

Bevezetés a részecskefizikába (CERN, 2006)

Amit át lehet adni (javaslat)

Horváth Dezső

horvath@rmki.kfki.hu.

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



A kísérleti részecskefizika áttekintése

Vázlat

- Kvarkok és leptonok
- Összetett részecskék: mezonok és barionok
- A kvarkok töltése és színe: kísérlet
- Szimmetriák és megmaradási törvények
- Mértékszimmetriák és kölcsönhatások
- Kvantumszíndinamika és a gluon, kvarkbezárás
- Higgs-mechanizmus

Előszó

A (részecske)fizika egzakt tudomány:

- Pontos matematikai formalizmuson alapszik.
- Érvényesség: kiszámítható eredmény, egyezik kísérlettel.
- A fogalmak mérhető mennyiségek, a szavak csak mankók.



Elemi részecskék

Elemi (és egyre elemibb) részecskék

Anaximenész: Föld — víz — tűz — levegő

Mengyelejev: Kémiai elemek

periodicitás, színekép \Rightarrow atomok \Rightarrow izotópok

Rutherford: atommag + elektron \Rightarrow
proton, neutron, elektron

1970 óta: Standard Modell

leptonok, kvarkok, mértékbozonok

Kölcsönhatások szimmetriákból



A mikrovilág vizsgálata: energia

Fénysebesség: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1$

Energia:

1 eV = kinetikus energia (e^- , $\Delta U = 1 \text{ V}$)

1 keV = 10^3 eV ; 1 MeV = 10^6 eV ;

1 GeV = 10^9 eV ; 1 TeV = 10^{12} eV

Tárgy	méret, m	energia
kicsi	10^{-3}	
baktérium	10^{-5}	
λ (fény)	10^{-7}	1 eV
atom	10^{-10}	1 keV
atommag	10^{-14}	1 GeV
elektron	10^{-18}	1 TeV

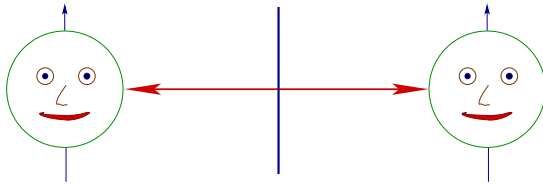
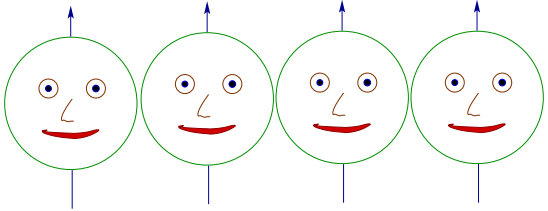
Heisenberg-féle határozatlansági reláció:

Nagyobb energia \Rightarrow kisebb távolság \Rightarrow mélyebb szerkezet



Fermionok és bozonok

Legfontosabb tulajdonság:
spin (perdület) = saját impulzusmomentum \hbar egységben

Tulajdonság	fermion	bozon
Spin	feles ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \dots$)	egész (0, 1, 2, ...)
$\psi(1, 2) = \pm \psi(2, 1)$ Kizárás	— van	+ nincs
Részecskeszám megmaradása	van	nincs
Kondenzáció		

Elemi fermionok ($S = \frac{1}{2}$)

	1. család	2. család	3. család	töltés
Leptonok	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	e^-	μ^-	τ^-	-1
Kvarkok	u u u	c c c	t t t	$+\frac{2}{3}$
	d d d	s s s	b b b	$-\frac{1}{3}$

Tömeg családdal nő; kvarkbomlás: \Downarrow , majd \Leftarrow

A világ semleges, az összes töltés családonként zérus

Kvarkok 3 színben, szabadon csak fehér (színtelen)



2 lehetőség: (qqq) és $(q\bar{q})$

Például: proton = (uud) , neutron = (udd)

Pionok: $\pi^+ = (u\bar{d})$, $\pi^- = (d\bar{u})$



Kölcsönhatások és közvetítő bozonjaik

Kölcsönhatás	erősség	hatótáv	bozon	m_0 (GeV)
Erős	1	1 fm	8 gluon	0
Elektromágneses	10^{-2}	∞	foton	0
Gyenge	10^{-7}	< 1 fm	W^\pm	80
			Z^0	91
Gravitáció	10^{-38}	∞	graviton	0

$$r(\text{proton}) = 0,8 \text{ fm} \quad (1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m})$$

