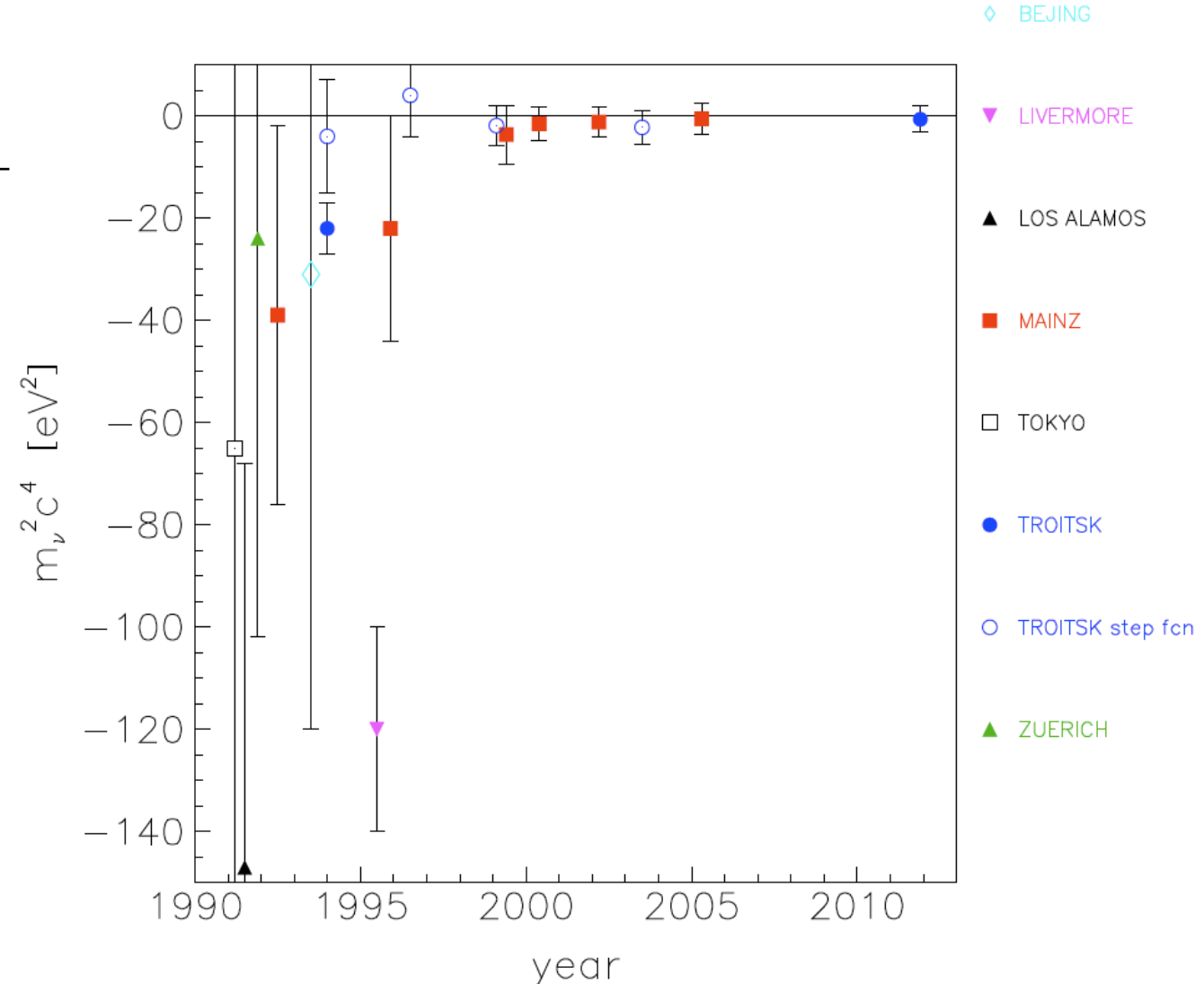
Experiment	$m(\nu_e)^2$ [eV <sup>2</sup> ]	$m(\nu_e)$ [eV]
Zürich (1992)	$-24 \pm 48_{\text{stat}} \pm 61_{\text{syst}}$	$< 11,7$
Tokyo (1991)	$-65 \pm 85 \pm 65$	$< 13$
Los Alamos (1992)	$-147 \pm 68 \pm 41$	$< 9,5$
Mainz (2003)	$-1,6 \pm 2,5 \pm 2,1$	$< 2,2$

Negative  $m(\nu_e)^2$ :

=> Mehr Ereignisse beim Endpunkt

=> noch keine plausible Erklärung

=> nähere Informationen: particle data group



Quelle: arXiv:0909.2104 [hep-ex]

# Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)

