

Einführung in die moderne Teilchenphysik

Dr. Stefan Schael
Max-Planck Institut für Physik
Werner Heisenberg Institut
Föhringer Ring 6
D-80805 München

1. Das Standardmodell der Teilchenphysik
2. Teilchenbeschleuniger & Teilchendetektoren
3. Erhaltungssätze und Symmetrien
4. Die elektroschwache Wechselwirkung I & Neutrinos
5. Die elektroschwache Wechselwirkung II
6. Das Top Quark
7. Physik mit B-Hadronen
8. CP Verletzung
9. Das ATLAS Experiment
10. Grenzen des Standardmodells

Literatur:

- F. Halzen, A.D. Martin, "Quarks & Leptons",
An Introductory Course in Modern Particle Physics,
John Wiley & Sons, Inc.
- N. Schmitz, "Neutrino-physik", Teubner Studienbücher

ftp:

[afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/](ftp://afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/)

Einleitung

Leptonen				
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	e-Neutrino	ν_e	$< 15 \cdot 10^{-6}$	0
	Elektron	e^-	0.511	-1
II	μ-Neutrino	ν_μ	< 0.17	0
	Myon	μ^-	105.7	-1
III	τ-Neutrino	ν_τ	< 24	0
	Tau	τ^-	1777	-1

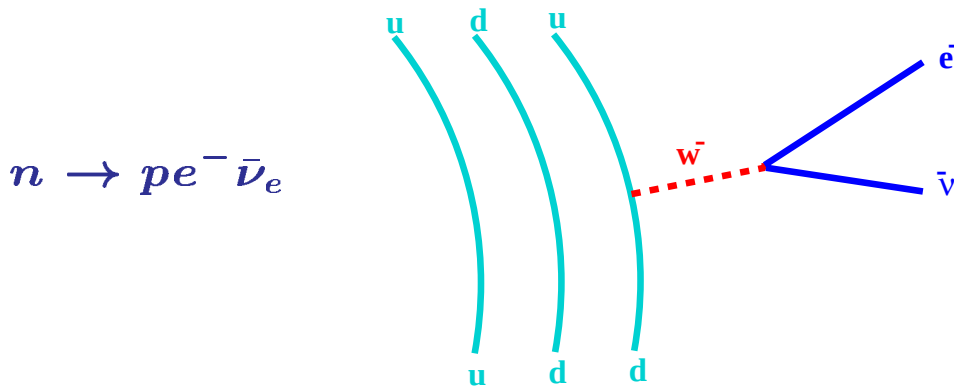
Quarks				
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	up	u	≈ 5	$+2/3$
	down	d	≈ 7	$-1/3$
II	charm	c	≈ 1500	$+2/3$
	strange	s	≈ 150	$-1/3$
III	top	t	≈ 180000	$+2/3$
	beauty	b	≈ 4500	$-1/3$

Die einzigen Fermionen deren Masse wir nicht kennen sind die **Neutrinos**.

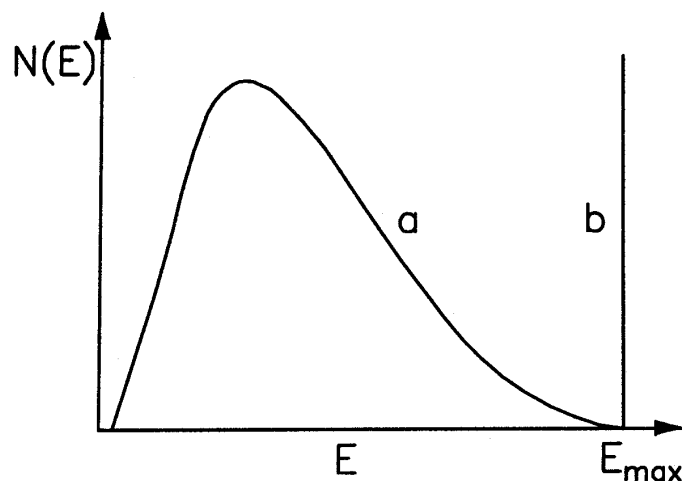
Sie sind elektrisch Neutral und tragen keine Farbladung. Sie reagieren daher nur über der **schwache Wechselwirkung** mit Materie.

Neutrinos können daher nur indirekt nachgewiesen werden.

• Schwache Wechselwirkung: β Zerfall des Neutrons



Bis 1930 waren nur 2 fundamentale Teilchen, das Proton und das Elektron bekannt. Die Energie des Elektrons konnte im β Zerfall gemessen werden:



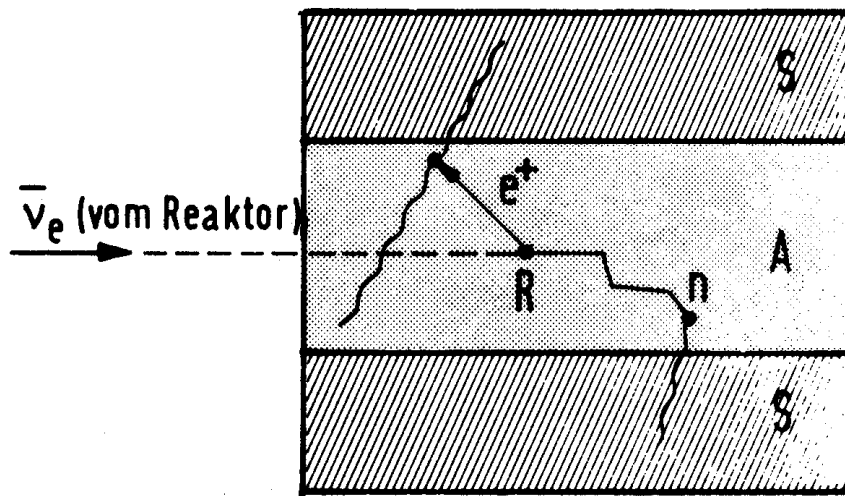
Im Ruhesystem des Neutrons gilt: $E_p + E_e = M_n$

$$\Rightarrow E_e = M_n - E_p \approx M_n - M_p = 1.29 \text{ MeV}.$$

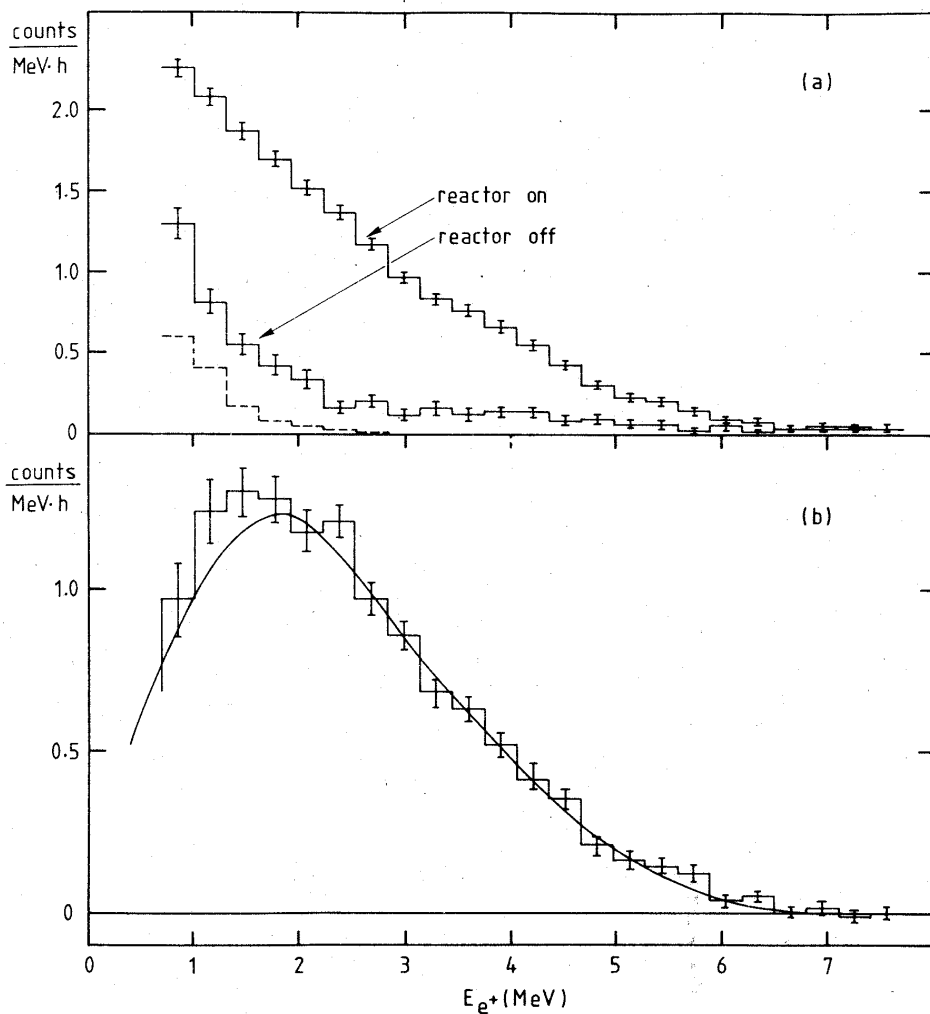
Um den Energieerhaltungssatz zu retten, postulierte Wolfgang Pauli die Existenz eines neutralen, leichten und nur schwach wechselwirkenden Teilchen das im β -Zerfall erzeugt werden sollte, das **Neutrino**.

