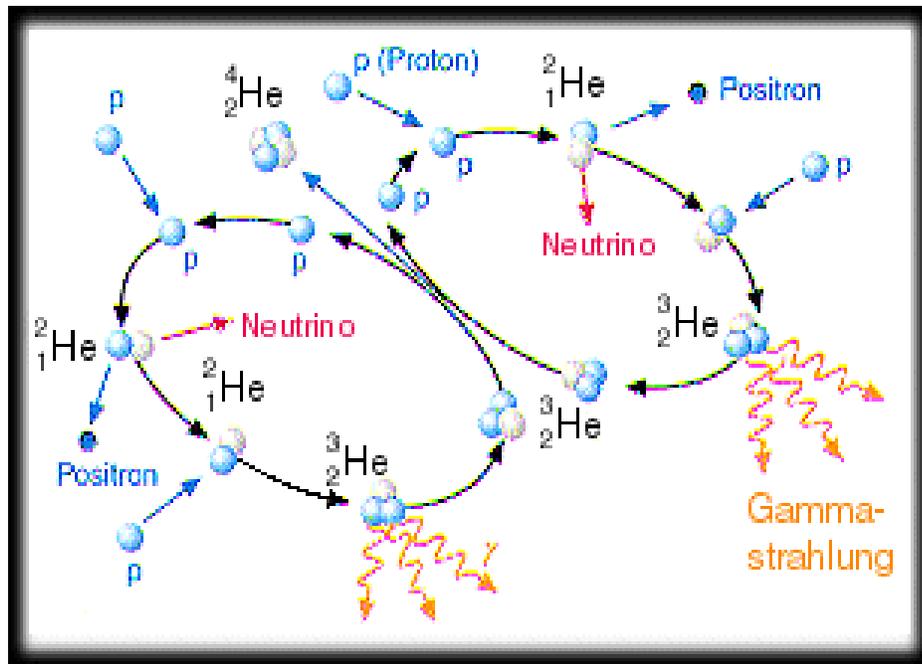


11. Sonne, Neutrinos, Homestake, Kamiokande, SNO

Das **Neutrino** ist seit der Zeit, zu der Wolfgang **Pauli** diese(s) Teilchen zur 'Rettung' von Energie- und Drehimpulserhaltung beim β -Zerfall postuliert hatte, das rätselhafteste Teilchen der Physik geblieben, obwohl es inzwischen in 'dreifacher Ausfertigung' einen höchst prominenten Platz in den **drei 'Leptonenfamilien des Standardmodells'** der Elementarteilchen gefunden hat. Eine der wichtigsten Bedeutungen der Neutrinos liegt darin, dass sie die **einzigsten direkten 'Boten' der in der Sonne ablaufenden Fusionszyklen** sind. Aber es sind äußerst 'flüchtige' Gestalten und kaum nachzuweisen, da ihr **Wirkungsquerschnitt** in der ungefähren Größenordnung von 10^{-40} cm^2 sie kaum je mit anderen Teilchen wechselwirken lässt.



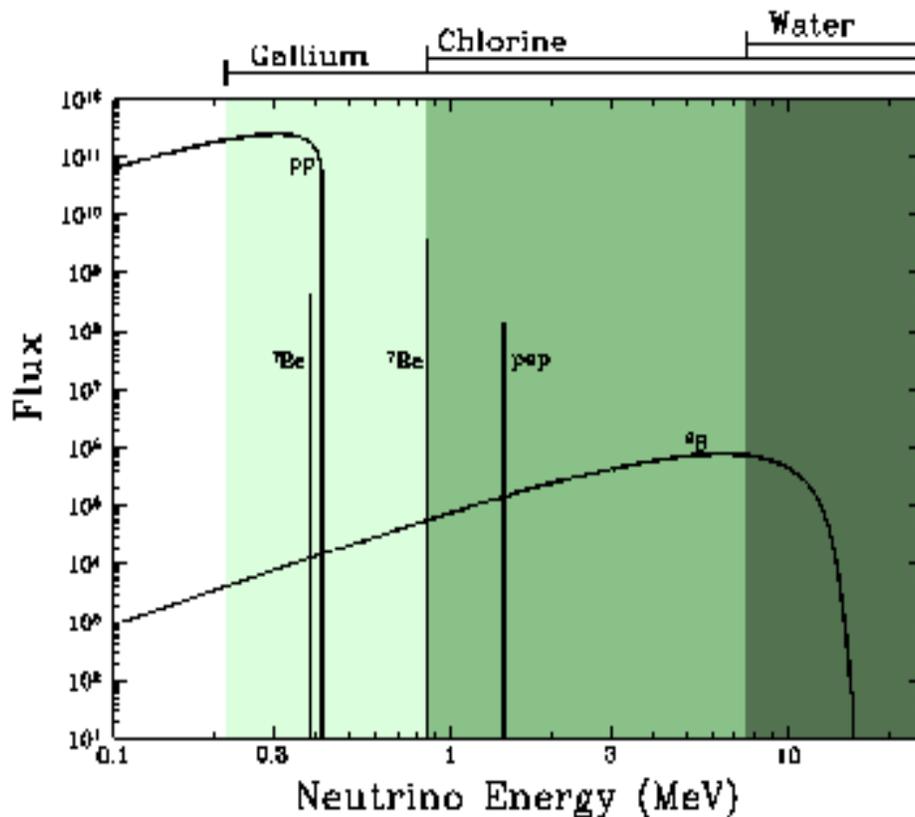
Fusionsschritte im **pp-Fusionszyklus** der Sonne

