

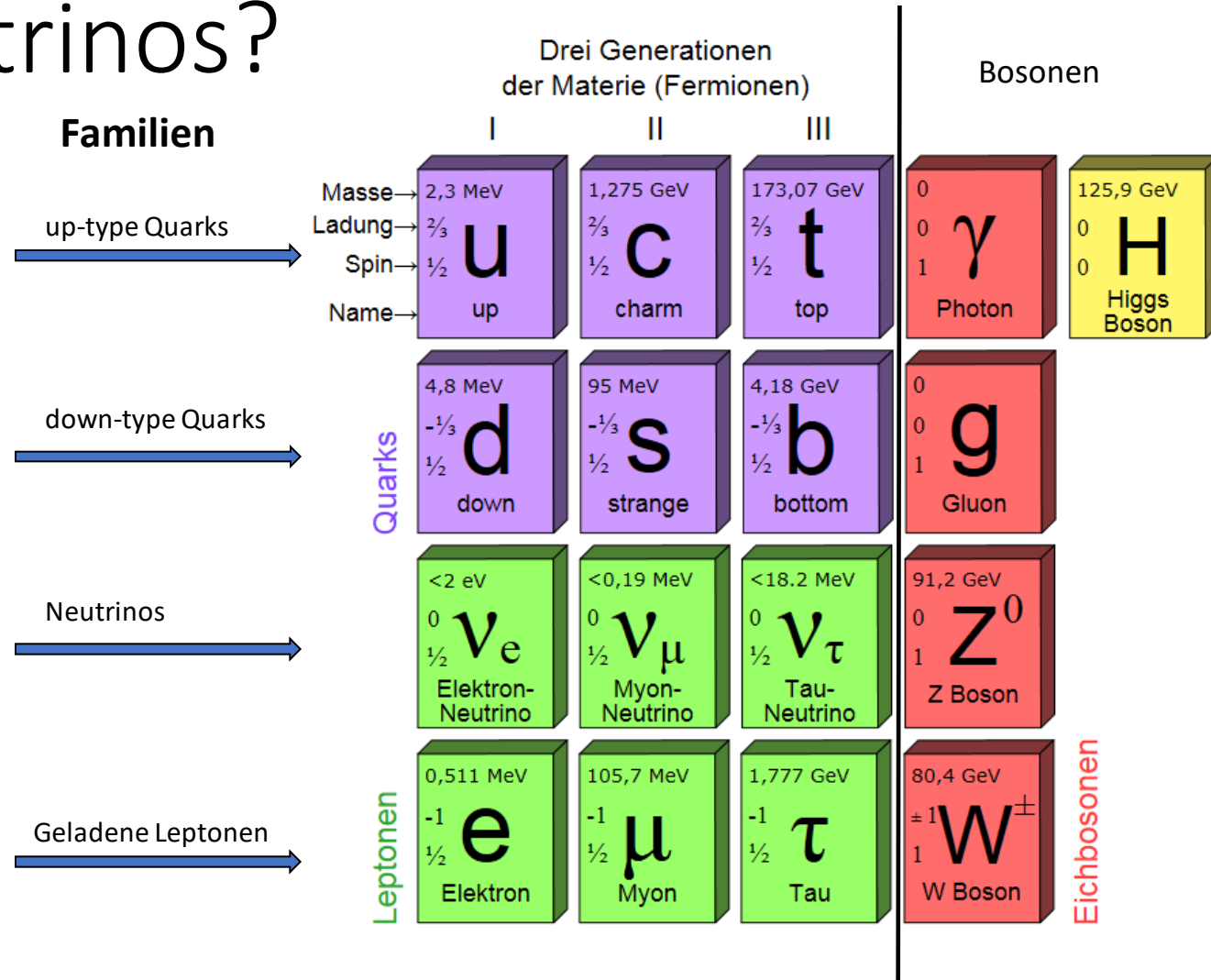
# Neutrinos

Patrick Ludl

# Was sind Neutrinos?

Standardmodell der  
Teilchenphysik

Neutrinos sind extrem  
leichte, elektrisch neutrale  
Elementarteilchen.



(Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11307906>)

# Warum sind Neutrinos interessant?

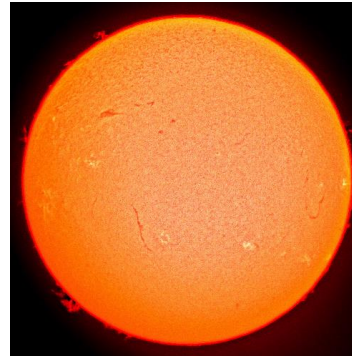
- Neutrinos sind überall ...

