2.4 Messungen des Neutrinoflusses von der Sonne

Elektronneutrinos ν_e aus der thermonuklearen Fusion im Sonnenzentrum.

Bei der berechneten Temperatur von $T = 15.6 \cdot 10^6$ K im Zentrum der Sonne (Sonnenmodelle) werden 98.4% der Sonnenenergie durch Proton-Proton-Fusion erzeugt, mit der Summenreaktion:

$$4p + 2e^- \rightarrow He^4 + 2\nu_e + 26.73 \text{ MeV}$$

mit $2 < E_\nu >= 0.59$ MeV (2% der Energieerzeugung) und $0.1 < E_\nu < 20$ MeV.

(Die übrigen 1.6% der Energieerzeugung erfolgen nach dem Bethe-Weizsäcker- oder CNO-Zyklus.)

Der Nachweis der Sonnenneutrinos dient zur

1. Prüfung des Sonnenmodells (Standard Solar Model, SSM),

   das die Temperaturverteilung in der Sonne und die Neutrinoflußspektren vorhersagt.

   Nach den SSM ist

   - der gesamte ν_e-Fluß von der Sonne: $1.87 \cdot 10^{38}$ s^{-1},
   - die ν_e-Flußdichte auf der Erde: $6.6 \cdot 10^{10}$ cm^2 s^{-1}.

Die Modelle sind in guter Übereinstimmung mit den Messungen der Oszillationsanregungen der Sonne (Helioseismologie).

Ursprüngliche Motivation:

Neutrinos liefern direkte, instantane Information über die Fusionsprozesse im Sonnenzentrum.

Die Temperatur $T_\odot$ im Sonnenzentrum bestimmt die Rate der thermonuklearen Fusion unnd damit den ν_e-Fluß von der Sonne.

(Photonen brauchen ca. 1 Million Jahre, um vom Zentrum an die Sonnenoberfläche und damit zur Erde zu kommen aufgrund der starken Streuung, Absorption und Reemission in der dichten Sonnenatmospäre.)

2. Suche nach Neutrino-Oszillationen

Gute Bedingungen für die Suche:

- Sehr niedrige Neutrinoenergie E_ν.
- Sehr große Abstände Quelle–Detektor:

$L = 7 \cdot 10^5$ km innerhalb der Sonnenmaterie
$+ 1.5 \cdot 10^8$ km (=1 AE) Sonne–Erde (im Vakuum).

$$\Longrightarrow \delta m^2_{\min} \approx \frac{E_\nu[\mathrm{MeV}]}{L[\mathrm{m}]}\ \mathrm{eV}^2 \approx 10^{-12}\ \mathrm{eV}^2.$$

Nachweismethoden für Sonnenneutrinos:

1. Radiochemische Messungen

   in Untergrundexperimenten zur Abschirmung gegen kosmische Strahlung.

   ν_e-Einfang durch inversen β-Zerfall nach der allgemeinen Reaktion:

$$\begin{aligned} \nu_e + B(Z) &\rightarrow C(Z+1) + e^- \\ (\nu_e + n &\rightarrow p + e^+) \end{aligned}$$

   mit dem anschließenden Zerfall

$$C(Z+1) + e^- \rightarrow B(Z) + \nu_e$$

   durch Elektroneinfang aus der Atomhülle mit folgender Emission eines Photons oder Auger-Elektrons bei Auffüllen des Lochs, die mit einem Proportionalzählrohr nachgewiesen werden kann (einschließlich der Messung der Energie).

   D.h. der Detektor besteht aus einem großen Targettank mit $B(Z)$-Kernen.

2. Geochemische Messungen:

Vorschlag: Erze und Mineralien auf der Erde als Nachweismedium, das dem Neutrinofluß von der Sonne über lange Zeit ausgesetzt war.

Die bei ν_e-Einfang entstehenden $C(Z+1)$-Kerne werden darin mit Hilfe eines Massenspektrometers nachgewiesen.

Noch existieren keine Meßresultate.