Die '**pp-Neutrinos**' kommen aus der Basisreaktion



Sie haben ein kontinuierliches Spektrum **bis 420 keV** und stellen mit Abstand den größten Anteil der Sonnenneutrinos (**85 %**). Mehr als 10^{10} **dieser pp-Neutrinos gehen pro Sekunde durch jeden cm^2 der Erdoberfläche!!** Im weiteren Verlauf, nach der Bildung von ^3He , ^4He , ^7Be und ^8B , entstehen **weitere Neutrinos** durch die β -Zerfälle von ^7Be (**monochromatisch**) bzw. ^8B (**0,02%**, Kontinuum **bis 14 MeV**).

11.1 Radiochemischer Nachweis solarer Neutrinos (Homestake, GALLEX und SAGE)



Der **erste zweifelsfreie Nachweis solarer Neutrinos** und damit die erste Bestätigung der Vorstellungen von der Energieproduktion in der Sonne und den Sternen gelang mit der Verifizierung der Reaktion

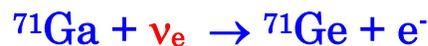


mittels einer riesigen Chloridmenge in der **Homestake-Mine** in Minnesota in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts. In diesem **radiochemischen** Experiment, das **nur auf die Beryllium- und Bor-Neutrinos**, aber **nicht auf die pp-Neutrinos** empfindlich ist, filtert man die wenigen (einige Dutzend pro Woche!) entstandenen ${}^{37}\text{Argon}$ -Atome chemisch aus dem Chlortank heraus und misst anschließend ihren Zerfall (inverse Reaktion ${}^{37}\text{Ar} + e^- \rightarrow {}^{37}\text{Cl} + \nu_e$ mit einer Halbwertszeit von 35 Tagen, bei der charakteristische Röntgenstrahlung von Argon entsteht) in einem Zählrohr. Dieses Experiment unter der Leitung von **Ray Davis** (Nobelpreis 2002), das heute noch in Betrieb ist, ergab aber immer nur **höchstens ein Drittel** des von der Theorie (**Sonnenmodell von Bahcall u.a.**) vorhergesagten Flusses von Beryllium- und Bor-Neutrinos.



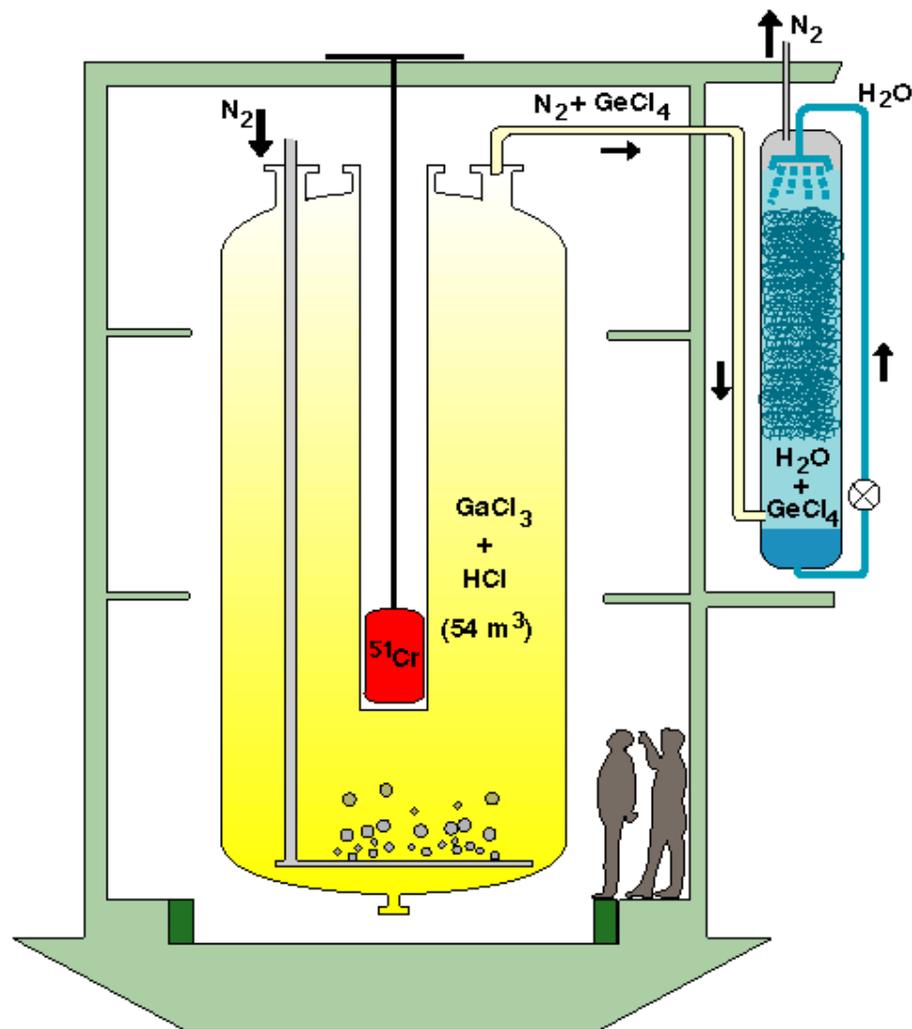
Homestake-Mine: Erster Nachweis solarer ${}^8\text{B}$ -Neutrinos mit der Reaktion ${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$. Nachweisschwelle: $E_\nu = 0,814 \text{ MeV}$
 Quelle: Nick Strobel <http://www.astronomynotes.com>

