

Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére
(CERN, 2007)*

Horváth Dezső

horvath@rmki.kfki.hu.

MTA KFKI Részecske– és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest
és ATOMKI, Debrecen



Bevezetés a részecskefizikába 3

Vázlat

E. Neutrínófizika

- Léggöri és Nap-neutrínók
- Neutrínó-oszcilláció
- Super-Kamiokande
- Sudbury Neutrino Observatory (SNO)
- LSND-kísérlet
- Hányféle neutrínó van?

















F. Új fizika keresése

- A Standard Modell problémái
- Szuperszimmetria

G. Részecskefizika a mindennapokban



A Standard Modell állatkertje

Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino e	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ	 $Z^0 W^\pm$
				 Higgs

The Standard Model

A. Pich - CERN Summer Lectures 2005

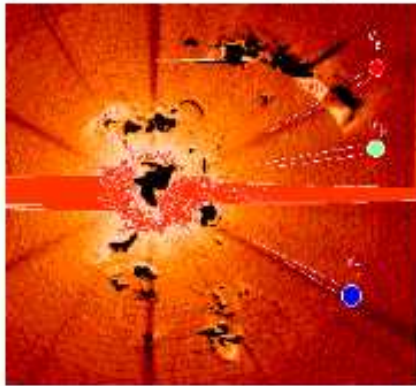


Neutrínóforrások



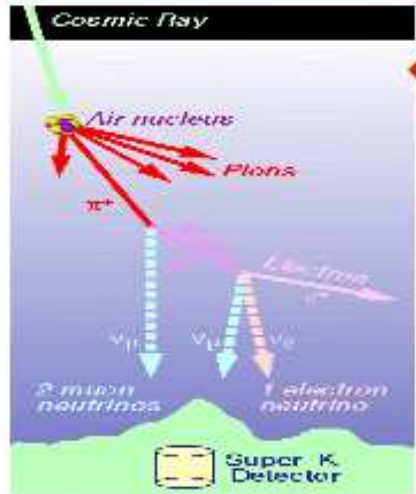
← Nap

Kozmikus →



← Kozmológia

Reaktor →



← Légkör

Gyorsító →



← Föld

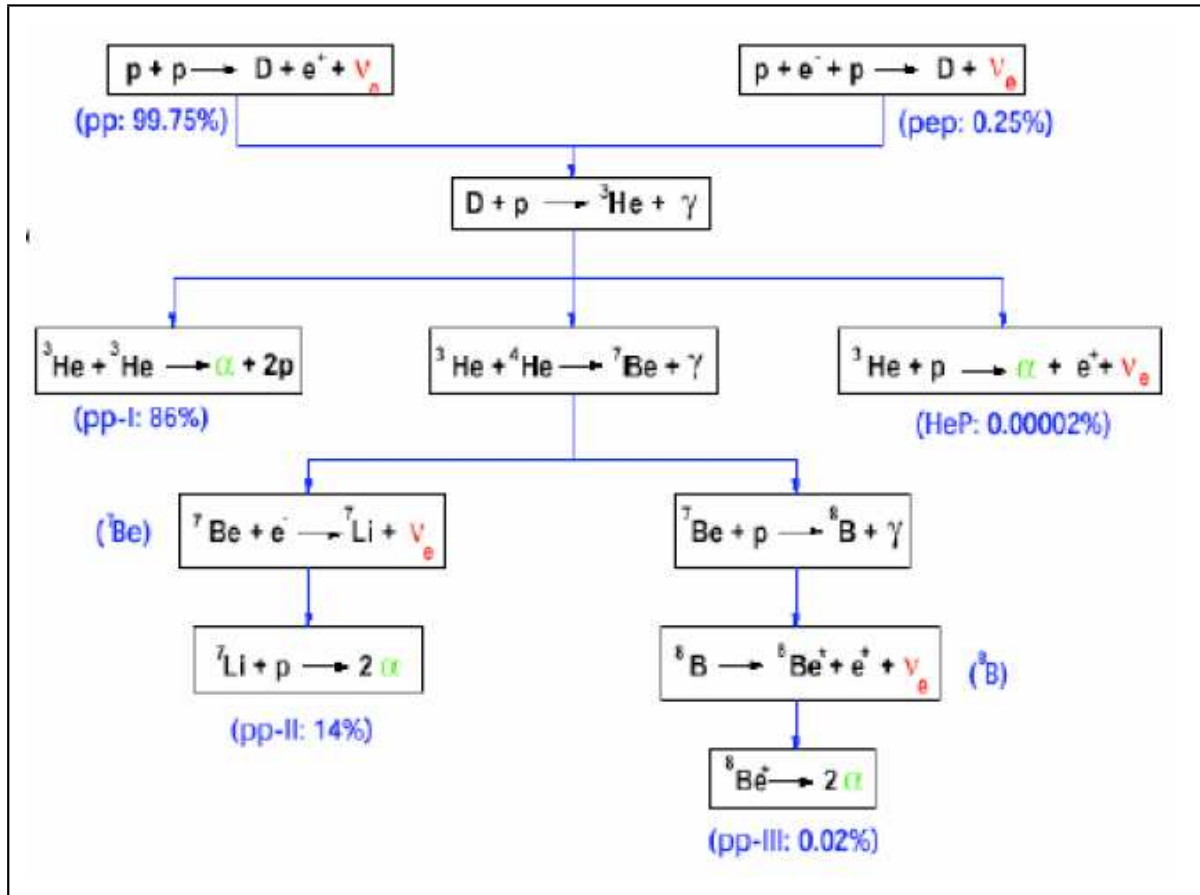


Neutrínóforrások

- Kozmikus sugarak (szupernova, ősrobbanás, ...)
- Nap: magfúzió $4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu_e$
 10^8 km távolságra, csak ν_e
- Légkör: kozmikus sugarak másodlagos részecskéi
 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$; $\mu^\pm \rightarrow \text{e}^\pm \nu_\mu \nu_e$
30km, $\nu_e, 2\nu_\mu$ ν és $\bar{\nu}$
- Atomreaktor: ~ 1 km, csak ν_e
- Gyorsító: analóg légkörrel 0–1000 km



A Nap neutrínói



Észlelési egység:

Solar Neutrino Unit

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

Detektor:

10 – 10000 t anyag

Mérés:



Várt: $8,2 \pm 1,8$ SNU;

mért: $2,56 \pm 0,23$ SNU

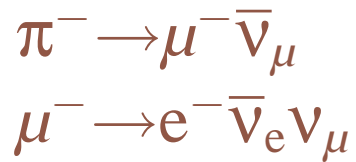
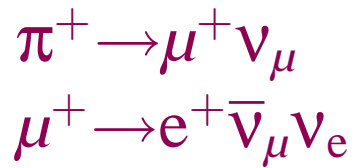
Elvesztek??

Mi rossz: Napmodell vagy mérés?

Mindkettő megerősítve...



