

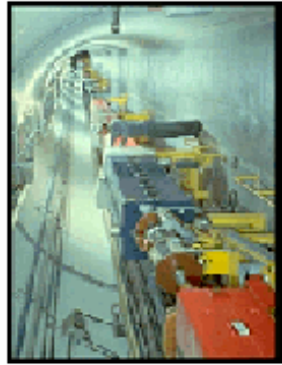
KAPITEL 17 :

Neutrinos

- 17.1 Neutrino Quellen**
 - 17.2 Neutrino Massen**
 - 17.3 Neutrino Oszillationen**
 - 17.4 Atmosphärische Neutrinos**
 - 17.5 Neutrinos von der Sonne**
 - 17.6 Neutrinos von Supernova 1978A**
-

17.1 Neutrino Quellen

Künstliche Neutrino Quellen

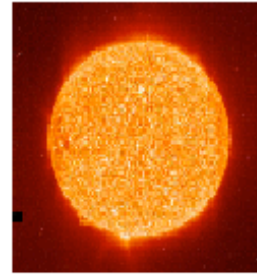


**Beschleuniger
Teilchenstrahlen:**
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



Kernreaktor
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

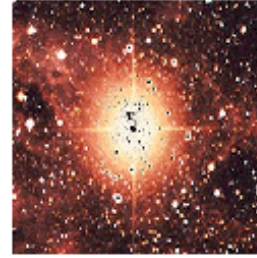
Natürliche Neutrino Quellen



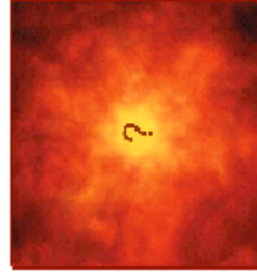
Sonne
 $10^{-6} \nu_e / \text{cm}^3$



Atmosphäre
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$



SuperNova
 $10^{-4} \nu_i / \text{cm}^3$
 $i = e, \mu, \tau$



Big Bang
 $300 \nu_i / \text{cm}^3$
 $i = e, \mu, \tau$

17.2 Haben Neutrinos eine Masse ?

- $m_\gamma = 0$: aus Eichinvarianz der elektromagnetischen WW. Solches Invarianzprinzip existiert nicht für ν 's (sind keine Eichbosonen) !
- Standardmodell:
 - Leptonflavour-Zahl L_α erhalten
 - Es gibt keine RH Neutrinos! Neutrinos haben feste Helizität: $h = -1(+1)$ für $\nu(\bar{\nu})$, nur möglich für $m_\nu = 0$

$\Rightarrow$ $m_\nu \neq 0$ bedeutet Abweichung vom SM

Auskunft über Neutrinomassen:

- Direkte Massenbestimmung:

Massengrenzen		
Teilchen	Bestimmung via	Grenze
m_{ν_e}	β^- -Zerfall des Tritiums	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
m_{ν_μ}	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$< 0.19 \text{ MeV}/c^2$
m_{ν_τ}	$\tau \rightarrow \nu_\tau + \text{Hadronen}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$

- ν -Oszillationen: $\nu_\alpha \longleftrightarrow \nu_\beta$ mit $\alpha, \beta = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Notwendige Bedingung:

- nicht alle ν 's haben $m_\nu = 0$ (siehe später)
- L_α nicht streng erhalten $\longrightarrow \nu$ -Arten mischen untereinander

m_{ν_e} aus β^- Zerfall des Tritiums

Methode: m_{ν_e} bestimmen aus Verlauf des β -Spektrums nahe der Endenergie (E_0)



Kurie-Darstellung:

$$K(E) = [\sqrt{(E_0 - E)^2 - (m_{\nu}c^2)^2} \cdot (E_0 - E)]^{\frac{1}{2}}$$

E_0 ... Endpunktsenergie

$$m_{\nu_e} = 0$$

Kurie Plot ist Gerade: $K(E) = E_0 - E$
mit Endpunkt $E_{\text{max}} = E_0$

$$m_{\nu_e} \neq 0$$

Kurie Plot ist $\sim$ Gerade für grosse E_{ν}

Nahe des Endpunkts (kleine E_{ν}):

