

---

# Neutrínó Detektorok

Magfizika szeminárium

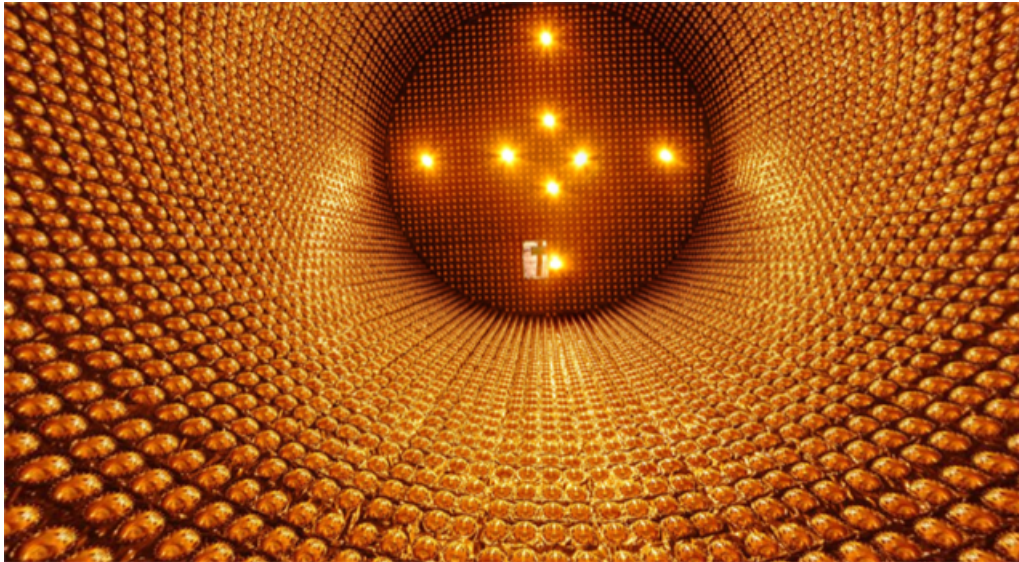
Kadlecsik Ármin

2020. november 26. 14:42:24

---

## 1. Történeti bevezető

- 1930-as javaslat, 1933 - Fermi-elmélet: A  $\nu$  könnyű, de  $m > 0$ .
- 1956-57: Új  $\nu$  hipotézis: definit kiralitás/kezesség:  $m = 0$  szükséges.
- Ugyanekkor: Ötletek tömeges neutrínókról és oszcillációkról (Pontecorvo)



## 2. Homestake kísérlet (60-as évek)

$$\nu + n \rightarrow p + e \tag{2.1}$$

$$^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^- \tag{2.2}$$

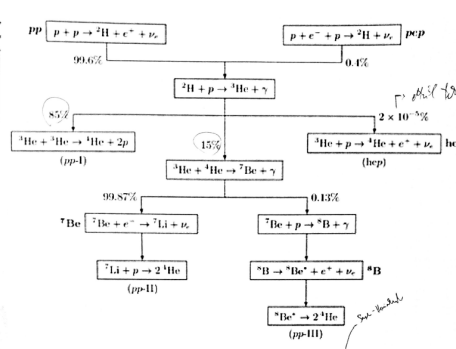
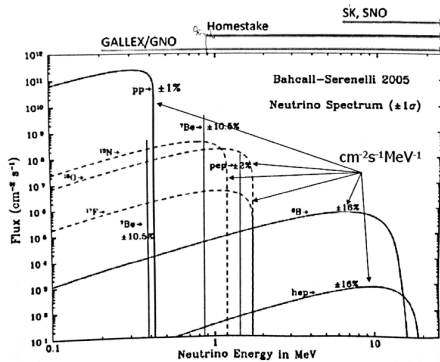
Küszöb:  $E_\nu \geq 0.8 \text{ MeV}$ .  $\rightarrow$   $^8\text{B}$ -t látjuk csak (kicsi %-os ág)

$\leadsto m = 600 \text{ t}$  céltárgy kell.