Az atommagot az erős kölcsönhatás protonból *kilógó* része tartja össze

Kvarkok szín-szín kölcsönhatása

Közvetítő: 8 gluon, $m = 0$

Színt hordoz: $R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$, $R\bar{G}$, $R\bar{B}$, $G\bar{R}$, $B\bar{R}$, $B\bar{G}$
de csak 8 független



gluon \sim foton, de foton nem hordoz töltést

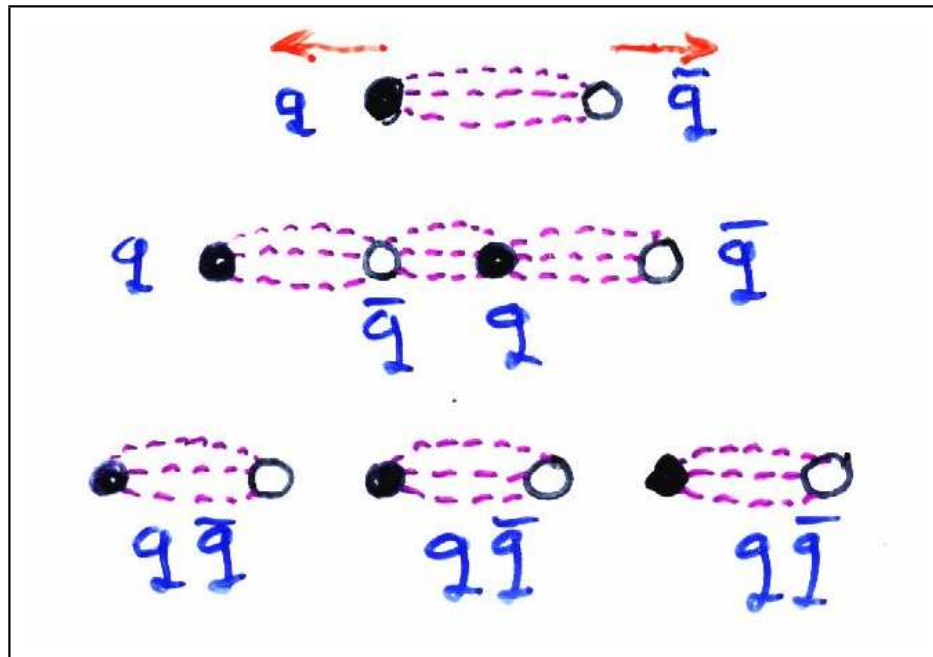
gluon két színt \Rightarrow g-g kölcsönhatás $\Rightarrow V(r) \sim r$

Gluonok

Kvarkok távolodása: kvarkpárok keltése, amíg az energiából futja



nincs szabad kvark vagy gluon



szakadó gluonszál

Gluon észlelése: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g \rightarrow 3$ hadronzápor

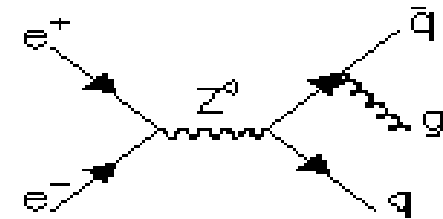
Gluon észlelése

Run: event 2542: 63750 Date 911014 Time 35925 Ctrk (N= 28 Sump= 42.1) Ecal (N= 42 SumE= 59.8) Hcal (N= 8 SumE= 12.7)
 Ebeam 45.609 Evis 86.2 Emiss 5.0 Vtx (-0.05, 0.12, -0.90) Muon (N= 1) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 2 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.8223 Aplan=0.0120 Oblat=0.3338 Spher=0.2463