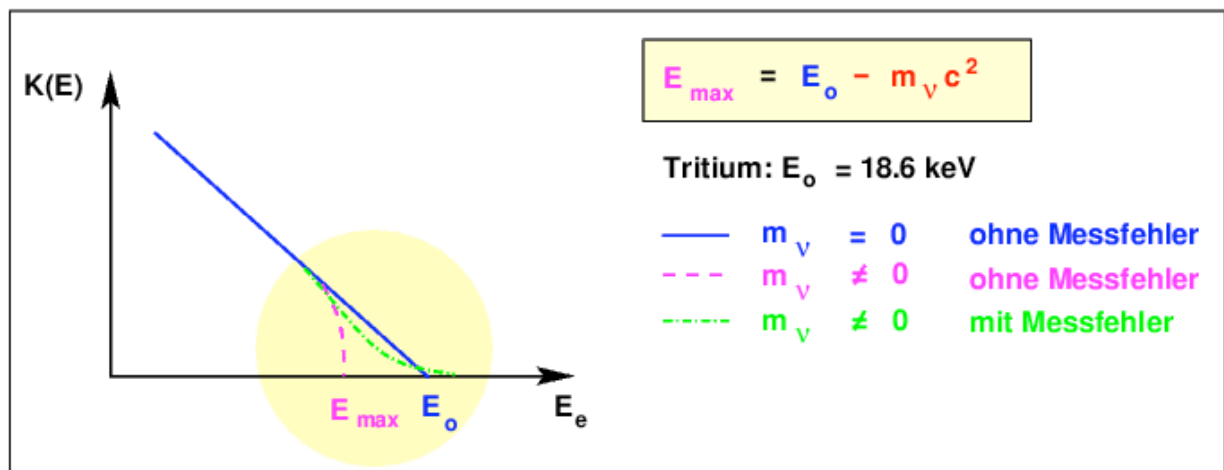
Kurve schneidet Achse senkrecht:

$$\frac{dK(E)}{dE} = \infty \text{ bei } E_{\text{max}} = E_0 - m_{\nu}c^2$$

$\longrightarrow m_{\nu}$ bestimmbar

Experiment: Zählrate sehr klein in Nähe der Maximalenergie
Auflösung verschmiert Spektrum

m_{ν} Bestimmung: Fit an gemessenen Kurvenverlauf unter
Annahme verschiedener m_{ν}



17.3 Neutrino Oszillationen

Annahme:

- Betrachte NUR ZWEI Neutrinofamilien
- Neutrinos haben (verschiedene) Massen: $\Delta m_\nu \neq 0$
- Eigenzustände der schwachen WW sind eine Mischung der Masseneigenzustände (θ Mischungswinkel)

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

$\Rightarrow$ Ein reiner ν_α Strahl zur Zeit $t = 0$ kann zu einem späteren Zeitpunkt ein ν_β Strahl werden

Oszillationswahrscheinlichkeit:

$$P(\nu_\alpha \longrightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 L}{E}\right)$$

$$P(\nu_\alpha \longrightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 L}{E}\right)$$

$$\longrightarrow \Delta m = 0 : P = 0.$$

Ungefähre Bereiche der Neutrinoenergien E , des Abstandes L sowie Empfindlichkeitsgrenzen $\Delta m_{\min}^2$ für verschiedene ν -Quellen in Oszillationsexperimente:

ν Quelle	ν Arten der Quelle	E – Bereich [MeV]	L – Bereich [m]	$\Delta m_{\min}^2$ [eV ²]	Oszillation
Reaktor	$\bar{\nu}_e$	1–10	10–10 ³	10 ^{–2}	$\bar{\nu}_e \leftrightarrow \bar{\nu}_\mu$
Beschleuniger	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	10–10 ⁵	10–10 ⁷	1–10 ^{–4}	$\bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_e$
Atmosphäre	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$	10 ² –10 ⁴	10 ⁴ –10 ⁷	10 ^{–5}	$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$
Sonne	ν_e	10 ^{–1} –10	10 ¹¹	10 ^{–12}	$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

