

Ultragyors neutrínók

Wigner FK SZFI szeminárium, 2012 jan. 10.

Horváth Dezső

MTA Wigner FK RMI^a, Budapest

és MTA ATOMKI, Debrecen

^aMár 10 napja!



Vázlat

- Az 1987A szupernova neutrínói.
- Földi nagy távolságú kísérletek.
- A MINOS kísérlet.
- CNGS és OPERA.
- A távolság mérése.
- Az idő mérése.
- Ellenőrzés.
- Lehetséges buktatók...



Apropó

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

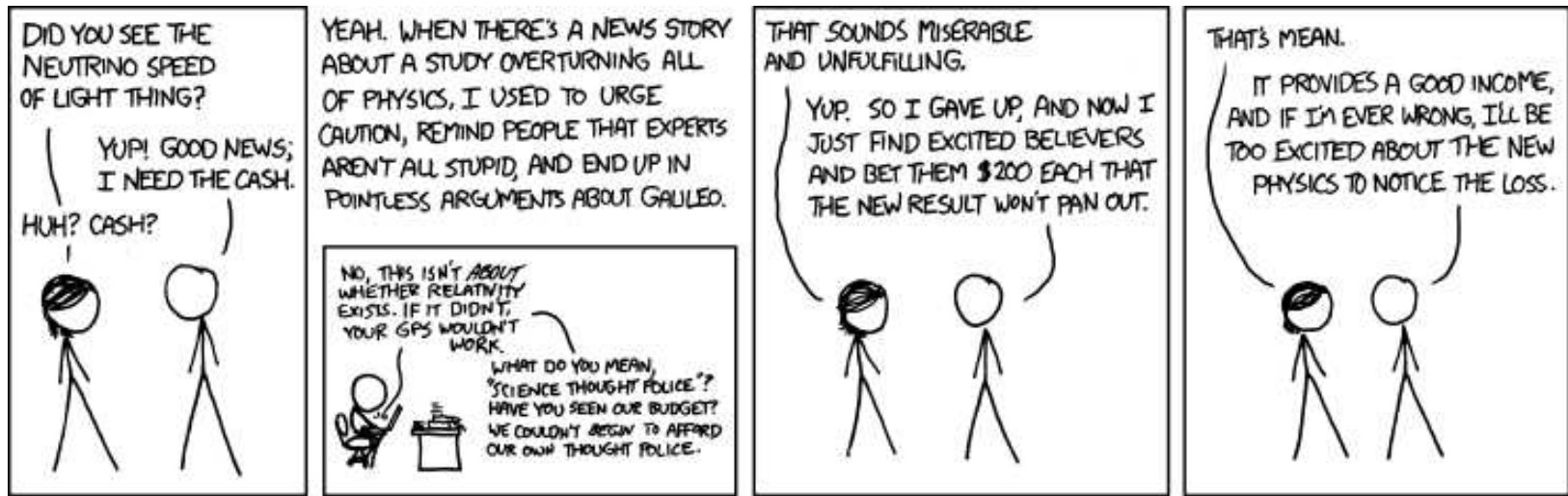
Szkeptikusak vagyunk, amikor a fizika eddig ismert törvényszerűségeinek ellentmondó jelenséget fedeznek fel, különösen, amikor kiszivárogtatással kezdődik.

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

Rolf-Dieter Heuer (DG of CERN): „I agreed to the seminar at CERN because it is the duty of a lab like CERN to give the collaboration the possibility to ask the community for scrutiny of their findings.”



Szkeptikusak vagyunk...



<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.

Rengeteg a neutrínó-kísérlet!



Bányában, alagútban, víz és jég alatt, reaktorok közelében

SN 1987A: ν -zápor

D.N. Schramm, J.W. Truran, Phys. Repts. 189 (1990) 89.

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

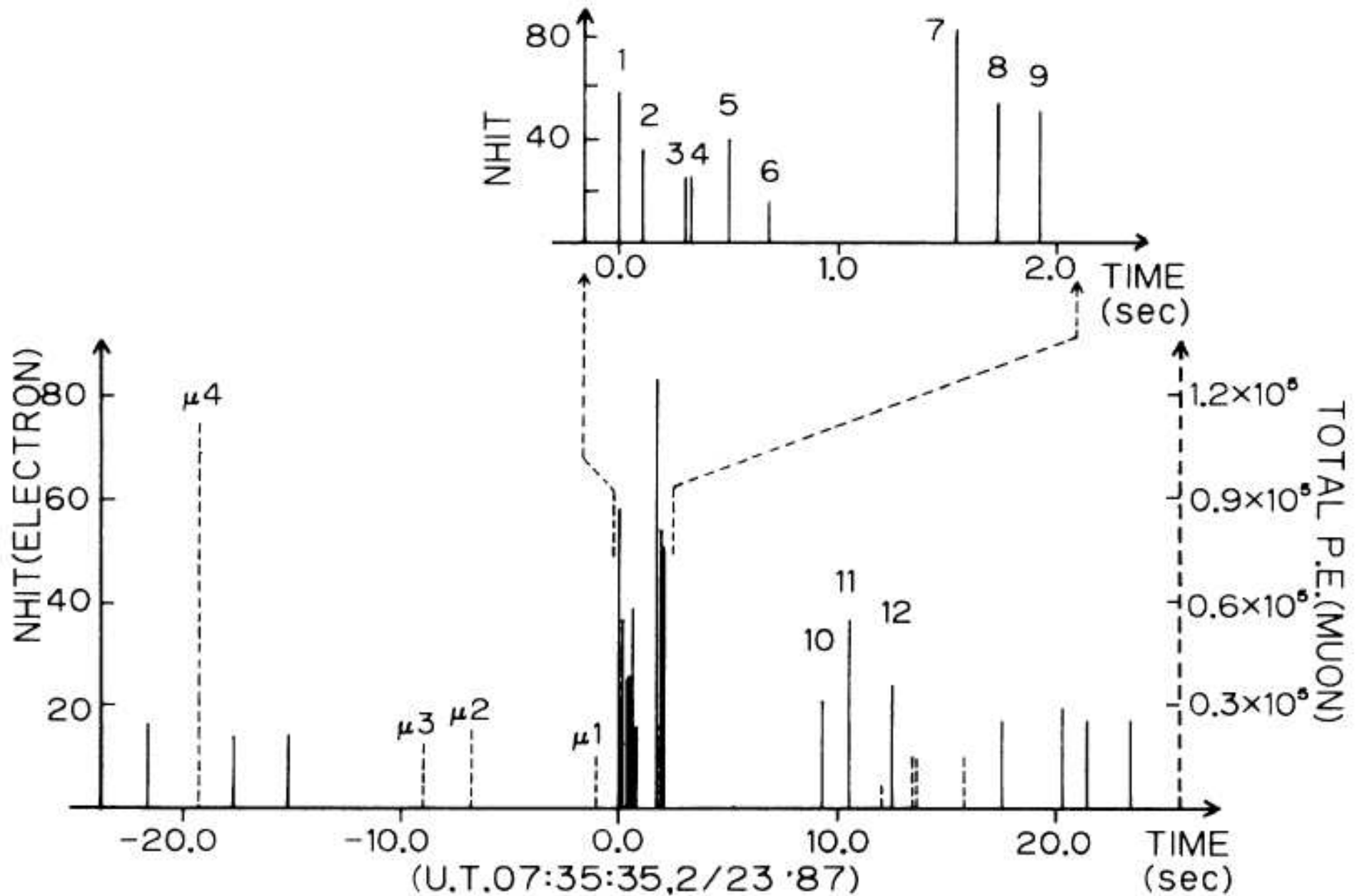
$\langle E_\nu \rangle \sim 10 \dots 15$ MeV.

