

Auringon neutriino-ongelma ja neutriino-oskillaatiot

Pasi Ritaluoto

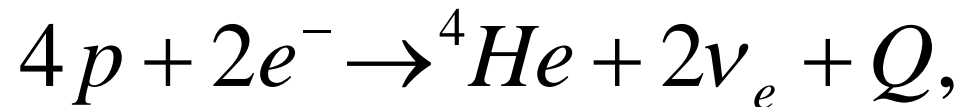
5.5.2011

Sisältö

- Miten neutriinot syntyvät Auringossa?
- Auringon neutriinovuota mittaavat kokeet
- Mikä on Auringon neutriino-ongelma?
- Neutriino-oskillaatiot

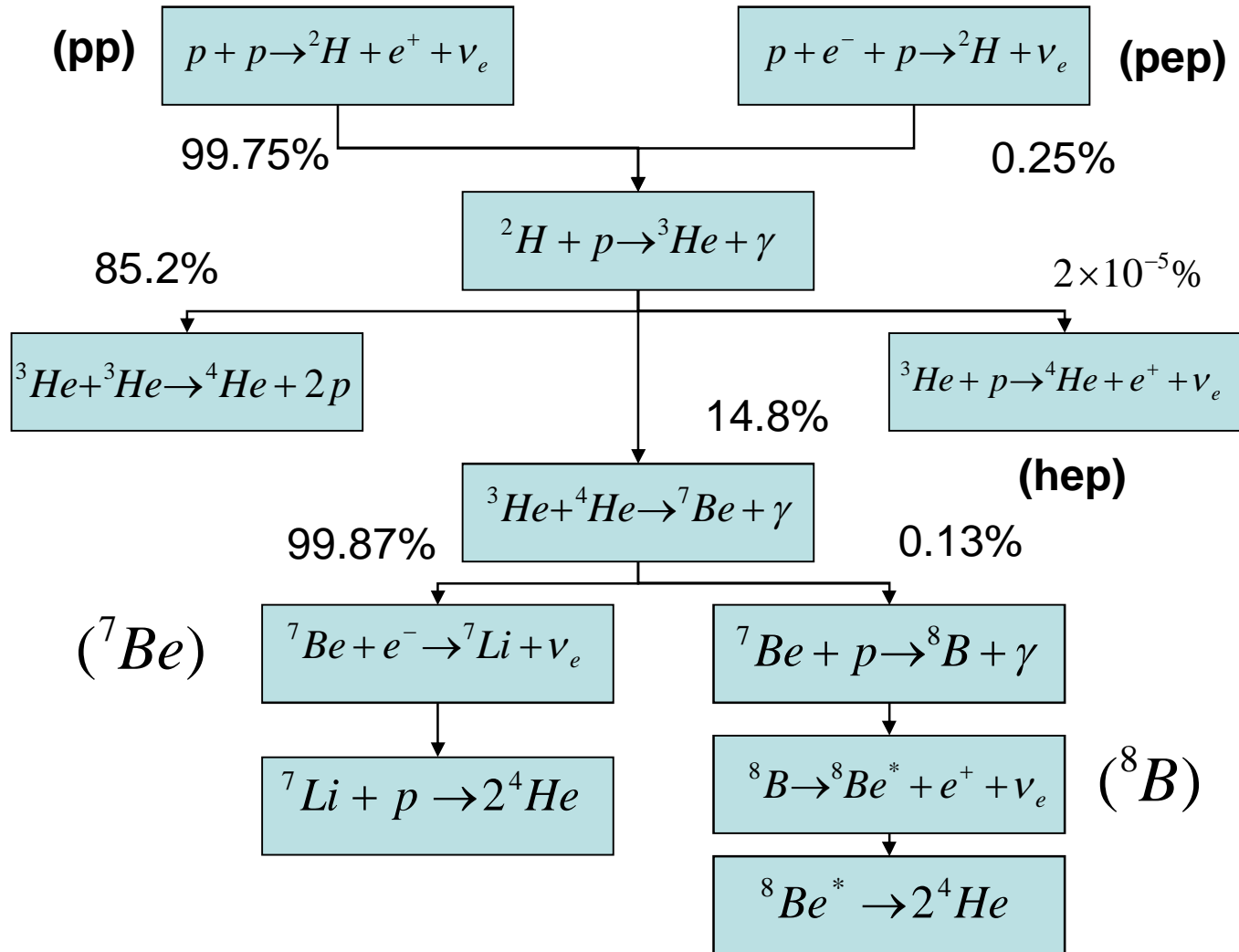
Auringon energiantuotto