Mit einem anderen radiochemischen Experiment, dem 'GALLEX' (Gallium-Experiment) konnten zum ersten Mal auch die **pp-Neutrinos** nachgewiesen werden konnten, weil dessen **Nachweisschwelle bei 234 keV**, also **unterhalb** der Maximalenergie der pp-Neutrinos **von 420 keV** liegt. Hier wird, analog zum Homestake-Experiment, Germanium-71, das Produkt der Reaktion



aus dem riesigen Tank mit GaCl_3 herausgefiltert und in einem Zählrohr über den inversen Zerfall (${}^{71}\text{Ge} + e^- \rightarrow {}^{71}\text{Ga} + \nu_e$ mit einer Halbwertszeit von 11 Tagen) nachgewiesen. Auch dieses Experiment, das seit den 80er Jahren im Gran Sasso-Tunnel in den italienischen Abruzzen abläuft, konnte **nur ca. 60 % der** nach der Theorie **zu erwartenden pp-Neutrinos** nachweisen, in Übereinstimmung mit **SAGE**, einem ähnlichen Gallium-Experiment, das im Kaukasus durchgeführt wurde.

Dieses signifikante **Neutrinodefizit** auf der Erde nennt man das **'solare Neutrino-Problem'**. Es kann i.w. drei Gründe haben:

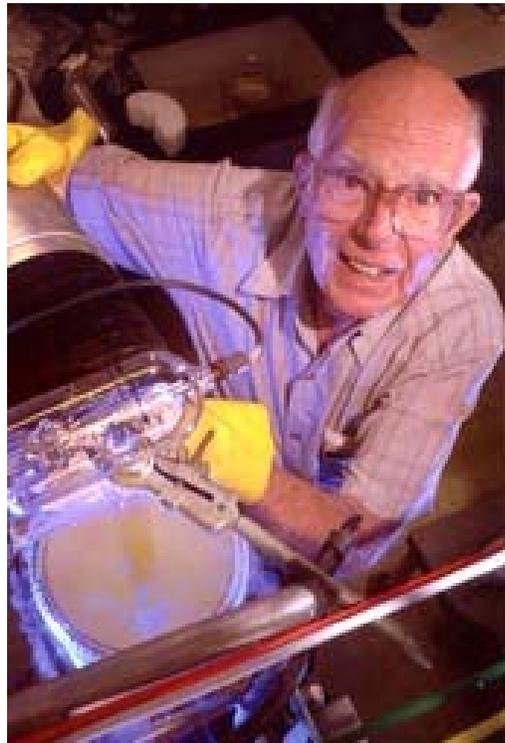


GALLEX- Experiment im Gran Sasso, Italien, zur Messung solarer pp-Neutrinos mit der Reaktion ${}^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ Nachweisschwelle: $E_\nu = 0,234 \text{ MeV}$.

Quelle: www.zebu.uoregon.edu

1. Alle diese **radiochemischen Messungen** sind **falsch**; dies kann **nicht ausgeschlossen** werden, da der Nachweis der wenigen Reaktionsprodukte extrem schwierig ist und die systematischen Fehler groß sind (um den Untergrund zu minimieren muss man tief unter die Erde gehen). Außerdem lässt sich bei allen radiochemischen Methoden die **Richtung der Neutrinos nicht bestimmen** -es ist also nicht zweifelsfrei sicher, dass sie wirklich von der Sonne kommen.
2. Das **Modell der Fusion in der Sonne ist falsch**, insbesondere die Annahmen über Temperatur und Dichte im Sonnezentrum, was dann zu falschen Zahlen der erwarteten Neutrinoerzeugung führt.

3. Wenn **Neutrinos eine Ruhemasse** besitzen, könnte ein in der Sonne produziertes **Elektron-Neutrino ν_e** auf dem Weg zur Erde seine 'Familienzugehörigkeit' (flavour) ändern, sich z.B. in ein **Myon-Neutrino ν_μ** 'verwandeln', das dann aber **nicht** in der Lage ist, eine Reaktion $^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ oder $^{71}\text{Ga} + \nu \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$ auszulösen, weil dazu **ein ν_e** , ein Elektron-Neutrino erforderlich ist. Diese Hypothese der '**Neutrino-Oszillation**' wurde in **Kamiokande** und **Sadbury** (SNO) in den Jahren 1999 – 2003... **bestätigt**.

