



Neutrinooszillationen für Sonnenneutrinos

Referent: Alexander Bien

Seminar: Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Datum: Freitag, 29. Juni 2007

Betreuerin: Dr. Stephanie Hansmann-Menzemer



Inhalt

- Produktion von Sonnenneutrinos
- Das Homestake-Experiment
- Weitere Sonnenneutrino-Experimente
- Neutrinooszillationen
- Das SNO-Experiment
- Blick in die Zukunft
- Zusammenfassung

Produktion von Sonnenneutrinos

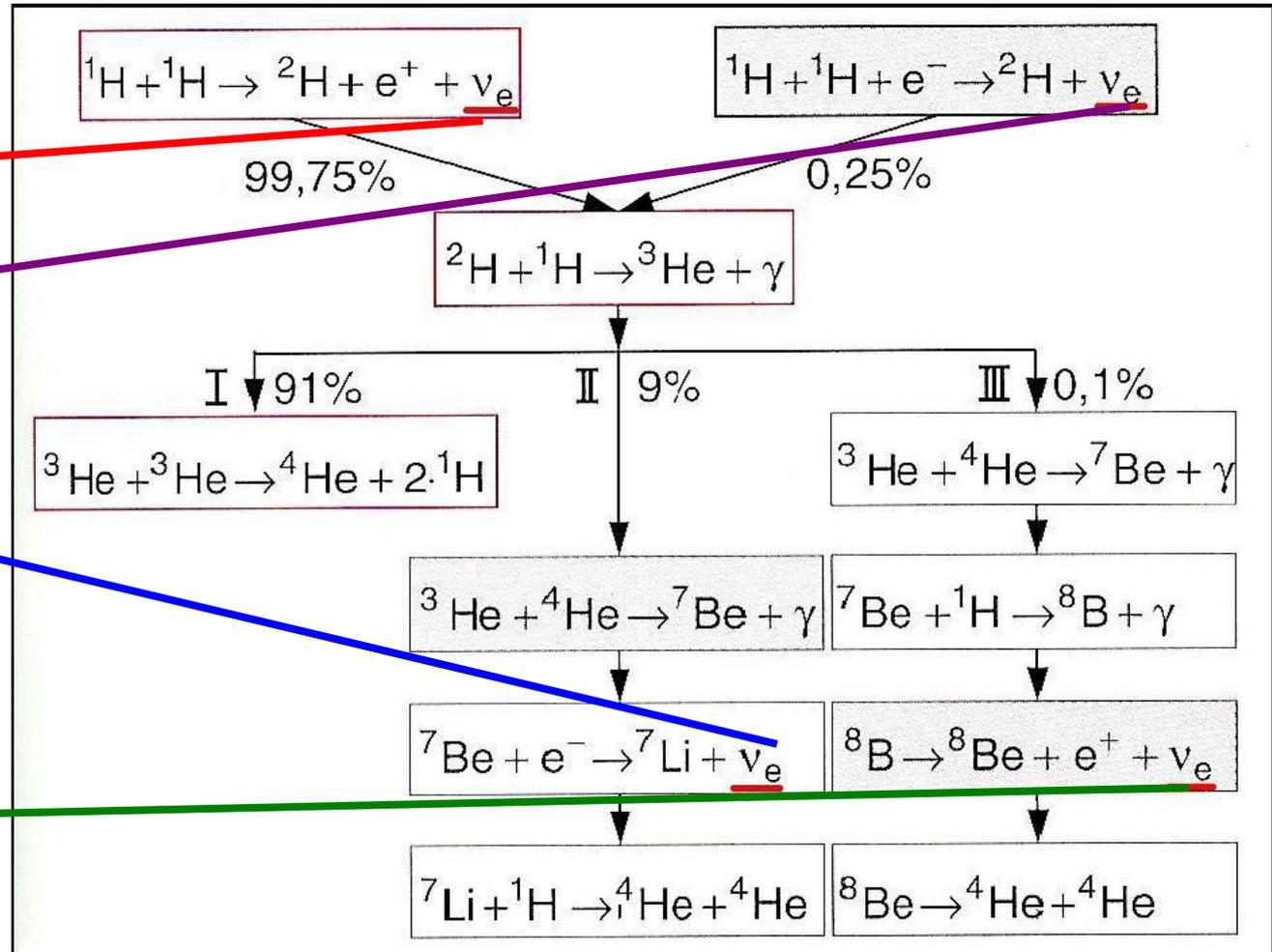
pp-Zyklus:

pp-Neutrinos

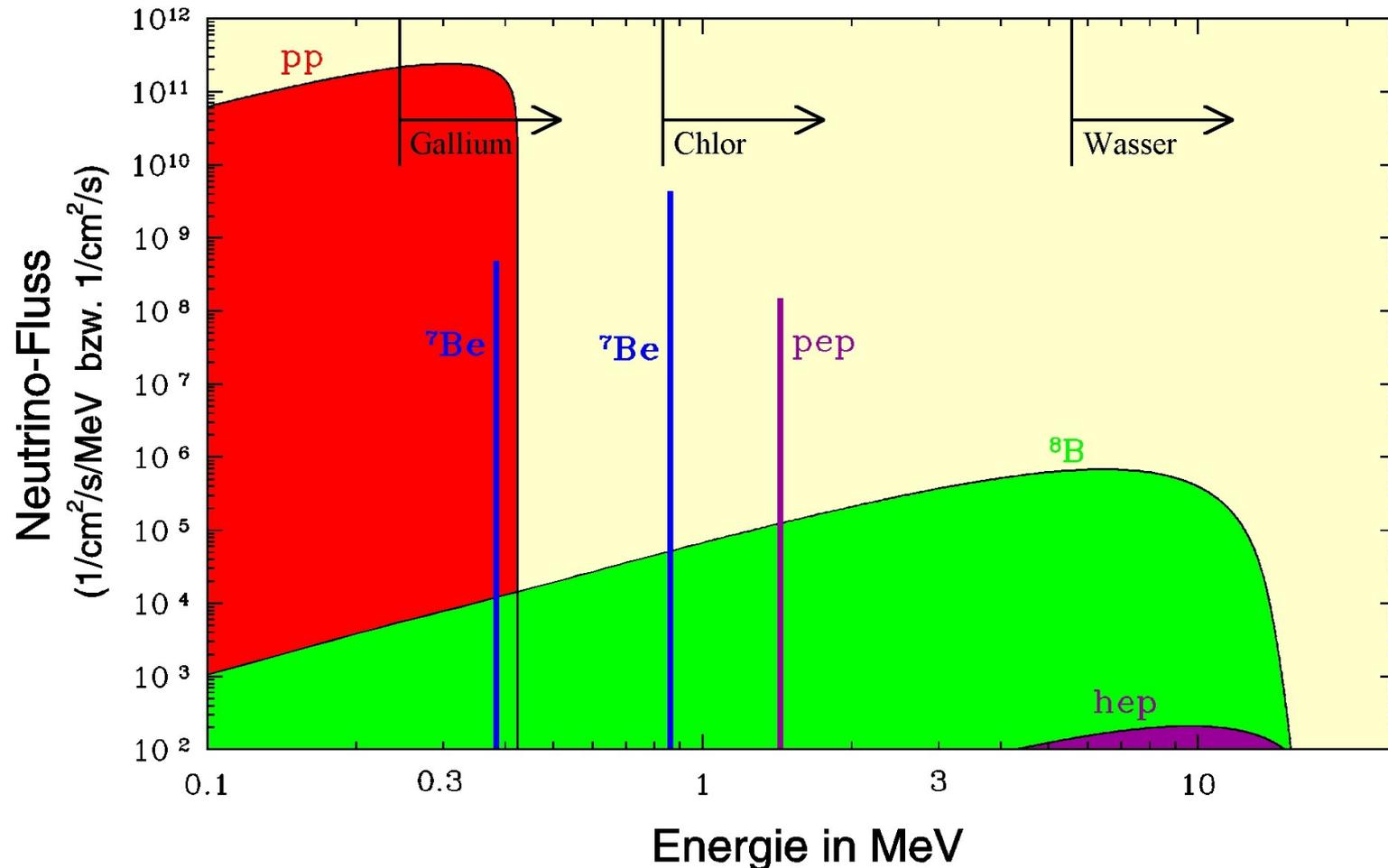
pep-Neutrinos

^7Be -Neutrinos

^8B -Neutrinos

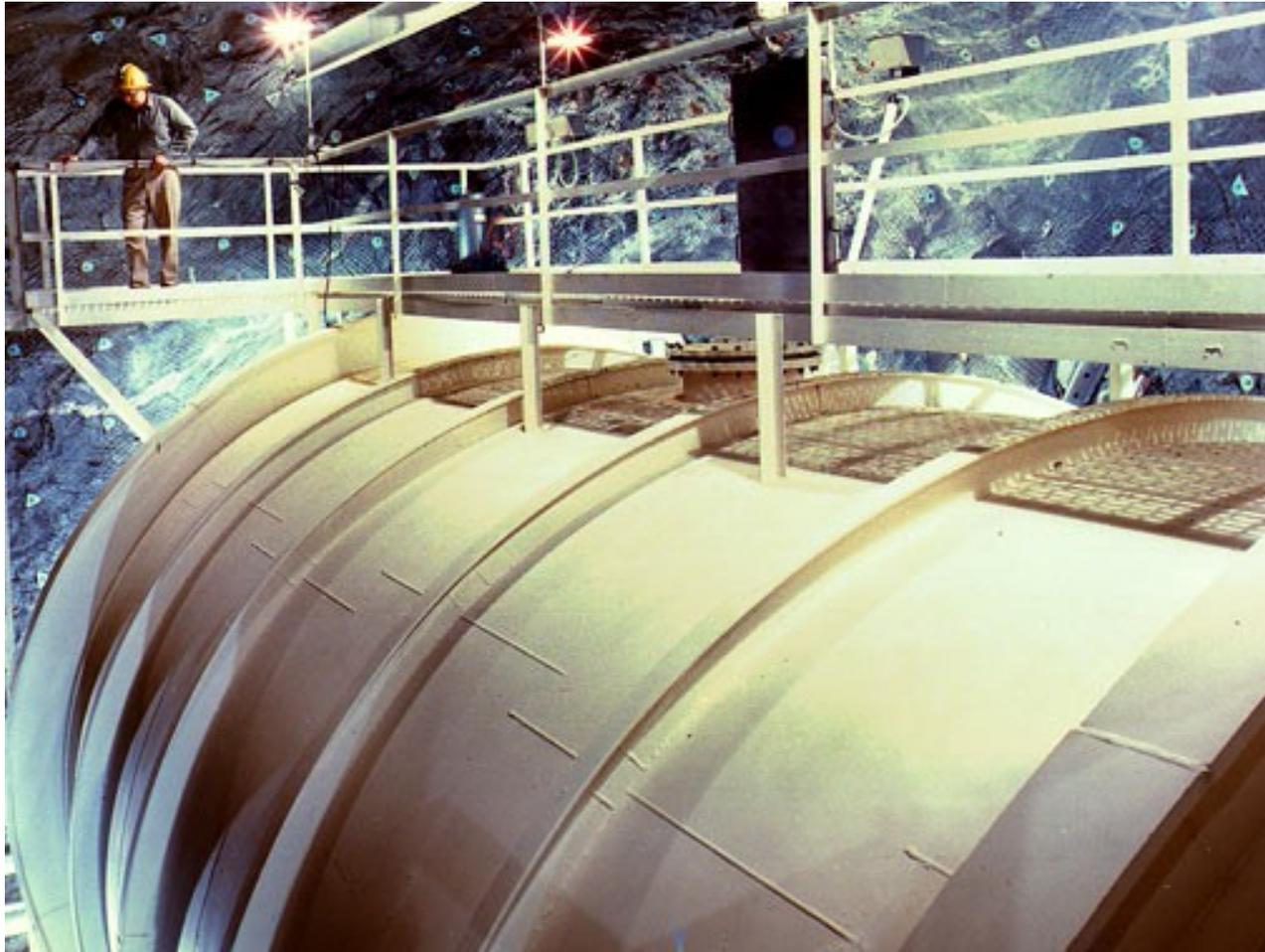


Neutrinospektrum der Sonne:



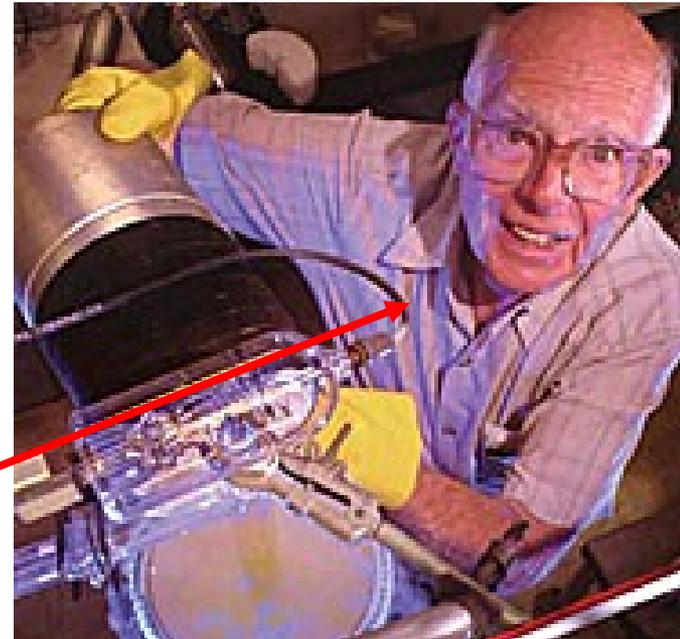
Wichtig: In der Sonne werden nur Elektron-Neutrinos produziert
Und: Spektrum theoretisch berechnet

Das Homestake-Experiment



Einige Daten

- Homestake-Goldmine in South-Dakota, USA
- 1,5 Kilometer unter der Erde (vermindert Untergrund)
- Tank mit 610 Tonnen C_2Cl_4 (Perchlorethylen)
- Inbetriebnahme 1967, ab 1970 ununterbrochener Betrieb
- Ein Messdurchlauf: 60 Tage
- Leiter: Raymond Davis
- Ausbeute sehr gering, insgesamt nur 875 Ereignisse



Raymond Davis

Messprinzip

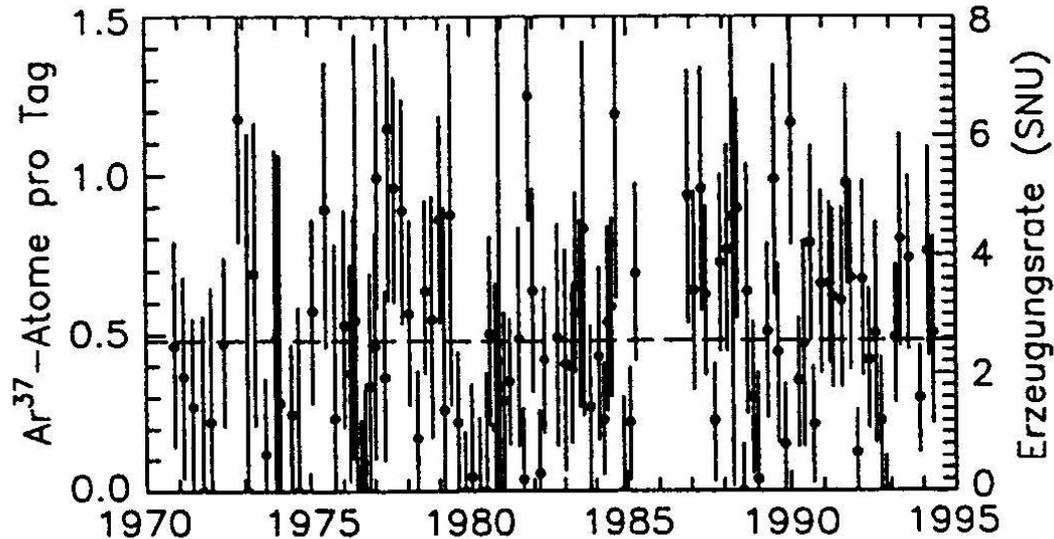
- Nachweis der Neutrinos: radiochemisch
- $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
- → Nur Elektroneneutrinos können nachgewiesen werden
- Energieschwelle für die Reaktion: 814 keV
- → Nur Nachweis von ${}^7\text{Be}$ -, pep- und ${}^8\text{B}$ -Neutrinos
- Alle 60 Tage Herausspülen der Argon-Atome mit Helium
- → keine Echtzeitmessung
- Messung über Zerfall ($\tau = 35$ Tage)
- → Zahl der Neutrinoereaktionen und Neutrino-Fluss
- Ausbeute: etwa 10 Argon-Atome pro Monat, einige davon schon wieder zerfallen

Warum ist die Ausbeute so klein?

Beispielrechnung

- Volumen $4 \cdot 10^5$ Liter, Dichte $1,5 \text{ g cm}^{-3}$
- Totaler Energiefluss der Sonne: $8,8 \cdot 10^{11} \text{ MeV s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
- 10% der Energie in Neutrinos, mittlere Energie: 1 MeV
- Nur 1% kann Reaktion induzieren
- Wirkungsquerschnitt für ^{37}Cl : $10^{-45} \text{ cm}^2 = 10^{-6} \text{ fb}$
- $N_{\text{Ar}} = (\Phi_{\nu} \cdot V \cdot \rho \cdot N_{\text{A}} \cdot \sigma) / M_{\text{mol}}$
- Ergebnis: 60 Atome pro Jahr
- Umgekehrt Berechnung von Φ_{ν} aus N_{Ar}

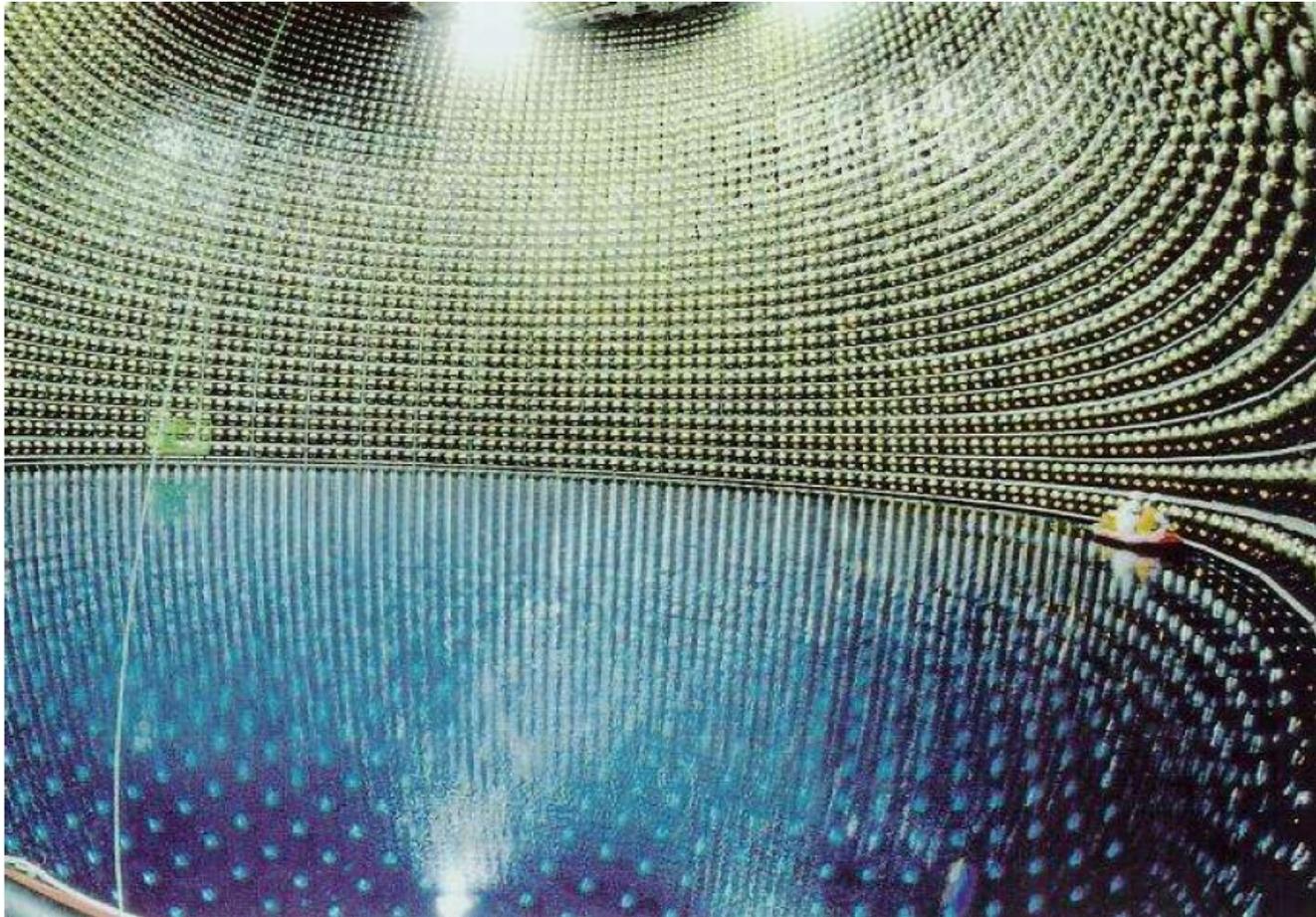
Ergebnis des Homestake-Experiments



- Mittelwert: ca. 2,5 SNU
- 1 SNU = 1 Reaktion / 10^{36} Atome / s
- Aus solarem Standardmodell erwartet: $(7,6 \pm 1,2)$ SNU
- Nur $(30 \pm 7)\%$ vom SSM-Wert

