

Az ultragyors neutrínók tündöklése és bukása

Trefort Gimnázium, 2012.04.20.

Horváth Dezső

Horvath.Dezso@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
Részecske- és Magfizikai Intézet, Budapest

és MTA ATOMKI, Debrecen



Vázlat

- Az OPERA-kísérlet bejelentése.
- Az 1987A szupernova neutrínói.
- Földi nagy távolságú kísérletek.
- A MINOS kísérlet.
- CNGS és OPERA.
- A távolság mérése.
- Az idő mérése: a hiba
- Ellenőrzés más kísérletekben.



Előszó

A (részecske)fizika egzakt tudomány:

- A fizika univerzális nyelve a matematika, pontos matematikai formalizmuson alapszik.
- Egy elmélet érvényes, ha kiszámítható, és eredménye egyezik a kísérlettel.
- Az igazi fogalmak mérhető mennyiségek, a szavak csak mankók.

Szavak mögött matematika és kísérleti tapasztalat

Új elméletnél alapkérdés: milyen pontossággal adja vissza az elméleti számítás a mérések eredményét?

Pontosabban-e, mint a régi?

Számítás nélkül nincs fizika, csak spekuláció....

és a fizika kísérleti tudomány!



A mikrovilág vizsgálata: nagy energia

1 eV = kinetikus energia, amelyet 1 V átszelésekor szerez egy elektron

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV};$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

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	$< 10^{-18}$	$>1 \text{ TeV}$

Nagyobb energia \Rightarrow kisebb távolság \Rightarrow mélyebb szerkezet



Az OPERA-kísérlet bejelentése

Az OPERA-kísérlet 2011 szept. 21-én kiszivárogtatja, majd másnap hivatalosan bejelenti (ArXiv-cikk, CERN-előadás), hogy fénysebességnél (2.5×10^{-5} -nel) gyorsabb neutrínókat észleltek a CERN és a Gran Sasso Nemzeti Laboratórium között (732 km).

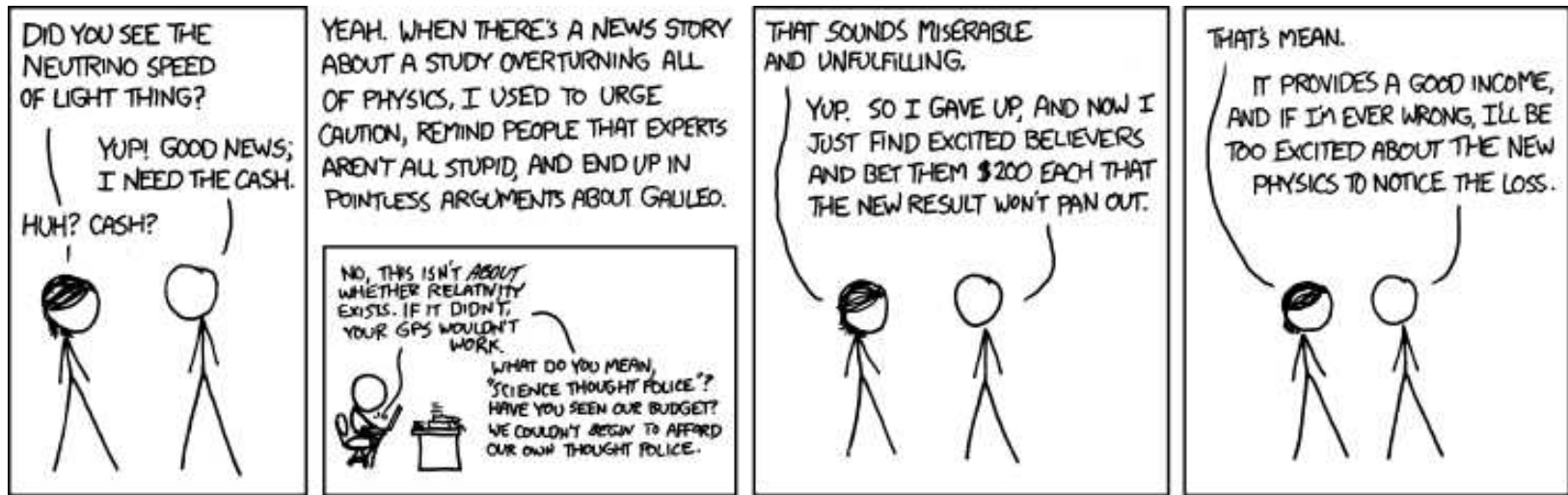
Gyanakszunk, amikor a fizika eddig ismert törvényszerűségeinek ellentmondó jelenséget fedeznek fel, különösen, amikor kiszivárogtatással kezdődik.

Számos *felfedezés*, (ALEPH, CDF, ...) Higgs-bozonok, dibarion, pentakvark, ... az ellenőrzésben elenyészett.

Rolf-Dieter Heuer, a CERN főigazgatója: *Engedélyeztem a CERN-i előadást, mert kötelességünk lehetőséget nyújtani az együttműködésnek, hogy vizsgálatra a tudományos közösség elé tárja, amit észlelt.*



Borúlátóak voltunk...



<http://xkcd.com/955/>

- Láttad a neutrínó – fénysebesség dolgot? – Aha, remek, szükségem van a pénzre. – Pénzre?

- Régebben, amikor hír jött a fizika felfordulásáról, óva intettem, szóltam, hogy a szakértők nem mind hülyék, és haszontalan vitákba bonyolódtam Galileiről.

- Ez elkeserítően hangzik. – Fel is adtam, most megkeresem az izgatott hívőket és fogadok velük 200 dollárba, hogy az új eredmény nem igazolódik.

- Ez durva. – Remek jövedelmet biztosít, és ha valaha tévedek, túlságosan izgat majd az új fizika, hogy a pénzzel törődjem.

Nemzetközi reakciók

Világsajtó:

**Megdőlt a relativitáselmélet! Lehetséges az időutazás!
Féreglyukak vannak a Világegyetemben! ...**

Fizikusok:

Ez lehetetlen, nem valószínű, mindennek ellentmond, amit idáig láttunk és gondoltunk, biztosan hibás a kísérlet.

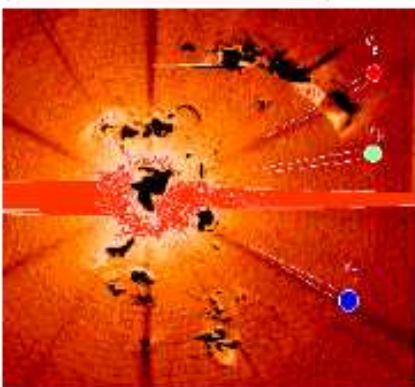
Persze, ha mégis igaz, iszonyú érdekes, gondoljuk végig! A relativitáselmélet nem dőlhet meg, de lehet, hogy a neutrínóra mások a szabályok, pl. extra térdimenziókban is terjedhet...

Neutrínóforrások



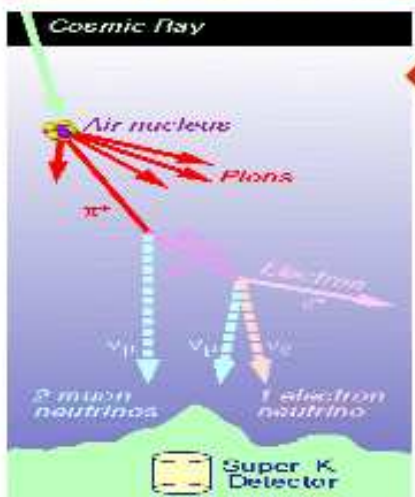
← Nap

Kozmikus →



← Kozmológia

Reaktor →



← Légkör

Gyorsító →



← Föld

Rengeteg a neutrínó-kísérlet!