- pp-ketju 99%
- CNO-ketju 1%
- 2×10^{38} neutriinoa
per sekunti

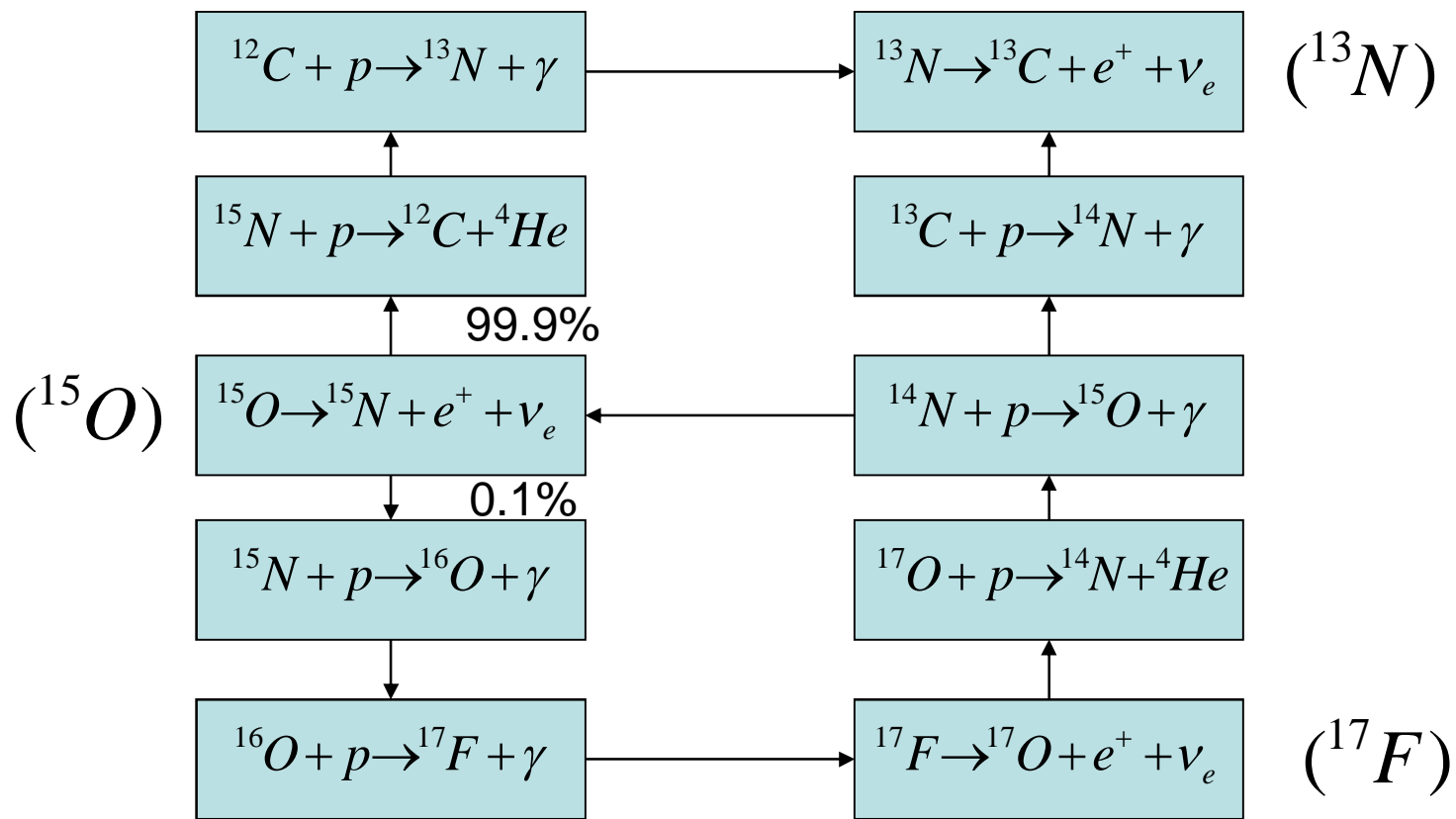


$$Q = 4m_p + 2m_e - m_{{}^4\text{He}} = 26.73\text{MeV}$$

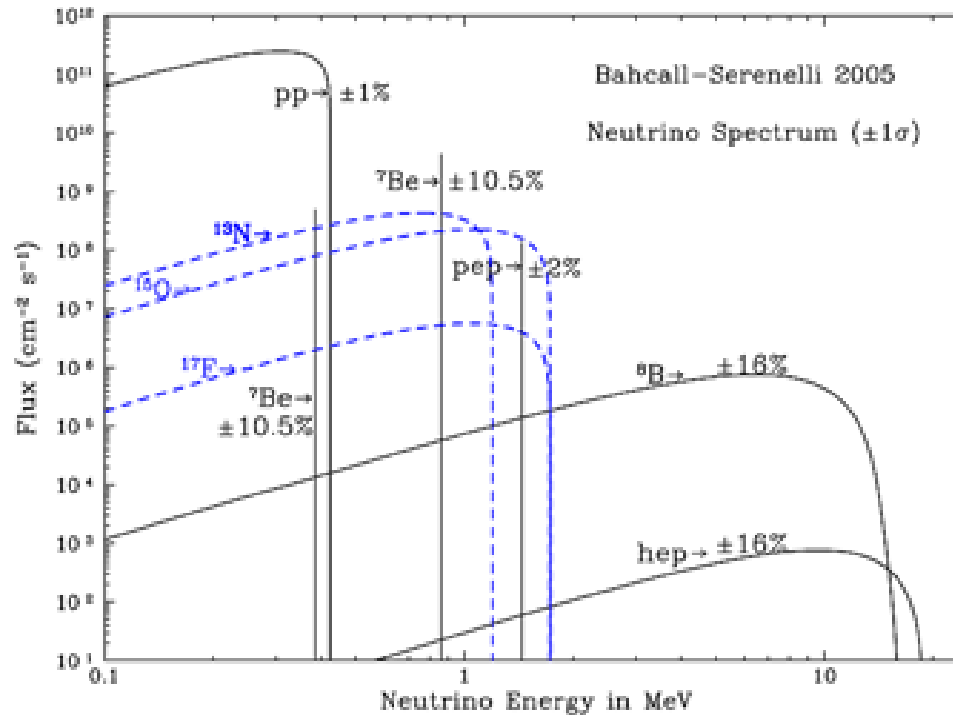
pp-ketju



CNO-*ketju*



Energiaspektri



$^{71}\text{Ga}(E > 0.233\text{MeV})$

$^{37}\text{Cl}(E > 0.814\text{MeV})$

vesisäiliö($E > 5\text{MeV}$)

Auringon neutriinovuota mittaavia kokeita

- Homestake
 - Käynnistettiin 1967
 - Käytti tavallista puhdistusainetta, tetrakloorieteeniä
 - Kynnysenergia 814 keV
 - Hyödynsi reaktiota



- Havaittu neutriinon vuo oli vain noin kolmasosa teoreettisesta arvosta

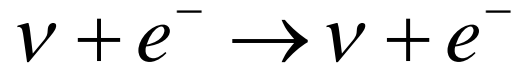
Auringon neutriinovuota mittaavia kokeita

