

# Részecskefizika 3: neutrínók

## *Előadássorozat fizikatanárok részére*

### *(CERN, 2014)*

**Horváth Dezső**

Horvath.Dezso@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont  
Részecske- és Magfizikai Intézet, Budapest  
és ATOMKI, Debrecen

# Bevezetés a részecskefizikába, 3. rész
















## E. Neutrínófizika

- Légekri és Nap-neutrínók
- Rejtélyek: hiány
- Neutrínó-oszcilláció
- Gyorsító kísérletek
- Hányféle neutrínó van?
- További rejtélyek: tömeg, keveredés

## F. Új fizika keresése

- A Standard Modell problémái
- Szuperszimmetria

# A Standard Modell állatkertje

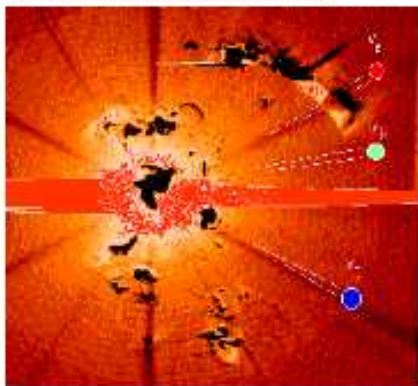
Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino e	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$	 $Z^0 W^\pm$
The Standard Model				Higgs
				A. Pich - CERN Summer Lectures 2005

# Neutrínóforrások



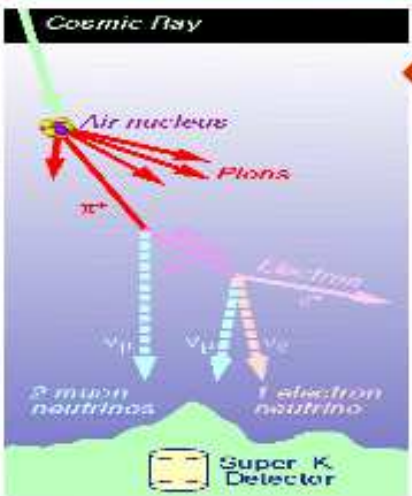
← Nap

Kozmikus →



← Kozmológia

Reaktor →



← Léggör

Gyorsító →



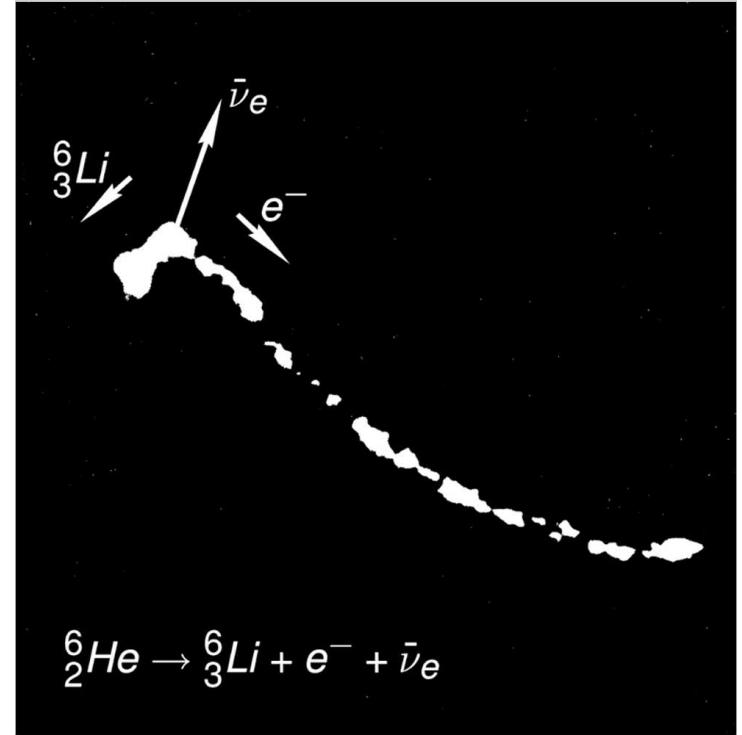
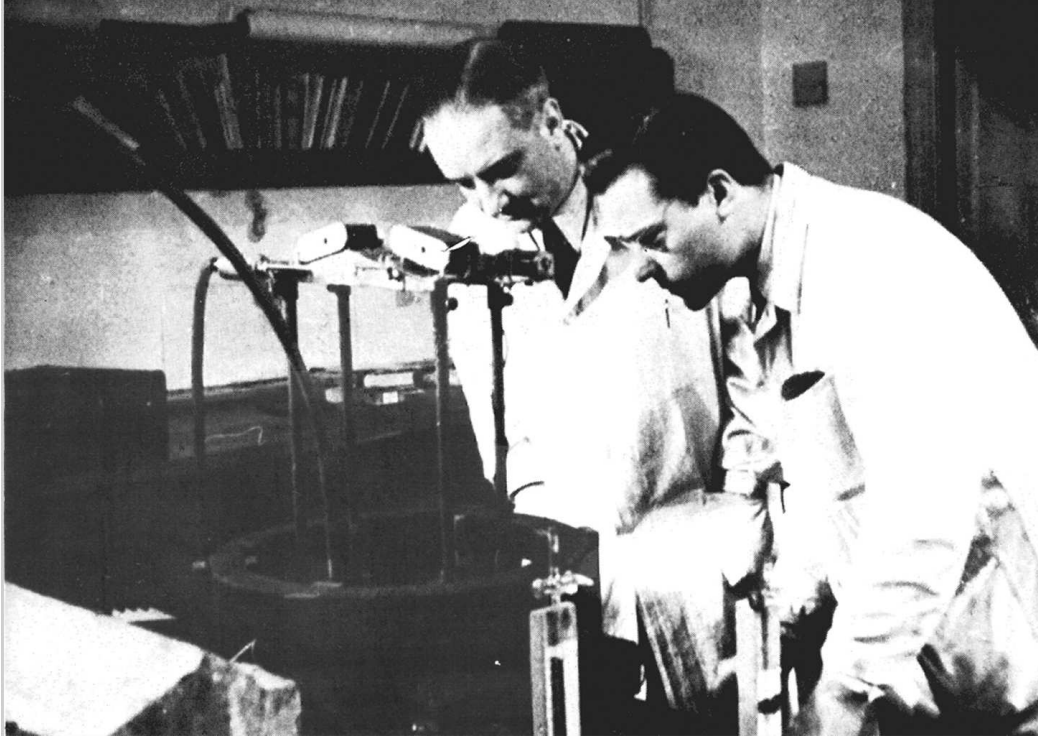
← Föld



# Neutrínóforrások

- Kozmikus sugarak (szupernova, ősrobbanás, ...)
- Nap: magfúzió  $4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu_e$   
 $10^8$  km távolságra, csak  $\nu_e$
- Léggör: kozmikus sugarak másodlagos részecskéi  
 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ ;  $\mu^\pm \rightarrow \text{e}^\pm \nu_\mu \nu_e$   
30km,  $\nu_e, 2\nu_\mu$   $\nu$  és  $\bar{\nu}$
- Atomreaktor:  $\sim 1$  km, csak  $\nu_e$
- Gyorsító: analóg léggörrel 0–1000 km
- Föld belseje: geoneutrínók  
Antineutrínók természetes radioaktivitásból  
U, Th  $\beta$ -bomlása:  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$

# Debrecen, 1956: a $\bar{\nu}_e$ megfigyelése



Szalay Sándor és Csikai Gyula a ködkamrával, és az elektron-antineutrínó nyoma

# A Nap neutrínói



Észlelési egység:

Solar Neutrino Unit

$$1 \text{ SNU} = \frac{10^{-36} \nu\text{-kölsönhatás}}{\text{atom} \cdot \text{sec}}$$

Detektor:

10 – 10000 t anyag

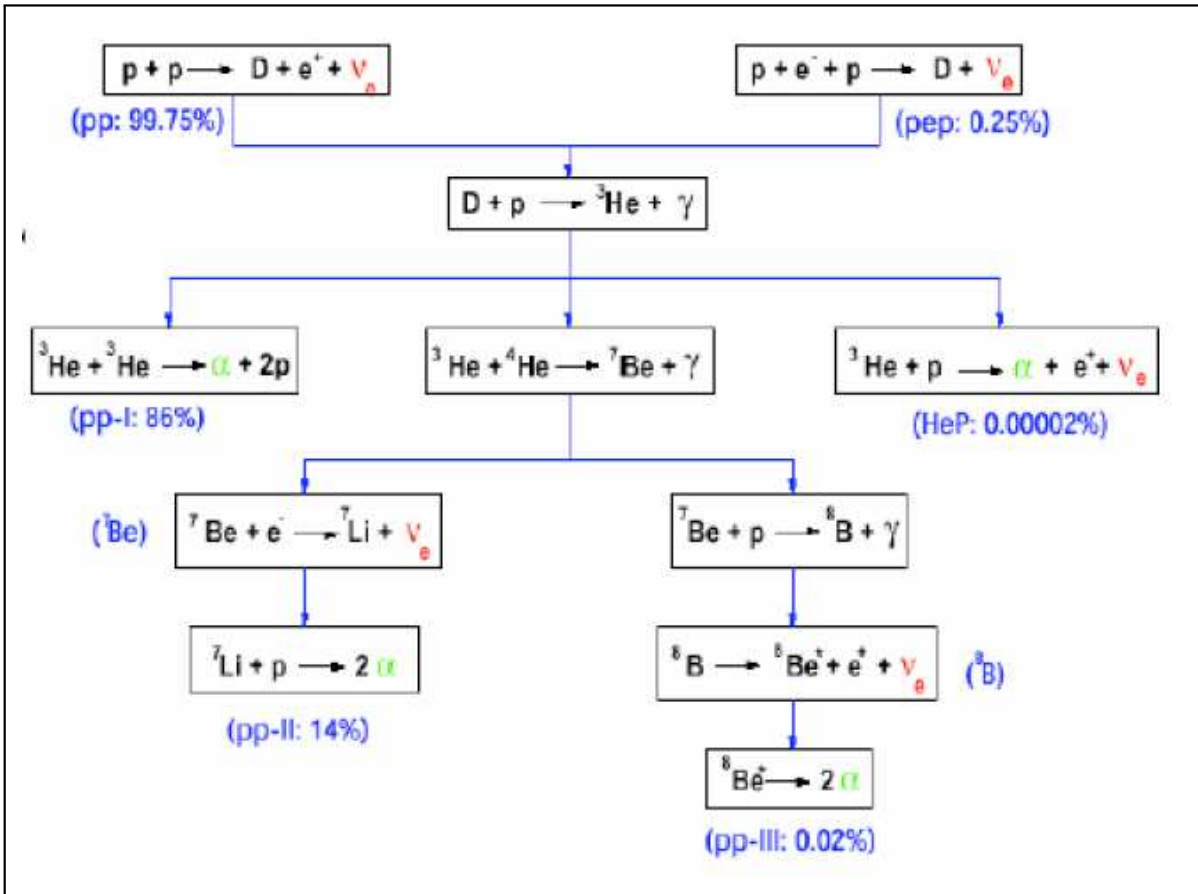
Mérés:



Várt:  $8,2 \pm 1,8$  SNU;

mért:  $2,56 \pm 0,23$  SNU

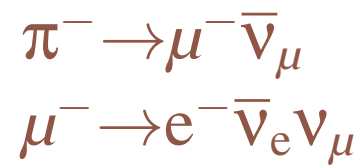
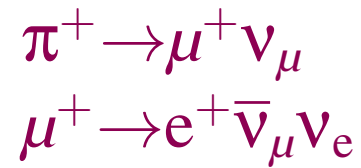
Elvesztek??



Mi rossz: Napmodell vagy mérés?

Mindkettő megerősítve...

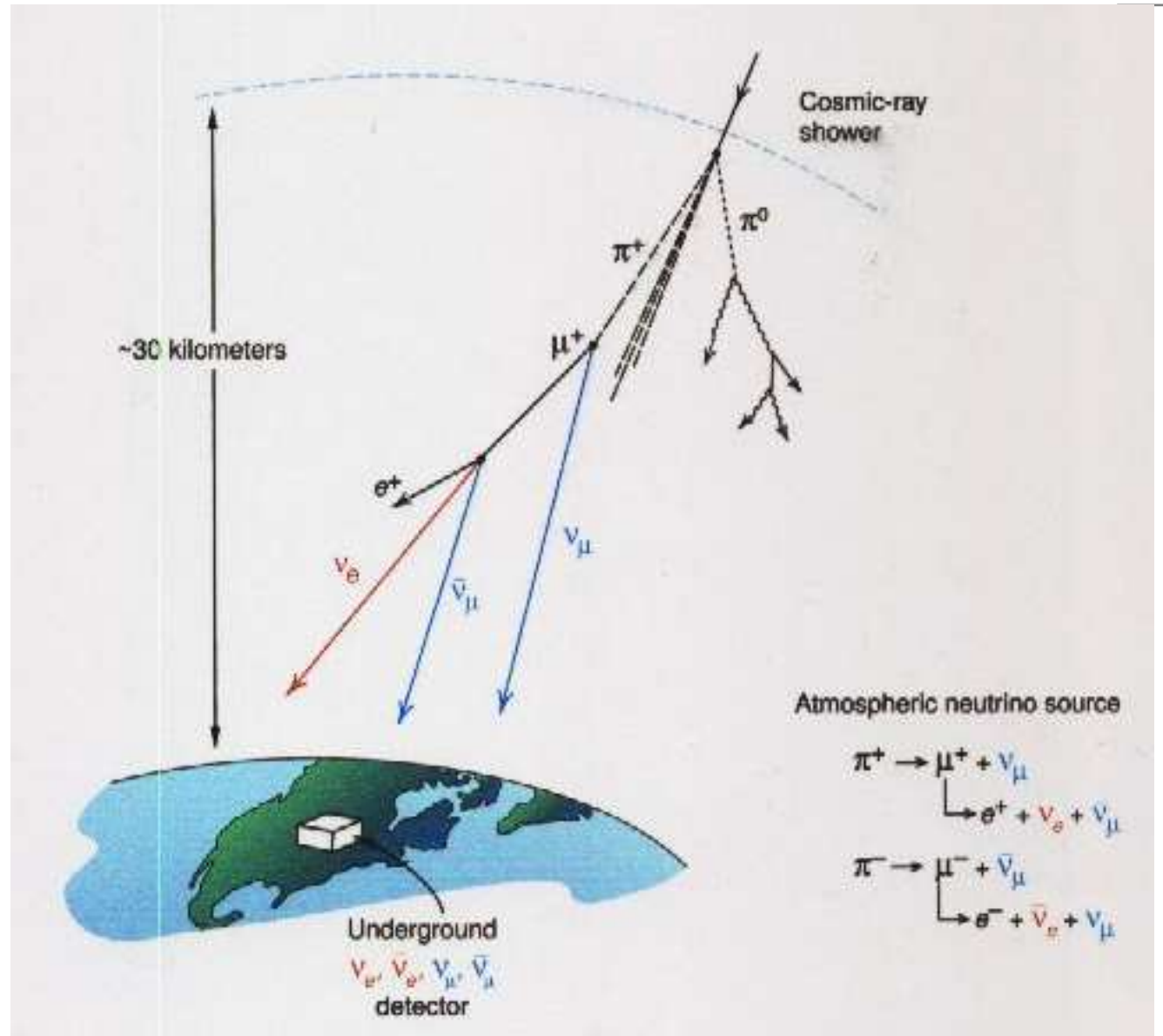
# A légköri neutrínók



Várt:  $N_\mu/N_e \sim 2$

Mért:  $N_\mu/N_e \ll 2$

Hova lesznek?



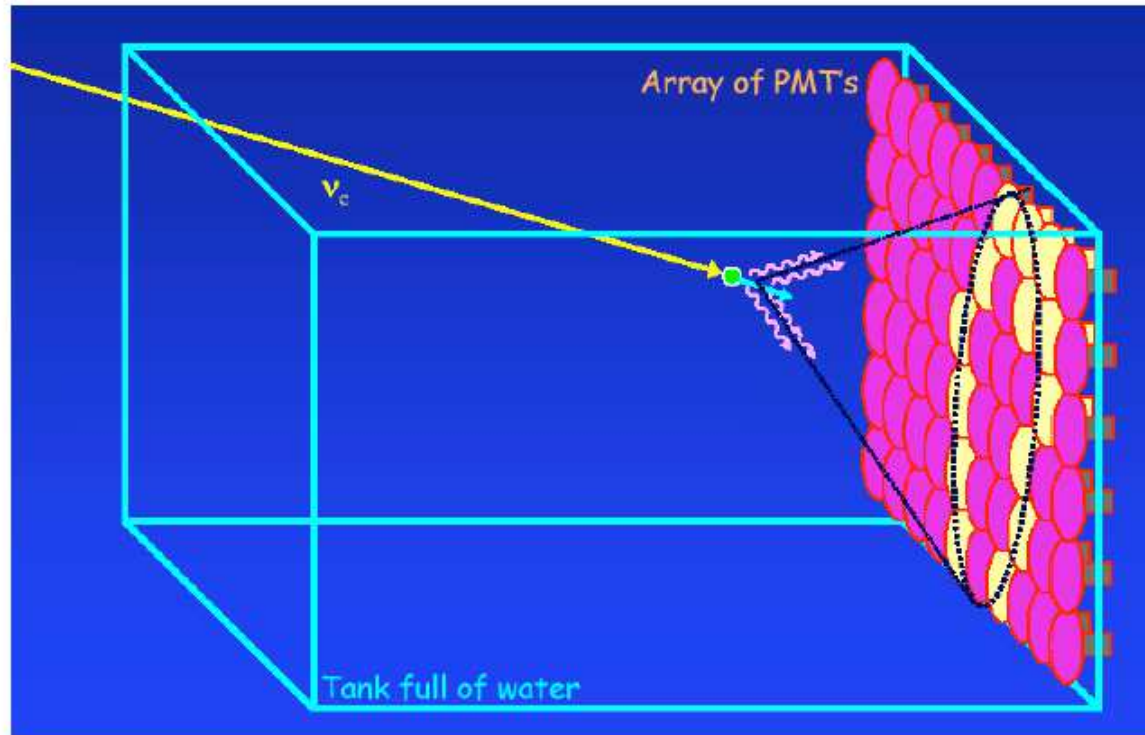


# Rengeteg a neutrínó-kísérlet!



Bánya, tengerfenék, Bajkál, jég  $\Leftrightarrow$  reaktor, gyorsító

# Észlelés vízben



Bennszülött, nagyenergiájú  $e^\pm, \mu^\pm$

Cserenkov-sugárzás: ellipsziszalak, időzítés  $\Rightarrow$  irány

# Szuper-Kamiokande (SKK)

Kamioka Nucleon Decay Experiment (Eredetileg protonbomlásra)  
1000 m mély Kamioka bányában (M. Koshiba, Nobel-díj 2002)

Belső detektor (1996-2001):