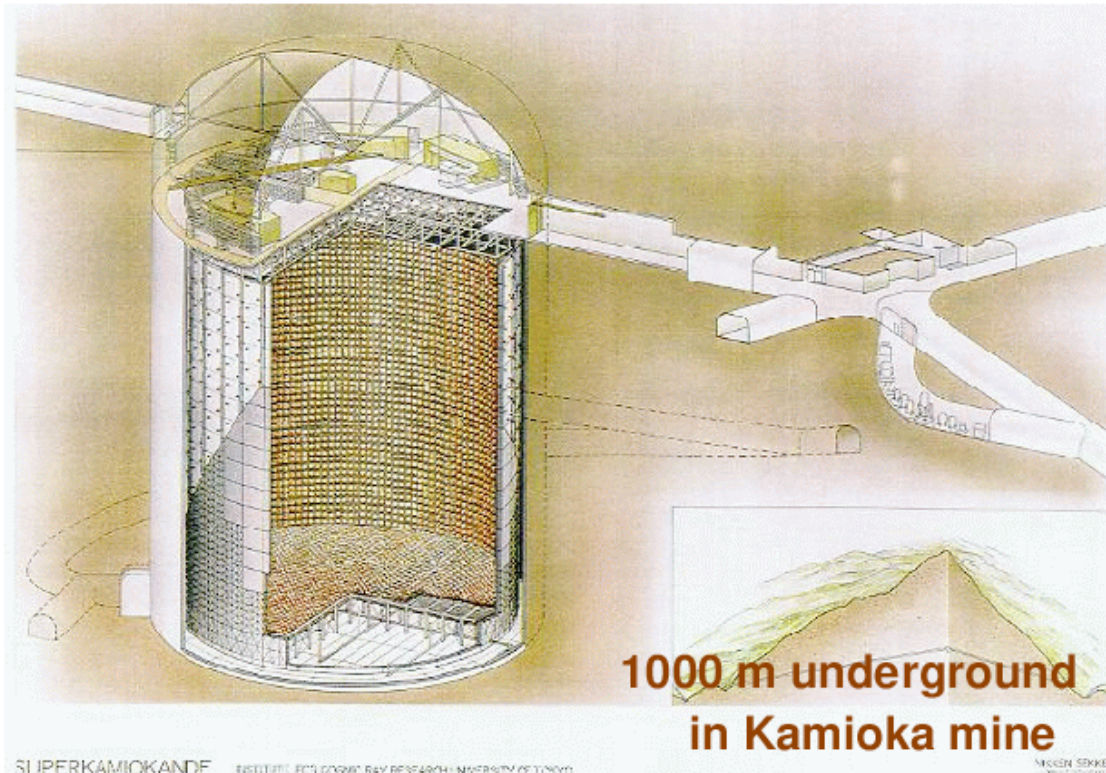
Bemerkung: Beschleuniger: short Baseline: $L = 10^2 - 10^3$ m
long Baseline: $L = 10^4 - 10^7$ m

Super-Kamiokande Experiment

Super-Kamiokande Experiment observes solar and atmospheric neutrino interaction in 50 000 tons of pure water

Signals:

- Solar Neutrino anomaly
- First evidence of neutrino oscillations from atmospheric neutrinos (1998)



Cylinder: 41.2 m (height) x 39.3 m (diameter)

50 000 tons of pure water

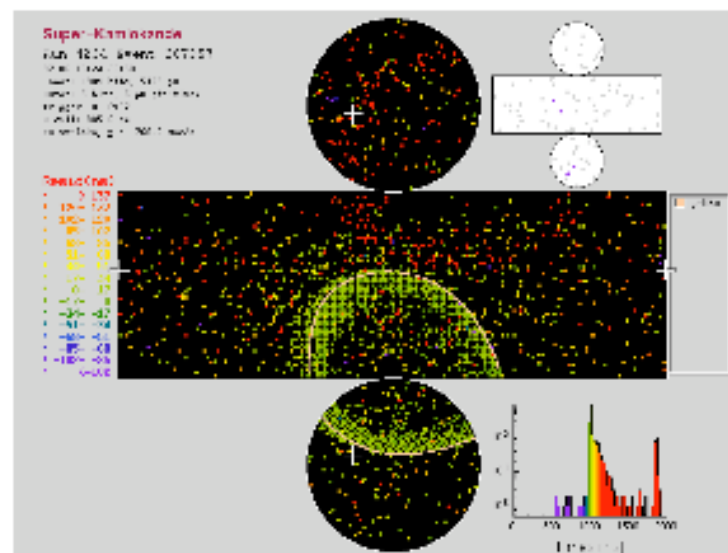
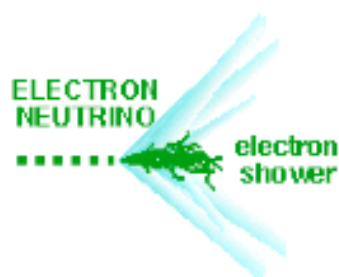
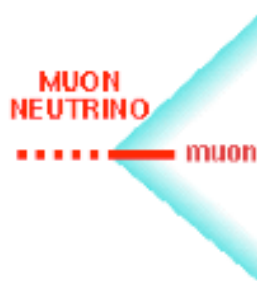
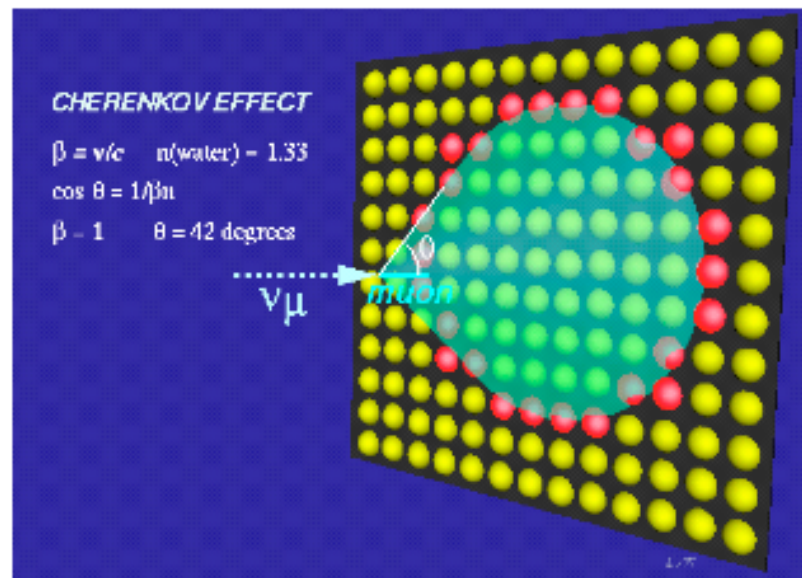
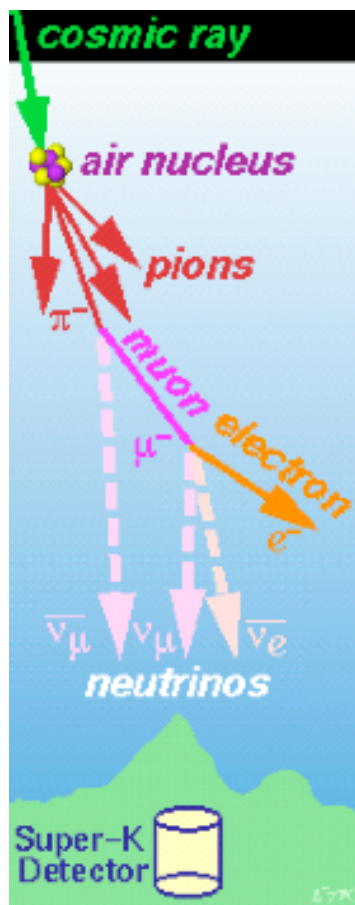
Energy threshold: 5 MeV