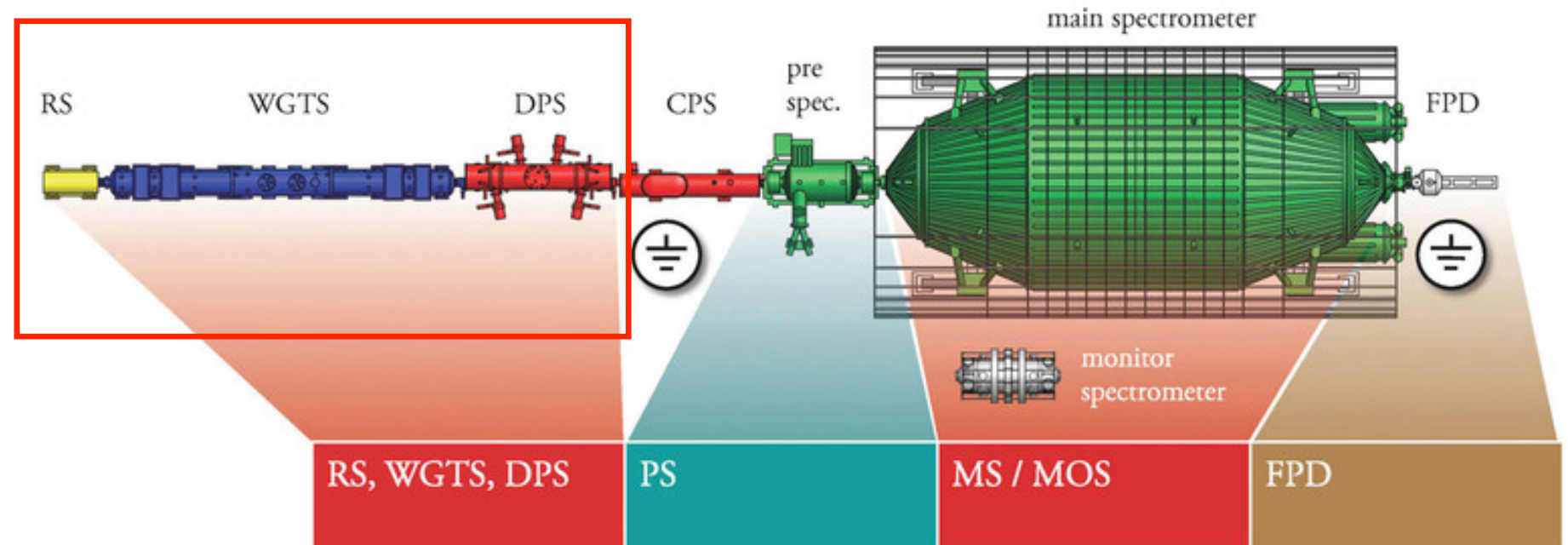
Was? 75m lang, 4 Module (Tritiumquelle, Tritium Pumpstrecke, Spektrometer, Detektor)

Wofür? Direkte Bestimmung der Neutrino Masse

0,2 eV Empfindlichkeit

Größenordnung 100 genauer als bisherige Experimente

Wann? Messbeginn vsl. 2015, Ergebnisse vsl. 2018-2020



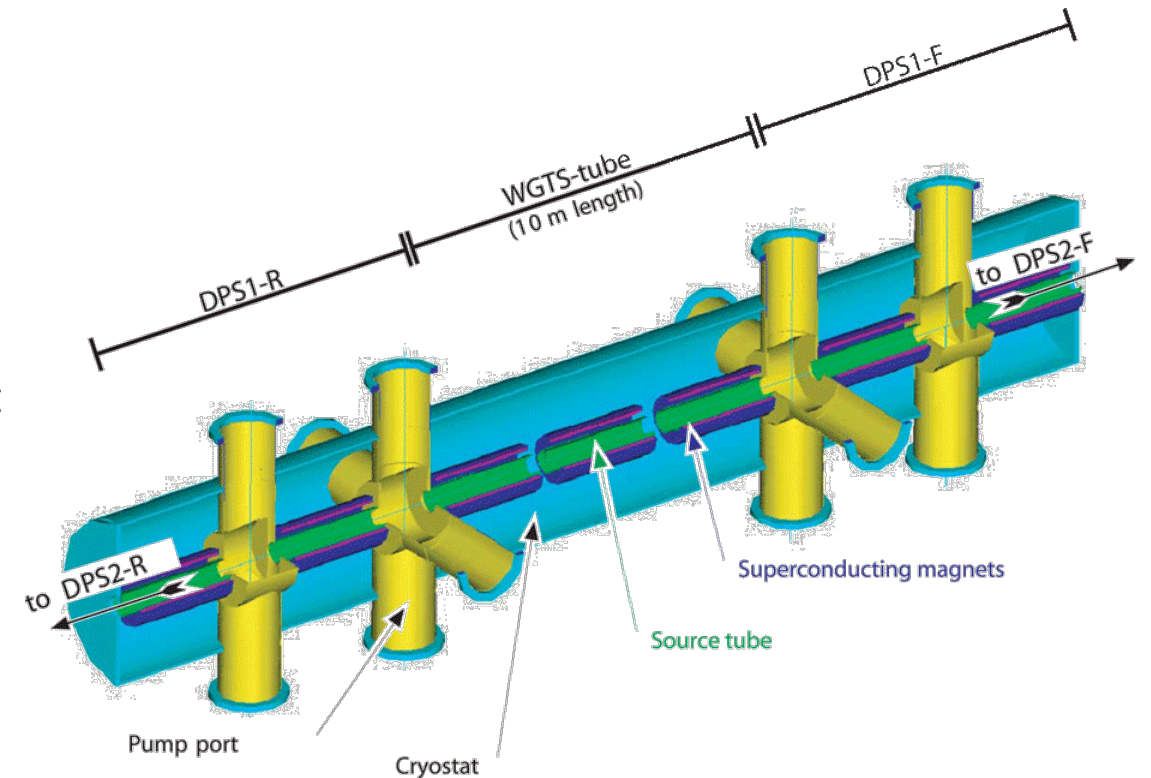
Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/80.php>

# Die Tritiumquelle (Windowless Gaseous Tritium Source)

- Länge: 10m; innerer Durchmesser: 9 cm
- Tritiumgas wird in der Mitte eingelassen
- Magnetfeld leitet Elektronen an die Enden
- Tritiumgas wird abgepumpt, gereinigt und eingespeist

⇒ Anzahl der  $\beta$ -Zerfälle:  $9,5 \times 10^{17}/s$

⇒ Tritium-Dichte muss konstant gehalten werden  
( $\pm 0,1\%$ )