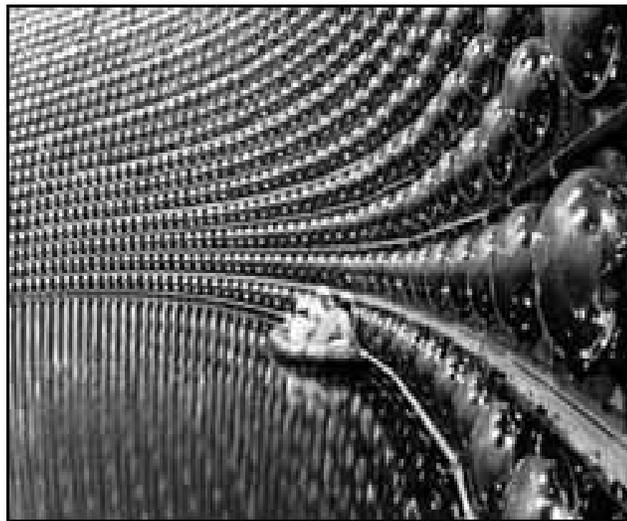


Raymond Davis jr., Nobelpreis 2002, in der Homestake-Mine

11.2 Nachweis der **Richtung** und **Energie** der Neutrinos mit H_2O , D_2O -Detektoren

In den letzten Jahrzehnten wurden neue Typen von Detektoren in **Kamioka**, Japan, und in **Sadbury**, Kanada, entwickelt, mit denen man auch die **Richtung und Energie** der Neutrinos feststellen kann. Ihr Nachweisvolumen besteht aus **vielen tausend Tonnen Wasser H_2O (Kamiokande) oder schwerem Wasser D_2O (Sadbury, SNO = 'Sadbury Neutrino Observatory')**. Mit tausenden von Photovervielfachern weist man **hochenergetische Elektronen**, die bei der **Neutrino-Elektron-Streuung** entstehen, über ihr **Cerenkov-Licht** nach.

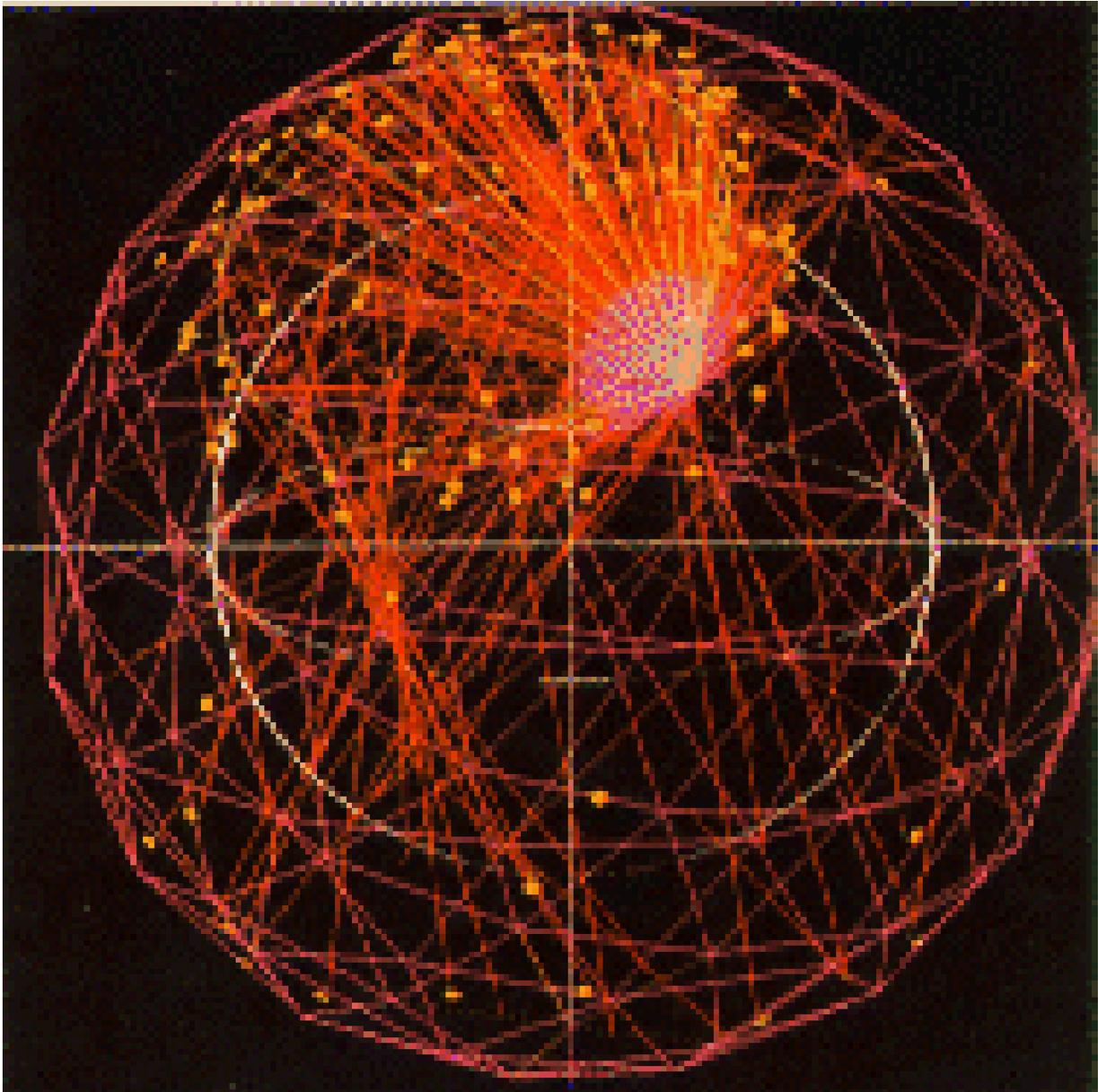
Nimmt man **schweres Wasser** kann man einerseits **Neutrino-Elektron-Streuung** detektieren, an der **alle 'flavours'** (Elektron- bzw. Myon- bzw. Tau-Neutrino) beteiligt sind, andererseits aber auch **Reaktionen wie $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$** , die **nur ein Elektron-Neutrino ν_e** auslösen kann. Aus dem Vergleich beider Reaktionsraten lässt sich nun ableiten, ob sich ein Teil der ursprünglichen Elektron-Neutrinos 'unterwegs' in andere Neutrinosorten umgewandelt hat und dann zwar noch Elektron-Neutrino-Streuung, aber **nicht die Reaktion $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$** auslösen kann. Messungen der letzten Jahre in **Sadbury und Kamiokande** erbrachten nun den Nachweis, dass es solche 'Familien-Wechsel' der Neutrinos tatsächlich gibt und somit **Neutrino-Oszillationen das Rätsel des solaren Neutrino-defizits lösen !!**