PM: diameter = 50 cm !



17.4 Atmospheric Neutrinos



Results from SK: Atmospheric Neutrinos

Measure number of events of each type as function of energy and direction $\Rightarrow$ compare with prediction **with** and **without** oscillation

1st piece of evidence: $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ and $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$:

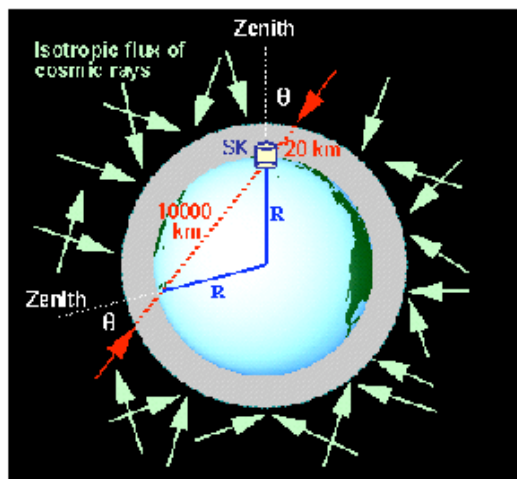
Predict: $R = \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \sim 2$

Double Ratio: $RR = \frac{(\mu/e)_{\text{measured}}}{(\mu/e)_{\text{predicted}}}$ (many uncertainties cancel)

Expect: $RR = 1$ without oscillations

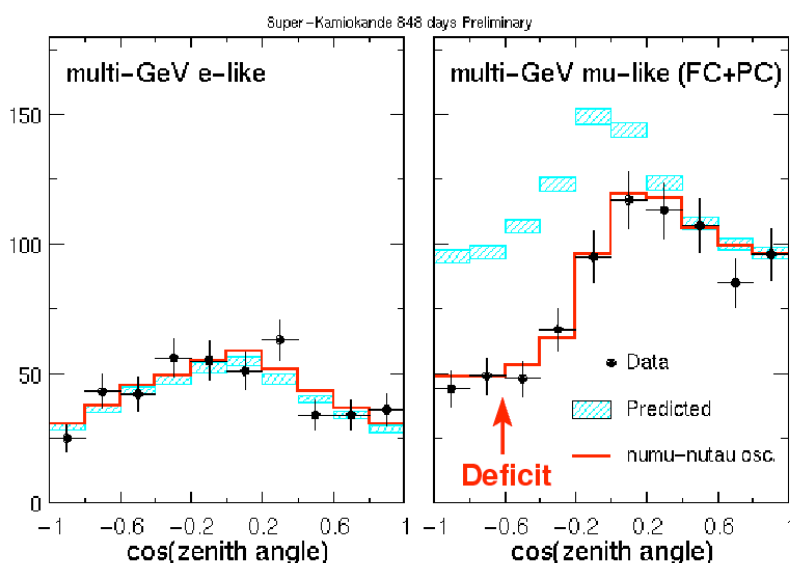
Data: $RR = 0.63 \pm 0.03 \pm 0.05$: Interpretation: deficit on N_μ
seen also by other experiments

