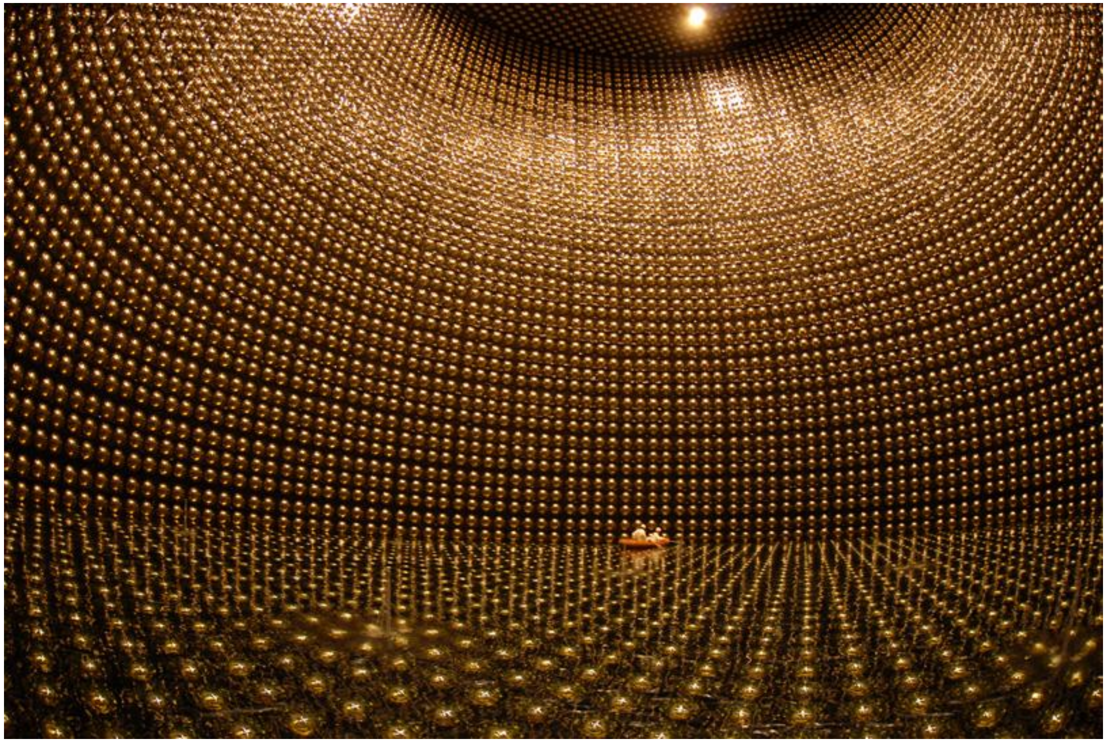
Neutrinomassen und -oszillationen

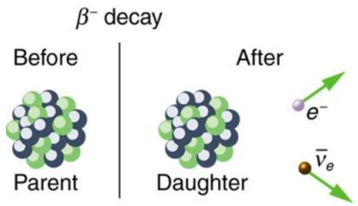
Seminarvortrag von Erik Fitzke



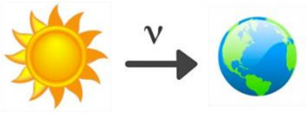
[1]