Kamiokande: 2140 tonna \rightarrow 11 beütés várható

Neutrínóészlelés 1987 febr. 23-án:

- 2h52', Kamiokande, 2,14 kt: 1 ν (7 MeV) / 10 s (tipikus háttér)
- 2h52', IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven), 6 kt: 0 ν
- 7h35', Kamiokande: 11 ν (7...35 MeV) / 13 s
- 7h35', IMB: 8 ν (20...40 MeV) / 4 s

SN 1987A: ν -zápor, Kamiokande



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:

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



SN 1987A: fényhozam

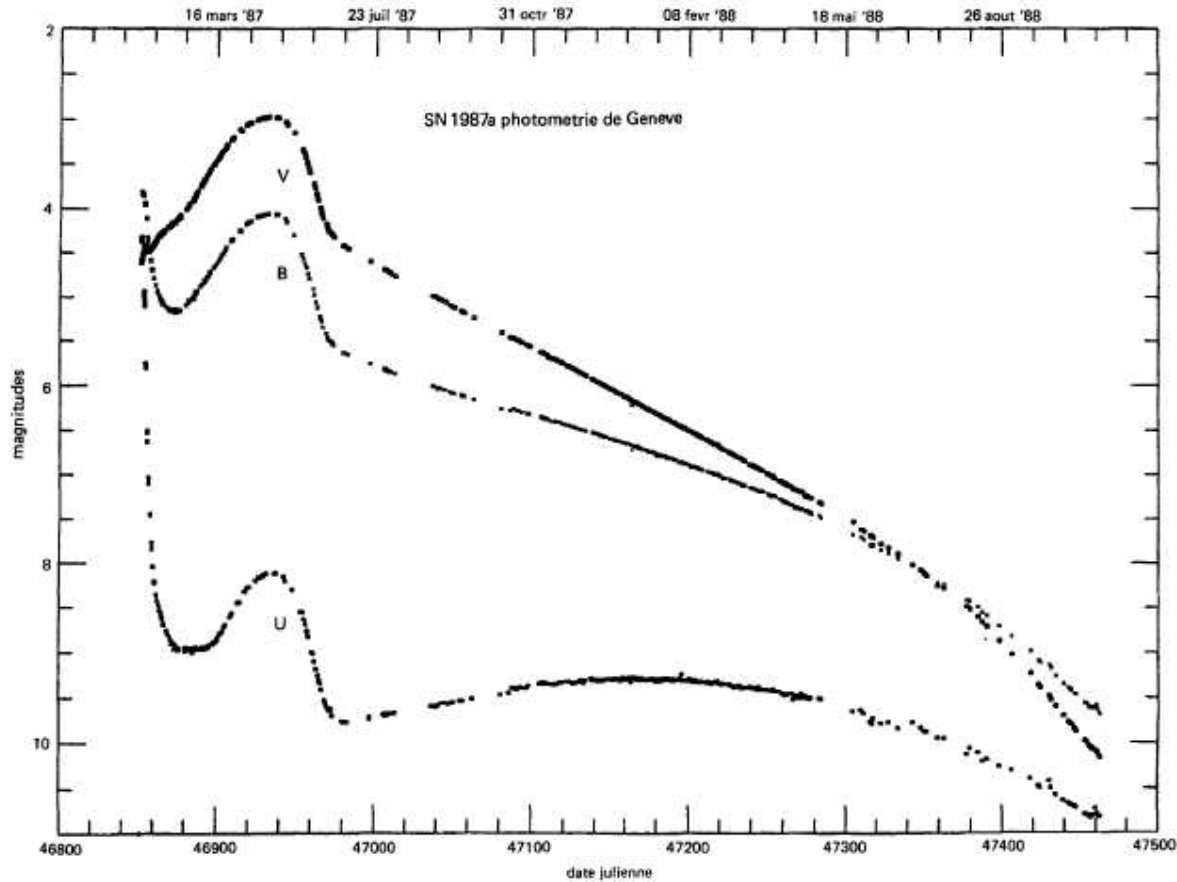


Fig. 4. Visual light curve of Supernova 1987A.

D. N. Schramm and J. W. Truran, *New physics from Supernova 1987A*

101

OPERA müon-neutrínói korábban ($2.5 \Rightarrow 2.37$):
 $2.4 \times 10^{-5} \times 168000 \sim 4 \text{ év}$

SN 1987A: kozmikus ν -zápor korábban?

4-5 évvel korábban Kamiokande nem működött

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

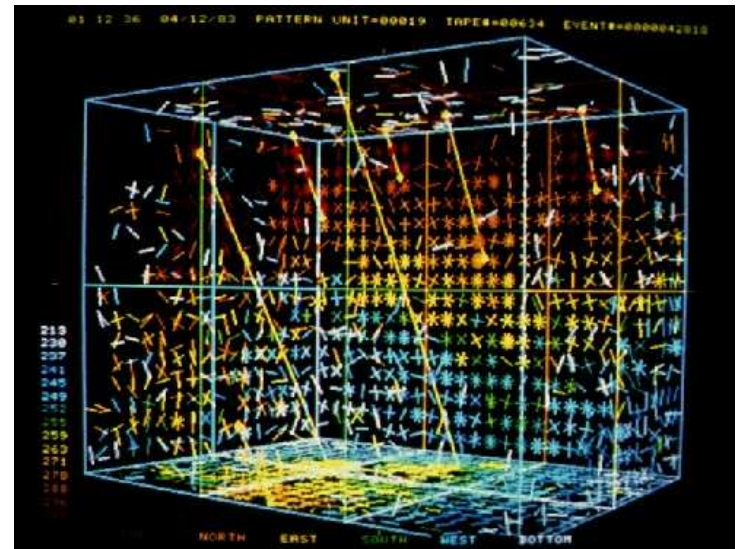
Baksan szcintillátor-teleszkóp (SzU)

- 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

oszcilláció vizsgálatára

$$pA \rightarrow \pi^\pm X \quad \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu; \quad \mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_\mu \nu_e$$

$L \sim 1 \dots 1000$ 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 termékek 4π -be.

\sim tiszta ν_μ nyaláb .

Neutrínó-oszcilláció: elv

Oszcilláció különböző tömegállapotok között

Szabad részecskére nem lehetséges (?)

Ha megmarad a p lendület ($\hbar = 1$; $c = 1$)

$$E_2 - E_1 = \sqrt{p^2 + m_2^2} - \sqrt{p^2 + m_1^2} \approx p \left[1 + \frac{m_2^2}{2p^2} - \left(1 + \frac{m_1^2}{2p^2} \right) \right] = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p} \equiv \frac{\delta m^2}{2p}$$

Ha megmarad az E energia:

$$p_2 - p_1 = \sqrt{E^2 - m_2^2} - \sqrt{E^2 - m_1^2} = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E} \equiv \frac{\delta m^2}{2E}$$

A neutrínó relativisztikus, a nyugalmi tömege nagyon kicsi:

$$E_\nu \approx p_\nu$$

Neutrínó-oszcilláció: frekvencia

Szabad neutrínó tere: $e^{-ip \cdot x}$ síkhullám
Tömeg változása \Rightarrow fázis

A fázisváltozás az E energiájú neutrínó keltése és elnyelődése közötti
 t idő alatt, $L \approx ct$ távolságon:

$$\delta(p \cdot x) = \delta(Et - \underline{p} \cdot \underline{x}) \approx \frac{\delta m^2 t}{2E} \approx \frac{\delta m^2 L}{2E}$$

Oszcillációhoz kölcsönhatás vagy határozatlansági reláció

Légkörben pion- és müonbomlás:

$$\delta p_\nu \approx 10^{-12} \text{ eV} \ll \Gamma_\pi \approx 10^{-8} \text{ eV} \text{ vagy } \Gamma_\mu \approx 10^{-10} \text{ eV}$$

Határozatlanság *belefér*

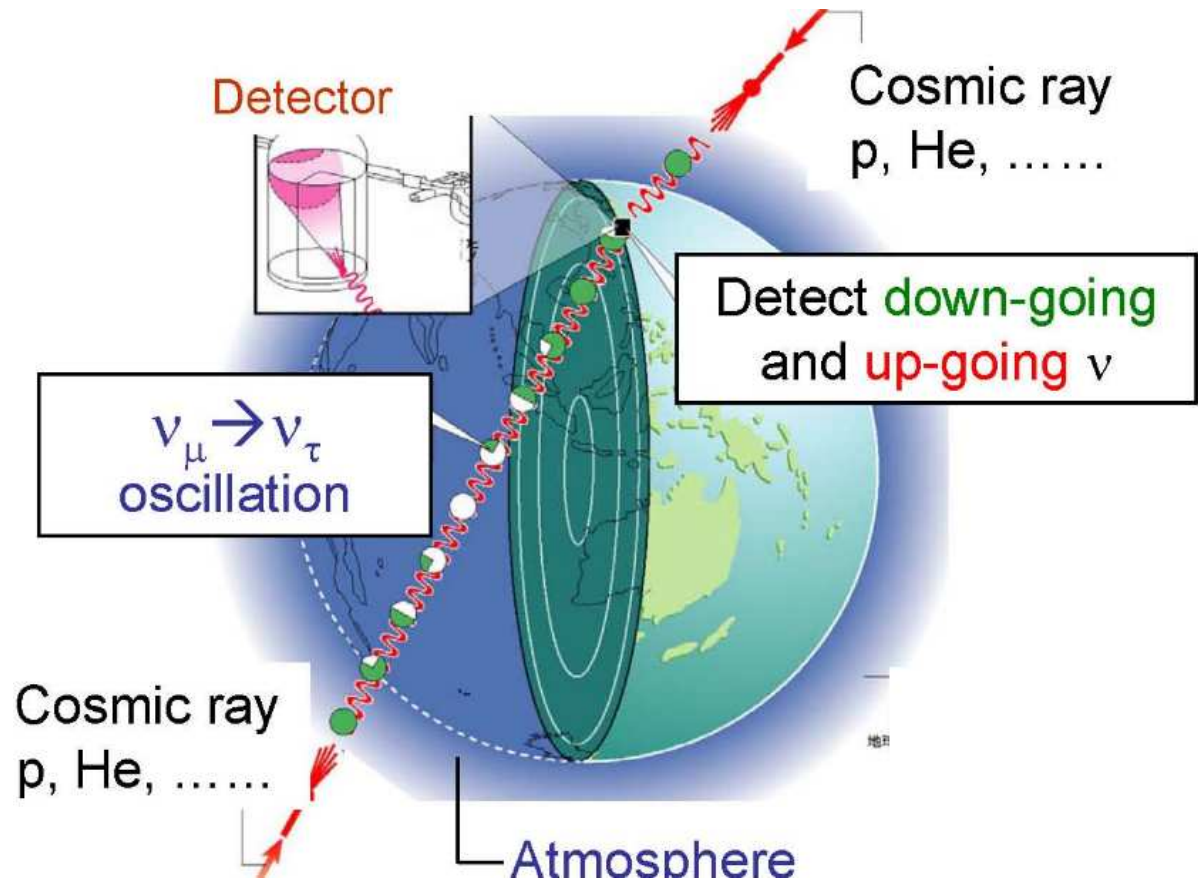
Napban, Földben kölcsönhatás is lehetséges