- Kamiokande

- Kamiokande käynnistyi Japanissa 1987

- Mittasi Tšerenkovin säteilyä

- Koe hyödynsi reaktiota



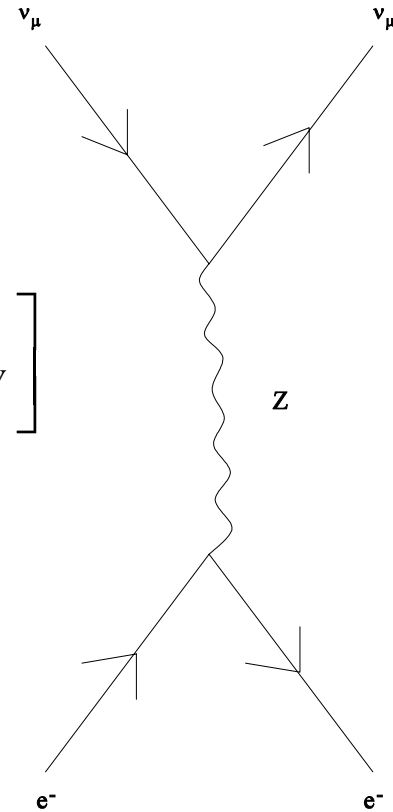
- Kynnysenergia korkea, 7 MeV

- Koe havaitsi pääasiassa elektronin neutriinoita

Elektronin ja neutriinon välinen sironna

$$\sigma(\nu_l e \rightarrow \nu_l e) = \frac{G^2 m_e E_\nu}{2\pi} \left[1 - 4 \sin^2 \theta_W + \frac{16}{3} \sin^2 \theta_W \right]$$

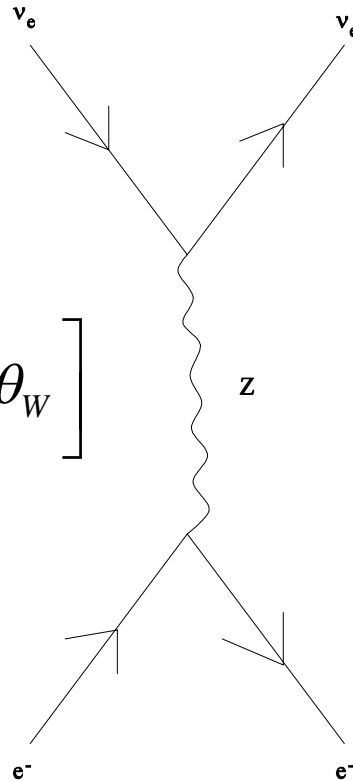
$$l = \mu, \tau$$



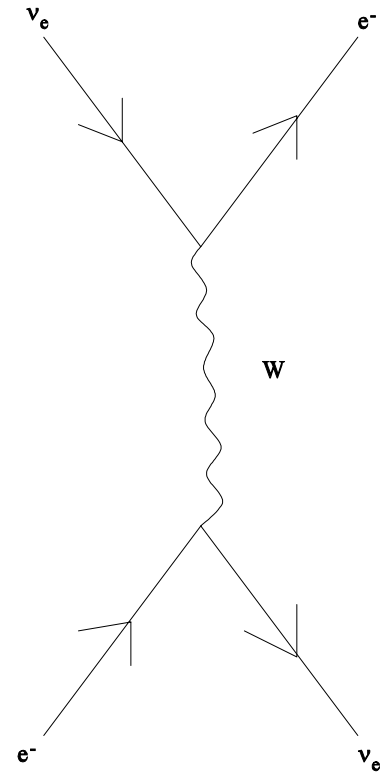
Elektronin ja neutriinin välinen sironna

$$\sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e)$$

$$= \frac{G^2 m_e E_\nu}{2\pi} \left[1 + 4 \sin^2 \theta_W + \frac{16}{3} \sin^2 \theta_W \right]$$



(a)



(b)