OPAL

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$$

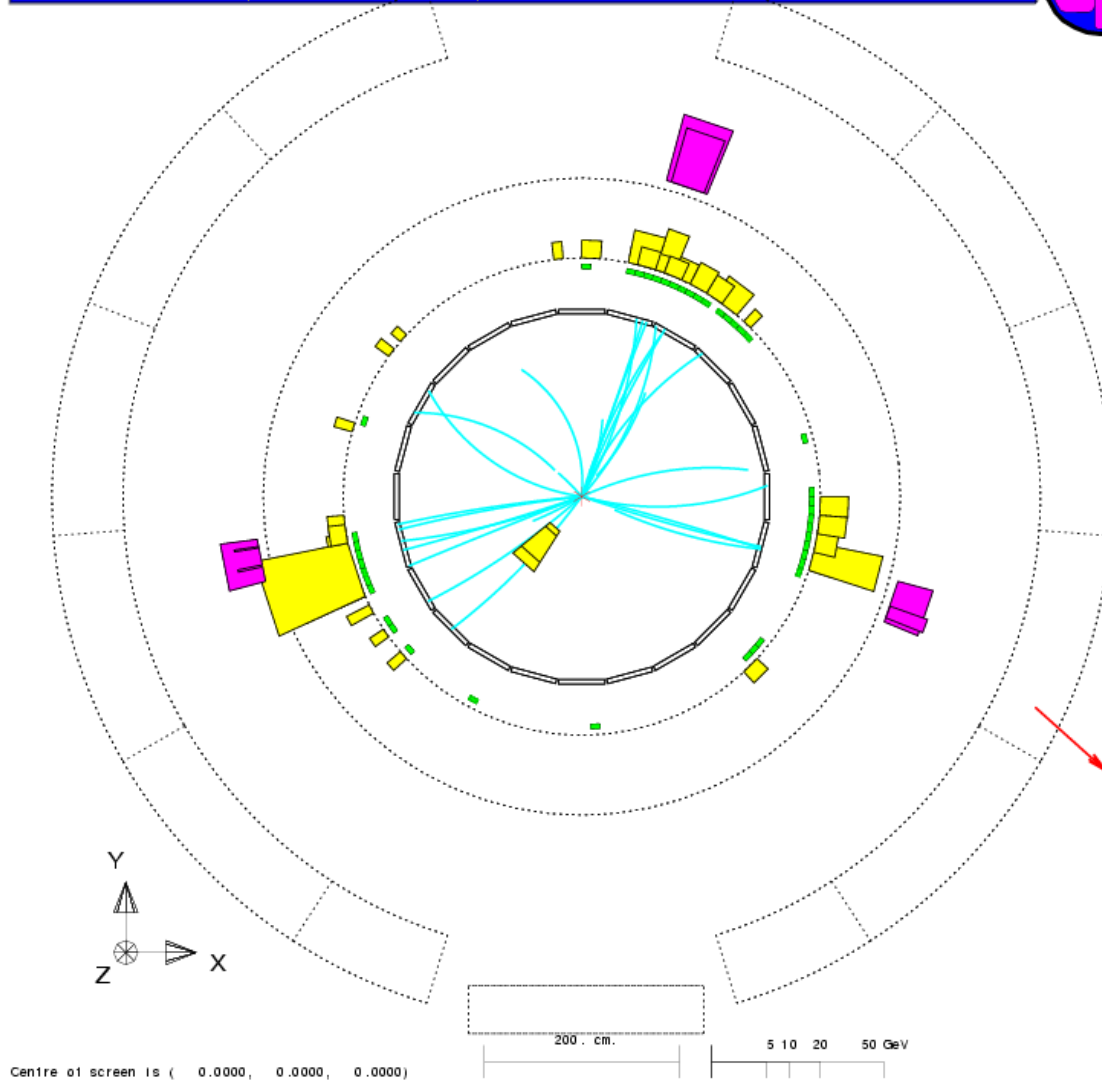


3 hadronzárpor:

28 töltött,

14 semleges

részecske

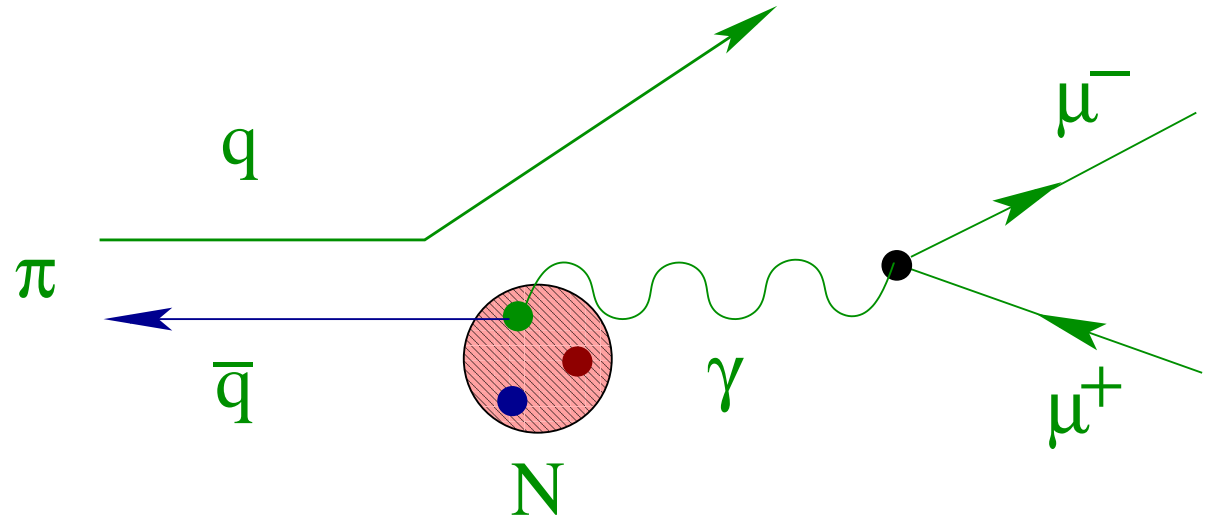


Kvarkmodell bizonyítékai

- Kvarkokat látni: nagyenergiájú e^+e^- ütközésekben hadronzárporok
- Összes lehetséges kvarkállapot létezik
- Nem találtunk lehetetlent (pl. $Q > 2$)
- Kvarkok harmados töltése és 3 színe: mérés

Elektromágneses pionszórás nukleonon

$$\pi N \rightarrow \mu^- \mu^+ X$$



Kvark szóródik, antikvark annihilál \Rightarrow müonpár

$$\begin{aligned} \pi^- &= (\bar{u}d) &> \sigma &\sim 18Q_u^2 = 18 \cdot \frac{4}{9} \\ {}^{12}\text{C} &\sim (18u + 18d) &> \sigma &\sim 18Q_d^2 = 18 \cdot \frac{1}{9} \\ \pi^+ &= (u\bar{d}) \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma(\pi^- \text{C} \rightarrow \mu^+ \mu^- \dots)}{\sigma(\pi^+ \text{C} \rightarrow \mu^+ \mu^- \dots)} \approx 4 \sim \text{kísérlet}$$