SKK: légköri neutrínók

Sok-GeV-es
műon-neutrínókra

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

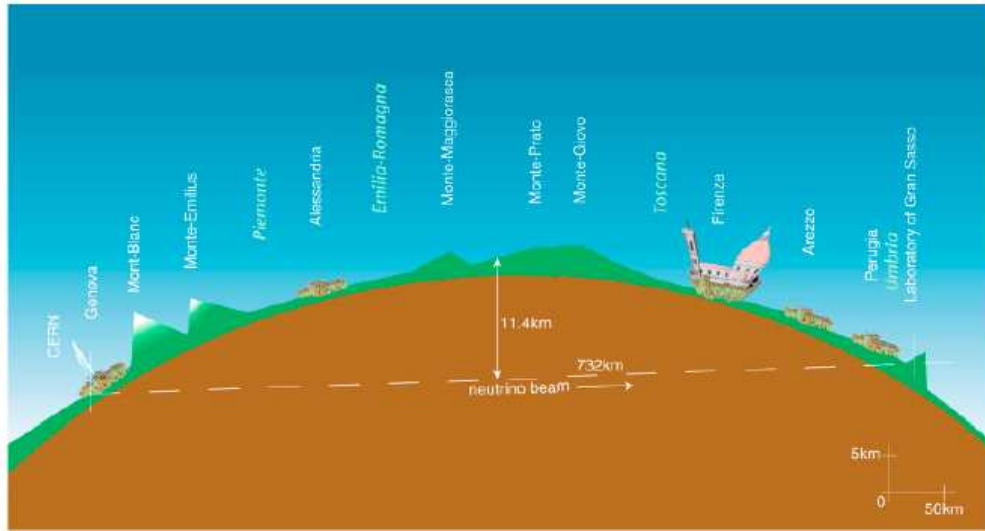
Föld átmérőjén



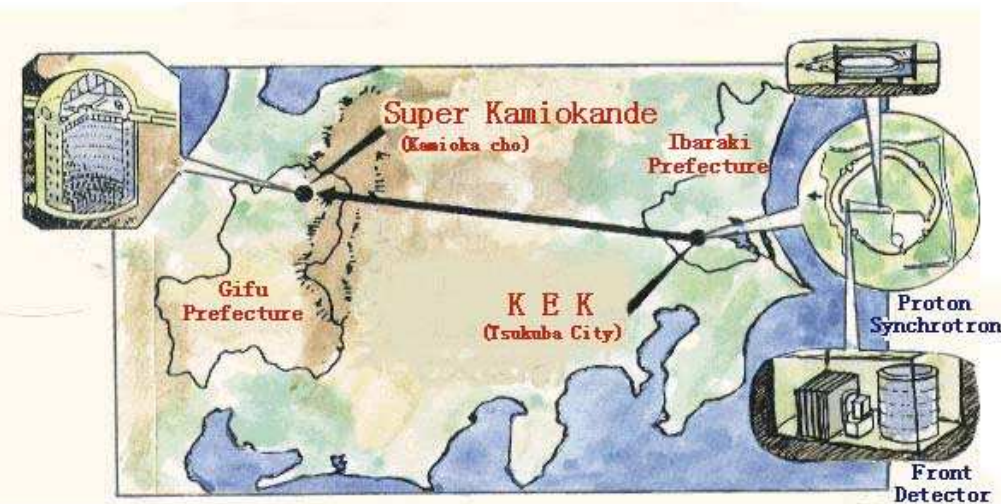
$$\text{Fluxus föl/Fluxus le} = \frac{N(-1,0 < \cos \Theta < -0,2)}{N(0,2 < \cos \Theta < 1,0)} = 0,54 \pm 0,04$$

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

Nagy távolságú gyorsítós kísérletek



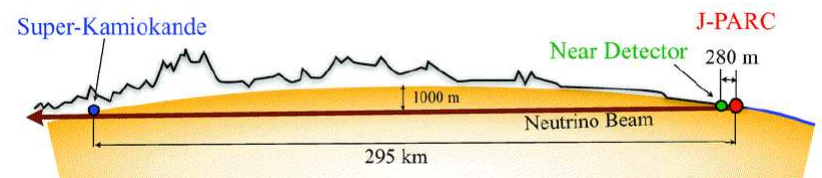
CNGS: CERN → Gran Sasso:
OPERA, 732 km



K2K: KEK → Kamioka: 250 km



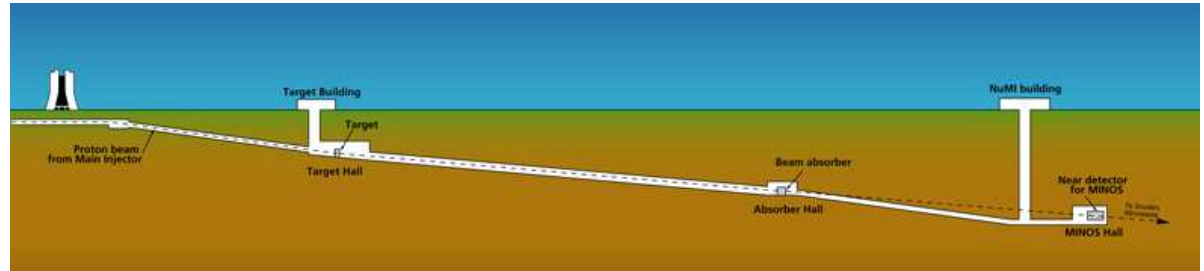
Fermilab → MINOS: 735 km



T2K (Tokai → Kamioka): 295 km

A MINOS-kísérlet

Main Injector Neutrino Oscillation Search



NUMI → MINOS Near Detector

Hasonló vas + szcinti kaloriméterek

Near Detector (980 tonna):