Weitere Sonnennneutrino-Experimente

Kamiokande und Super-Kamiokande



- In der Kamioka-Mine in Japan
- Leiter: Masatoshi Koshiba (Universität Tokio)
- Kamiokande (1986 – 1995): 2140 Tonnen Wasser
- Super-Kamiokande: 50000 Tonnen Wasser
- Nachweis: $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ (elastischer Stoß)
- Nur geringe Sensitivität für ν_μ und ν_τ
- Elektron nach Stoß: fast Lichtgeschwindigkeit
- Aussendung von Cherenkov-Licht, richtungsempfindlich
- Nachweis über Photomultiplier
- Detektionsschwelle: 5 MeV
- Auch hier: Neutrinodefizit (50% des erwarteten Signals)

Nobel-Preis:



Raymond Davis Jr.

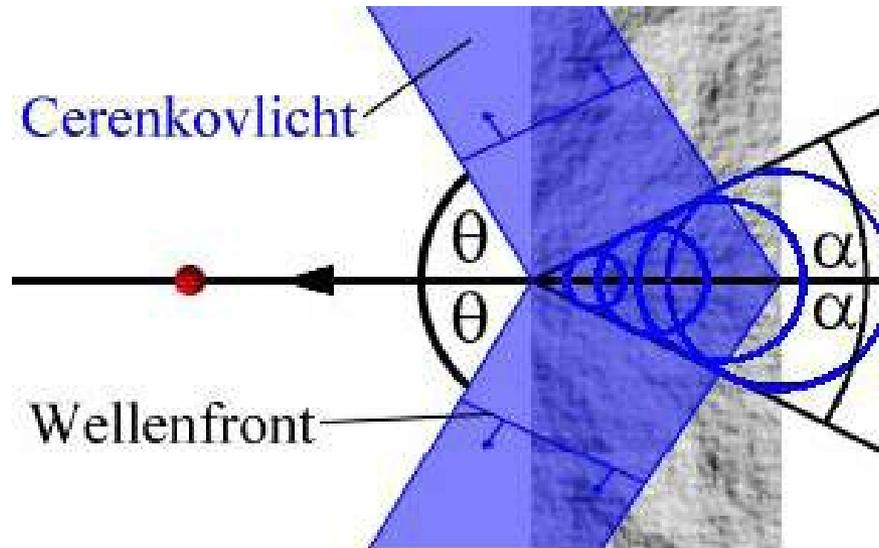


Masatoshi Koshiba

Nobel Prize in Physics 2002

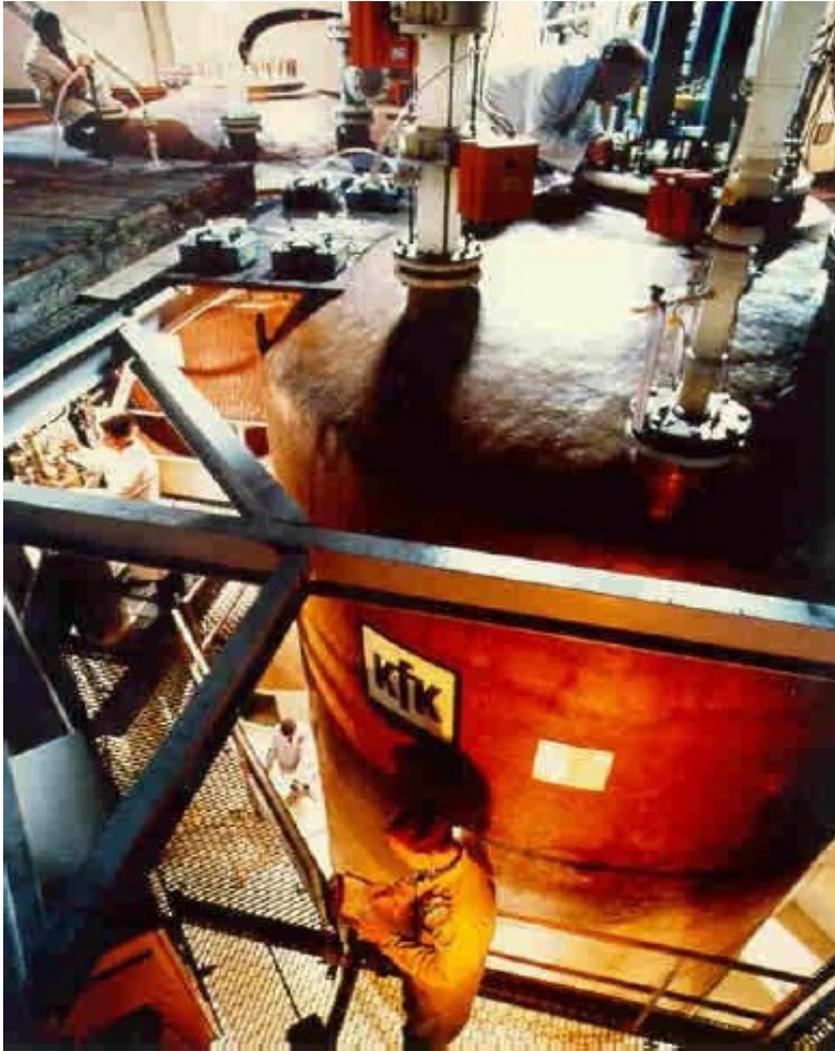
“for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos“

Einschub: Cherenkov-Effekt



- Geladenes Teilchen strahlt Lichtkegel ab
- $v_{\text{Teilchen}} > c_{\text{Medium}}$
- Öffnungswinkel des „Mach“kegels: $\sin \alpha = 1/(n \cdot \beta)$
- Damit: $\theta = 90^\circ - \alpha$
- Intensität der Beleuchtungsringe \rightarrow Energie
- Rückschluss auf Richtung

GALLEX / GNO



- $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
- 30 Tonnen GaCl_3 - HCl – Lsg.
- pp-Neutrinos
- Spülen mit $2000 \text{ m}^3 \text{ N}_2$
- Nachweis: Messen des Zerfalls von ${}^{71}\text{Ge}$
- Nur 53% des erwarteten Neutrinoflusses
- Aber: Nachweis von pp-Neutrinos
- Bestätigung von Fusionsprozessen

Resultate der Experimente

- Gemessener Neutrinofluss deutlich zu wenig gegenüber dem solaren Standardmodell
- Messwerte der drei Experimente in sich inkonsistent, ^8B - ν weniger unterdrückt als ^7Be - ν

Zwei Hauptmöglichkeiten:

- Solares Standardmodell ist falsch oder zumindest teilweise fehlerhaft
- Neutrinooszillationen, d.h. Umwandlungen von einem Neutrino flavour in das andere

Neutrinooszillationen

- Standardmodell: $m_\nu = 0$, neutral, stabil
- Erweiterung: Dirac- ν mit $m_\nu \neq 0$
- Und: Leptonzahl nicht zu 100% erhalten
- Dann: Neutrinooszillationen

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Flavour-Eigenzustände
definierter Leptonzahl

Masseneigenzustände
definierter Masse

Mischungswinkel

- Flavoureigenzustände als Superpositionen

$$\nu_e = \nu_1 \cdot \cos \alpha + \nu_2 \cdot \sin \alpha$$

- z. B. aus $pp \rightarrow d e^+ \nu_e$
- Zeitenwicklung durch Massenzustände gegeben

$$\begin{aligned} \nu_1(t) &= \nu_1(0) \cdot e^{-iE_1 t} & E_1 &= \sqrt{p^2 + m_1^2} \approx p + \frac{m_1^2}{2p} \\ \nu_2(t) &= \nu_2(0) \cdot e^{-iE_2 t} & E_2 &= \sqrt{p^2 + m_2^2} \approx p + \frac{m_2^2}{2p} \end{aligned}$$

- Start bei $t = 0$ mit ν_e , dann Zeitentwicklung

$$\nu_e(t) = \nu_e(0) \cdot [\cos^2 \alpha \cdot e^{-iE_1 t} + \sin^2 \alpha \cdot e^{-iE_2 t}]$$

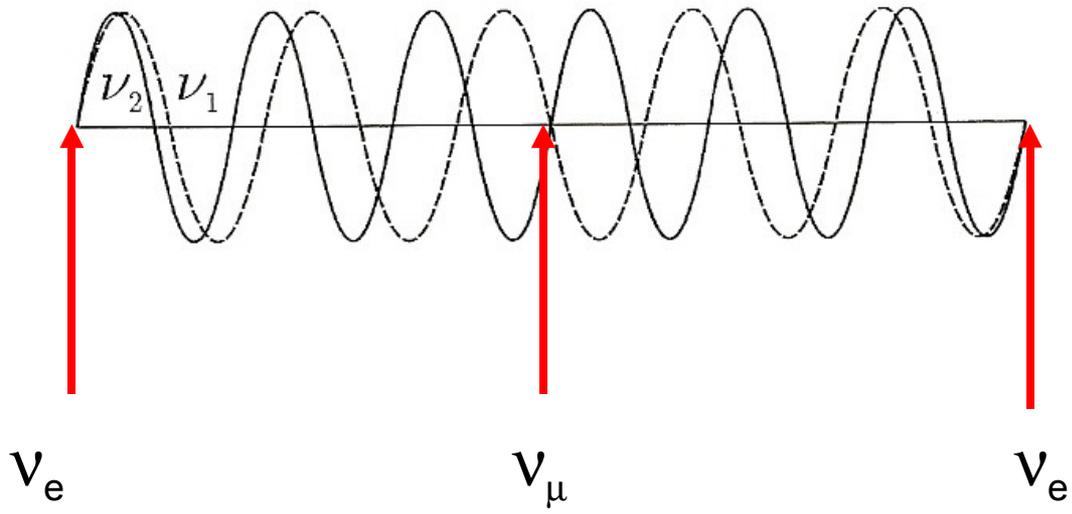
■ Damit ergibt sich dann

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2\alpha) \cdot \sin^2\left(\frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{2}\right)$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$$