Bányában, alagútban, víz és jég alatt, reaktorok közelében
Víz, jég árnyékol és észlel

Az SN1987A szupernóva: ν -zápor

Neutroncsillag kötési energiája: 99% neutrínóban távozik

SN 1987A: Nagy Magellán-felhőben, 168000 fényévre

$\sim 10^{58}$ ν , fele első 1–2 s, többi 10–100 s alatt

$\langle E_\nu \rangle \sim 10 \dots 15$ MeV.

Neutrínóészlelés 1987 febr. 23-án:

- 2h52', Kamiokande, 2140 tonna:
 1ν (7 MeV) / 10 s (tipikus háttér)
- 2h52', IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven), 6000 tonna:
 0ν
- 7h35', Kamiokande: 11ν (7...35 MeV) / 13 s
- 7h35', IMB: 8ν (20...40 MeV) / 4 s

SN 1987A: fényhozam

Neutrínók kollapszus pillanatában keletkeznek.
Fényjel késleltetve, amikor a hő elkezd kiszabadulni.

Vörös óriás: napok, **kék óriás:** órák múlva.

Fényjel 1987 febr. 23-án:

- 10h40': fényképen megjelenik
- 10h53': felfedezés
- Világít 1988 szeptemberéig

A fényjel 3 órát késett, kék óriás volt

Neutrínósebességre felső határ:

$$\left| \frac{v_\nu - c}{c} \right| < 2 \times 10^{-9}$$



SN1987A a Tarantula-köd
szélén

SN 1987A: kozmikus ν -zápor korábban?

$$2.4 \times 10^{-5} \times 168000 \sim 4 \text{ év}$$

4-5 évvel korábban Kamiokande nem működött

Kozmikus (nem Nap-, földi vagy légköri): $E_\nu > 20 \text{ MeV}$

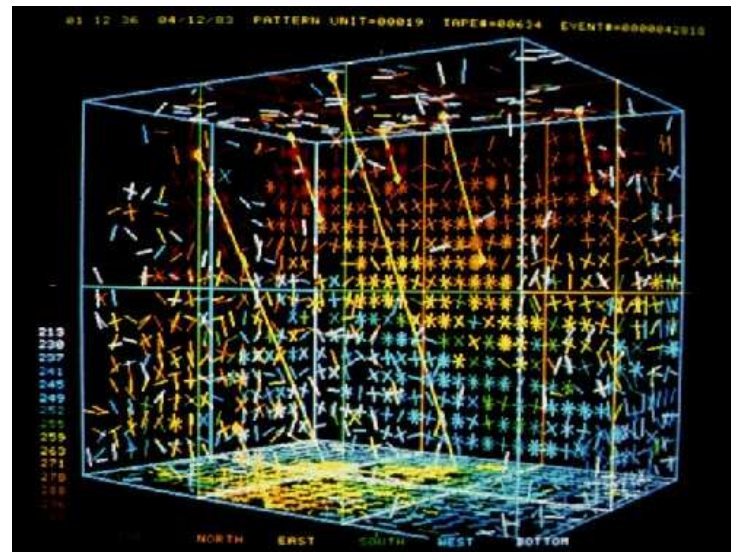
Baksan szcintillátor-teleszkóp (SzU)

- 1980-1986: 0.16 ν /nap
- 1987.02.23: 5 ν / 9.1 sec



IMB vizes Cserenkov-det (USA)

- 1982-1986: 2 ν /nap
- 1987.02.23: 8 ν / 4 sec



Gyorsító neutrínó-kísérletek

neutrínók egymásba alakulásának (neutrínó-oszcilláció) vizsgálatára

Kozmikus protonok a légkörben piont keltenek:



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

Gyorsító analóg légkörrel $L \sim 30$ km

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

Müon lelassul bomlás előtt \Rightarrow termékei szerteszéjjel repülnek.

Irányítva: \sim tiszta ν_μ nyaláb.