$\rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{Cl}_4$ : Perklóretilén.

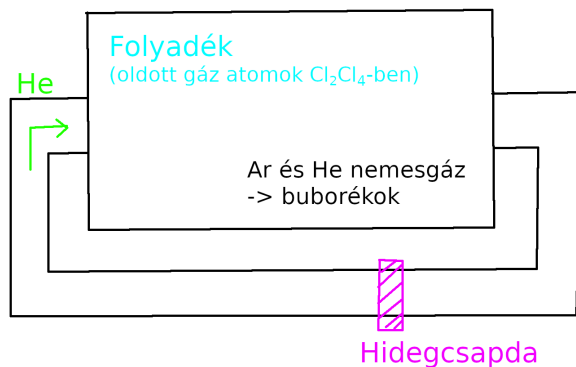
$\rightarrow$  1 hónap:  $\sim 50$  reakció

$\rightarrow$  Ar is bomlik!  $\rightarrow$  hogy lehet kinyerni időben?



## 2.1. Davis-módszer

- Stabil Argont ( $^{38}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ) adunk még hozzá (kinyerési hatások megegyezik)
- 1 napon át He-t áramoltatunk rajta



1. ábra. A keringetés menete.

- oldott Ar bediffundál He buborékba
- Hidegcsapda: He-n kívül  $\forall$  kicsapódik

Csapdát ezután → proporcionális számlálóba. Megfigyelés: 12 felezési idő (1 év) → tömegspektrométer (mennyi  $^{38}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ) → Kinyerési hatások  $\checkmark$ .

## 2.2. Eredmények

$$\Phi_{\text{mért}}^{\text{Homestake}} = \frac{1}{3} \Phi_{\text{SM}} \quad (2.3)$$

## 2.3. „Eredetibbnél eredetibb” magyarázatok

### 2.3.1. Extrapolálás rossz



Folyamat rátája:  $\Phi_{B_8} \sim \langle \sigma v \rangle_{{}^7\text{Be}+p \rightarrow {}^8\text{B}+\gamma}$ . Alacsony E-n nehéz asztrfiz. S-faktort<sup>1</sup> mérni (hkm E függése miatt).

~ Háttha rossz az alacsony E-s S extrapolálás?

→ Jogos felvetés

→ De kevés.

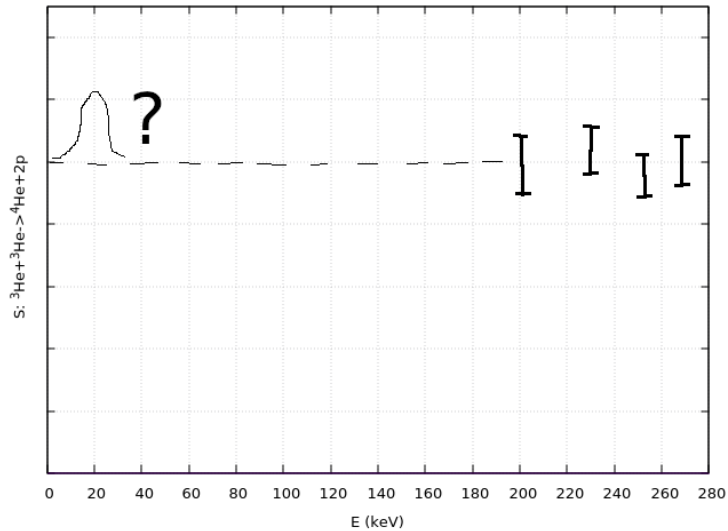
---

<sup>1</sup> $S(E) = \frac{E}{e^{-2\pi\eta}} \sigma(E), \eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v}$

### 2.3.2. Rossz elágazási arány

Igazából 95% és 5%?  $\leadsto$  3-as faktor pont.

Mindent a reakció ráta szab meg: talán létezik  $E \sim 20$  keV-es rezonancia.