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/81.php>



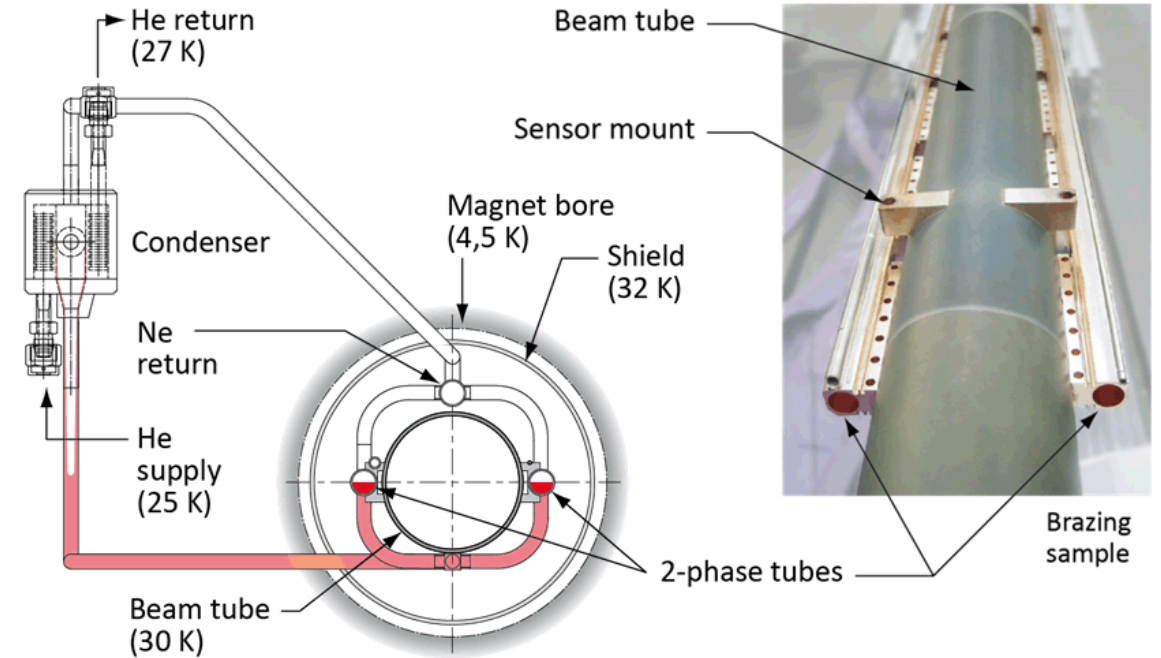
# Die Tritiumquelle (Windowless Gaseous Tritium Source)

Um Aktivität konstant zu halten benötigt man:

1. Temperaturstabilisation
2. Druckstabilisation
3. Reinheit des Tritiums

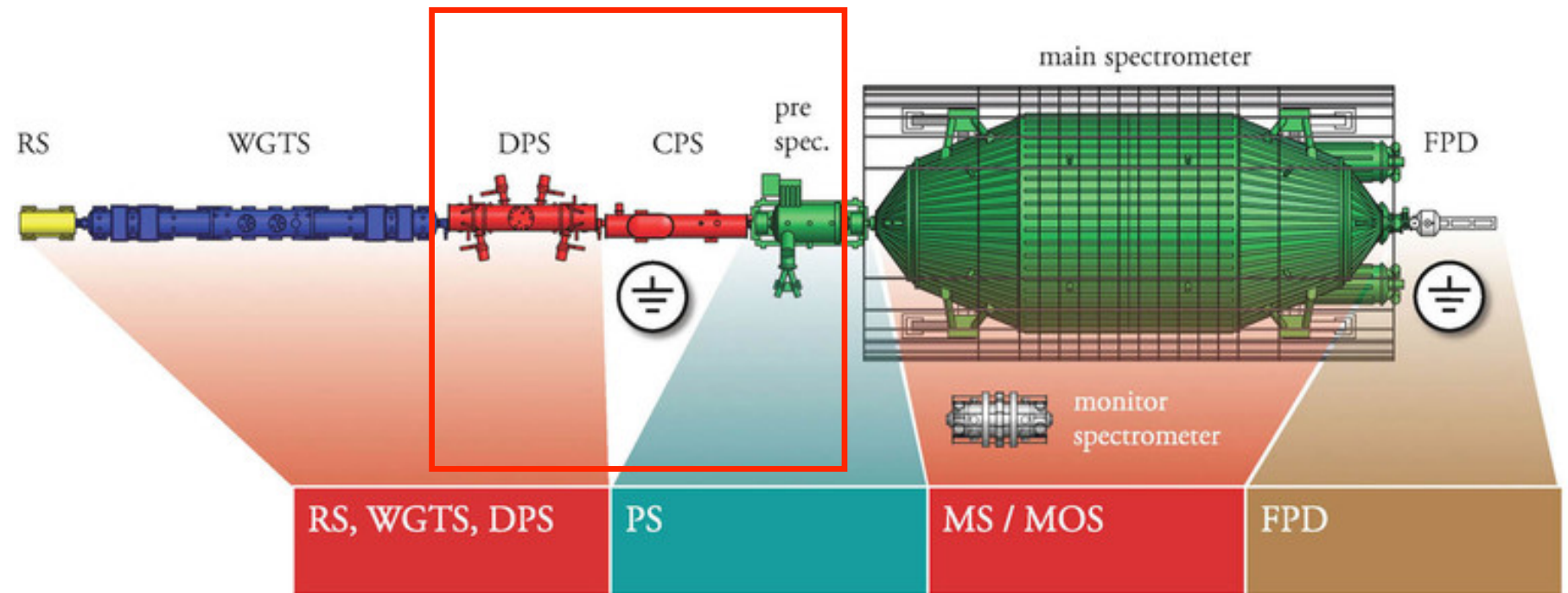
⇒ Aktivität wird mit Monitor Detectors kontrolliert

(bspw. Röntgenspektrometer misst Bremsstrahlung)



