

# Neutrínóoszilláció detektálása a Sudbury Neutrínó Obszervatóriumban

Nagy Richárd László

Eötvös Lóránd Tudományegyetem (ELTE)  
Budapest

Magfizika szeminárium 15/10/2020

# Bevezetés

Mi az a neutrínóoszilláció?

Egy kis lingvisztika: Összetett szó  $\longrightarrow$  neutrínó + oszcilláció

Mi oszcillál ebben az esetben?

Honnan lesznek neutrínók? Milyen neutrínók?

Neutrínók detektálása? Hogyan? És miért?

# Bevezetés: Neutrínók

Mi is a neutrínó?

Standard Modell szerint:

- Elemi részecske
- Fermion: lepton
- Három íz: elektron, müon, tau
- Csak gyenge kölcsönhatás
- Nincs tömegük

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III	
tömeg→	2,3 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	173 GeV/c <sup>2</sup>	0
töltés→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
név→	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton
	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	95 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d-kvark	s-kvark	b-kvark	gluon
	0	0	0	91,2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	v <sub>e</sub>	v <sub>μ</sub>	v <sub>τ</sub>	Z <sup>0</sup>
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó	Z-bozon
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e	μ	τ	W <sup>±</sup>
	elektron	müon	tau	W-bozon

Kvarkok

Leptonok

Bozonok (kölcsönhatások)

# Bevezetés: Neutrínók

Mi is a neutrínó?

Standard Modell szerint:

- Elemi részecske
- Fermion: lepton
- Három íz: elektron, müon, tau
- Csak gyenge kölcsönhatás
- **Nincs tömegük? Miért?**

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III	
tömeg→	2,3 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	173 GeV/c <sup>2</sup>	0
töltés→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
név→	u-kvark	c-kvark	t-kvark	Y
				foton
	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	95 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d-kvark	s-kvark	b-kvark	g
				gluon
	0	0	0	91,2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z^0$
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó	Z-bozon
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e	$\mu$	$\tau$	$W^\pm$
	elektron	müon	tau	W-bozon

Kvarkok

Leptonok

Bozonok (kölcsönhatások)