Inhalt

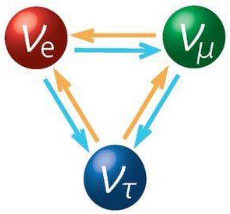
der Präsentation



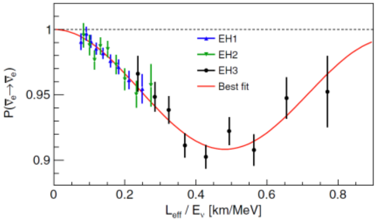
1) Neutrinos als Elementarteilchen



2) Das solare Neutrinoproblem



3) Herleitung der Neutrinooszillation

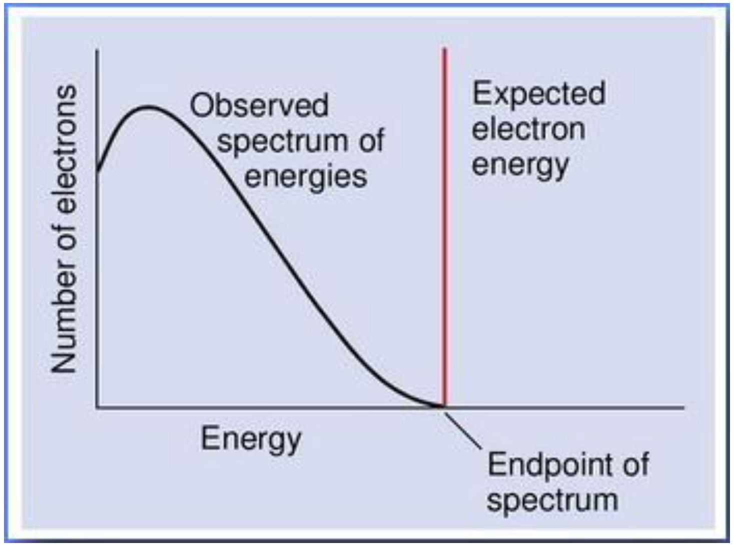


4) Experimentelle Ergebnisse

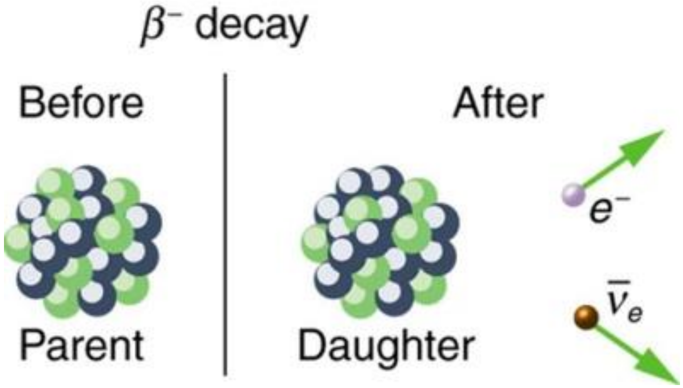
Bildquellen v. l. n. r.: [2], [3], [4], [5]

Entdeckung des Neutrinos

durch Energiespektrum beim β^--Zerfall



[6]

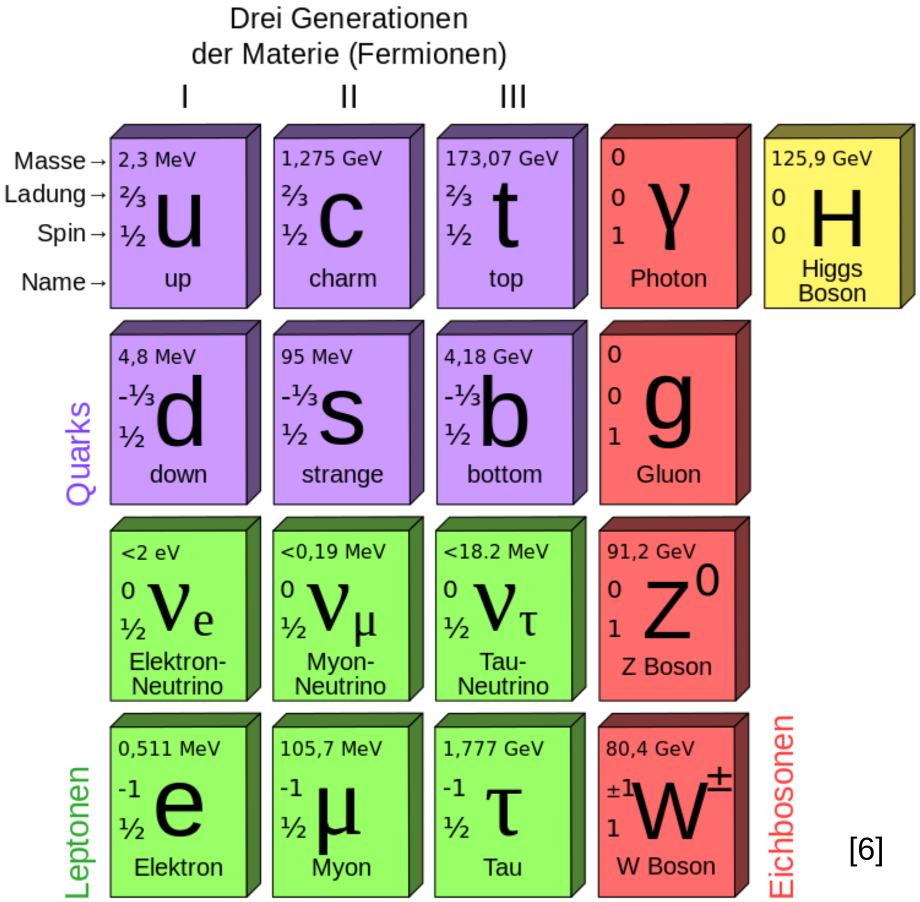


[7]