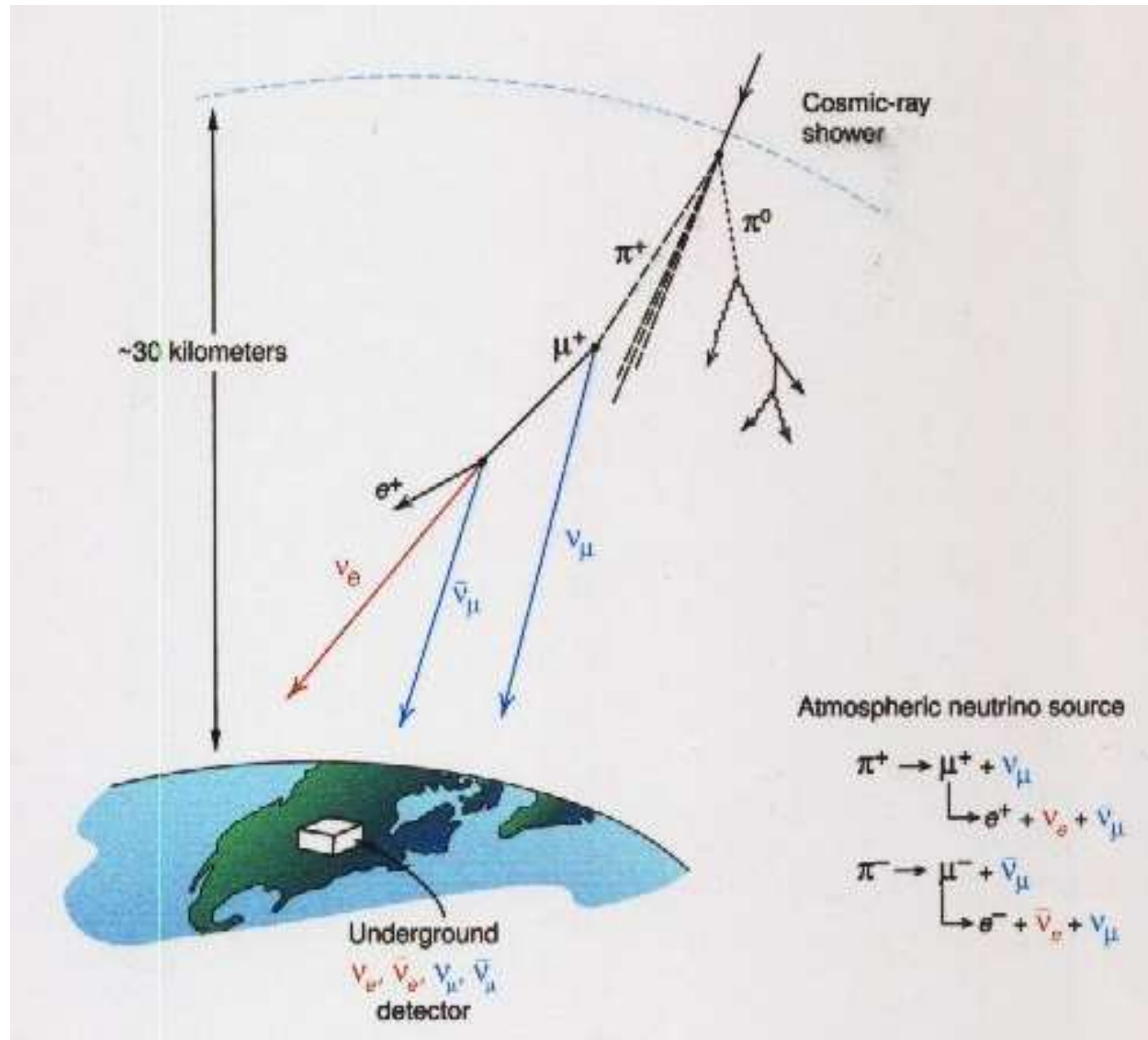
A légköri neutrínók



Várt: $N_\mu/N_e \sim 2$

Mért: $N_\mu/N_e \ll 2$

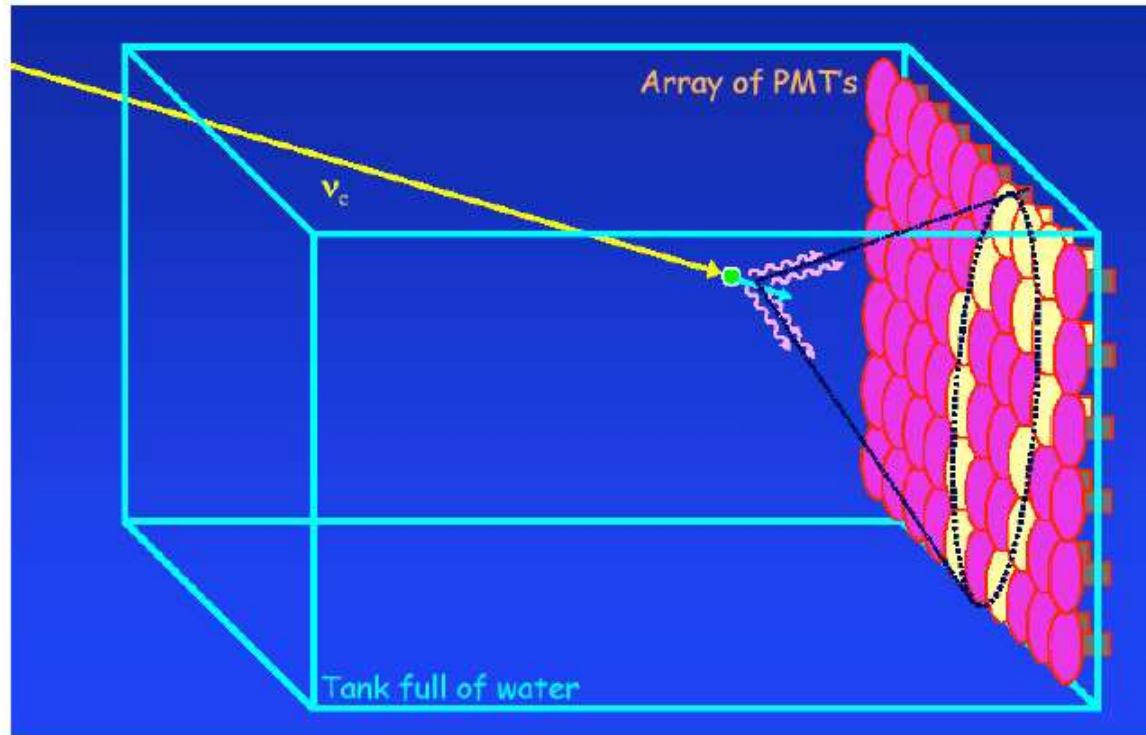
Hova lesznek?



Rengeteg a neutrínó-kísérlet!



Észlelés vízben



Bennszülött, nagyenergiájú e^\pm, μ^\pm
Cserenkov-sugárzás: ellipsziszalak, időzítés \Rightarrow irány

Szuper-Kamiokande (SKK)

Kamioka Nucleon Decay
Experiment

1000 m mély

Kamioka-bányában

Belső detektor (1996-2001):

Ø39 m × 42 m tartály

cca. 50000 t tiszta H₂O

11146 PMT (Ø50 cm !!)

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

2001-ben öngyilkos lett,
fokozatos renoválás

Külső detektor:

vétó: átfutó e, μ n, γ falból

2 m vastag H₂O (fény is!)