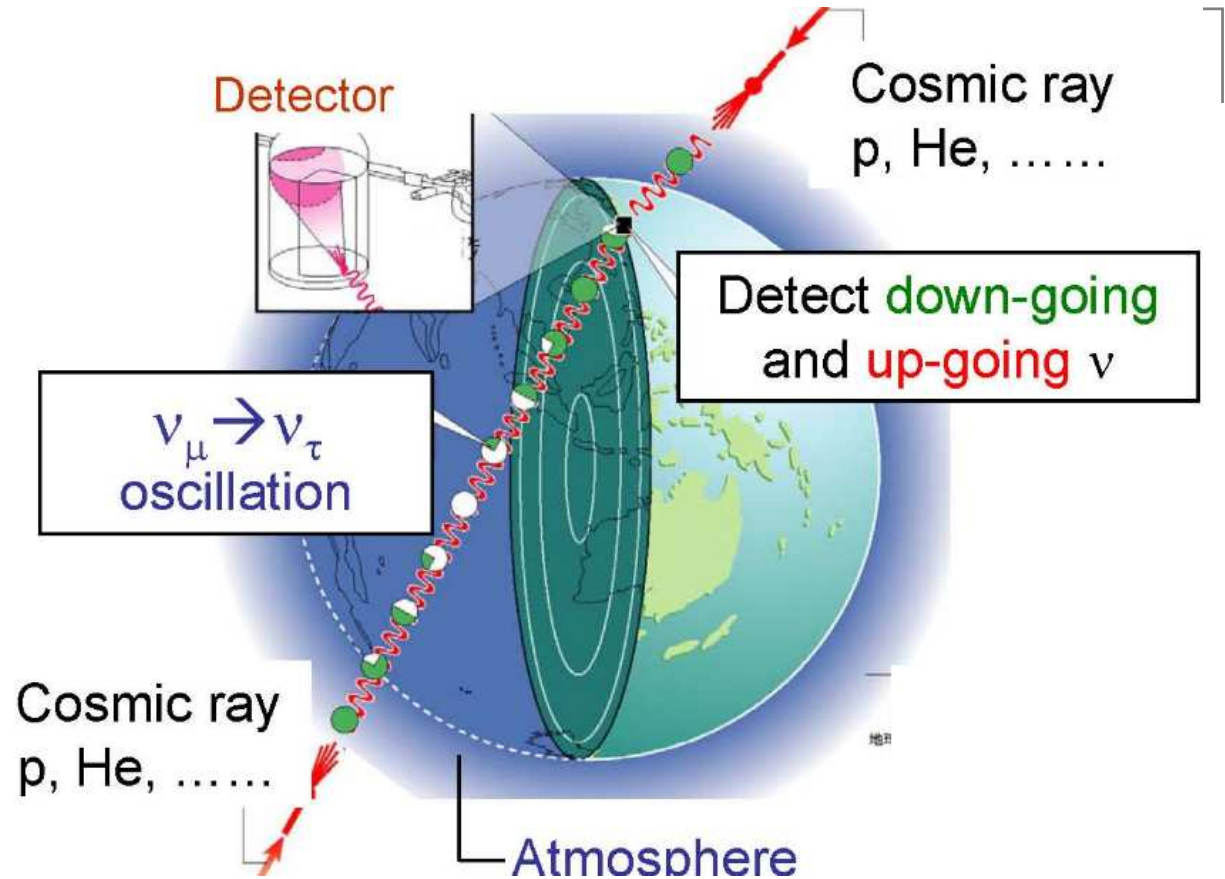
Légköri neutrínók átalakulása

Szuper-kamiokande,
amioka-bánya, Japán

Sok-GeV-es
műon-neutrínókra

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

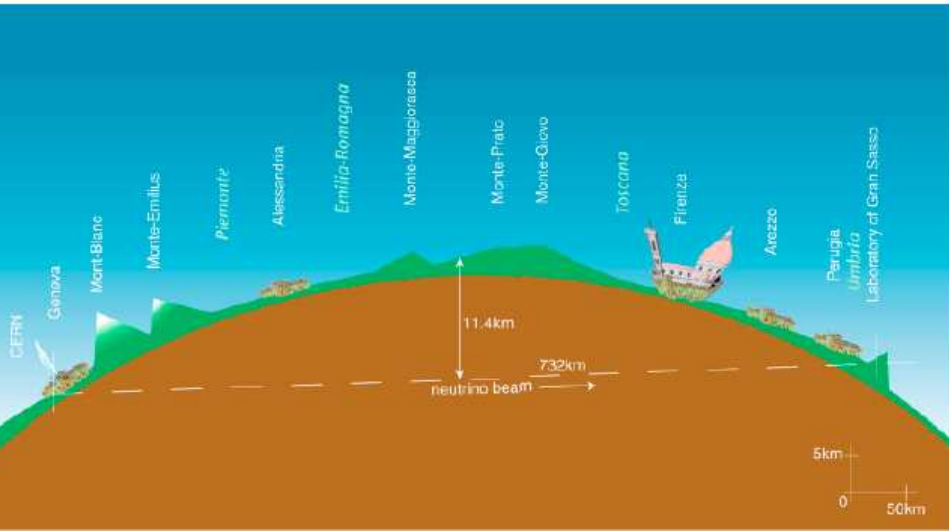
Föld átmérőjén



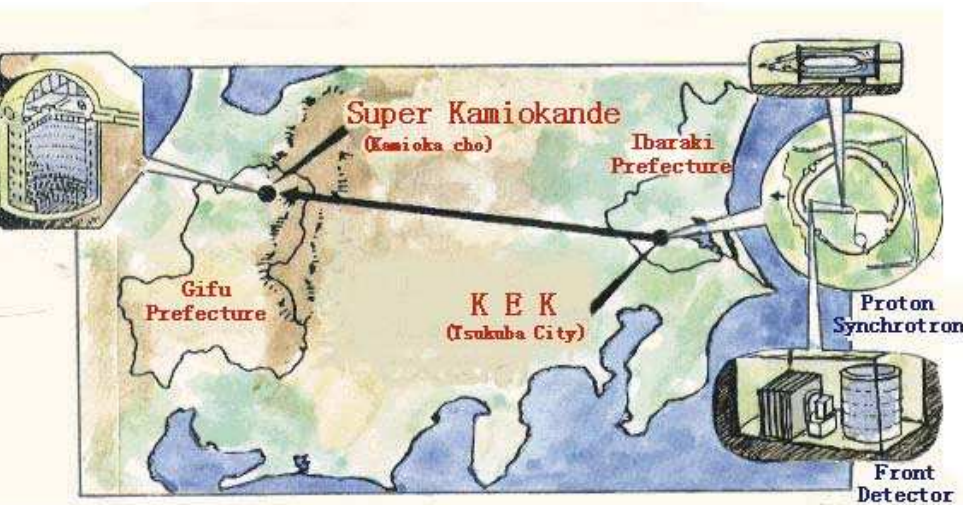
$$\text{Fluxus fel/Fluxus le} = \frac{N(-1,0 < \cos \Theta < -0,2)}{N(0,2 < \cos \Theta < 1,0)} = 0,54 \pm 0,04$$

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

Nagy távolságú gyorsító kísérletek



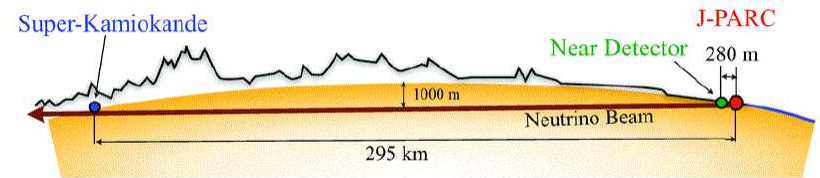
CNGS: CERN → Gran Sasso:
OPERA, 732 km



K2K: KEK → Kamioka: 250 km



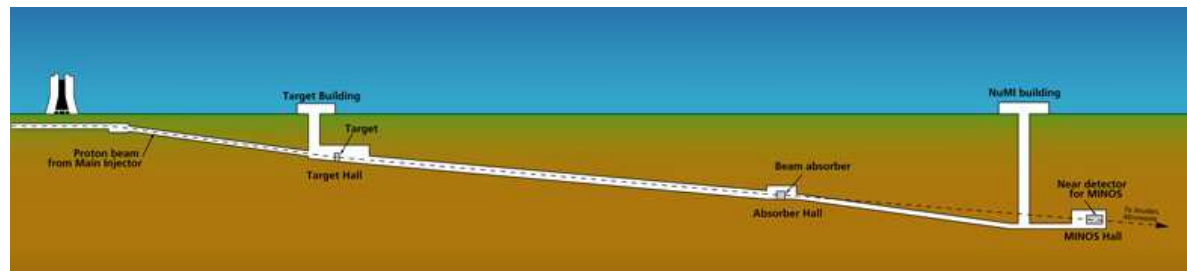
Fermilab → MINOS: 735 km



T2K (Tokai → Kamioka): 295 km

A MINOS-kísérlet, USA

Main Injector Neutrino Oscillation Search



NUMI → MINOS közeli detektor

Hasonló vas + szcinti kaloriméterek

közeli detektor (980 tonna):

93% ν_μ , 6% $\bar{\nu}_\mu$, 1% ($\nu_e + \bar{\nu}_e$)

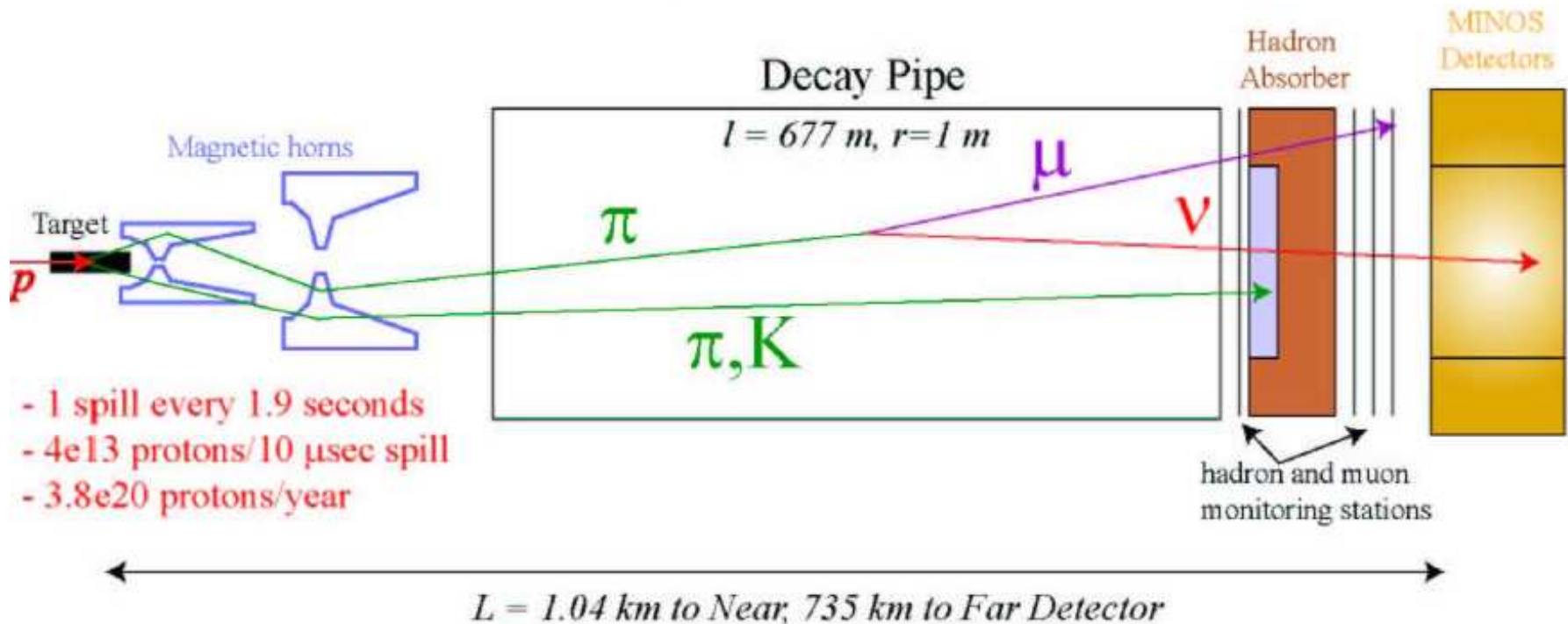
⇓ 734 km ⇓

távoli detektor (5400 t): $\sim 60\% \nu_\mu$

$$E(\nu_\mu) \sim 3 \text{ GeV}$$

MINOS Coll., P. Adamson et al., Phys. Rev. D76, 072005 (2007)