→ Tényleges mérések S-re egészen ide

→ Eredmény: 1 beütés/hónap.

### 3. Kamiokande mérés

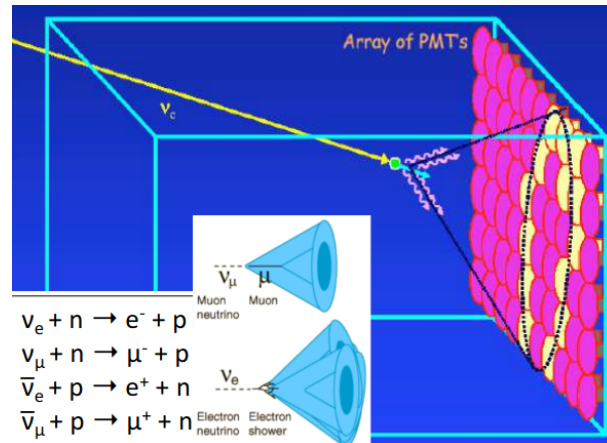
Eredetileg GUT tesztelés  $\rightarrow$  Átalakítás.

#### 3.1. Super-Kamiokande

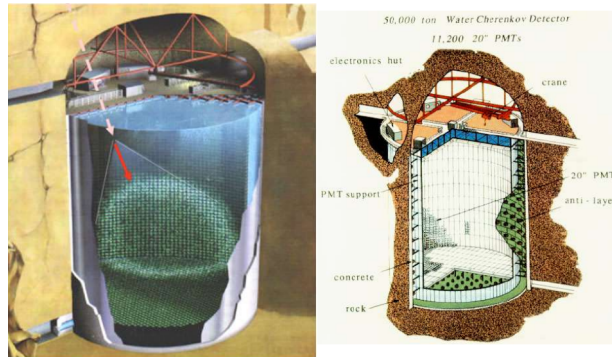
Valós idejű detektor, de nagy küszöb. Mechanizmus: rugalmatlan elektron-szórás:

$$\nu + e^- \rightarrow \nu' + e^- \quad (3.1)$$

$$v_e > c_{\text{víz}} \rightsquigarrow \text{Cherenkov-sug.} \quad (3.2)$$

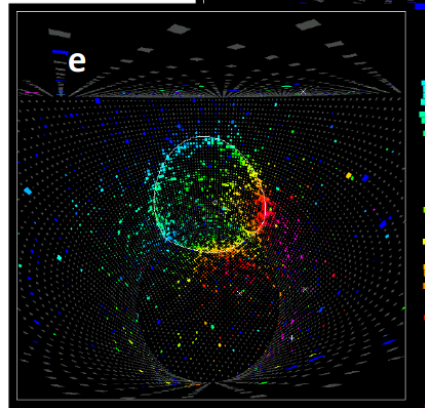
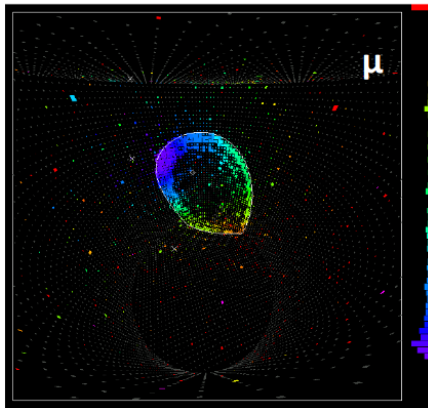
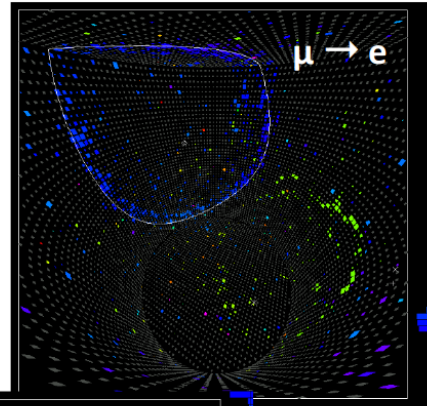