Typisches Energiespektrum
eines β^--Zerfalls

Standardmodell

und Einordnung der Neutrinos



Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

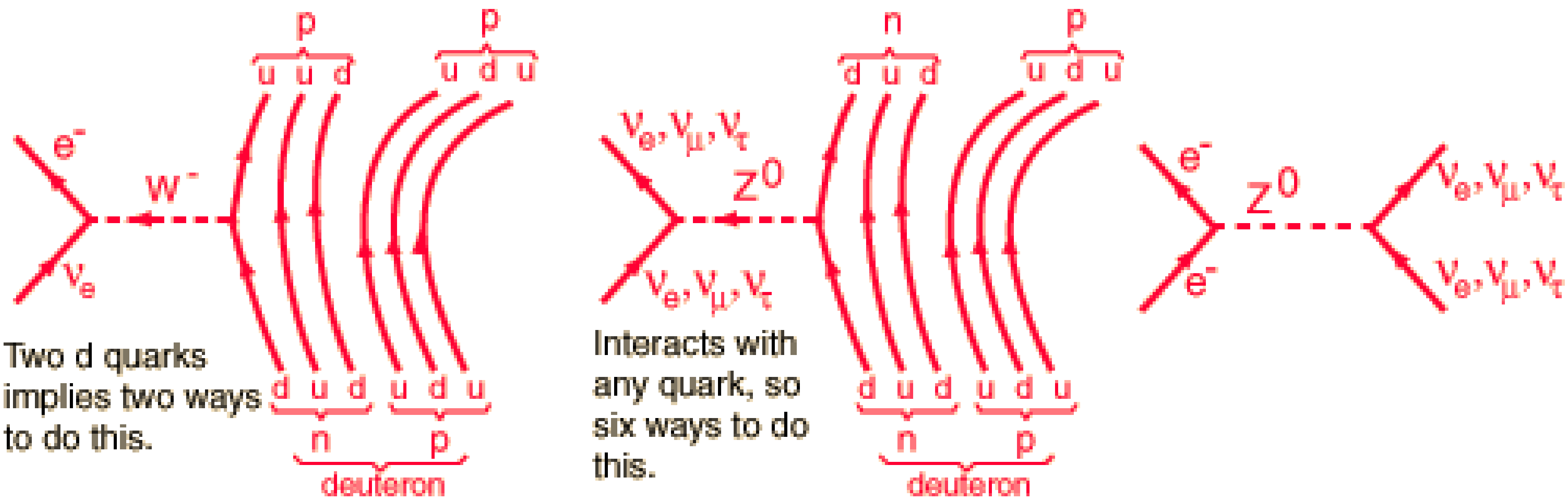
Masse→ Ladung→ Spin→ Name→

	I	II	III	Eichbosonen	
Quarks	2,3 MeV ⅔ ½ u up	1,275 GeV ⅔ ½ c charm	173,07 GeV ⅔ ½ t top	0 0 1 γ Photon	125,9 GeV 0 0 H Higgs Boson
	4,8 MeV -⅓ ½ d down	95 MeV -⅓ ½ s strange	4,18 GeV -⅓ ½ b bottom	0 0 1 g Gluon	
Leptonen	<2 eV 0 ½ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 ½ ν_μ Myon-Neutrino	<18.2 MeV 0 ½ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV -1 ½ e Elektron	105,7 MeV -1 ½ μ Myon	1,777 GeV -1 ½ τ Tau	80,4 GeV ±1 1 $W^\pm$ W Boson	

[6]

Wechselwirkungen

durch die schwache Kraft



Two d quarks implies two ways to do this.

Interacts with any quark, so six ways to do this.