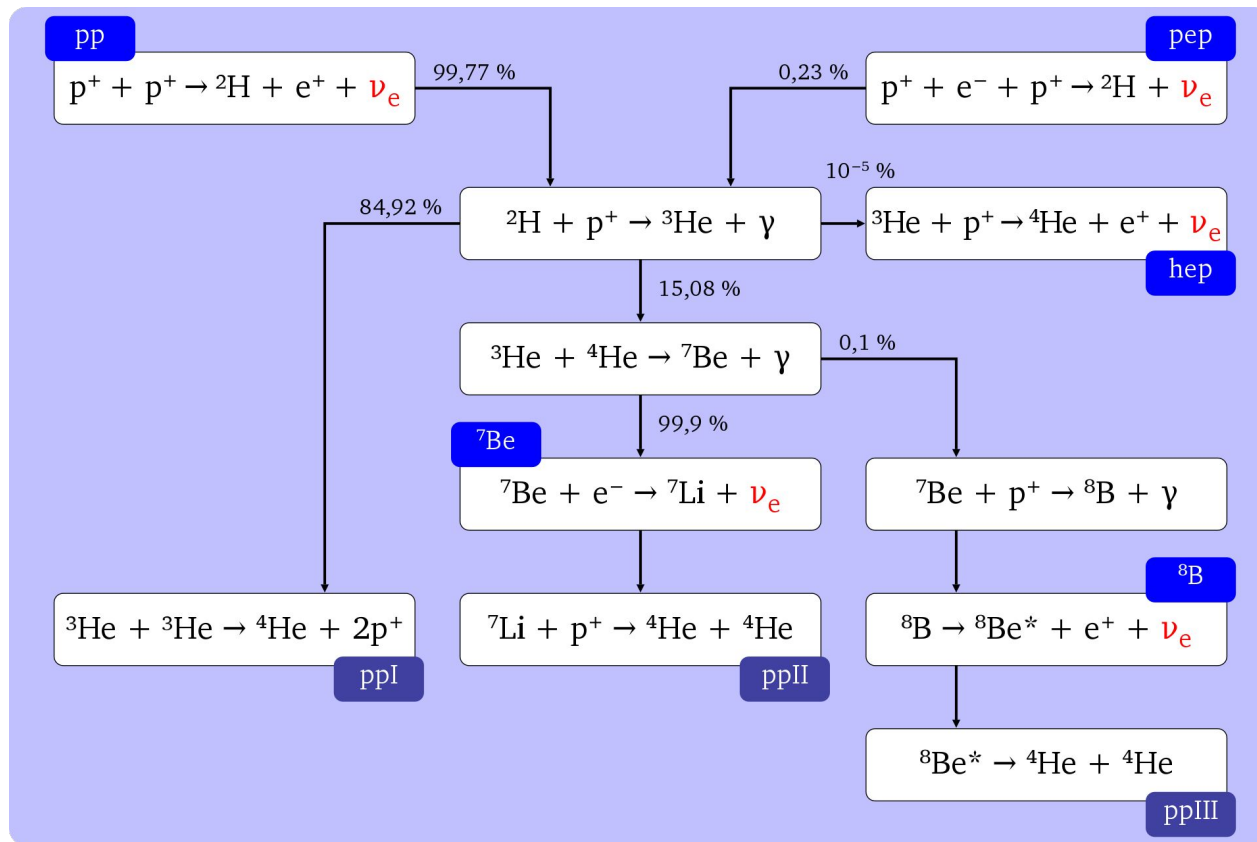
# Bevezetés: Standard napmodell

Standard Napmodell → Jakovác Kristóf (dec. 10.) előadása  
“A Nap energiatermelése”

# Bevezetés: Standard napmodell

## Standard Napmodell

p-p lánc (...és CNO ciklus)

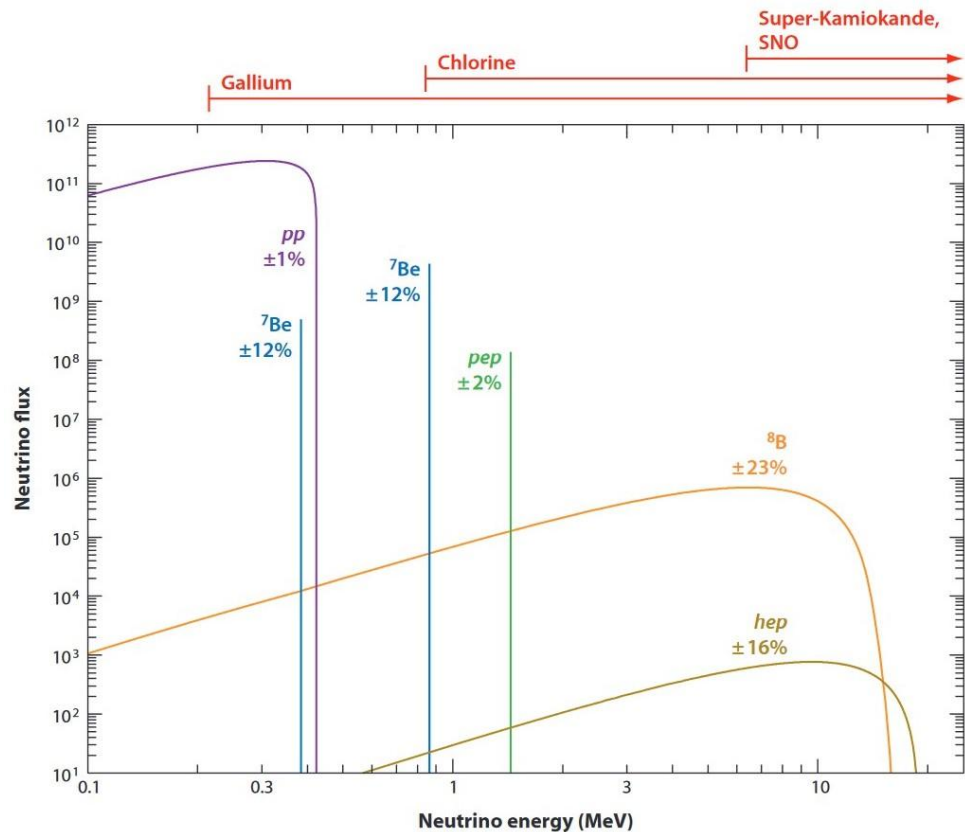


# Bevezetés: Standard napmodell

## Standard Napmodell

p-p lánc (...és CNO ciklus)

