

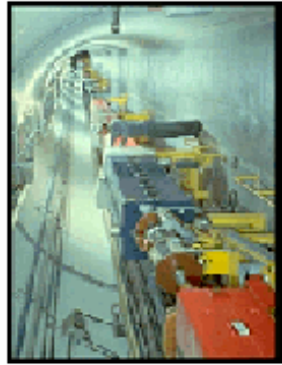
KAPITEL 17 :

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

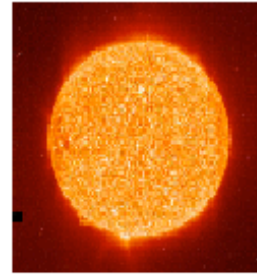


**Beschleuniger
Teilchenstrahlen:**
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



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

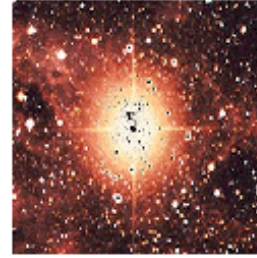
Natürliche Neutrino Quellen



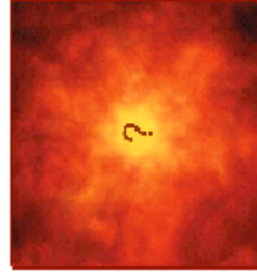
Sonne
 $10^{-6} \nu_e / \text{cm}^3$



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}):

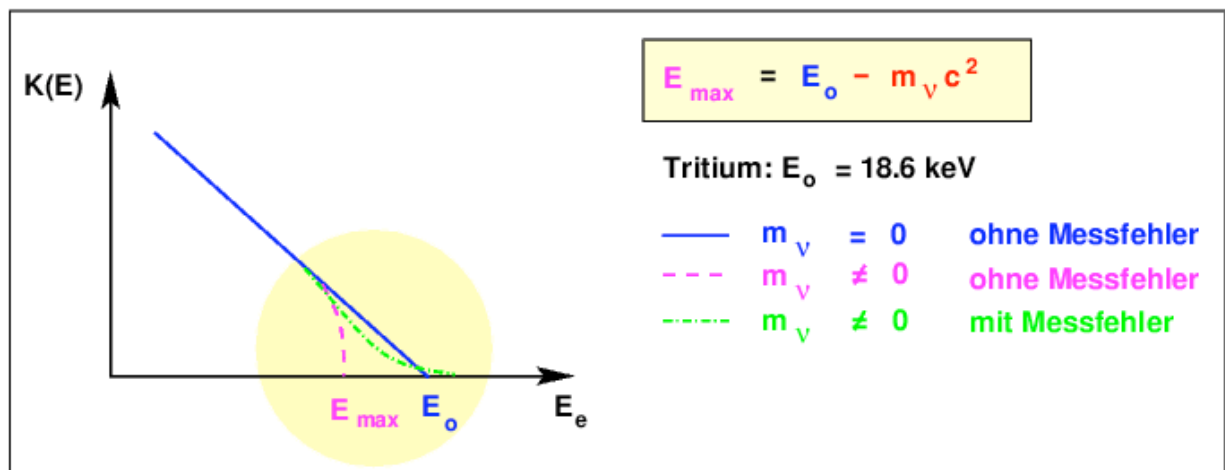
Kurve schneidet Achse senkrecht:

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

$\longrightarrow m_{\nu}$ bestimmbar

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

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



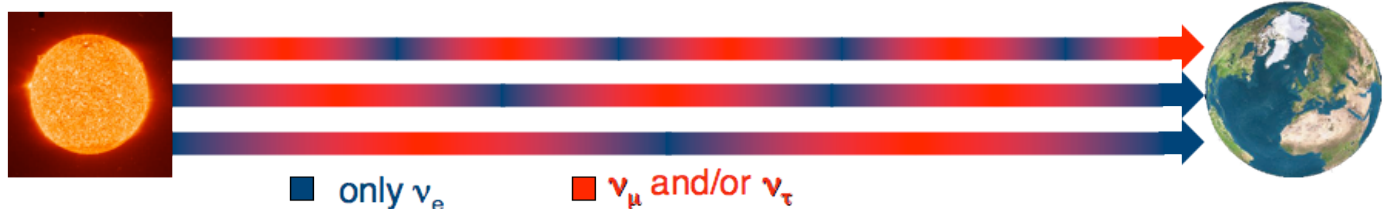
17.3 Neutrino Oszillationen

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)

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

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



Oszillationswahrscheinlichkeit:

→ $\Delta m = 0$: $P = 0$.