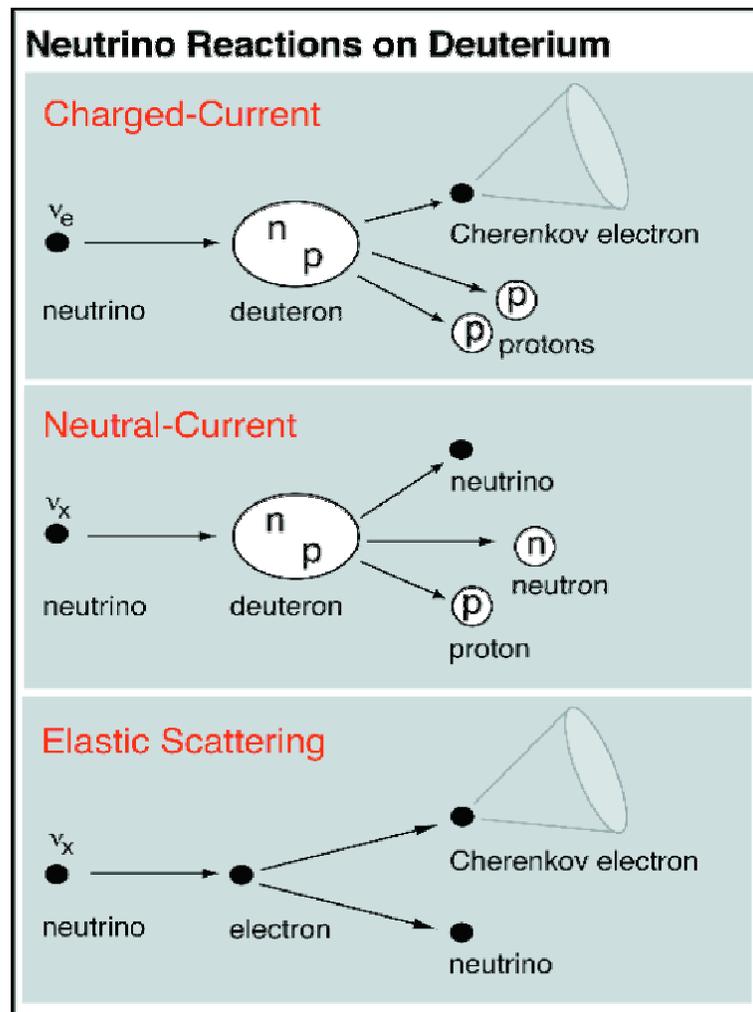
Kamiokande-Experiment in Kamioka, Japan. Hier werden solare Neutrinos über **Elektron-Neutrino-Streuung in H_2O** identifiziert und ihre **Richtung** bestimmt. **Schwelle: $E_\nu = 5 \text{ MeV}$** . **Quelle: www.fnal.gov/neutrino/discovery**



Masatoshi Koshihara, Kamioka, Nobelpreis 2002



SNO-Experiment in Sudbury, Kanada. Elektron-Neutrino-Streuung in **schwerem Wasser, D₂O**. Schwelle: $E_\nu = 5 \text{ MeV}$. Quelle: www.lbl.gov/Highlights



Das Bild zeigt die **drei Reaktionstypen**, die am **SNO mit schwerem Wasser D₂O** gemessen werden können.

Charged-Current (Geladene Ströme): Ein ν_e und ein Neutron eines **Deuteronkerns** (D) erzeugen gemäß $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ (β^- -Zerfall) ein **Proton und ein Elektron**. Diese Reaktion ist **am SNO** (D₂O), **nicht in Kamiokande** (H₂O) möglich, aber **nur mit Elektron-Neutrinos** (ν_e).

Neutral-Current (Neutrale Ströme): **alle Neutrinosorten** (ν_e, ν_μ, ν_τ) können über 'neutrale Ströme' (Austausch eines Z^0 -Bosons) mit dem Neutron oder Proton wechselwirken.

Elastic Scattering: **alle Neutrinosorten** können ein gebundenes **Elektron** aus den Atomen des (schweren) Wassers **herausstreuen**. **Richtung und Geschwindigkeit** des Elektrons werden aus dem **Öffnungskegel des Cherenkov-Lichts** bestimmt. Diese Reaktion kann **bei SNO und Kamiokande** beobachtet werden.

