

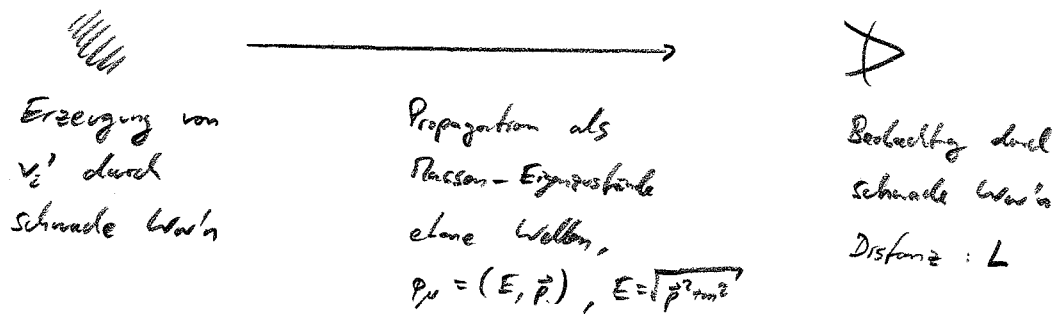
(6) indirekt

Massendifferenzen sind leichter zu messen, da sie zu Neutrino-Oszillationen führen:

In Analogie zu den Quarks sind die im schwachen WW's erzeugten ν 's (falls massiv) LK's von Masseneigenzuständen.

(hier: betrachte der Einfachheit halber nur 2 Generationen)

$$\text{Schwache EW} \rightarrow \begin{pmatrix} \nu_1' \\ \nu_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \leftarrow \text{Massen-EZ}$$



betrachte z.B. Propagation eines ν_1'

$$|\nu_1'(t, L)\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle e^{-iEt + ip_1 L} + \sin \theta |\nu_2\rangle e^{-iEt + ip_2 L}$$

$$\langle \nu_2' | = -\sin \theta \langle \nu_1 | + \cos \theta \langle \nu_2 |$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \langle \nu_2' | \nu_1'(t, L) \rangle &= \frac{\cos \theta \sin \theta}{\frac{1}{2} \sin(2\theta)} e^{-iEt} \frac{(e^{ip_2 L} - e^{ip_1 L})}{e^{i(p_1 + p_2) \frac{L}{2}} (e^{i(p_2 - p_1) \frac{L}{2}} - e^{-i(p_2 - p_1) \frac{L}{2}})} \\ &= i \sin(2\theta) e^{-iEt} e^{i(p_1 + p_2) \frac{L}{2}} \sin((p_2 - p_1) \frac{L}{2}) \end{aligned}$$

also ist die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang

$$P(1' \rightarrow 2') = |\langle \nu_2' | \nu_1'(t, L) \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left((p_2 - p_1) \frac{L}{2}\right)$$

für $E \gg m_i$ ist $p_i = \sqrt{E^2 - m_i^2} \approx E - \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{E} + \mathcal{O}\left(\frac{m^4}{E^3}\right)$

$$\Rightarrow \boxed{P(1' \rightarrow 2') = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{(m_1^2 - m_2^2) L}{4E}\right)}$$

$\equiv \Delta m^2$

setzen wir nun "typische" Einheiten in den 2. Summ. ein:

$$\frac{L}{4E} \Delta m^2 = \frac{L [\text{km}] \Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} = \frac{10^3 \text{m} \cdot 10^{-10} \text{GeV}^2}{4 \cdot \text{GeV}}$$