1857 PMT (Ø20 cm)

50,000 ton Water Cherenkov Detector

11,200 20" PMTs

electronics hut

crane

20" PMTs

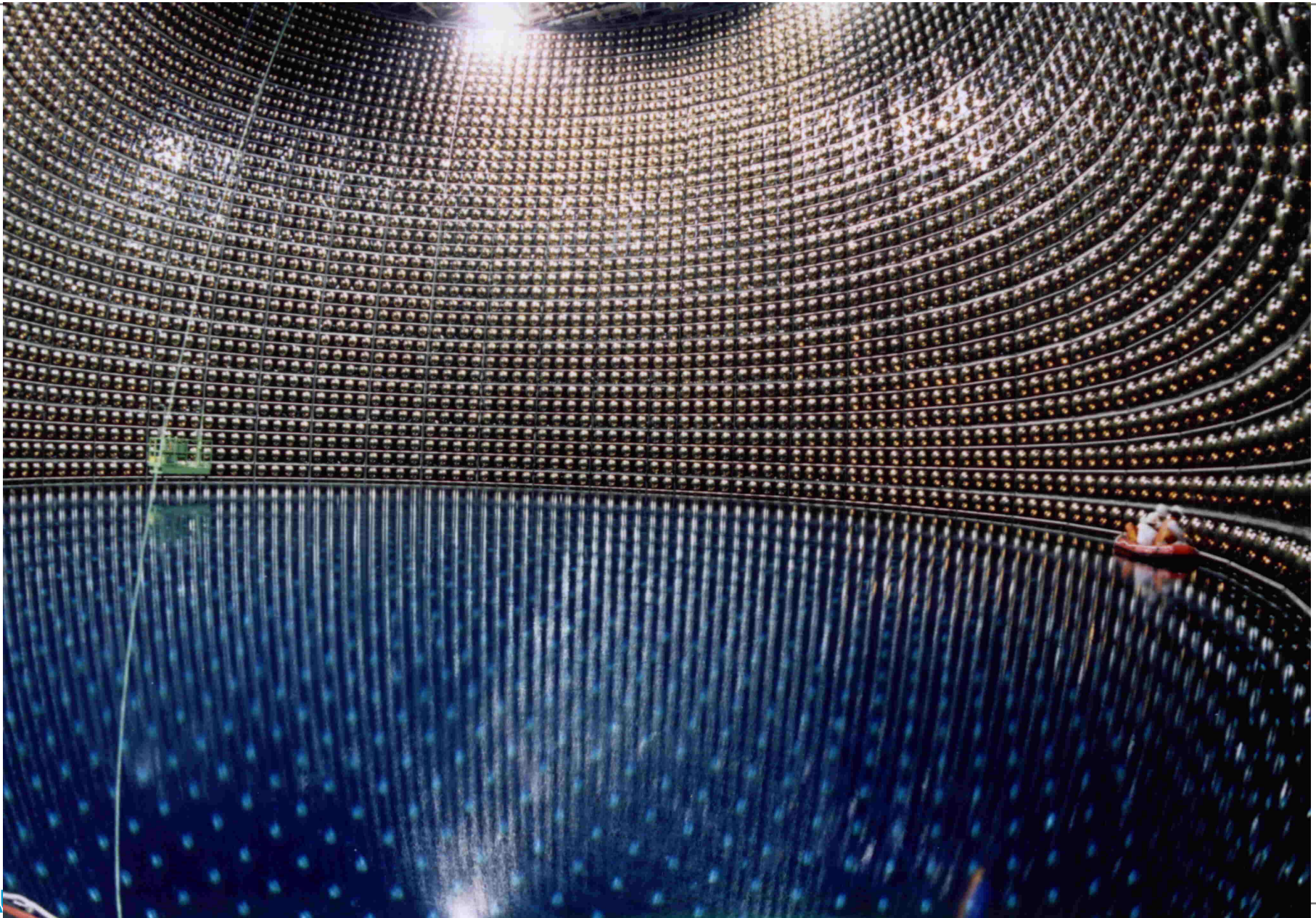
anti-layer

PMT support

concrete

rock

Szuper-Kamiokande belülről



Szuper-Kamiokande: nap-neutrínók

Azonosított forrás:
irány, energia, fajta

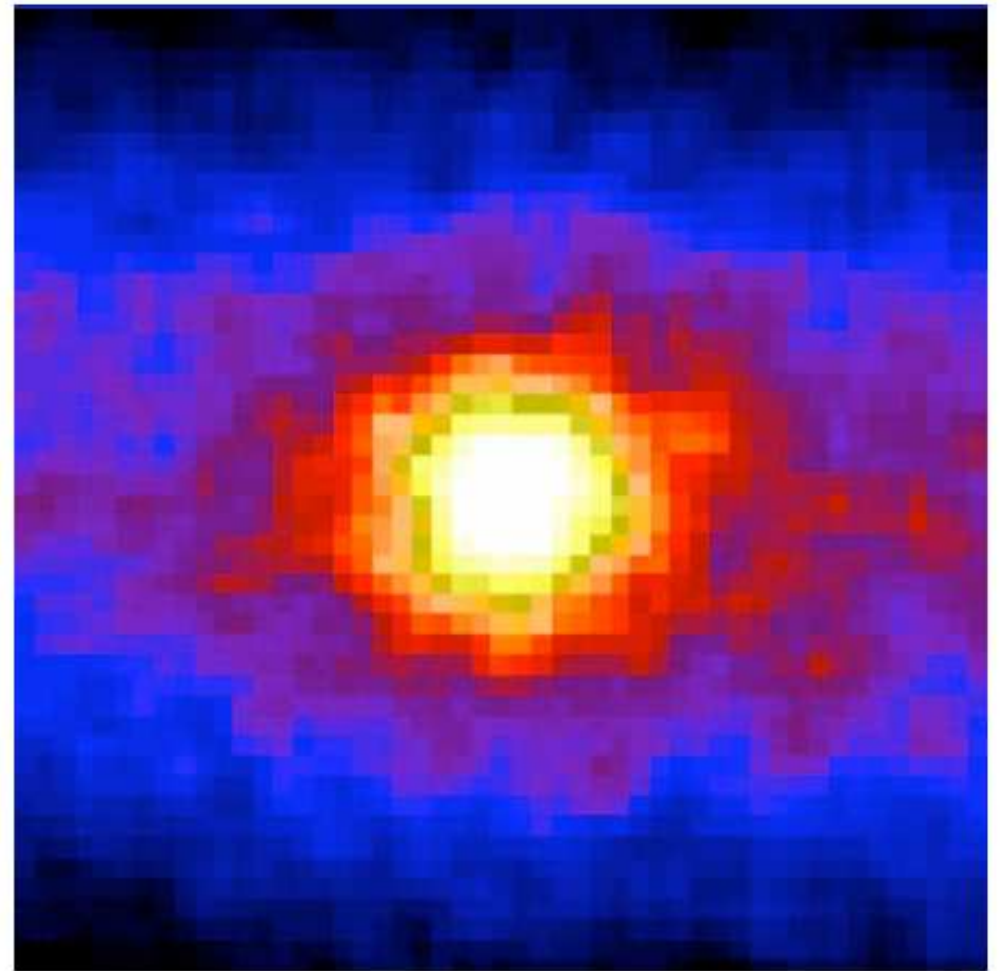
Standard Solar Model (SSM)
40%-a

$$\frac{\text{SKK adat}}{\text{SSM MC}} = 0,406 \pm 0,004 \begin{cases} +0,014 \\ -0,013 \end{cases}$$