2nd piece of evidence: up-down asymmetry $A = \frac{\text{up} - \text{down}}{\text{up} + \text{down}}$:
expect zenith-distribution symmetric if no oscillation



Data: μ -events:
 $A = 0.2963 \pm 0.048 \pm 0.01$

Data: e-events:
 A consistent with 0



Data are consistent with neutrino oscillation:

$$\nu_\mu \longrightarrow \nu_x$$

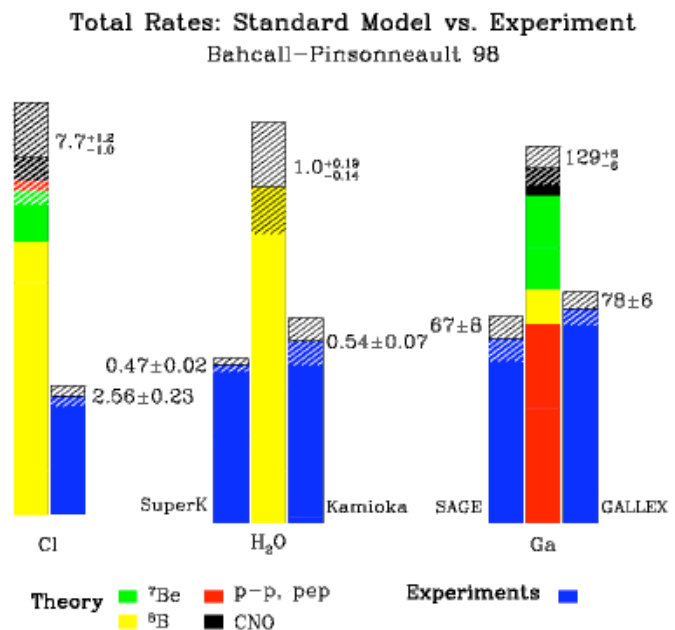
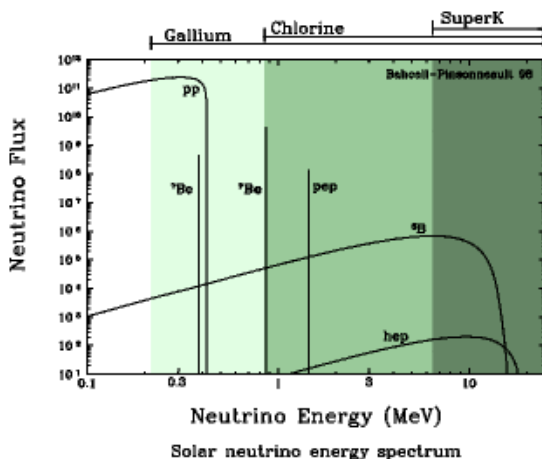
$$\Delta m^2 = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\Theta \sim 1$$

17.5 Neutrinos von der Sonne

- Auskunft über Sonne:
 ν 's vom Sonneninneren zur Erde: 8.3min
 γ 's vom Sonneninneren nach $\sim 10^6$ Jahre zur Sonnenoberfläche diffundiert
- Auskunft über Neutrinos: $R_{\text{Sonne}} \sim 7 \cdot 10^5 \text{ km}$
Distanz von Sonne zur Erde: $1.5 \cdot 10^8 \text{ km}$
 $\longrightarrow$ Oszillationen in Materie und Vakuum möglich