Im **April 2002** veröffentlichte die **SNO-Kollaboration** ihr höchst aufregendes Ergebnis, das zum ersten Mal den eindeutigen Beweis lieferte, dass solare Neutrinos (es handelt sich hier um den kleinen Anteil der **⁸B -Neutrinos**, da man nur diese bei einer Nachweisschwelle von 5 MeV detektieren konnte):

$$\Phi_{CC} / \Phi_{NC} = 0,36 \pm 0,04 \quad (11.3)$$

In Worten: der Fluss solarer Neutrinos, die an der '**Charged-Current**' **Wechselwirkung** teilnehmen -und das sind nur die **Elektronen-Neutrinos ν_e** - beträgt nur ca. **36% des Flusses der Neutrinos, die an der 'Neutral-Current' Wechselwirkung** teilnehmen -und das sind alle Neutrinosorten (ν_e, ν_μ, ν_τ).

Da aber in der Sonne im β -Zerfall von ⁸B **nur Elektron -Neutrinos ν_e** entstanden sein konnten, heißt dies, dass sich 'unterwegs' **ca. 2/3 der Elektron-Neutrinos in andere 'flavours' umgewandelt** haben müssen. Damit ist gezeigt, dass die hochenergetischen solaren Elektron-Neutrinos ($5 \text{ MeV} < E_\nu < 14 \text{ MeV}$) **'oszillieren'**. Nimmt man als Beispiel an, dass sich das ν_e in ein ν_μ und umgekehrt umwandelt, kann man die orthogonalen Wellenfunktionen von ν_e und ν_μ in der Form schreiben:

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\vartheta |\nu_1\rangle + \sin\vartheta |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin\vartheta |\nu_1\rangle + \cos\vartheta |\nu_2\rangle \end{aligned} \quad (11.4)$$

$|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle =$ '**Energie-Eigenzustände**' ; $\vartheta =$ '**Mischungswinkel**'. Da sich die Energie-Eigenzustände gemäß $|\nu_1(t)\rangle = \exp(-i\omega_1 t) |\nu_1\rangle, |\nu_2(t)\rangle = \exp(-i\omega_2 t) |\nu_2\rangle$ entwickeln, wird die Wellenfunktion eines Neutrinos, das zur Zeit **t = 0 ein 'reines' ν_e** war, als Funktion der Zeit sich folgendermaßen entwickeln:

$$|\nu(t)\rangle = \cos\vartheta \exp(-i\omega_1 t) |\nu_1\rangle + \sin\vartheta \exp(-i\omega_2 t) |\nu_2\rangle \quad (11.5)$$

Projektion auf ν_e : $\langle \nu_e | \nu(t) \rangle = \cos^2\vartheta \exp(-i\omega_1 t) + \sin^2\vartheta \exp(-i\omega_2 t)$ (11.5a)

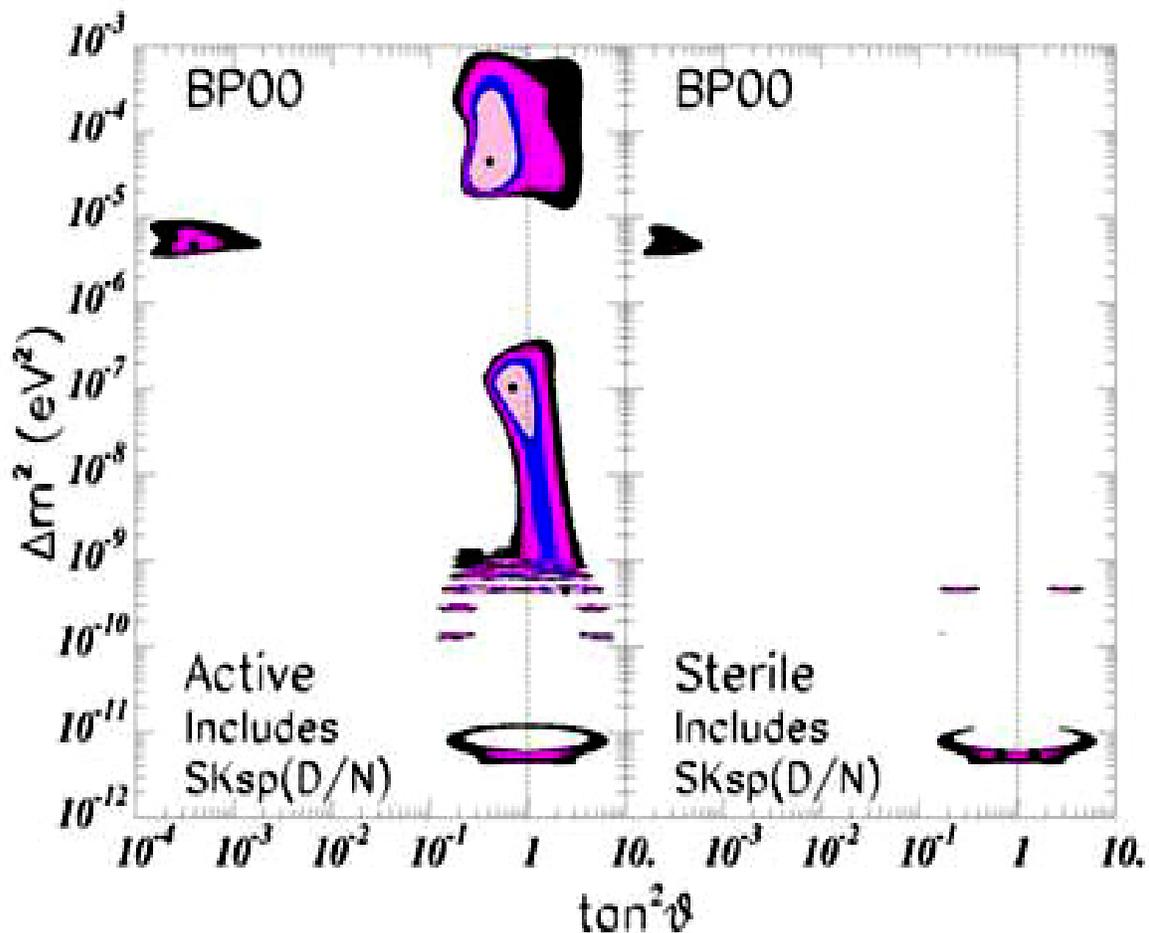
Dann ist die **Wahrscheinlichkeit $W(\nu_e)$** , nach einer Zeit t noch (oder wieder) ein bei t = 0 **'reines' ν_e anzutreffen**:

$$W(\nu_e) \equiv |\langle \nu_e | \nu(t) \rangle|^2 = \cos^4\vartheta + \sin^4\vartheta + 2\sin^2\vartheta \cos^2\vartheta \cos(\Delta\omega t) \quad (11.5b)$$

mit $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = 1/\hbar (E_1 - E_2) = \Delta^2 m / [(E_1 + E_2) \hbar]$

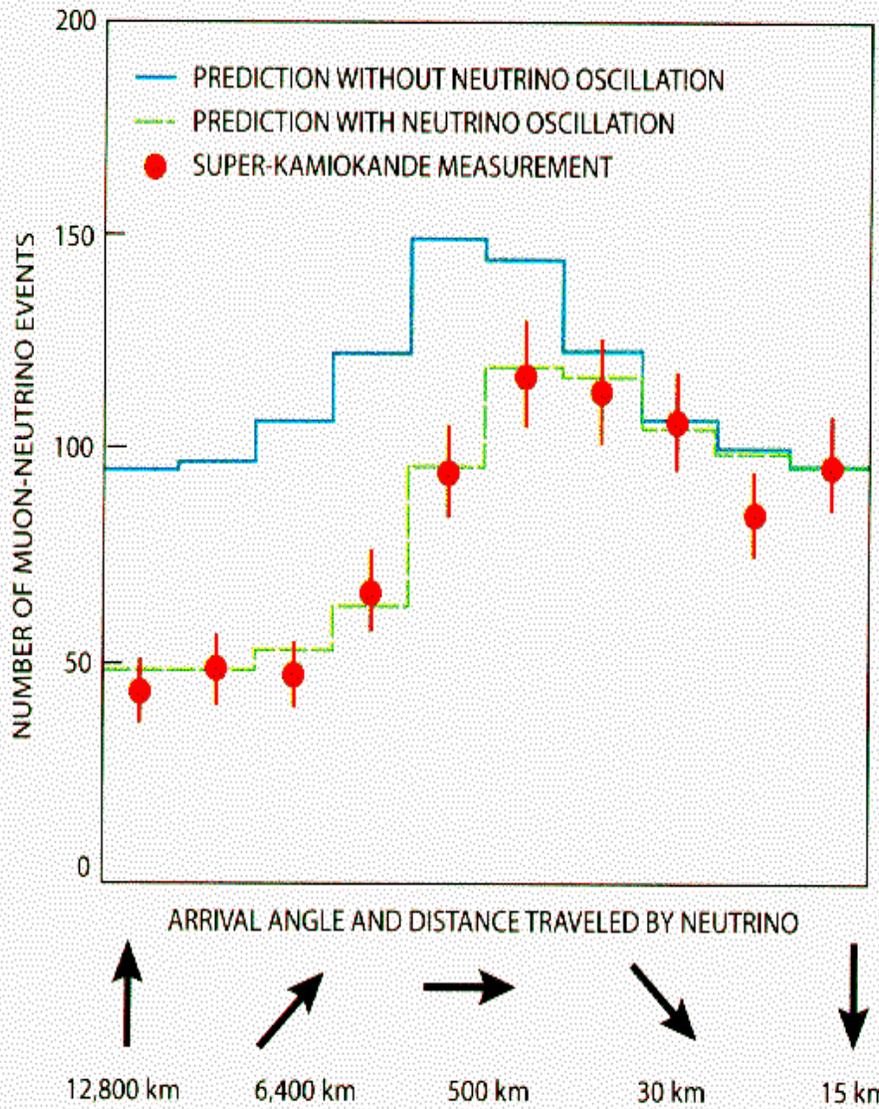
$$\{\Delta^2 m = [(m_1 c^2)^2 - (m_2 c^2)^2]\} = \text{Differenz der Quadrate der Ruheenergien}$$

$\Delta\omega \neq 0$, also '**Oszillation**', ist nur möglich, wenn **mindestens einer der Energie-Eigenzustände $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$ eine von 0 verschiedene Ruhemasse (m_1 bzw. m_2) hat.**