NUMI → MINOS nyalábvezeték



- Pionröptetés: 677 m vákuum
- Hadronok azonosítása, elnyeletése
- Müon azonosítása, elnyeletése: 300 m anyag
- Közeli detektor: 1040 m, távoli detektor: 735 km

MINOS: a neutrínók repülési ideje

Ha $m_\nu = 0 \Rightarrow v_\nu = c$, ha $m_\nu > 0 \Rightarrow v_\nu < c$

Várakozás: m_ν nagyon kicsi $\Rightarrow v_\nu \approx c$

ν átlagos beérkezési ideje c -hez képest:

$$\delta = -126 \pm 32 \text{ (stat)} \pm 64 \text{ (syst) ns}$$

Relatív sebességkülönbség:

$$\frac{v_\nu - c}{c} = \frac{-\delta}{\tau + \delta} = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5}$$

A különbség bizonytalanságon belüli, nem szignifikáns

Következtetés: $v_\nu \approx c$

MINOS Coll., P. Adamson et al., Phys. Rev. D76, 072005 (2007)

CNGS → OPERA: Infóforrások

Dario Autiero előadása, CERN, 2011.09.22

T. Adam *et al.* (OPERA Collaboration),
„Measurement of the neutrino velocity with the OPERA
detector in the CNGS beam,”

(A neutrínó sebességének mérése a CNGS-nyalámban az
OPERA detektorral)

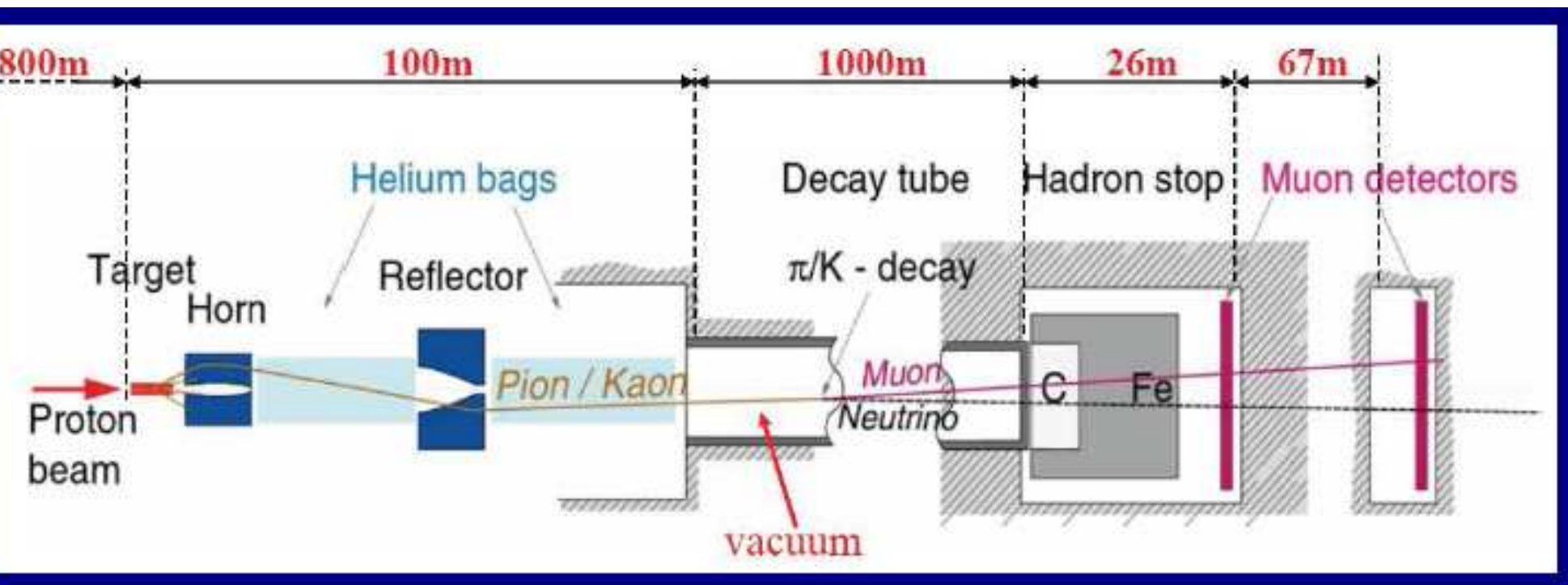
arXiv:1109.4897 [hep-ex].

Rengeteg (százezres!) újságcikk és blog

Mottó: „Semmi nem megy a fénynél gyorsabban, csak a
pletyka!”

230 komoly fizikai elemzés publikálva, főként elméleti

CNGS: CERN Neutrinos to Gran Sasso



Proton pion, kaon $K \rightarrow \pi, \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ K, π stop μ^\pm észlelése

Mindegyik részecske relativisztikus.

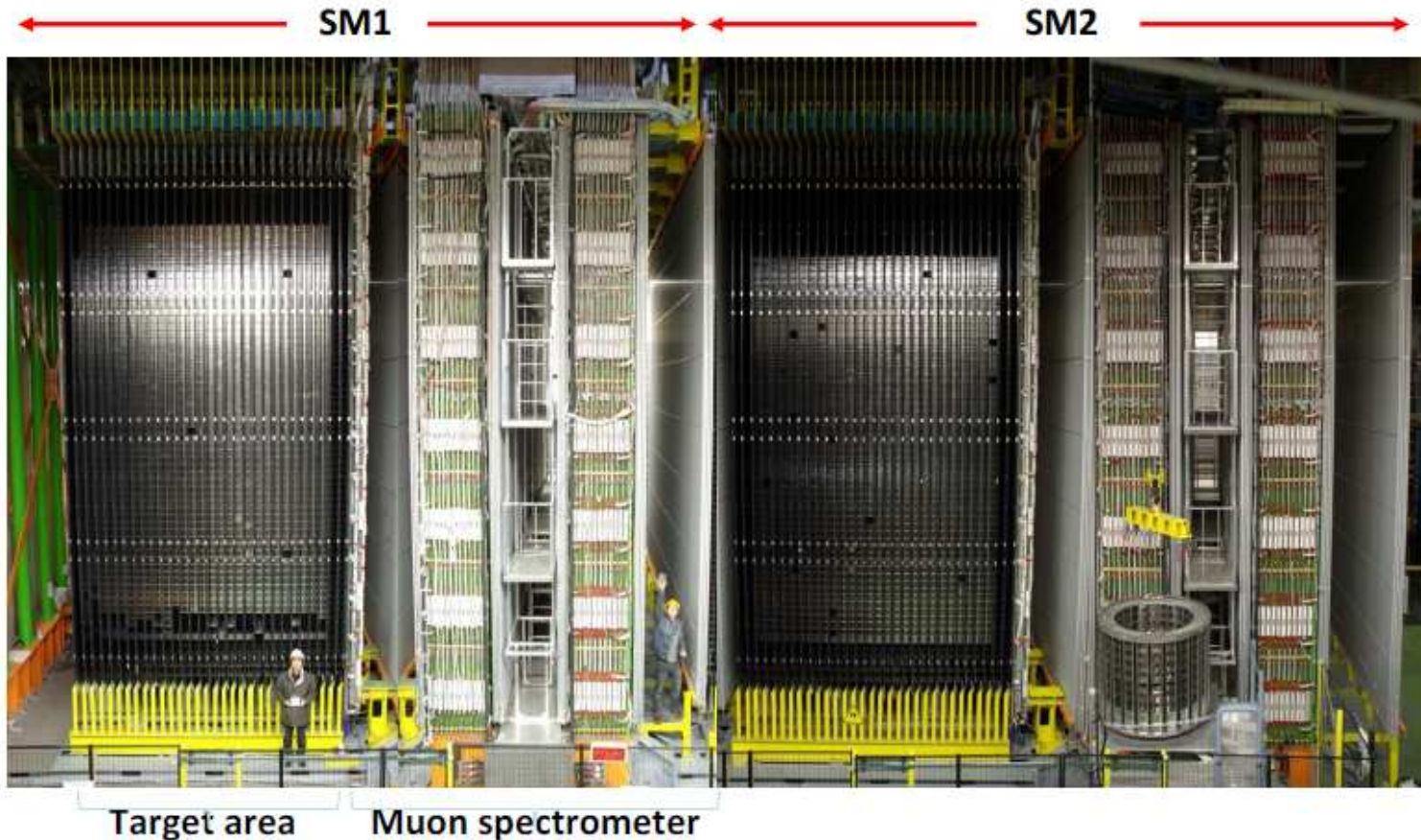
Müon bomlás előtt lelassul, $\mu \rightarrow e \nu_\mu \nu_e$ neutrínói szétszóródnak