Neutrínófluxus



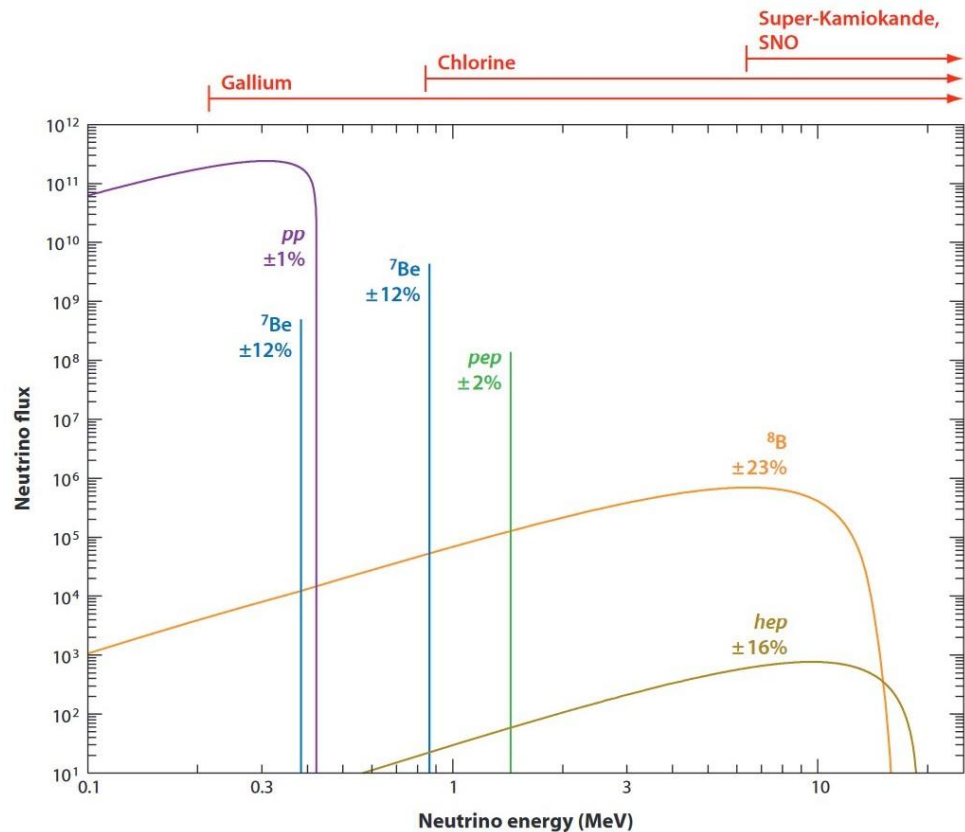
# Bevezetés: Standard napmodell

Standard Napmodell

↓  
p-p lánc (...és CNO ciklus)

↓  
Neutrínófluxus

↓  
Ellenőrzés? Méréssel!





# Mérési kísérletek

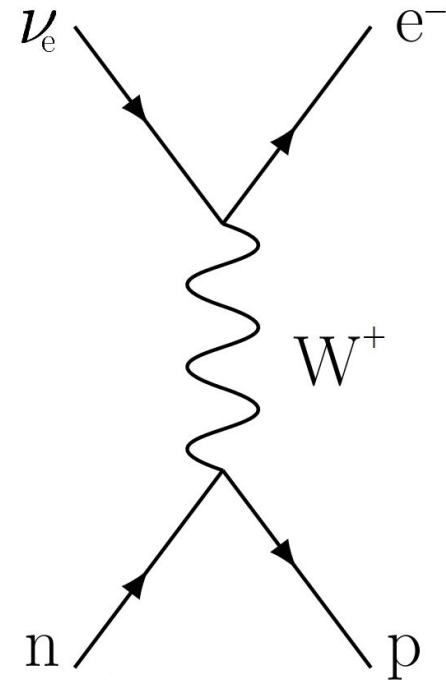
Homestake kísérlet

Ray Davis & John Bahcall

$C_2Cl_4$  (perklóretilén) használtak



Küszöbenergia  $\sim 0.8$  Mev

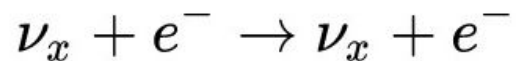


# Mérési kísérletek

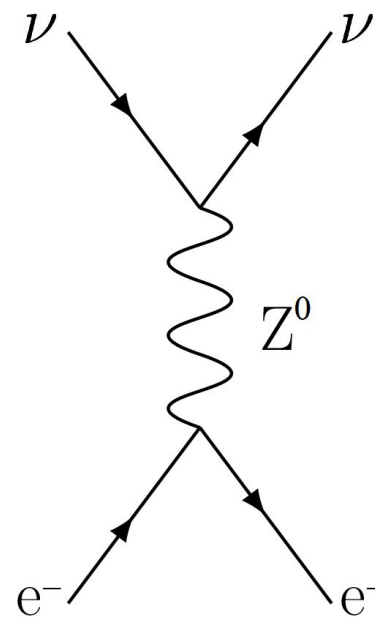
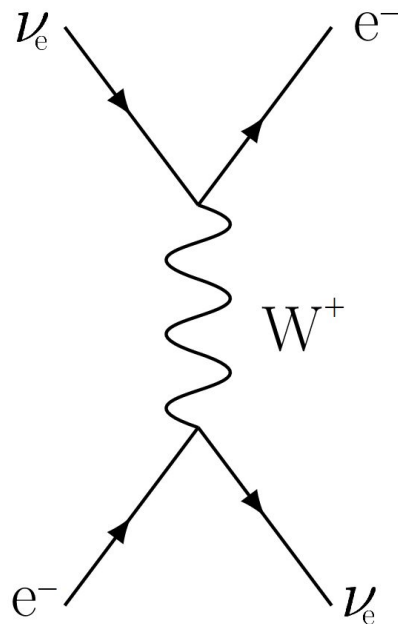
Super-Kamiokande

Vizes Cherenkov detektor

Elektron szórás (ES)



Töltött áramú (CC) és  
semleges áramú (NC)



# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték  
Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell?
- Detektorok?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában?**

- Detektorok?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**
- Detektorok?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták?**
- Detektorok?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**
- Detektorok?



# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**
- Detektorok? **Rosszul mértek?**

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**
- Detektorok? **Rosszul mérték? Nem...** (...teljesen igaz...)

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**
- Detektorok? **Rosszul mérték? Nem...** (...teljesen igaz...)

Mi lehet a megoldás?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**

- Detektorok? **Rosszul mérték? Nem...** (...teljesen igaz...)  
**Nem mérték az összes neutrínó teljes fluxusát!**

Mi lehet a megoldás?

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**

- Detektorok? **Rosszul mérték? Nem...** (...teljesen igaz...)  
**Nem mérték az összes neutrínó teljes fluxusát!**

Mi lehet a megoldás? Hiányzó elmélet

# Napneutrínó probléma

Homestake eredménye: A várt fluxus harmadát mérték

Super-Kamiokande eredménye: A várt fluxus felét mérték

Mivel lehet gond?

- Napmodell? **Leálltak a nukleáris folyamatok a Nap magjában? Nem.**  
**Hidegebb volna a Nap magja, mint gondolták? Nem.**

- Detektorok? **Rosszul mérték? Nem...** (...teljesen igaz...)

**Nem mérték az összes neutrínó teljes fluxusát!**

Mi lehet a megoldás? Hiányzó elmélet  $\longrightarrow$  Neutrínóoszilláció!

# Neutrínóoszilláció elmélete

Vannak neutrínó tömeg-sajátállapotok

A különböző ízek egy keveredési mátrixszal előállíthatók

# Neutrínóoszilláció elmélete

Vannak neutrínó tömeg-sajátállapotok

A különböző ízek egy keveredési mátrixszal előállíthatók

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$



# Neutrínóoszilláció elmélete

Vannak neutrínó tömeg-sajátállapotok

A különböző ízek egy keveredési mátrixszal előállíthatók

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_k(t)\rangle = \mathcal{H} |\nu_k(t)\rangle = E_k |\nu_k(t)\rangle \quad \Longrightarrow \quad |\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$$

# Neutrínóoszilláció elmélete

Vannak neutrínó tömeg-sajátállapotok

A különböző ízek egy keveredési mátrixszal előállíthatók

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_k(t)\rangle = \mathcal{H} |\nu_k(t)\rangle = E_k |\nu_k(t)\rangle \quad \Longrightarrow \quad |\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$$

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle = \sum_{\beta=e,\mu,\tau} \left( \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} U_{\beta k} \right) |\nu_\beta\rangle$$

# Neutrínóoszilláció elmélete

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} U_{\beta k} \right|^2 = \sum_{k,j=1}^3 U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i(E_k - E_j)t}$$

# Neutrínóoszilláció elmélete

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} U_{\beta k} \right|^2 = \sum_{k,j=1}^3 U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i(E_k - E_j)t}$$

$$E_k = \sqrt{\vec{p}^2 + m_k^2} \simeq E + \frac{m_k^2}{2E} \quad \Longrightarrow \quad E_k - E_j = \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E}$$

# Neutrínóoszilláció elmélete

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} U_{\beta k} \right|^2 = \sum_{k,j=1}^3 U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i(E_k - E_j)t}$$

$$E_k = \sqrt{\vec{p}^2 + m_k^2} \simeq E + \frac{m_k^2}{2E} \quad \Longrightarrow \quad E_k - E_j = \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E}$$

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \sum_{k,j=1}^3 U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E}\right)$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

Csak két tömeg-sajátállapot van

2x2 keveredési mátrix egy keveredési szöggel

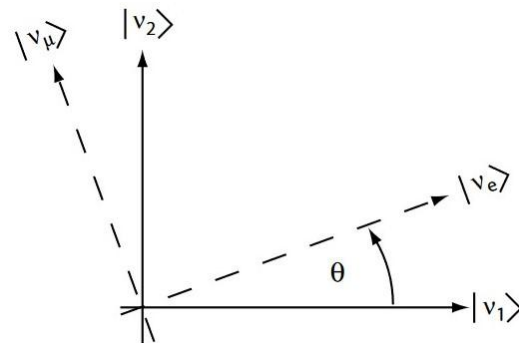
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

Csak két tömeg-sajátállapot van

2x2 keveredési mátrix egy keveredési szöggel

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



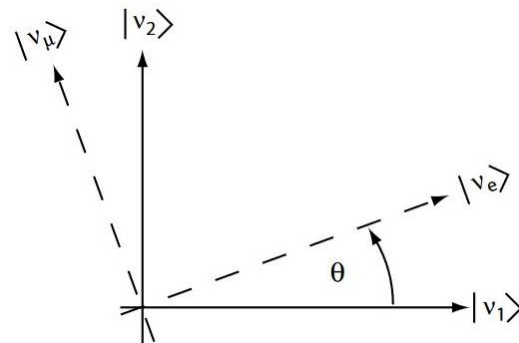
# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