3. Kryogenische Messungen

in Untergrundexperimenten zur Abschirmung gegen kosmische Strahlung

unter Benutzung der kohärenten elastischen Neutrinostreuung an Kernen A,

$$\nu_e + A \to \nu_e + A$$

mit Messung der Rückstoßenergie der Kerne A bei tiefen Temperaturen insbesondere in der supraleitenden Phase (zur Erhöhung der Sensitivität).

Experimentiervorschläge
(u.a. TU München und Max-Planck-Institut für Physik, München: Kryodetektoren im Gran Sasso-Tunnel für die Suche nach Teilchen der 'Dunklen Materie' im Universum nach dem gleichen Prinzip),
aber noch keine Realisierung von Experimenten für Sonnenneutrinonachweis.

4. Realzeitmessungen

in Untergrundexperimenten zur Abschirmung gegen kosmische Strahlung

unter Benutzung der Neutrinoreaktionen:

(a) Elastische Streuung $\nu_\alpha e^- \to \nu_\alpha e^-$
bei der das Elektron Energie und Richtung des ν_α angibt (Vorwärtsstreuung).

Experimente: (Super-) Kamiokande, SNO, Borexino.

(b) Neutrinoeinfang durch Deuteronen (hoher Reaktionsquerschnitt, 10-fach höhere Reaktionsrate als für elastische Streung $\nu e \to \nu e$):

$$\begin{aligned}
(1)\ \nu_e + d &\to e^- + 2\ p \\
. &\quad (\nu_e - \mathrm{Einfang}, E_\nu > 1.442\ \mathrm{MeV}) \\
(2)\ \nu_\alpha + d &\to \nu_\alpha + p + n \\
. &\quad (d - \mathrm{Spaltung}, E_\nu > 2.226\ \mathrm{MeV})
\end{aligned}$$

Durch Vergleich beider Reaktionsraten erhält man Information über das Verhältnis der Neutrinoflüsse ν_e/ν_α.

Anwendung beim SNO-Experiment (Sudbury Neutrino Observatory) in einem Nickelbergwerk in Sudbury, Kanada, das sich in sehr großer Tiefe von 6000 m Wasseräquivalent WE mit einer Targetmasse von 1000 Tonnen D_2O zur Zeit in Vorbereitung befindet.

Alle bisherigen Ergebnisse stammen von radiochenischen und Realzeitexperimenten.

2.4.1 Radiochemische Experimente:

Meßgrößen:

ν_e-Einfangrate $Y = N_T \sum_i \int \phi_i(E_\nu)\sigma(E_\nu)dE_\nu$

mit N_T = Anzahl der Targetkerne,
$\phi_i(E_\nu) = \nu-$Fluß [cm^{-2}s^{-1}] von der Fusionsreaktion i,
$\sigma(E_\nu)$ = Einfangquerschnitt [cm^2].

und das Verhältnis $R = Y/N_T$ [SNU],

wobei 1 SNU = 1 Solar Neutrino Unit
$= 10^{-36}$ ν_e-Einfänge/s/Targetkern.

Bedingungen für die Wahl der Targetkerne:

- Schwellenenergie für ν_e-Einfang niedrig genug für das solare ν_e-Spektrum.

- Geeignete Halbwertszeit $T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$ der Tochterkerne C für ihren radiochemischen Nachweis: typischerweise einige Tage:

  1. Reaktionsgesetz:

  $$\frac{dN_C(t)}{dt} = \underbrace{Y_C}_{\text{Erzeugung}} - \underbrace{\frac{N_C(t)}{\tau}}_{\text{Zerfall}}$$

     D.h. Gleichgewicht von Erzeugungs- und Zerfallsrate für $t \gg \tau$, wenn $Y_C \equiv N_C(t)/\tau$.
     $\Longrightarrow$ τ nicht zu lang.