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

↓ 734 km ↓

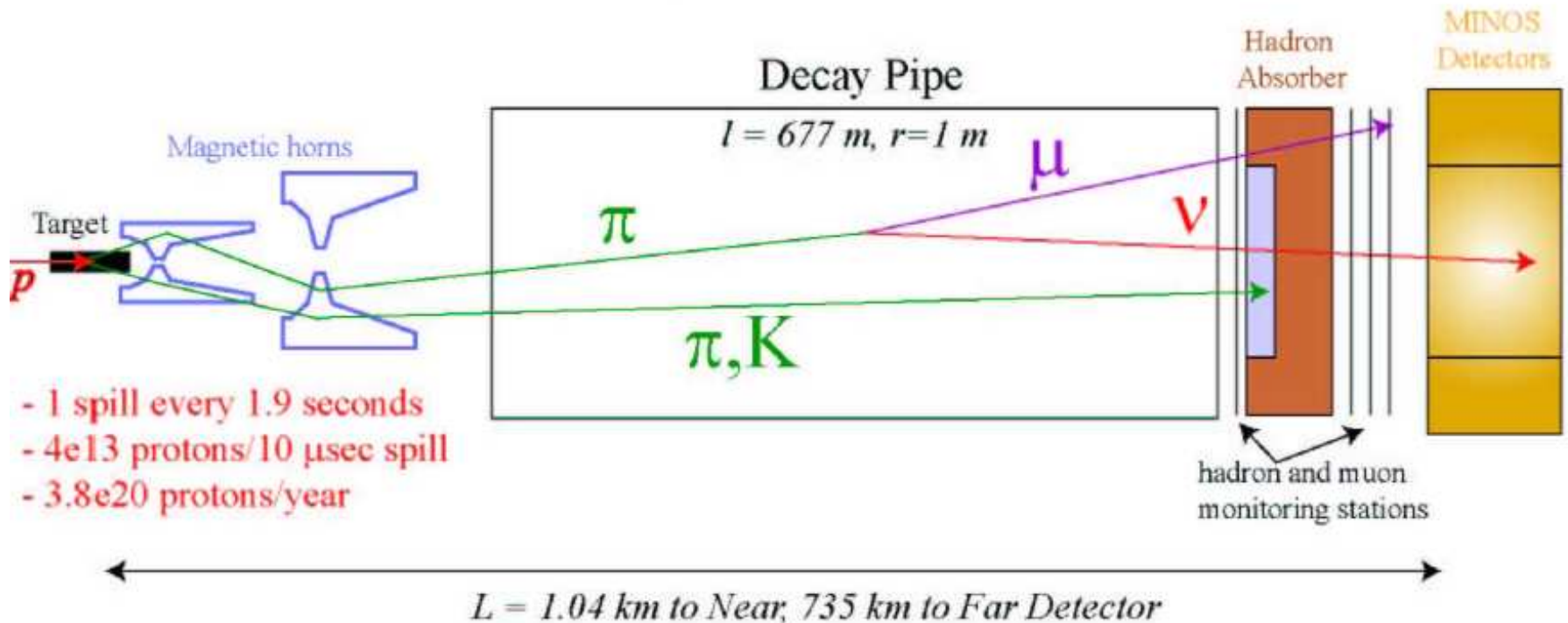
Far Detector (5400 t): $\sim 60\% \nu_\mu$

NuMI ν -nyaláb

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

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
- Near detector: 1040 m, far detector: 735 km

A MINOS időmérése

ND \leftrightarrow FD távolság:

$$\Delta L = 734298.6 \pm 0.7 \text{ m}, \Delta t = 2449356 \pm 2 \text{ ns}$$

Időmérés indul: protonok kivonó mágnes ($t_0 \pm \sim 1 \text{ ns}$)

Protoncsomagok: 5 v. 6 csomag, $9.7 \mu\text{s}$ hossz / 2,2 s

Pionbomlás 675 m-en, müonok azonosítása és elnyeletése

$$1.6 \times 10^6 \text{ ND-}\nu_{\mu}, 473 \text{ FD-}\nu \text{ (258 } \nu_{\mu}, \bar{\nu}_{\mu}\text{)}$$

Órák szinkronizálása GPS vevővel: $\pm 100 \text{ ns}$ jitter

Időkülönbség mérése a neutrínók beérkezése között:

események legkorábbi szcintijele

Nem ugyanazok a neutrínók!

$$t_1 = t_{ND} - t_0 - t_{DN}; \quad t_2 = t_{FD} - t_0 - t_{DF}$$

t_{DF}, t_{DN} (GPS, kábeles, elektronikus) késleltetés

A MINOS időmérése: eloszlás

Egyedi események mérési pontossága < 10 ns.

Pontosság: $\sigma_t(\text{ND}) = 18.8$ ns; $\sigma_t(\text{FD}) = 1.6$ ns

Legnagyobb sziszt. hiba: FD — GPS kábel (46 ns)

Teljes sziszt. szórás: 64 ns.

Ha $P_1^n(t_1)$ a neutrínók érkezési eloszlása ND-ben a MI $n = 5$ és $n = 6$ csomagos üzemében, akkor a FD-ben várható eloszlás

$$P_2^n(t_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int \exp -\frac{(t_2-t')^2}{2\sigma^2} P_1^n(t') dt'$$

($\sigma = 150$ ns az ND+FD korrelálatlan időbizonytalanság)

MINOS: ν -észlelések időbeli eloszlása

Kétféle üzemmód: 5 és 6 protoncsomag / spill

P. ADAMSON *et al.*

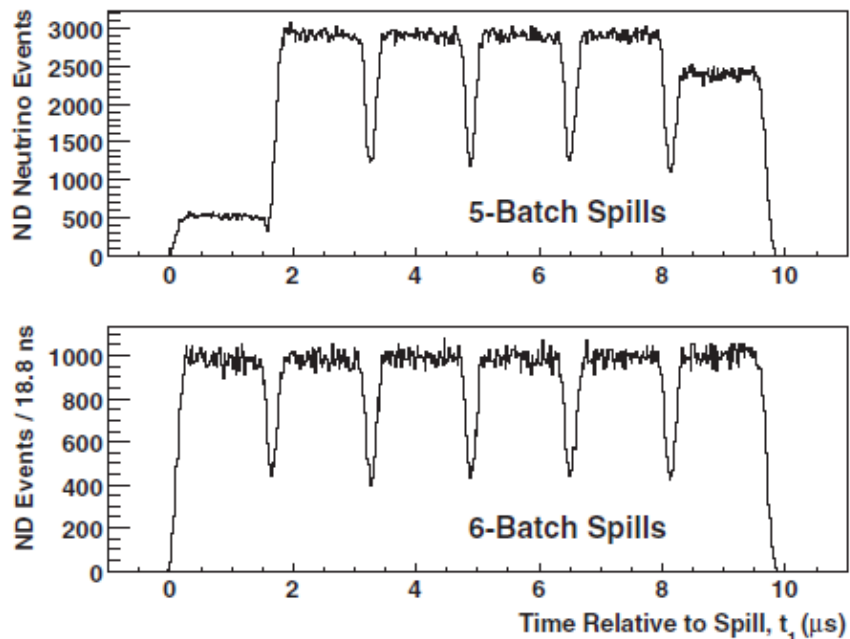


FIG. 1. Neutrino event time distribution measured at the MINOS near detector. The top plot corresponds to events in 5-batch spills $P_1^5(t_1)$ while the bottom plot corresponds to 6-batch spills $P_1^6(t_1)$.

Near Detector
(data)

PHYSICAL REVIEW D 76, 072005 (2007)

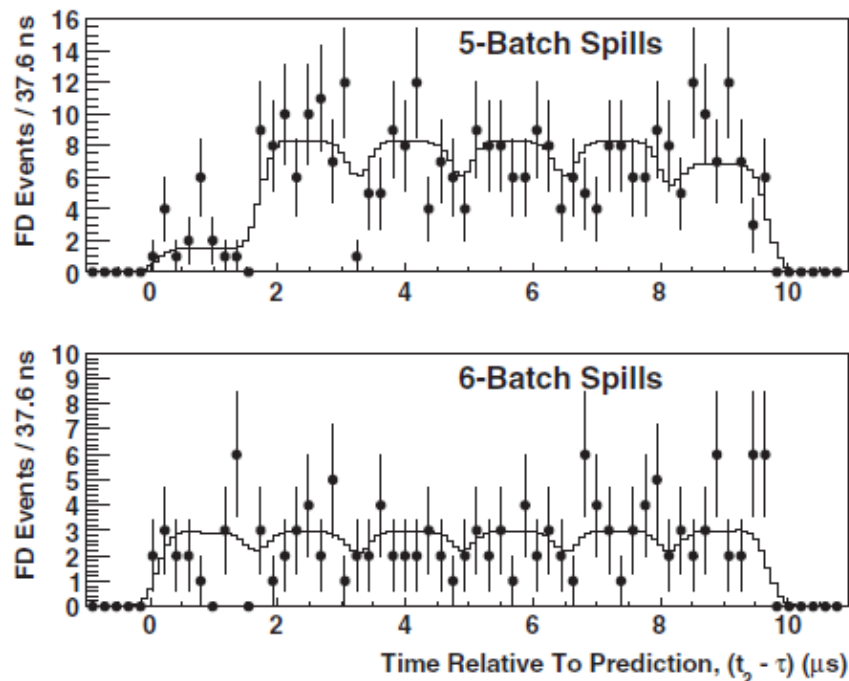


FIG. 2. Time distribution of FD events relative to prediction after fitting the time of flight. The top plot shows events in 5-batch spills, the bottom 6-batch spills. The normalized expectation curves $P_2^5(t)$ and $P_2^6(t)$ are shown as the solid lines.

Far Detector
(data + MC after fitting the time)

A MINOS időmérése: eredmény

δ eltérés a várt τ repülési időtől

$L = \sum_i \ln P_2(t_2^i - \tau - \delta) = \text{maximum}$
az összes FD-eseményre összegezve.