Csak két tömeg-sajátállapot van

2x2 keveredési mátrix egy keveredési szöggel

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

$$|\nu_\mu(t=0)\rangle = |\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle$$





# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

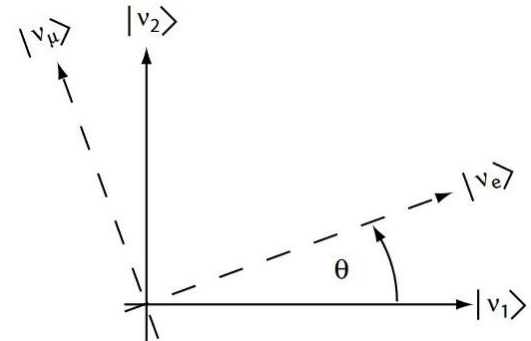
Csak két tömeg-sajátállapot van

2x2 keveredési mátrix egy keveredési szöggel

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

$$|\nu_\mu(t=0)\rangle = |\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle e^{-i\frac{E_1 t}{\hbar}} + \cos \theta |\nu_2\rangle e^{-i\frac{E_2 t}{\hbar}}$$



# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

Csak két tömeg-sajátállapot van

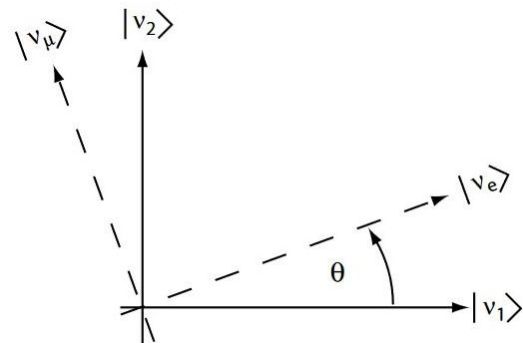
$$2 \times 2 \text{ keveredési mátrix egy keveredési szöggel} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$|\nu_\mu(t=0)\rangle = |\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle e^{-i\frac{E_1 t}{\hbar}} + \cos \theta |\nu_2\rangle e^{-i\frac{E_2 t}{\hbar}}$$

$$\hbar = c = 1 \quad E_1 = \sqrt{p^2 + m_1^2} \quad E_2 = \sqrt{p^2 + m_2^2}$$

$$E_1 \simeq p + \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{p} \quad E_2 \simeq p + \frac{1}{2} \frac{m_2^2}{p}$$



# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle e^{-i\left(p + \frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{-i\left(p + \frac{1}{2}\frac{m_2^2}{p}\right)t}$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_2^2}{p}\right)t}$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} \left( -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{+i\left(\frac{1}{2}\frac{m_1^2-m_2^2}{p}\right)t} \right)$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_2^2}{p}\right)t}$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} \left( -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{+i\left(\frac{1}{2}\frac{m_1^2-m_2^2}{p}\right)t} \right)$$

$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2 \quad t = \frac{x}{c} = x \quad e^{-iz} = e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t}$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_2^2}{p}\right)t}$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t} \left( -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{+i\left(\frac{1}{2}\frac{m_1^2-m_2^2}{p}\right)t} \right)$$

$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2 \quad t = \frac{x}{c} = x \quad e^{-iz} = e^{-i\left(p+\frac{1}{2}\frac{m_1^2}{p}\right)t}$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = e^{-iz} \left( -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{+i\left(\frac{1}{2}\frac{\Delta m^2}{p}\right)x} \right)$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

$$\langle \nu_e | = \cos \theta \langle \nu_1 | + \sin \theta \langle \nu_2 |$$



# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = \\ &= e^{+iz} e^{-iz} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left( -1 + e^{\frac{i}{2} \frac{\Delta m^2}{p} x} \right) \left( -1 + e^{-\frac{i}{2} \frac{\Delta m^2}{p} x} \right) \end{aligned}$$

# Neutrínóoszilláció elmélete egyszerűbben

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 =$$
$$= e^{+iz} e^{-iz} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left( -1 + e^{\frac{i}{2} \frac{\Delta m^2}{p} x} \right) \left( -1 + e^{-\frac{i}{2} \frac{\Delta m^2}{p} x} \right)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2}{4} \frac{L}{E_\nu} \right)$$

# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

## Felépítése

Ni bányában felszín alatt 2 km-rel

12 m átmérőjű 5.6 cm vastag akril tartály

Benne 1000 tonna nehézvíz (hidrogén helyett deutron)

