

Neutrino-Oszillation

Lars Künkel

28. Mai 2013

Gliederung

- 1 Einleitung
 - Was ist Neutrino-Oszillation?
 - Solares Neutrino-Problem
- 2 Quantenmechanische Deutung
- 3 Experimente
 - Homestake-Experiment
 - IceCube Neutrino Observatory
- 4 Quellen

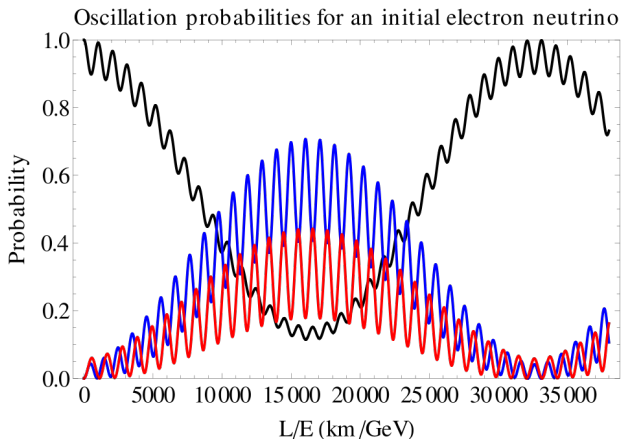
Neutrino-Flavours

Neutrinos treten in verschiedenen Flavours auf, welche sich in ihren Wechselwirkungseigenschaften unterscheiden.

- Elektron-Neutrinos ν_e
- Muon-Neutrinos ν_μ
- Tau-Neutrinos ν_τ

Umwandlung der Neutrino-Flavours

Neutrino-Oszillation beschreibt die Umwandlung dieser verschiedenen Flavours ineinander, welche aufgrund quantenmechanischer Effekte auftritt.



Nobelpreisträger 2002



Raymond Davis Jr.



Masatoshi Koshiwa

Historische Entwicklung

1930: Wolfgang Pauli postuliert das Neutrino.

1946: Bruno Pontecorvo schlägt vor mit Hilfe der Reaktion
 $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ Neutrinos zu detektieren.

1951-1955: Raymond Davis Jr. führt mit dieser Reaktion erste
Neutrino-Experimente.

Ergebnis: Solarer Neutrinofluss < 40.000 SNU

$$1 \text{ SNU} = 10^{-36} \frac{\nu\text{-Einfänge}}{\text{Targetatom-s}}$$

1957: Bruno Pontecorvo sagt Neutrino-Oszillation theoretisch
vorher.

Historische Entwicklung

1965-1966: Homestake Experiment wird errichtet.

1967-1994: Homestake Experiment vermisst den Solaren Neutrino-Fluss.
Ergebnis: 2,56 SNU

Theoretische Vorhersage: 7,6 SNU

1982-1983: Unter Leitung von Masatoshi Koshiba wird das Kamioka Nucleon Decay Experiment (Kamiokande) konstruiert.

1987: Supernova 1987A wird an verschiedenen Neutrino-Observatorien detektiert.

Lösung des Solaren Neutrino-Problems

1996: Super-Kamiokande geht in Betrieb.

1998: Super-Kamiokande untermauert Oszillation atmosphärischer Neutrinos nach.

2001-2002: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) weist Neutrino-Oszillation nach.

Quantenmechanische Deutung

1. Bedingung

Neutrinos besitzen unterschiedliche Massen.

2. Bedingung

Massen-Eigenzustände sind gegenüber Wechselwirkungs-Zuständen vermischt.

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{m1} \\ \nu_{m2} \end{pmatrix}$$

Ausbreitung der Masseneigenzustände

$$\begin{aligned}
 |\nu_\alpha\rangle &= \cos\theta \cdot |\nu_{m1}\rangle + \sin\theta \cdot |\nu_{m2}\rangle \\
 |\nu_\beta\rangle &= -\sin\theta \cdot |\nu_{m1}\rangle + \cos\theta \cdot |\nu_{m2}\rangle
 \end{aligned}$$

Ausbreitung als ebene Welle (mit $c=1, \hbar=1$):

$$|\nu_{mi}(t)\rangle = e^{-i(E_i t - p_i L)} |\nu_{mi}(0)\rangle$$

Für $t \approx \frac{L}{c} = L$: $|\nu_{mi}(L)\rangle = e^{-i(E_i - p_i)L} |\nu_{mi}(0)\rangle$