- 1000 m mély
- Belső detektor
  - ★  $\phi$  39  $\times$  42 m tank
  - ★ 50000 t H<sub>2</sub>O.
  - ★ 11146 PMT ( $\phi$  51 cm)
- Külső detektor
  - ★ Célja:  $e, \mu, n, \gamma$  vétó
  - ★ 2 m széles
  - ★ 1885 PMT ( $\phi$  20 cm)
- Mérhet Nap-, atmoszférikus, és gyorsítóból származó  $\nu$ -t is
- Start 1996-ban.





# Super-Kamiokande



### 3.2. Eredmények

→ Nap-neutrínók:

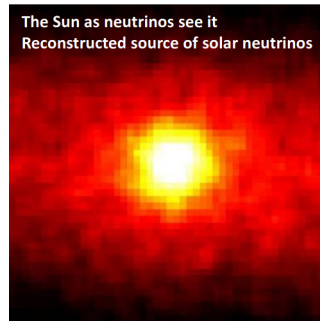
$$\frac{\Phi_{1996-2001}^{\text{data}}}{\Phi_{\text{SSM}}} = 0.406 \pm 0.004(\text{stat}) + \text{syst}$$

★ Több mint  $\Phi_{\text{Homestake}}$ , pedig nagyobb a küszöb! (???)

→ Atmoszférikus-neutrínók:

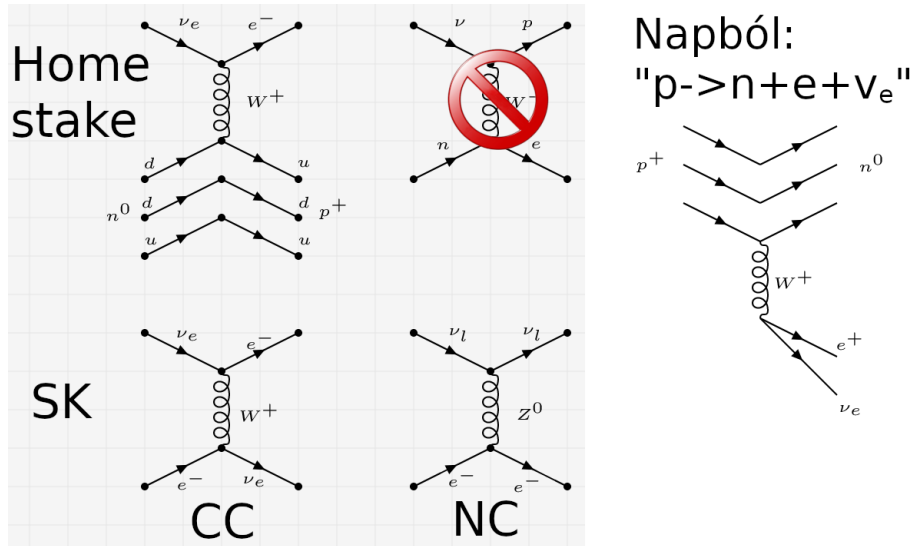
$$\star [N(\nu_{\mu})/N(\nu_e)]_{\text{data}}/[N(\nu_{\mu})/N(\nu_e)]_{\text{MC}} = 0.658 \pm 0.016(\text{stat}) + \text{syst}$$

★ „ $\nu_{\mu}$  hiány”