Csak müon-neutrínó megy előre, müon elnyelődik útközben.

~ 17 GeV-es ν_μ -nyaláb szétterül, LNGS-nél 2.8 km széles

Az OPERA-kísérlet

Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oszcilláció kimutatására

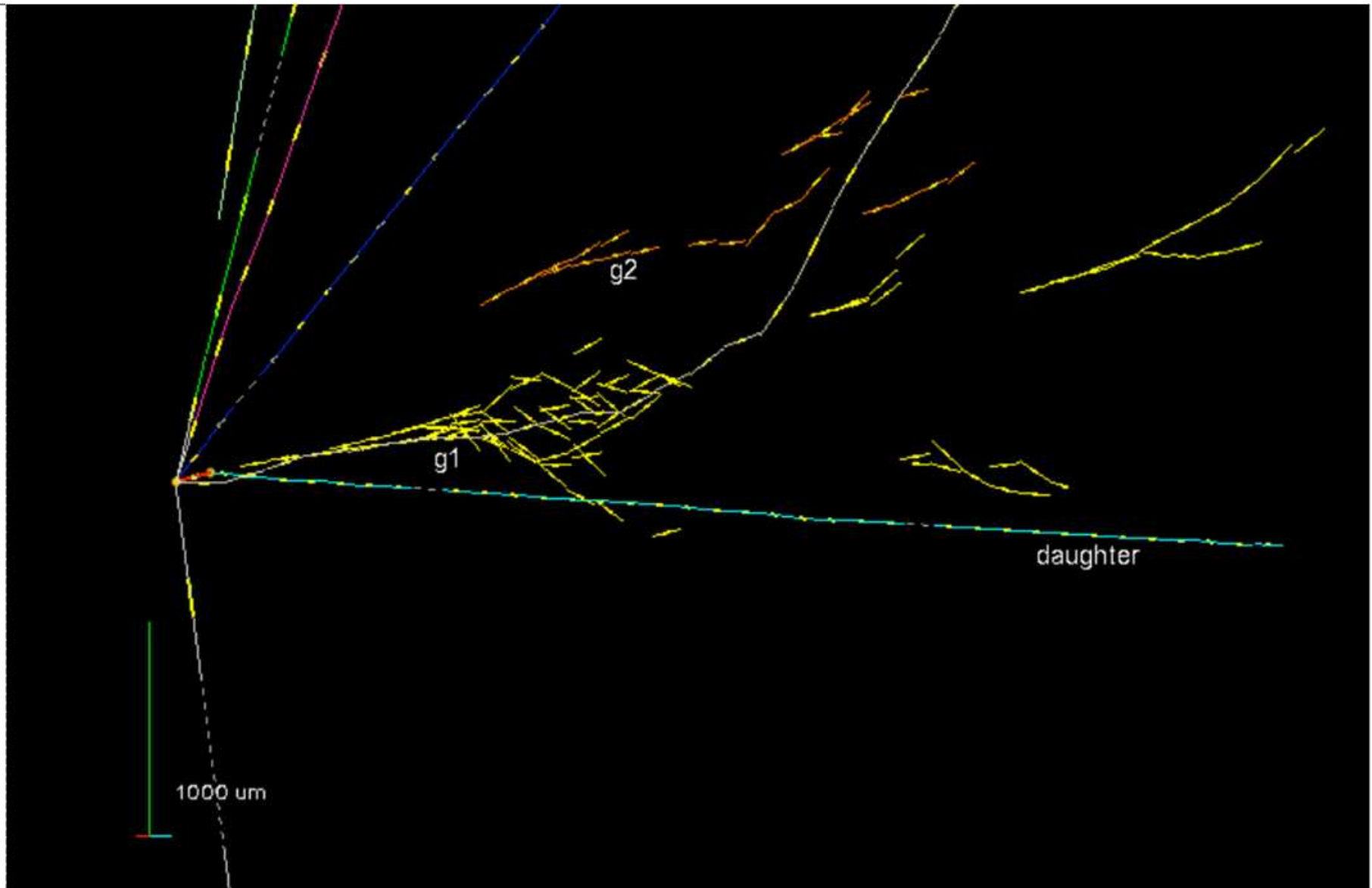
Blokk: ólomlemez + fotoemulzió + szcintillátor-hodoszkóp