Ø39 m × 42 m tartály

cca. 50000 t tiszta H<sub>2</sub>O

11146 PMT (Ø50 cm !!)

$p_{\mu} > 100 \text{ MeV}/c \Rightarrow \varepsilon \sim 100\%$

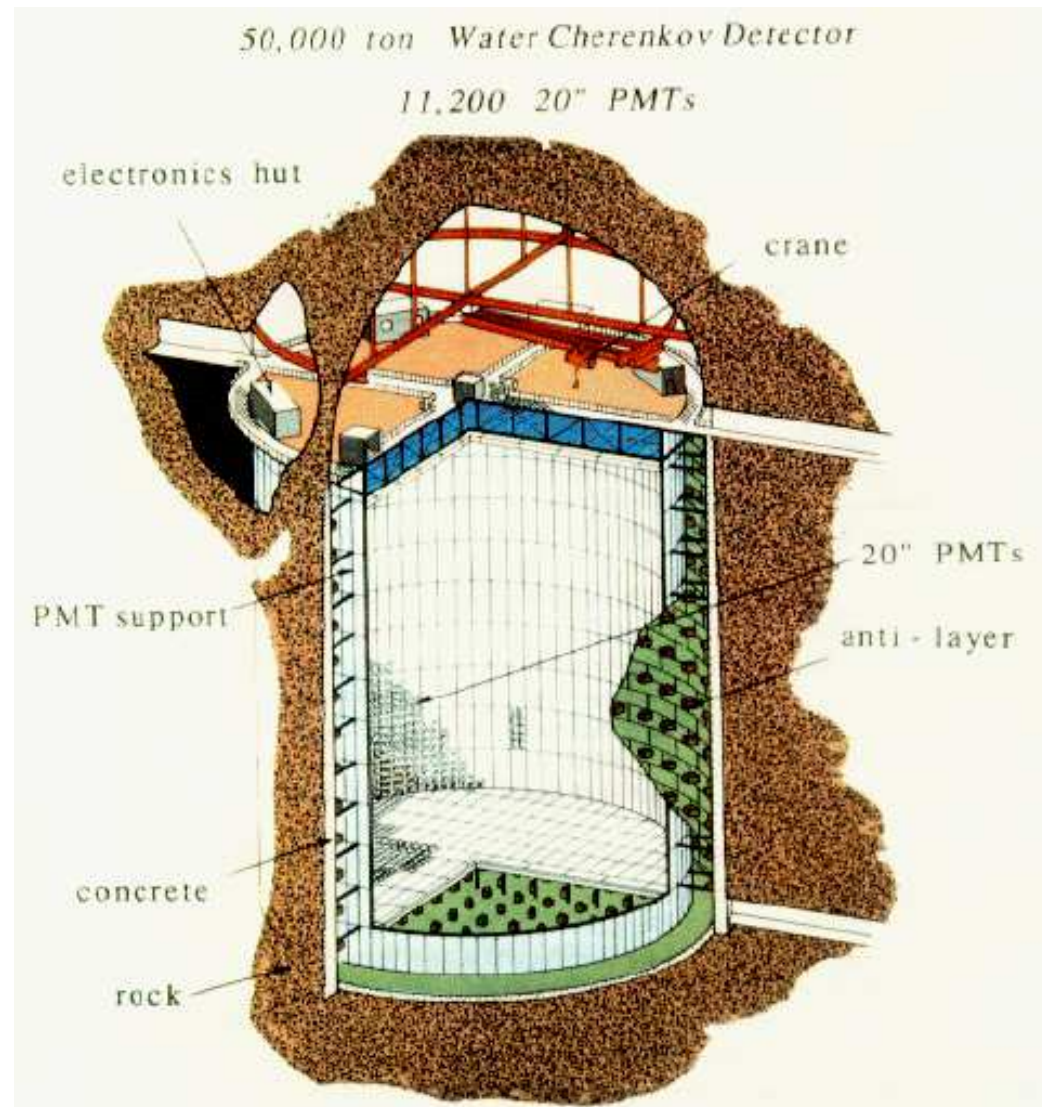
2001-ben öngyilkos lett,  
fokozatos renoválás

Külső detektor:

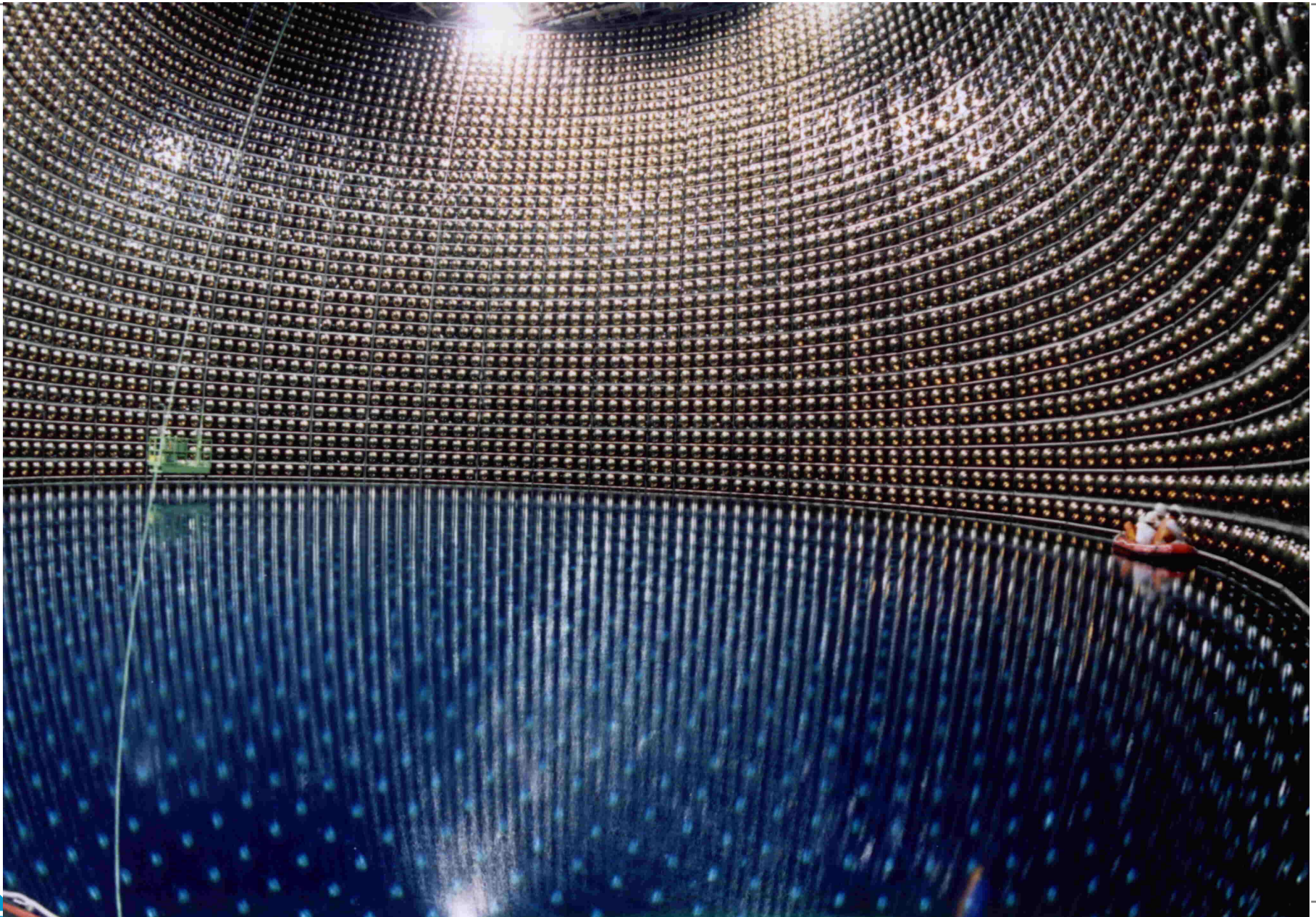
vétó: átfutó e,  $\mu$  n,  $\gamma$  falból

2 m vastag H<sub>2</sub>O (fény is!)

1857 PMT (Ø20 cm)



# Szuper-Kamiokande belülről



# Szuper-Kamiokande: nap-neutrínók

Azonosított forrás:  
irány, energia, fajta

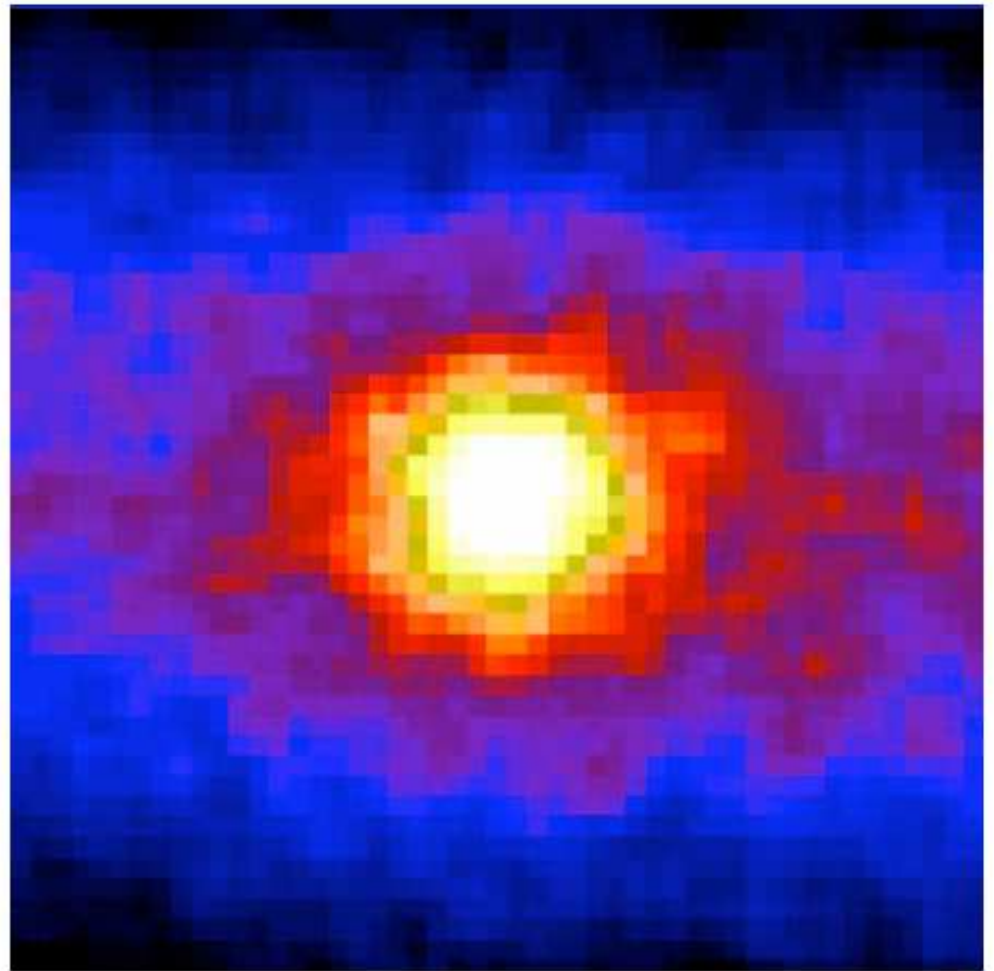
Standard Solar Model (SSM)  
40%-a

$$\frac{\text{SKK adat}}{\text{SSM MC}} = 0,406 \pm 0,004 \left\{ \begin{array}{l} +0,014 \\ -0,013 \end{array} \right.$$