Nachweis der Elektron-Neutrinos

Umgekehrter β -Zerfall: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$



Gelang erstmals 1960 Cowan und Reines.



Messung der Elektron-Neutrino Masse

• $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$: Im Neutron Ruhesystem gilt:

$$\vec{p}_p + \vec{p}_\nu + \vec{p}_e = 0, \quad E_p + E_\nu + E_e = m_n$$

$$E_p^2 = m_p^2 + p_p^2 \approx m_p^2$$

$$\Rightarrow m_p + E_\nu + E_e = m_n$$

$$E_\nu + E_e = m_n - m_p = E_0$$

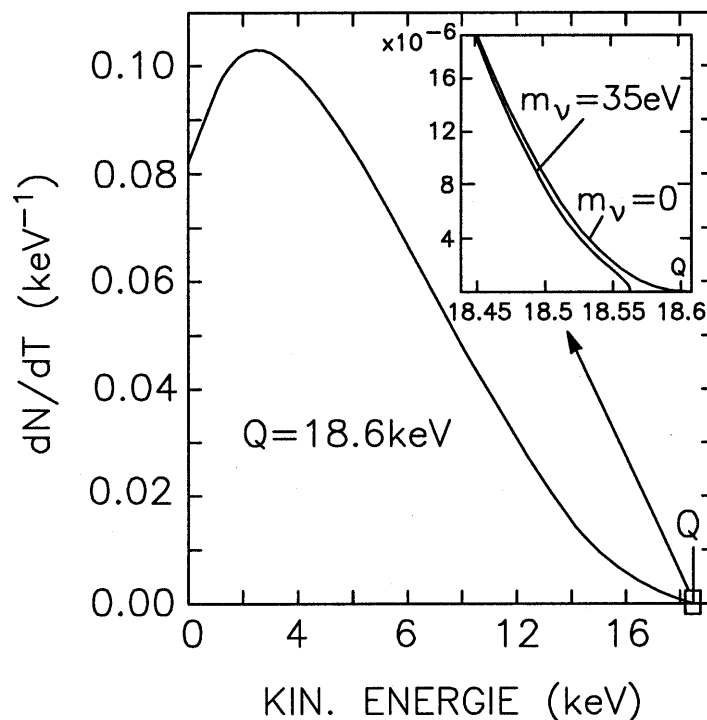
$$E_e = E_0 - \sqrt{m_\nu^2 + p_\nu^2}$$

$$\Rightarrow E_e^{max} = E_0 - m_\nu$$

Aus der Messung des Endpunktes des Energiespektrums der Elektronen aus dem β -Zerfall von Tritium:



stammt das beste Limit auf die ν_e -Masse: $m(\nu_e) < 3.5 \text{ eV}$



Nachweis des Myons

C. Anderson (1937) und B. Rossi (1942).

In der kosmischen Höhenstrahlung:

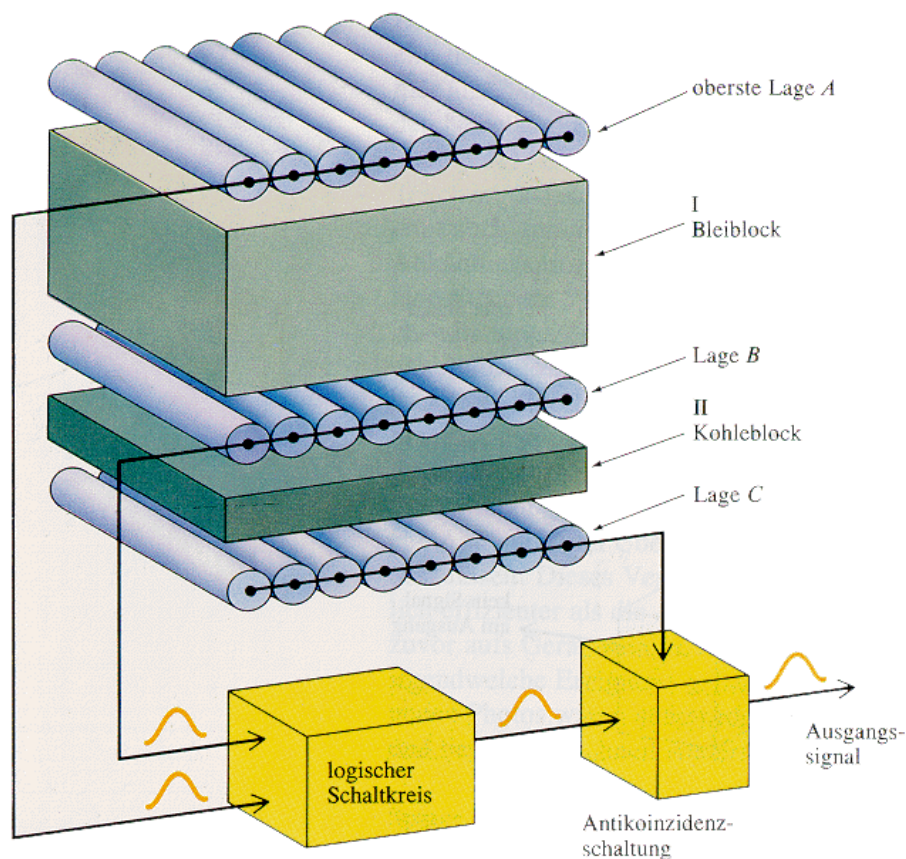
$$p + \text{air nucleus} \rightarrow \pi^{\pm} + X,$$

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}),$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

- $m(\pi^{\pm}) = 139.57 \text{ MeV}$,
- $m(\mu^{\pm}) = 105.65 \text{ MeV}$,
- $m(e^{\pm}) = 0.51099 \text{ MeV}$.

Nachweis mit Hilfe einer Antikoinzidenzschaltung:

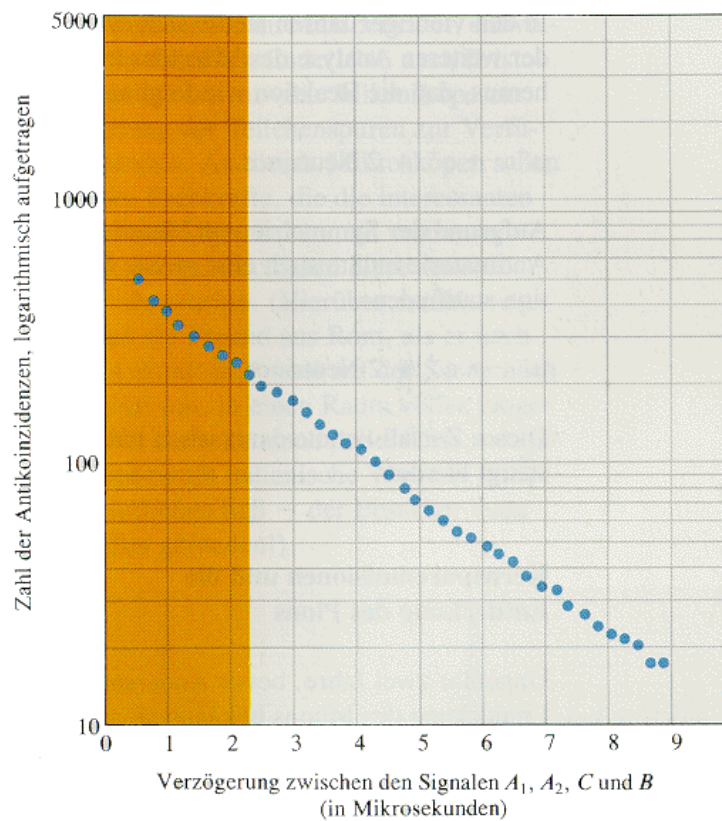


Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

τ ist die **mittlere Lebensdauer** des Teilchens, d.h. die Zeit, nach der nur noch 37% der ursprünglichen Teilchen “überlebt” haben.

$$N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\tau/\tau} = N_0 \cdot e^{-1} \Rightarrow \frac{N(\tau)}{N_0} = 0.37$$



$$1942 : T_\mu = (2.30 \pm 0.17) \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$1996 : T_\mu = (2.19703 \pm 0.00004) \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Die Myonen werden in ca. 10 km Höhe mit einer Energie von $E \approx 5 \cdot 10^9 \text{ eV}$ erzeugt.

$$s = T_\mu \cdot c \approx 600 \text{ m}$$

Wie können die Myonen die Erde erreichen ?