Charged current reaction, electron neutrinos only.

Neutral current reaction, all neutrinos.

Elastic scattering with any neutrino.

$$\nu_e + {}^2H \rightarrow p + p + e^- \qquad \nu_x + {}^2H \rightarrow \nu_x + p + n \qquad \nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$

[9]

Das solare Neutrinoproblem

machte auf die Oszillationen aufmerksam

Solare Neutrinoproduktion, z.B.

$$p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_e$$
$${}^{8}B \rightarrow {}^{7}Be + e^{+} + \nu_e$$

Fluss: $6 \times 10^{10}\ cm^{-2}s^{-1}$

Nachweis im Homestake-Experiment:

$$\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow \underbrace{{}^{37}Ar}_{radioaktiv} + e^{-}$$

Messung: $2{,}56 \pm 0{,}32$ SNU
Standardmodell der Sonne: $8{,}5 \pm 0{,}9$ SNU

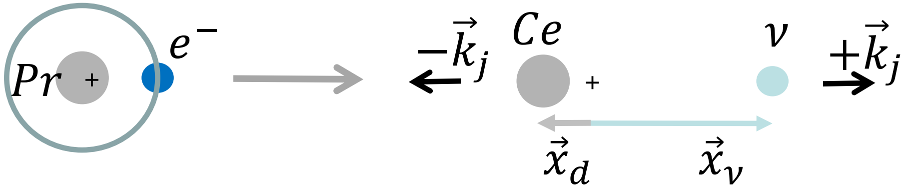
[10]

*SNU: Solar Neutrino Unit

Die Lösung

sind Neutrinooszillationen

Beispiel Elektroneneinfang: $^{140}_{59}Pr + e^- \rightarrow {}^{140}_{58}Ce + \nu_e$



Annahmen:

1) ν_e, ν_μ, ν_τ sind Mischungen der Massen-Eigenzustände $j \in \{1, 2, 3\}$

$$|\nu_e\rangle = \sum_{j=1,2,3} |j\rangle\langle j|\nu_e\rangle$$

$\{\langle j|\nu_e\rangle\}$ sind durch PMNS-Matrix gegeben

2) Für jeden Massen-Eigenzustand gelten Energie- und Impulserhaltung separat

$$K = \begin{pmatrix} M_m \\ \vec{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{M_d{}^2 + \vec{k}_j{}^2} \\ -\vec{k}_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sqrt{m_j{}^2 + \vec{k}_j{}^2} \\ +\vec{k}_j \end{pmatrix}$$

Viererimpuls Tochter-Nuklid Neutrino ν_j

Die Lösung

sind Neutrinooszillationen

Verschränkter Gesamtzustand nach Zerfall:

$$|K,d,\nu_e\rangle = \sum_{j=1,2,3} \left(|-\vec{k}_j,d\rangle \otimes |+\vec{k}_j,j\,\rangle\right)\langle j|\nu_e\rangle$$

Tochter-Nuklid Neutrino

Zeitentwicklungsoperator: $\hat{U}(t) = e^{-i\hat{H}_d t} \otimes e^{-i\hat{H}_\nu t}$

$$= \sum_{\vec{k}} |\vec{k},d\rangle e^{-i\sqrt{{M_d}^2+\vec{k}^2}\,t}\langle\vec{k},d| \otimes \sum_{\substack{j=1,2,3\\ \vec{k}}} |\vec{k},j\rangle e^{-i\sqrt{{m_j}^2+\vec{k}^2}\,t}\langle\vec{k},j|$$

Normierte Amplitude für Neutrino ν_α, $\alpha \in \{e,\mu,\tau\}$ bei $\vec{x}_\nu$ und Rückstoßkern bei $\vec{x}_d$

$$A_{e\to\alpha}(\vec{x},t) = \langle\vec{x}_d,d;\vec{x}_\nu,\nu_\alpha|\hat{U}|K,d,\nu_e\rangle$$

$$= \sum_{j=1,2,3} e^{-i\sqrt{{M_d}^2+{\vec{k}_j}^2}\,t}\langle\vec{x}_d,d|-\vec{k}_j,d\rangle e^{-i\sqrt{{m_j}^2+{\vec{k}_j}^2}\,t}\langle\vec{x}_\nu,\nu_\alpha|+\vec{k}_j,j\rangle\langle j|\nu_e\rangle$$

$$= e^{-iM_m t}\sum_{j=1,2,3}\langle\nu_\alpha|j\rangle e^{i\vec{k}_j(\vec{x}_\nu-\vec{x}_d)}\langle j|\nu_e\rangle$$

