

Solare Neutrinos

Anja Wurdack, Björn Tegetmeyer

19. Dezember 2012

Inhaltsverzeichnis

Einführung

Erzeugung

Solares Neutrino Problem

Masse des Neutrinos

Experimentelle Detektionsmöglichkeiten

Chlor-Experiment

GALLEX/SAGE

Super-Kamiokande

SNO

Neutrinooszillation

Ausblick

Einführung

- ▶ Was ist ein Neutrino?

Einführung

Was ist ein Neutrino?

- ▶ elektrisch neutrales Elementarteilchen
- ▶ Lepton
- ▶ beeinflusst durch schwache WW und Gravitation
- ▶ Spin = $\frac{1}{2}$
- ▶ Kleine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit ($\sigma \approx 10^{-42} \text{ cm}^2$)

Erzeugung

- ▶ Einfachste Möglichkeit: β -Zerfälle:

- ▶ β^- -Zerfall

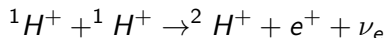


- ▶ β^+ -Zerfall



Erzeugung

- ▶ Für uns wichtigste Neutrinoquelle: Sonne
- ▶ Neutrinoentstehung durch Kernfusionsprozesse
- ▶ Prominentestes Beispiel: Proton-Proton-Reaktion



Erzeugung

Neutrinoerzeugung in der Sonne

Reaktion	Abkürzung	Fluß [$cm^{-2}s^{-1}$]
$pp \rightarrow de^+\nu$	pp	$5,99 \cdot 10^{10}$
$pe^-p \rightarrow d\nu$	pep	$1,42 \cdot 10^8$
${}^3He p \rightarrow {}^4He e^+\nu$	hep	$7,93 \cdot 10^3$
${}^7Be e^- \rightarrow {}^7Li \nu + (\gamma)$	7Be	$4,84 \cdot 10^9$
${}^8B \rightarrow {}^8Be^* e^+\nu$	8B	$5,69 \cdot 10^6$
${}^{13}N \rightarrow {}^{13}C e^+\nu$	${}^{13}N$	$3,07 \cdot 10^8$
${}^{15}O \rightarrow {}^{15}N e^+\nu$	${}^{15}O$	$2,33 \cdot 10^8$
${}^{17}F \rightarrow {}^{17}O e^+\nu$	${}^{17}F$	$5,84 \cdot 10^6$

Tabelle: Quelle: Markus Bobrowski, Solare Neutrinos (Scriptum)

Erzeugung

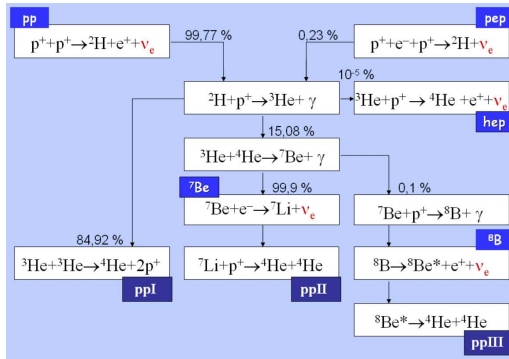


Abbildung: Quelle: Wikipedia, Artikel: Neutrino

Neutrinospektrum

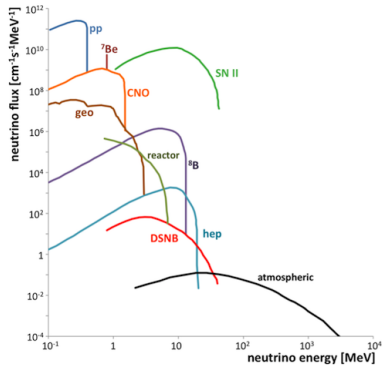


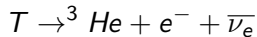
Abbildung: Quelle: LENA

Solares Neutrinoproblem

- ▶ Problem: Es kommen weniger Neutrinos als erwartet
- ▶ Keine Zweifel am Sonnenmodell, da gute Übereinstimmung mit helioseismologischen Schallgeschwindigkeitsmessungen
- ▶ Lösung: Neutrinooszillation (später)

Masse des Neutrinos

- ▶ Lange umstritten, ob Neutrinos Ruhemasse besitzen
- ▶ Neutrinooszillation \Rightarrow Neutrinos müssen Masse besitzen
- ▶ Massenmessungen mit Tritium-Betazerfallsexperimenten:



Masse des Neutrinos

Experiment	$m^2 [(eV)^2]$	Jahr
Average of PDG	$-1,1 \pm 2,4$	2007
Mainz	$-1,6 \pm 2,5$	2000
Troisk	$-1,0 \pm 3,0$	2000
Zürich	-24 ± 48	1992
Tokyo INS	-65 ± 85	1991
Los Alamos	-147 ± 68	1991
Livermore	-130 ± 20	1995

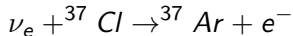
Negative Massenquadrate nach bisherigem Stand auf systematischen Messfehler zurückzuführen.

Experimentelle Detektionsmöglichkeit

Wie lassen sich Neutrinos
detektieren?

Chlor-Experiment

- ▶ Neutrinodektor in der Homestake Goldmine in South Dakota
- ▶ 1970 - 1994 in kontinuierlichem Betrieb
- ▶ Detektor aus 615 t Tetrachlorethylen
- ▶ Einfangreaktion:



- ▶ Energieschwelle: 814 keV \rightarrow ${}^8\text{B}$ und ${}^7\text{Be}$ Neutrinos detektierbar

Chlor-Experiment

- ▶ Reaktion selbst nicht nachweisbar
- ▶ entstehendes Argon-Atom ist radioaktiv ($\tau = 35 \text{ d}$)
- ▶ zerfällt zurück in ein angeregtes Chlor-Atom
- ▶ Nachweis: Alle paar Wochen Tank mit Helium spülen
- ▶ Argon in Kühlfalle gesammelt, gereinigt und 250-400 Tage auf Zerfälle untersucht

Chlor-Experiment

108 Messzyklen im Zeitraum 1970-1994

- ▶ Ergebnis: $2,56 \pm 0,22$ SNU
- ▶ theoretisch vorhergesagt:

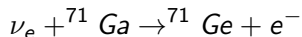
$$\approx 7,7 \text{ SNU}$$

(Bahcall et al., 1998a)

- ▶ → Rate von experimentellem zu theoretischem Wert:
 $\approx 33\% \Rightarrow$ Neutrinoproblem!

GALLEX/SAGE

- ▶ GALLium EXperiment, Soviet-American Gallium Experiment



- ▶ GALLEX: 54 m^3 Tank mit 101 t Galliumtrichlorid-Salzsäure, enthält ca. 30 t Gallium
- ▶ Schwellenwert: 233,2 keV
- ▶ wegen des geringen Schwellenwertes: Nachweis von pp -Neutrinos ($E_{max} = 420$ keV)

GALLEX/SAGE

- ▶ Entstandenes ^{71}Ge in Monogerman (GeH_4) umgewandelt
- ▶ Zerfall von ^{71}Ge gemessen ($\tau = 11,43 \text{ d}$)
- ▶ jeder nachgewiesene Zerfall entspricht einem eingefangenen Neutrino
- ▶ Ergebnis: $78 \pm 8 \text{ SNU}$ nachgewiesen, $\approx 60\%$ des erwarteten Wertes \rightarrow Neutrinoproblem

Super-Kamiokande

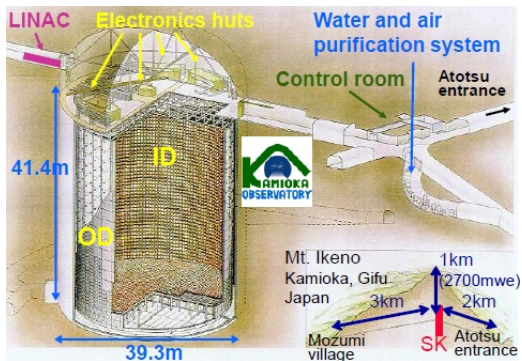


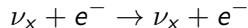
Abbildung: Aufbau des Super-Kamiokande Detektors

Super-Kamiokande

- ▶ Detektor in 1000m Tiefe unter dem Berg Kamioka, nahe Hida City, Japan, 1996-2008
- ▶ innerer und äußerer zylindrischer Tank aus rostfreiem Stahl
- ▶ Gesamtvolumen 50000 Tonnen Reinstwasser
- ▶ insgesamt 13000 Photomultiplier am inneren Zylinder
- ▶ Vorgänger Kamiokande erster "real time" Detektor