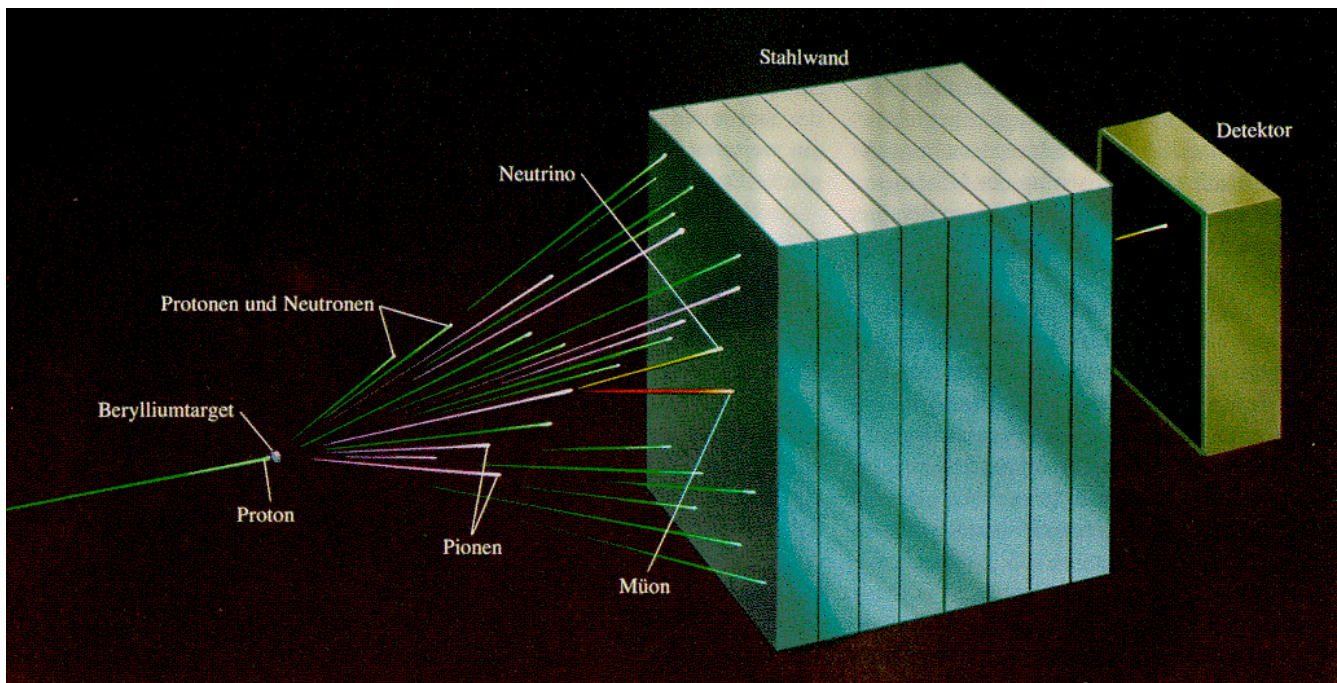
Lorenz-Transformation:

$$\begin{aligned} s' &= v \cdot \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \beta^2}} = v \cdot \gamma \cdot \Delta t = \frac{v}{c} \cdot \gamma \cdot c \cdot \Delta t \\ &= \beta \cdot \gamma \cdot c \cdot \Delta t = \frac{p}{m} \cdot c \cdot \Delta t \approx \frac{E}{m} \cdot c \cdot \Delta t \\ &= \frac{5 \cdot 10^9 \text{ eV}}{1 \cdot 10^8 \text{ eV}} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 30 \text{ km.} \end{aligned}$$

mit $\beta = v/c = p/E$, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = E/m$ und $m_\mu = 105.66 \cdot 10^6 \text{ eV}$.

Die Entdeckung des Myon-Neutrinos

1961 am Brookhaven Proton-Synchrotron.

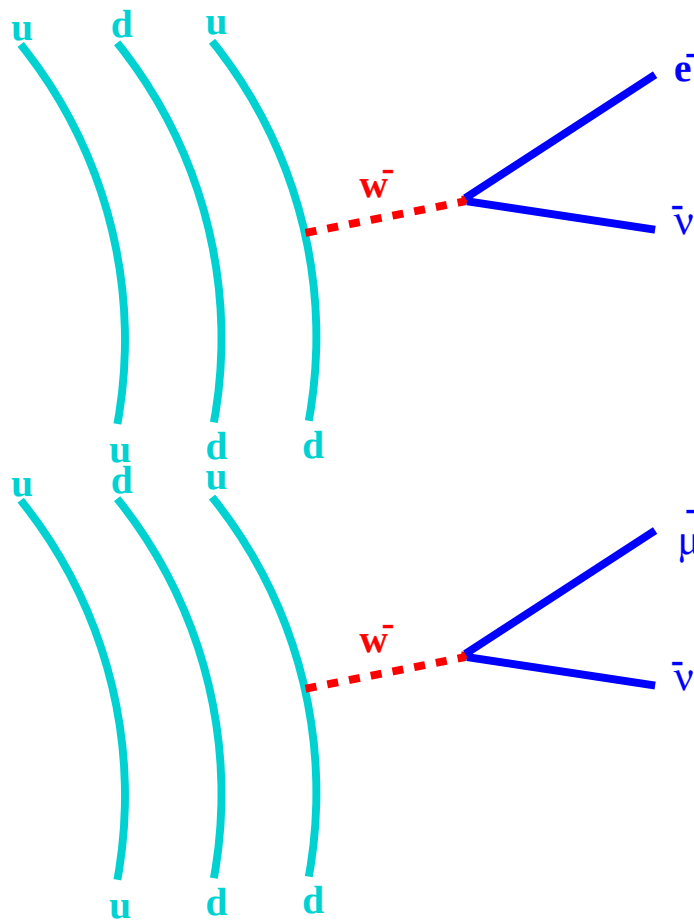


Abschirmung aus 12 m dickem Panzerstahl aus einem abgewracktem Schlachtschiff aus dem zweiten Weltkrieg.

Dies war der erste hochintensive Neutrinostrahl. Innerhalb von 8 Monaten konnten 56 Kollisionen nachgewiesen werden.

Nachweis durch inversen Betazerfall:

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p \text{ und } \nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$



Für diese Arbeit erhielten Jack Steinberger, Melvin Schwarz und Leon Ledermann 1988 den Nobelpreis.

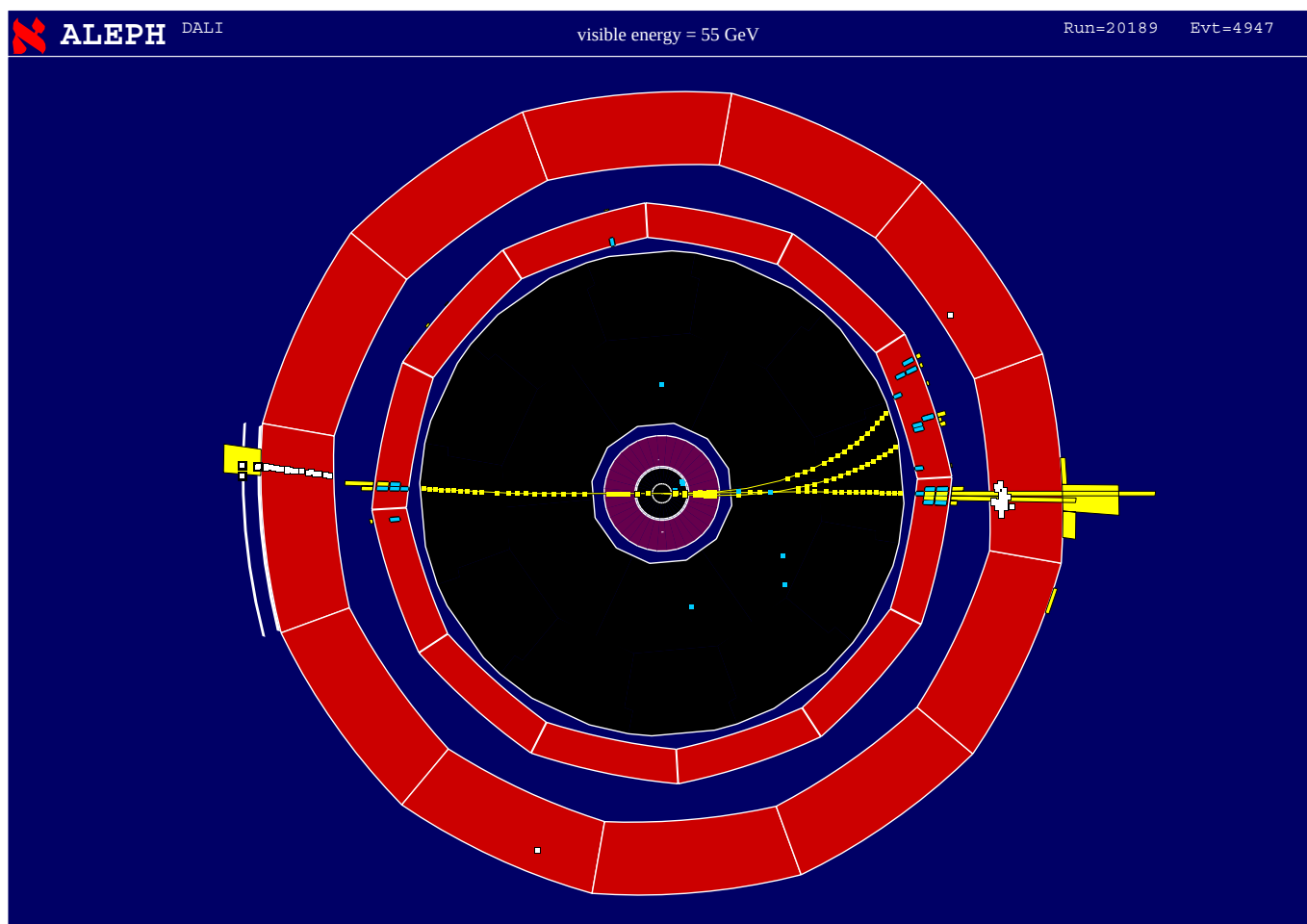
1976 wurde am e^+e^- -Collider SPEAR in Stanford das τ -Lepton erstmals von Martin Perl (Nobelpreis 1995) nachgewiesen. Der direkte Nachweis des τ -Neutrinos durch die Reaktion:

$$\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p$$

steht bis heute aus.