Vor Sommer 2001

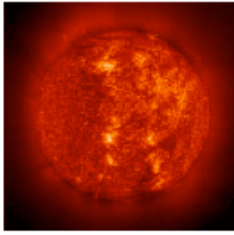


1 SNU = 1 ν_e -Einfang pro Sekunde und pro 10^{36} Targetteilchen
SNU = Solar Neutrino Unit

Ergebnis: Defizit gegenüber Standard Solar Modell (SSM)
Vorhersage

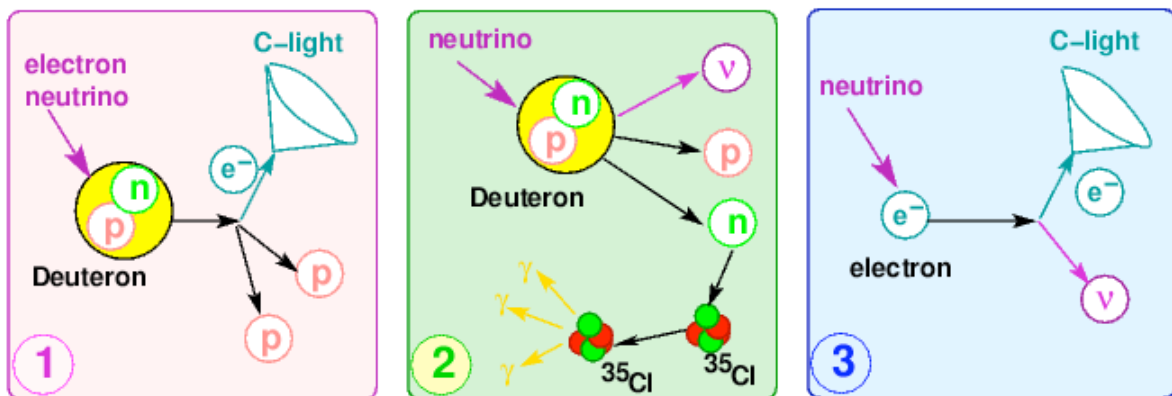
Astrophysikalischer Effekt oder Neutrino Oszillationen ?

Solar Neutrinos and SNO



SNO : Sudbury Neutrino Observatory

SNO measures ^8B solar neutrinos via following reactions using ultra-pure D_2O :



- | | | | |
|---|---------------------------------------|----|--|
| 1 | $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ | CC | only ν_e |
| 2 | $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ | NC | all ν -types |
| 3 | $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ | ES | all ν -types,
but reduced
sensitivity to ν_μ, ν_τ |

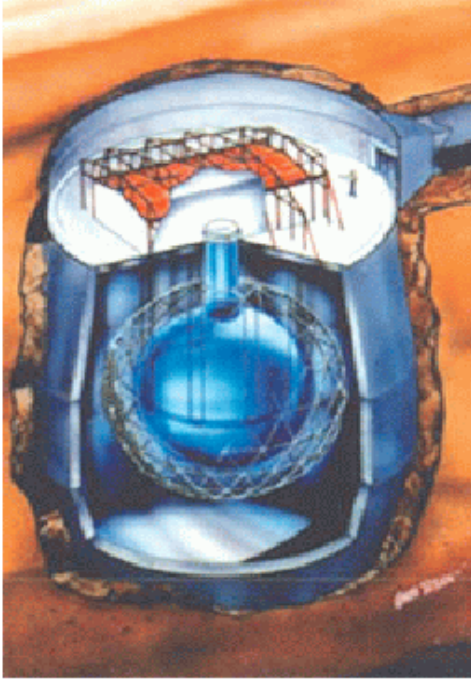
Comparison of ^8B -flux deduced from ES reaction, assuming no ν -oscillation ($\Phi_{\text{ES}}(\nu_x)$) to that measured by CC reaction ($\Phi_{\text{CC}}(\nu_e)$)

⇒ If ν 's from sun change to other ν -flavour:

$$\Phi_{\text{CC}}(\nu_e) < \Phi_{\text{ES}}(\nu_x)$$

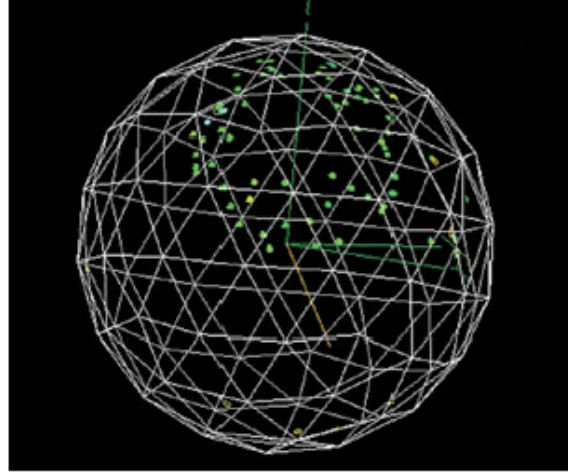
⇒ Evidence for oscillation without reference to solar model flux calculation

SNO Detector and Results



Schematic picture of SNO detector

Light cone from neutrino interaction with nucleus in the heavy water



Water Cherenkov detector 2000 m underground in a nickel mine near Sudbury (Ontario, Canada)
12 m diameter spherical vessel, 1000 tons of ultra-pure D_2O
9456 PMTs (20 cm diameter)
Energy threshold: 6.75 MeV

Results:

$$\Phi_{CC}(\nu_e) = (1.76^{+0.05}_{-0.05} \ ^{+0.09}_{-0.09}) 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi_{ES}(\nu_{\mu,\tau}) = (3.41^{+0.45}_{-0.45} \ ^{+0.48}_{-0.45}) 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$\Rightarrow 5.3 \sigma$ effect !!