ν átlagos beérkezési ideje:

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

Relatív sebességkülönbség:

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

1.8σ különbség, nem szignifikáns

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

CNGS → OPERA: Infóforrások

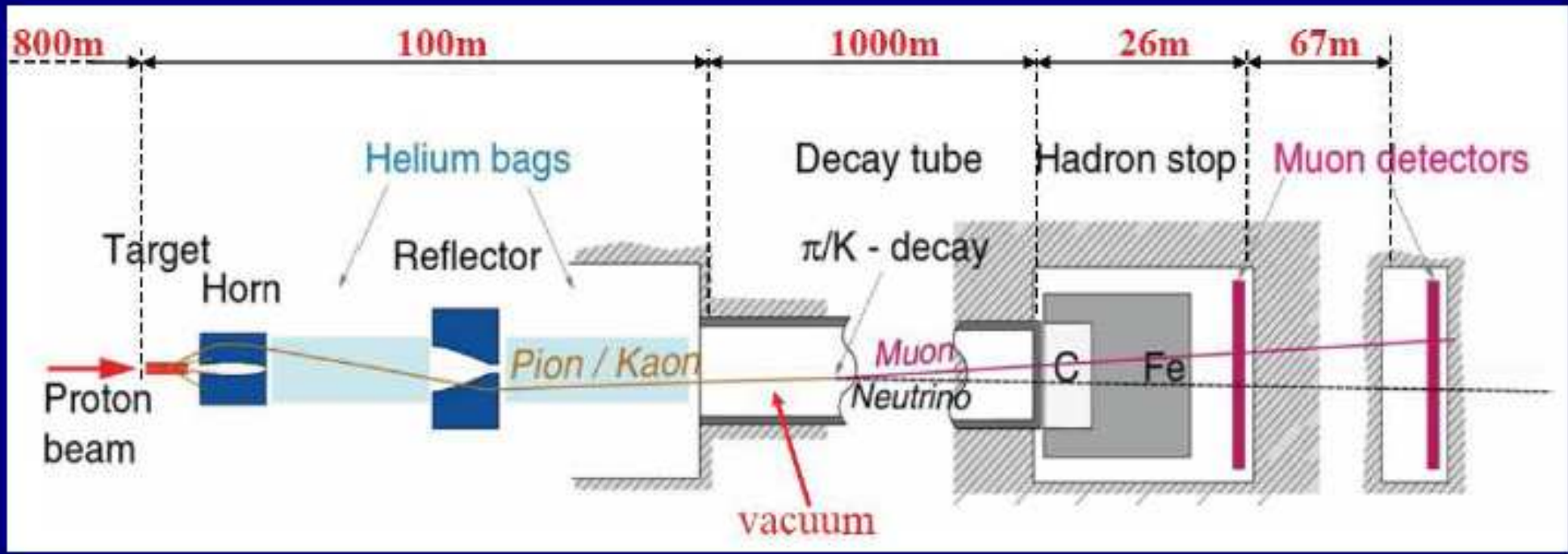
Dario Autiero előadása, CERN, 2011.09.22

T. Adam *et al.* (OPERA Collaboration),
„Measurement of the neutrino velocity with the OPERA
detector in the CNGS beam,”
[arXiv:1109.4897 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1109.4897).

Rengeteg (százezres!) újságcikk és blog
Motto: „Nothing travels faster than light but gossip!”

180 komoly fizikai publikáció hivatkozta, főként elméleti

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.

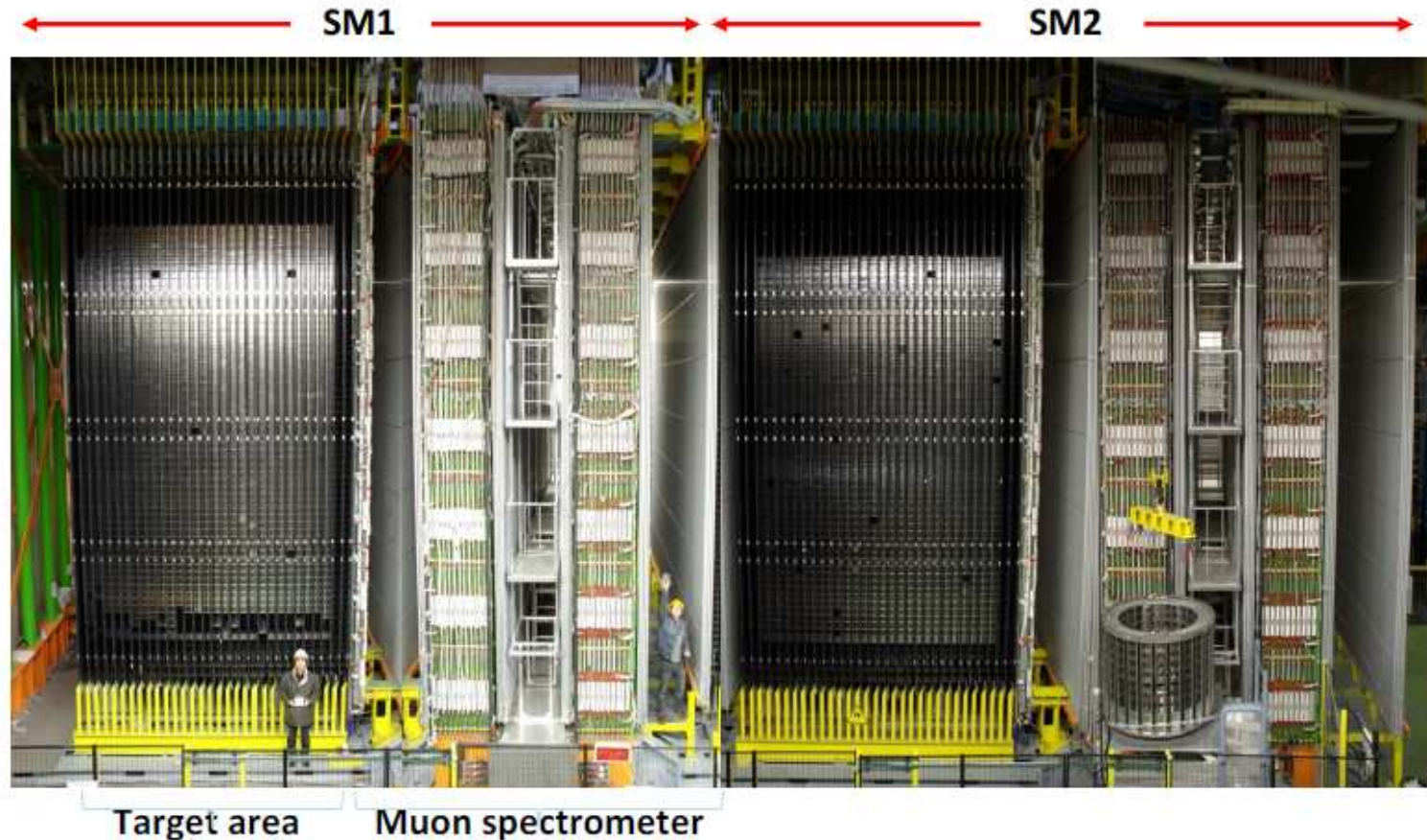
Müon bomlás előtt lelassul, $\mu \rightarrow e \nu_\mu \nu_e$ neutrínói szétszóródnak

Csak müon-neutrínó megy előre, müon elnyelődik útközben.