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

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

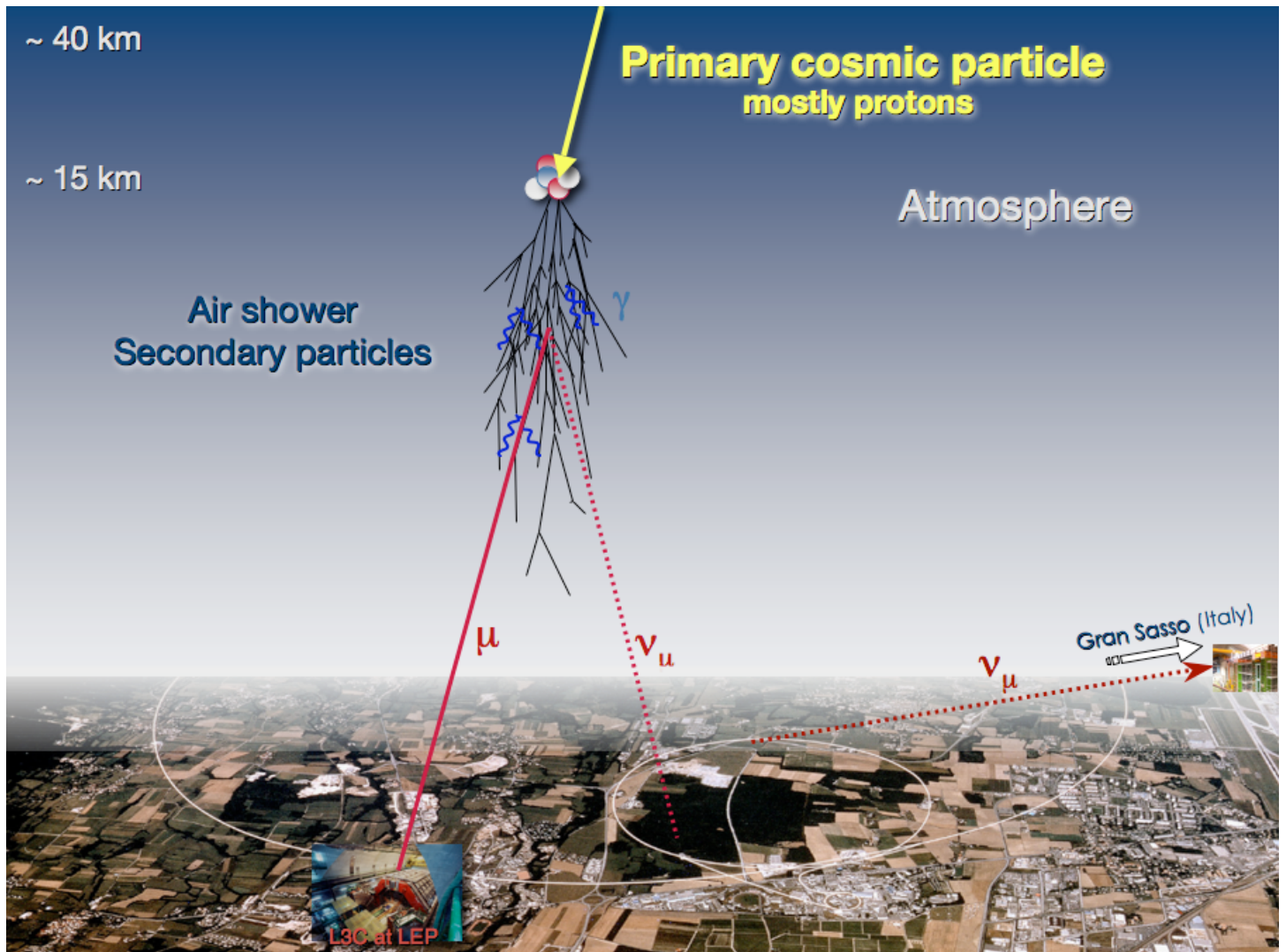
Ungefähre Bereiche der Neutrinoenergien E , des Abstandes L sowie Empfindlichkeitsgrenzen $\Delta m_{\min}^2$ für verschiedene ν -Quellen in Oszillationsexperimente:

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

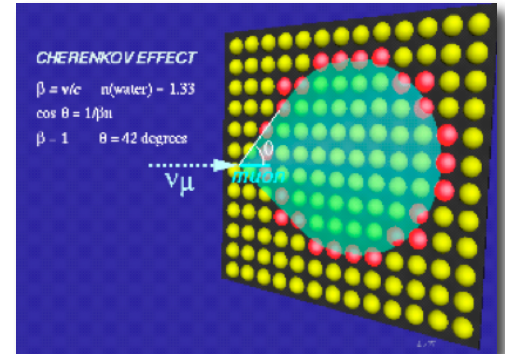
17.4 Atmosphärische Neutrinos



Atmosphärische Neutrinos: $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$
 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

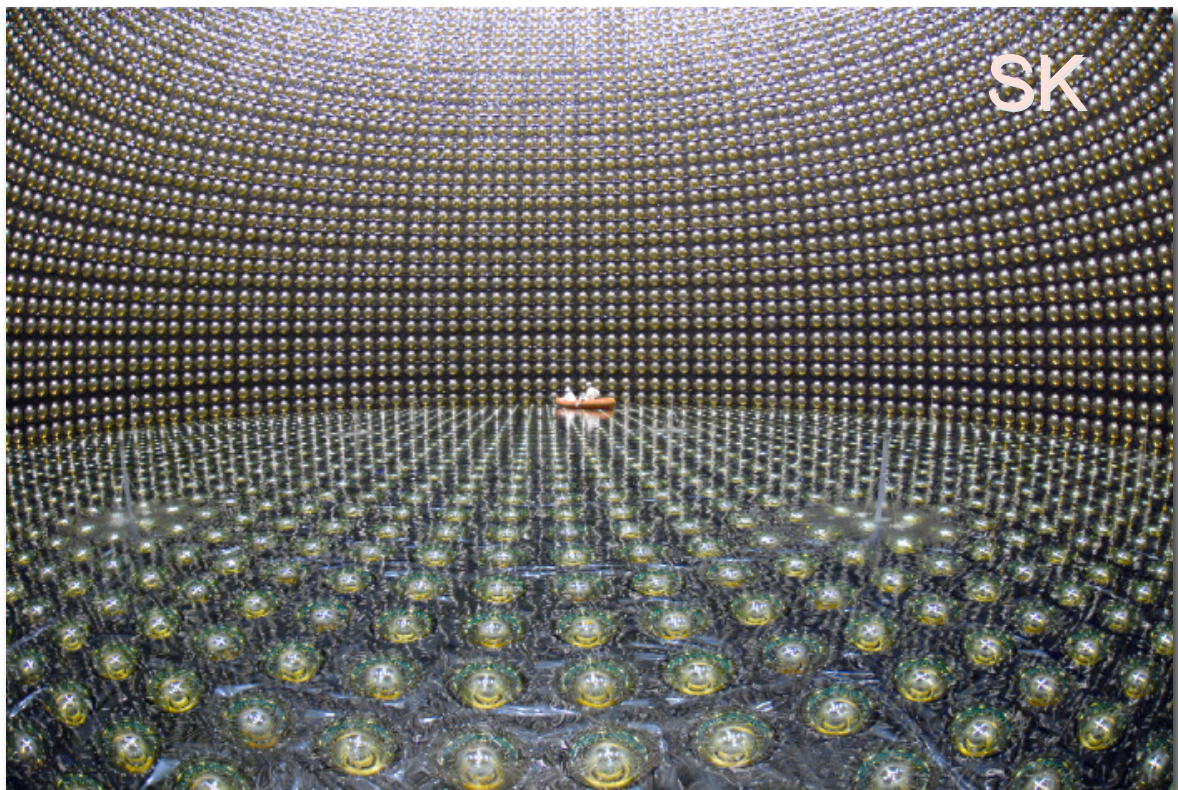
Super-Kamiokande (SK) Experiment

Super-Kamiokande Experiment located 1'000 m underground in Kamioka mine (Japan) observed solar and atmospheric neutrino interactions in 50'000 tons of pure water
Measure Cherenkov light from leptons (e or μ)



Signals:

1. Solar neutrino anomaly
2. First evidence of neutrino oscillations from atmospheric ν 's in 1998



11'200 PMs, PM diameter = 50 cm

Energy threshold: 5 MeV

Detector: cylinder of 41.2 m (height) x 39.3 m (diameter)

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 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$:

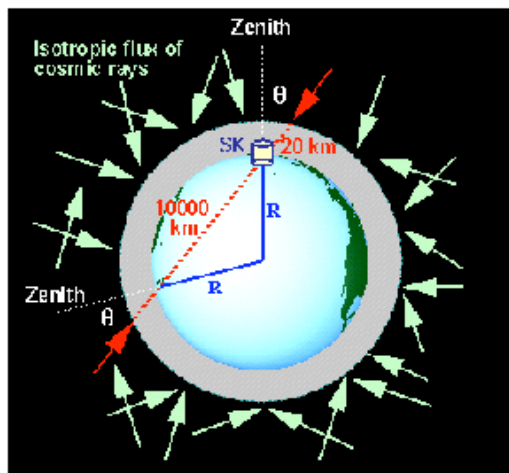
Predict: $R = \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \sim 2$

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 $A = \frac{\text{up-down}}{\text{up+down}}$:
expect zenith-distribution symmetric if no oscillation

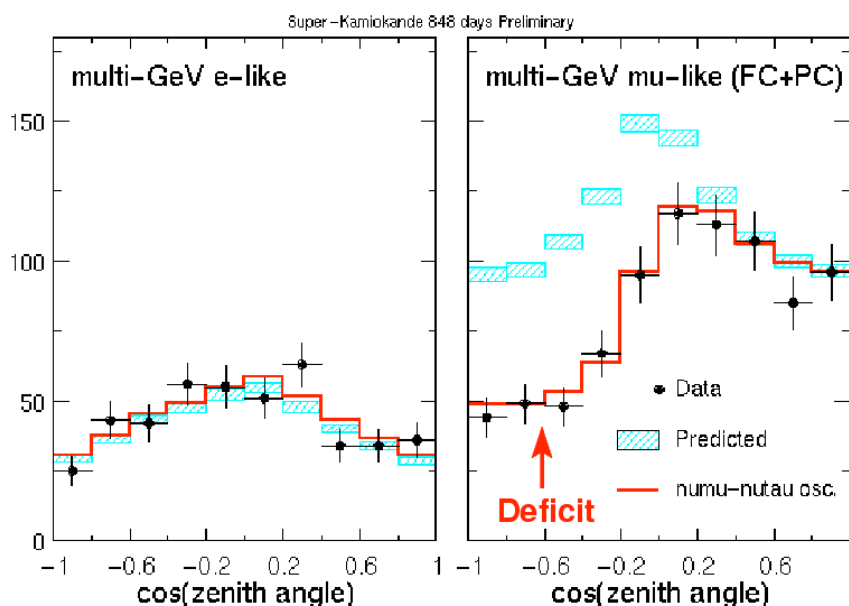


Data: μ -events:

$A = 0.2963 \pm 0.048 \pm 0.01$

Data: e-events:

A consistent with 0



Data are consistent with neutrino oscillation:

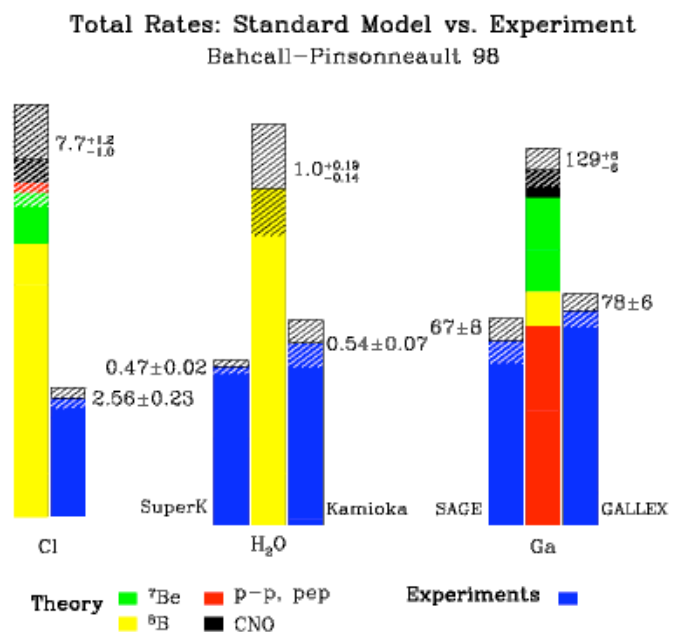
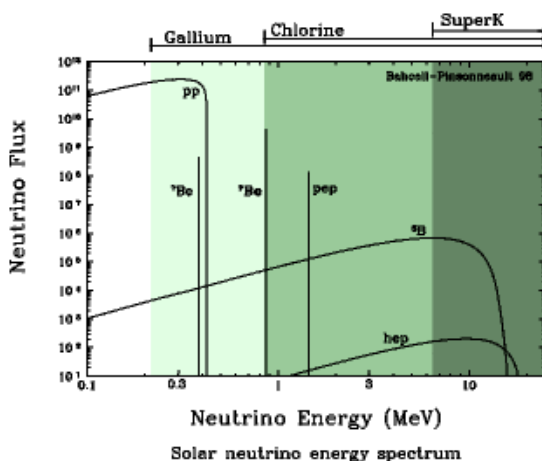
$\nu_\mu \longrightarrow \nu_x$

