2.4.2 Realzeitexperimente:

Elastische Streuung: $\nu_\alpha e^- \to \nu_\alpha e^-$

für sehr niedrige E_ν aus der Sonne.

D.h. keine Unterscheidung des einfallenden Neutrinoflavours, aber $\sigma(\nu_{\mu,\tau}) \approx \frac{1}{6} \cdot \sigma(\nu_e e^-)$.

Wirkungsquerschnitt relativ klein.

Messung des Čerenkov-Lichts des Rückstoßelektrons im Wassertarget (große Targetmasse):

$\Longrightarrow$ Čerenkov-Kegel um die Flugrichtung geladener Teilchen in einem Dielektrikum mit Brechungsindex n, falls $\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}$: Öffnungswinkel $\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$.

$\Longrightarrow$ Čerenkov-Ringe als Projektion gemessen mit PMTs: erlauben Bestimmung der Richtung und Energie der Elektronen (aus Ringdurchmesser und γ-Ankunftszeiten).

$\Longrightarrow$ Messung der ν_α-Richtung und Energie (Impuls) durch aus der Richtung und Energie der Elektronen (bei genügend hoher ν-Energie, Vorwärtsstreuung).

$\Longrightarrow$ Messung des Winkels zur Sonne, Identifikation as Sonnenneutrinos.

Anwendung im

Kamiokande-Experiment
(Kamioka Nucleon Decay Experiment):

im Kamioka-Bergwerk bei Tokyo, in 2700 mWÄ ($= 1000$ m) Tiefe.

Seit 1983: für Suche nach dem Protonzerfall (Vorhersage der Grand Unified Theories) gebaut (Kamiokande I).

1987-95: Messungen solarer und atmosphärischer Neutrinos (Kamiokande II und III).

Target:

Zylindrischer Tank mit 3000 Tonnen purifiziertem H_2O (davon 680 Tonnen inneres Target, Rest Abschirmung, Veto), verkleidet mit ca. 1000 PMT zum Nachweis des Čerenkov-Lichts (20% der Oberfläche).

Schwellenenergie: $E_\nu \geq 7.5$ MeV wegen PMT-Überdeckung und -Sensitivität.

$\Longrightarrow$ nur B^8-Neutrinos nachweisbar.

Relativ hohe Untergrundrate, aber deutlicher Anstieg der Rate bei $\theta_\odot \approx 0^\circ$: Sonnenneutrinos.

Ergebnisse:

Beobachteter im Vergleich zum erwarteten Neutrinofluß:

$$
\begin{aligned}
\phi_{\nu\,\exp}(B^8) &= (2.80 \pm 0.19 \pm 0.33) \cdot 10^6 \ \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1} \\
\phi_{\nu\,SSM}(B^8) &= (5.7 \pm 2.4) \cdot 10^6 \ \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1} \ (3\sigma)
\end{aligned}
$$

$\Longrightarrow$ Nur 49% des erwarteten (B^8-) Neutrinoflusses von der Sonne beobachtet, unabhängig von der Tages- und Jahreszeit.

Seit 1996 mit hoher Präzision bestätigt durch das Superkamiokande-Experiment:

Ausbau des Vorgängerexperiments mit 50000 Tonnen Reinstwassertank (davon 32000 Tonnen inneres Target) verkleidet mit 11200 PMT (40% Überdeckung).

$\Longrightarrow$ niedrigere Energieschwelle $E_\nu \geq 5$ MeV, d.h. Messung des B^8-Neutrinoenergiespektrums.

$\Longrightarrow$ 8000 ν_e-Reaktionen von solaren Neutrinos pro Jahr ($80\times$ Kamiokande).

Ergebnisse 2000:

$$\begin{aligned}
\phi_{\nu\,\mathrm{exp}}(B^8) &= (2.40 \pm 0.03 \pm 0.08) \cdot 10^6\ \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1} \\
\frac{\phi_{\nu\,\mathrm{exp}}(B^8)}{\phi_{\nu\,SSM}(B^8)} &= 0.465 \pm 0.005 \pm 0.014
\end{aligned}$$

Jahreszeitliche Variationen in guter Übereinstimmung mit der Erwartung von der Exzentrizität der Erdbahn um die Sonne.

Bisher keine Tag-Nacht-Variationen beobachtet (evtl. Regeneration von ν_e bei Durchgang durch die Erdmaterie in der Nacht aufgrund des MSW-Effekts?).

Die solare Neutrino-Anomalie

Dreifaches Problem:

1. Solares ν-Defizit bei B^8-Neutrinos: $< 50\%$ beobachtet.

   Betroffene Experimente:

   - Homestake (Cl^{37}): 78% B^8, 15% Be^7.
   - (Super-) Kamiokande (νe, H_2O): 100% B^8.
   - GALLEX, SAGE (Ga^{71}): 10% B^8, 54% pp, 27% Be^7.

   Der pp ν-Fluß ist wenig sensitiv in Bezug auf die Sonnentemperatur: $\sim T_\odot^{1.2}$.

   Der B^8 ν-Fluß ist sehr sensitiv: $\sim T_\odot^{18}$, könnte im SSM unterschätzt sein (?).

   Kamiokande liefert direkt die benötigte Reduktion in $T_\odot$.