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

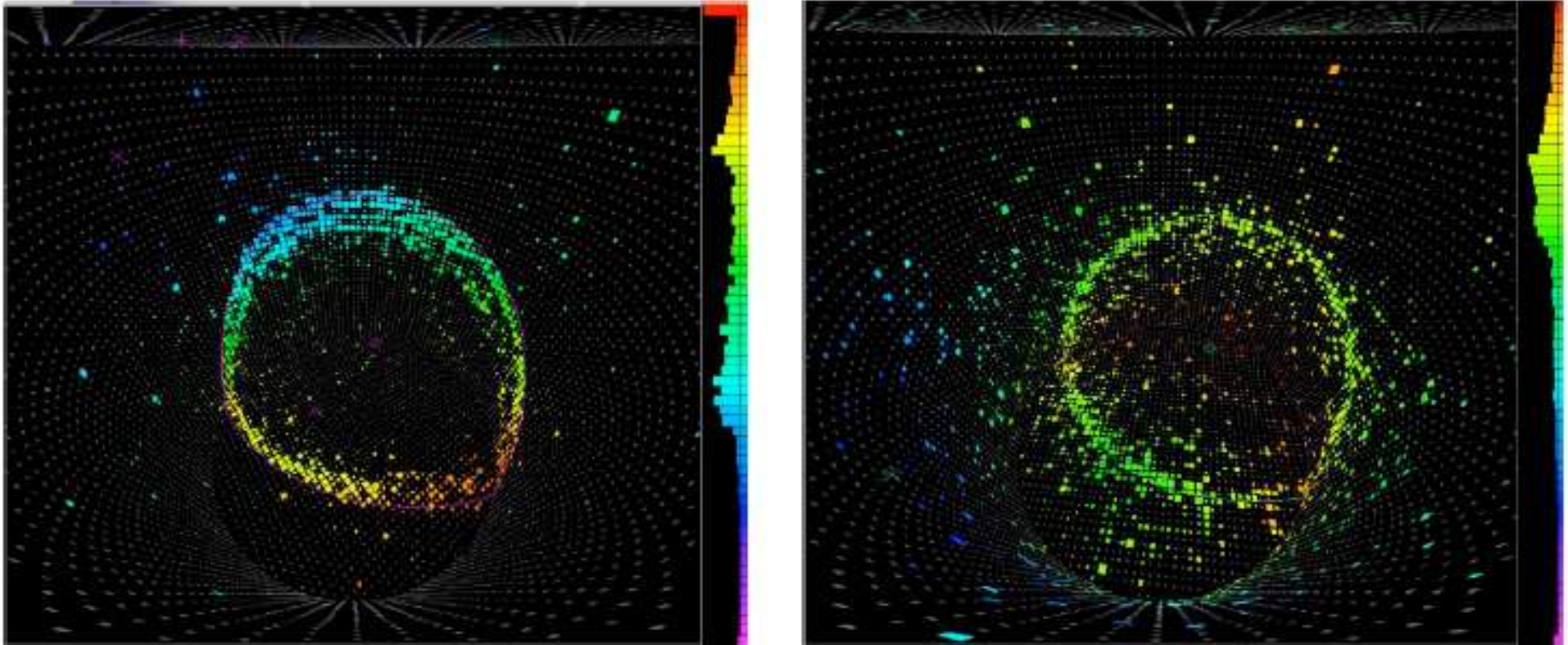
Korábbi mérések rendben

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

Neutrínó-állapotokat
gyenge kölcsönhatás
keveri

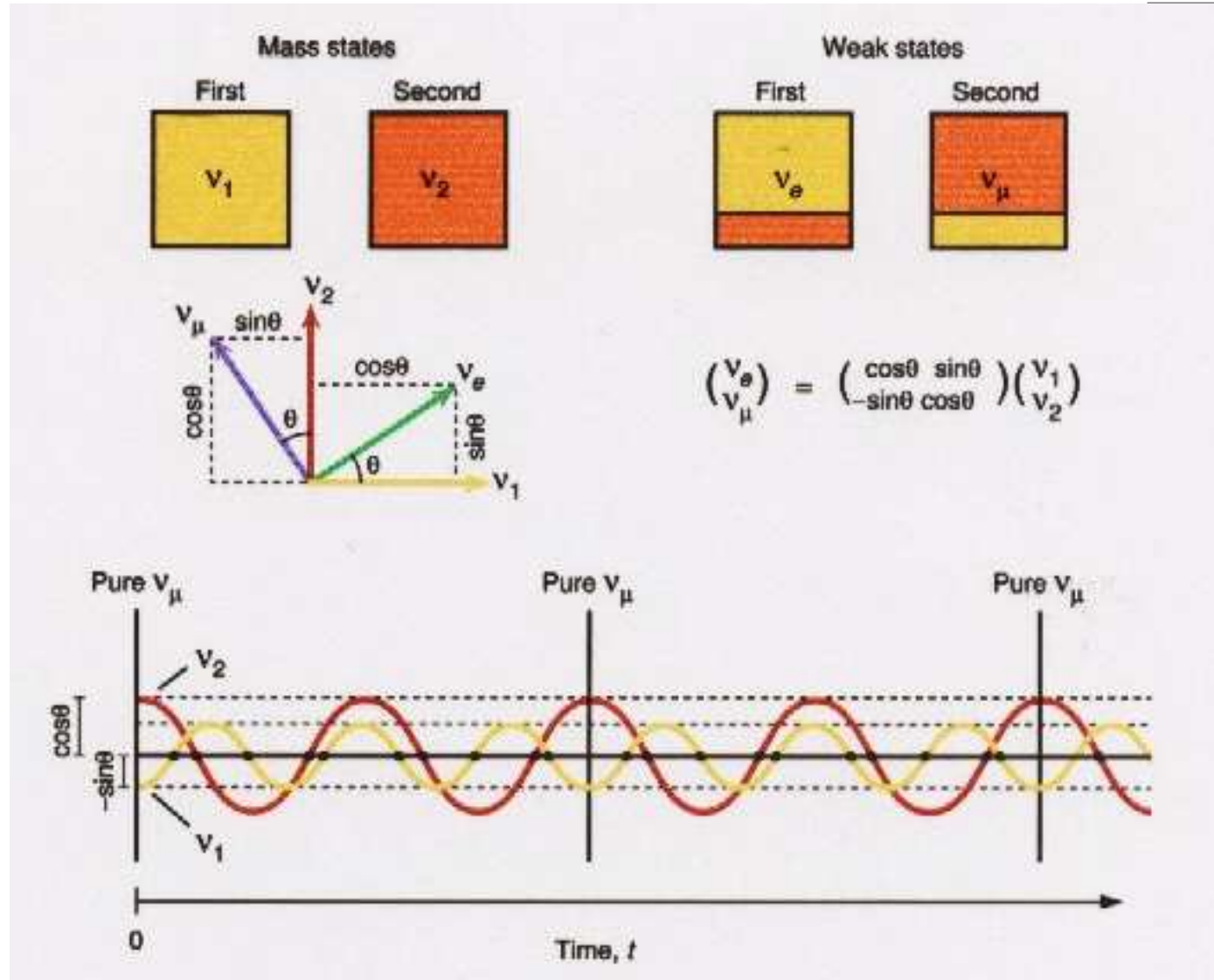
Tömegállapot: (ν_1, ν_2)
gyenge kh. sajátáll.:
 (ν_e, ν_μ)

Egymásba alakulnak
(Θ : keveredési szög)

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

Frekvencia

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



SKK: légköri neutrínók

Légköri neutrínók

MC ν -oszc. nélkül

MC $\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$ OSZC.

ν_e és ν_μ fentről megvan

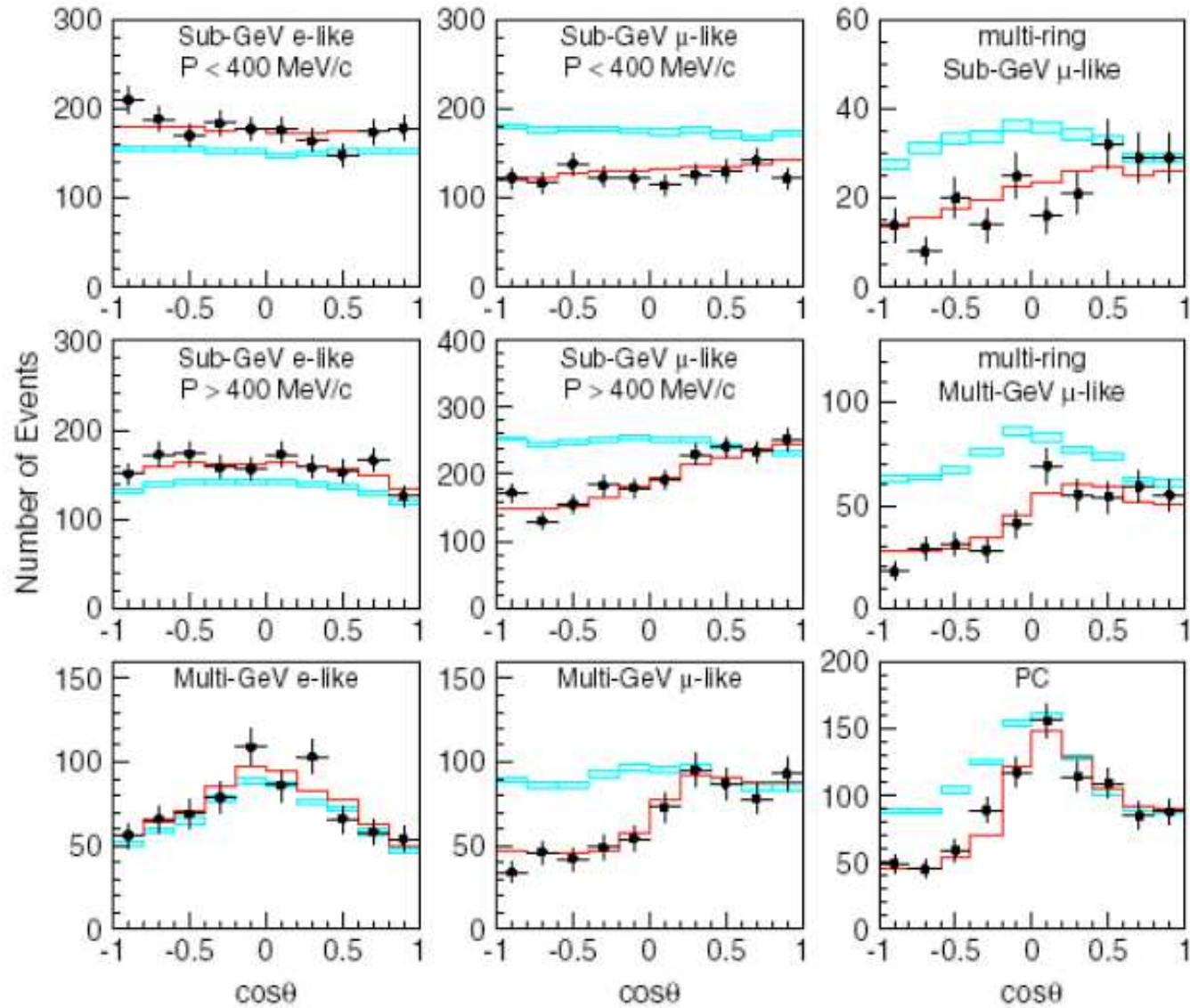
Lentről jövő ν_μ elfogy

(Θ : zenitszög)