Frequenzen der Masseneigenzustände

$$|v_{mi}(L)\rangle = e^{-i(E_i - p_i)L} |v_{mi}(0)\rangle$$

Annahmen: $p_i = p$; m_i klein gegenüber p

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2 \cdot p} \approx p + \frac{m_i^2}{2 \cdot E}$$

$$|v_{mi}(L)\rangle = e^{-i \frac{m_i^2}{2E} L} |v_{mi}(0)\rangle$$

Umwandlung der Wechselwirkungszustände

$$|\nu_\alpha(L)\rangle = \cos\theta \cdot |\nu_{m1}(0)\rangle e^{-i\frac{m_1^2}{2E}L} + \sin\theta \cdot |\nu_{m2}(0)\rangle e^{-i\frac{m_2^2}{2E}L}$$

Befand sich bei $L=0$ das Neutrino im Zustand ν_α , dann ist die Wahrscheinlichkeit im Abstand L ν_β anzutreffen gegeben durch:

$$|\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2$$

Relevante Parameter:

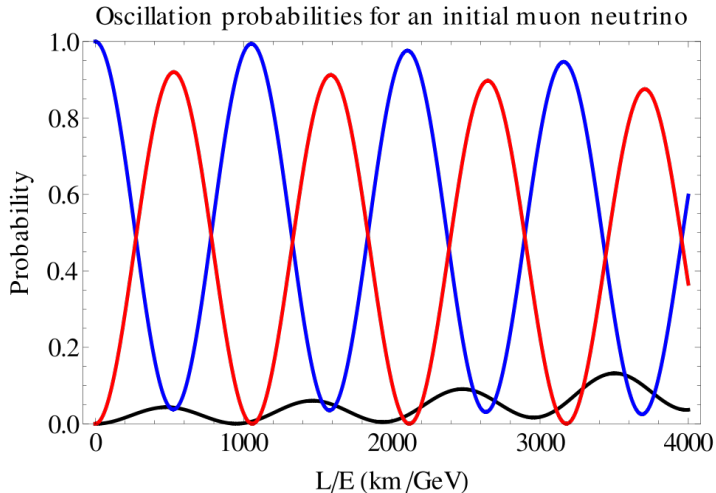
- Mischungswinkel θ_{12} , θ_{23} und θ_{13}
- Differenz der Massenquadrate der Flavours Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 und Δm_{32}^2

Beschreibung Atmosphärischer Neutrinos

- Muon-Neutrinos entstehen in der Atmosphäre und wandeln sich auf beobachtbaren Längen größtenteils in Tau- Neutrinos um.

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) = 1 - \sin^2(2 \cdot \theta_{23}) \sin^2(1,27 \cdot \Delta m_{23}^2 L/E) \quad ; L \text{ in km, } E \text{ in GeV}$$