  2. Keine Zerfälle bis zur radiochemischen Isolation der Tochterkerne.
     $\Longrightarrow$ τ nicht zu kurz.

$\Longrightarrow$ Zwei Targetkerne kommen in Frage und wurden in solaren Neutrinomessungen verwendet: Chlor Cl^{37} und Gallium Ga^{71}.

Reaktion 1:

$$\nu_e + Cl^{37} \longrightarrow Ar^{37} + e^-$$

für $E_\nu \geq 814$ keV,

d.h. vor allem sensitiv für hochenergetische Beryllium Be^7-(15% der Nachweisrate) und Bor B^8-Neutrinos (78% der Nachweisrate).

Der Rest (7%) sind Neutrinos aus der dominierenden pp-Reaktion und anderen Fusionsprozessen. Das Experiment ist deshalb dafür unempfindlich.

Insgesamt wird nach dem SSM mit der Reaktion ein meßbarer Neutrinofluß von

$$R_{SSM} = (8.0 \pm 3.0)\ SNU\ \ (3\sigma)$$

erwartet.

$T_{1/2}(Ar^{37}) = 35.0$ Tage für den K-Einfang (90%) von Argon Ar^{37} unter Röntgen- bzw. Auger-Elektronemission:

$$Ar^{37} + e^- \longrightarrow Cl^{37} + \nu_e + 2.82\ \text{keV}\ (\gamma, e^-).$$

Anwendung im

Homestake (Cl^{37})-Experiment (R. Davis, BNL, 1970-94):

Goldbergwerk in South Dakota, USA: 4100 mWÄ ($= 1480$ m) Tiefe.

Erstes Experiment zur Suche nach Sonnenneutrinos.

Target:

Tank mit 390 m^3 (615 Tonnen) füssigem Perchloräthylen C_2Cl_4,

entspricht $2.2 \cdot 10^{30}$ Cl^{37} Atomen (133 Tonnen).

Meßverfahren:

1. Exposition: über ca. 60–70 Tage bis Sättigung erreicht ist.

2. Ausspülen der gelösten Ar^{37}-Tochterkerne,

   zusammen mit einer bekannten Menge stabiler $Ar^{36,38}$-Atome als Trägergas im Tank, durch

   (a) Durchpumpen von Helium (~ 400 m^3) durch den Tank.
   (b) Ausfrieren des Argons (Gefrierpunkt $-189°$ C) aus dem Heliumgas und Adsorption in Holzkohlefilter bei Flüssig-Stickstoff-Temperatur ($-196°$ C).
   (c) Messung der Argon-Extraktionseffizienz (Vergleich der Menge Trägergas ein und aus) von ca. 95%.

3. Zählen der Ar^{37}-Zerfälle im Trägergas durch Einfüllen in ein kleines ($0.3 - 0.7$ cm^3) Proportionalzählrohr mit 7% Methan als Zählgas (Messung der K γ- bzw. e^--Emission).

Ergebnis:

Beobachtete Neutrinoreaktionsrate:

$$
\begin{aligned}
Y_{\rm exp} &= (0.482 \pm 0.042)\ Ar^{37} - \text{Atome pro Tag, d.h.} \\
R_{\rm exp} &= (2.56 \pm 0.22)\ SNU.
\end{aligned}
$$

D.h. es wurden nur 32% der erwarteten ν_e-Rate von der Sonne beobachtet (1970-94, 108 Einzelmessungen).

$\Longrightarrow$ “Solares Neutrinodefizit”

Erste Entdeckung; trifft hauptsächlich zu für B^8-Neutrinos, deren Produktionsrate allerdings stark von der Sonnentemperatur abhängt).

Erklärungsversuche:

- SSM sagt zu hohe Temperatur im Sonnenzentrum voraus.
- Erkalten des Sonneninnern, das sonst erst in 10^6 Jahren auf der Erde bemerkbar wird ?
- Neutrinooszillationen Sonne $\longrightarrow$ Erde (im Vakuum).
- Neutrinooszialltionen in der Sonne (Materie-, MSW-Effekt).