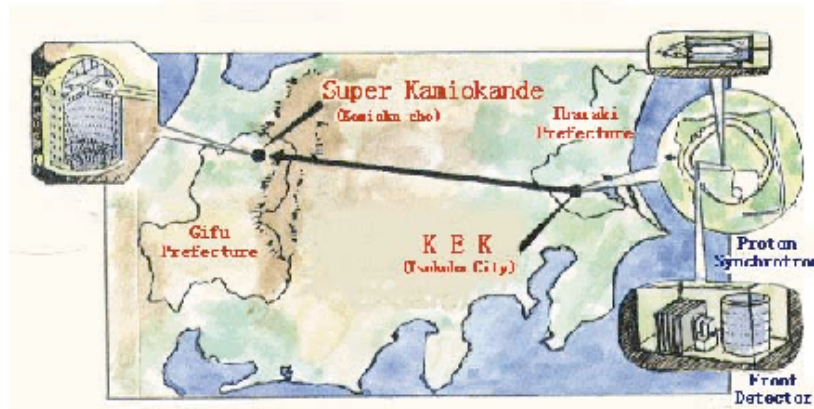
Total flux measured with NC reaction:

$$\Phi_{NC}(\nu_{e,\mu,\tau}) = (5.09^{+0.44}_{-0.43} \ ^{+0.46}_{-0.43}) 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

In agreement with SSM !!
SSM: Solar Standard Model

Future: Long-Baseline ν Experiments

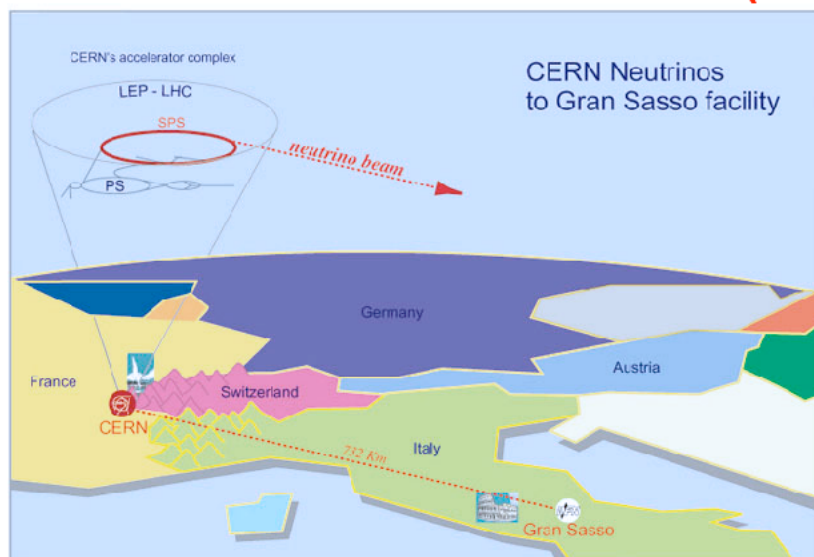
ν Beam from KEK to Superkamiokande: K2K



$\langle E_\nu \rangle \sim 1.4$ GeV, distance ~ 250 km, disappearance experiment
data taking started early 1999

Future: JHF ν : new 50 GeV high-intensity proton accelerator in JAERI (Tokai) for new neutrino beam to SuperK in Kamioka (295 km away from Tokai)

ν beam from CERN to Gran Sasso (Italy)



$\langle E_\nu \rangle \sim 25$ GeV, distance ~ 730 km, optimized for τ -appearance
approved in December 1999 start operation in 2006
Experiments: (ICARUS), OPERA

ν beam from Fermilab to Sudan Mine (USA)