Neutrinooszillationen

Beispiel: Zwei Neutrinos und zwei Eigenzustände

$$A_{e\to\alpha} = e^{-iM_m t} \sum_{j=1,2} \langle \nu_\alpha | j \rangle e^{i\vec{k}_j(\vec{x}_\nu - \vec{x}_d)} \langle j | \nu_e \rangle$$

Vereinfachungen:

$$\{\langle j|\nu_\alpha\rangle\} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$|\vec{x}_\nu - \vec{x}_d| = L$$

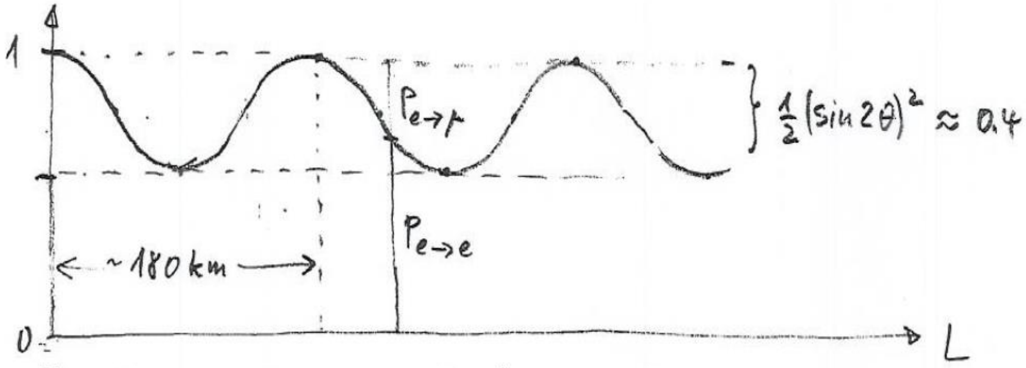
$$(\vec{x}_\nu - \vec{x}_d) \parallel \vec{k}$$

$$k_1 - k_2 \approx -\frac{m_1^2 - m_2^2}{2\bar{E}_\nu}$$

$$P_{e\to e}(L) = |A_{e\to e}|^2$$

$$= \left|\cos^2\theta\, e^{ik_1 L} + \sin^2\theta\, e^{ik_2 L}\right|^2$$

$$= 1 - \sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{m_1^2 - m_2^2}{4\bar{E}_\nu} L\right)$$



Ostillation between electron und muon neutrino

[11]

$\bar{E}_\nu = 3.3$ MeV
$\Delta m^2 = 9 * 10^{-5}$(eV)²
$\sin^2 2\theta \approx 0.8$

Die PMNS-Matrix

beschreibt die Mischung

Die PMNS-Matrix (nach Pontecorvo, Maki, Nakagawa und Sakata):

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}80 \ldots 0{,}85 & 0{,}51 \ldots 0{,}58 & 0{,}14 \ldots 0{,}16 \\ 0{,}23 \ldots 0{,}52 & 0{,}44 \ldots 0{,}70 & 0{,}61 \ldots 0{,}79 \\ 0{,}25 \ldots 0{,}53 & 0{,}46 \ldots 0{,}71 & 0{,}59 \ldots 0{,}78 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

[12]