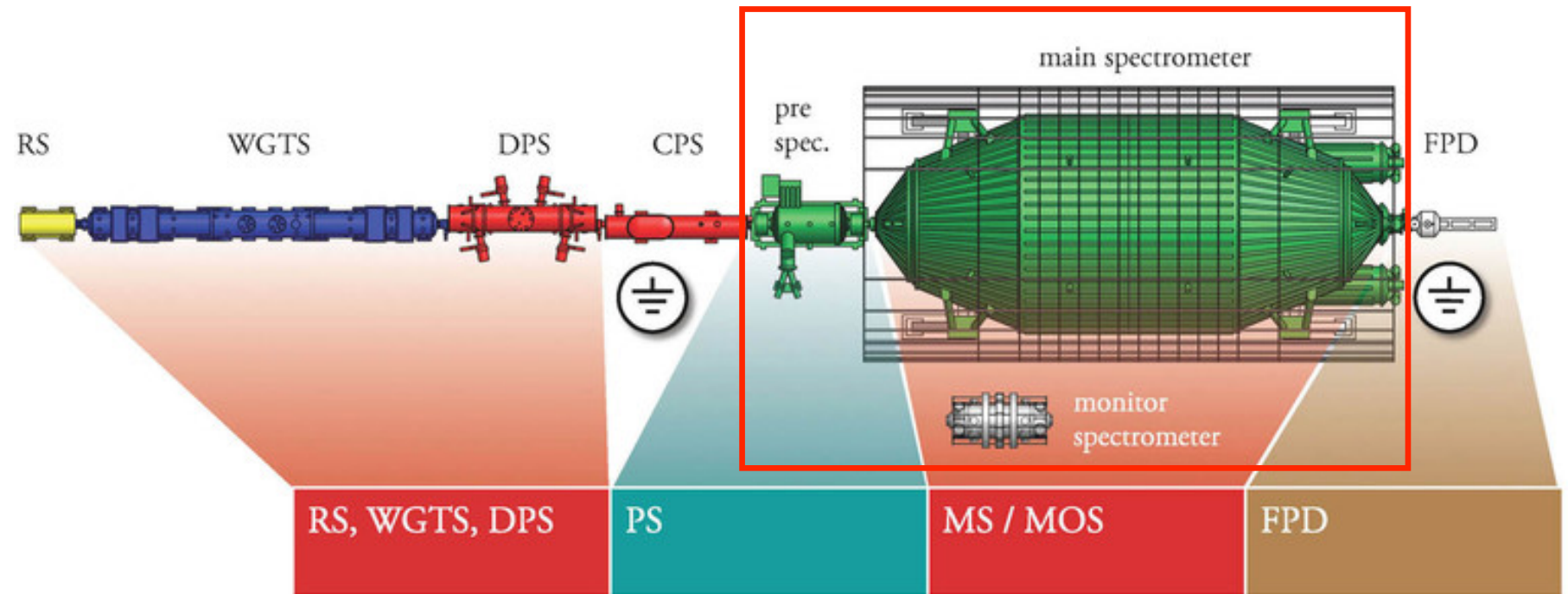
Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/81.php>

# Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/80.php>

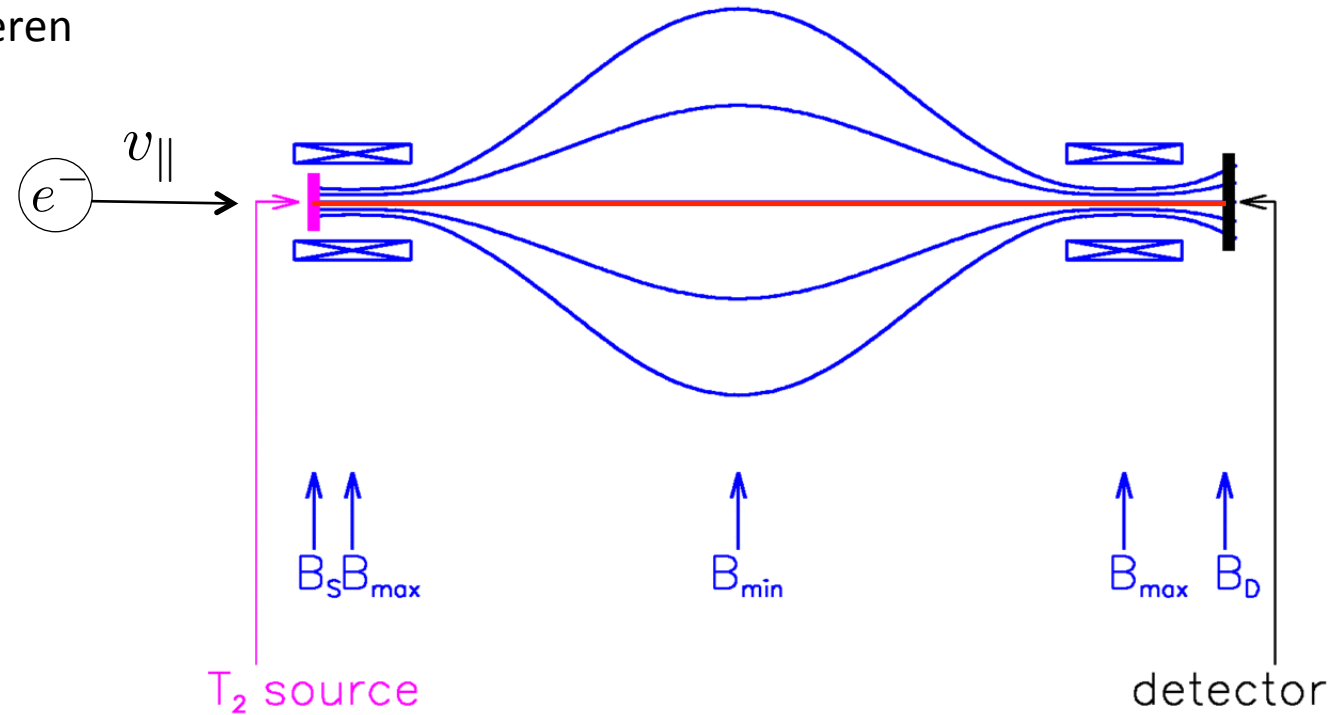
# Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/80.php>