Szimmetriák

Részecskefizikában még fontosabbak, mint kémiában vagy szilárdtestfizikában

Globális szimmetria

⇒ megmaradási törvény

Eltolás térben

⇒ impulzus

Eltolás időben

⇒ energia

Forgatás

⇒ impulzusmomentum

Elektromágneses mérték- ⇒ töltés

Mértékelmélet:

Lokális szimmetria ⇒ kölcsönhatás

Lokális szimmetria: meghatározott módon, pontról pontra módosuló

Részecskefizika legfontosabb feladata
a szimmetriák vizsgálata



CPT-invariancia

A térelmélet alaptétele:

Ha egyszerre tükrözünk töltést (C), teret (P) és időt (T), nem változtatjuk meg a fizikát.

azaz szabad **antirészecske** \sim **részecske**,
amely téridőben visszafelé mozog.

Elmélet általában: *CPT* nem sérül

habár gyenge kölcsönhatás sérti a paritást és *CP*-t

Vannak *CPT*-sértő modellek \Rightarrow ellenőrizni

Részecske = – antirészecske ?

A CERN antiproton–lassítója (AD) a *CPT*-invariancia ellen-
őrzésére épült



Mérték-kölcsönhatások elmélete

Pontszerű fermion (pl. elektron) mozog lokális szimmetriájú térben.

Háromféle lokális szimmetria, három kölcsönhatás: elektromágneses, **gyenge** és **erős** (szín-)

De semminek nincs tömege és más problémák

Tömegteremtés: Higgs-mechanizmus

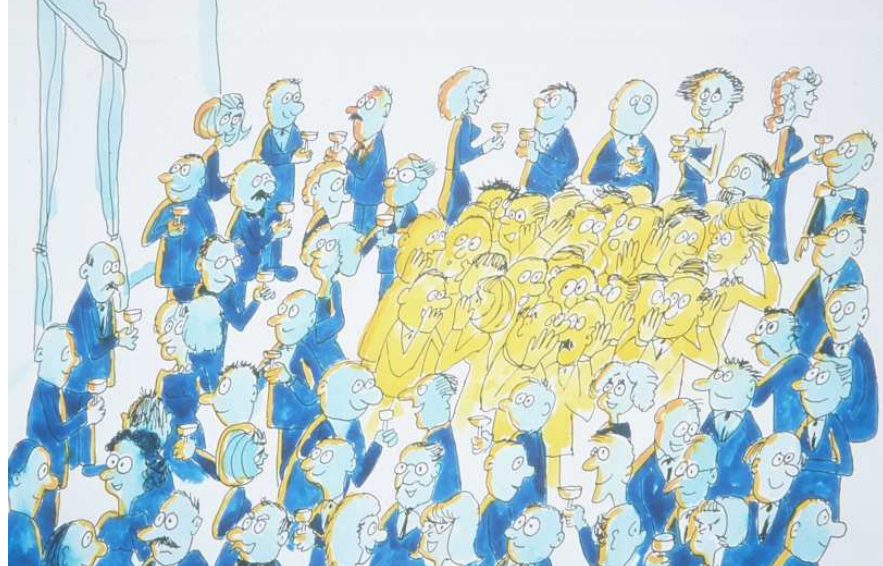
Higgs-bozon bújkál:

Elméletben léteznie kell, de eddig nem látjuk

Nagy a tömege? **Mért határ: $m_H > 114\text{GeV}$**

















Ha mégsem létezik, a Standard Modell összeomlik, dacára a kiváló kísérleti egyezésnek