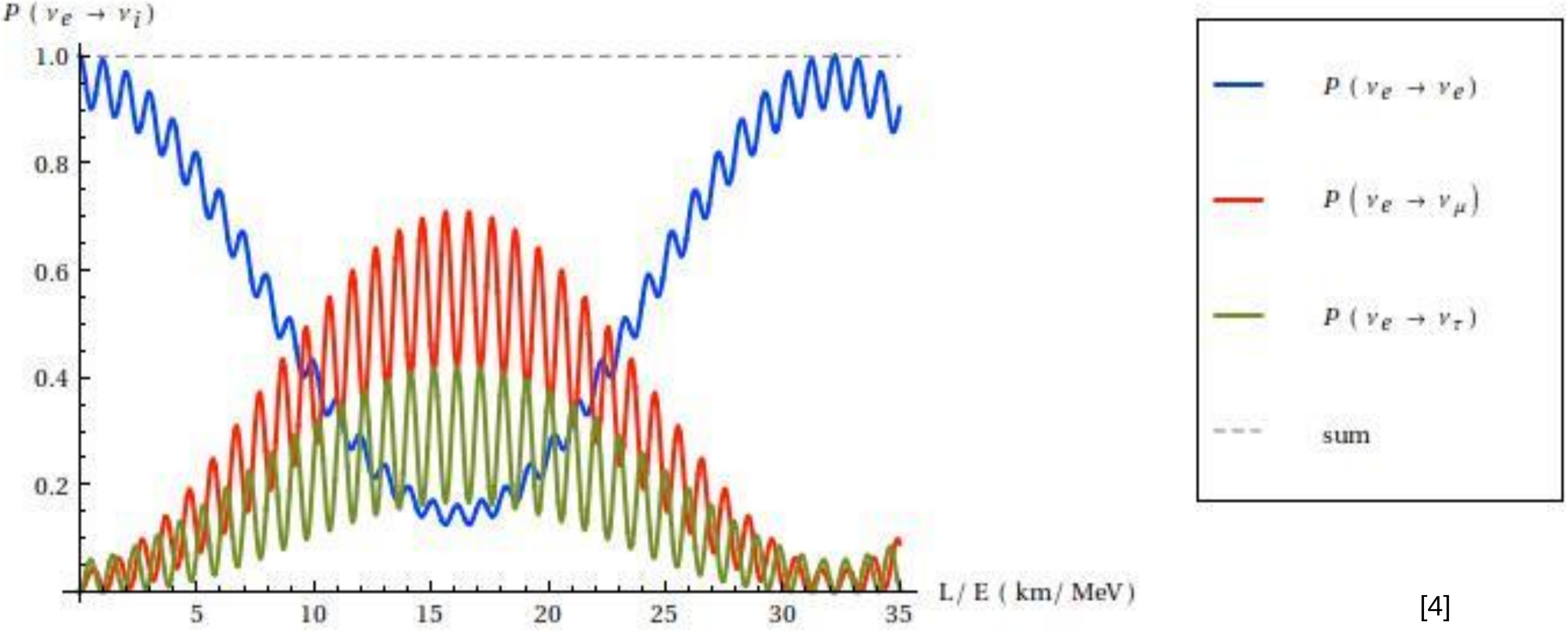
Massenquadrat-Differenzen:

$$\Delta m_{21}^2 = (7{,}03 \ldots 8{,}09) \times 10^{-5}\ \mathrm{eV}^2$$
$$\Delta m_{23}^2 \approx \Delta m_{31}^2 = (2{,}33 \ldots 2{,}60) \times 10^{-3}\ \mathrm{eV}^2$$

[12]

Theoretische Oszillation

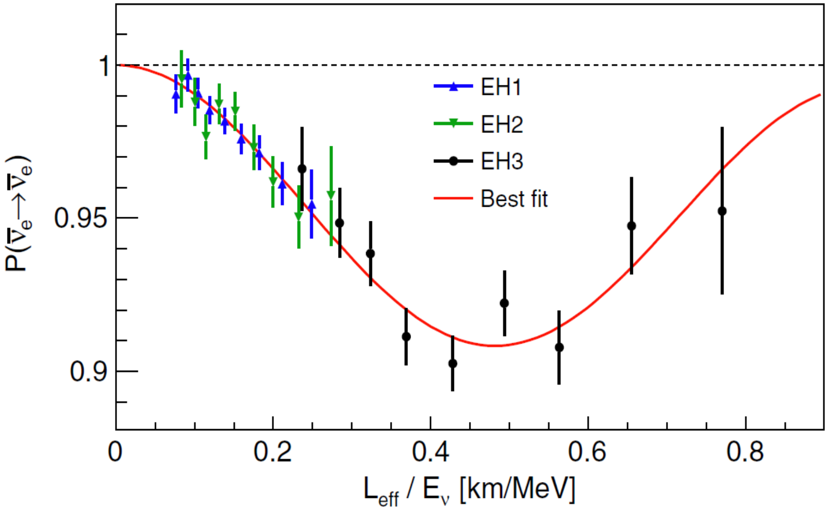
von ν_e gemäß Parametern der PMNS-Matrix