(mért érték  $\pm$  stat.  $\pm$  sziszt. hiba)

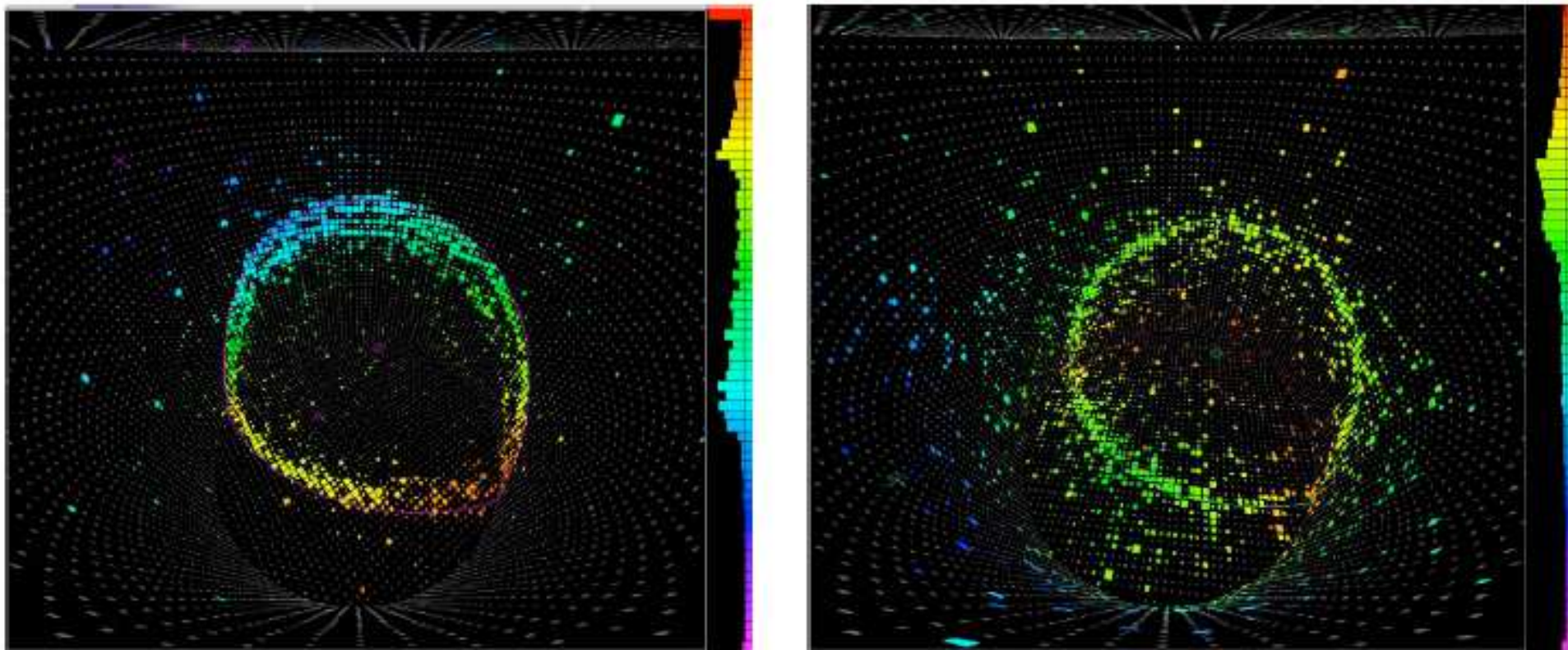
Korábbi mérések rendben

de hova tűnnek?



A Nap-neutrínók rekonstruált  
forrása

# Szuper-Kamiokande: müonok



Légköri neutrínók ( $E_\nu < 1$  GeV):

Müonok azonosítása: lassulás, bomlás

$$\frac{(N_\mu/N_e)_{\text{data}}}{(N_\mu/N_e)_{\text{MC}}} = 0,688 \pm 0,016 \pm 0,050$$

Hova lesznek?

# Neutrínó-oszcilláció

Bruno Pontecorvo, 1963

Neutrínó-állapotokat  
gyenge kölcsönhatás  
keveri

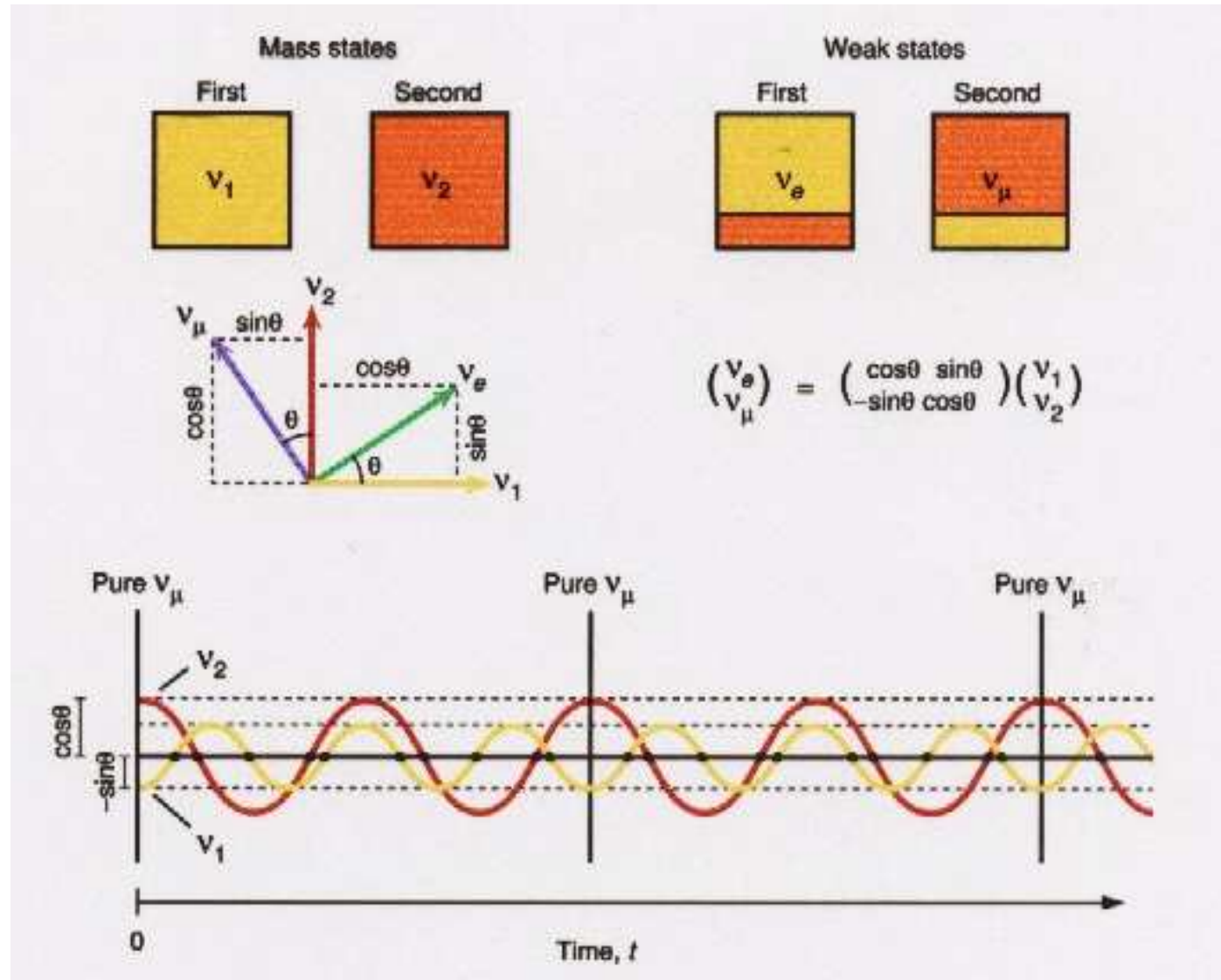
Tömegállapot:  $(\nu_1, \nu_2)$   
gyenge kh. sajátáll.:  
 $(\nu_e, \nu_\mu)$

Egymásba alakulnak  
( $\Theta$ : keveredési szög)

Oszcilláció két állapot  
között:  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