   Dies erklärt aber nicht die

2. Inkompatibilität zwischen Homestake (78% B^8, nur ν_e) und Kamiokande (ν_e plus $\nu_{\mu,\tau}$ mit je 1/6 der ν_e-Rate).

   Homestake mißt im Vergleich zu geringe Rate:

   Kamiokande sollte stärker von $\Delta T_\odot$ betroffen sein, d.h. keine Erklärung durch Anpassung des SSM.

   Homestake ist stärker durch evtl. $\nu_e \rightarrow \nu_X$-Oszillationen betroffen.

   $\Longrightarrow$ ν-Oszillationen bieten sich als Lösung des Problems an.

3. Fehlende Be^7-Neutrinos:

Sie müssen in der pp-Kette auftreten, da B^8-Neutrinos schon nachgewiesen wurden.

Die Homestake- und Gallium-Messungen sind zu niedrig

und lassen keinen Raum mehr für Be^7-Neutrinos selbst wenn der erwartete B^8-Fluß auf die Kamiokande-Messung von 50% reduziert wird.

$\Longrightarrow$ keine Lösung im SSM durch Anpassung der Sonnentemperatur an die Kamiokanderate für B^8 (nur kleine Änderung, hohe Sensitivität).

Das Borexino-Experimente

(in Vorbereitung im Gran Sasso-Tunnel unter Beteiligung der TU München für Beginn in 2001)

zielt auf die direkte Suche nach den monoenergetischen Be^7-Neutrinos ($E_\nu = 0.862$ MeV)

durch Messung der νe-Streuung $\nu_\alpha e^- \rightarrow \nu_\alpha e^-$ mit sehr niedriger Schwelle $E_\nu > 0.25$ MeV

mit einem Target von 300 Tonnen organischem Füssigszintillator (Trimethylborat TMB):

Das Szintillationslicht ist 100-fach intensiver als Čerenkov-Licht und daher besser nachweisbar mit PMTs.

Es werden ca. 18000 nachgewiesene νe-Ereignisse pro Jahr erwartet.

Da die νe-Reaktion für alle ν-flavour stattfindet, wenn auch mit geringerer Rate für ν_μ und ν_τ las für ν_e (NC und CC; siehe MSW-Effekt), kann durch die Ratenmessung festgestellt werden, ob die Be^7-Neutrinos von Anfang an zu wenig waren oder den flavour geändert haben.

Dies ist auch beim SNO-Experiment, einem Čerenkov-Detektor mit schwerem Wasser, möglich durch Vergleich der CC- (nur ν_e) und NC- (alle flavours) Reaktionsraten, allerdings bei einer Meßschwelle von ca. 5 MeV wie bei Superkamiokande nur für B^8-Neutrinos.

Das KamLAND-Reaktor-Experiment sucht ebenfalls nach Be^7-Neutrinos.

Interpretation des solaren ν-Defizits als ν-Oszillationen

$(\nu_e \to \nu_X)$

1. Oszillationen im Vakuum, Sonne–Erde:

Lösungen nur für sehr lange Wellenlängen

$$L_0 = \frac{4\pi E_\nu}{\delta m^2} \approx L(\mathrm{Sonne-Erde}) = 1.5 \cdot 10^11\ m$$

da die Überlebenswahrscheinlichkeit $\mathcal{P}(\nu_e \to \nu_e)$ sehr sensitiv ist für E_ν (einzige Erklärung für die unterschiedlichen Defizite der verschiedenen Experimente in diesem Modell) und L (nur geringe jahreszeitliche Schwankungen der Raten wegen der Elliptizität der Erdbahn beobachtet).

Wäre überraschende Koinzidenz!

Aus sämtlichen Daten 2000 ergeben sich Lösungen mit sehr niedrigen Frequenzen und großen Mischungswinkeln (LMA):

$$\underline{\delta m^2_{eX} \approx 10^{-10}}\ (\mathrm{Vakuum})$$

Mit zusätzlichen Materieeffekten in Sonne und Erde:

$$\underline{\delta m^2_{eX} = 4.4 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{eV}^2; \sin^2\ 2\theta = 0.93}\ (\mathrm{Quasi-Vakuum})$$

2. Oszillationen im Materie, Sonne, MSW-Effekt:

Resonanzkonversion der ν_e in ν_X auf dem Weg zur Sonnenoberfläche.

Erklärt insbesondere auch die starke Unterdrückung des Be^7-Neutrinoflusses.

Heute die bevorzugte Interpretation:

Anpassung des MSW-Effekts (für 2-ν-Oszillationen) an alle experimentellen Daten in 2000 liefert mehrere konsistente Lösungen:

δm^2 [eV^2]	$\sin^2 2\theta$	
$\nu_e \to \nu_{\mu,\tau}$		
$2.2 \cdot 10^{-5}$	0.76	LMA
$4.9 \cdot 10^{-6}$	0.005	SMA
$9.0 \cdot 10^{-8}$	0.88	LOW
$\nu_e \to \nu_{\text{steril}}$		
$3.8 \cdot 10^{-6}$	0.004	SMA

Sterile Neutrinos sind nicht aktiv, wechselwirken nur durch Gravitation mit Materie. Z.B. rechtshändige Neutrinos, falls $m_\nu \neq 0$.