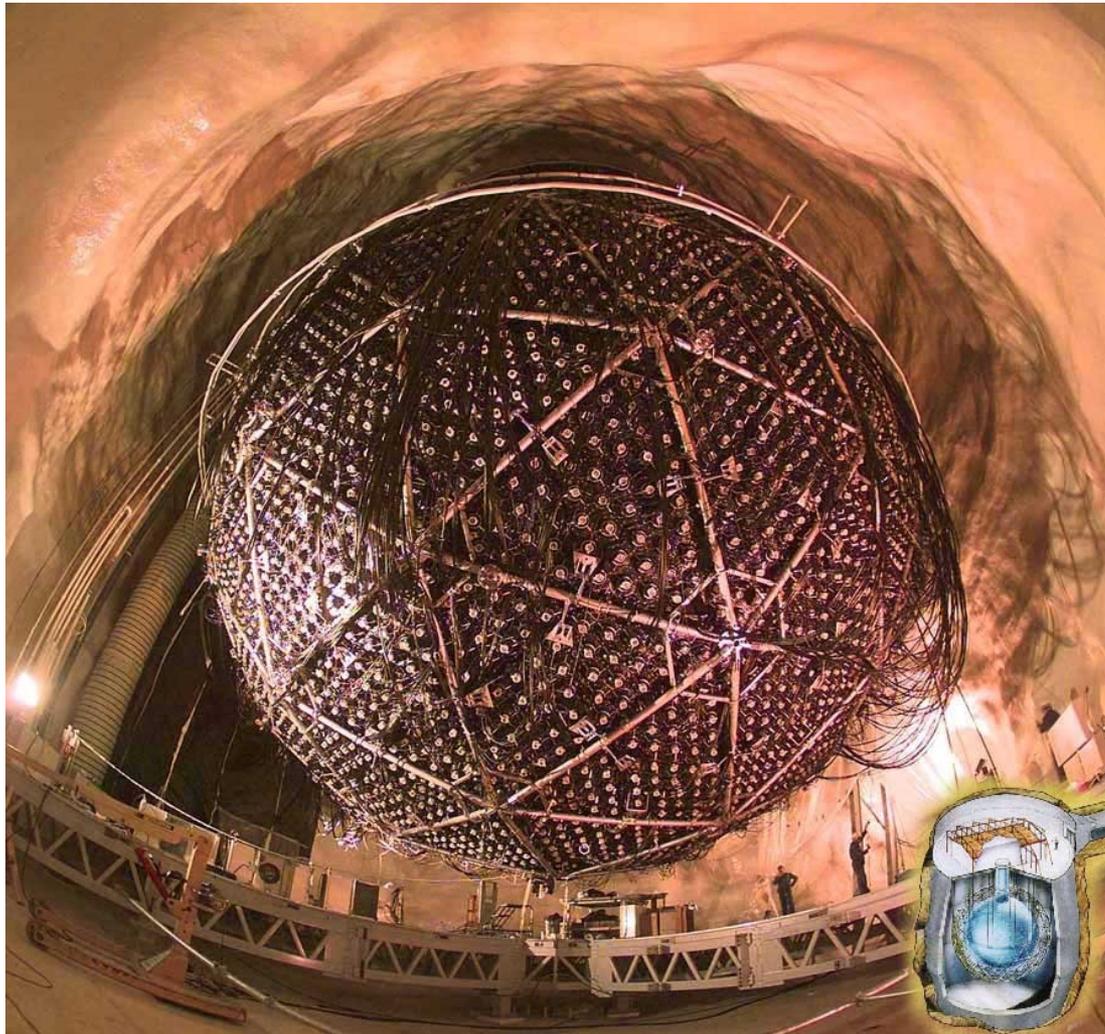
Massendifferenz

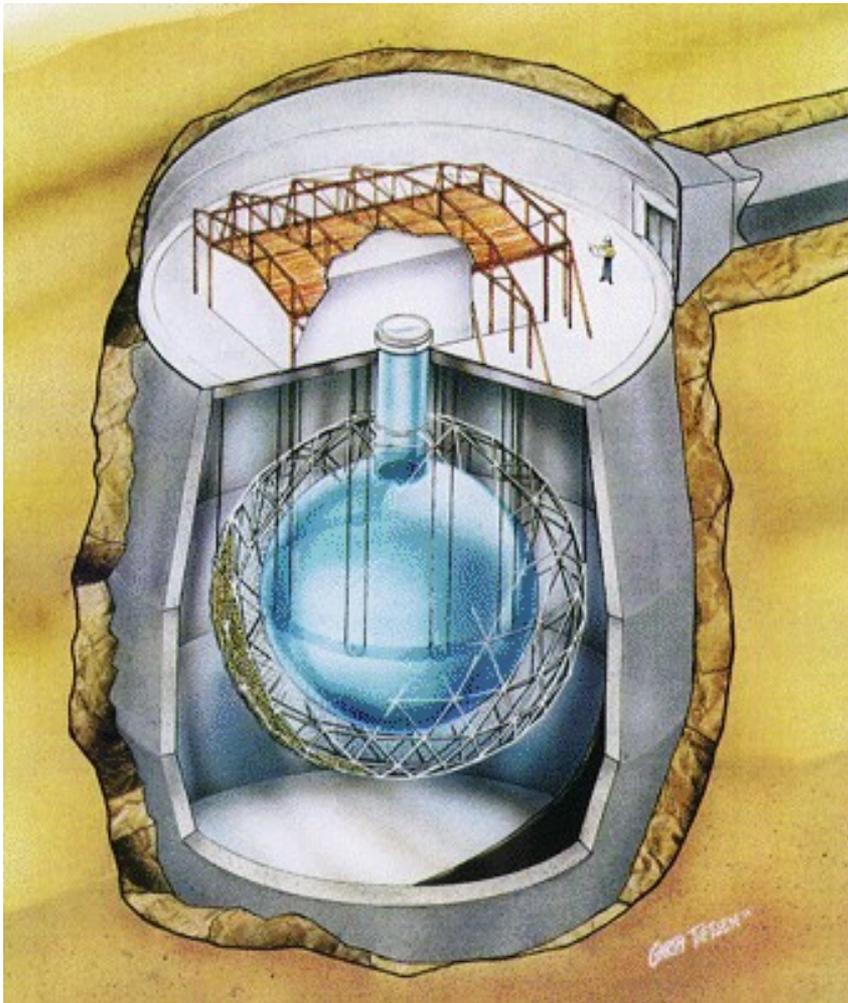
■ 2. Wahrscheinlichkeit 0, falls $\alpha=0$ oder $E_1=E_2$ (gleiche Massen)