2 szupermodul: 150000 blokk + mágneses spektrométer

Az OPERA-detektor Gran Sassoban



Az OPERA tau-neutrínója: $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$



OPERA Coll., N. Agafonova et al., Phys.Lett.B691:138-145,2010

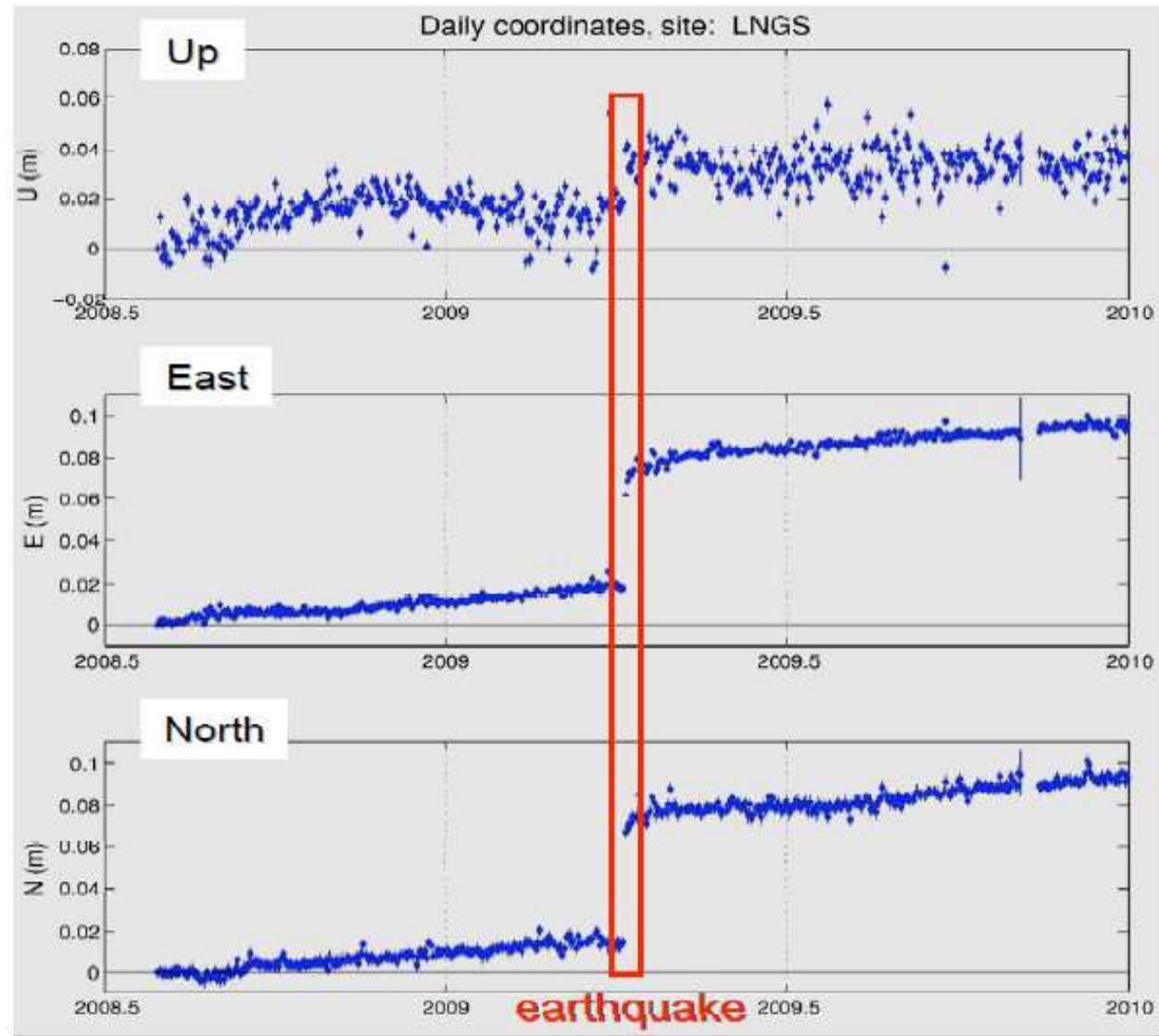
OPERA: folyamatos távolságmérés

2009-es
földrengés

Fel: 1 cm

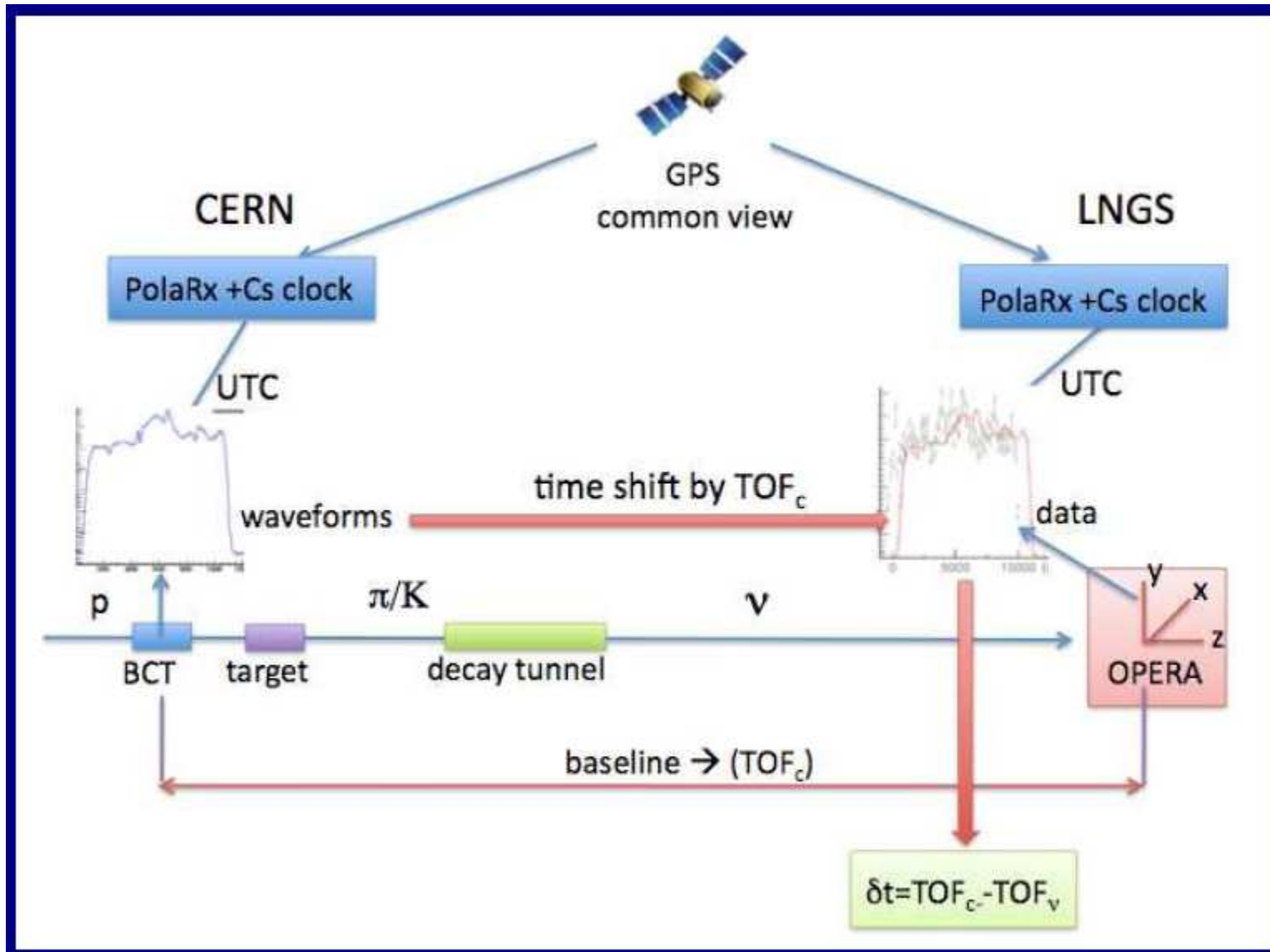
Keletre: 5 cm

Északra: 6 cm



Távolságmérés bizonytalansága: ± 20 cm

CNGS → OPERA időzítés



Cs atomórák mérnek, GPS közvetít és szinkronizál.

Távolság- és időmérés hitelesítése

Távolságmérés:

European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)
(Eurázsiai földrészhez rögzített rendszerben)
Protontarget fókuszpontja ↔ OPERA-detektor eleje
(731278.0 ± 0.2) m, fő hibaforrás: LNGS alagút

Mérés: CERN és LNGS geodéziai csoportjai

Ellenőrzés: Római Sapienza Egyetem, Geodézia csoport

Időmérés:

Mérés: Swiss Metrology Institute

Ellenőrzés: Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Braunschweig és Berlin
(a német metrológiai hivatal)

OPERA: időmérés eredménye

Instrumentális késleltetések mérése
hordozható Cs atomórákkal

Események: 7586 belső müon, 8525 sziklában áttöltődött

Illesztett késleltetés:

Összes eseményre: $(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)})$ ns
Csak belső müonokra: $(1047.4 \pm 11.2 \text{ (stat.)})$ ns

Kalibrációs „doboz” felnyitása után:

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu =$$
$$(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)}) \text{ ns} - 987.8 \text{ ns} =$$

$$(57.8 \pm 7.8 \text{ (stat.)} \begin{matrix} +8.3 \\ -5.9 \end{matrix} \text{ (sys.)}) \text{ ns}$$

OPERA állítása: Illesztés proton-eloszláshoz pontosabb,
mint pl. közeli neutrínó-detektor eseményeihez.