Oszc. Föld átmérőjében

M. Koshiba, Nobel-díj,

2002



ν_e

ν_μ

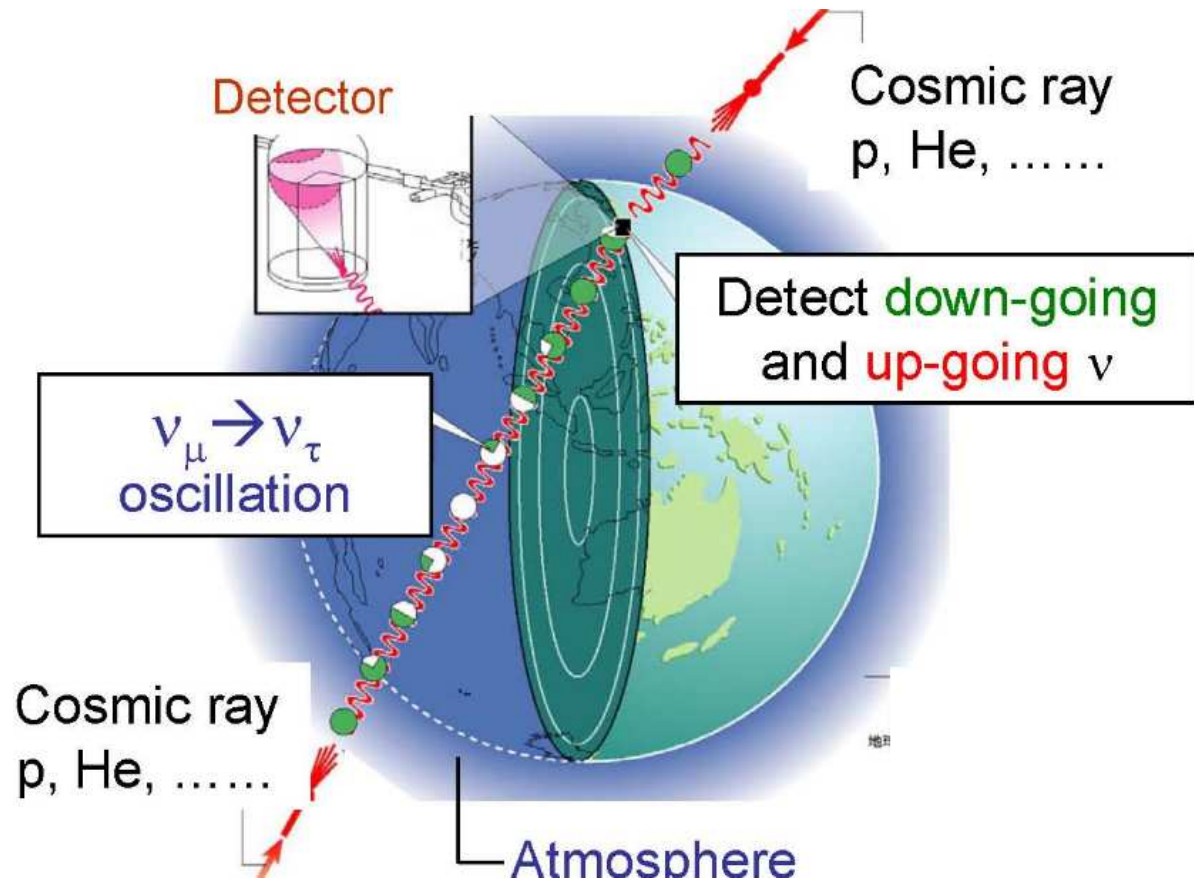
ν_μ

Szuper-Kamiokande: oszcilláció

Sok-GeV-es
műon-neutrínókra

$\nu_{\mu} \Leftrightarrow \nu_{\tau}$ oszcilláció

Föld átmérőjén



$$\text{Fluxus föl/Fluxus le} = \frac{N(-1,0 < \cos \Theta < -0,2)}{N(0,2 < \cos \Theta < 1,0)} = 0,54 \pm 0,04$$

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

Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Creighton-bánya,
Sudbury, Kanada:

$h = -2$ km

Kinn: 7500 t H₂O

Benn: 1000 t

99,92% D₂O

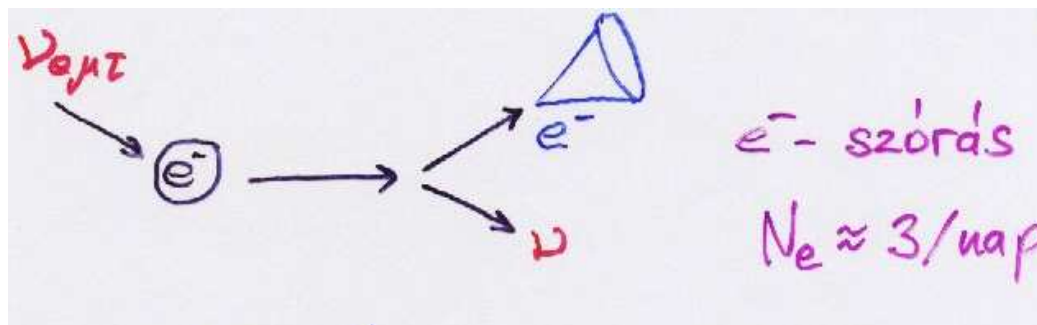
2001-03:

+2 t Na³⁵Cl

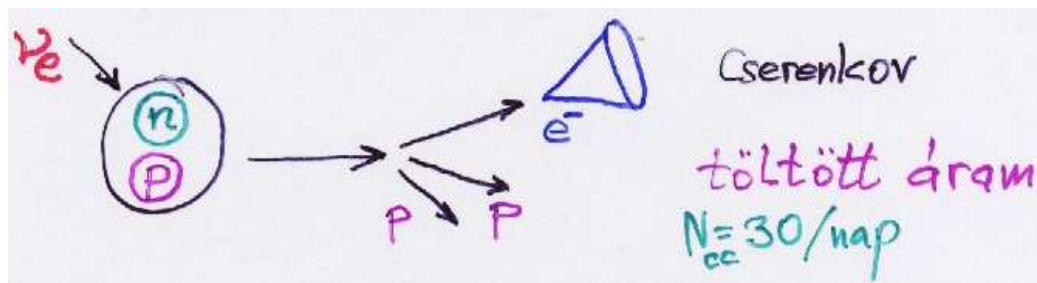
Azonosítható:

ν_e mind és $\bar{\nu}_e$ külön

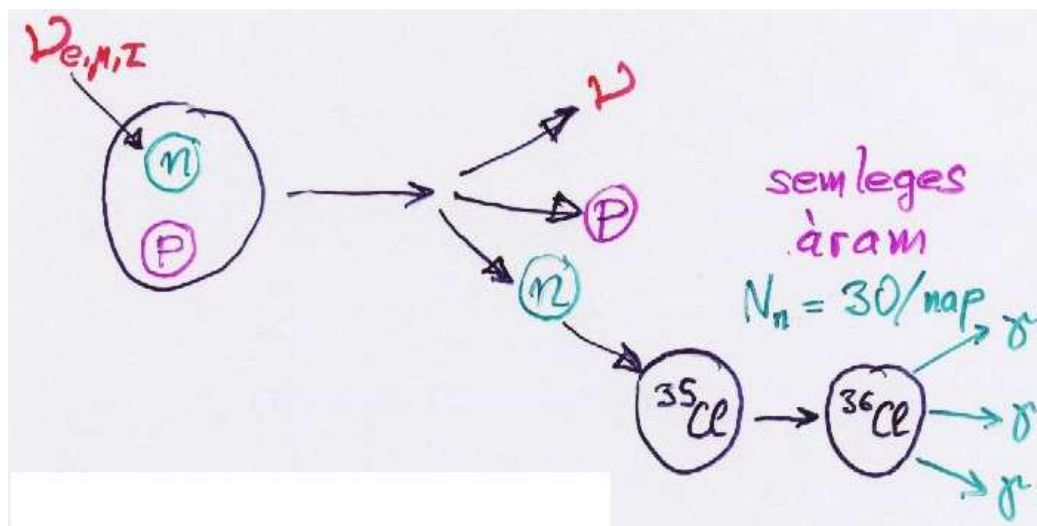
Nap- és légköri ν



ES



CC

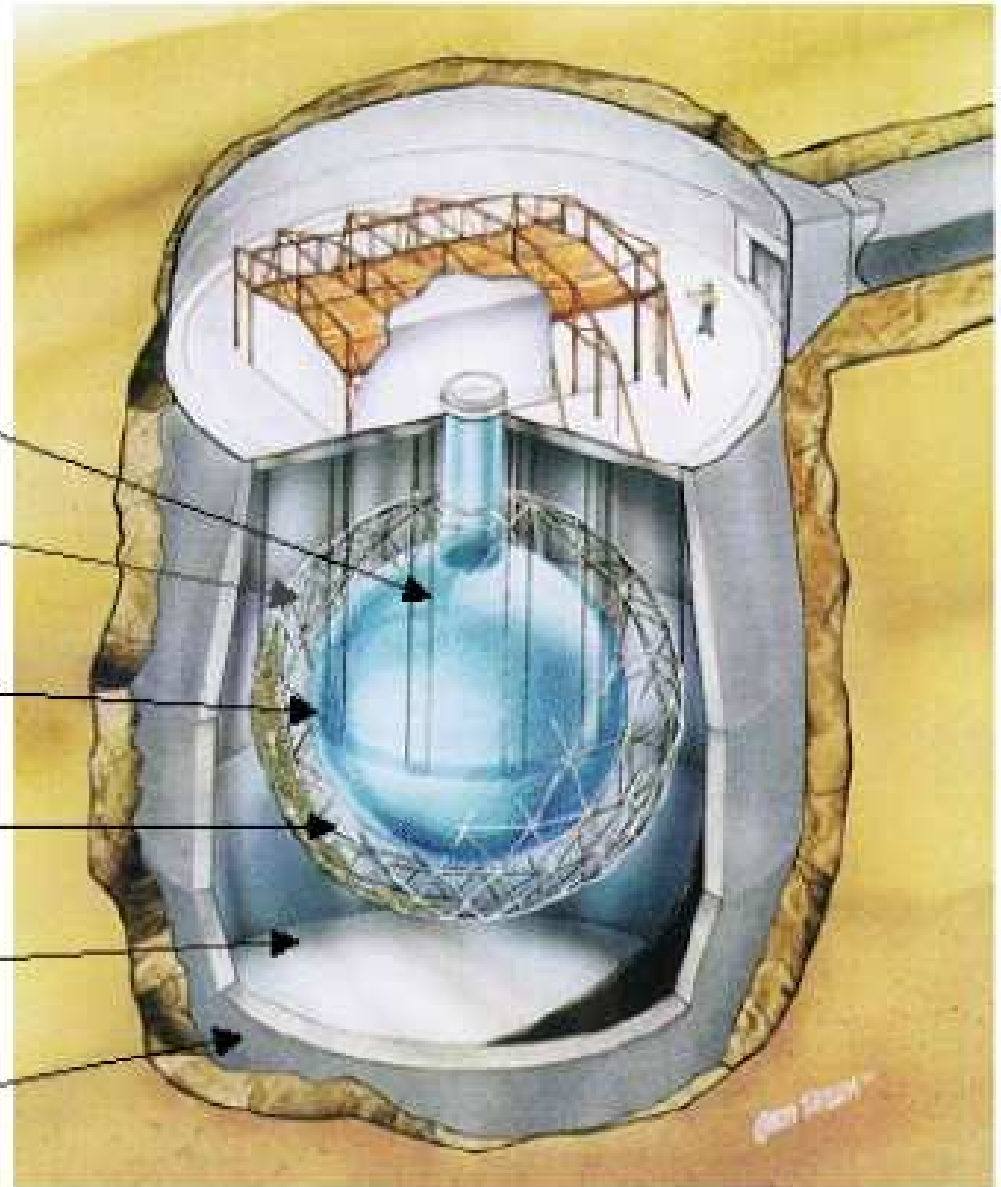


NC

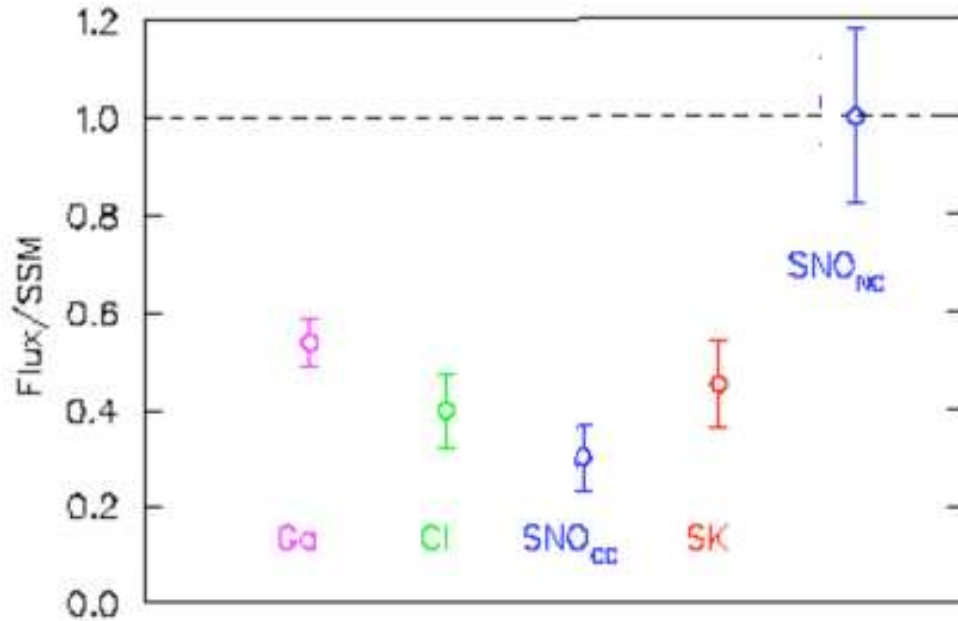


A SNO detektorrendszer

- 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

ν_e eloszcollál

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

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

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

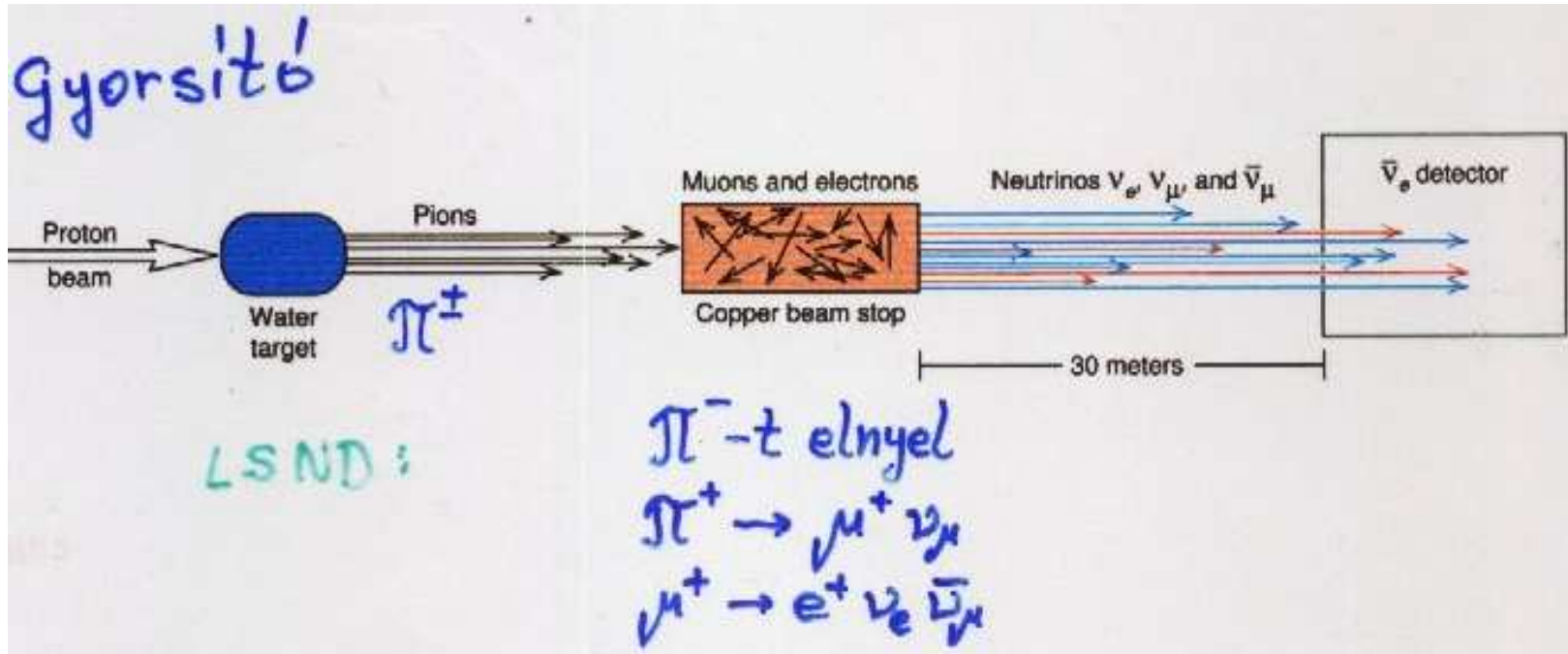
Légköri neutrínók: $\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$ oszcilláció Föld átmérőjén

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