$\alpha = 45^\circ$

Das SNO-Experiment

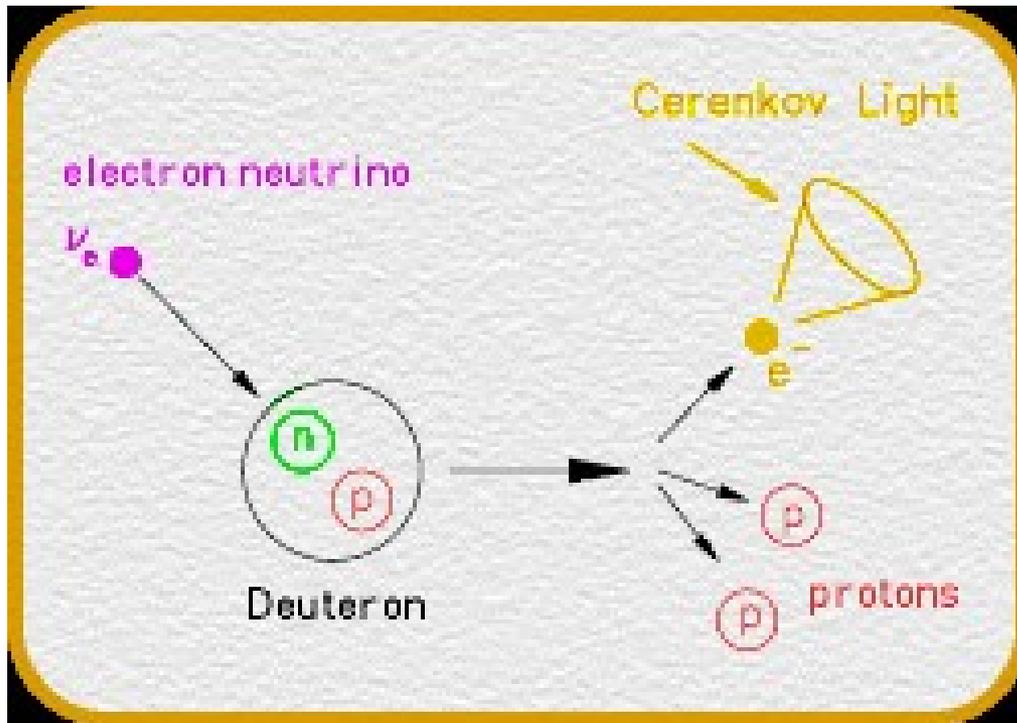




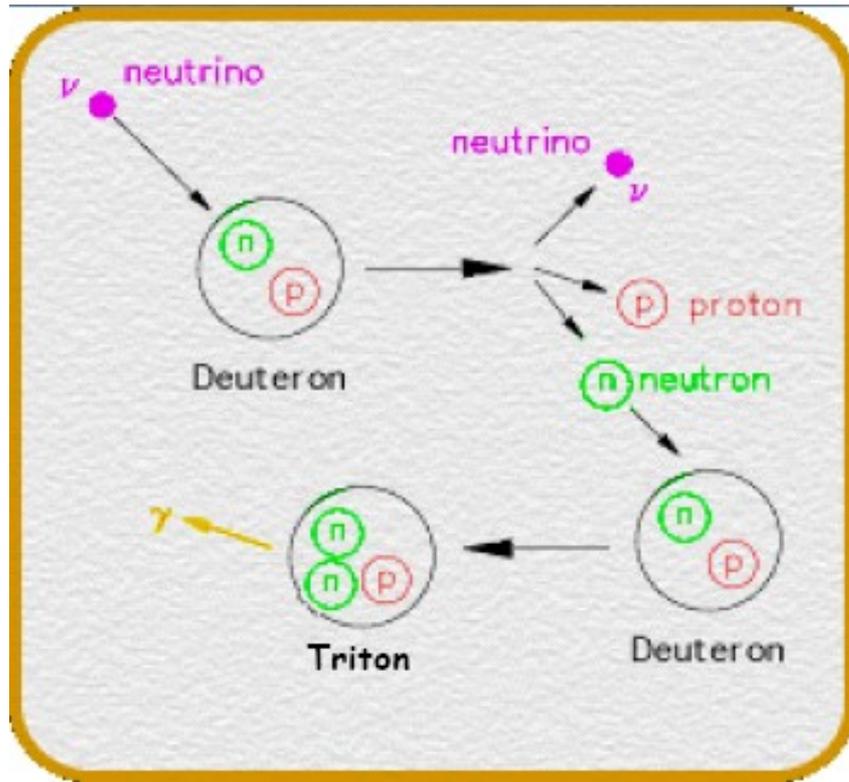
- Sudbury Neutrino Observatory
- Creighton Nickel-Mine, Sudbury, Kanada
- 6,1 km in der Tiefe
- 1000 Tonnen schweres Wasser
- Abschirmung durch 7000 Tonnen leichtes Wasser
- Cherenkov-Detektor
- Schwellenenergie: 5 MeV (v.a. wegen Untergrund)
- → ${}^8\text{B}$ -Neutrinos

Q.R. Ahmad,¹⁷ R.C. Allen,⁴ T.C. Andersen,⁶ J.D. Anglin,¹⁰ J.C. Barton,^{11,*} E.W. Beier,¹² M. Bercovitch,¹⁰
 J. Bigu,⁷ S.D. Biller,¹¹ R.A. Black,¹¹ I. Blevis,⁵ R.J. Boardman,¹¹ J. Boger,³ E. Bonvin,¹⁴ M.G. Boulay,^{9,14}
 M.G. Bowler,¹¹ T.J. Bowles,⁹ S.J. Brice,^{9,11} M.C. Browne,^{17,9} T.V. Bullard,¹⁷ G. Bühler,⁴ J. Cameron,¹¹
 Y.D. Chan,⁸ H.H. Chen,^{4,†} M. Chen,¹⁴ X. Chen,^{8,11} B.T. Cleveland,¹¹ E.T.H. Clifford,¹⁴ J.H.M. Cowan,⁷
 D.F. Cowen,¹² G.A. Cox,¹⁷ X. Dai,¹¹ F. Dalnoki-Veress,⁵ W.F. Davidson,¹⁰ P.J. Doe,^{17,9,4} G. Doucas,¹¹
 M.R. Dragowsky,^{9,8} C.A. Duba,¹⁷ F.A. Duncan,¹⁴ M. Dunford,¹² J.A. Dunmore,¹¹ E.D. Earle,^{14,1} S.R. Elliott,^{17,9}
 H.C. Evans,¹⁴ G.T. Ewan,¹⁴ J. Farine,^{7,5} H. Fergani,¹¹ A.P. Ferraris,¹¹ R.J. Ford,¹⁴ J.A. Formaggio,¹⁷
 M.M. Fowler,⁹ K. Frame,¹¹ E.D. Frank,¹² W. Frati,¹² N. Gagnon,^{11,9,8,17} J.V. Germani,¹⁷ S. Gil,² K. Graham,¹⁴
 D.R. Grant,⁵ R.L. Hahn,³ A.L. Hallin,¹⁴ E.D. Hallman,⁷ A.S. Hamer,^{9,14} A.A. Hamian,¹⁷ W.B. Handler,¹⁴
 R.U. Haq,⁷ C.K. Hargrove,⁵ P.J. Harvey,¹⁴ R. Hazama,¹⁷ K.M. Heeger,¹⁷ W.J. Heintzelman,¹² J. Heise,^{2,9}
 R.L. Helmer,^{16,2} J.D. Hepburn,¹⁴ H. Heron,¹¹ J. Hewett,⁷ A. Hime,⁹ J.G. Hykawy,⁷ M.C.P. Isaac,⁸
 P. Jagam,⁶ N.A. Jelley,¹¹ C. Jillings,¹⁴ G. Jonkmans,^{7,1} K. Kazkaz,¹⁷ P.T. Keener,¹² J.R. Klein,¹²
 A.B. Knox,¹¹ R.J. Komar,² R. Kouzes,¹³ T. Kutter,² C.C.M. Kyba,¹² J. Law,⁶ I.T. Lawson,⁶ M. Lay,¹¹
 H.W. Lee,¹⁴ K.T. Lesko,⁸ J.R. Leslie,¹⁴ I. Levine,⁵ W. Locke,¹¹ S. Luoma,⁷ J. Lyon,¹¹ S. Majerus,¹¹ H.B. Mak,¹⁴
 J. Maneira,¹⁴ J. Manor,¹⁷ A.D. Marino,⁸ N. McCauley,^{12,11} D.S. McDonald,¹² A.B. McDonald,^{14,13} K. McFarlane,⁵
 G. McGregor,¹¹ R. Meijer Drees,¹⁷ C. Miffin,⁵ G.G. Miller,⁹ G. Milton,¹ B.A. Moffat,¹⁴ M. Moorhead,¹¹
 C.W. Nally,² M.S. Neubauer,¹² F.M. Newcomer,¹² H.S. Ng,² A.J. Noble,^{16,5} E.B. Norman,⁸ V.M. Novikov,⁵
 M. O'Neill,⁵ C.E. Okada,⁸ R.W. Ollerhead,⁶ M. Omori,¹¹ J.L. Orrell,¹⁷ S.M. Oser,¹² A.W.P. Poon,^{8,17,2,9}
 T.J. Radcliffe,¹⁴ A. Roberge,⁷ B.C. Robertson,¹⁴ R.G.H. Robertson,^{17,9} S.S.E. Rosendahl,⁸ J.K. Rowley,³
 V.L. Rusu,¹² E. Saettler,⁷ K.K. Schaffer,¹⁷ M.H. Schwendener,⁷ A. Schülke,⁸ H. Seifert,^{7,17,9} M. Shatkay,⁵
 J.J. Simpson,⁶ C.J. Sims,¹¹ D. Sinclair,⁵ P. Skensved,¹⁴ A.R. Smith,⁸ M.W.E. Smith,¹⁷ T. Spreitzer,¹²
 N. Starinsky,⁵ T.D. Steiger,¹⁷ R.G. Stokstad,⁸ L.C. Stonehill,¹⁷ R.S. Storey,^{10,†} B. Sur,^{1,14} R. Tafirout,⁷
 N. Tagg,^{6,11} N.W. Tanner,¹¹ R.K. Taplin,¹¹ M. Thorman,¹¹ P.M. Thornewell,¹¹ P.T. Trent,¹¹ Y.I. Tserkovnyak,²
 R. Van Berg,¹² R.G. Van de Water,^{9,12} C.J. Virtue,⁷ C.E. Waltham,² J.-X. Wang,⁶ D.L. Wark,^{15,11,9}
 N. West,¹¹ J.B. Wilhelmy,⁹ J.F. Wilkerson,^{17,9} J.R. Wilson,¹¹ P. Wittich,¹² J.M. Wouters,⁹ and M. Yeh³

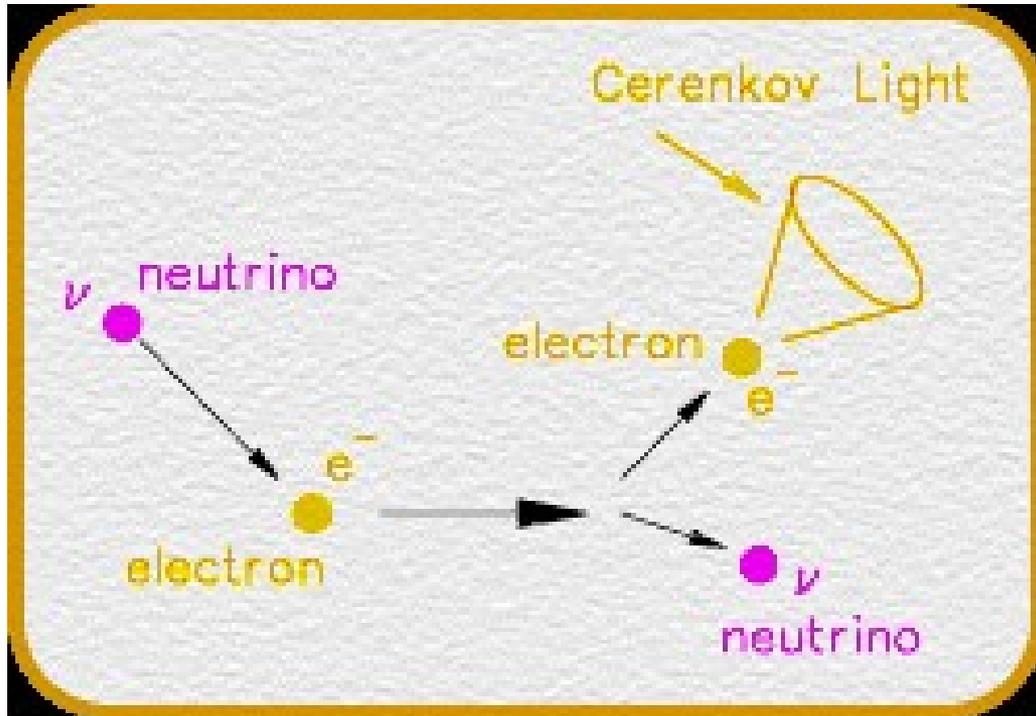
Nachweisreaktionen und Detektion



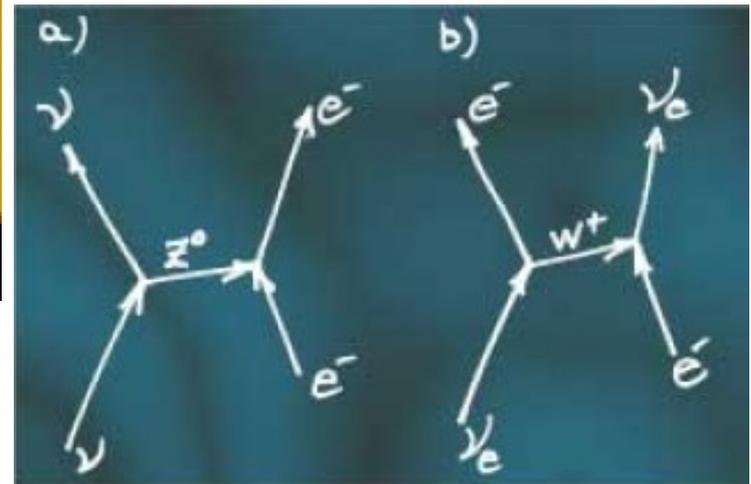
- Charged-Current-Reaktion (CC)
- $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
- Nachweis: nur ν_e
- 30 Events/Tag erwartet