Super-Kamiokande

- ▶ Elastische Neutrino-Elektron Streuung (ν_e größter Wirkungsquerschnitt, 5 MeV)



- ▶ Rückstoßelektron ist schneller als Lichtgeschwindigkeit im dielektrischen Medium
- ▶ blaue, richtungsabhängige Cherenkov-Strahlung als Nachweis für solare Neutrinos
- ▶ Intensität \rightarrow Neutrino-Energie, Form \rightarrow Richtung

Super-Kamiokande

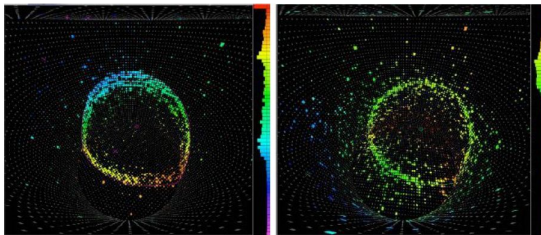


Abbildung: Unterschiedliche Ringmuster

Super-Kamiokande

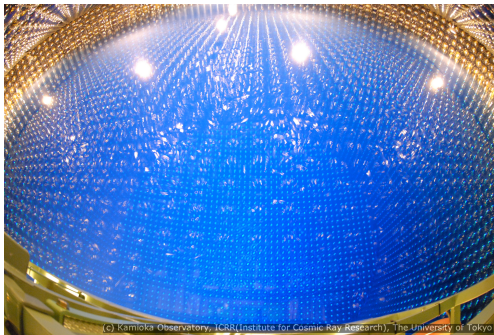


Abbildung: Blaues Cherenkov-Licht im Super-Kamiokande-Detektor

Super-Kamiokande

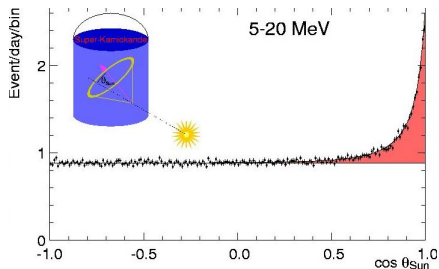


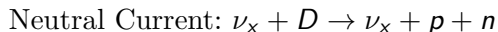
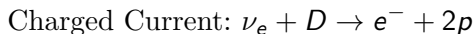
Abbildung: Winkeldifferenz zwischen detektierten Neutrinos und jeweiliger Sonnenposition

SNO

- ▶ Sudbury Neutrino Observatory in 2000m Tiefe in einer Miene in Ontario, Kanada, 1999-2006
- ▶ innerer Kessel mit 1000 Tonnen Schwerwasser gefüllt D_2O
- ▶ äußere Kugel mit 9600 Photomultipliern
- ▶ äußeres Becken ist mit normalem Wasser gefüllt → Stabilisierung und Abschirmung

SNO

- ▶ Schwerwasser lässt zwei weitere Reaktionen zu



- ▶ Wirkungsquerschnitt beim NC flavour-unabhängig, 2.226 MeV
- ▶ CC läuft nur über ν_e ab, 1.442 MeV
- ▶ Nachweis über Cherenkov-Licht, alle drei Neutrinoarten detektierbar

SNO

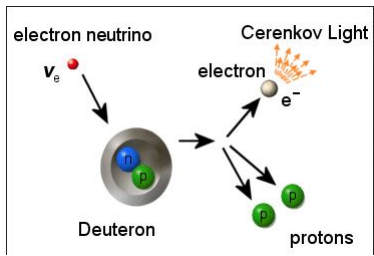


Abbildung: Charged Current

SNO

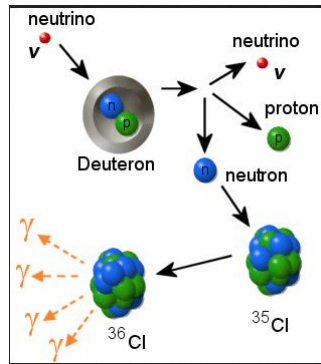


Abbildung: Neutral Current

SNO

- ▶ CC entspricht den gesamten Elektronen-Neutrino-Fluss
- ▶ NC ist die Summe aller solaren Neutrino-Flüssen
- ▶ Elastische Streuung: 6 mal größerer Wirkungsquerschnitt für ν_e als für ν_μ bzw. ν_τ
- ▶ Ohne Oszillation müssten alle drei Flüsse gleich sein
- ▶ Messungen der Flüsse deuten auf Neutrinooszillation hin
- ▶ Gesamter Neutrinofluss deckt sich mit SSM-Vorhersagen