Spontán szimmetriasértés \Rightarrow tömeg



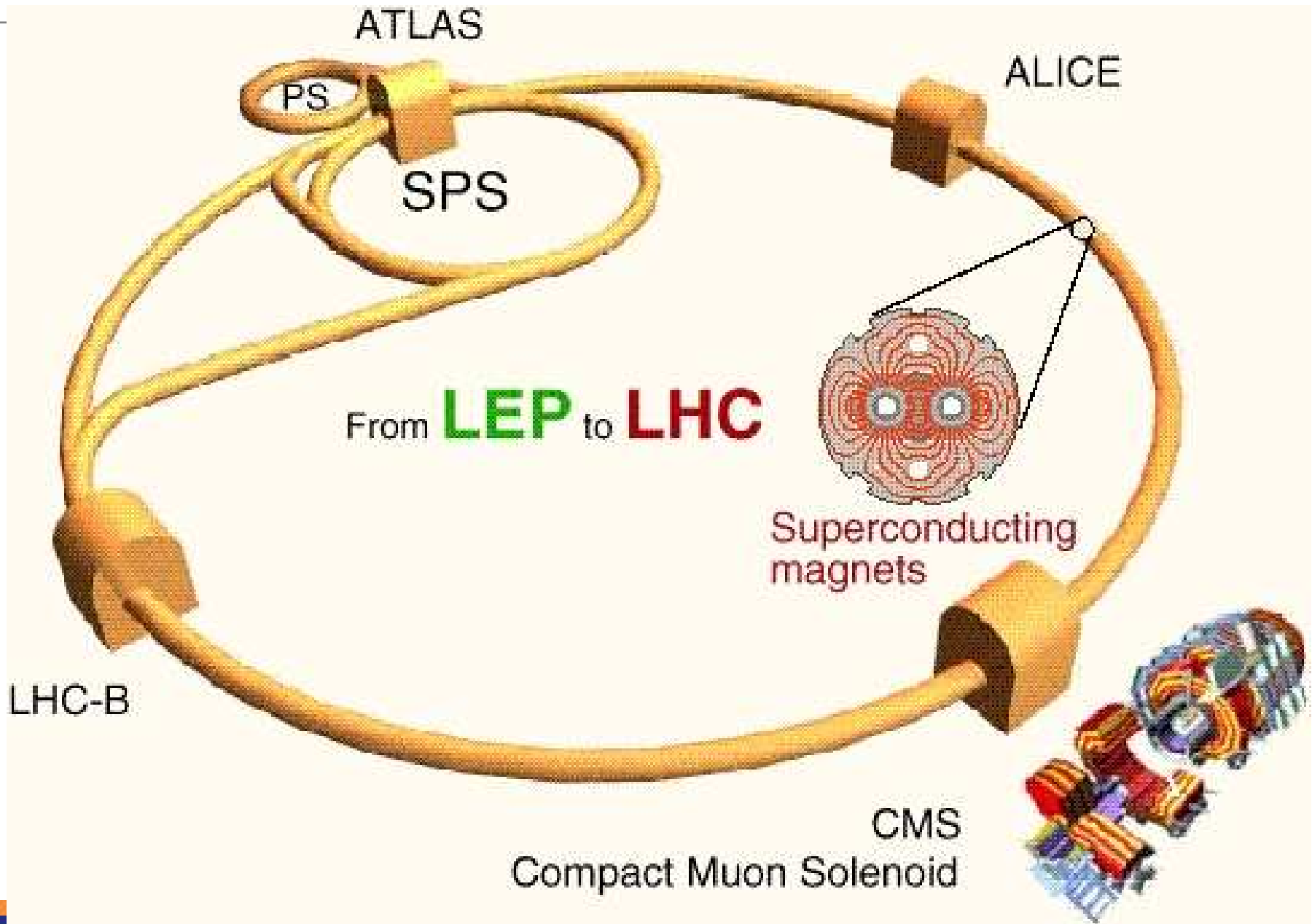
Courtesy of David J. Miller and CERN: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>

A Standard Modell állatkertje

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

A. Pich - CERN Summer Lectures 2005

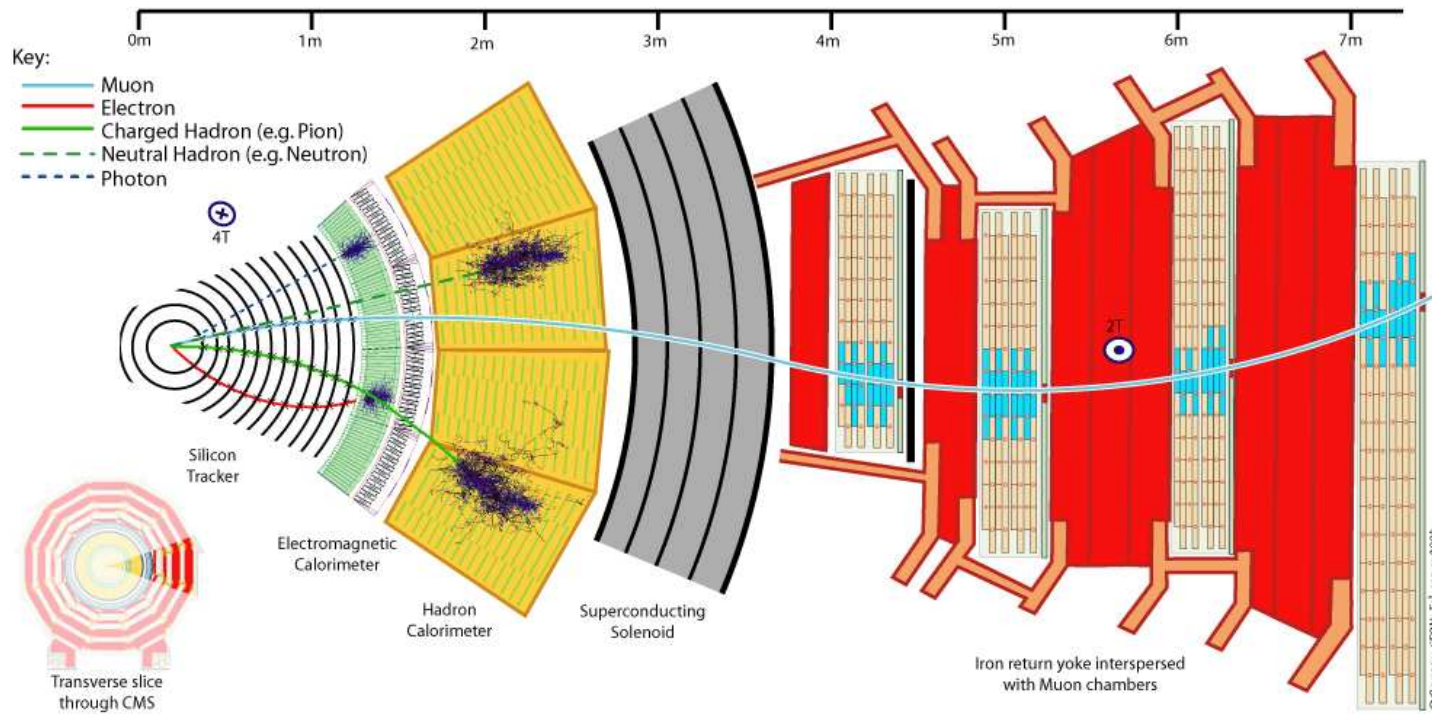
A Nagy Hadron-ütköztető (LHC)