Rengeteg ellenvetés, spekuláció

InSpire: 131 tudományos cikk 1 hónap alatt a témában

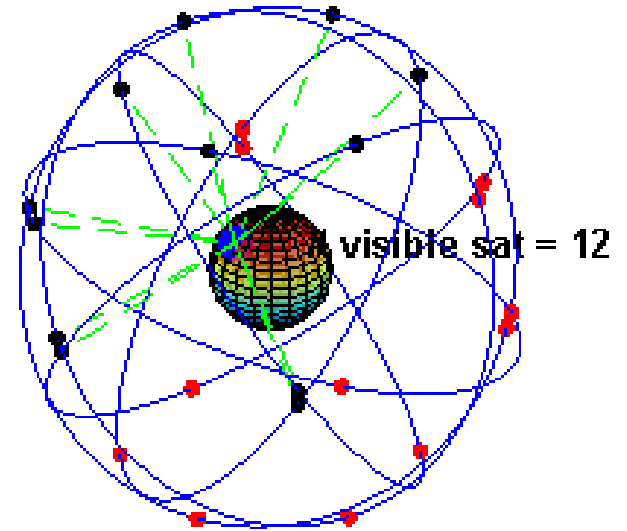
Rengeteg különbség SN-1987A és OPERA között:

Tulajdonság	SN-1987A	OPERA
Neutrínó	$\bar{\nu}_e$	ν_μ
E_ν	10 MeV	17 GeV
Közeg	vákuum	szikla

Naív ellenvetés: GPS-hiba

R.A.J. van Elburg, arXiv:11102685v3

GPS-műhold 20 e km magasan 3900 m/s sebességgel mozog a CERN – LNGS vonalon, akkor relativisztikus időrövidülés miatt a felszíni megfigyelőhöz képest 32 ns-mal kevesebbet mér. Két irányban az éppen 60 ns.



Telekürtölte a világsajtót, pedig marhaság:

- 31 műhold mozog mindenféle irányban, ez legfeljebb kiszélesítené a spektrumot.
- A műholdakat 1-2 ns pontossággal egymáshoz hangolják, ez nem volna lehetséges a relativisztikus hatás elhanyagolása mellett.
- 32 ns hiba 10 m-t jelentene, annál a hadászati GPS, amelynek vevőjében atomóra van, akár OPERÁ-nál, sokkal pontosabb.
- A GPS-műhold időjelét még ált. relativitáselméletre is korigálják, és a Föld középpontjához rögzített inerciarendszerben számol.

Naív ellenvetés: óracipelés

Atomórák összehangolása odavitellel nem jó:

- Gyorsítás–lassítás: spec. rel.
- Fel-le utaztatás: ált. rel.

De: az órákat nem cipelték, GPS-sel folyamatosan szinkronizálták őket

Komoly ellenvetés: fékezési sugárzás

Andrew G. Cohen and Sheldon L. Glashow:

Fénynél gyorsabb neutrínó gyenge kh-ban e^+e^- párokat
keltve gyorsan elveszti az energiáját.

$E(\nu_\mu) > 12.5 \text{ GeV}$ nem érkezhethet meg Gran Sasso.

Viszont a Szuperkamiokande látott a Földet átszelt

$E(\nu_\mu) \sim 1 \text{ TeV}$ neutrínókat, az IceCube pedig

$E(\nu_\mu) \sim 10 \dots 100 \text{ TeV}$ felfelé menőket.

Ez megerősíti az SN1987A megszorítást és ellentmond az
OPERÁ-nak.

Komoly ellenvetés: ν_μ tachion?

Tachion: hipotetikus, félynél gyorsabb részecske,
kisebb energia \Rightarrow nagyobb sebesség
fénysebesség végtelen energiánál

Ha igaz OPERA: $E_\nu \sim 15 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta t = -60 \text{ ns}$, akkor
SN1987A neutrínóira (17 MeV) $\Delta t = -137000 \text{ év}$.

Ha minden neutrínó ugyanannyit siet, kellene látni 4,2 évvel
korábban SN1987A neutrínóit.

Ha mégsem, nagyon különböző a tömegük, nem
oszillálhat $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

A tachionnal egyébként is bajok vannak (azon kívül, hogy nem léteznek):

Bemegy egy tachion a bárba. Azt mondja neki a pultos: *Téged nem
szolgállak ki!* Mire a tachion: *Miért, holnap kiszolgáltál!*

CNGS: rövid neutrínóimpulzusok

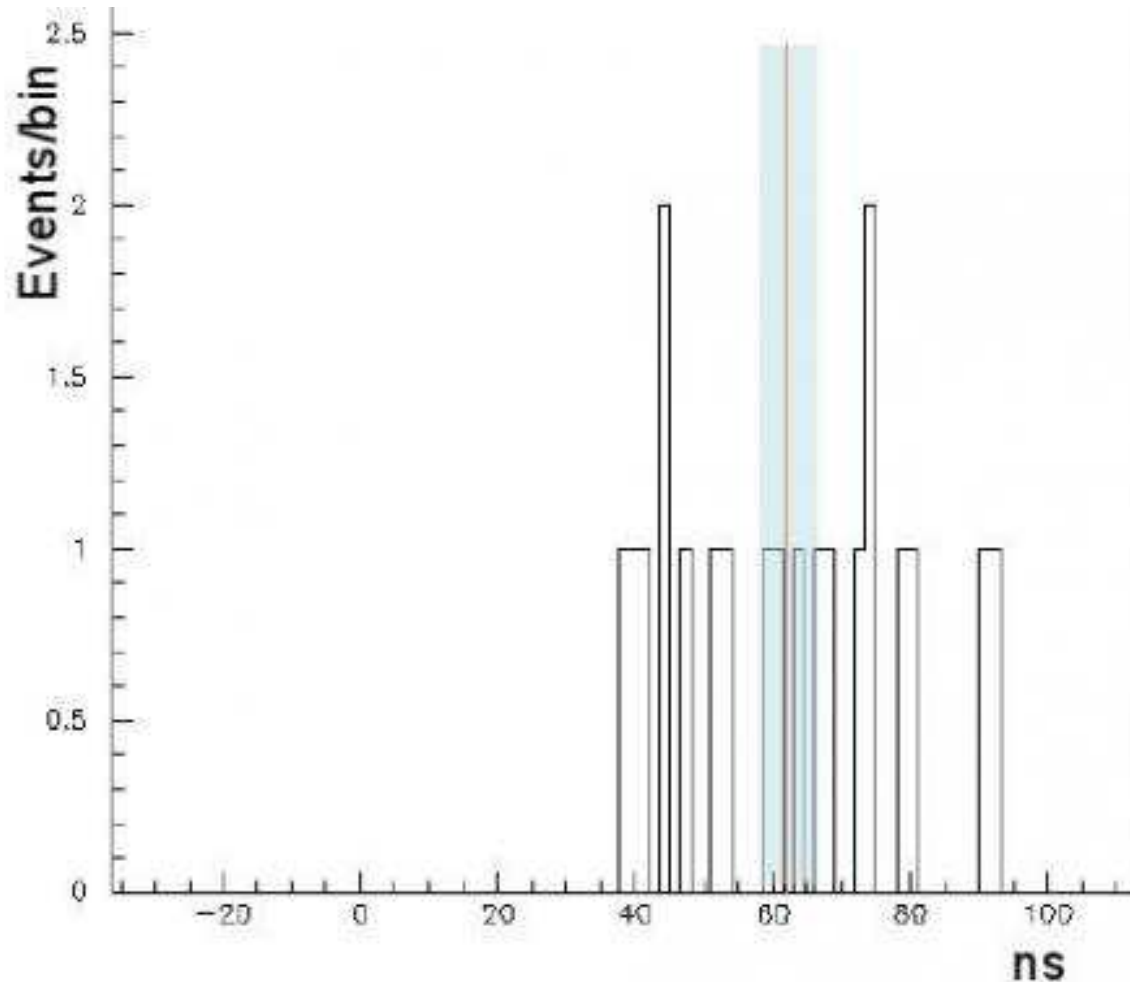
Kísérleti ellenvetés: $10.5 \mu\text{s}$ hosszú jelek
összehasonlításából 10 ns pontos késleltetés?