## 3.3. Nap-neutrínók magyarázata

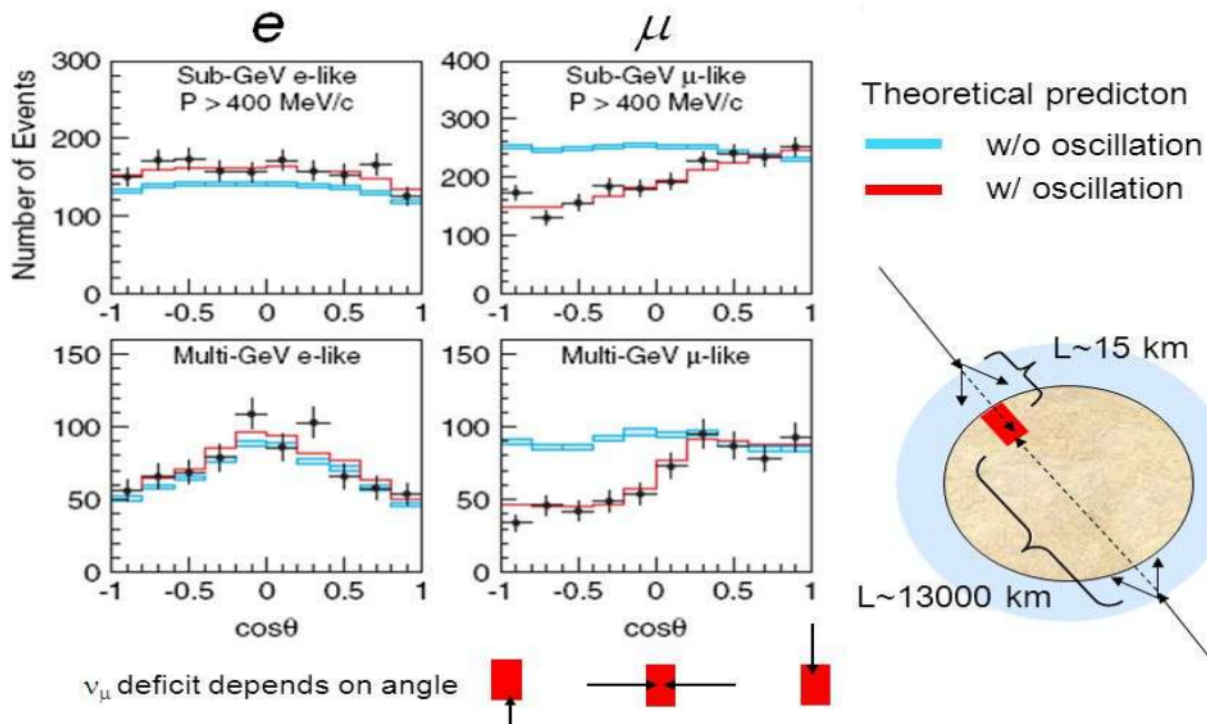
Álláspont: A Nap-neutrínó fluxus biztosan jó. Folyamatok:



Homestake: csak  $\nu_e$ , SK:  $\nu_\mu$  és  $\nu_\tau$  is. Mivel:  $\sigma_{\text{NC}} = \frac{1}{6}\sigma_{\text{CC}}$ , magyarázhatja az 1/3 eltérést.

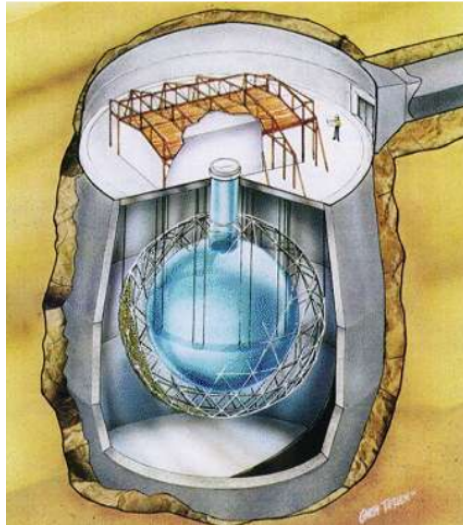
~ ha  $\nu_e$ -k nem  $\nu_e$ -ként érkeznek a Földre.