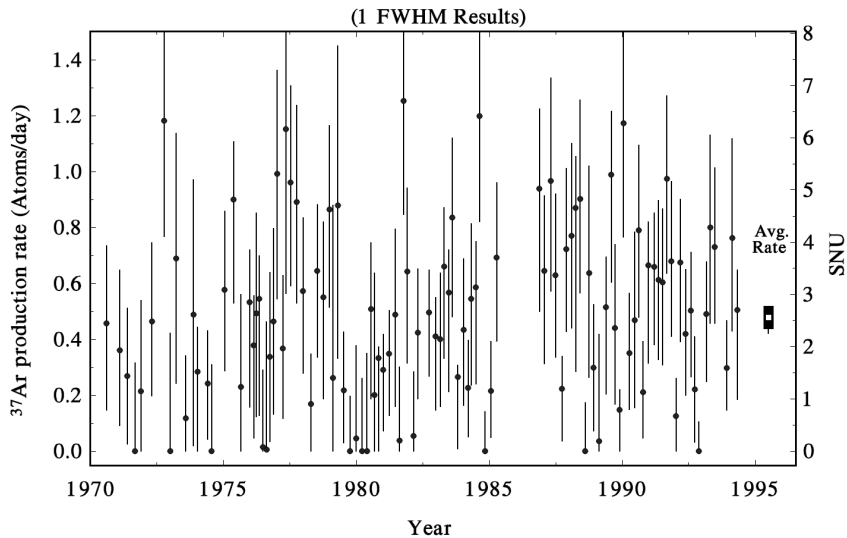
Muon-Neutrino Umwandlung



Homestake-Experiment

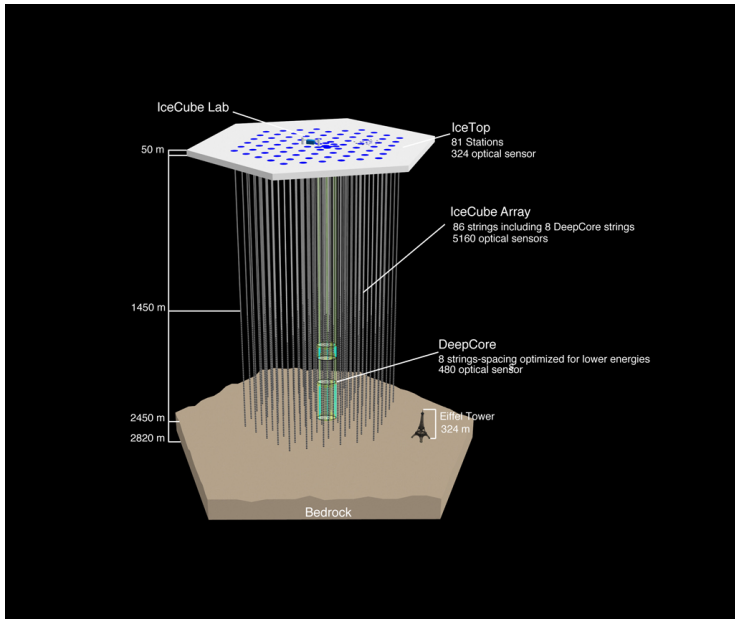
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- ^{37}Ar zerfällt wiederrum und kann so detektiert werden
- 378.000 Liter Tetrachlorethylen
- 2200 Argon-Atome wurden gezählt
- Detektion solarer Neutrinos im MeV-Bereich

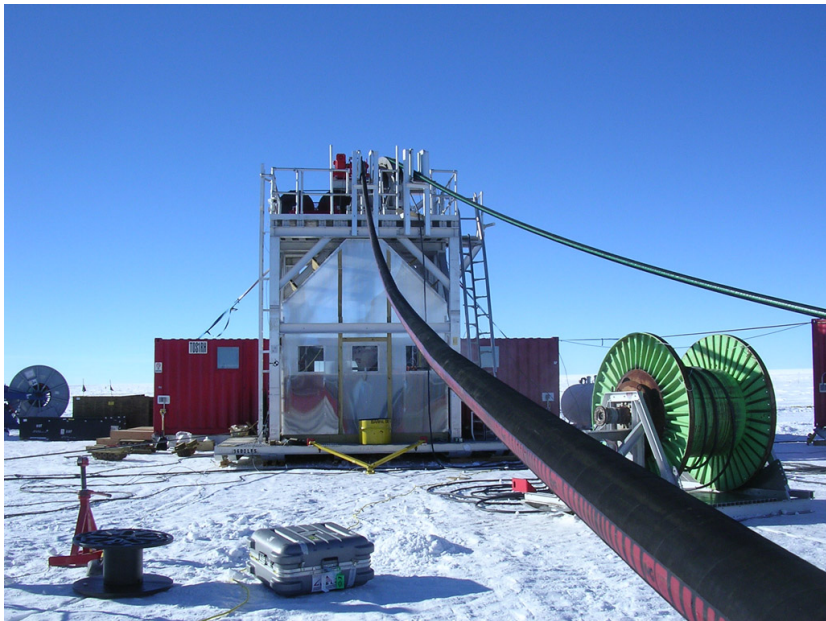




IceCube

- Photo-Multiplier zeichnen Stöße von Neutrinos mit Eis auf
- Am Empfindlichsten auf Muon-Neutrinos
- 1 km^3 Eis am Südpol
- Detektiert Neutrinos ab dem GeV-Bereich