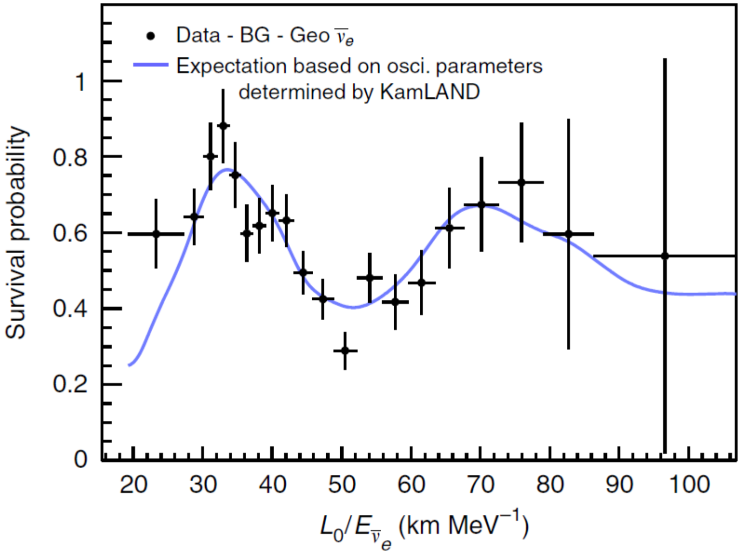
[4]

Messwerte

von Neutrinos aus Kernreaktoren



Messdaten Daya Bay [5]

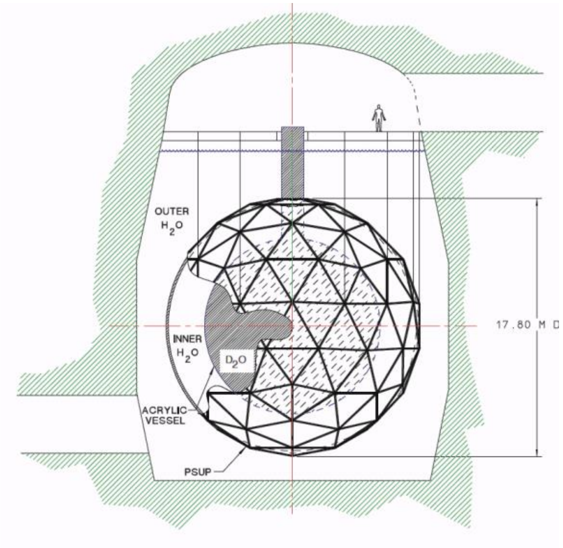


[13]