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

Az OPERA-kísérlet

Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus



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

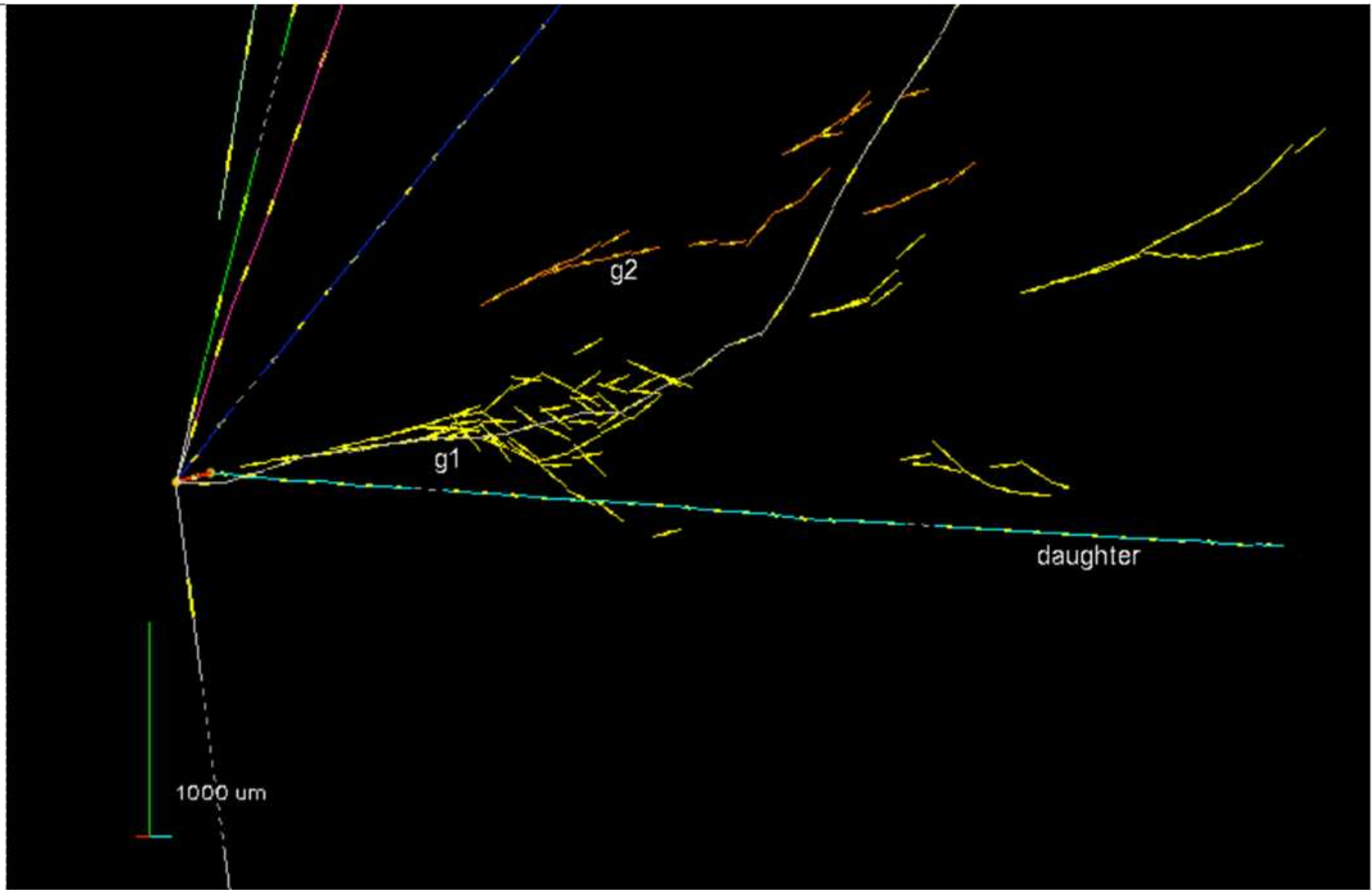
Blokk: ólomlemez + fotoemulzió + szcintillátor-hodoszkóp