A Nagy Hadron-ütköztető (LHC)



Kalorimetria: a CMS-detektor



Súly: 12500 tonna, több vas, mint Eiffel-toronyban

A világ legnagyobb (szupravezető) szolenoidja: átmérő ~ 8 m, $B = 4$ Tesla

> 2000 résztvevő a világ minden tájáról

Detektorépítésben magyar részvétel:

DE Kisérleti Fizika Tanszék és ATOMKI, Debrecen

Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

A Nap neutrínói

Észlelési egység: Solar Neutrino Unit

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

Detektor: 10 – 10000 t anyag



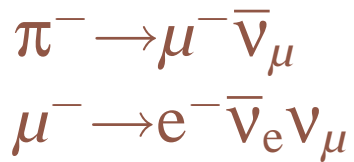
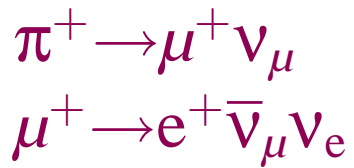
Várt: $8,2 \pm 1,8$ SNU; mért: $2,56 \pm 0,23$ SNU

Elvesztek??

Mi rossz: Napmodell vagy mérés?

Mindkettő megerősítve...

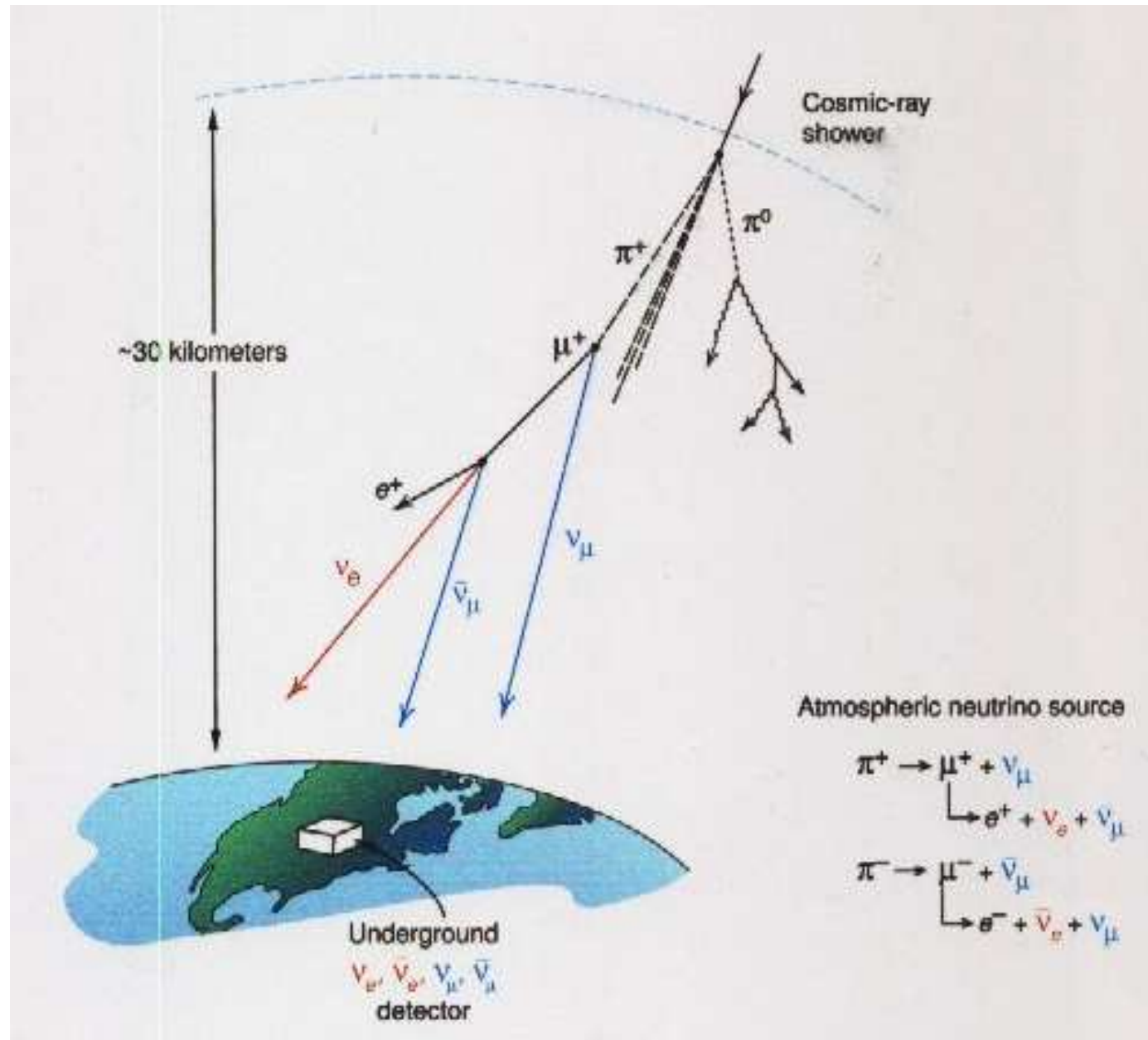
A légköri neutrínók



Várt: $N_\mu/N_e \sim 2$

Mért: $N_\mu/N_e \ll 2$

Hova lesznek?



Szuper-Kamiokande (SKK)

50,000 ton Water Cherenkov Detector

11,200 20" PMTs

electronics hut

crane

20" PMTs

anti-layer

PMT support

concrete

rock

Kamioka Nucleon Decay Experiment

1000 m mély

Kamioka-bányában

Belső detektor (1996-2001):

Ø39 m × 42 m tartály

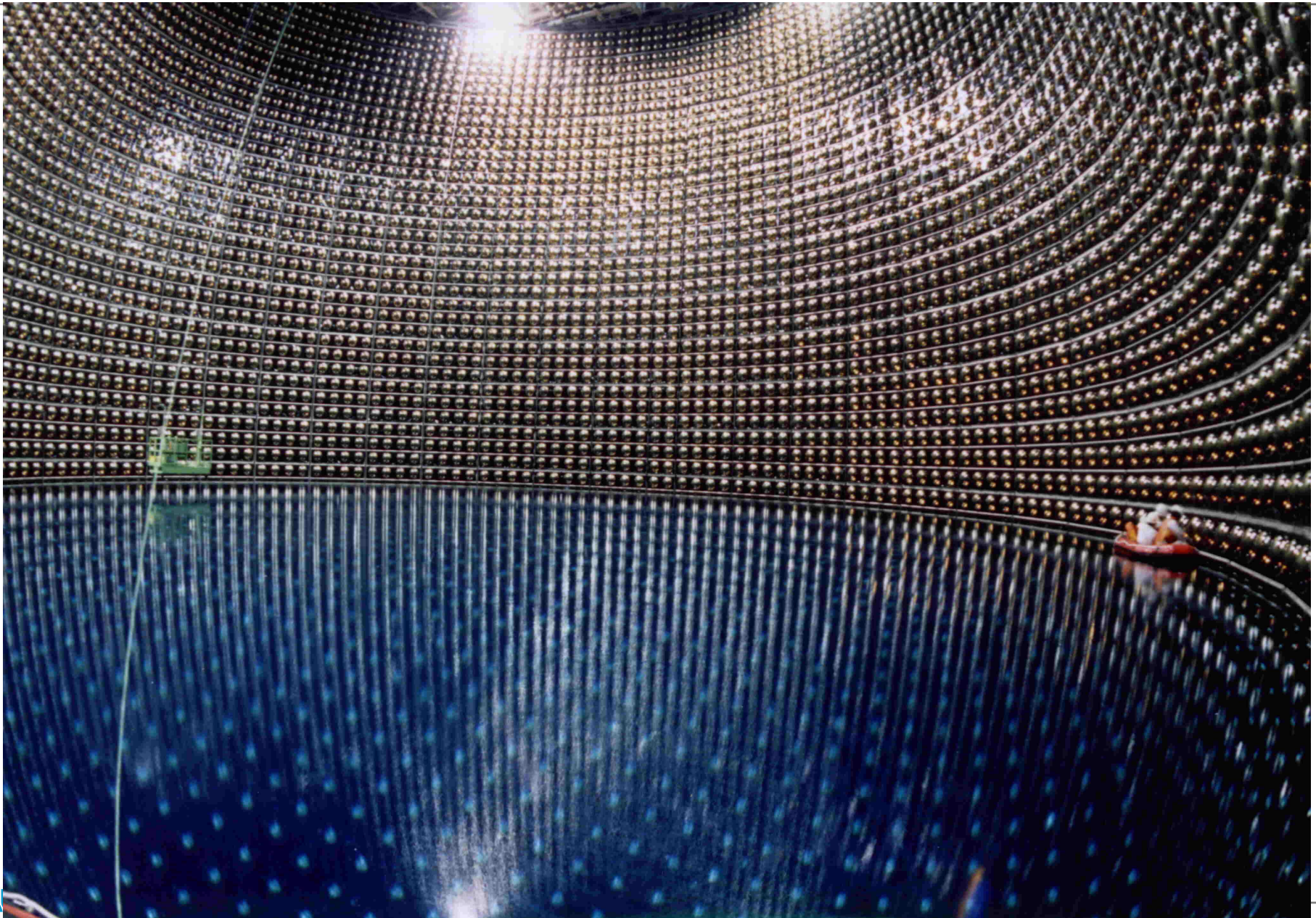
cca. 50000 t tiszta H₂O

2001-ben öngyilkos lett,
fokozatos renoválás

Külső detektor:

vétó: átfutó e, μ n, γ falból
2 m vastag H₂O (fény is!)