$\Delta m^2 = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 2\Theta \sim 1$

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

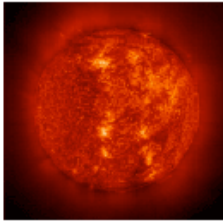


1 SNU = 1 ν_e -Einfang pro Sekunde und pro 10^{36} Targetteilchen
SNU = Solar Neutrino Unit

Ergebnis: Defizit gegenüber Standard Solar Modell (SSM)
Vorhersage

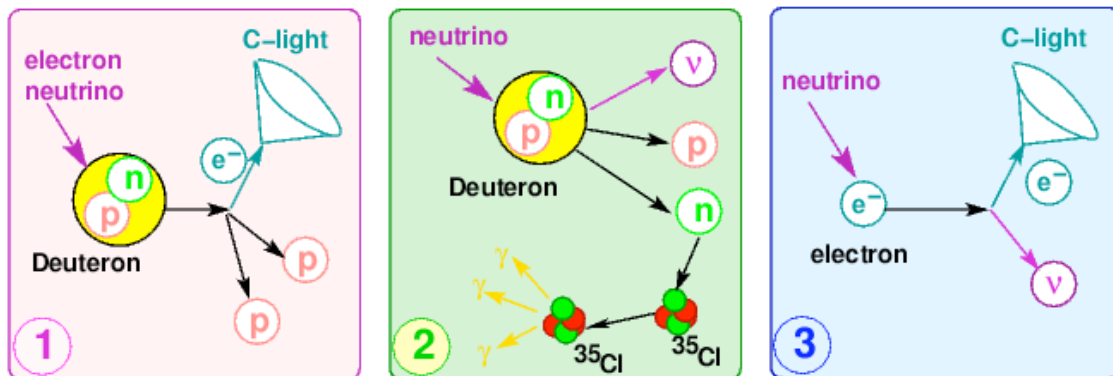
Astrophysikalischer Effekt oder Neutrino Oszillationen ?

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 ($\Phi_{\text{CC}}(\nu_e)$)

$\Rightarrow$ If ν 's from sun change to other ν -flavour:

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

$\Rightarrow$ Evidence for oscillation without reference to solar model flux calculation

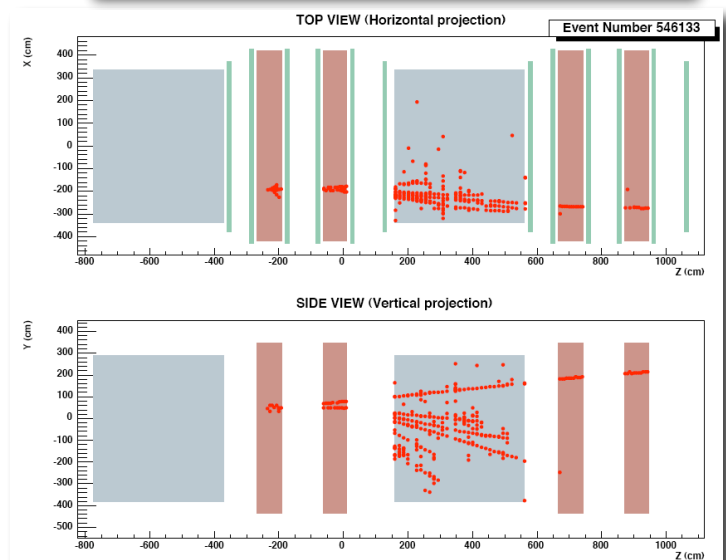
SNO measured $\Phi_{\text{CC}}(\nu_e) < \Phi_{\text{ES}}(\nu_x)$ and $\Phi_{\text{NC}}(\nu_{e,\mu,\tau})$
 $\Phi_{\text{NC}}(\nu_{e,\mu,\tau})$ is in agreement with Solar Standard Model