2 supermodul: 150000 blokk + mágneses spektrométer

Az OPERA-detektor Gran Sasso-ban



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



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

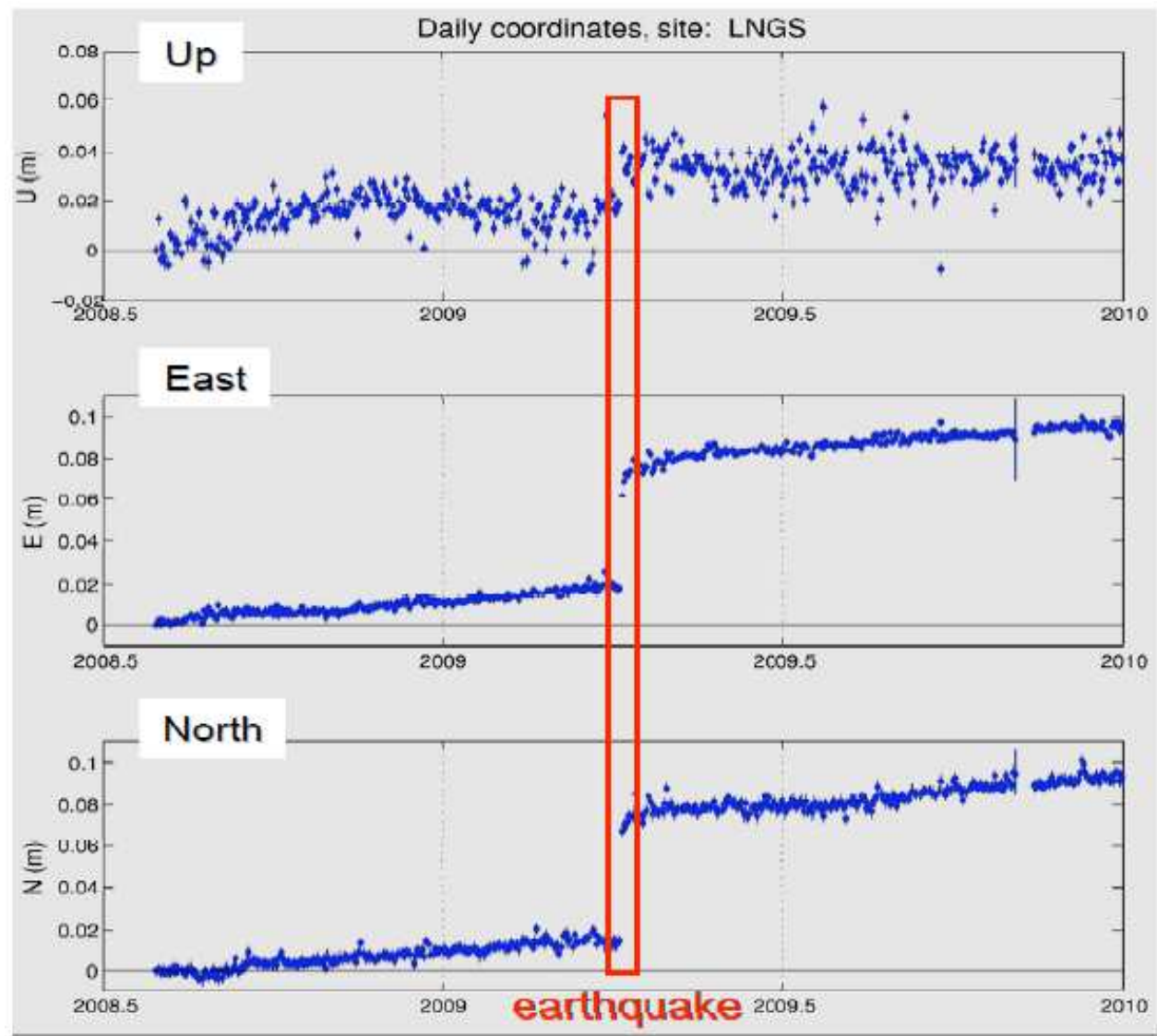
OPERA: folyamatos távolságmérés

2009-es
földrengés

Fel: 1 cm

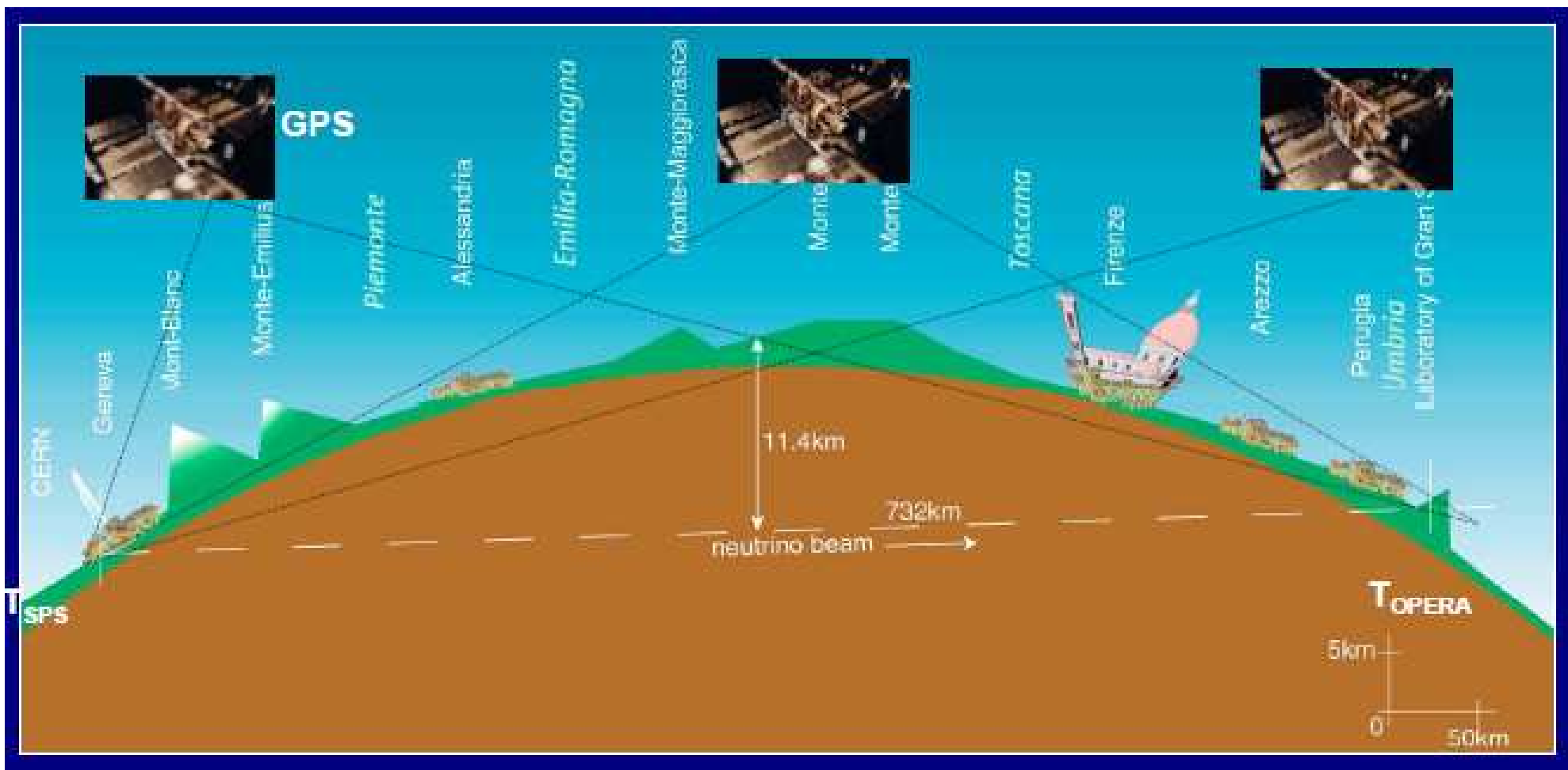
Keletre: 5 cm

Északra: 6 cm



Távolságmérés bizonytalansága: ± 20 cm

CNGS → OPERA időzítés: GPS

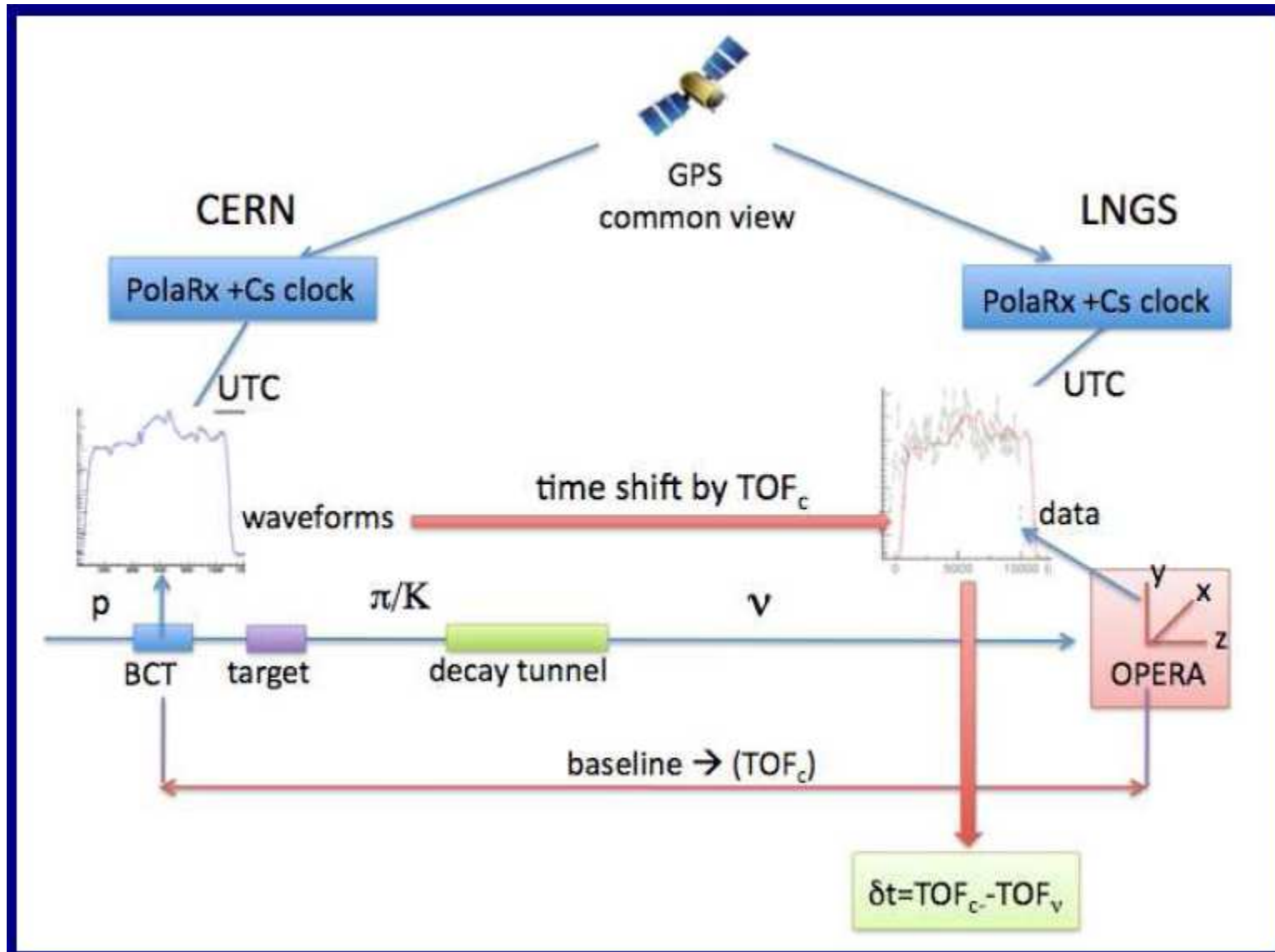


Időzítés proton-indítással:

$$|T(\text{OPERA}) - (T(\text{Kicker}) + T(\text{TOF}_c))| < 20\mu\text{s}$$

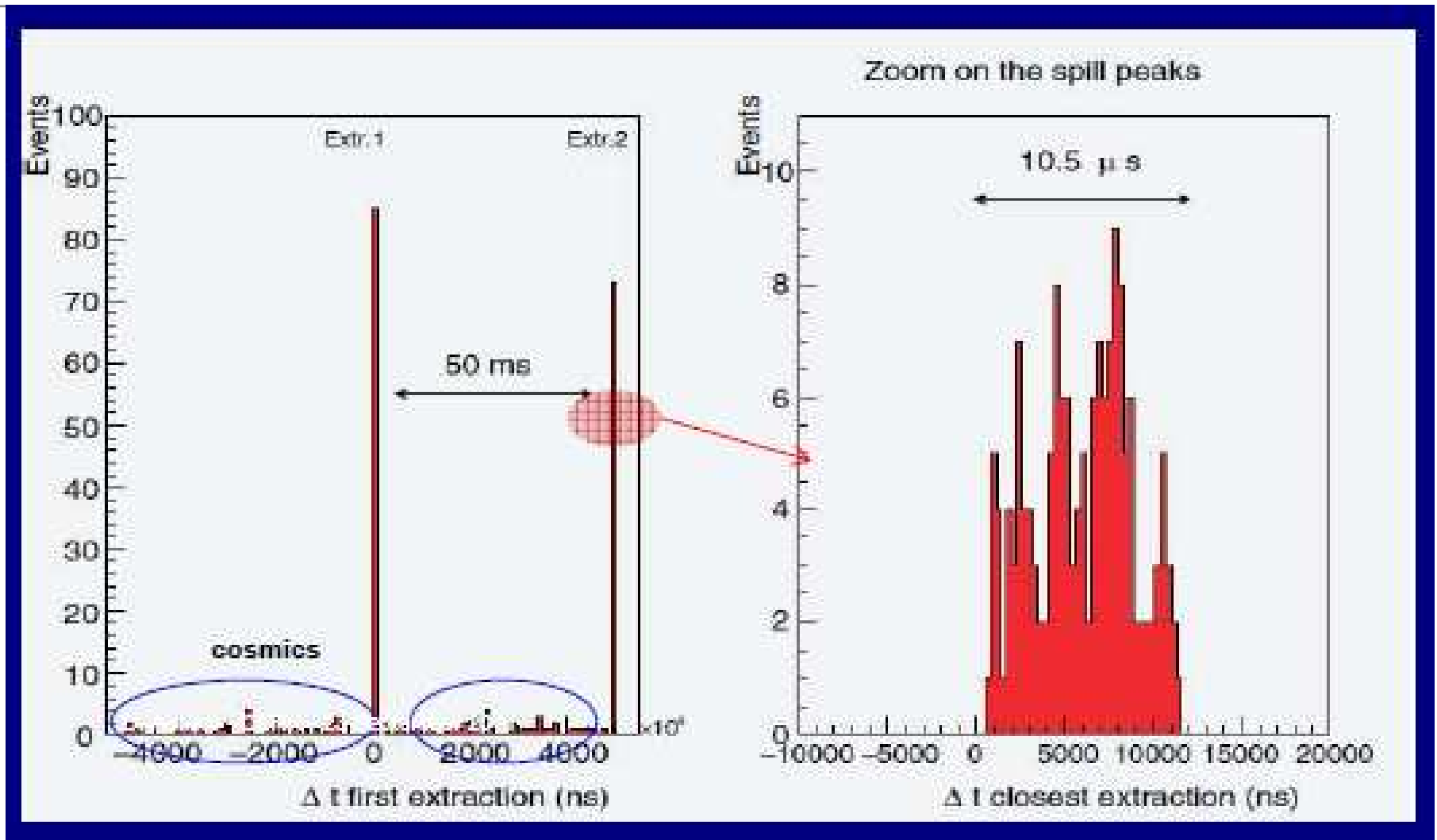
Szinkronizáció standard GPS-hez: ~ 100 ns Nem elég jó.