## 3.4. Atmoszférikus-neutrínók magyarázata



#### 4. SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

- 2 km mélyen, Ontario, Kanada
- Nehézvizes ( $D_2O$ , 1000 t) Cherenkov-detektor,  $\phi$  12 m
- 9600 PMT,  $\phi$  20 cm
- Árnyékolás: normál víz, 30 méteres hordó-üreg
- Start: 1999
- $3/\sqrt{60} \cdot 10^9 \nu \frac{1}{cm^2 s}$  megfigyelve.

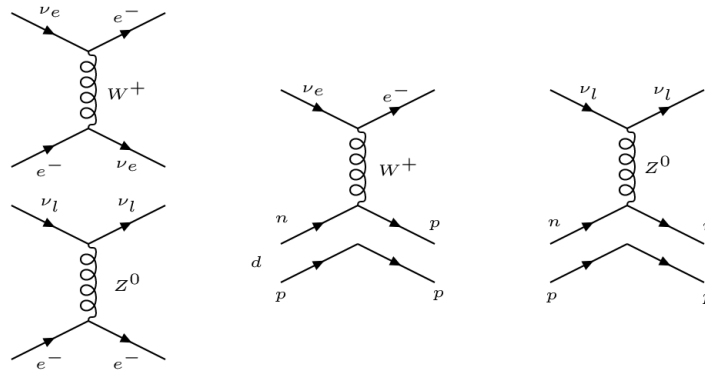


Lehetséges folyamatok:

$$\nu + e \rightarrow \nu' + e \quad \text{ES: cc+nc} \quad (4.1)$$

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e \quad \text{CC} \quad (4.2)$$

$$\nu_l + d \rightarrow p + n + \nu_l \quad \text{NC} \quad (4.3)$$



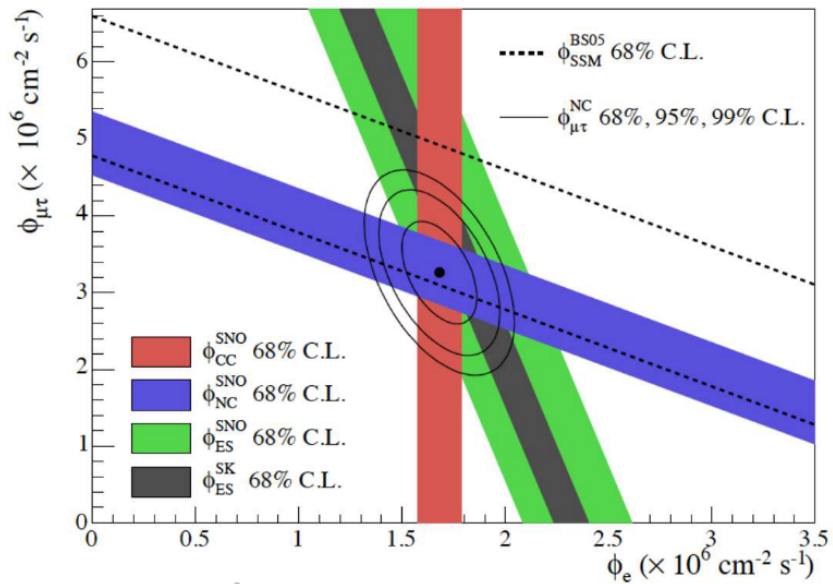
Érzékenység:

$$\Phi_{\text{ES}} = \Phi_{\nu_e} + \frac{1}{6}\Phi_{\nu_{\mu,\tau}} \quad (4.4)$$

$$\Phi_{\text{CC}} = \Phi_{\nu_e} \quad (4.5)$$

$$\Phi_{\text{NC}} = \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_{\mu}} + \Phi_{\nu_{\tau}} \quad (4.6)$$

## 4.1. Eredmények



## 5. Neutrínó-oszcilláció QM leírása

→ 2 családra,  $m_{a,b}$ .

→ WI íz-sajátállapot ( $|l_{1,2}\rangle$ )  $\neq$  tömeg sajátállapot ( $|a, b\rangle$ ), helyette szuperpozíciói.