- Neutral-Current-Reaktion (NC)
- $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$
- Sensitiv für alle 3 Flavours
- Neutron-Einfang: γ -Strahlung
- Streuung an Elektronen
- e^- beschleunigt
- Cherenkov-Licht
- 30 Events/Tag erwartet



- Elastic-Scattering-Reaktion (ES)
- $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
- genügend Intensität: $E_e > 5 \text{ MeV}$
- WQ für ν_μ, ν_τ um Faktor 7 kleiner als für ν_e

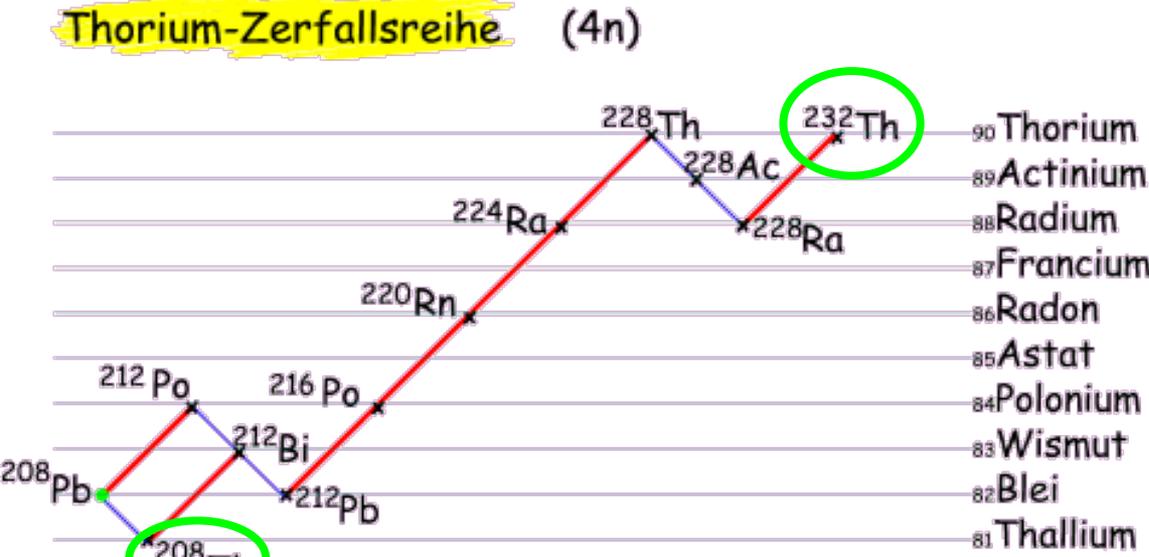
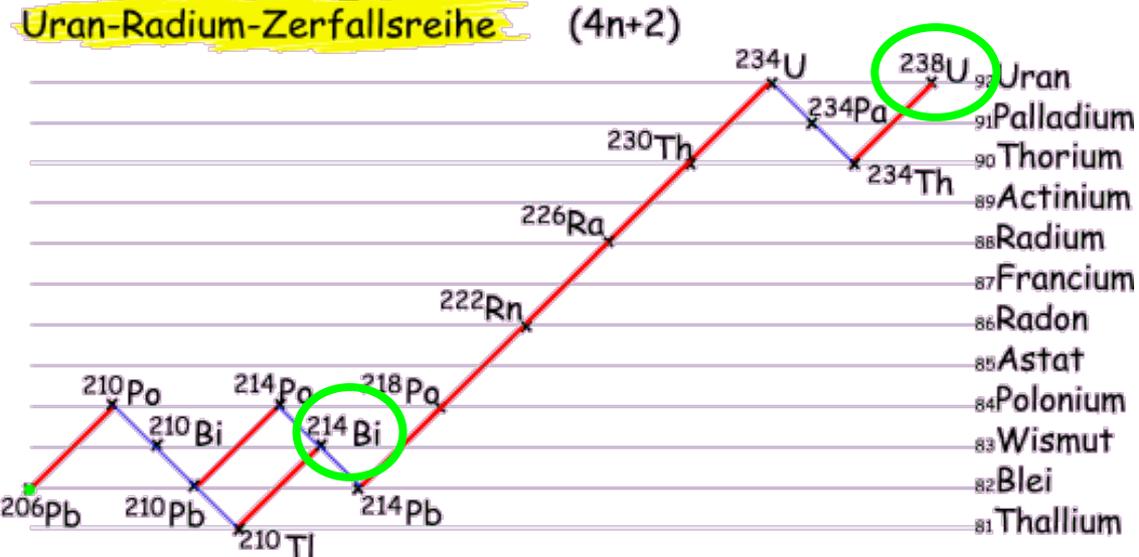


- 3 Events/Tag erwartet

- D_2O in sphärischer Acryll-Hülle
 - 12 Meter Durchmesser
 - Detektion: 9456 Photomultiplier-Röhren
- Reduzierung des Untergrundes:
- Stahlkugel mit 17,8 Meter Durchmesser
 - Darin: ultra-reines leichtes Wasser
 - Nur Vertices innerhalb 5,5-Meter-Kugel beachtet



Untergrund



- Viele verschiedene Quellen für Untergrund

^{214}Bi und ^{208}Tl aus Zerfallsketten von U und Th:

- γ 's erzeugen freie Neutronen durch Spaltung des d \rightarrow Cherenkov - Licht wie bei NC-Reaktion
- Niederenergetische Cherenkov-Events aus β -Zerfällen

- Zwei unabhängige Messungen:
- Relative U-/Th-Konzentrationen: 10^{-14} bis 10^{-13}

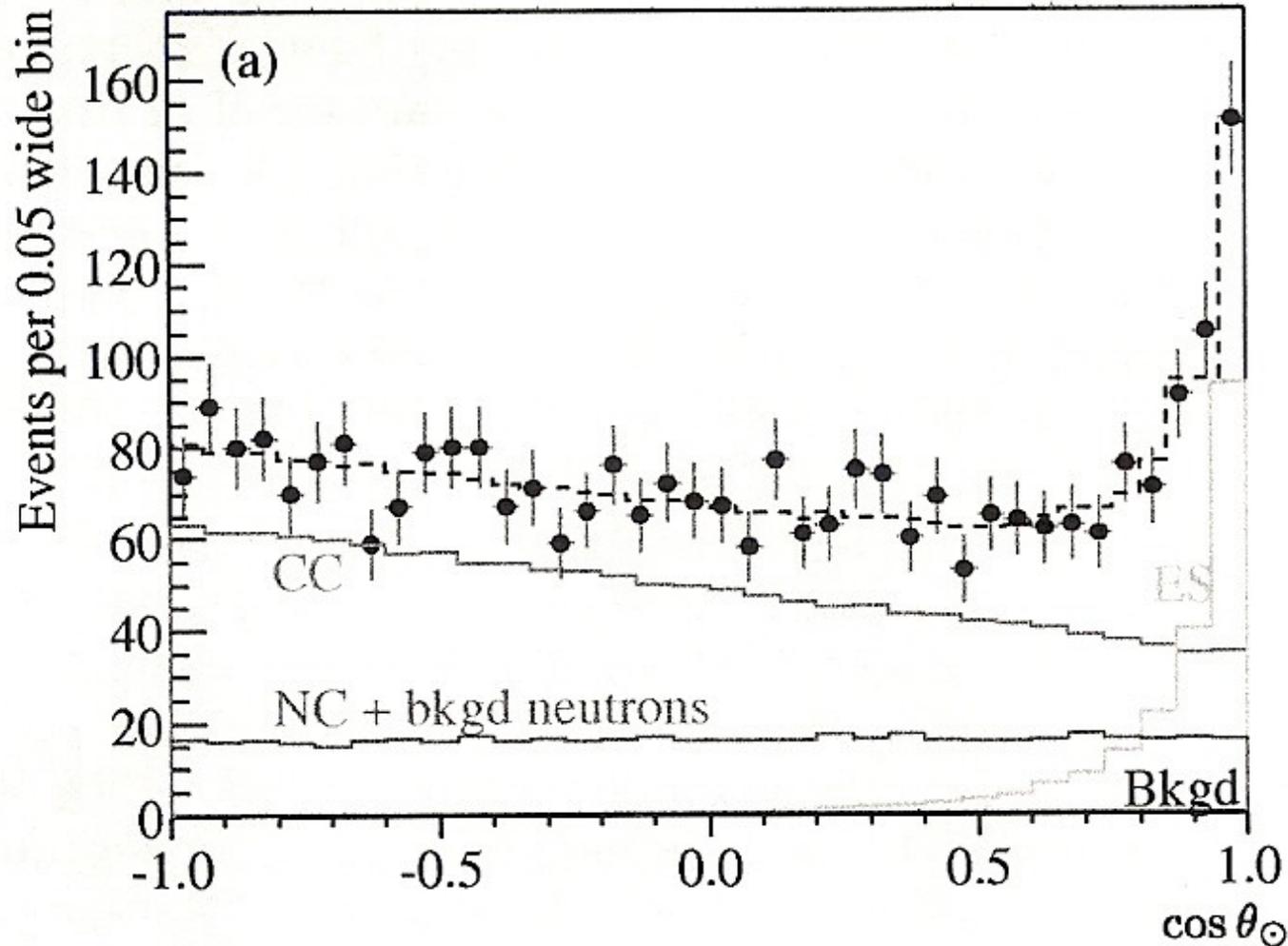
- Rate der Untergrund-n-Produktion: ca. 1 Neutron/Tag
- Gesamter Neutron-Untergrund: 12 %