**Kernreaktoren**



(Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Nuclear energy: Philippsburg2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Nuclear_energy:Philippsburg2.jpg))

**Sonne**



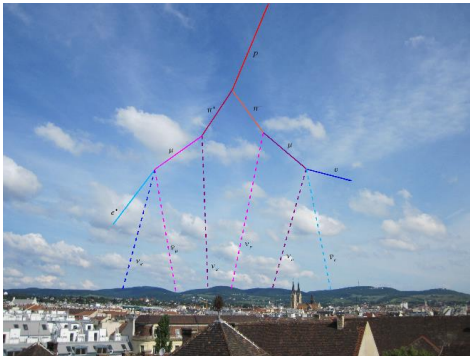
(Quelle: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sun#/media/File:Sun in February.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Sun#/media/File:Sun_in_February.jpg))

**Astrophysikalische Quellen**



(Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=268438>)

**Atmosphäre**

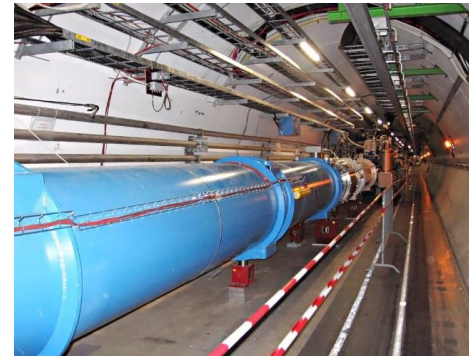


**Geoneutrinos**



(Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43894484>)

**Teilchenbeschleuniger**



(Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3844377>)

# Warum sind Neutrinos interessant?

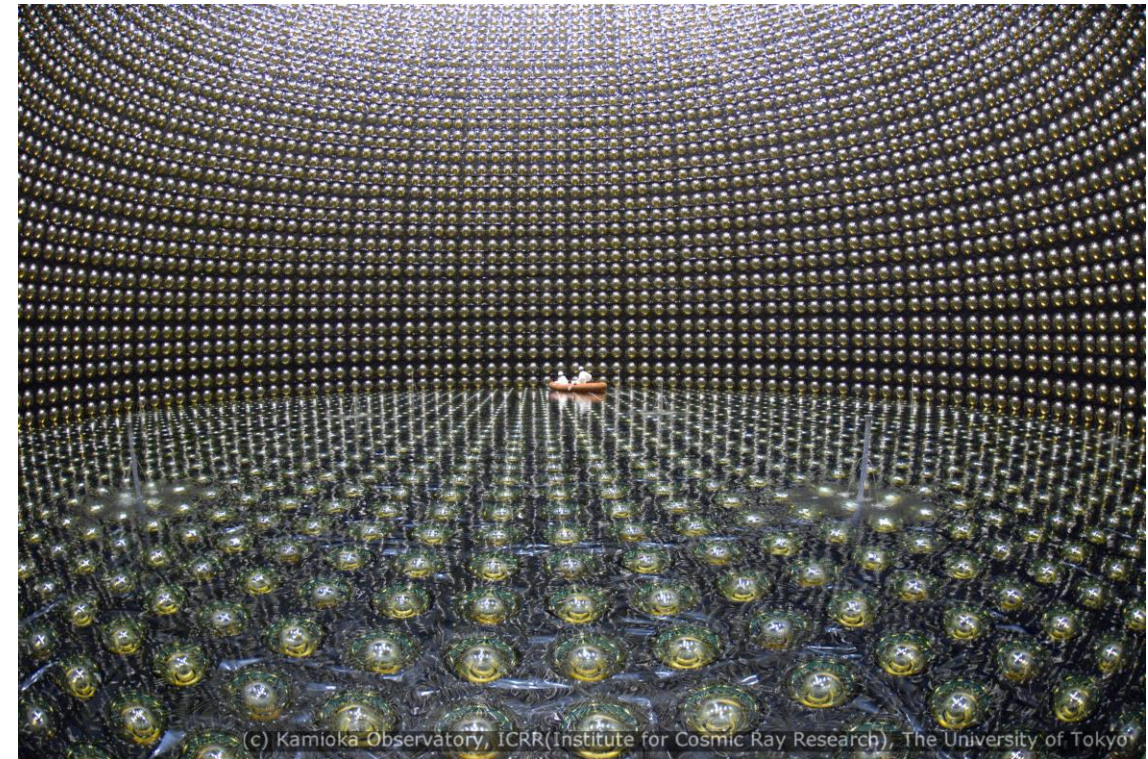
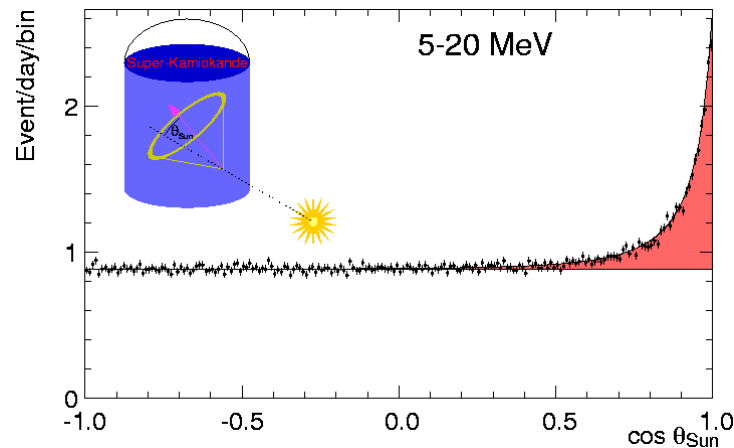
- Neutrinos **wechselwirken nur extrem schwach** (nur über schwache Wechselwirkung und Gravitation)
- Bsp: Solarer Neutrinofluss  $\sim 10^{15} m^{-2} s^{-1}$ . Etwa 1000 dieser  $10^{15}$  Neutrinos werden beim Durchqueren der Erde gestreut.