CNGS: 3 ns hosszú ν -impulzusok 524 ns távolságra



$10.5 \mu\text{s}, 50 \text{ ms} \Rightarrow 3 \text{ ns}, 524 \text{ ns}$

OPERA: 20 új neutrínó



2011 vége: 20 új neutrínó, korábbival egyező időzítés

OPERA Collaboration (T. Adam et al., 175 authors): arXiv:1109.4897

OPERA: a hiba

200 résztvevőből 15 nem adta nevét a cikk első változatához

Részben másik 10 nem szerző a beküldött cikkben

2012 március: hiba az OPERA-berendezésben!

8,3 km optikai kábel GPS-vevő és OPERA-óra között. Laza csatlakozást találtak, a szinkronjel $73,2 \pm 0,6$ ns-mal felgyorsult, amikor kihúzták és visszadugták. Kiderült, hogy 2006-ban is annyival gyorsabb volt.

2012 ápr.: Az OPERA két választott vezetője lemondott

Kísérleti ellenőrzés, 2012

Az OPERA szinkronizációs hibáját megerősítette két másik Gran Sasso-i kísérlet

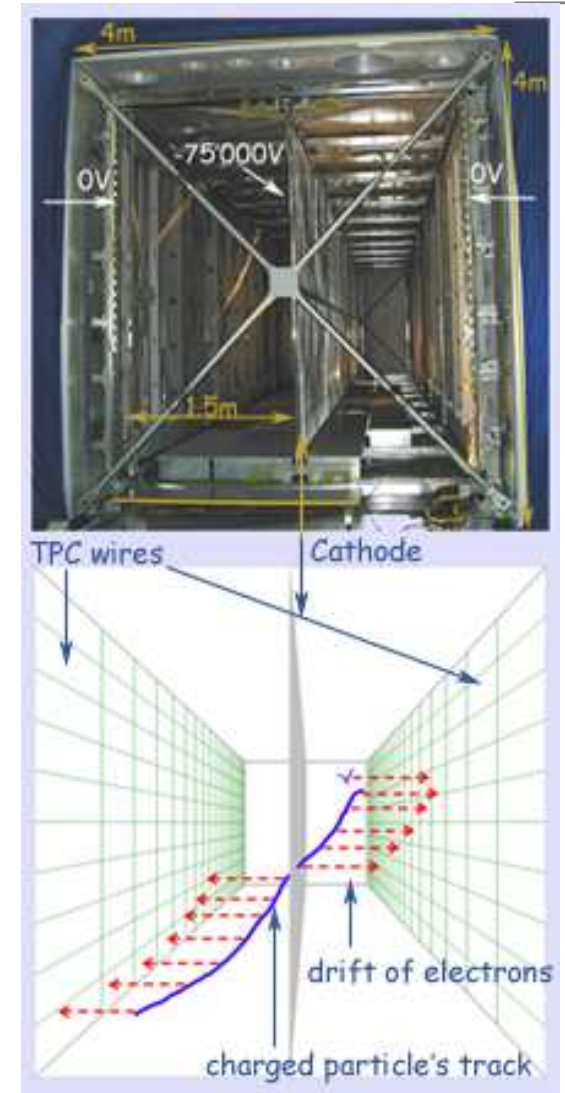
LVD (Large Volume Detector): összehasonlította a vízszintesen repülő, mindkét detektort átszelő kozmikus müonok beérkezési idejének különbségét: 2008 előtt és 2012-ben 73 ± 9 ns-mal hosszabb volt, mint 2008-2011-ben.

LNGS: ICARUS-kísérlet

Imaging Cosmic And Rare Underground Signals

Két 279 m³-es LAr kaloriméterből álló neutrínódetektor Gran Sasso-ban

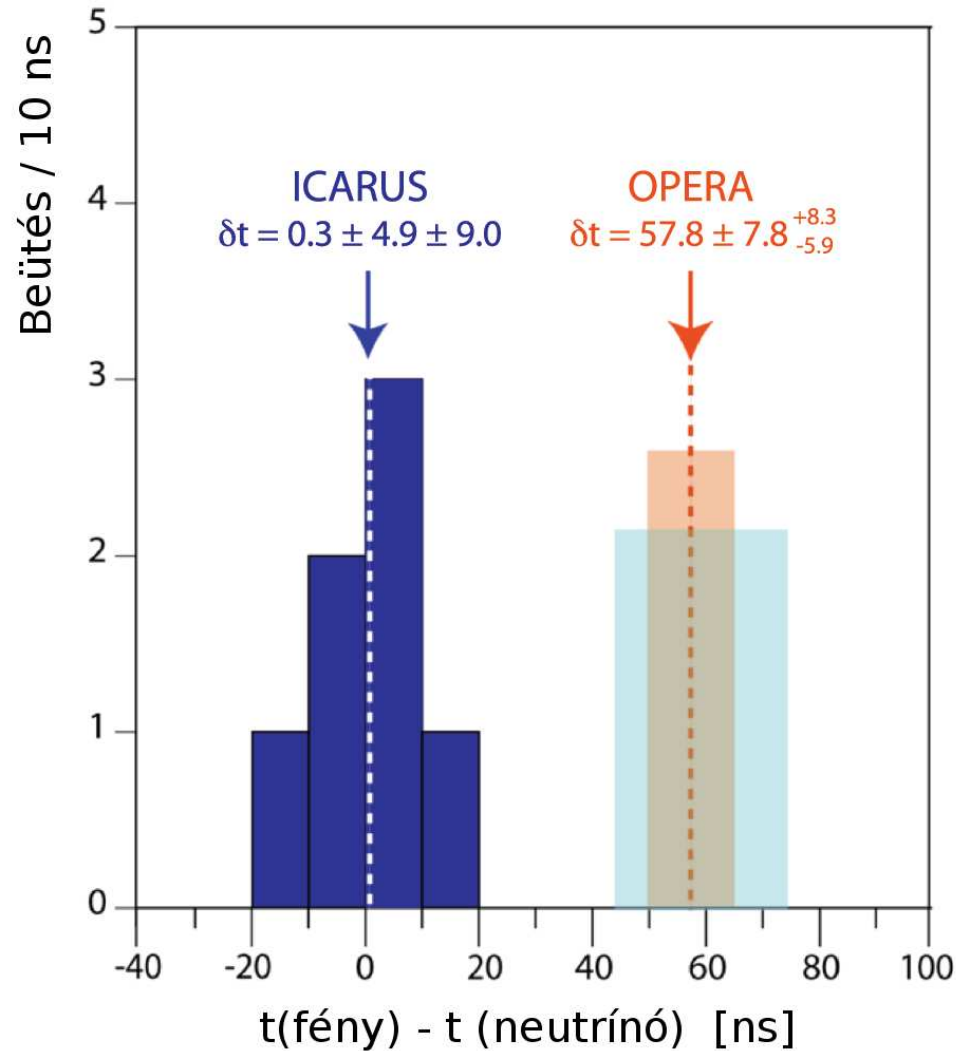
Sem torzulás az E_ν eloszlásban, sem Cohen-Glashow-féle fotonok vagy e^-e^+ párok.



ICARUS: 2 modul

$3.6 \times 3.9 \times 19.9 \text{ m}^3$

ICARUS-kísérlet: időmérés



Az ICARUS nem látott korai neutrínót, amikor az OPERA igen.

Tanulság

- Nem kell a következtetéseket elkapkodni.
- Kritikusan kell viszonyulnunk a megrázó új felfedezésekhez.
- Kísérletezni kell, mert az esetleges hibás kísérlet is hasznos, előre viszi a tudományt:
 - felkelti az érdeklődést,
 - gondolkodásra serkent,
 - új ötleteket ad, és
 - vitát provokál.
- **A számítások nélküli spekuláció viszont haszontalan, mert kísérletileg nem ellenőrizhető.**

Köszönöm a figyelmet!

Mindannyitoknak

normális sebességű neutrínókkal
teli^a tavaszt és nyarat kívánok!

^aEz biztosan teljesül majd, megígérhetem!