Frekvencia

$$\sim |m(\nu_e) - m(\nu_\mu)|^2$$



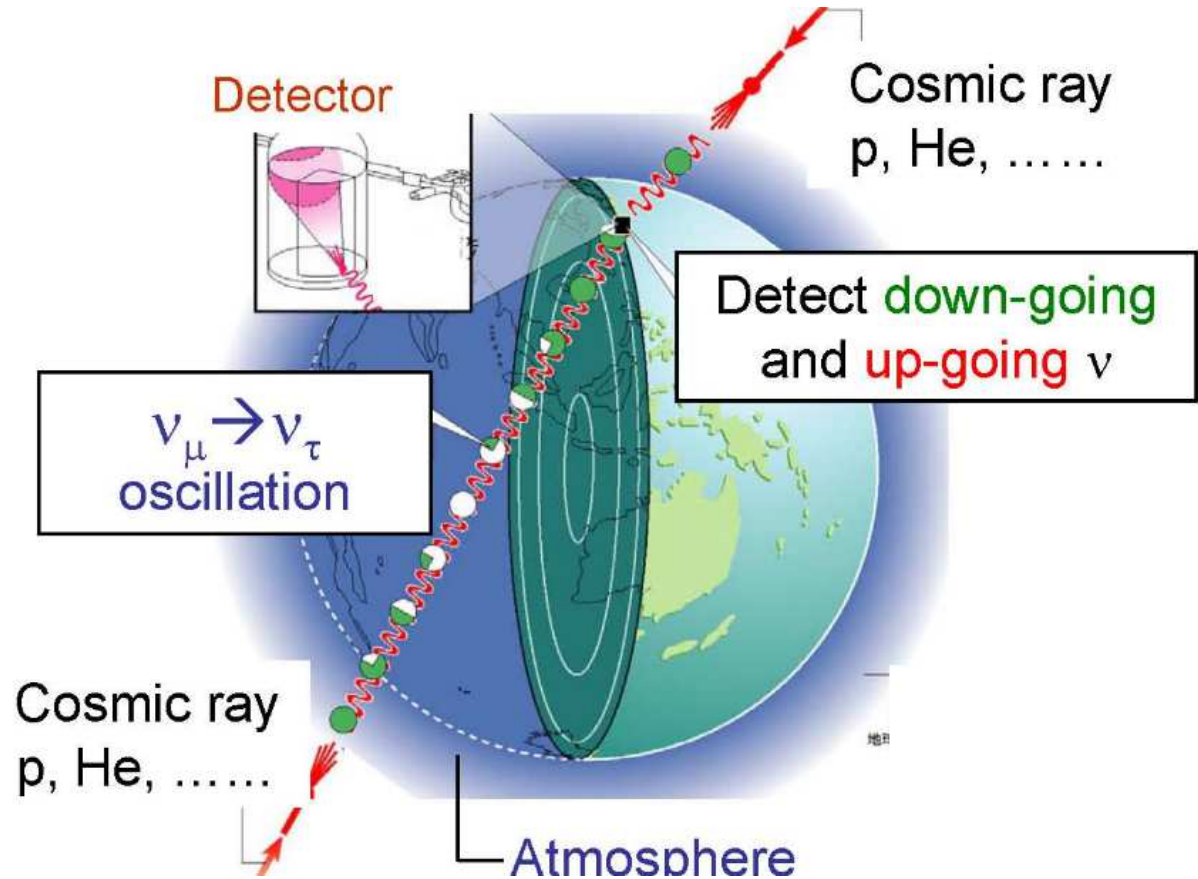
# SKK: légköri neutrínók

Sok-GeV-es  
műon-neutrínókra

$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$  oszcilláció

Föld átmérőjén

M. Koshiba, Nobel-díj,  
2002



$$\text{Fluxus föl/Fluxus le} = 0,54 \pm 0,04$$

$$1,3 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \leq \Delta M_{\text{atm}}^2 \leq 3,0 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$



# Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Sudbury  
Neutrino  
Observatory

1000 tonnes  $D_2O$

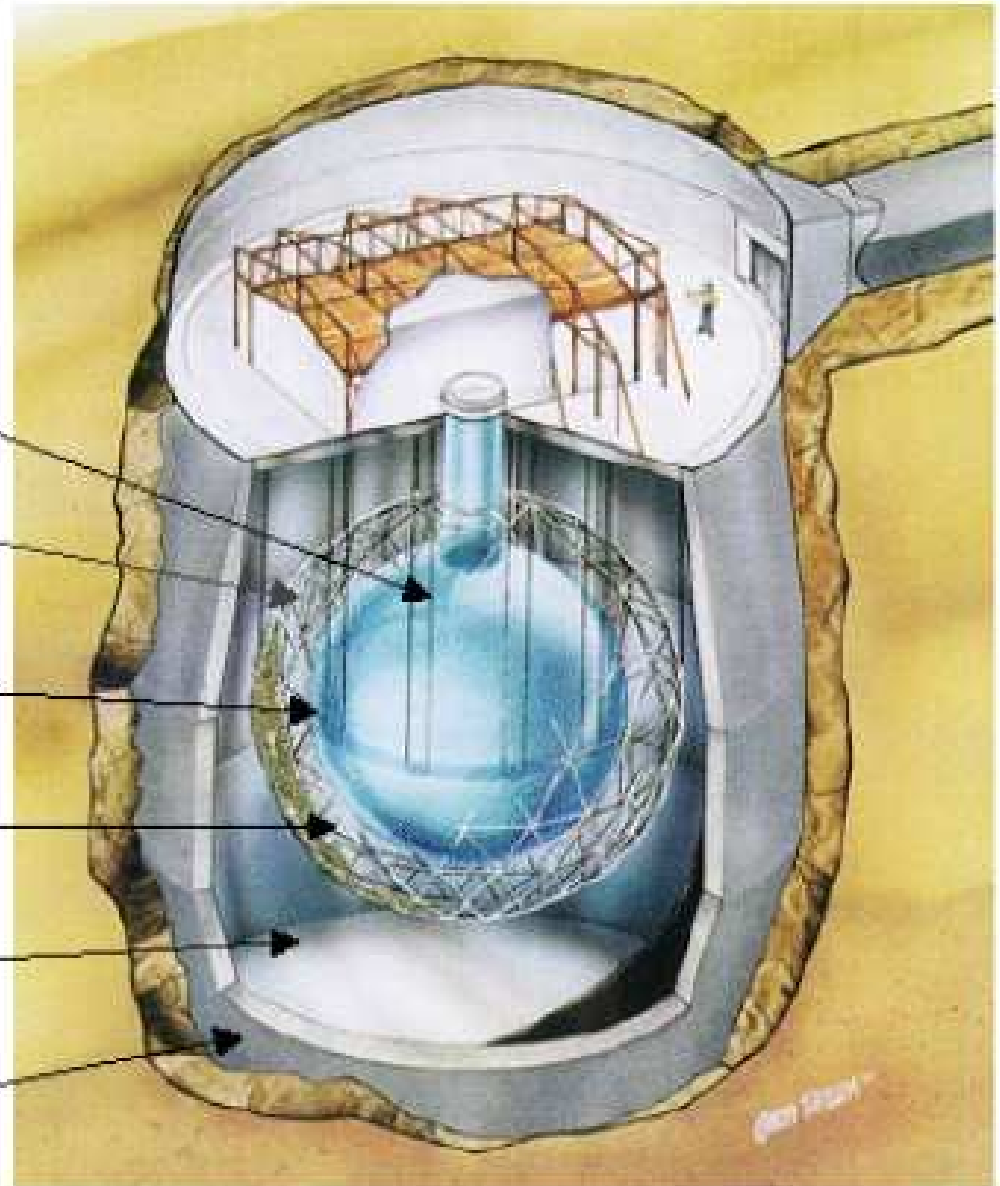
Support Structure  
for 9500 PMTs,  
60% coverage

12 m Diameter  
Acrylic Vessel

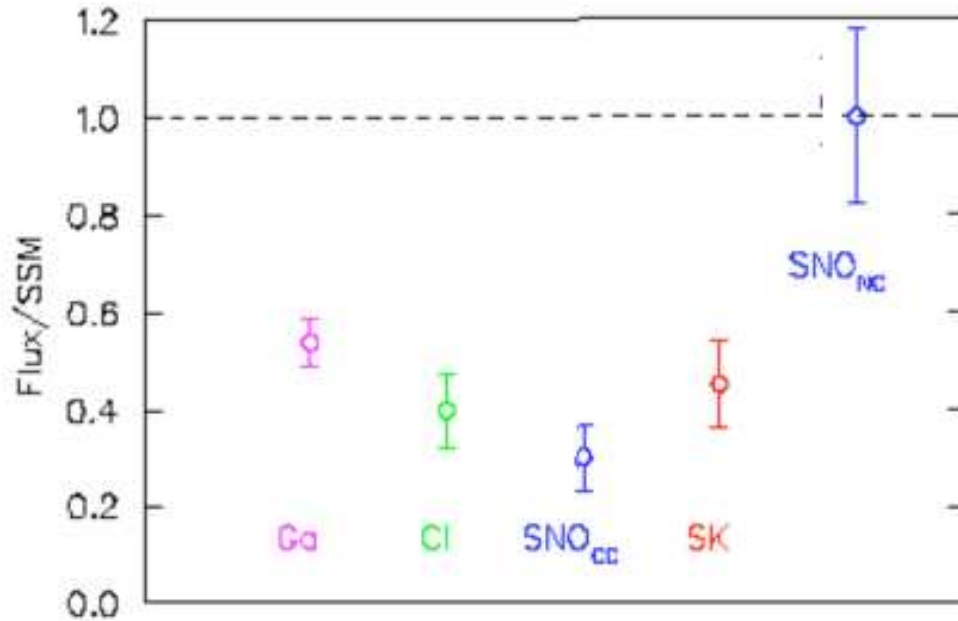
1700 tonnes Inner  
Shielding  $H_2O$

5300 tonnes Outer  
Shield  $H_2O$

Urylon Liner and  
Radon Seal



# SNO: a nap-neutrínók



Teljes fluxus  $\approx$  elmélet

$\nu_e$  eloszillál

$$\Delta M^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$L_{\text{osc}} [\text{km}] = 2\pi \frac{E [\text{GeV}]}{1,27 \Delta M^2 [\text{eV}^2]}$$