Neutrinooszillation

- ▶ erste Hinweise schon Ende der 60er Jahre, eindeutiger Nachweis des Flavour-Changes 2001 durch SNO
- ▶ quantenmechanisches Phänomen
- ▶ Wahrscheinlichkeit ein Neutrino in einem bestimmten Flavour zu messen variiert periodisch
- ▶ Oszillation \rightarrow mindestens zwei Neutrinos haben verschiedene Massen
- ▶ Standardmodell der Teilchenphysik?

Neutrinooszillation

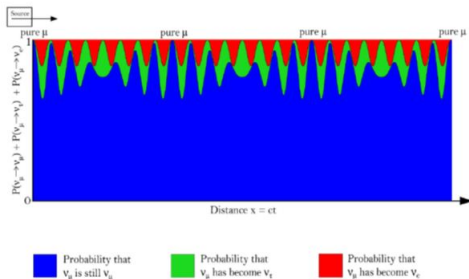


Abbildung: Oszillationswahrscheinlichkeiten

Neutrinooszillation

- ▶ Flavour-Zustände miteinander verknüpft
- ▶ Differenz im Mischungswinkel entspricht Amplitude
- ▶ Differenz in Oszillationslänge entspricht Masse
- ▶ MSW-Effekt in Materie
- ▶ variable Elektronendichte beeinflusst Neutrinooszillation → resonante Verstärkungen möglich
- ▶ Wahrscheinlichkeit für Flavourübergang erhöht

Neutrinooszillation

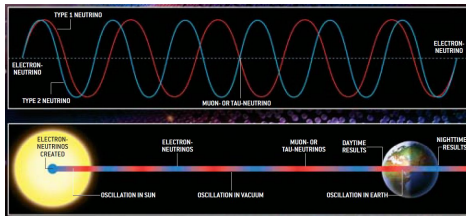


Abbildung: Der Weg eines Neutrinos von der Sonne zur Erde

Borexino

- ▶ Untersuchung solarer Neutrinos niedriger Energie, ca. 1.0-1.5 MeV
- ▶ Gran Sasso Laboratorium, nahe L'Aquila, Italien, Beginn 2007
- ▶ Detektion von ${}^7\text{Be}$ solaren Neutrinos, 2007
- ▶ Messung von Antineutrinos aus dem Erdinneren (radioaktiver Zerfall), 2008
- ▶ Präzisionsmessung des ${}^7\text{Be}$ Neutrino-Flusses und pep-Neutrinos, 2011
- ▶ Geschwindigkeitsmessungen von CNGS-Neutrinos von CERN nach Gran Sasso, 2012

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

Quellenverzeichnis

- ▶ Kirsten, T.A. 1999, Solar Neutrino Experiments: results and implications, Reviews of Modern Physics, Vol. 71, No. 4, 1213
- ▶ McDonald, A.B., Klein, J.R., Wark, D.L. 2003, Solving the Solar Neutrino Problem, Scientific American, Vol. 288, No. 4, 40
- ▶ Bellini, G., et al. 2012, First Evidence of pep Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino, Phys. Rev. Letters 108, 051302
- ▶ Antonelli, V., Miramonti, L., Pena-Garay, C., Serenelli, A. 2012, Solar Neutrinos, to be published in Special Issue on Neutrino Physics, Advances in High Energy Physics Hindawi Publishing Corporation 2012, preprint available as arXiv:1208.1356 at de.arxiv.org/abs/1208.1356
- ▶ Markus Bobrowski, Solare Neutrinos (Scriptum)
- ▶ Wikipedia, Artikel: Neutrino
- ▶ Webpräsenz des Super-Kamiokande Detektors <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>
- ▶ Neutral & Charged Current <http://vali.physics.carleton.ca/research/sno/introduction/reactions.html>
- ▶ Neutrinooszillation: http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/jochum/SS06_Neutrinos/SBoelzle_Neutrinooszillationen_Theorie_Vortrag.pdf
- ▶ Borexino: <http://borex.lngs.infn.it/>
- ▶ LENA: <http://neutrino.desy.de/projekte/lena/>