# Elektrostatischer MAC-E Filter Spektrometer

- $\vec{B}_s \parallel v_{\parallel} \Rightarrow$  Elektron kann ungehindert passieren



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/83.php>

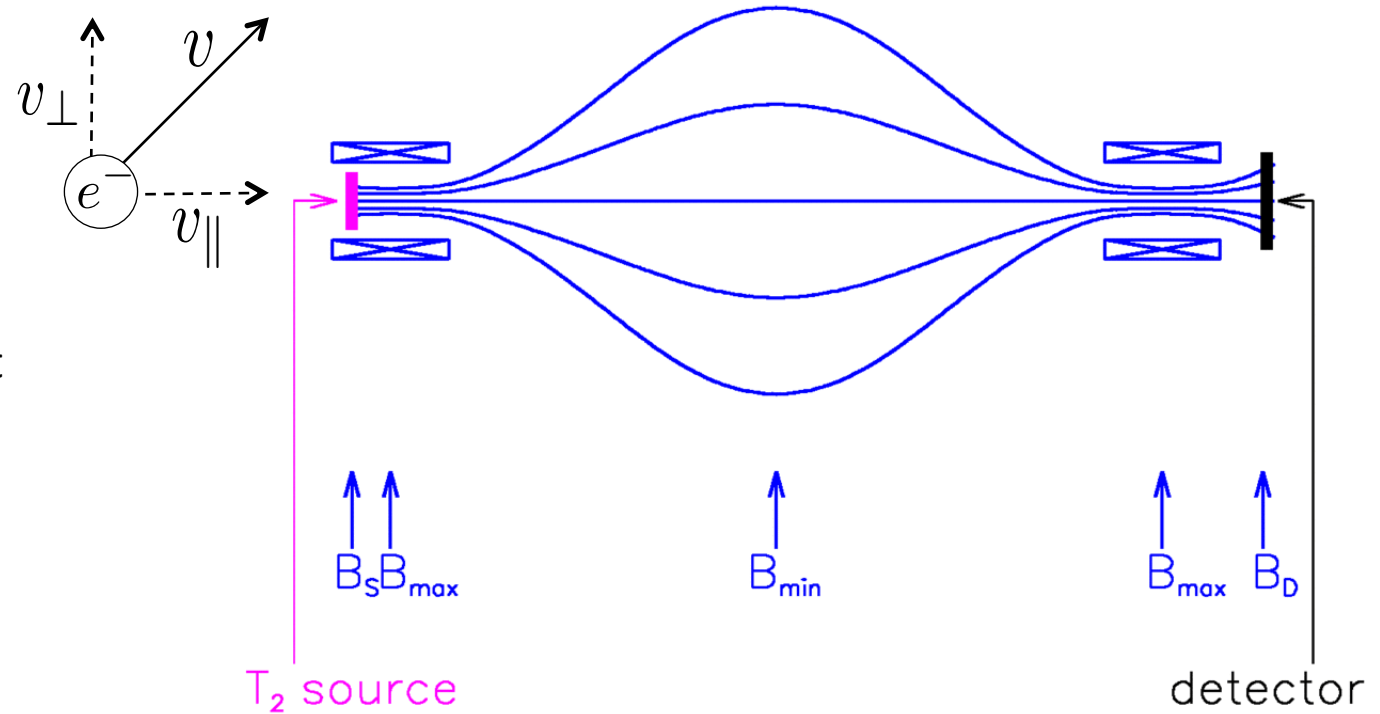
# Elektrostatischer MAC-E Filter Spektrometer

- $\vec{B}_s \parallel v_{\parallel}$
- $\vec{B}_s \perp v_{\perp}$

⇒ Lorentzkraft entspricht Zentripetalkraft

$$\frac{mv_{\perp}^2}{r} = qv_{\perp}B$$
$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{p_{\perp}}{qB}$$

⇒ Elektronen erhalten Zyklotonbewegung



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/83.php>

# Elektrostatrischer MAC-E Filter Spektrometer

Änderung des Feldes klein gegenüber Zyklotonumdrehung

⇒ adiabatische Näherung:

$$\Phi = BA = B\pi r_{cycl}^2 = const.$$

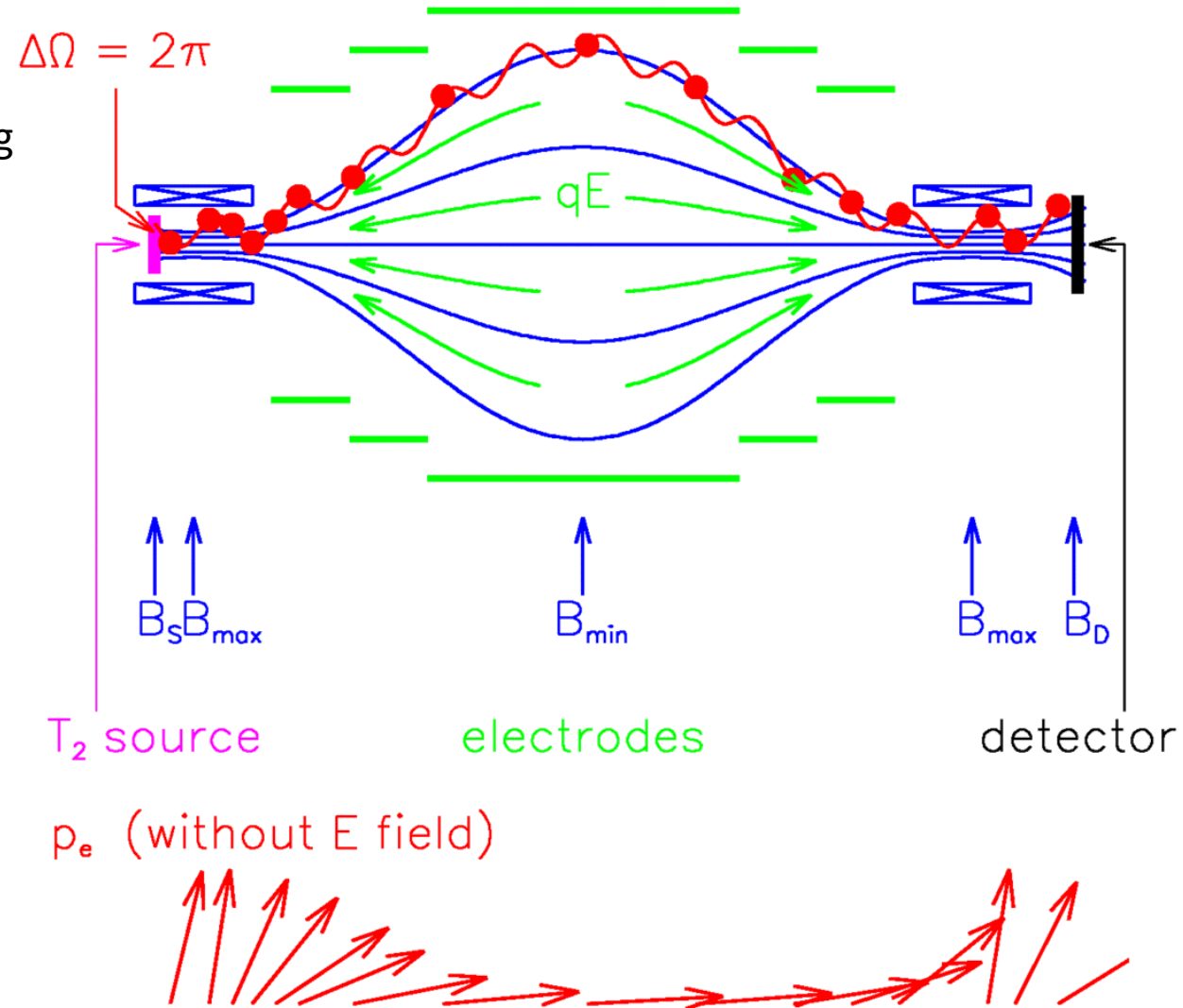
$$\Rightarrow \frac{p_{\perp}^2}{B} = const.$$

$$\Rightarrow \frac{E_{\perp}}{B} = const.$$

$$\Rightarrow \frac{E_{kin,S\perp}}{B_S} = \frac{E_{kin,min\perp}}{B_{min}}$$

$$\Rightarrow E_{kin,min\perp} = \frac{B_{min}}{B_S} E_{kin,S\perp}$$

$$\Rightarrow E_{kin,min\parallel} = E_{kin} - \frac{B_{min}}{B_S} E_{kin,S\perp} \approx E_{kin}$$



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/83.php>

# Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)

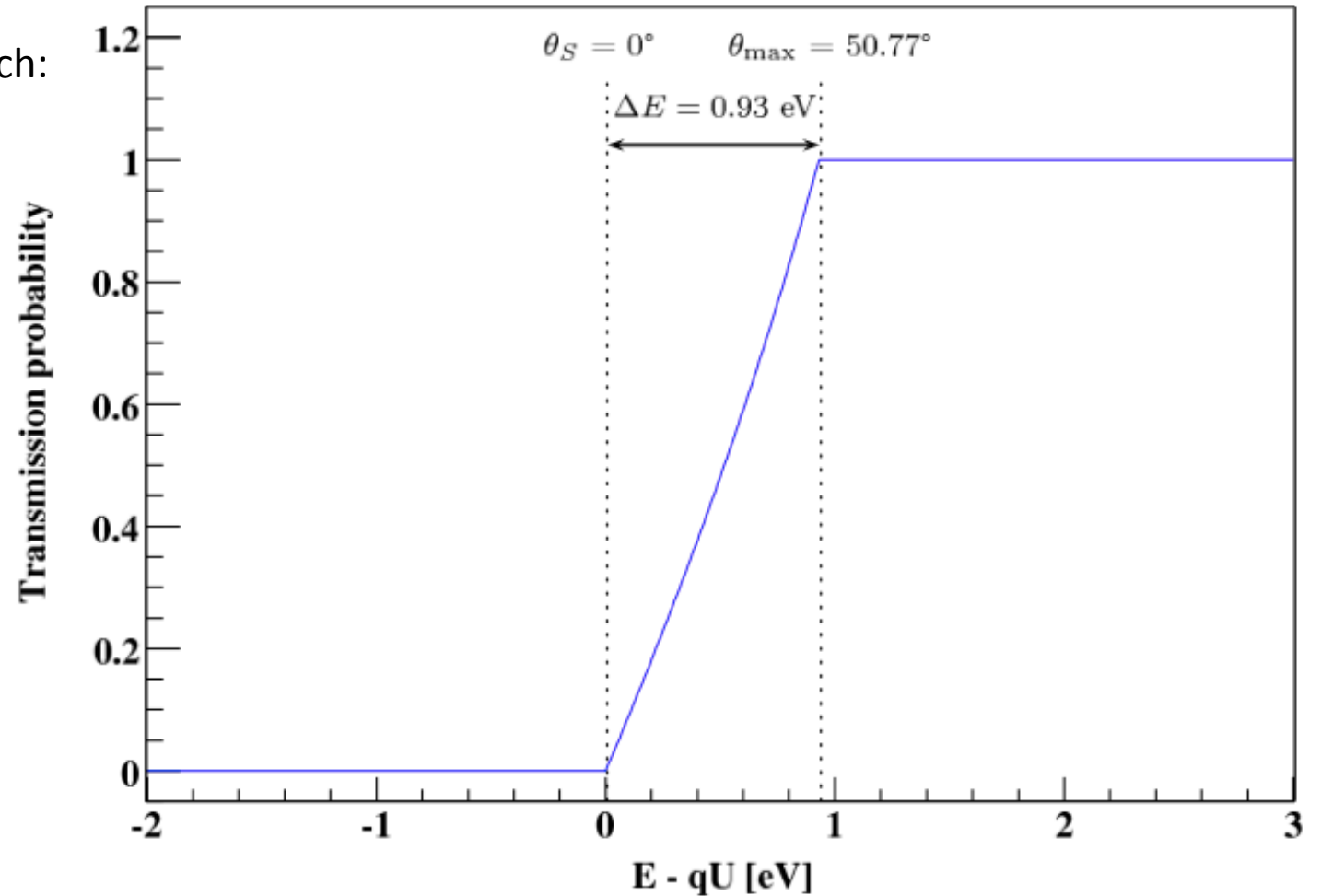
Für die Energieauflösung ergibt sich folglich:

$$B_{max} = 6T$$

$$B_{min} = 3 \cdot 10^{-4}$$

$$E_0 = 18,6kV$$

$$\Delta E = \frac{B_{min}}{B_{max}} E_0 = 0,93eV$$



# Transport



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/img/Transport-Main-Spectrom4.jpg>



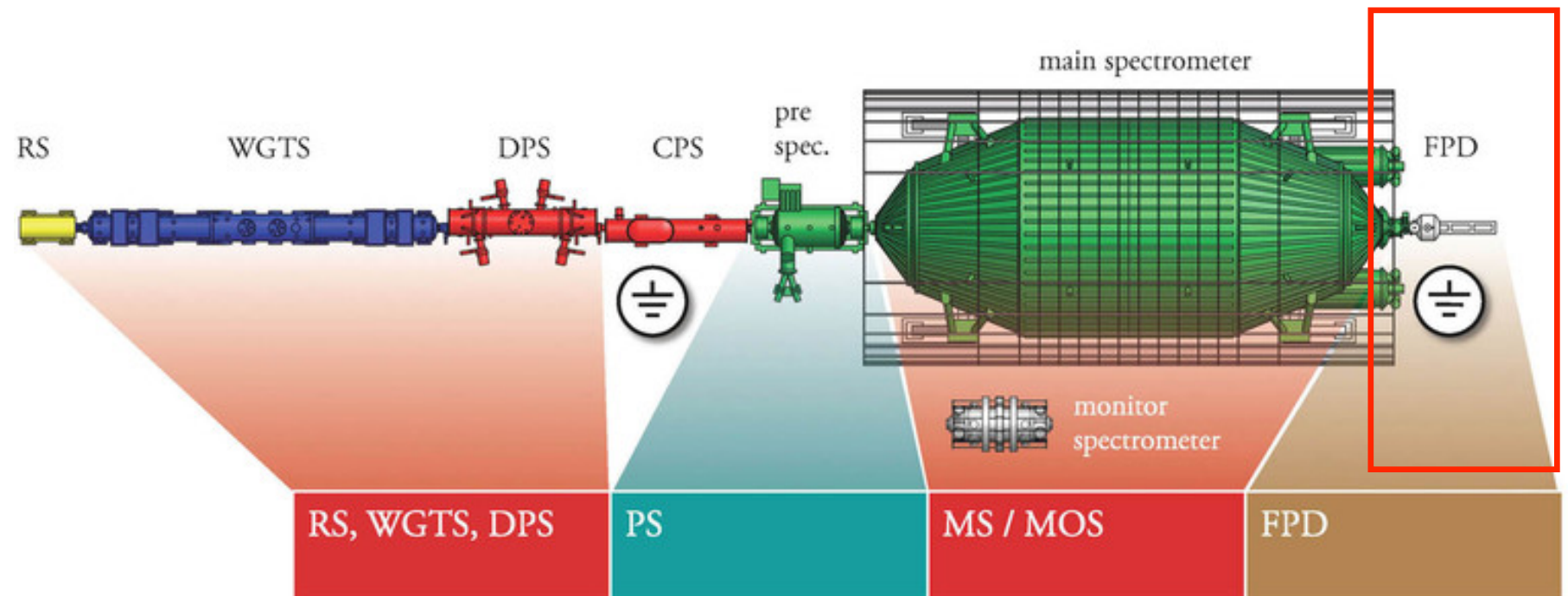
# Transport



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/img/Transport-Main-Spectrom4.jpg>

# Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)

- FPD: Focal Plane Detector

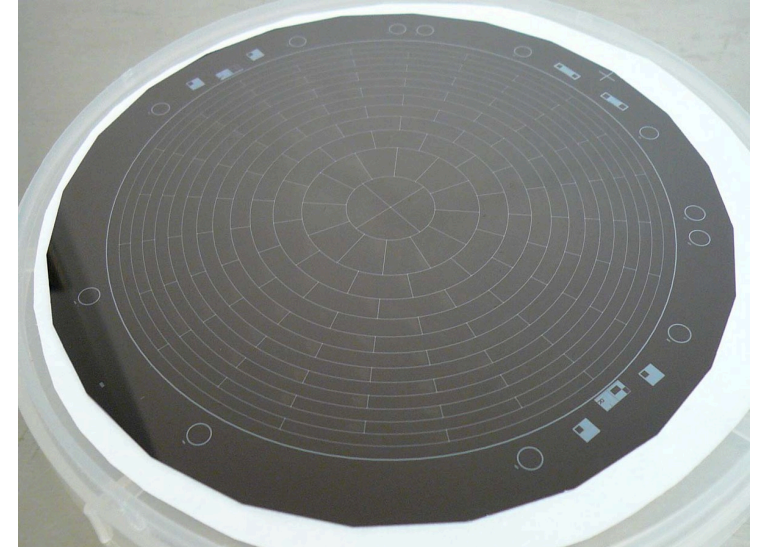


Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/80.php>

# Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)