$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$
- $\tau^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- \nu_\tau$



- $m(\tau) = (1777.00 \pm 0.30) \text{ MeV},$
- $\tau(\tau) = (0.2910 \pm 0.0015) \cdot 10^{-12} \text{ s},$
- $c\tau = 87.2 \text{ } \mu\text{m}.$

Jack Steinberger

War Leiter der ALEPH-Collaboration von 1983 - 1986.

Er arbeitet noch heute am CERN.



Sein Rat ist noch immer gefragt: Nobelpreisträger Jack Steinberger, 77, erscheint täglich an seiner alten Wirkungsstätte

- Geboren 1921 in Bad Kissingen.
- Ausgewandert 1934 in die USA.
- Promotion bei Enrico Fermi 1948.
- Nobelpreis für Physik 1988.

Neutrino Massen

- $m(\nu_e) < 3.5 \text{ eV}$

Die Masse des μ -Neutrinos:

Sie wird in dem Zerfall $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$ bestimmt.

Im $\pi^\pm$ Ruhesystem gilt:

$$m_\pi = E_\mu + E_\nu = \sqrt{m_\mu^2 + p_\mu^2} + \sqrt{m_\nu^2 + p_\nu^2}$$

und $0 = \vec{p}_\mu + \vec{p}_\nu \Rightarrow \vec{p}_\nu = -\vec{p}_\mu$

$$\Rightarrow m_\nu^2 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi \sqrt{m_\mu^2 + p_\mu^2}$$

Die Pion-Massenbestimmung beruht auf der Energiemessung von Röntgenstrahlung aus Übergängen von pionischen Atomen.

$$m(\pi^-) = (139.56995 \pm 0.00035) \text{ MeV} \quad (2.5 \text{ ppm})$$

Die Myon Masse wird aus seinem magnetischen Moment bestimmt:

$$m_\mu = (105.658389 \pm 0.000034) \text{ MeV} \quad (0.3 \text{ ppm})$$

Der Myonimpuls wird mit einem Magnetspektrometer gemessen:

$$p_\mu = (29.79200 \pm 0.00011) \text{ MeV} \quad (4 \text{ ppm})$$

$$\Rightarrow m(\nu_\mu)^2 = (-0.016 \pm 0.023) \text{ MeV}^2$$

$$\Rightarrow m(\nu_\mu)^2 = (-0.016 \pm 0.023) \text{ MeV}^2$$

$$\Leftrightarrow m(\nu_\mu) < 0.17 \text{ MeV} \text{ (90\% CL)}$$

Die Masse des τ -Neutrinos:

Sie wird an e^+e^- -Collidern in $\tau^\pm$ -Zerfällen

$$\tau \rightarrow \nu_\tau + \textit{Hadronen}$$

die in der Reaktion $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ mit fester Energie $E_{cms}/2$ erzeugt werden, gemessen.

Dazu wird der Zerfall:

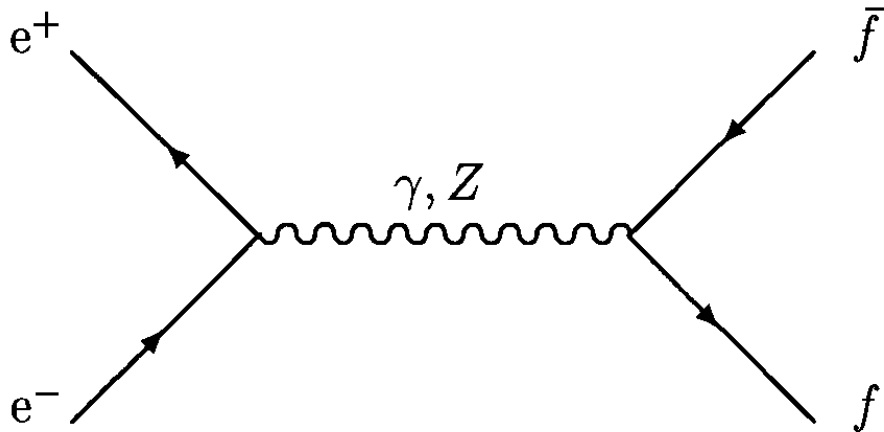
$$\tau \rightarrow \nu_\tau + 5\pi^\pm$$

verwendet, da die Energie des ν_τ im τ -Ruhesystem um so kleiner ist, je größer die Masse des Hadronsystems ist.

$$m(\nu_\tau) < 24 \text{ MeV} \text{ (95\% CL) (ALEPH 1995)}$$

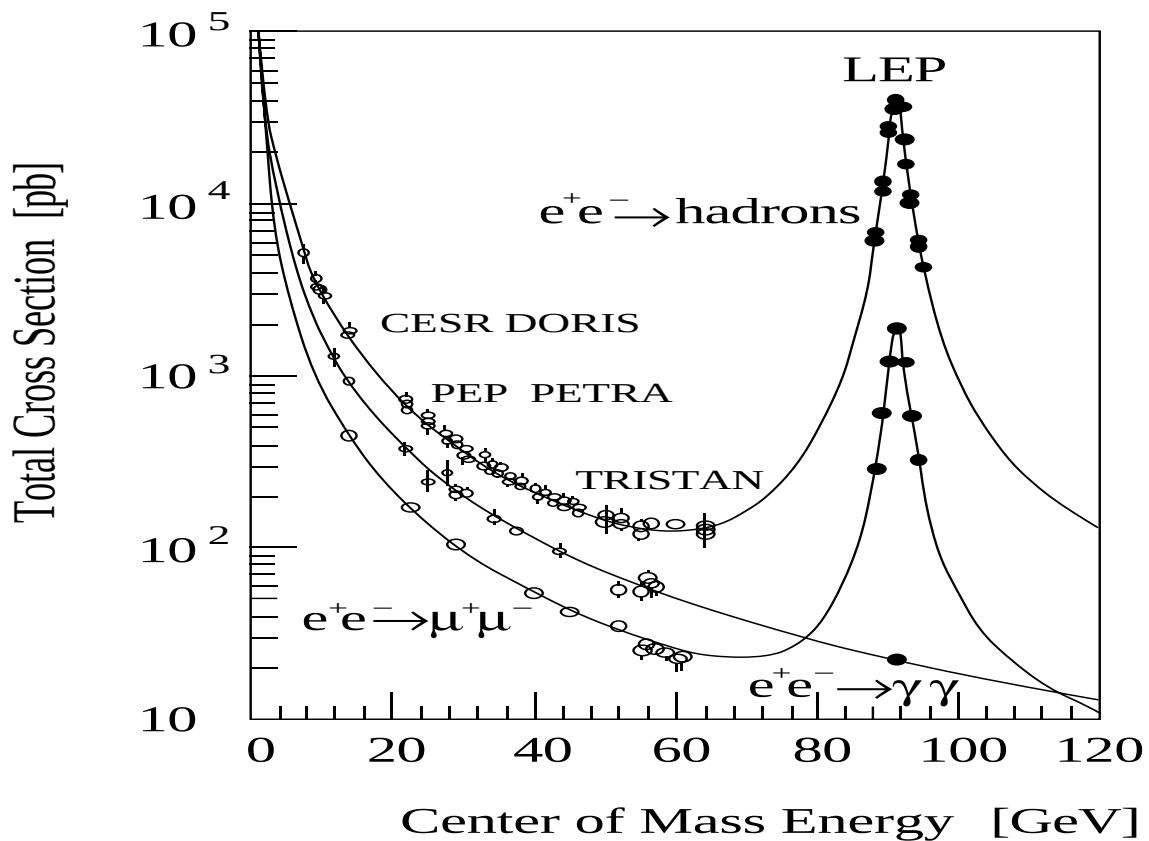
Wie viele Neutrinos gibt es ?