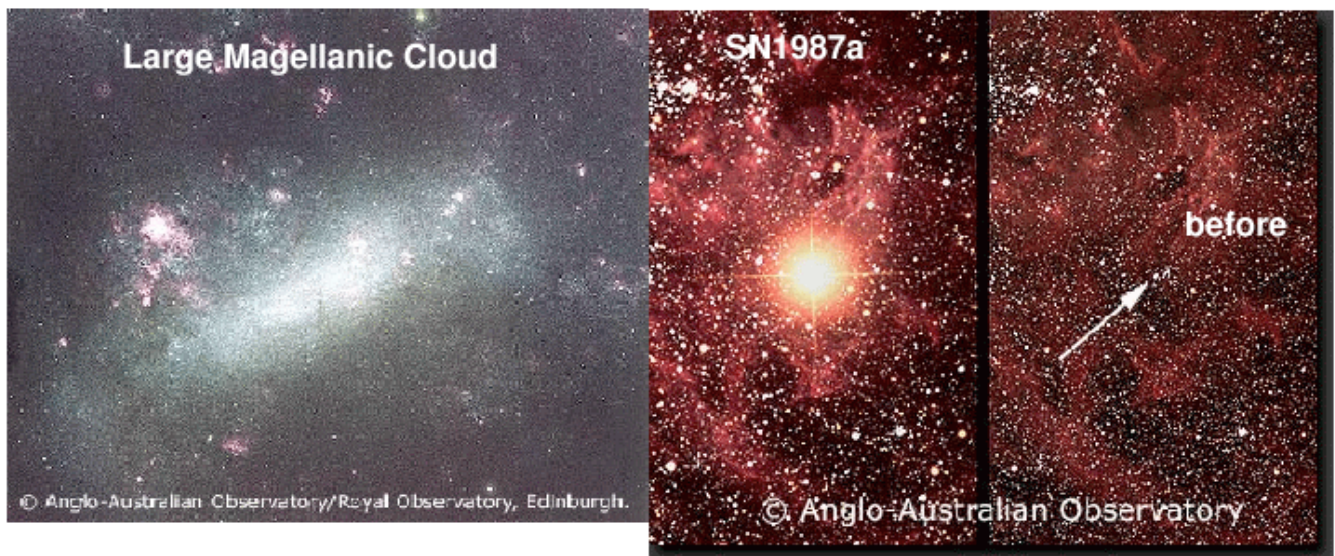
$\langle E_\nu \rangle \sim 10$ GeV, distance ~ 730 km, optimized for disappearance experiments
started operation in 2005
Experiment: MINOS

17.6 Neutrinos von Supernova 1987A

Am 23. Februar 1987: Stern kollabierte in Nachbargalaxie
Grosse Magellansche Wolke:
ca 170000 Lj entfernt

Supernova 1987A wurde nicht vorhergesagt !

Mit freiem Auge sichtbare SN: im Jahre 1006, 1572, 1604, 1987



Gravitationskollaps setzt ungeheure Energie frei:
kleiner Teil in Strahlung (obwohl hell scheint)
meister Anteil $\longrightarrow$ Neutrinos

Neutrinos: Einige Sekunden nach Explosion wird
äussere Schale ν -durchlässig
 $\longrightarrow$ fliegen durch den Raum
 ν mit $m_\nu \sim 0$: $v \sim c$

Strahlung: erst nach einiger Zeit fängt SN zu leuchten an
 $\implies$ Neutrinos sind vorher weggekommen !!

SN1987A und Untergrundexperimente

Wie hat man den Neutrino-Burst von SN1987A nachgewiesen ?

Untergrundexperimente messen Proton Lebensdauer

$\tau_{\text{Proton}} > 10^{32}$ Jahre
auch sensitiv zu ν 's von SN
(jedoch niemand suchte danach!)

Nach Nachricht über SN1987A: Analyse der Daten

Kamiokande Experiment (Japan): 10.3.1987 berichteten über ν -Signal vom 23.2.1987: Signal kam 3 Stunden vor dem Licht Signal an
Zeit der SN Ereignisse: Genauigkeit war 1 Minute (Stromausfall!!)

SN1987A: $\sim 10^{58}$ ν 's produziert
 $\sim 3 \cdot 10^{14}$ ν 's durch Detektor
11 davon aufgezeichnet

IBM Experiment (USA): Fanden 8 ν Ereignisse
→ bestätigten Kamiokande

- ⇒ Alles passte zusammen: Genau wie Supernova Theorie !!!
Grenze für m_ν : $m_\nu < 30 \text{ eV}/c^2$
Falls ν Masse hat → Photon kommt früher an
- ⇒ Heute sucht man systematisch nach SN Explosionen
auch in Untergrundexperimenten !!



SN1987A Rings
Hubble Space
Telescope

Physik Nobelpreis in 2002



Masatoshi Koshihara

University of Tokyo



Raymond Davis

University of
Pennsylvania



Riccardo Giacconi

Associated University
Inc., Washington, DC

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

For pioneering contributions
to astrophysics, which have
led to the discovery of cosmic
X-ray sources

R. Davis:

Beweis für Existenz von solaren Neutrinos

Hat in 1960-iger Jahren mit Experimenten in South Dakota
(USA) Goldmine begonnen (bis 1994)

M. Koshihara:

Kamiokande Experiment in Japan

Solare Neutrinos bestätigt, Neutrinos von der Supernova 1987A
atmosphärische Neutrinos: 1. Evidenz für Neutrino Oszillationen

R. Giacconi:

Teleskop für X-ray Detection: Strahlung aus dem Kosmos
entdeckt

später: Satellitenexperimente (erstes Experiment 1970):
grosse Zahl von X-ray Quellen entdeckt