Legáltalánosabb paraméterezés:

$$|l_1\rangle = \cos\theta|a\rangle + \sin\theta|b\rangle \quad (5.1)$$

$$|l_2\rangle = -\sin\theta|a\rangle + \cos\theta|b\rangle \quad (5.2)$$

Szabad időfejlődés:

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iH_{\text{free}}t}|\psi(0)\rangle, \quad \text{tfh } |\psi(0)\rangle = |l_1\rangle_{\text{adott } \vec{p}} \quad (5.3)$$

$$|\psi(t)\rangle = \cos\theta e^{-iE_a t}|a\rangle + \sin\theta e^{-iE_b t}|b\rangle \quad (5.4)$$

ahol  $E_{a,b} = \sqrt{(\vec{p})^2 + m_{a,b}^2}$ . Valsz, hogy  $l_1$ -et detektálunk  $t$ -ben:

$$\begin{aligned} |\langle l_1|\psi(t)\rangle|^2 &= |\cos\theta e^{-iE_a t}\langle l_1|a\rangle + \sin\theta e^{-iE_b t}\langle l_1|b\rangle|^2 = |\cos^2\theta e^{-iE_a t} + \sin^2\theta e^{-iE_b t}|^2 = \\ &= \cos^4\theta + \sin^4\theta + 2\cos^2\theta\sin^2\theta\cos(E_a - E_b)t \end{aligned} \quad (5.5)$$

→ Függ: idő, energiaskála → oszcilláció.



Kicsi  $m_{a,b} \rightarrow$  ultrarelat:  $|\vec{p}| \gg m_{a,b}$ :

$$E_a - E_b = \frac{E_a^2 - E_b^2}{E_a + E_b} = \frac{m_a^2 - m_b^2}{E_a + E_b} \approx \frac{m_a^2 - m_b^2}{2|\vec{p}|} = \frac{\Delta m^2}{2|\vec{p}|} \quad (5.6)$$

Neutrínó fluxus:  $\Phi_1(x(t)) \sim |\langle l_1 | \psi(t) \rangle|^2 \rightsquigarrow$

$$\Phi_1(x) = A + B \cos \frac{\Delta m^2}{2|\vec{p}|} x \quad (5.7)$$

$$\frac{A}{B} = \frac{\cos^4 \theta + \sin^4 \theta}{2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta} = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{1 - \cos^2 2\theta} \quad (5.8)$$

Oszcillációhoz feltétel: legalább egy tömegkülönbség  $\neq 0$ .  $\rightarrow$  legalább egy  $m_\nu \neq 0$ .

Továbbá,  $x$ -ben: „baseline”.

- $\rightarrow$  Atmoszférikus- $\nu$ : Föld átmérője
- $\rightarrow$  Nap-neutrínó: Föld-Nap távolság

### 5.1. 3 családra általánosítás

- $\rightarrow$  Keveredési mátrix lesz 3 szöggel és egy eliminálhatatlan fázissal (többi fázis nem fizikai)
- $\rightarrow$  3 tömegnégyzet különbség lesz

Kísérleti eredmények:

$$\begin{aligned} \Delta m_{21}^2 &= 7.55_{-0.16}^{+0.20} \cdot 10^{-5} \text{eV}^2 & |\Delta m_{31}^2| &= \begin{cases} 2.50 \pm 0.03 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 & \text{(NO)} \\ 2.42_{-0.04}^{+0.03} \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 & \text{(IO)} \end{cases} \\ \sin^2 \theta_{12} &= 3.20_{-0.16}^{+0.20} \cdot 10^{-1} & \sin^2 \theta_{23} &= \begin{cases} 5.47_{-0.30}^{+0.20} \cdot 10^{-1} & \text{(NO)} \\ 5.51_{-0.30}^{+0.18} \cdot 10^{-1} & \text{(IO)} \end{cases} \\ \sin^2 \theta_{13} &= \begin{cases} 2.160_{-0.069}^{+0.083} \cdot 10^{-2} & \text{(NO)} \\ 2.220_{-0.076}^{+0.074} \cdot 10^{-2} & \text{(IO)} \end{cases} & \frac{\delta_{CP}}{\pi} &= \begin{cases} 1.32_{-0.15}^{+0.21} & \text{(NO)} \\ 1.56_{-0.15}^{+0.13} & \text{(IO)} \end{cases} \end{aligned}$$