Future: Long-Baseline ν Experiments

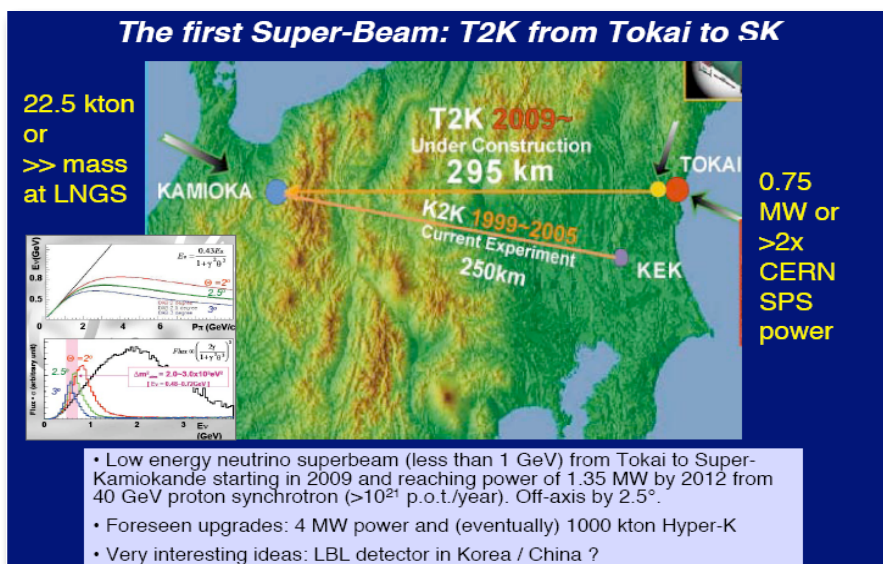
- CERN neutrino beam to Gran Sasso underground laboratory at 730 km distance from CERN



First ν events detected with OPERA in August 2006



- ν -beam from FERMILAB to Sudan Mine (USA) at 730 km distance; started in 2005; MINOS experiment
- T2K (Tokai to Kamioka) in Japan: start in 2009 SK Experiment in Kamioka at 295 km distance



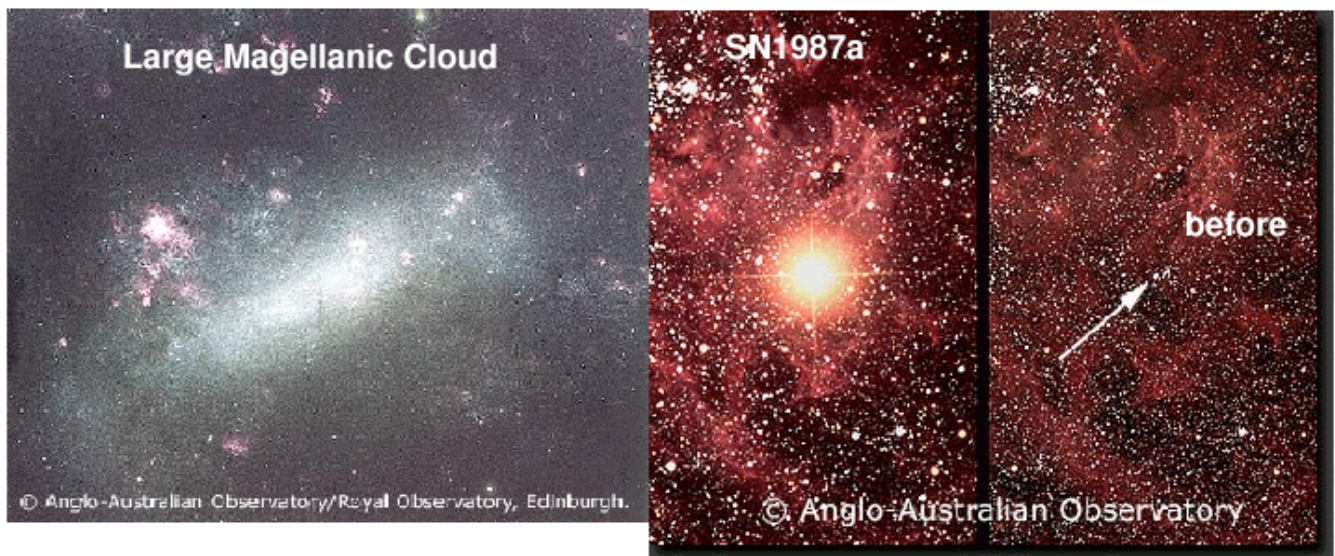
A very high intensity ν -beam (super beam) is presently constructed at Tokai
 ➔ measure precisely the ν mixing parameters

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 Koshiba

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. Koshiba:

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