Vaikutusalojen suhde

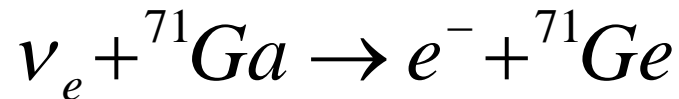
$$r = \frac{\sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e)}{\sigma(\nu_{\mu,\tau} e \rightarrow \nu_{\mu,\tau} e)} = \frac{1 + 4 \sin^2 \theta_W + \frac{16}{3} \sin^4 \theta_W}{1 - 4 \sin^2 \theta_W + \frac{16}{3} \sin^4 \theta_W}$$

$$\sin^2 \theta_W = \frac{1}{4} \Rightarrow r = 7$$

$$\sin^2 \theta_W = 0,23149 \Rightarrow r \approx 6,1465$$

Auringon neutriinovuota mittaavia kokeita

- GALLEX and SAGE
 - SAGE käynnistettiin Kaukasuksella 1990
 - GALLEX käynnistettiin Italiassa 1991
 - Kynnysenergia matala, 233 keV
 - Kokeet hyödynsivät reaktiota



Super-Kamiokande-koe

- Käynnistyi 1996
- Havaitsi, että kosmisten säteiden vaikutuksesta syntyvien ilmakehän neutriinoiden vuo riippui tulosuunnasta
- Selitys: osa myöskin neutriinoista muuttuu taan neutriinoiksi matkallaan maapallon halki
- Syntymekanismi: neutriino-oskillaatio

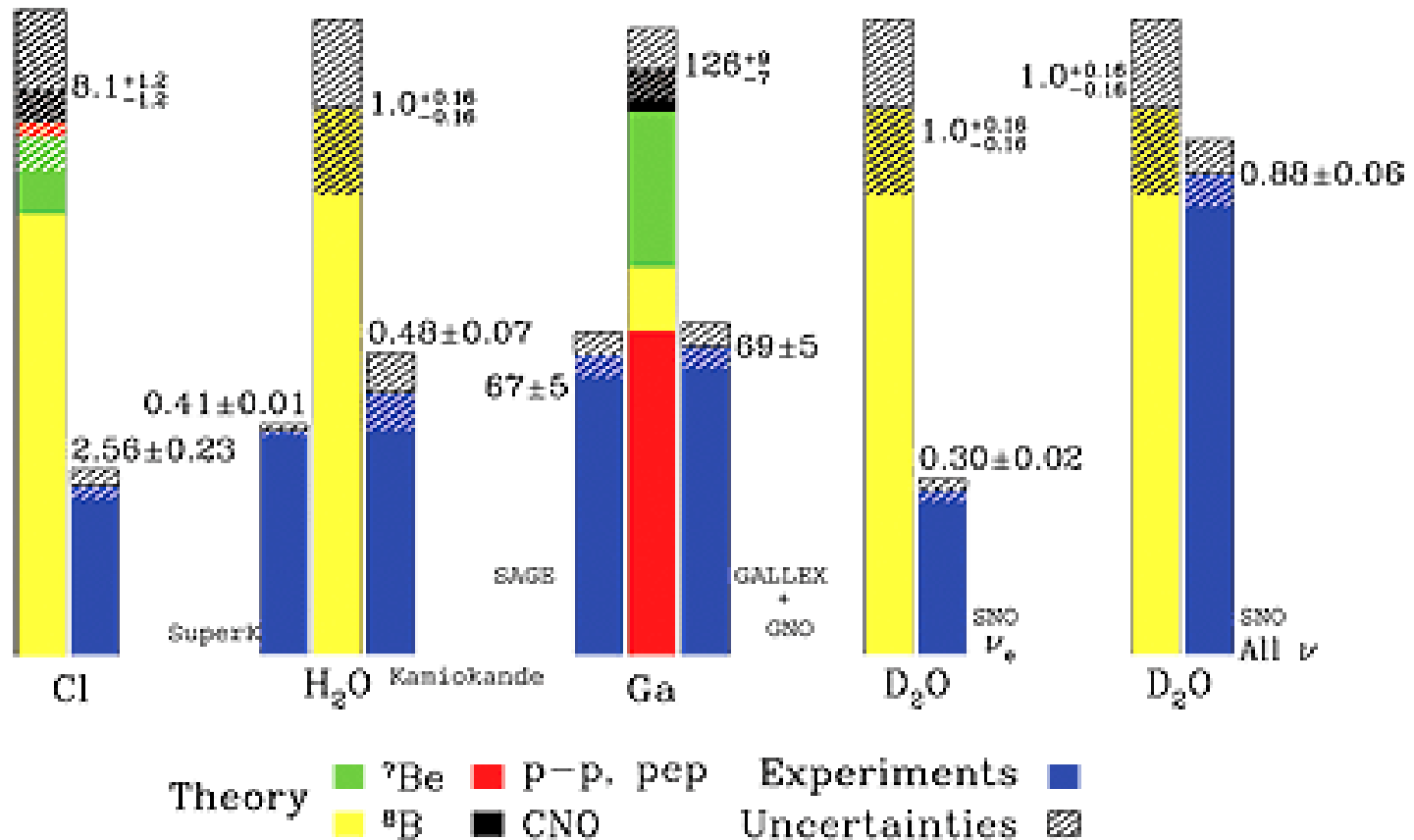
Sudburyn neutriino-observatorio (SNO)