A Szuper-Kamiokande detektor



Szuper-Kamiokande: oszcilláció!

Légköri neutrínók

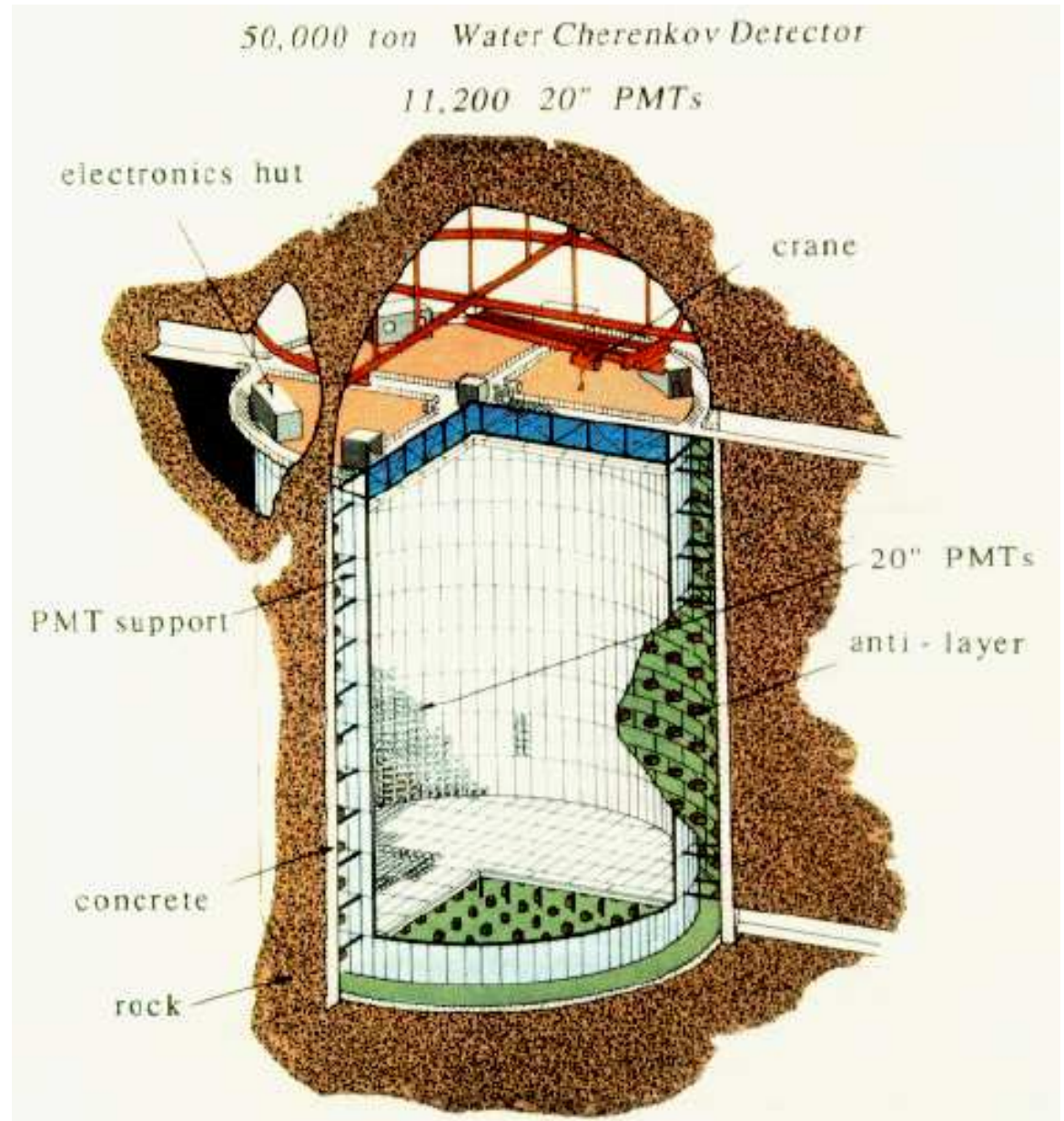
1000 m mély
Kamioka-bányában
Ø39 m × 42 m tartály
cca. 50000 t tiszta H₂O

ν_e és ν_μ fentről megvan

Lentről jövő ν_μ elfogy

Oszc. Föld átmérőjében

M. Koshiba, Nobel-díj, 2002



Neutrínó-oszcilláció

Neutrínó-állapotokat gyenge kölcsönhatás keveri

Egymásba alakulnak

Oszcilláció három állapot között:

$$\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$$

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

A 3 neutrínóból legalább kettőnek van tömege