$$E/L \sim \Delta M^2$$

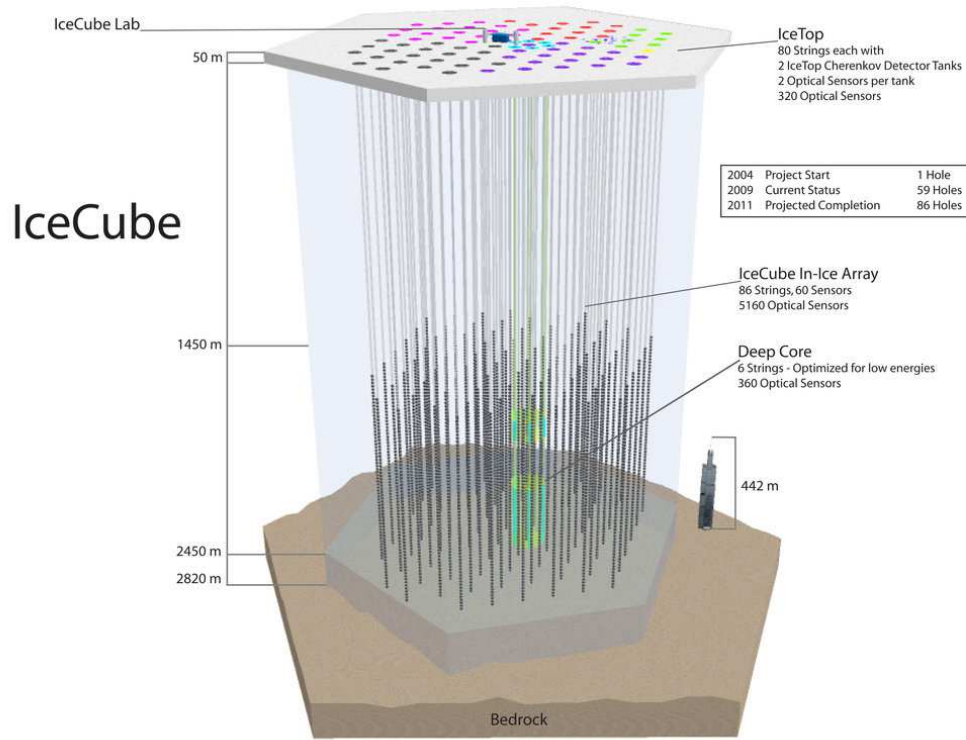
Légköri neutrínók:  $\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$  oszcilláció Föld átmérőjén

Nap-neutrínók:  $\nu_e \Leftrightarrow \nu_X$  oszcilláció Nap-Föld távolságon

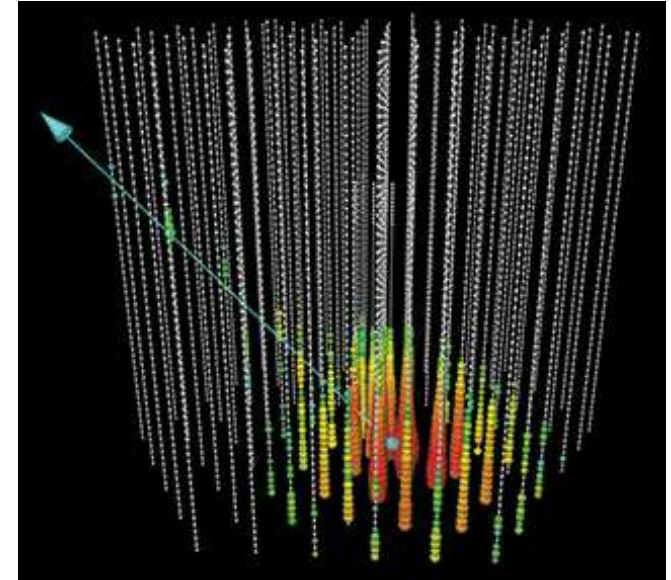
Legalább két neutrínóra  $m_\nu > 0$ !



# IceCube: 2.8 km az Antarktisz jegében

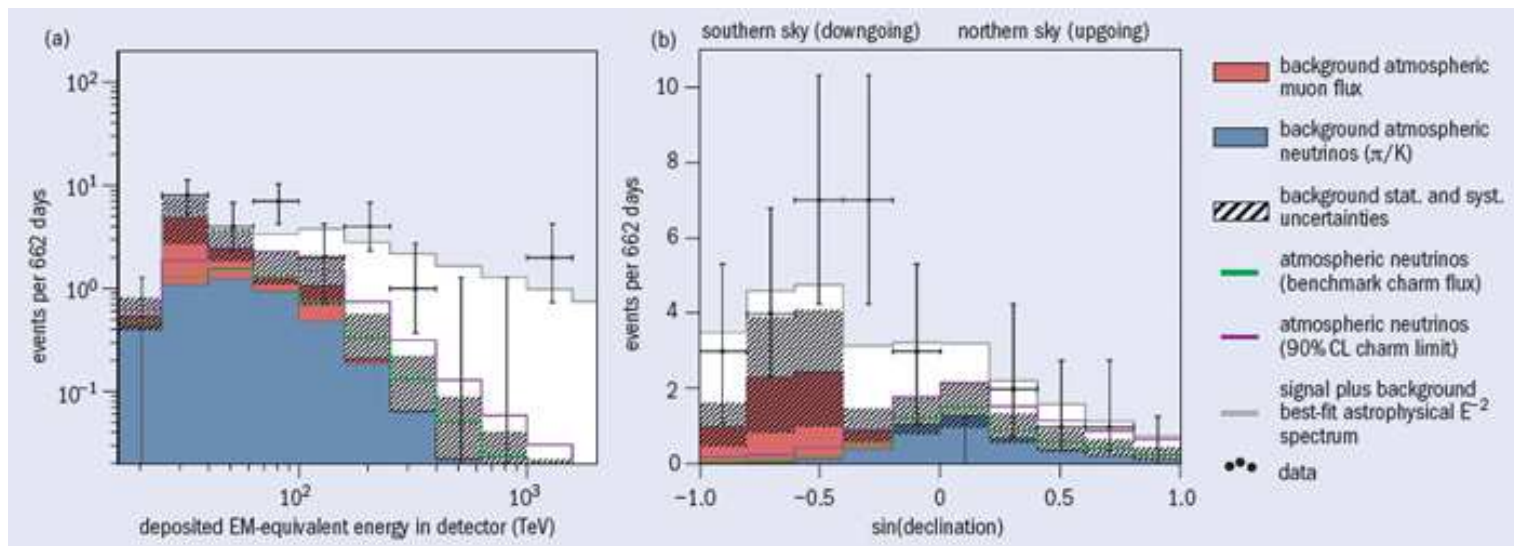


2011  
↓  
2013

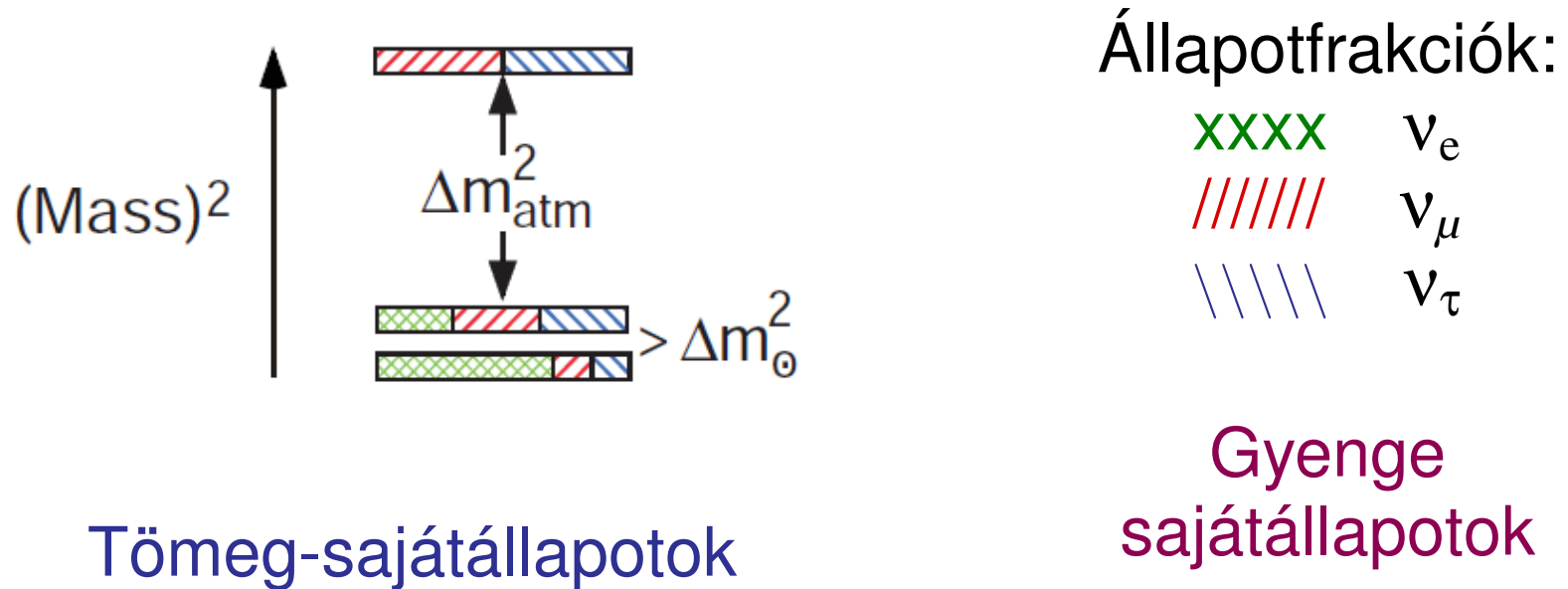


250 TeV-es neutrínó

$E_\nu = 1060 \text{ TeV!}$



# A jelenlegi szituáció



Légkör:  $\Delta M^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Nap:  $\Delta M^2 \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

Megoldottuk problémákat? Tömeges a neutrínó...

Még több lett a neutrínó-rejtély!

# Honnan van a neutrínók tömege??

A neutrínó oszcillációja rejtélyes, hiszen csak egyféle kölcsönhatása ismeretes, nem szabadna kevert állapotának lennie.

A neutrínótömegek kilógnak a standard modellből, sértenünk kell vagy hozzáadnunk, hogy magyarázzuk.