→ Neutrinoexperimente sind sehr sehr sehr aufwendig ...



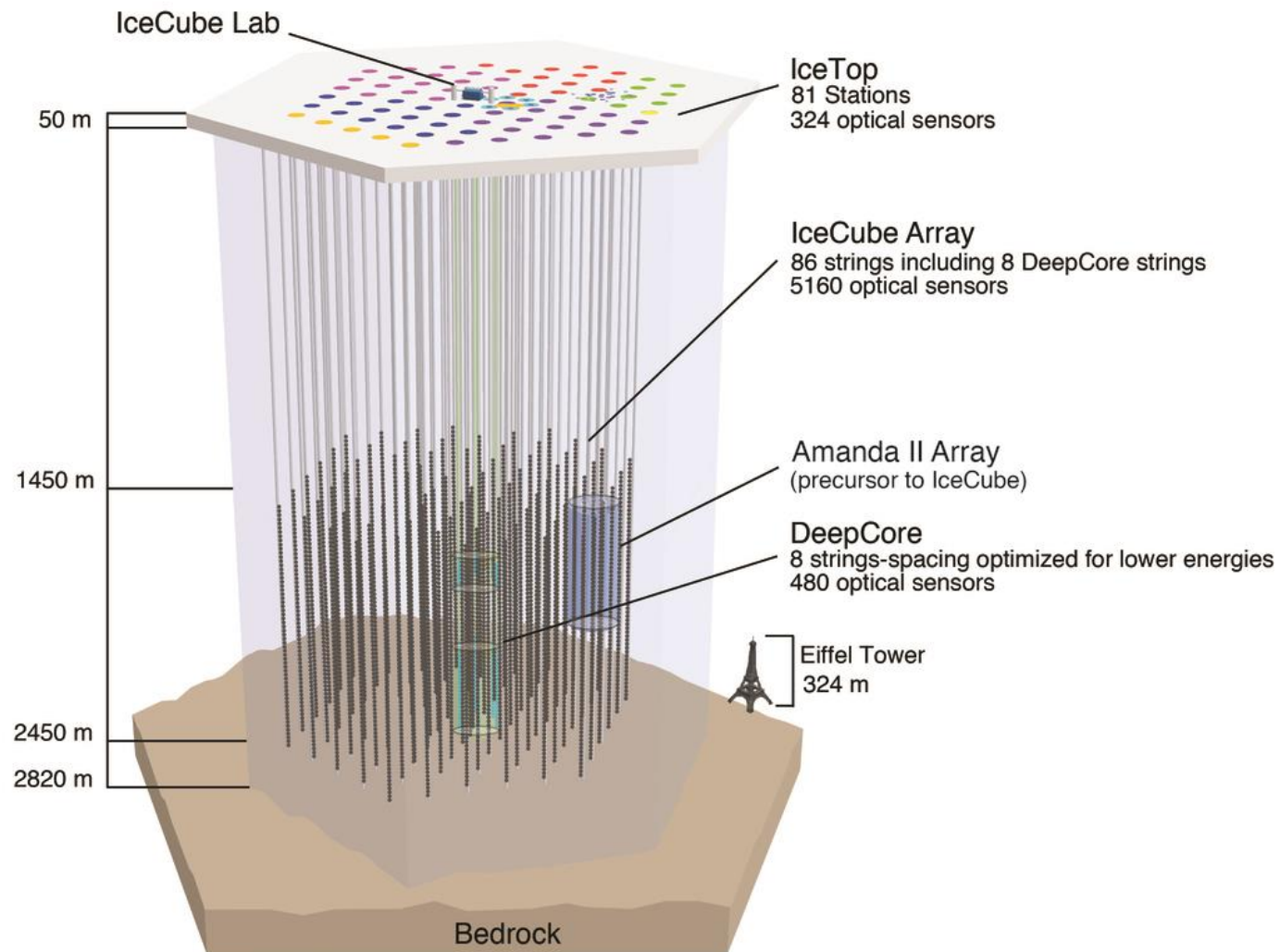
# Beispiel: Superkamiokande

- Zylindrischer Tank, 40 m hoch, 40 m Durchmesser,
- gefüllt mit  $\sim 50000$  t hochreinem Wasser,
- $\sim 13000$  Photomultiplier



(Quelle: Super-Kamiokande Collaboration ([www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/](http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/)))

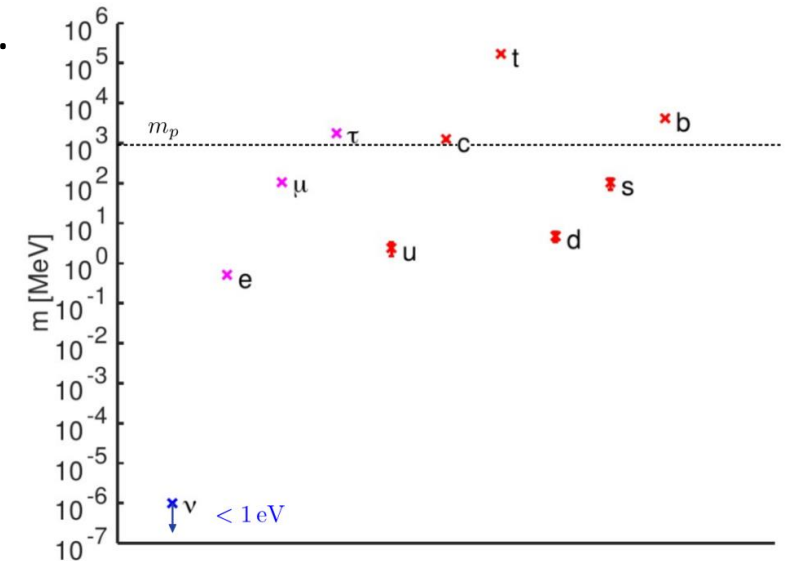
# Beispiel: IceCube Neutrino Observatory



# Warum sind Neutrinos interessant?

- Neutrinos **wechselwirken nur extrem schwach** (nur über schwache Wechselwirkung und Gravitation)
- Bsp: Solarer Neutrinofluss  $\sim 10^{15} m^{-2} s^{-1}$ . Etwa 1000 dieser  $10^{15}$  Neutrinos werden beim Durchqueren der Erde gestreut.
- Neutrinos sind viel **leichter als alle anderen bekannten Fermionen**.
- **Wenn Neutrinomassen so klein sind, woher wissen wir, dass sie überhaupt eine Masse  $\neq 0$  haben?**