9438 PMT detektor

A tartály körül az üregben ultratiszta könnyűvíz



# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

## Detektálás

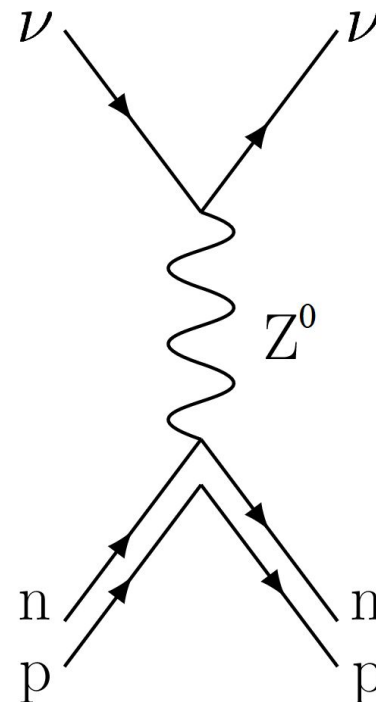
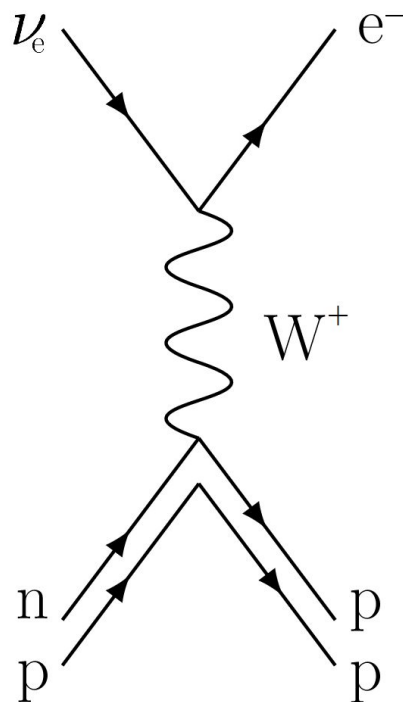
Az érkező neutrínó kölcsönhat a nehézvíz deutronjával:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- - 1.44 \text{ MeV (CC)}$$

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x - 2.22 \text{ MeV (NC)}$$

És az elektronokkal:

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \text{ (ES)}$$



# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

1. mérési fázis: Tiszta nehézvízzel (306.4 napig)

Eredmények:

# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

1. mérési fázis: Tiszta nehézvízzel (306.4 napig)

Eredmények:

I. Első kidolgozott analízis

Effektív kinetikus energia  $> 6.75$  MeV

$$\phi_{CC}^{SNO}(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07 \text{ (stat.)}_{-0.11}^{+0.12} \text{ (syst.)} \pm 0.05 \text{ (theor.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi_{ES}^{SNO}(\nu_x) = 2.39 \pm 0.34 \text{ (stat.)}_{-0.14}^{+0.16} \text{ (syst.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi_{ES}^{SK}(\nu_x) = 2.32 \pm 0.03 \text{ (stat.)}_{-0.07}^{+0.08} \text{ (syst.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi(\nu_x) = 5.44 \pm 0.99 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

# Sudbury Neutrínó Observatórium

## 1. mérési fázis: Tiszta nehézvízzel (306.4 napig)

### Eredmények:

#### I. Első kidolgozott analízis

Effektív kinetikus energia  $> 6.75$  MeV

$$\phi_{CC}^{\text{SNO}}(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07 \text{ (stat.)}_{-0.11}^{+0.12} \text{ (syst.)} \pm 0.05 \text{ (theor.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi_{ES}^{\text{SNO}}(\nu_x) = 2.39 \pm 0.34 \text{ (stat.)}_{-0.14}^{+0.16} \text{ (syst.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi_{ES}^{\text{SK}}(\nu_x) = 2.32 \pm 0.03 \text{ (stat.)}_{-0.07}^{+0.08} \text{ (syst.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi(\nu_x) = 5.44 \pm 0.99 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

#### II. Második kidolgozott analízis

Effektív kinetikus energia  $> 5$  MeV

$$\phi_{CC} = 1.76_{-0.05}^{+0.06} \text{ (stat.)}_{-0.09}^{+0.09} \text{ (syst.)}$$