- Varatun virran (CC)
deuteronin hajoaminen
 $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$
- Neutraalin virran (NC)
deuteronin hajoaminen
 $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.301 \pm 0.033.$$



Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



Neutriino-oskillaatiot

- 1967 Bruno Pontecorvo

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle, \alpha = e, \mu, \tau$$

$$|\nu_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i} |\nu_\alpha\rangle, i = 1, 2, 3$$

Eteneminen ja interferenssi

$$|v_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \vec{p}_i \cdot \vec{x})} |v_i(0)\rangle$$

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

$$t \approx L \Rightarrow |v_i(L)\rangle = e^{-i\frac{m_i^2 L}{2E}} |v_i(0)\rangle$$

Oskillaatiotodennäköisyys

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= \left| \langle \nu_{\beta} | \nu_{\alpha}(t) \rangle \right|^2 = \left| \sum_i U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-im_i^2 L/2E} \right|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right), \Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2 \end{aligned}$$

Kahden neutriinon tapaus

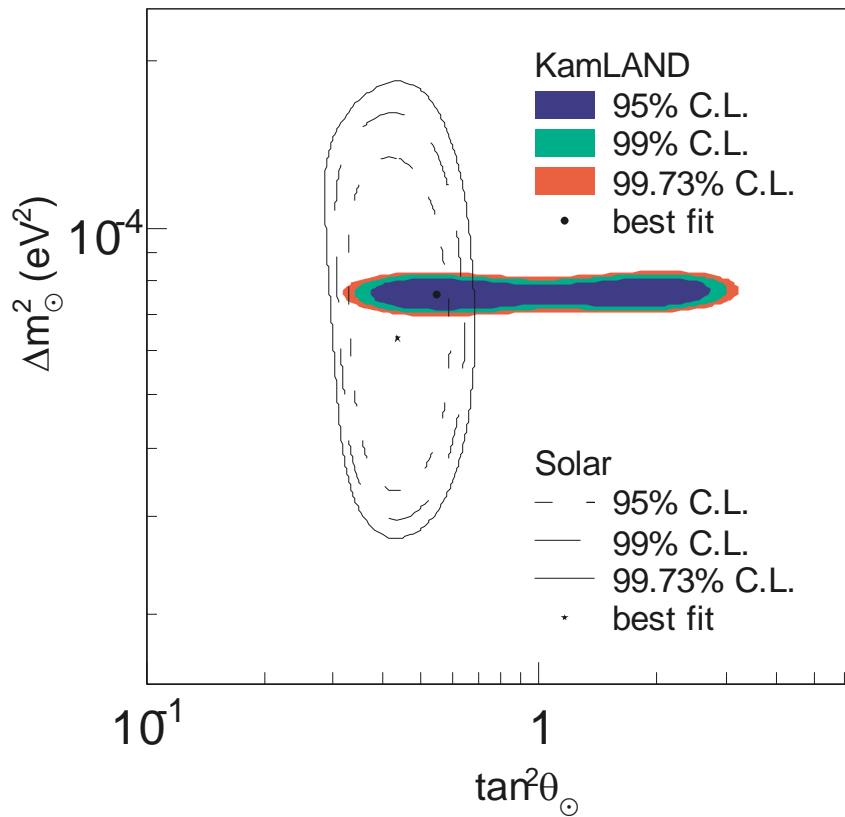
$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$P_{\alpha \rightarrow \beta, \alpha \neq \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