Schwache WW: Elektron-Positron Annihilation



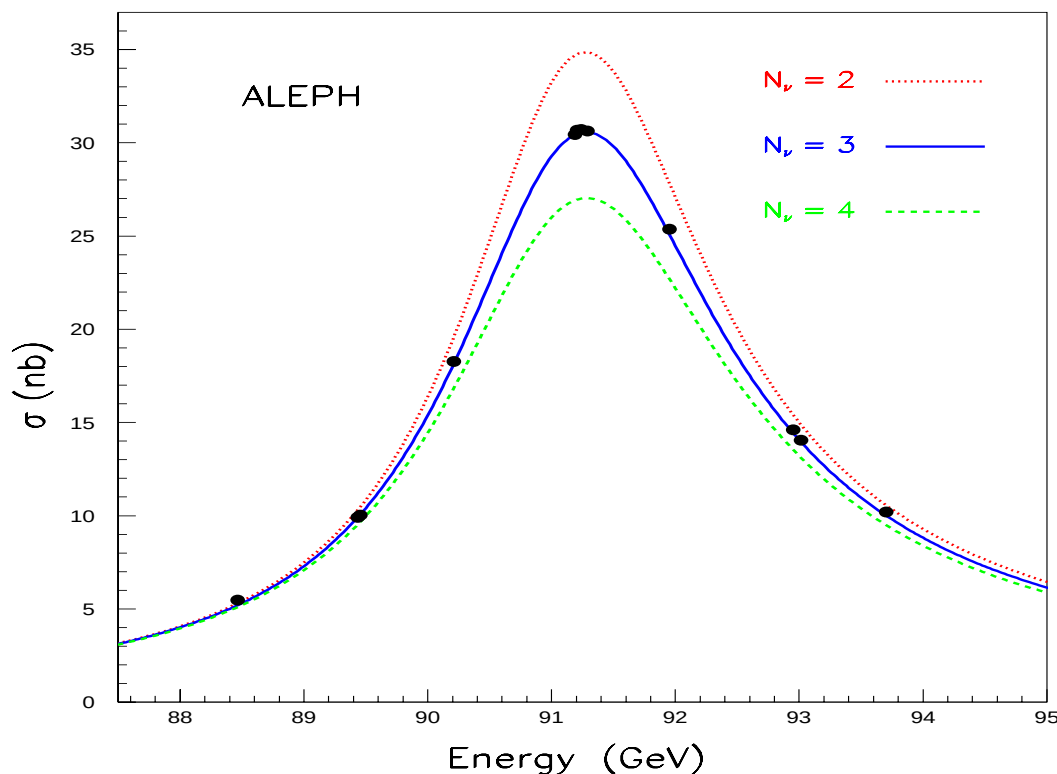
• $N_{f\bar{f}} = L \cdot \sigma_{f\bar{f}}$

Die Luminosität L ist eine Beschleunigereigenschaft.



$$\sigma_{f\bar{f}}(s) = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{\Gamma_Z} \cdot \frac{s\Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2\Gamma_Z^2}$$

- $\sqrt{s} = E_{cm} = 91 \text{ GeV}$
- $\tau(Z) = \hbar/\Gamma_Z = 2.643 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- $\Gamma_Z = \sum_f \Gamma_{f\bar{f}}$



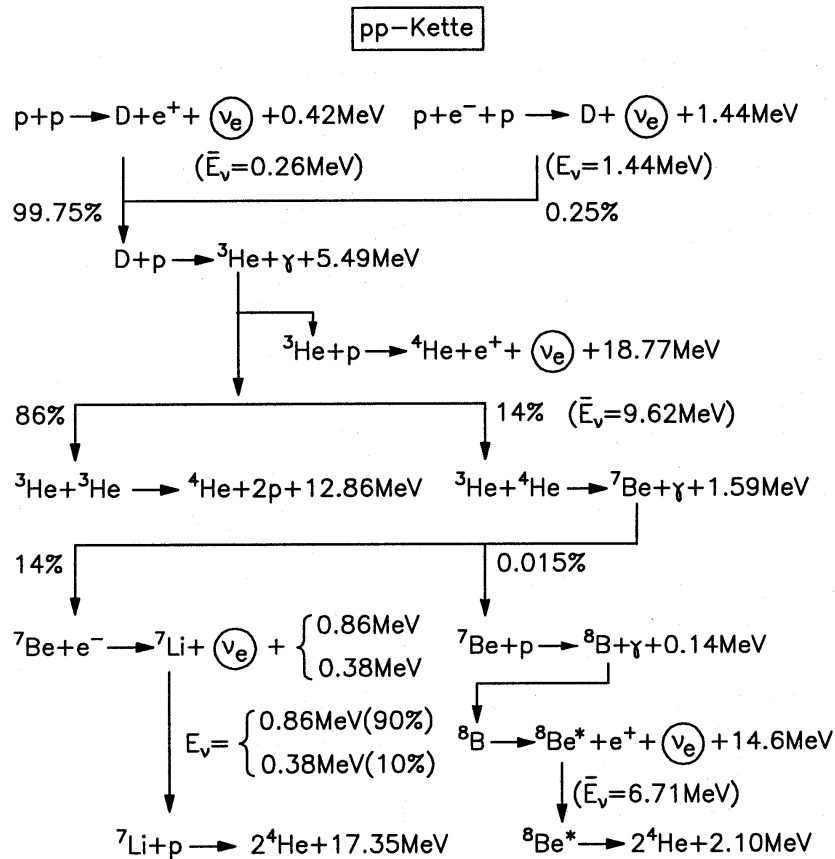
$$\Gamma_{inv} = N_\nu \cdot \Gamma_{\nu\nu}^{SM} = \Gamma_Z - \sum_q \Gamma_{q\bar{q}} - \sum_l \Gamma_{l+l-}$$

$$N_\nu = 2.993 \pm 0.011$$

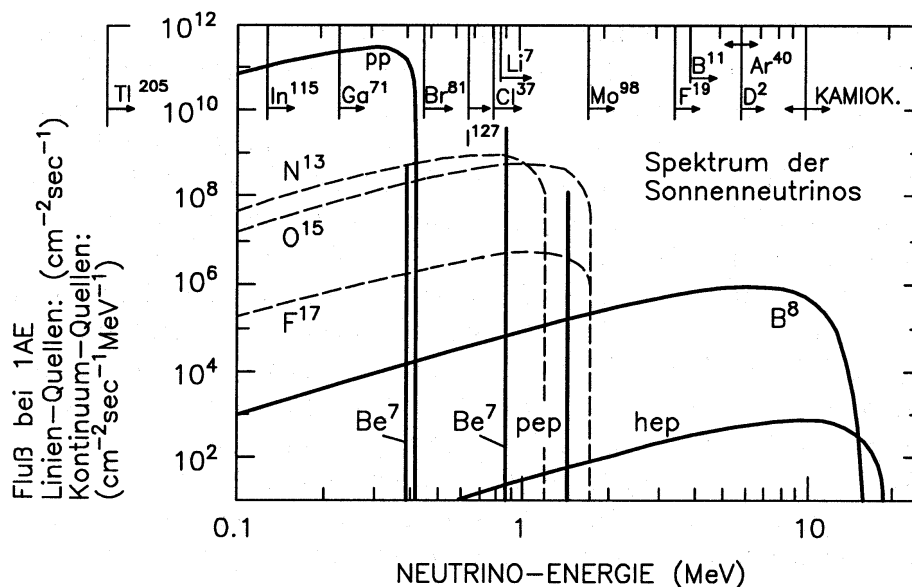
Es gibt nur 3 Arten von Neutrinos mit $m_\nu < 45 \text{ GeV}$!!!

Das Rätsel der Solarneutrinos

ν_e werden in der Sonne bei folgenden Prozessen erzeugt:



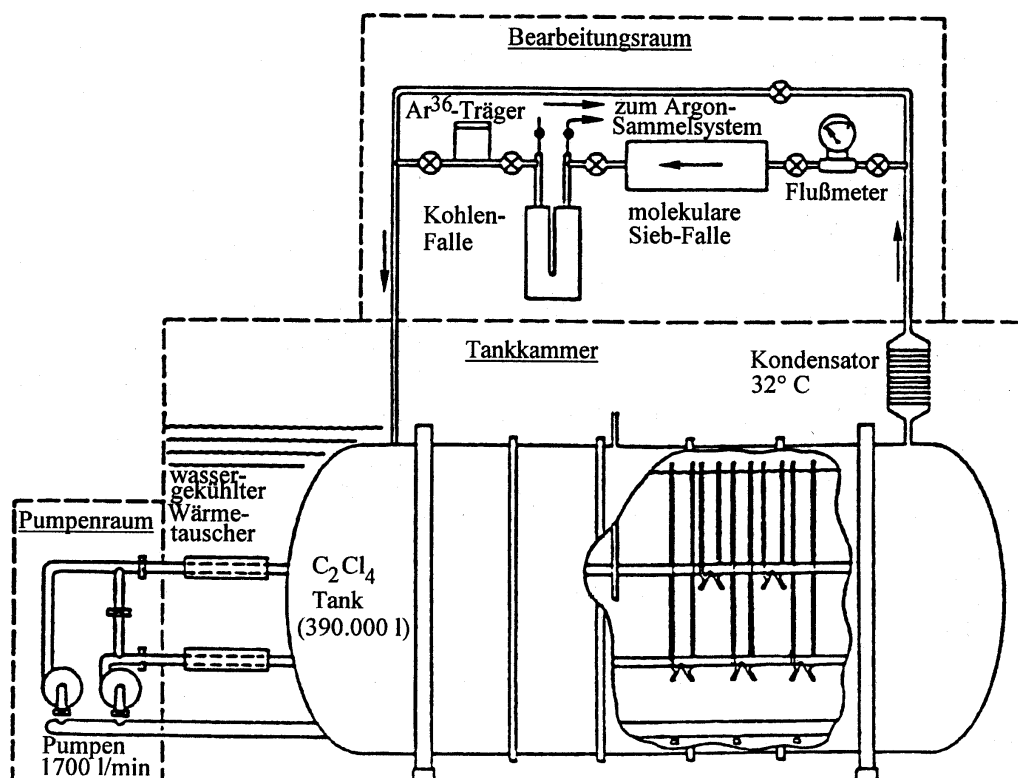
Die Neutrinos haben folgendes Energiespektrum:



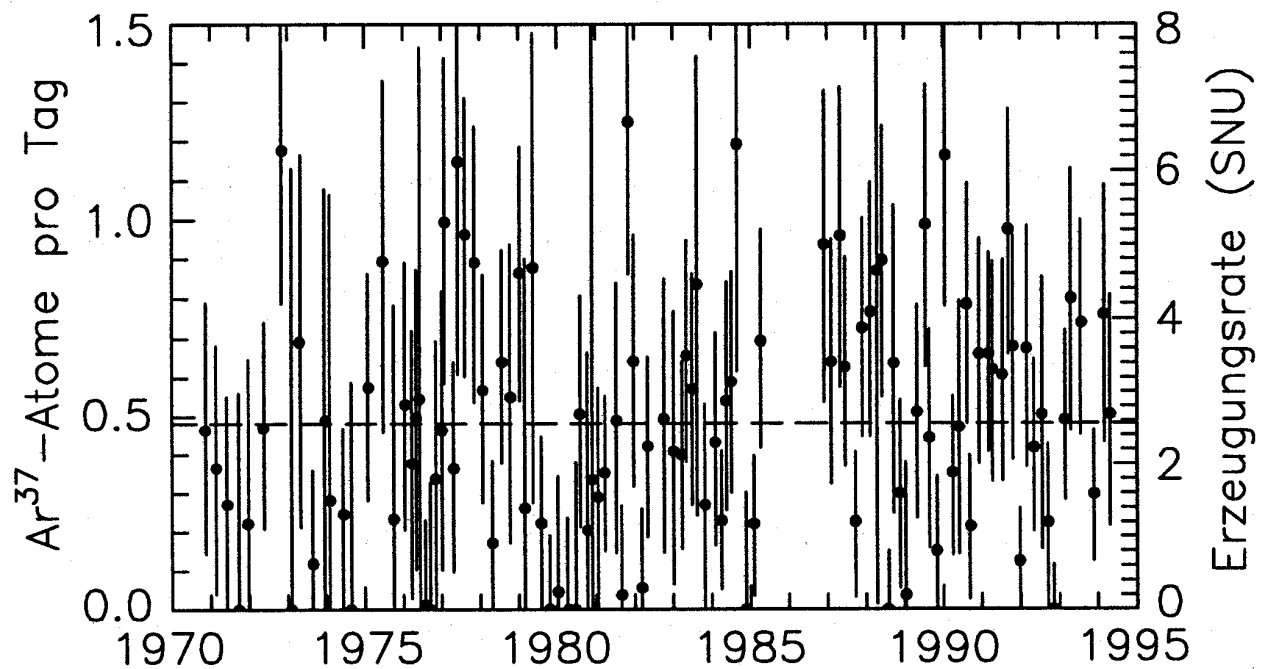
Nachweis mit Hilfe von Radiochemischen Experimenten:



Das berühmteste Experiment dieser Art ist das **Homestake Experiment** in einer Goldmine in South Dakota (USA), in 1480 m Tiefe. Es nimmt seit 1970 Daten und arbeitet mit einem 615 t (380 m^3) Target aus Perchloräthylen (C_2Cl_4). Die entspricht $2.2 \cdot 10^{30}$ Cl-Atomen (133 t). Der ν_e Nachweis erfolgt durch die Reaktion:



Eine Exposition dauert ca. 60-70 Tage, dann wird der Anteil von Ar^{37} bestimmt.



$$R_{exp} = (2.56 \pm 0.22) \text{ SNU}$$

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

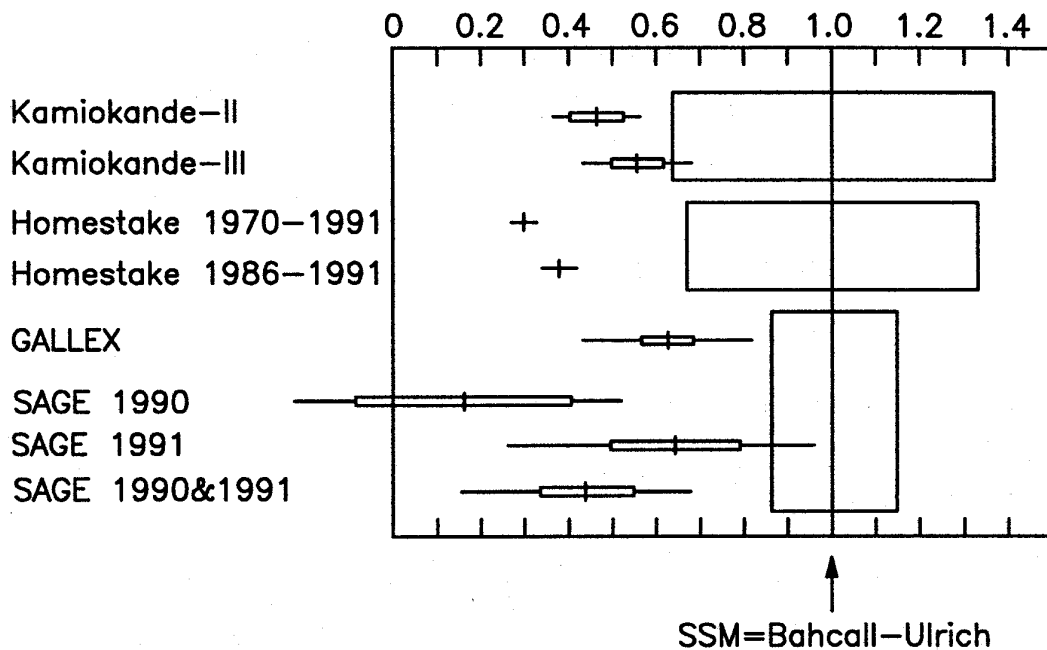
“Solar Neutrino Units” (SNU) sind:

$1 \text{ SNU} = 10^{-36} \nu_e \text{ Einfänge pro sec pro Targetkern}$

$1 \nu_e \text{ Einfang pro sec pro } 10^{36} \text{ Targetkerne}$

Diese Ergebnisse wurden von anderen Experimenten bestätigt:

Experiment	Standort	Tiefe (mWÄ)	Reaktion	E_S (MeV)	Hauptquelle	Target
Chlor (radioch.)	Home-stake	4100	$\text{Cl}^{37}(\nu_e, e)\text{Ar}^{37}$	0.814	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Be}^7 (15\%) \\ \text{B}^8 (78\%) \end{array} \right.$	615 t C_2Cl_4
GALLEX (radioch.)	Gran Sasso	3500	$\text{Ga}^{71}(\nu_e, e)\text{Ge}^{71}$	0.233	$\left\{ \begin{array}{l} pp (54\%) \\ \text{Be}^7 (27\%) \\ \text{B}^8 (10\%) \end{array} \right.$	30 t Ga (GaCl_3)
SAGE (radioch.)	Baksan	4700	$\text{Ga}^{71}(\nu_e, e)\text{Ge}^{71}$	0.233	$\left\{ \begin{array}{l} pp (54\%) \\ \text{Be}^7 (27\%) \\ \text{B}^8 (10\%) \end{array} \right.$	30 (57) t Ga (metallisch)
Kamio-kande	Kamio-ka	2700	νe -Streuung	~ 7.5	B^8	3000 t H_2O (680 t Target)



Wo sind die ν_e -Neutrinos geblieben ???

Neutrino Oscillationen

Nehmen wir an die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung ν_μ und ν_τ sind die Mischung von zwei Masseneigenzuständen ν_1 und ν_2 :

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \mathcal{R} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Dann gilt wegen der zeitabhängigen Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2 \Psi(\vec{x}, t)$$

deren Lösung ebene Wellen sind:

$$\Psi(\vec{x}, t) = A \cdot e^{i(\vec{p} \cdot \vec{x} - E \cdot t)}$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \nu_1(\vec{x}, t) \\ \nu_2(\vec{x}, t) \end{pmatrix} &= e^{i\vec{p} \cdot \vec{x}} \cdot \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} \nu_1(0) \\ e^{-iE_2 t} \nu_2(0) \end{pmatrix} \\ &= e^{i\vec{p} \cdot \vec{x}} \cdot \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1(0) \\ \nu_2(0) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \nu_\mu(\vec{x}, t) \\ \nu_\tau(\vec{x}, t) \end{pmatrix} = e^{i\vec{p} \cdot \vec{x}} \cdot \mathcal{R}^{-1} \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \mathcal{R} \cdot \begin{pmatrix} \nu_\mu(0) \\ \nu_\tau(0) \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \nu_\mu(\vec{x}, t) \\ \nu_\tau(\vec{x}, t) \end{pmatrix} = e^{i\vec{p} \cdot \vec{x}} \cdot \mathcal{R}^{-1} \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \mathcal{R} \cdot \begin{pmatrix} \nu_\mu(0) \\ \nu_\tau(0) \end{pmatrix}$$