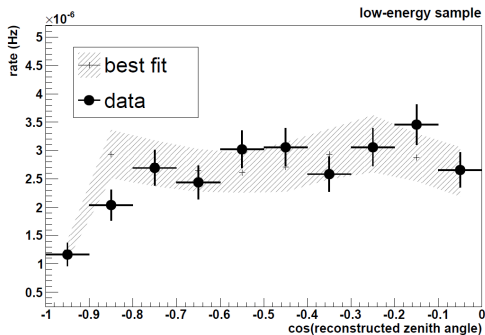




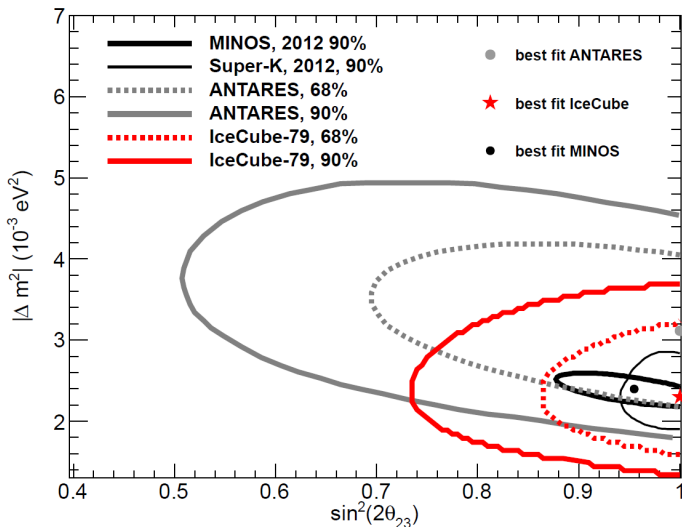
»Measurement of Atmospheric Oscillations with IceCube«

Ergebnisse veröffentlicht am 16. Mai 2013

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2 \cdot \theta_{23}) \sin^2(1,27 \cdot \Delta m_{23}^2 L/E)$$

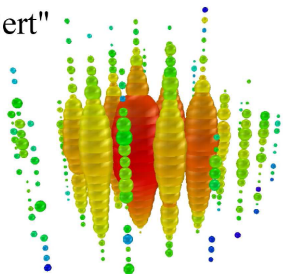


»Measurement of Atmospheric Oscillations with IceCube«

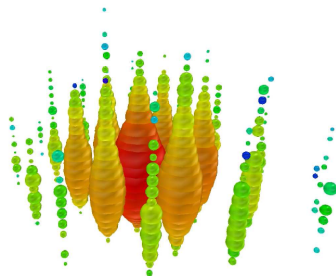


Ernie und Bert

"Bert"



"Ernie"



Am IceCube wurden 2011 bzw. 2012 zwei Neutrinos detektiert, welche Energien von 1.04 ± 0.16 bzw. 1.14 ± 0.17 PeV aufwiesen.

Zusammenfassung

- Neutrino-Wechselwirkungszustände sind Linearkombinationen von Masseneigenzuständen.
- Wellenfunktionen von Masseneigenzuständen schwingen mit unterschiedlichen Frequenzen

→ Neutrinos können in einem anderen Wechselwirkungszustand als sie erstellt wurden detektiert werden.

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit.

Literatur

- http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/davis-lecture.pdf
- http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/koshiba-lecture.pdf
- <http://pdg.lbl.gov/2012/reviews/rpp2012-rev-neutrino-mixing.pdf>
- <http://xxx.lanl.gov/pdf/1304.5356v1.pdf>
- <http://arxiv.org/pdf/1305.3909v1.pdf>
- <http://www.mpg.de/443025/forschungsSchwerpunkt1>
- http://www2.physik.uni-bielefeld.de/fileadmin/user_upload/theory_e6/Bachelor_Theses/BachelorArbeit_DanielGrewe.pdf

Aufgerufen am 28.05.13

Bildnachweis

- Folie 4: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Oscillations_electron_long.svg
- Folie 5: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/davis.jpg
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/koshiba.jpg
- Folie 14: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Oscillations_muon_short.svg
- Folie 16: <http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/images/1-390-66-sm.jpg>
- Folie 17:
http://iopscience.iop.org/0004-637X/496/1/505/pdf/0004-637X_496_1_505.pdf
- Folie 19:
http://gallery.icecube.wisc.edu/web/var/albums/WWW_GALLERY/Diagrams/1-blueTopArray_black-618432112.jpg?m=1309528898
- Folie 20: http://gallery.icecube.wisc.edu/web/var/albums/WWW_GALLERY/Drilling-and-Deployment/04-DSCN2420_4.jpg?m=1309535383
- Folie 21/22: <http://arxiv.org/pdf/1305.3909v1.pdf>
- Folie 23: <http://xxx.lanl.gov/pdf/1304.5356v1.pdf>