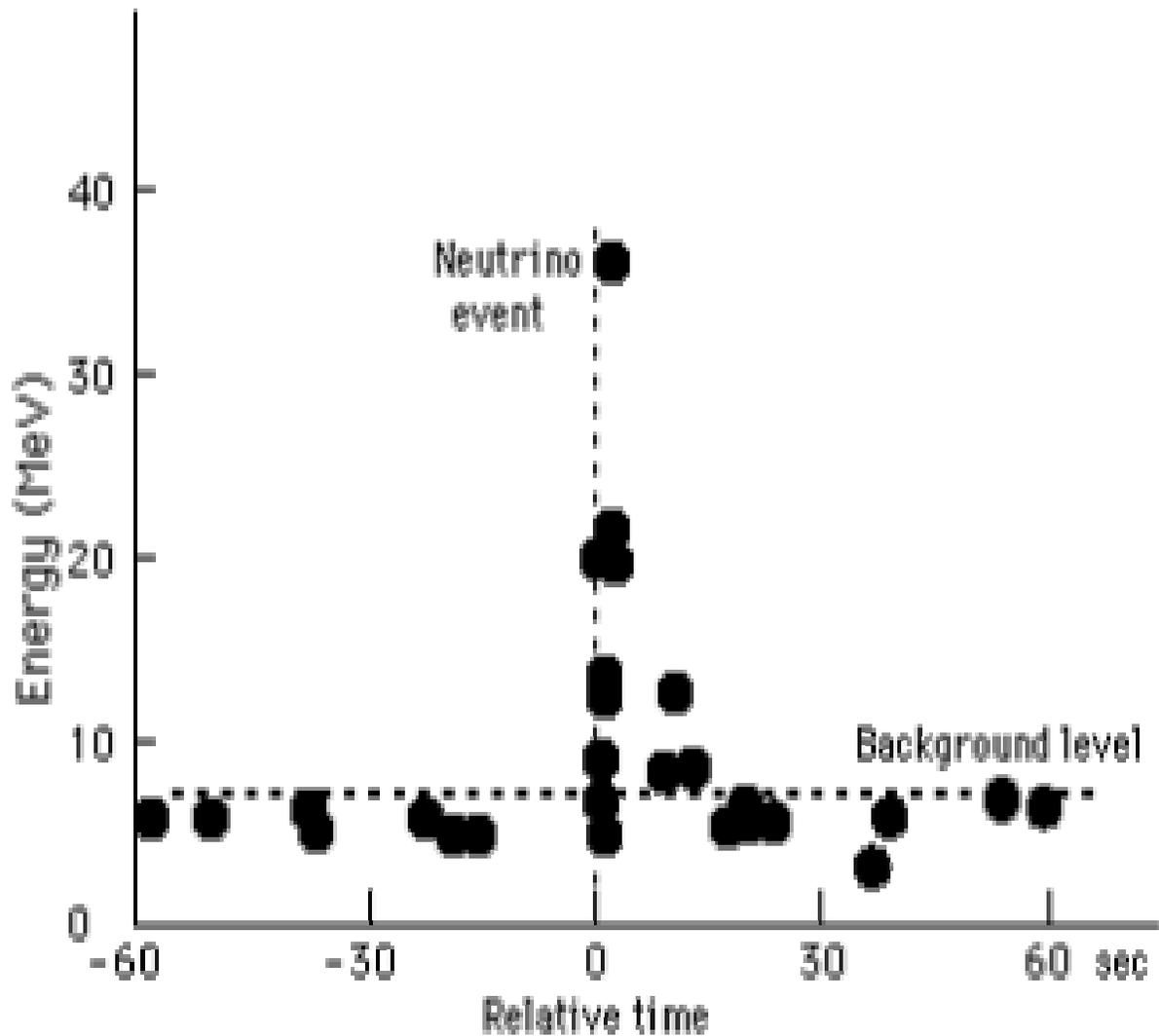
'Erlaubter' Parameterraum (die Farben um die schwarzen Punkte beschreiben den jeweiligen 90%, 95% und 99% -Konfidenzbereich) für die Differenz der Ruhemassenquadrate Δ^2m und für den Mischungswinkel θ gemäß den Ergebnissen von SNO für die drei Neutrino-'Flavors' (rechts: zusätzlich ein 'steriles' Neutrino).

In Kamiokande war kurz zuvor (1999) die Oszillation 'atmosphärischer' Myon- Neutrinos nachgewiesen worden. Ebenfalls in Kamiokande wurden 1987 zum ersten Mal Neutrinos aus einer Supernova-Explosion entdeckt, von der Explosion der SN1987A im Februar 1987 in der Großen Magellanschen Wolke. Hier wurden innerhalb weniger Sekunden 13 hochenergetische Neutrinos detektiert; die Große Magellansche Wolke ist 180 000 Lichtjahre entfernt. Man kann sich vorstellen, welcher gewaltiger Neutrinofluss die Erde erreicht haben muss!



LAURIE GRACE

NUMBER OF HIGH-ENERGY MUON-NEUTRINOS seen arriving on different trajectories at Super-K clearly matches a prediction incorporating neutrino oscillations (*green*) and does not match the no-oscillation prediction (*blue*). Upward-going neutrinos (*plotted toward left of graph*) have traveled far enough for half of them to change flavor and escape detection.



Spektrum der in Kamiokande (Japan) am 23. Februar 1987 gemessenen **13 hochenergetischen Neutrinos** der **Supernova SN1987A** in der 180 000 Lichtjahre entfernten Großen Magellanschen Wolke