Legalább két neutrínóra $m_\nu > 0!$



Neutrínónyaláb: LSND-kísérlet



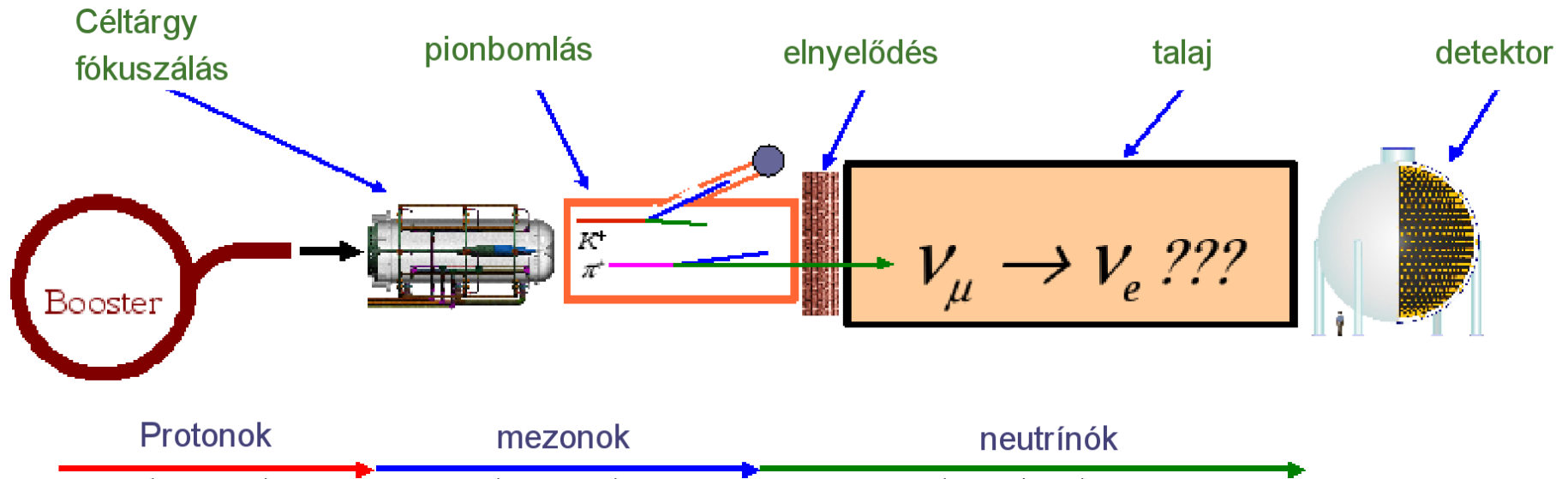
Los Alamos neutrínónyalábja

Liquid Scintillator Neutrino Detector (LSND) kísérlet:

$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ reakcióból $M_\nu > 0,4 \text{ eV}/c^2$

Ellentmond többi mérésnek, ellenőrzés: MiniBoone-kísérlet

A MiniBoone-kísérlet



Nagyobb energia: $E \approx 500$
MeV

Hosszabb repülési táv:
 $L \approx 500$ m

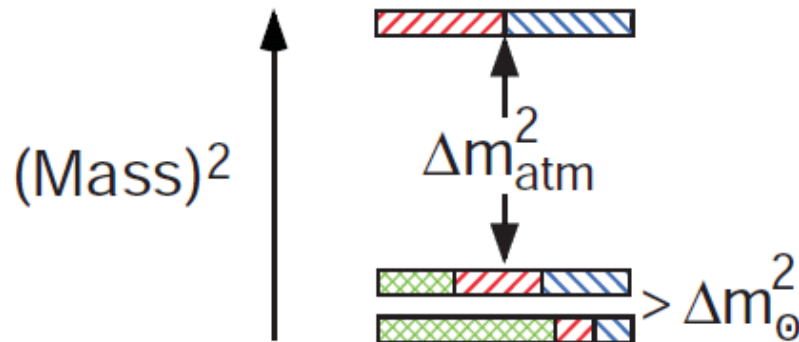
LSND: 30 MeV

LSND: 30 m

De L/E és oszcilláció azonos

MiniBoone-kísérlet cáfolja LSND-t (2007!)

A jelenlegi szituáció



Tömeg-sajátállapotok

Állapotfrakciók:

XXXX ν_e

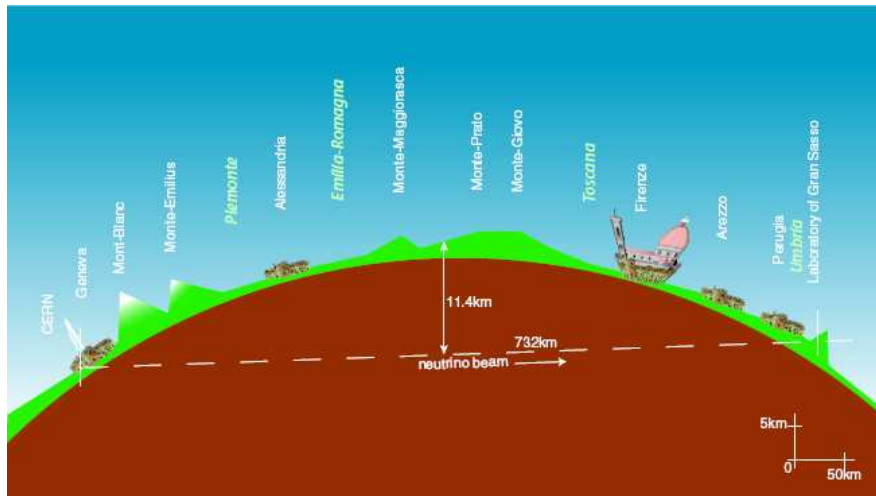
//// ν_{μ}

\\\\ ν_{τ}

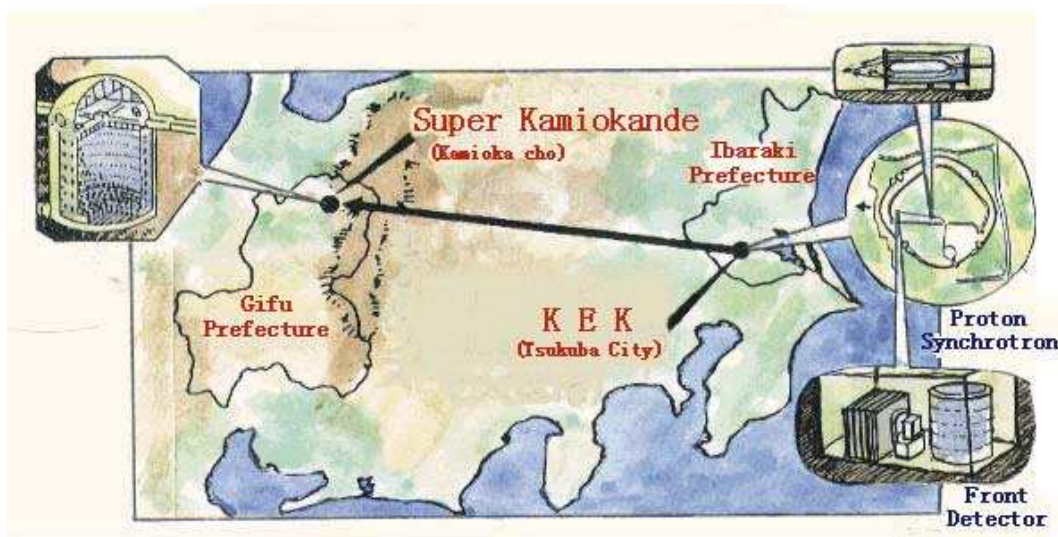
Gyenge
sajátállapotok

Nagy távolságú gyorsítós kísérletek

oszcilláció vizsgálatára



CNGS: CERN-v → Gran Sasso: 732 km



K2K: KEK-v → Kamioka: 250 km



Fermilab-v → MINOS:
730 km



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, ν), 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, μ, τ ν_e, ν_μ, ν_τ	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

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

A bozonok SUSY-partnerei

Elemi bozon	spin	SUSY-partner	spin
foton: γ	1	fotino: $\tilde{\gamma}$	$\frac{1}{2}$
gyenge bozonok: Z, W^+, W^-	1 1	zínó: \tilde{Z} wínó: \tilde{W}^+, \tilde{W}^-	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$
gluonok: g_1, \dots, g_8	1	8 gluínó: $\tilde{g}_1, \dots, \tilde{g}_8$	$\frac{1}{2}$
Higgs-terek $H_1^0, H_2^0, H_1^+, H_2^-$	0	higgszínók $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}_1^+, \tilde{H}_2^-$	$\frac{1}{2}$
graviton	2	gravitínó	$\frac{3}{2}$

két Higgs-dublett \Rightarrow 5 Higgs-bozon: h, H, A, H^+, H^-

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

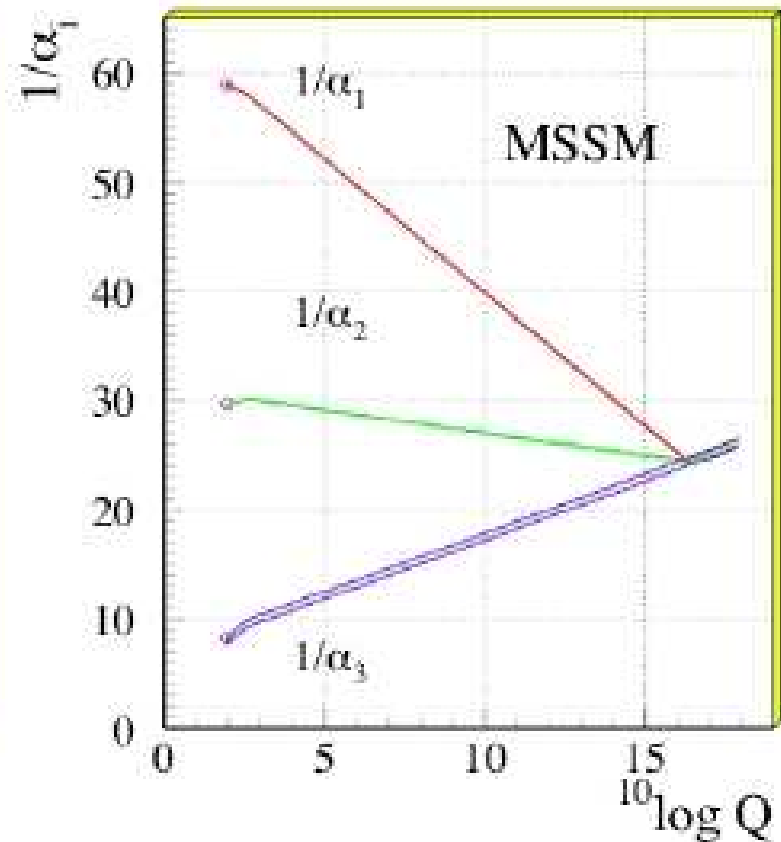
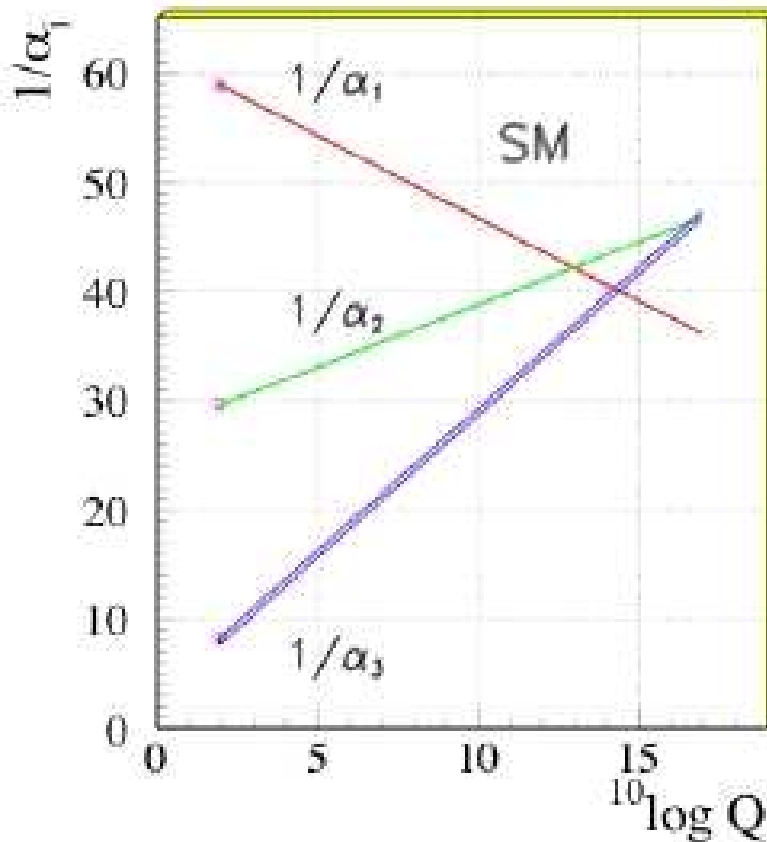
Higgs-tér sért egy **létező** szimmetriát



SUSY bevezet egy **nemlétezőt**

Mindez egy racionális, konzisztens elméletért

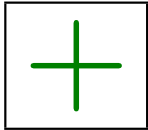
A mérték-kölcsönhatások egyesítése



Standard Modell: Nagy energián közelítő, de nem konvergáló mértékcsatolások

SUSY: Tökéletes konvergencia $\sim 10^{16}$ GeV körül

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 közösleges 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), 2008 –



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 órási 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)