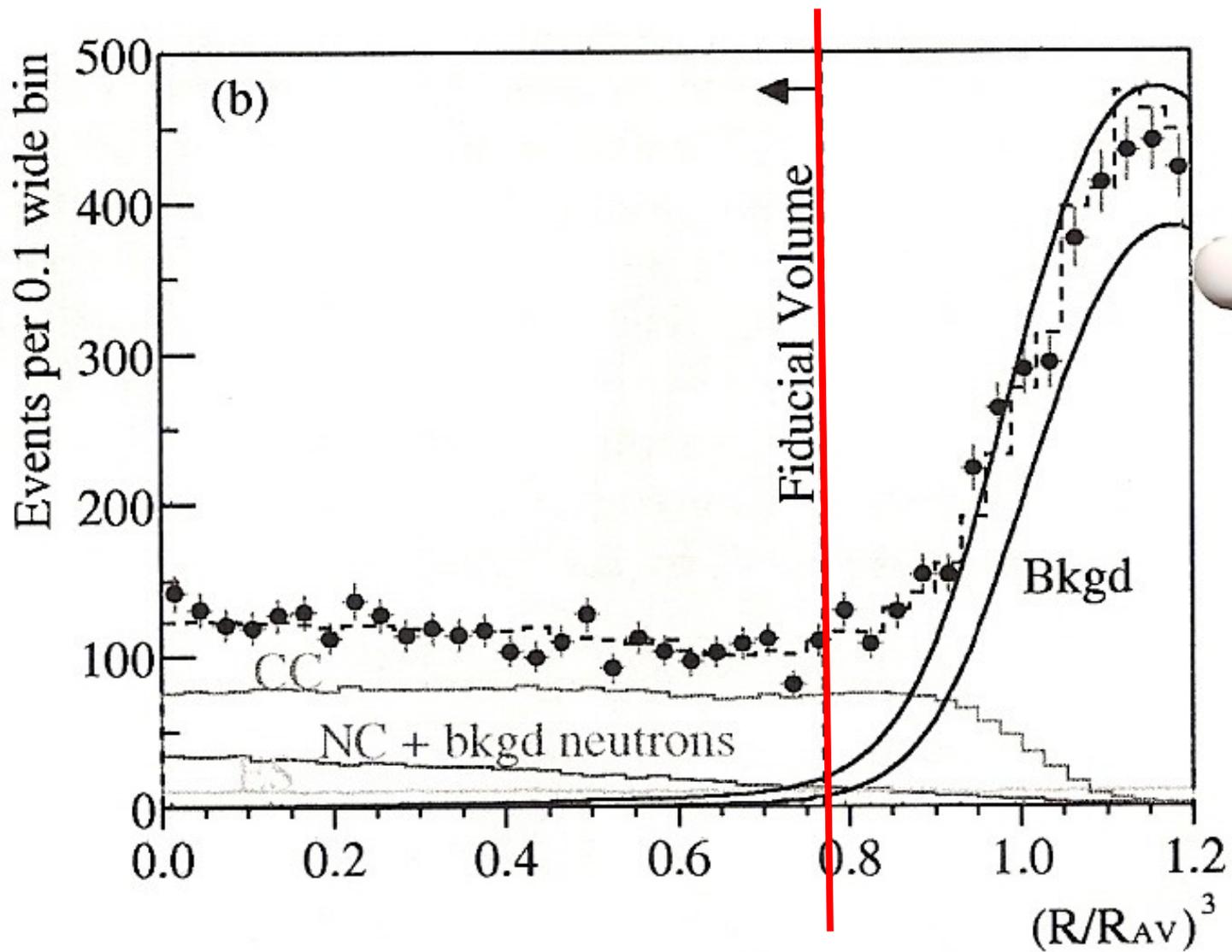
Weitere Untergrundquellen (gering)

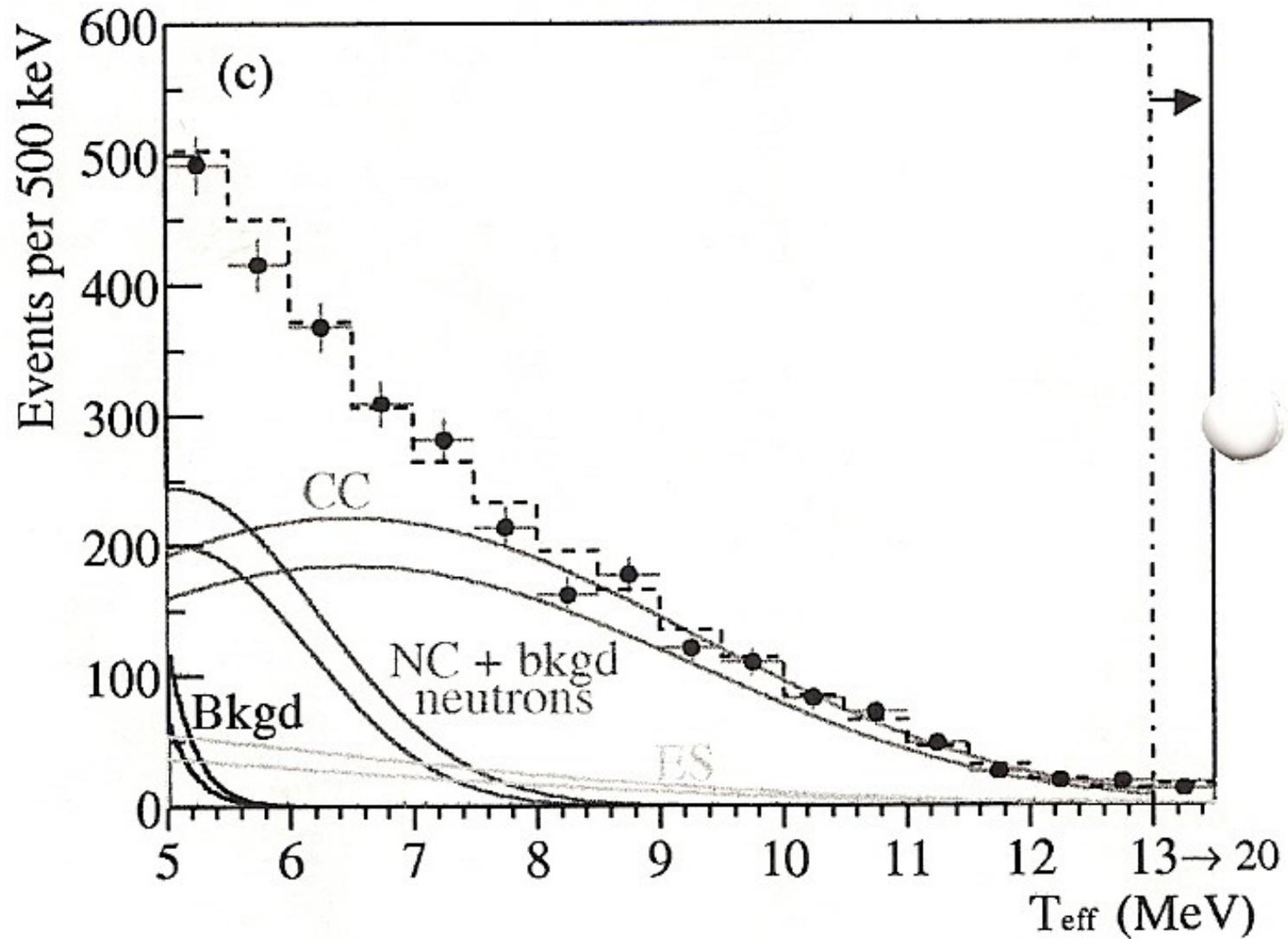
- Atmosphärische Neutrinos
- Neutrinos aus kosmischer Strahlung
- Neutrinos aus Kernreaktoren

Analyse der Daten und Ergebnisse

Trennung der drei Reaktionen durch drei Verteilungen:







Aus

- gemessenen Daten,
- Monte-Carlo-Vorhersagen für CC, NC, ES und
- Standard-Neutrino-Spektrum (Verteilung c)

Ergebnisse für den Neutrinofluss.

Trennung von CC und NC erfolgt vorwiegend über Verteilung c)

Separation von ES über Verteilung a)

Alle Werte in Einheiten von $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$\phi_{\text{CC}}^{\text{SNO}} = 1.76_{-0.05}^{+0.06} (\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09} (\text{syst.})$$

$$\phi_{\text{ES}}^{\text{SNO}} = 2.39_{-0.23}^{+0.24} (\text{stat.})_{-0.12}^{+0.12} (\text{syst.})$$

$$\phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} = 5.09_{-0.43}^{+0.44} (\text{stat.})_{-0.43}^{+0.46} (\text{syst.})$$

$$\phi_e = 1.76_{-0.05}^{+0.05} (\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09} (\text{syst.})$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41_{-0.45}^{+0.45} (\text{stat.})_{-0.45}^{+0.48} (\text{syst.})$$

5,5 σ über 0

- Nun: Ausklammern von Verteilung c)
- → Unabhängig von Spektrum aus SSM
- Aber: Schlechtere Trennung von CC- und NC-Events

$$\phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} = 6.42_{-1.57}^{+1.57} (\text{stat.})_{-0.58}^{+0.55} (\text{syst.})$$