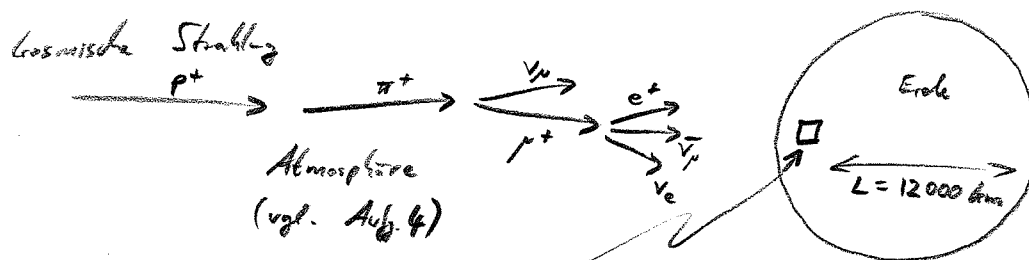
$$= \frac{1}{4} \text{fm} \cdot \text{GeV} \approx \frac{5}{4} \approx 1.25$$

→ eine Oszillation kann für $\frac{L}{4E} \Delta m^2 \approx 1$ beobachtet werden;
für $E \sim \text{GeV}$ und $\Delta m^2 \ll \text{eV}$ braucht man also $L \gg \text{km}$.

⇒ große Abstände nötig im Experiment!

mehrere Möglichkeiten:

(1) Atmosphärische Neutrinos



ν -Detektor Super-Kamiokande₁₉₆₋ (in stillgelegter Mine, unter dem japanischen Alpen; 50 000 Tonnen reines Wasser; Photomultiplier)

ν -Nachweis über Streuung von geladenem Strom:

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + N, \quad \nu_e + N \rightarrow e + N$$

geladenes Lepton nachweisbar (Photonen; Cherenkov-Strahlung)

atmosphärische ν 's werden auf allen Seiten der Erde erzeugt!

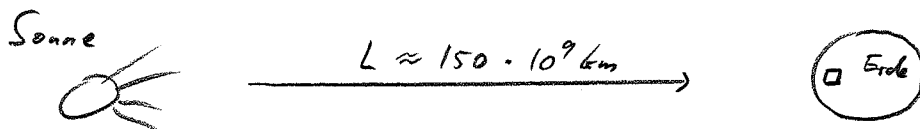
man findet aber: $\frac{\text{Flux von } \nu_\mu \text{ nach oben}}{\nu_\mu \text{ unten}} = 0.54 \pm 0.04$

hier: $E \approx \text{einige GeV}$; $L \approx 12000 \text{ km}$

Interpretation: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Oszillation

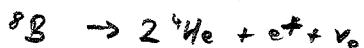
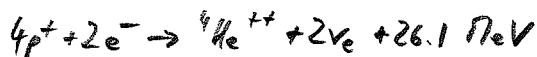
$$|m_{\nu_\mu}^2 - m_{\nu_e}^2| \approx (2 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{\mu e} > 0.9$$

(2) Sonnen-Neutrinos

Stern der "Kernreihe"
verbrennt Wasserstoff: Fusion

SNO (Sudbury Neutrino Observatory)
Kanada, '99-



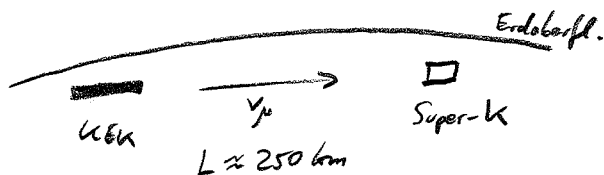
brauchen ν -Fluss an der Quelle (= Kern der Sonne)

→ "SSM" solar standard model [Bahcall et al, 1963-2005]

→ $E_\nu \sim 0.01 - 10 \text{ MeV}$; nur ν_e werden erzeugt

Messung:
$$\frac{\text{Fluss}(\nu_e)}{\text{Fluss}(\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau)} \approx 0.31 \pm 0.03$$

Interpretation: $|m_{\nu_e}^2 - m_{\nu_\mu}^2|$ oder $|m_{\nu_e}^2 - m_{\nu_\tau}^2| \approx (7 \pm 3) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$

(3) Beschleuniger-Neutrinos

Distanz kleiner als bei (1), also verschwinden weniger als 50%

der ν_μ , aber man kann E_ν kontrollieren!

→ viele ähnliche Experimente, z.B. CERN → Gran Sasso (Italien, 730 km)

Tevatron → Soudan (USA, 735 km)