---

- eigentlich nur Elektronen zählen
  - energetische, räumliche , zeitliche Auflösung interessant
- ⇒ Ungenauigkeiten im elektr. Spektrometer Potential
- ⇒ Untergrund (z.B. kosmische Strahlung, natürliche Radioaktivität)



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/84.php>

# Technische Herausforderungen

---

1. Langzeitige Zirkulation und Reinheit des Tritiums
2.  $10^{-3}$  K Temperaturstabilität bei 27 K
3. Extremes Vakuum ( $< 10^{-11}$  mbar) in großem Volumen
4. Große Anzahl supraleitender Magnete ( $\approx 30$ )
5. Spannungsstabilität im 20kV Bereich auf  $\approx 0,02$ V genau

# Discovery potential

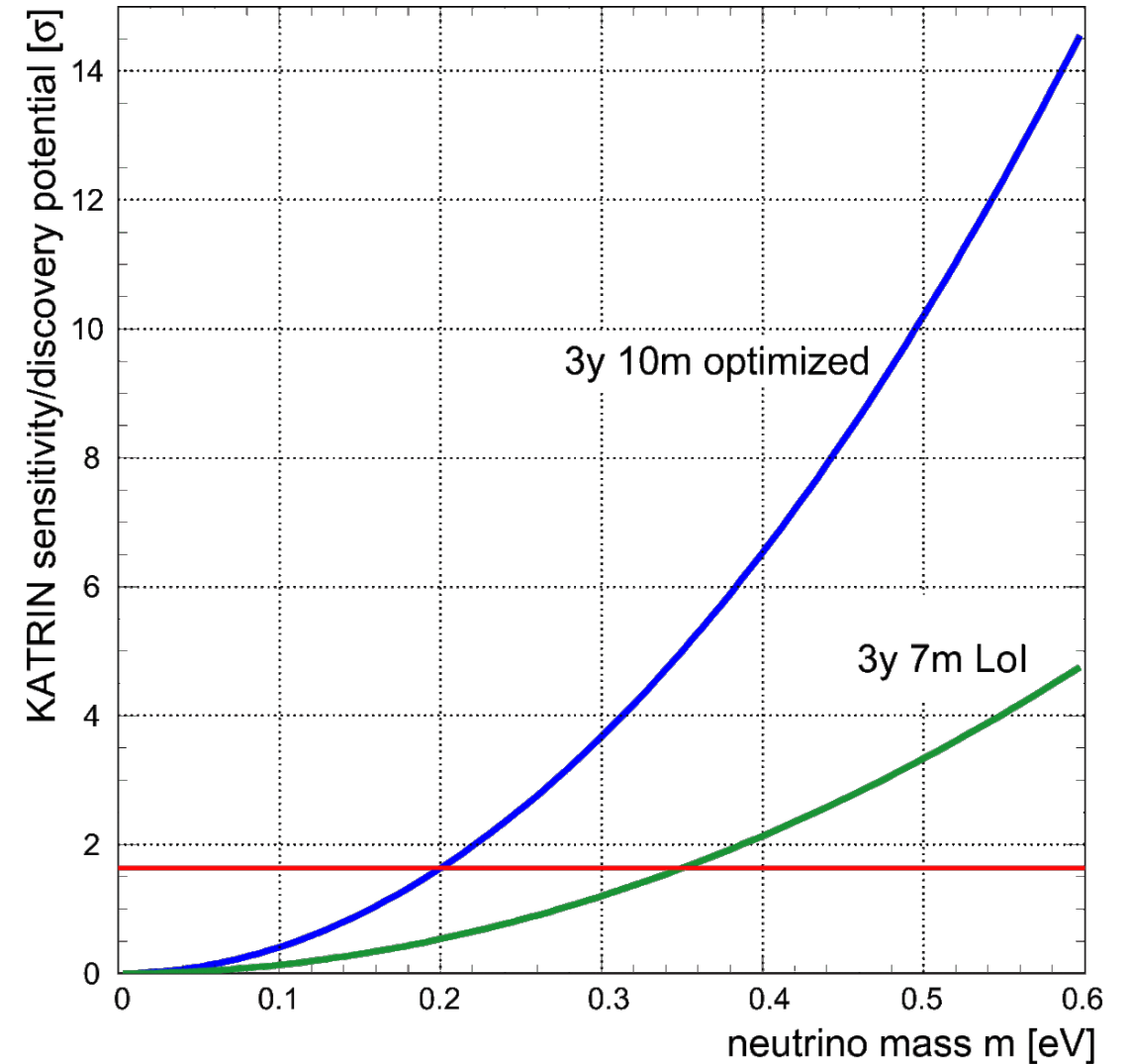
Ursprünglich war 7m Spektrometer geplant (LOI 2001)

=> kleinerer Spektrometer

=> kleineres Verhältnis der Magnetfelder

=> schlechtere Energieauflösung ( $\approx 1\text{eV}$ )

Neutrinomasse	Discovery potential
0,20 eV	90% ( $1,64\sigma$ )
0,30 eV	99,73% ( $3\sigma$ )
0,35 eV	99,99994% ( $5\sigma$ )



Quelle: <http://www.katrin.kit.edu/128.php>

# Inhaltsverzeichnis

---

## Grundlagen



- Neutrinooszillationen
- Das Neutrino im Standardmodell
- Anforderungen an das Experiment

## Bestimmung der Neutrinomasse



- Methoden der Massenbestimmung
- Das Experiment KATRIN

## Ausblick



# Ausblick

---

## Teilchenphysik:

- kurzfristig: Vervollständigung Standardmodell: CP-Phase, Neutrinomassen
- langfristig: Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

## Kosmologie:

- Relic Neutrinos : baryonischen Teilchen  $10^9 : 1$

=> In einer Streichholzschachtel befinden sich also knapp 10000

=> bedeutender Beitrag zu Dunkler Materie

---

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!