- NO: Normálrendezés:  $\Delta m_{32}^2 > 0 \rightsquigarrow m_1 < m_2 \ll m_3$
- IO: Invertáltrendezés:  $\Delta m_{32}^2 < 0 \rightsquigarrow m_3 \ll m_1 < m_2$
- Jelenleg nincs kísérlet ami eldöntené melyik valósul meg.

## 5.2. Neutrínó-tömeg (SM kiterjesztése)

Legegyszerűbb lehetőség: Higgs-mechanizmuson keresztül.

- Jobbkezes (negatív kiralitású) neutrínó mező kell. ( $SU(2)_L$  szinglett eltűnő  $U(1)_Y$ -al.)
- Keveredés: csatolás nem diagonális

SSB után ezzel lesz Dirac-tömegtag:  $\bar{\nu}_L \nu_R + \bar{\nu}_R \nu_L$ . De  $\nu_R$  CSAK ehhez van csatolva → steril neutrínó.

„Csalás.”

## 6. GALLEX/GNO

Radiokémiai detektor (Mechanizmus: neutrínó-indukált nukleáris reakció):



Leánymag produkciós rátája:  $R = N_{\text{target}} \int \Phi_{\text{nap}}(E) \sigma(E) dE$ .

GALLEX: 1991-1997, GNO: 1998-2003. Helyszín: LNGS, Gran Sasso hegység ( $\equiv$  3200 m árnyékoló víz), Abruzzo provincia (Olaszország).



Galliumnak hála a küszöb: 233.2 keV  $\rightarrow$  a pp lánc  $\nu$ -jei is vizsgálhatóak.

Detektor:

$\rightarrow$  54  $m^3$  tank 101 tonna gallium-triklorid ( $\text{GaCl}_3$ ): 30.3 t gallium.

$\rightarrow$   ${}^{71}\text{Ge}$  kivonása  $\rightarrow$  Germán-ná ( $\text{GeH}_3$ ) alakítás.  $\rightarrow$  11.43 nap felezési idő, proporcionális számlálóval mérés.  $\forall$  bomlás  $\Leftrightarrow$  1 detektált  $\nu$ .

### 6.1. Eredmények

Befogási ráta:

$\rightarrow$  GALLEX: 73.1 SNU<sup>2</sup>

$\rightarrow$  GNO: 62.9 SNU.

---

<sup>2</sup>Solar Neutrino Unit  $\equiv$  annyi mint ha a neutrínó fluxus  $10^{-36}$  befogást ad target atomonként, másodpercenként.

**Hivatkozások**

- [1] Csótó Attila: Fejezetek a mag- és részecskefizikából előadásjegyzet
- [2] Pásztor Gabriella: Experimental methods in particle physics  
[http://atomfizika.elte.hu/rfkm/rfkm2020/ELTEReszFizKisModsz2020-5\\_compressed.pdf](http://atomfizika.elte.hu/rfkm/rfkm2020/ELTEReszFizKisModsz2020-5_compressed.pdf)
- [3] Matteo Giordano: Weak Interactions lecture slides  
[http://bodri.elte.hu/giordano/weak/lecture\\_wi\\_19.pdf](http://bodri.elte.hu/giordano/weak/lecture_wi_19.pdf)
- [4] Till Kristen: Retrospect of GALLEX/GNO, Max-Planck Institute für Kernphysik  
<https://www.slideserve.com/lam/retrospect-of-gallex-gno-powerpoint-ppt-presentation>