Reaktion 2:

$$\nu_e + Ga^{37} \longrightarrow Ge^{37} + e^-$$

für $E_\nu \geq 233$ keV, niedrigere Schwelle als bei Cl^{37},

d.h. 54% der erwarteten Nachweisrate von den dominierenden pp-Neutrinos (weniger stark temperatur- und damit modellabhängig), 27% Be^7- und 10% B^8-Neutrinos.

$\Longrightarrow$ Hoher ν_e-Flußerwartet nach dem SSM:

$$R_{SSM} = (132^{+21}_{-17})\ SNU\ \ (3\sigma).$$

Ausserdem hohe ν_e-Einfangrate durch Gallium Ga^{71}.

Nachteil: Gallium sehr teuer.

$T_{1/2}(Ge^{71}) = 11.4$ Tage für K- (L-) Einfang:

$$Ge^{71} + e^- \longrightarrow Ga^{71} + \nu_e + 1.2\ (10.4)\ \text{keV}\ (\gamma, e^-).$$

Anwendung in den Ga^{71}-Experimenten GALLEX und SAGE.

GALLEX-Experiment (1991-95):

Im italienischen nationalen Untergrundlabor LNGS im Gran Sasso am Autobahntunnel durch die Abruzzen, 120 km östlich von Rom

in 3500 mWÄ ($= 1200$ m) Tiefe.

Target:

101 Tonnen $GaCl_3$-Lösung in Salzsäure,

entspricht $1.0 \cdot 10^{29}$ Ga^{71} Atomen (30 Tonnen).

Meßverfahren:

1. Exposition: 30 Tage bis zum Gleichgewicht.

   $\Longrightarrow$ 16 Ge^{71}-Atome erwartet ($Y = 1.18$ Atome pro Tag).

2. Extraktion der Ge^{71}-Atome,

   zusammen mit einer bekannten Menge von $Ge^{72,74,76}$ als inaktivem Träger,

   in Form von Germanium-Tetrachlorid $GeCl_4$ (gasförmig) unter Durchpumpen von Stickstoff (~ 2000 m^3).

3. Zählen der Ge^{71}-Zerfälle über 6 Monate in Proportionalzählrohren mit Xenon-Zählgas (beobachtung der K- und L-Peaks).

4. Überprüfung und Eichung durch Bestrahlung des Targets mit einer intensiven Cr^{51}-Neutrinoquelle bekannter Aktivität ($1.67 \cdot 10^6$ Curie).

Ergebnis:

Beobachtete Neutrinorate:

$$R_{\mathrm{exp}} = (69.7^{+7.8}_{-8.1})\ SNU.$$

D.h. es wurden nur 53% der erwarteten ν_e-Rate von der Sonne beobachtet (1991-95, 53 Einzelmessungen in 3 Perioden).

Bestätigung des "solaren Neutrinodefizits" bei den niederenergetischeren dominierednen pp-Neutrinos!)

Schwieriger erklärbar durch Modifikationen des SSM.

Eine neue Version des GALLEX-Experiments ist in Vorbereitung:

Gallium Neutrino Observatory, GNO

(Max-Planck-Institut Heidelberg, TU München, Uni Mailand, Rom, Gran Sasso Labor LNGS)

30–100 Tonnen Gallium geplant.

Ähnliche Methode:

SAGE-Experiment (1990-99): (Soviet-American Gallium Experiment)

Im Baksan-Tunnel im Nord-Kaukasus in 4700 mWÄ Tiefe.

Verwendet 30–57 Tonnen füssiges, metallisches Gallium erhältlich in aus damaligen UdSSR (Schmelzpunkt bei $29.8°$ C) in geheizten Behältern.

Ergebnis:

Beobachtete Neutrinorate (1990-99):

$$R_{\text{exp}} = (75.4^{+7.8}_{-7.4})\ SNU.$$

D.h. es wurden nur 56% der erwarteten ν_e-Rate von der Sonne beobachtet.

Gute Übereinstimmung mit GALLEX.