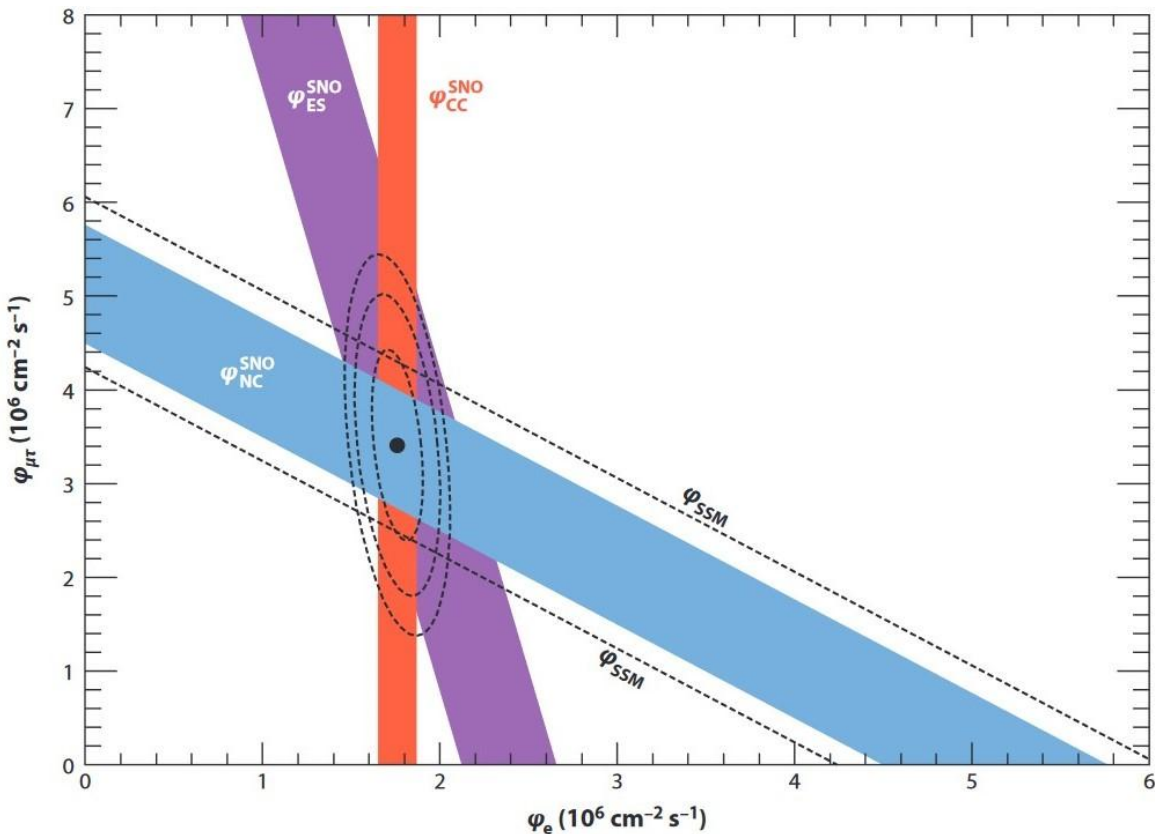
$$\phi_{ES} = 2.39_{-0.23}^{+0.24} \text{ (stat.)}_{-0.12}^{+0.12} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{NC} = 5.09_{-0.43}^{+0.44} \text{ (stat.)}_{-0.43}^{+0.46} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{\nu_{\mu\tau}} = 3.41_{-0.45}^{+0.45} \text{ (stat.)}_{-0.45}^{+0.48} \text{ (syst.)}$$

# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

Az 1. mérési fázisban a II. analízis eredményeinek ábrázolása



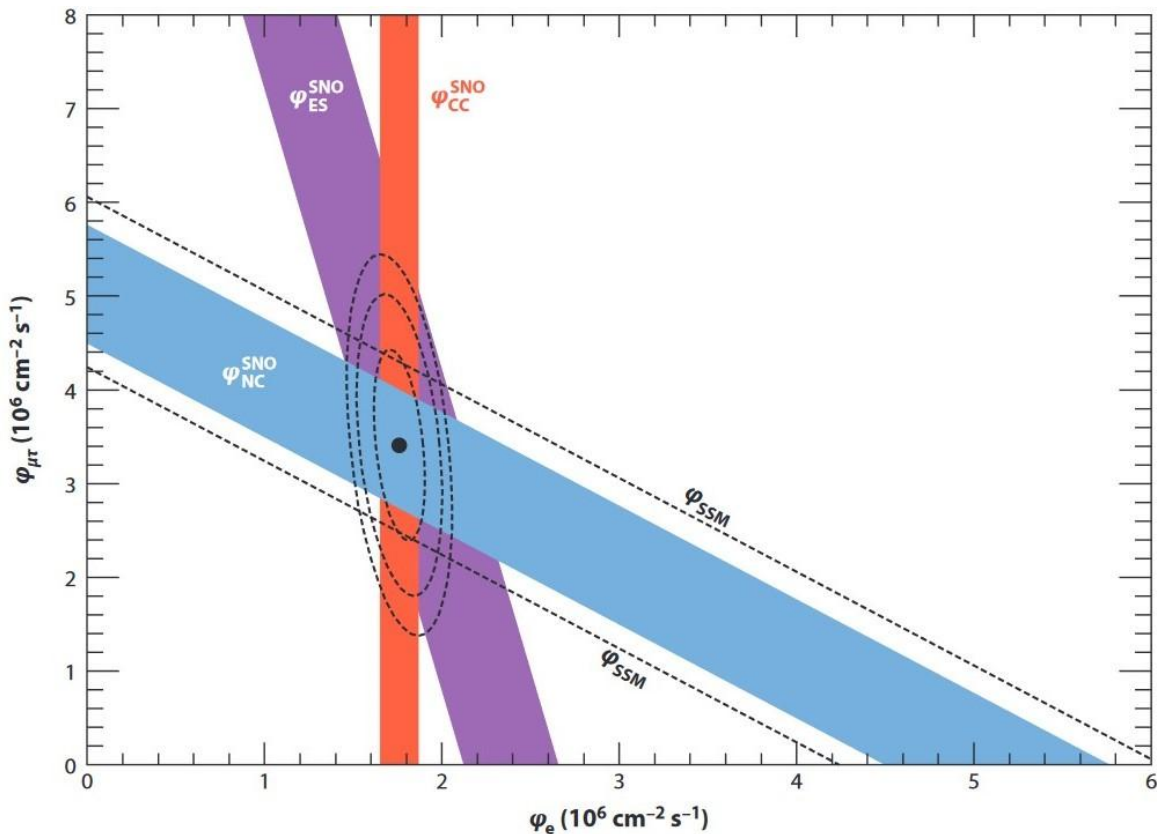


# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

Az 1. mérési fázisban a II. analízis eredményeinek ábrázolása

További analízis:

Az éjjeli és nappali beütések számának összehasonlítása



# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

## 2. mérési fázis (391.4 napig)

2 t NaCl-t oldottak fel, ezzel felerősítették a NC jelet

Eredmények: (eff. kin.  $E > 5.5$  MeV)

$$\phi_{CC} = 1.68_{-0.06}^{+0.06} \text{ (stat.)}_{-0.09}^{+0.08} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{ES} = 2.35_{-0.22}^{+0.22} \text{ (stat.)}_{-0.15}^{+0.15} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{NC} = 4.94_{-0.21}^{+0.21} \text{ (stat.)}_{-0.34}^{+0.38} \text{ (syst.)}$$

$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.340_{-0.023}^{+0.023} \text{ (stat.)}_{-0.031}^{+0.029} \text{ (syst.)}$$

# Sudbury Neutrínó Obszervatórium

## 2. mérési fázis (391.4 napig)

2 t NaCl-t oldottak fel, ezzel felerősítették a NC jelet

Eredmények: (eff. kin.  $E > 5.5$  MeV)

$$\phi_{CC} = 1.68_{-0.06}^{+0.06} \text{ (stat.)}_{-0.09}^{+0.08} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{ES} = 2.35_{-0.22}^{+0.22} \text{ (stat.)}_{-0.15}^{+0.15} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{NC} = 4.94_{-0.21}^{+0.21} \text{ (stat.)}_{-0.34}^{+0.38} \text{ (syst.)}$$

$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.340_{-0.023}^{+0.023} \text{ (stat.)}_{-0.031}^{+0.029} \text{ (syst.)}$$

## 3. mérési fázis (385.17 napig)

Kiszívták a NaCl-t, és neutronokra érzékeny prop. számlálókat helyeztek el

Eredmények:

$$\phi_{CC} = 1.67_{-0.04}^{+0.05} \text{ (stat.)}_{-0.08}^{+0.07} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{ES} = 1.77_{-0.21}^{+0.24} \text{ (stat.)}_{-0.10}^{+0.09} \text{ (syst.)}$$

$$\phi_{NC} = 5.54_{-0.31}^{+0.33} \text{ (stat.)}_{-0.34}^{+0.36} \text{ (syst.)}$$

$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.301 \pm 0.033 \text{ (total)}$$

# Kiemelkedő munkásságok

Fizikai Nobel-díjban részesültek “a neutrínóoszilláció felfedezéséért, ami megmutatta, hogy a neutrínóknak van tömegük”



Arthur B. McDonald



Kajita Takaaki

# Kiemelkedő munkásságok

A standard napmodell felépítéséért és a napneutrínó probléma megoldásáért nyújtott hozzájárulásáért



John N. Bahcall

# Összefoglalás

Sikerült detektálni a Naptól érkező neutrínókat, megmérni a fluxusukat

Ezzel sikerült igazolni a napmodell jóslatait, a modell jól működik

A neutrínók ízt tudnak váltani

Ennek felírható a valószínűsége

Az oszcilláció miatt a neutrínóknak mégis van tömegük

# Összefoglalás és érdekességek

Sikerült detektálni a Napból érkező neutrínókat, megmérni a fluxusukat

Ezzel sikerült igazolni a napmodell jóslatait, a modell jól működik

A neutrínók ízt tudnak váltani

Ennek felírható a valószínűsége

Az oszcilláció miatt a neutrínóknak mégis van tömegük

*Neutrínók további rejtélyei: Balkezes neutrínók? Majorana részecske?*

# Felhasznált irodalom és további olvasmányok

<https://falcon.phy.queensu.ca/SNO/papers/JelleyMcDonaldRobertsonAnnRev2009.pdf>

<https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0409230.pdf>

<https://physicsx.erau.edu/Office/oscillations.pdf>

<http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1202/Fenyestibor.pdf>

<https://arxiv.org/pdf/1704.06331.pdf>

<https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9512285.pdf>

Wikipedia: Neutrino, Standard solar model, Solar neutrino problem, etc.