- $\nu_R$  és  $\bar{\nu}_L$  hipertöltése  $Y = 0$ , steril (nincs párban töltött leptonnal)? Olyant nem látunk (LSND-kísérlet?)
- Majorana-részecske,  $\nu = \bar{\nu}$ ?
- Több Higgs-tér van, hogy tömeget adna neki?
- Ötödik erő keveri?
- Miért olyan kicsi? Seesaw mechanizmus: Könnyű Dirac + nehéz steril?

Oszcilláció csak  $\Delta M_\nu^2$ -et ad  $M_\nu < 2 \text{ eV}$  (trícium-bomlás)

# Gyorsító neutrínó-kísérletek

neutrínók egymásba alakulásának (neutrínó-oszcilláció) vizsgálatára

Kozmikus protonok a légkörben piont keltenek:  
 $pA \rightarrow \pi^\pm X$      $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ ;  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_\mu \nu_e$      $L \sim 30\text{km}$

Gyorsító analóg légkörrel

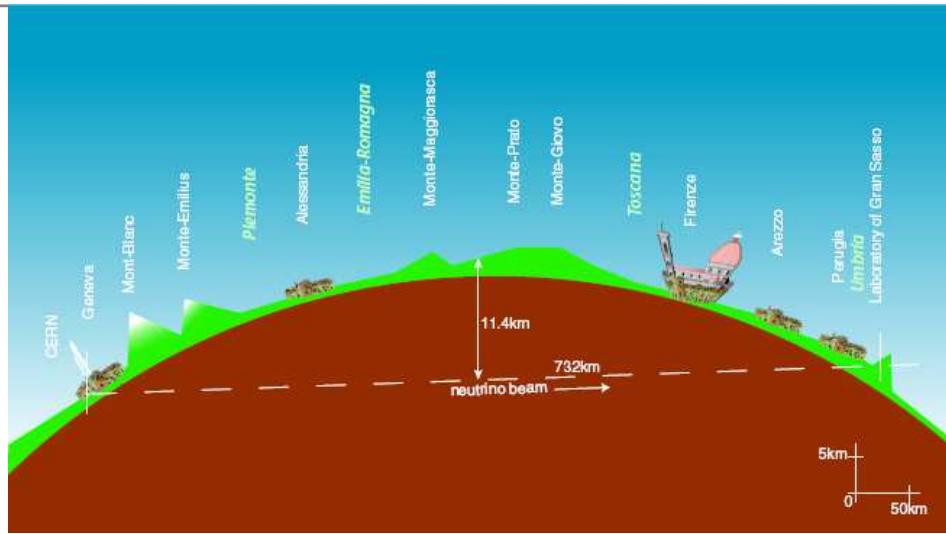
$L \sim 1 \dots 1000 \text{ km}$ ,  $\nu_e + 2\nu_\mu$ ;  $\nu$  és  $\bar{\nu}$

Nagy energián  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$  előre megy.

Müon lelassul bomlás előtt  $\Rightarrow$  termékei szerteszéjjel repülnek.

Irányítva:  $\sim$  **tiszta  $\nu_\mu$  nyaláb**.

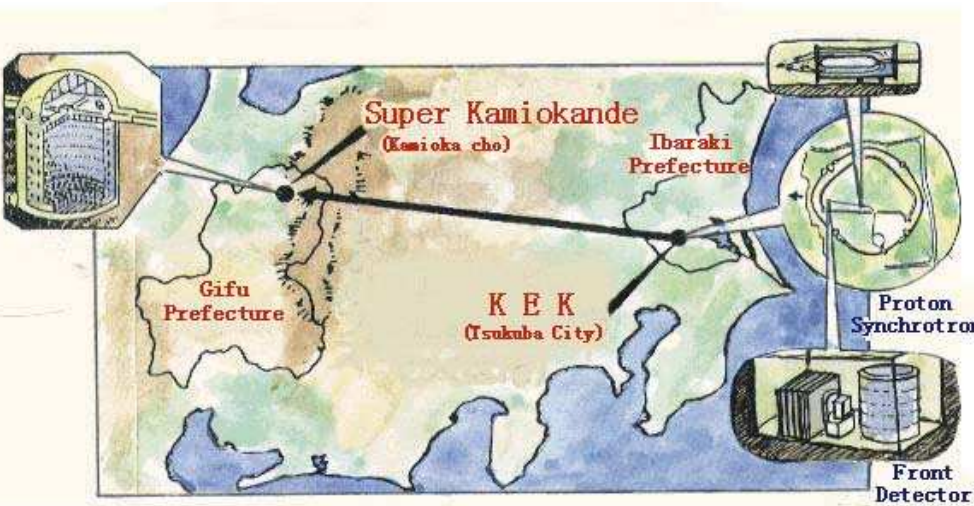
# Nagy távolságú gyorsítós kísérletek



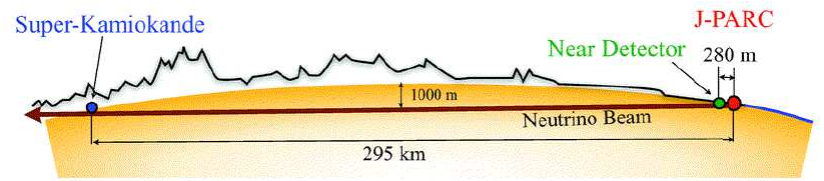
CNGS: CERN → Gran Sasso:  
OPERA, 732 km



Fermilab → MINOS: 735 km

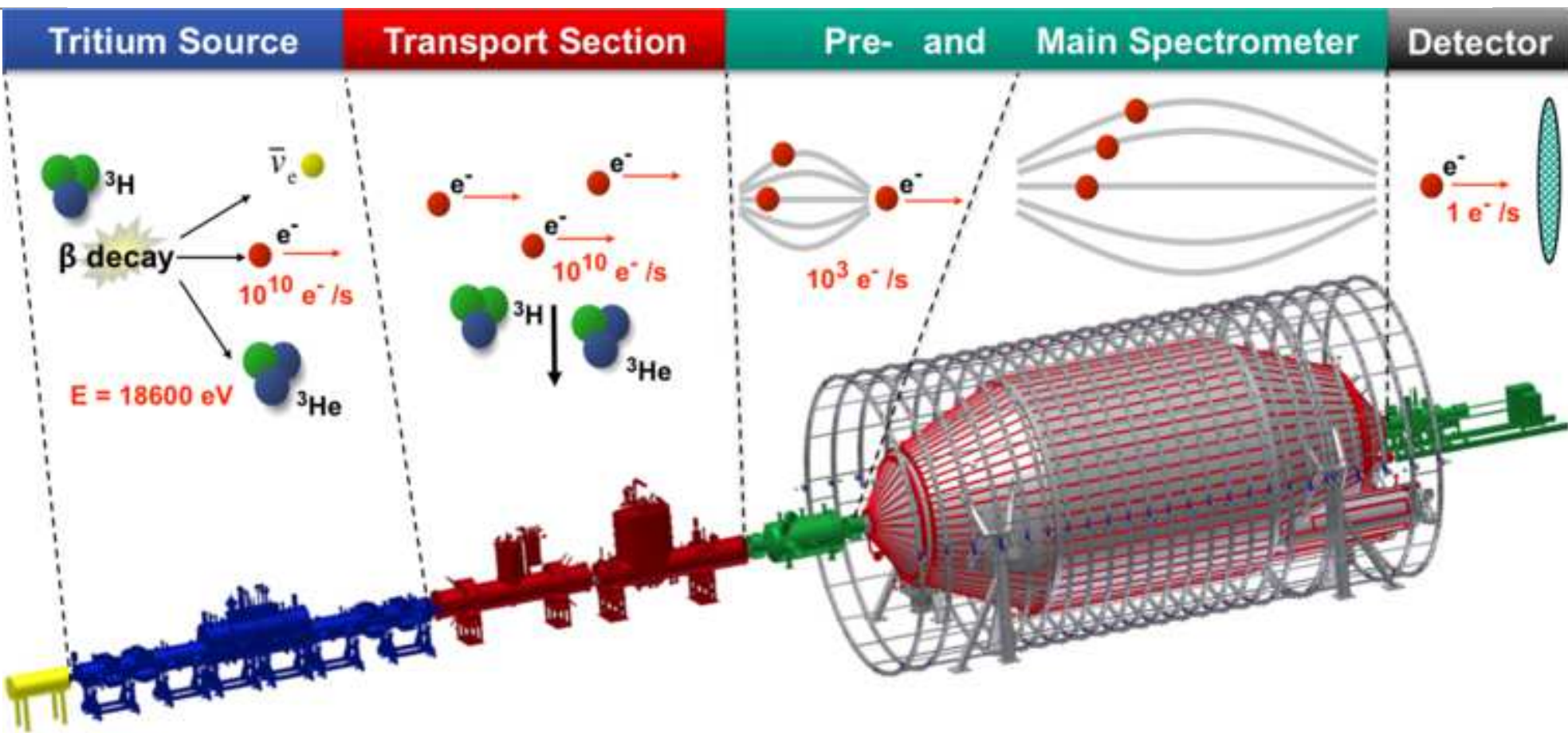


K2K: KEK → Kamioka: 250 km



T2K (Tokai → Kamioka): 295 km

# Karlsruhe TRItium Neutrino: $M(\nu_e)$



Tritium decays, releasing an electron and an anti-electron-neutrino. While the neutrino escapes undetected, the electron starts its journey to the detector.

Electrons are guided towards the spectrometer by magnetic fields. Tritium has to be pumped out to provide tritium free spectrometers.

The electron energy is analyzed by applying an electrostatic retarding potential. Electrons are only transmitted if their kinetic energy is sufficiently high.

At the end of their journey, the electrons are counted at the detector. Their rate varies with the spectrometer potential and hence gives an integrated  $\beta$ -spectrum.