Nehmen wir an $\nu_\mu(0) = 1$ und $\nu_\tau(0) = 0$ dann ist die Wahrscheinlichkeit ein ν_τ zu beobachten:

$$|\nu_\tau(\vec{x}, t)|^2 = \sin^2(2\Theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{2} \equiv P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$$

Für $E_1, E_2 \gg m_1, m_2$ gilt $p \approx E$ und:

$$E_2 - E_1 = \sqrt{m_2^2 + p^2} - \sqrt{m_1^2 + p^2} \approx \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p} = \frac{\Delta m^2}{2E}$$

mit $\sqrt{1+x^2} \approx 1 + \frac{1}{2}x$

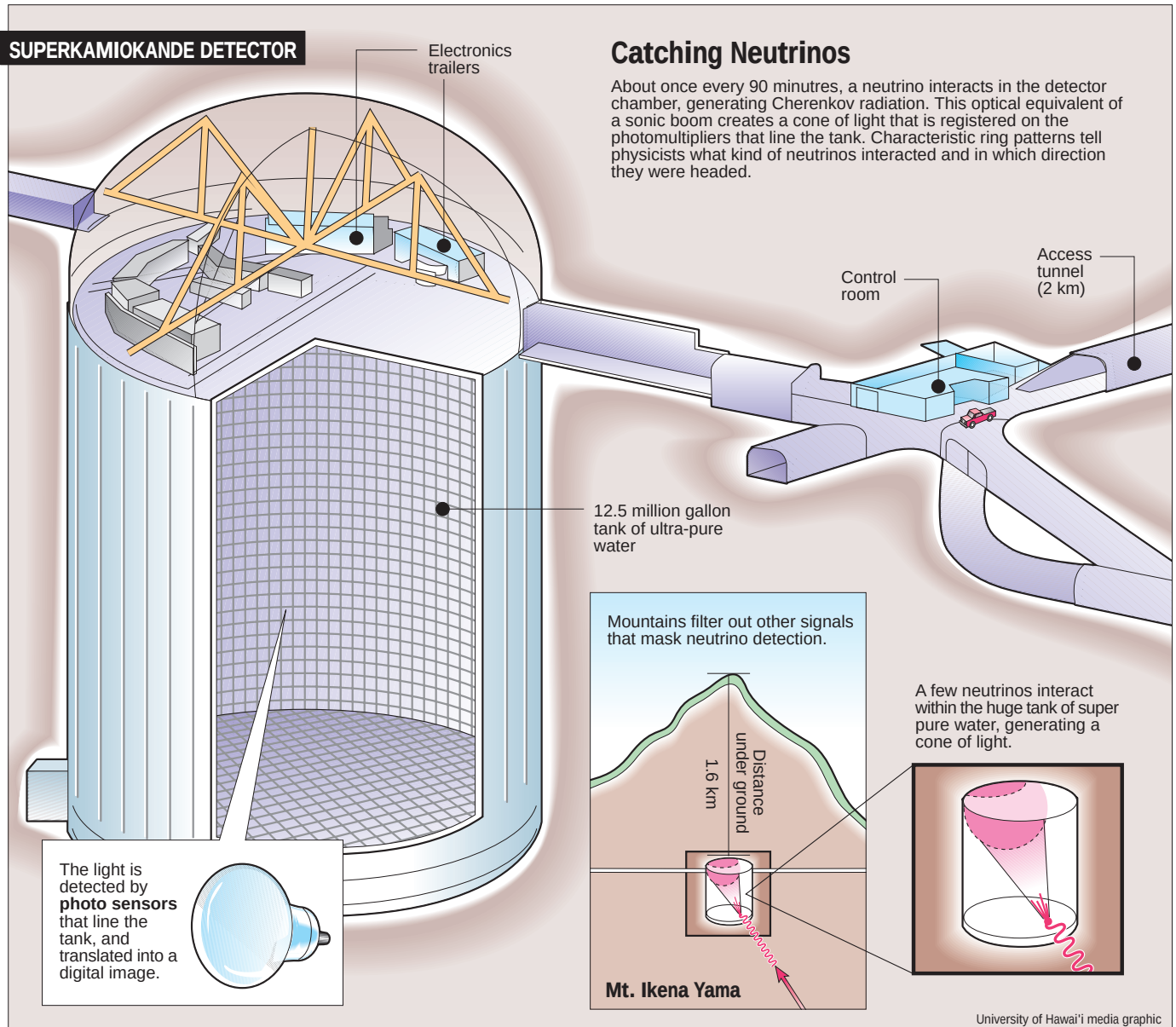
$$\Rightarrow P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \approx \sin^2(2\Theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

mit $t = L/c = L$ für $c = 1$.

Nur wenn wenigstens 1 der 3 bekannten Neutrinos eine von Null verschiedene Ruhemasse hat kann es Neutrino-Oscillationen geben !

Das Super-Kamiokande Experiment

Informationen finden sich unter:
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>

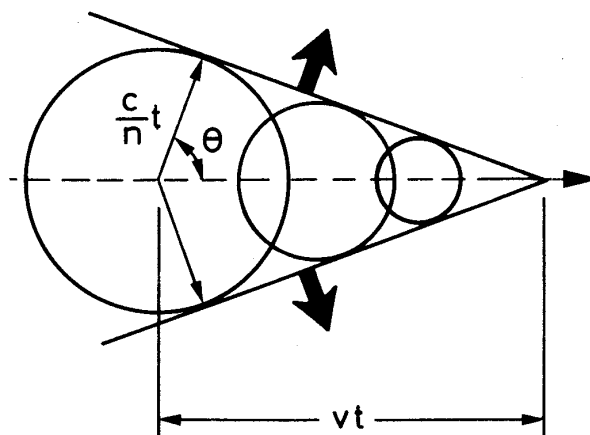


Cherenkov-Strahlung:

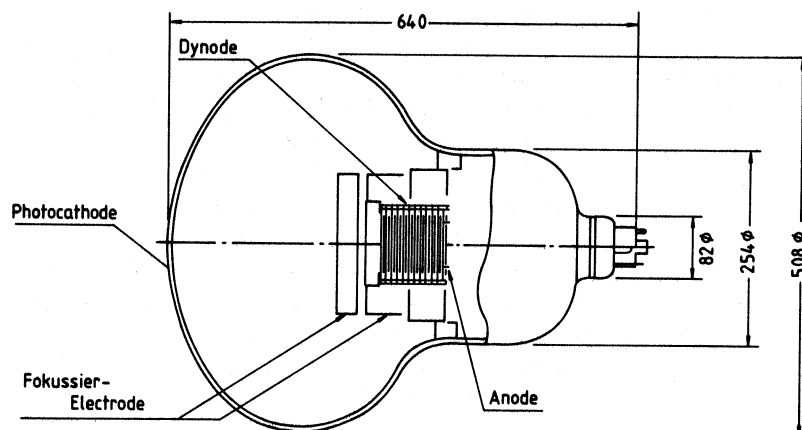
Die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium ist $v_c = c/n$. Dabei ist n der Brechungsindex. Ein Teilchen das sich mit $v > v_c$ durch dieses Medium bewegt strahlt Licht mit einem Öffnungswinkel von:

$$\cos \Theta_C = \frac{1}{\frac{v}{c} \cdot n}$$

ab.



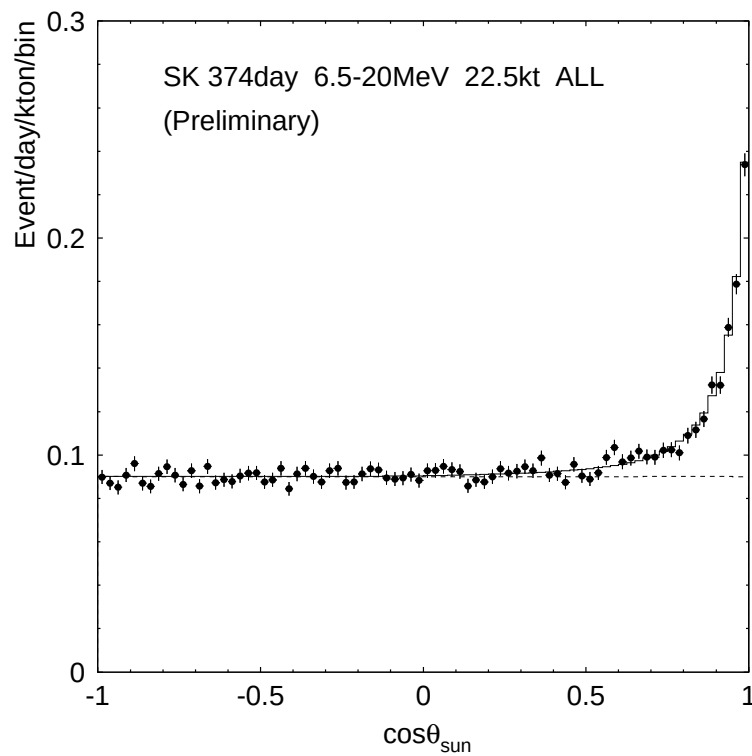
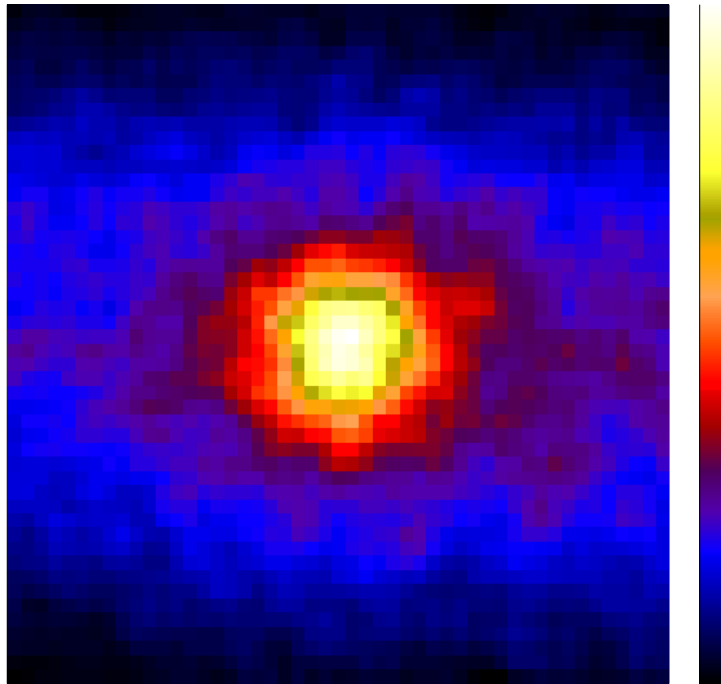
Nachweis einzelner Photonen mit einem Photomultiplier:

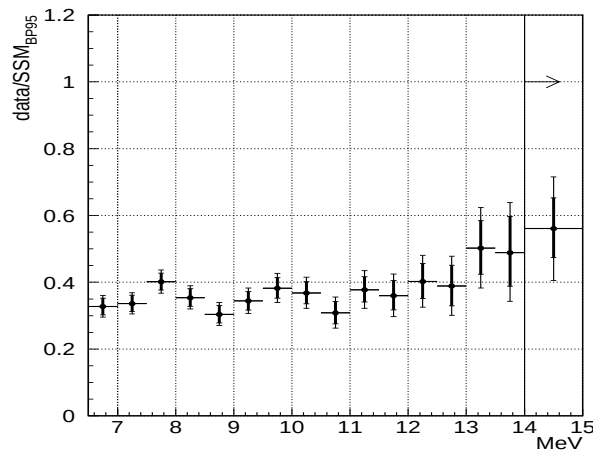


Durch Photoeffekt werden Elektronen aus der Alkali-Metall-Photokathode herausgelöst und anschließend in den Dynoden vervielfältigt (10^8).

Super-Kamiokande & Solar Neutrinos

Die Sonne im Neutrino Teleskop:





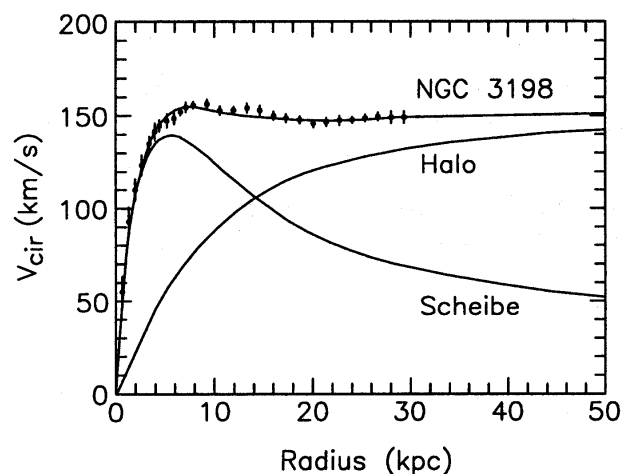
Auch Super-Kamikonade sieht ein klares Defizit an Solar-Neutrinos.

Auf der Neutrino 98 Konferenz auf Hawai, am 05. Juni 1998 hat die Super-Kamiokande Kollaboration erstmals gezeigt, daß zumindestens 1 Neutrino eine von Null verschiedene Ruhemasse hat.

Dies hat Konsequenzen für die Astrophysik & Kosmologie.

Gravitationseffekte zeigen, daß es Dunkle Materie im Welt-raum geben muß:

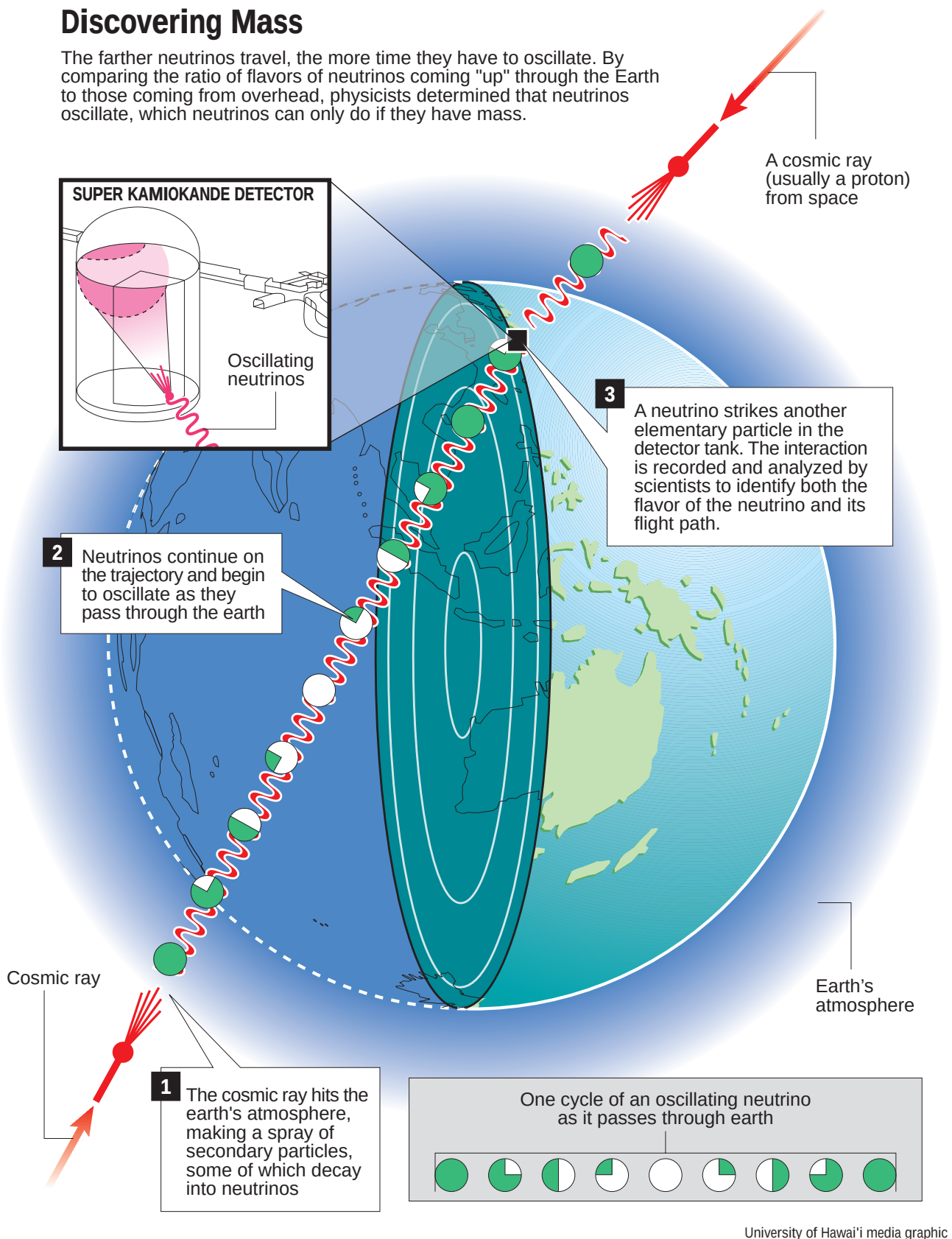
$$\frac{mv(r)^2}{r} = G_N \frac{mM_{vis}}{r^2} \Rightarrow v(r)^2 = G_N \frac{M_{vis}}{r}$$



Wir kennen heute ca. 90% der Materie im Universum nicht !

Discovering Mass

The farther neutrinos travel, the more time they have to oscillate. By comparing the ratio of flavors of neutrinos coming "up" through the Earth to those coming from overhead, physicists determined that neutrinos oscillate, which neutrinos can only do if they have mass.



Any Other Business

1. Vorlesung von Donnerstag den 02.07.98 auf Montag den 29.06.98 verschieben ?
2. Vorlesung von Donnerstag den 09.07.98 auf Montag den 13.07.98 verschieben ?
3. Besuch am CERN
Vorschlag: Donnerstag 29.10.98-31.10.98 oder 01.11.98

Zugfahrt:

Twen-Ticket 224,80 DM, Gruppentarif 218,60 DM für Hin- und Rückfahrt.

Übernachtung am CERN im Gästehaus:

Einzelzimmer mit Bad & WC: 53 CHF

Doppelzimmer mit Bad & WC: 70 CHF