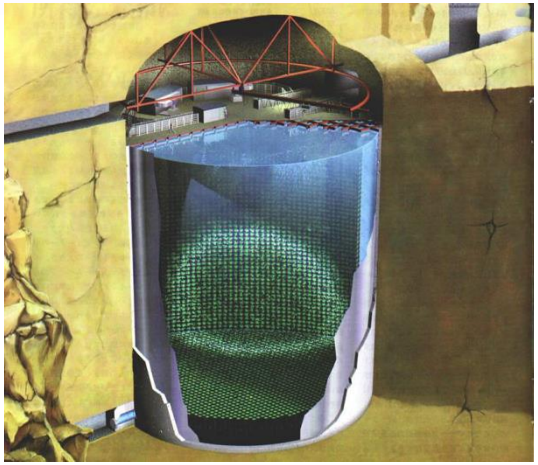
Messdaten KamLAND

Solare Neutrinos

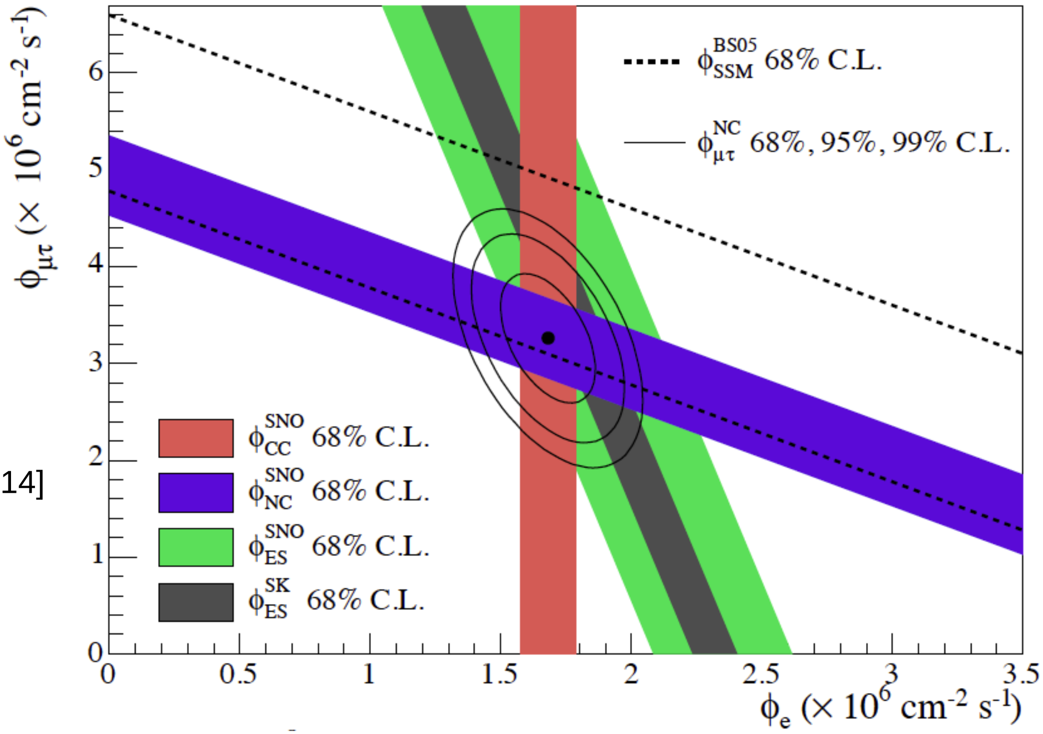
Übereinstimmung von Modell und Experiment



[14]



[14]



[10]

Flussmessungen von SNO und Super-Kamiokande

Ausblick

Woran wird noch geforscht?

- Genauere Mischungsmatrix
- Absolutwerte der Massen
- CP-Verletzung durch Neutrinos
- Sind Neutrinos Majorana-Fermionen?
- Größerer Detektor Hyper-Kamiokande

Das Wichtigste

nochmal kurz zusammengefasst

- ν_e, ν_μ, ν_τ sind Mischungen der Massen-Eigenzustände gemäß PMNS-Matrix
- Mischung der MEZ: Oszillation von $P_{\alpha\rightarrow\beta}(L)$
- Solares ν_e –Defizit: ν_e oszillieren zum Teil zu ν_μ, ν_τ
- Oszillationsperioden: ca. 32 km/MeV und 1 km/MeV

Quellen und Literatur

[1] http://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2008/05/neutrino.jpg

[2] https://cnx.org/contents/VSkwG-AK@3/Nuclear-Decay-and-Conservation

[3] http://www.quantumdiaries.org/wp-content/uploads/2010/08/solarneutrinos.png

[4] http://invisibles.eu/outreach/entry/ceaseless-transformation-three-neutrinos

[5] Spectral Measurement of Electron Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at Daya Bay, F. P. An *et al.* (Daya Bay Collaboration) Phys. Rev. Lett. 112, 061801 – Published 10 February 2014

[6] http://www.cobra-experiment.org/

[7] http://www.physi.uni-heidelberg.de/Forschung/ANP/Perkeo/theorie.php

[8] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg/2000px Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg.png

[9] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/imgpar/feyncr.gif

[10] Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015, NEUTRINO OSCILLATIONS, compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences

[11] On neutrino oscillations in cavuum, Lecture held at Doctoral Training Programme at ECT, 28.04.2010, Hans Feldmeier, GSI

[12] http://www.nu-fit.org/?q=node/8

[13] Neutrino oscillation studies with reactors P. Vogel, L.J. Wen & C. Zhang Nature Communications 6, Published 27 Apr 2015

[14] Y. Suzuki, Atmospheric Neutrinos, Presentation 2013/09/19