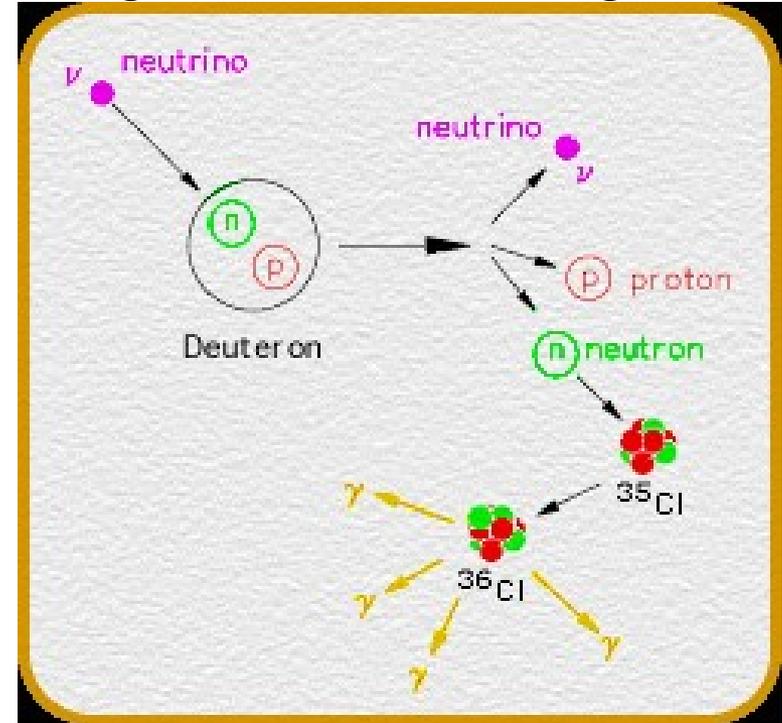
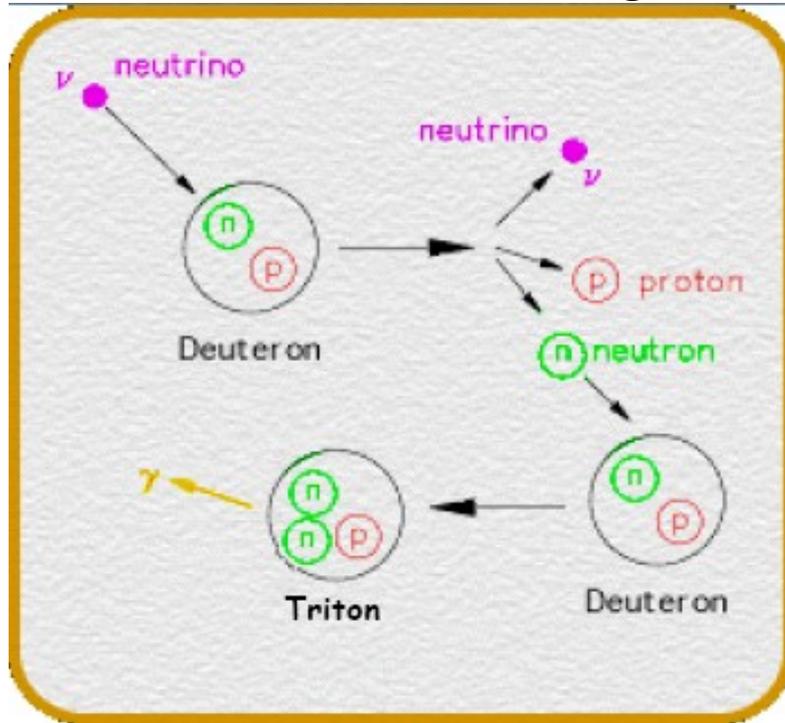
- SSM-Vorhersage für ${}^8\text{B}$ -Neutrinos: 5,05

Ergebnis:

- **${}^8\text{B}$ -Neutrinos unterliegen Flavour-Oszillationen**
- **Gesamtneutrinofluss aus NC-Reaktion stimmt in den Fehlergrenzen mit dem SSM-Wert für ${}^8\text{B}$ überein**

Weiterentwicklung des Experiments

- Zusatz: 2 Tonnen NaCl pro 1000 Tonnen D₂O
- Höhere Effizienz beim Neutroneinfang (von Cl)
30% → 80%
- Höhere Sensitivität, genauere Untergrundbestimmung



- Größere Isotropie der Cherenkov-Strahlung bei dieser NC-Reaktion im Vergleich zur ersten und auch zu CC und ES
- Gute statistische Trennung der Reaktionen
- Trennung unabhängig von Annahmen bzgl. des Energiespektrums und des SSM
- → statt Verteilung c) (Energieverteilung) benutze Isotropie
- Unabhängiges Energiespektrum für die Reaktionen
- Erwartung: Genauerer Wert für NC-Reaktion

Ergebnisse (in $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

$$\begin{aligned}\phi_{\text{CC}}^{\text{SNO}} &= 1.59_{-0.07}^{+0.08}(\text{stat})_{-0.08}^{+0.06}(\text{syst}) \\ \phi_{\text{ES}}^{\text{SNO}} &= 2.21_{-0.26}^{+0.31}(\text{stat}) \pm 0.10(\text{syst}) \\ \phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} &= 5.21 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 0.38(\text{syst})\end{aligned}$$

$$\frac{\phi_{\text{CC}}^{\text{SNO}}}{\phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}}} = 0.306 \pm 0.026(\text{stat}) \pm 0.024(\text{syst})$$

Wobei hier: $T_{\text{eff}} > 5,5 \text{ MeV}$

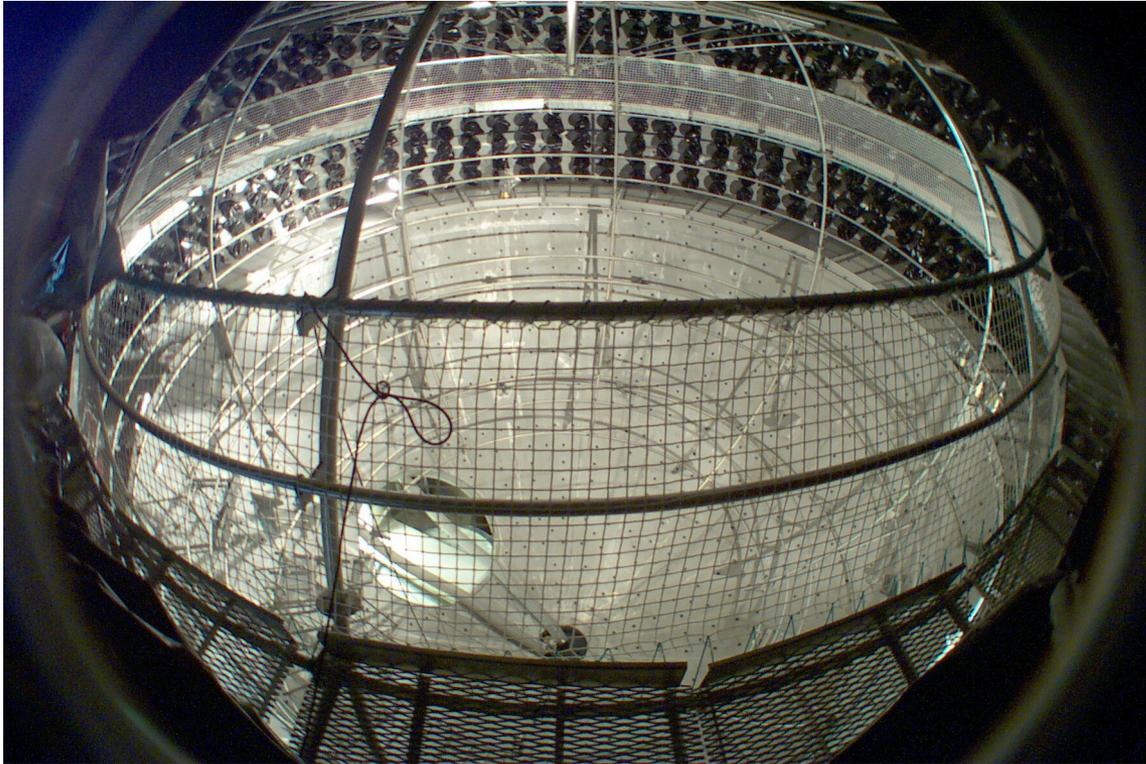
wesentlich geringer Fehler

Werte für Mischungsparameter in 2-Flavour-Modell:

$$\alpha = (32,5 \pm 2,4)^\circ$$

$$\Delta m^2 = (7,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

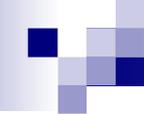
Blick in die Zukunft: BOREXINO



- Messbeginn:
16. Mai 2007
- 300 t flüssiges
Szintillatormaterial
- Nachweis: ES
- Messung des
niederenergetischen
Neutrinospektrums
- Überprüfung des
SSM und der
Oszillationsmodelle
- Echtzeitmessungen

Zusammenfassung

- Großteil der Sonnenneutrinos aus pp-Zyklus
- Pionierexperiment: Homestake
- Homestake, Superkamiokande, Gallex: Neutrinofluss zu klein gegenüber SSM
- SNO: Voller Nachweis auch für ν_μ und ν_τ
- Erste Evidenz für Oszillationen bei Sonnenneutrinos
- Borexino: Überprüfung des SSM für niedrige Energien
- Heute: Nachweis der Oszillationen bei atmosphärischen, Reaktor- und Beschleuniger-Neutrinos



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Fragen ???

Literaturverzeichnis

- <http://www.pi1.physik.uni-erlangen.de/~katz/ws06/atp/talks/tr/TR.pdf>
- http://iktp.tu-dresden.de/Home/Seminare/HS2005_6/posselt.pdf
- http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/index.html
- http://www.mps.mpg.de/images/aktuelles/events/event_20061109/ihy_logo_xl.jpg
- http://www.mps.mpg.de/events/2007ihy/dokumente/vortraege/vortrag_hampel.pdf
- <http://www-ap.gsi.de/bosch/Schluesselexperimente%2011-13.pdf>
- <http://www.mpi-hd.mpg.de/nuastro/Educ/Hardy/bilder/spektrum.jpg>
- <http://www.pbs.org/wgbh/nova/neutrino/images/dete-homestake.jpg>
- <http://www.sas.upenn.edu/home/assets/img/news/davis2.jpg>
- <http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos/neutimg/nexp/homestake.gif>
- <http://smithers.physnet2.uni-hamburg.de/archive/THESIS/J.Schuessler/sonne3.pdf.gz>
- <http://www.pi1.physik.uni-erlangen.de/~katz/ws05/atp/talks/bh/BH.pdf>
- Donald H. Perkins, Introduction to High Energy Physics, Cambridge University Press
- <http://www.physique.usherbrooke.ca/attracte/13-2002/Images/Sno.jpg>
- http://www.ipp.ca/Program/SNO_man_on_deck.GIF
- <http://www.aip.org/pt/vol-54/iss-8/p13.html>
- http://www.sno.phy.queensu.ca/sno/images/publicity_photos/sno3.jpg
- Q. R. Ahmad et al., Phys. Rev. Lett. 89, 011301 (2002)
- S. N. Ahmed et al., Phys. Rev. Lett., 92, 181301 (2004)
- http://www.mpi-hd.mpg.de/nuastro/borexino_de.html
- <http://www.phys.vt.edu/~borex/Pictures/Sss%20Before.jpg>
- <http://www.roro-seiten.de/physik/zerfall/thorium-zerfallsreihe.html>
- <http://www.roro-seiten.de/physik/zerfall/uran-radium-zerfallsreihe.htm>