→ **Neutrinooszillationen**



# Was sind Neutrinooszillationen?

Schwache Wechselwirkung

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

charged current interaction

W-boson

3 x 3 mixing matrix (unitary)

neutrinos with definite mass

$$\mathcal{L}_{\text{CC, leptonic}} = -\frac{g}{\sqrt{2}} W_\lambda^- (\bar{e}_L \quad \bar{\mu}_L \quad \bar{\tau}_L) \gamma^\lambda U \begin{pmatrix} \nu_{1L} \\ \nu_{2L} \\ \nu_{3L} \end{pmatrix} + \text{H.c.}$$

charged leptons

neutrinos with definite flavour

Diagram description: The diagram shows the leptonic charged current interaction Lagrangian. Arrows point from descriptive labels to parts of the equation: 'charged current interaction' points to the Lagrangian symbol; 'W-boson' points to the W\_lambda^- term; '3 x 3 mixing matrix (unitary)' points to the U matrix; 'neutrinos with definite mass' points to the mass eigenstate column vector; 'charged leptons' points to the lepton number column vector; and 'neutrinos with definite flavour' points to the flavour eigenstate column vector.

Example:  $\beta$ -decay:  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ .

$|\bar{\nu}_e\rangle$  is a superposition of mass eigenstates!  $|\bar{\nu}_e\rangle = \sum_{j=1}^3 U_{ej} |\bar{\nu}_j\rangle$



# Neutrinooszillationen

Neutrinos die in Charged-Current-Interactions erzeugt werden sind Superpositionen von Masseneigenzuständen.

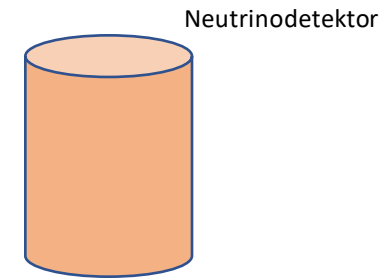
Erzeuge Neutrino  $\nu_\alpha$  (z.B.  $\alpha = e$ ) bei  $x=0$

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j}^* |\nu_j\rangle$$

Quantenmechanik: Zustand eines freien (nicht-wechselwirkenden) Teilchens:

$$|\nu_j(x, t)\rangle = e^{-i(Et - px)} |\nu_j(0, 0)\rangle$$

Neutrino bewegt sich zu  $x=L$  in  
Zeit  $L/c$



$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(L, L/c)\rangle &= \sum_j U_{\alpha j}^* |\nu_j(L, L/c)\rangle = \\ &= \sum_j U_{\alpha j}^* e^{-i(EL/c - p_j L)} |\nu_j\rangle \end{aligned}$$

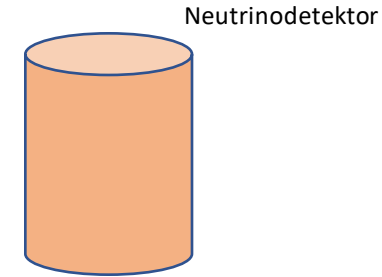
Neutrinozustände  $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$  haben gleiche Energie  $E$ ,  
aber verschiedene Impulse  $p_j = \sqrt{E^2/c^2 - m_j^2 c^2}$ .  $\rightarrow$   
Sammeln verschiedene Phasen auf.

# Neutrinooszillationen

Erzeuge Neutrino  $\nu_\alpha$  (z.B.  $\alpha = e$ ) bei  $x=0$

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j}^* |\nu_j\rangle$$

Neutrino bewegt sich zu  $x=L$  in  
Zeit  $L$ . [ $c=1$ ]



$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(L, L)\rangle &= \sum_j U_{\alpha j}^* |\nu_j(L, L)\rangle = \\ &= \sum_j U_{\alpha j}^* e^{-i(EL - p_j L)} |\nu_j\rangle \end{aligned}$$


- Wahrscheinlichkeit Neutrino  $|\nu_\beta\rangle$  in Zustand  $|\phi\rangle$  zu finden ist  $|\langle\nu_\beta|\phi\rangle|^2$ .
- Zustände mit verschiedenen Massen sind orthonormal:  $\langle\nu_j|\nu_k\rangle = \delta_{jk}$ .