# KATRIN szállítása: 400 ⇒ 9000 km



# Összegzés

- A neutrínókat nem értjük, mérni kell
- Eldöntendő kérdések  $\Rightarrow$  új fizika:
  - Honnan a tömeg?
  - Bővítendő-e a Higgs-szektor?
  - Önmaga antirészecskéje vagy nem vagy mindkettő?
  - Van-e steril  $\nu$  (töltött lepton nélküli)?
  - Valami új erő keveri őket?
- Sok új kísérlet vizsgálja őket:
- ... csak kijön valami !!!

# A Standard Modell problémái

- **Aszimmetriák:** jobb  $\Leftrightarrow$  bal világ  $\Leftrightarrow$  antivilág
- **Töltéskvantálás:**  $Q_e = Q_p$ ,  $Q_d = Q_e/3$
- **Miért éppen 3 fermioncsalád?**
- **Sötét anyag és energia ??** Az Univerzum tömegének 4%-a közönséges anyag (csillag, gáz, por,  $\nu$ ), 23 %-a láthatatlan *sötét anyag*, 73 %-a rejtélyes *sötét energia*
- **Természetesség:** A Higgs-bozon tömege divergál, fermion-bozon szimmetria eltűntetné.
- **Gravitáció:** nem illik a másik három kölcsönhatás rendszerébe.
- A SM három kölcsönhatási állandója **konvergál**, de **nem találkozik** nagy energián. **Egyesülő kölcsönhatások?**

# Szuperszimmetria: partner-részecskék

A problémákat mind megoldaná, ha a fermionok és bozonok párban léteznének, azonos tulajdonságokkal (tömeg, töltés)

## A fermionok SUSY-partnerei

Leptonok ( $S = \frac{1}{2}$ ) $e, \mu, \tau$ $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	skalár leptonok ( $S = 0$ ) $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$
Kvarkok ( $S = \frac{1}{2}$ ) $u, d, c, s, t, b$	skalár kvarkok ( $S = 0$ ) $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$

Antirészecske  $\leftrightarrow$  antipartner

$$X_L, X_R \leftrightarrow \tilde{X}_1, \tilde{X}_2$$

# Szuperszimmetria? Minek?

A szuperszimmetria nyilvánvalóan sérül:  
nincsenek ilyen részecskék,  
vagy sokkal nagyobb tömeggel

Mire jó egy **sérülő** szimmetria?

**Higgs-mechanizmus:**  
szimmetria-sértő tér  $\Rightarrow$  tömeg, renormálás

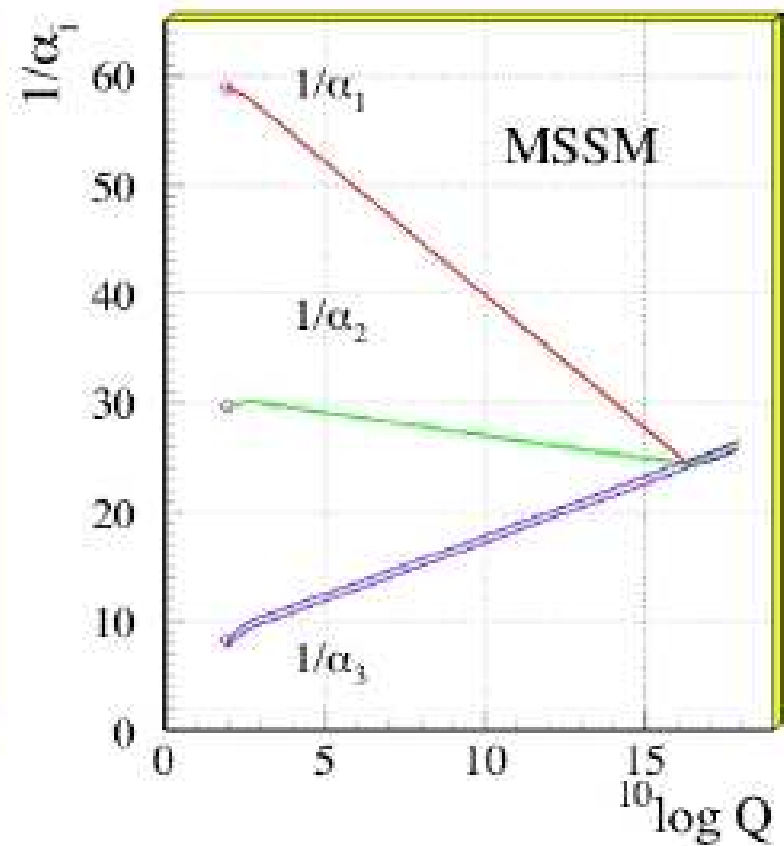
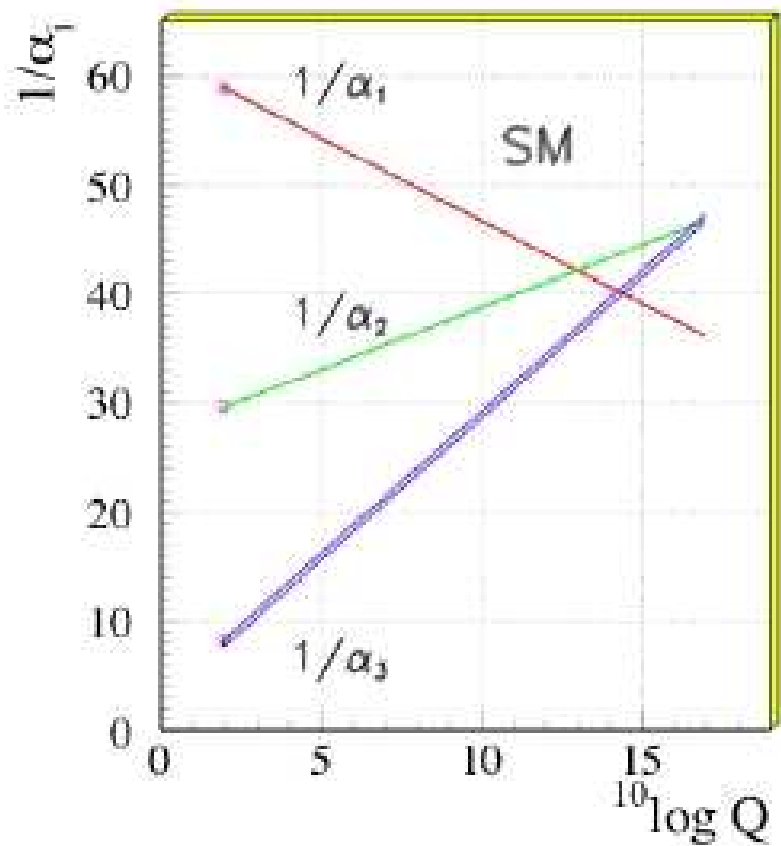
Higgs-tér sért egy **létező** szimmetriát



SUSY bevezet egy **nemlétezőt**

Mindez egy racionális, konzisztens elméletért

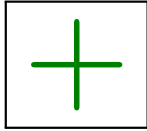
# A mérték-kölcsönhatások egyesítése



**Standard Modell:** Nagy energián közelítő, de nem konvergáló mértékcsatolások

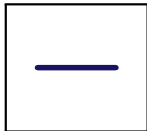
**SUSY:** Tökéletes konvergencia  $\sim 10^{16}$  GeV körül  
hála a sok új részecske járuléknak

# Szuperszimmetria: + és –



- elmélet természetessége
- Unverzum hideg, sötét anyaga (23 %):  
legkönnyebb SUSY-részecske
- kölcsönhatások egyesítése
- gravitáció is beilleszthető

## DE:



- SUSY-sértés mechanizmusa ??
- Sok különböző SUSY-modell
- Rengeteg új paraméter
- $\tilde{m} \sim 100$  GeV alatt nem látunk SUSY-részecskét

# SUSY-részecskék keresése

Keletkezés párban, bomlás közönséges és  
SUSY-részecskére

Tulajdonságok **modell- és parameter-függők**

**Legkönnyebb SUSY-részecske (LSP)** nem figyelhető meg  
⇒ csak **hiányzó energia** látszana

LSP melyik? Modellfüggő...

**SUSY- (és Higgs-) keresés a CERN-ben:**

Large Electron-Positron collider (LEP), 1989 – 2000;

Large Hadron Collider (LHC), 2010 –



# Elveszett szimmetriák?

„... a fizika alapvető egyenletei több szimmetriával rendelkeznek, mint az aktuális fizikai világ”

Frank Wilczek: *In search of symmetry lost*, Nature 433 (2005) 239

- **CPT-invariancia:** abszolút, alapvető, nem sérülhet (?)
- **Gyenge kölcsönhatás:** sérti a paritást és  $CP$ -t (tehát időtükrözési szimmetriát is!)
- Higgs-tér spontán sérti az elektrogyenge kölcsönhatás helyi szimmetriáját, és azzal tömeget teremt, divergenciát töröl.
- Szuperszimmetria ??

# Részecskefizika a mindennapokban

Alap kutatás, közvetlen gyakorlati haszna nem várható.

Élesíti az elmét, pedagógiai haszna óriási:

- Kreatív gondolkodásra serkent
- Az óriási méretek miatt komoly technikai fejlesztéseket indukál — **100000 egyforma műszerre tender!**
- Élenjáró programozástechnikai gyakorlat (bankok előszeretettel alkalmaznak HEP-PhD-t szerzett fizikusokat)

# Részecskefizikai módszerek másutt

- Világháló: CERN, 1990  $\Rightarrow$  nagyvilág: 1994–
- Müonspin-rezonancia módszere (kémia, szilárdtestfizika)
- Pozitronemissziós tomográfia, hadronterápia
- Grid-hálózatok a számítástechnikában (EGEE-projekt)

# Konklúzió helyett

"Van egy elmélet, miszerint, ha egyszer kiderülne, hogy mi is valójában az Univerzum, és mit keres itt egyáltalán, akkor azon nyomban megszűnne létezni, és valami más, még bizarrabb, még megmagyarázhatatlanabb dolog foglalná el a helyét"

"Van egy másik elmélet, amely szerint ez már be is következett"

Douglas Adams: *Vendéglő a világ végén* (Nagy Sándor fordítása)