- SI-yksiköissä

$$P_{\alpha \rightarrow \beta, \alpha \neq \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.267 \frac{\Delta m^2 L}{4E} \frac{\text{GeV}}{\text{eV}^2 \text{km}} \right)$$

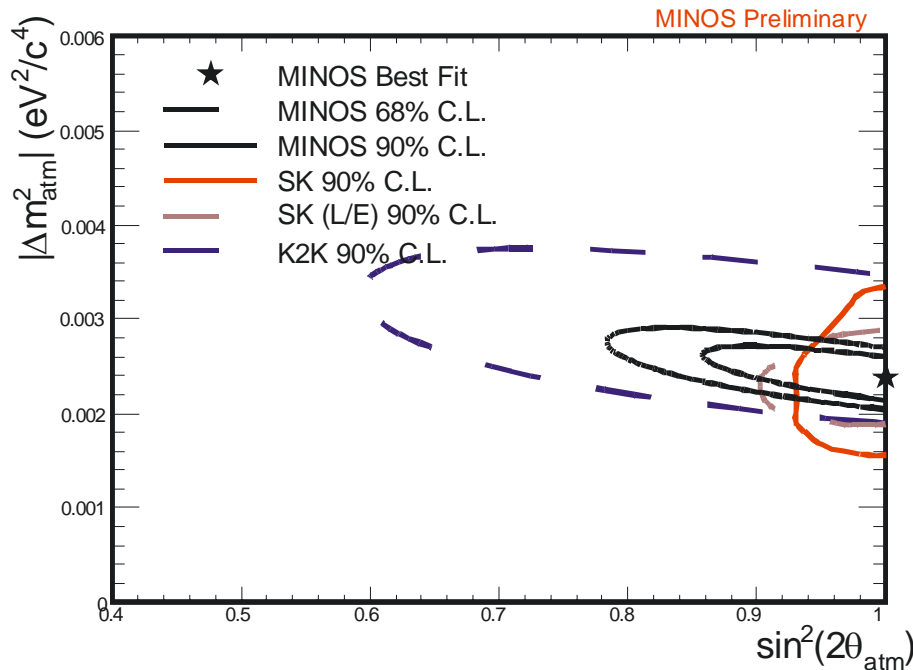
Auringon neutriinojen oskillaatioiden parametrien arviointi



$$\Delta m_{sol}^2 = (7.59 \pm 0.21) \times 10^{-5} eV^2$$

$$\tan^2 \theta_{sol} = 0.47^{+0.06}_{-0.05}$$

Ilmakehän neutriinojen oskillaatioiden parametrien arviointi



$$\Delta m_{atm}^2 = 2.4^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2(2\theta_{atm}) = 1^{+0}_{-0.1}$$

Yhteenveto

- Kumpaa teoriaa on täydennettävä, Auringon standardimallia vai hiukkasfysiikan standardimallia
- Neutriinoilla ei hiukkasfysiikan standardimallin mukaan ole massaa
- Suosituin selitys neutriinin massan alkuperälle: kiikkulautamekanismi