**Oszillation in  $L/E$   
→ Neutrinooszillationen**

Wahrscheinlichkeit Neutrino  $|\nu_\beta\rangle$  zu detektieren  
ungleich 0:

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = |\langle\nu_\beta|\nu_\alpha(L, L)\rangle|^2 = \left| \sum_{j=1}^3 U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i m_j^2 L / 2E} \right|^2.$$

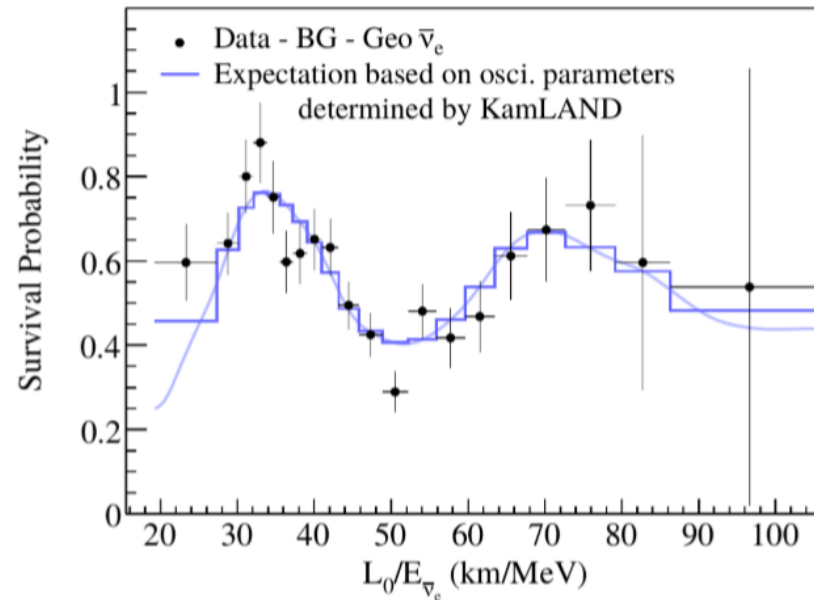
# Was lernen wir aus Neutrinooszillationen?

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(x = L) \rangle|^2 = \left| \sum_{j=1}^3 U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i m_j^2 L / 2E} \right|^2.$$


- Wahrscheinlichkeit für Flavour-Änderung nur ungleich 0, wenn  $m_1, m_2, m_3$  nicht alle gleich sind.
- Insbesondere muss mindestens eine Neutrinomasse ungleich 0 sein.
- Oszillationsexperimente erlauben Messung der Leptonmischungsmatrix  $U$ .

# Neutrinooszillationen im Experiment

KamLAND experiment [S. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 221803.]:



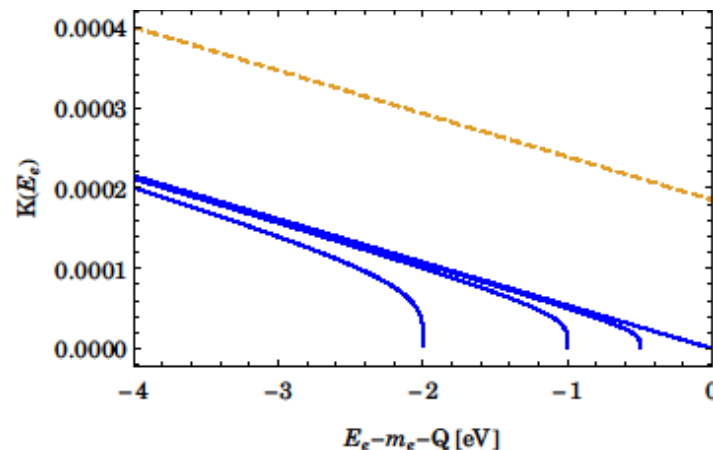
Global fit results [I. Esteban et al., JHEP 01 (2019) 106]:

$$m_2^2 - m_1^2 = (7.39^{+0.21}_{-0.20}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$
$$m_3^2 - m_1^2 = (2.525^{+0.033}_{-0.031}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2.$$

$$\Rightarrow \max m_\nu > 50 \text{ meV}.$$

# KATRIN: Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment

- Haben gesehen: Neutrinomassen sehr klein. → Direkte Messung?
- Beta-Zerfall von Tritium:  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
- Gesamtenergie die dabei frei wird:  $Q = 18.6 \text{ keV}$  → Verteilt sich auf die 3 Produkte → Energiespektrum des emittierten Elektrons.
- Neutrinomasse hat Einfluss auf Form des Endpunktes dieses Spektrums.



Geplante Sensitivität:  $m_\beta > 0.35 \text{ eV}$ .

Untersucht: Auswirkung “neuer Physik” in schwacher Wechselwirkung auf Form des Spektrums.



# KATRIN: Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment



(Quelle: KATRIN collaboration: <https://neutrino.ikp.kit.edu/owncloud/data/katrin/files/Public/KATRIN%20photos/album/index.html>)