CNGS → OPERA időzítés



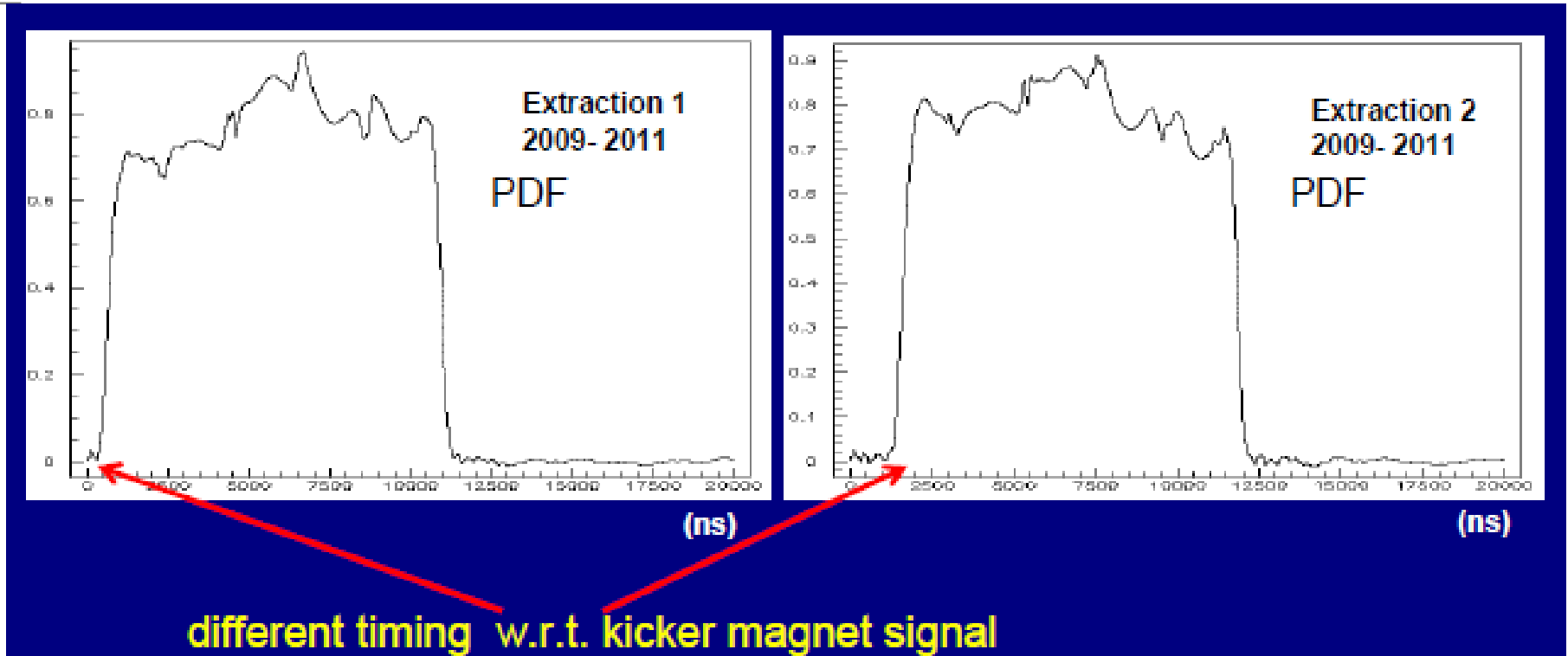
Cs atomórák mérnek, GPS közvetít és szinkronizál.

CNGS neutrínók érkezése OPERÁ-ba



SPS-ből 2 (10.5μ s széles) protoncsomag 50 ms távolságra

Proton- és ν -csomagok



SPS: 2 protoncsomag időzítése és eloszlása különböző

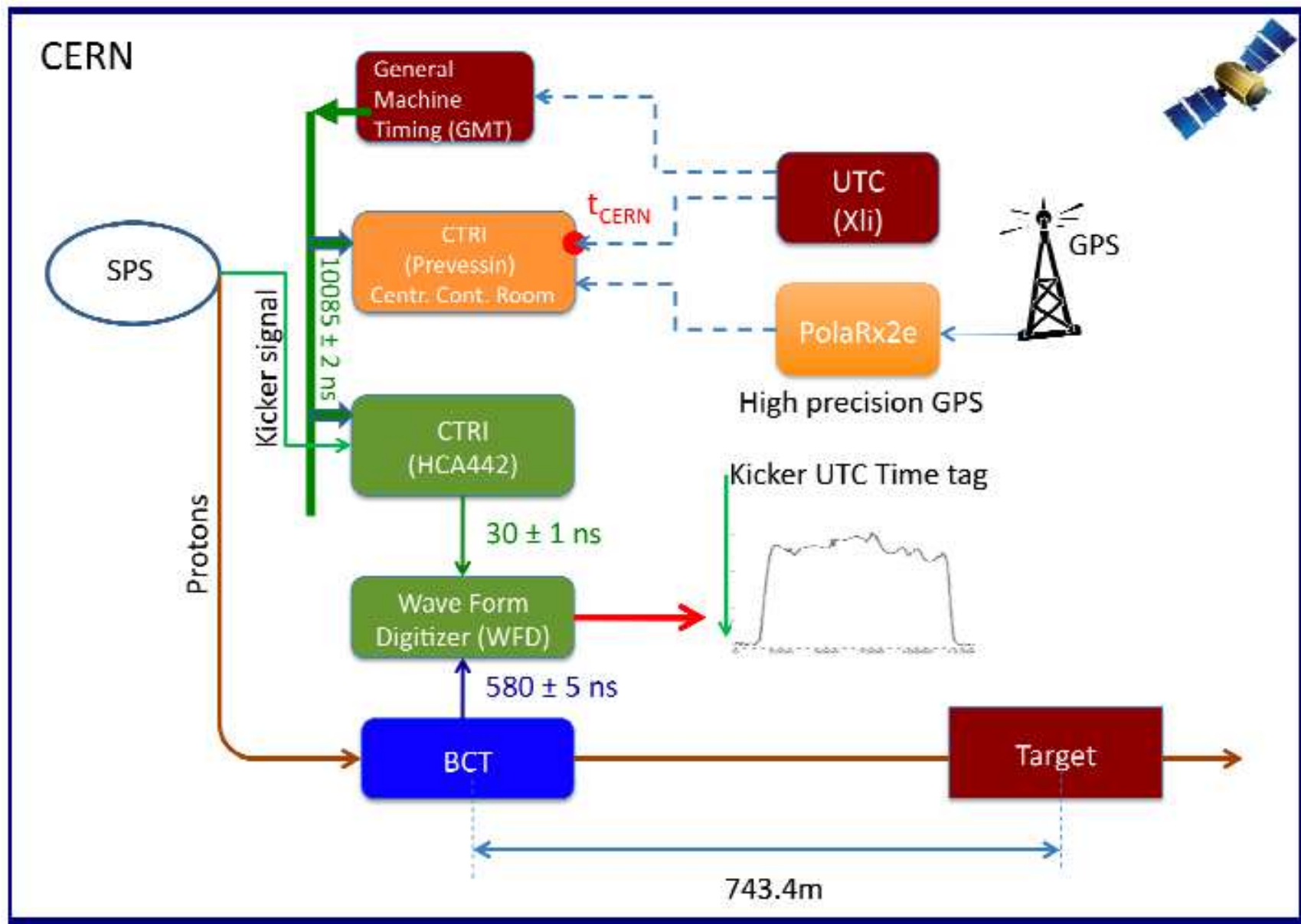
Neutrínó-indítás időzítése különböző.

MINOS: Near Detector (neutrínó) \Rightarrow

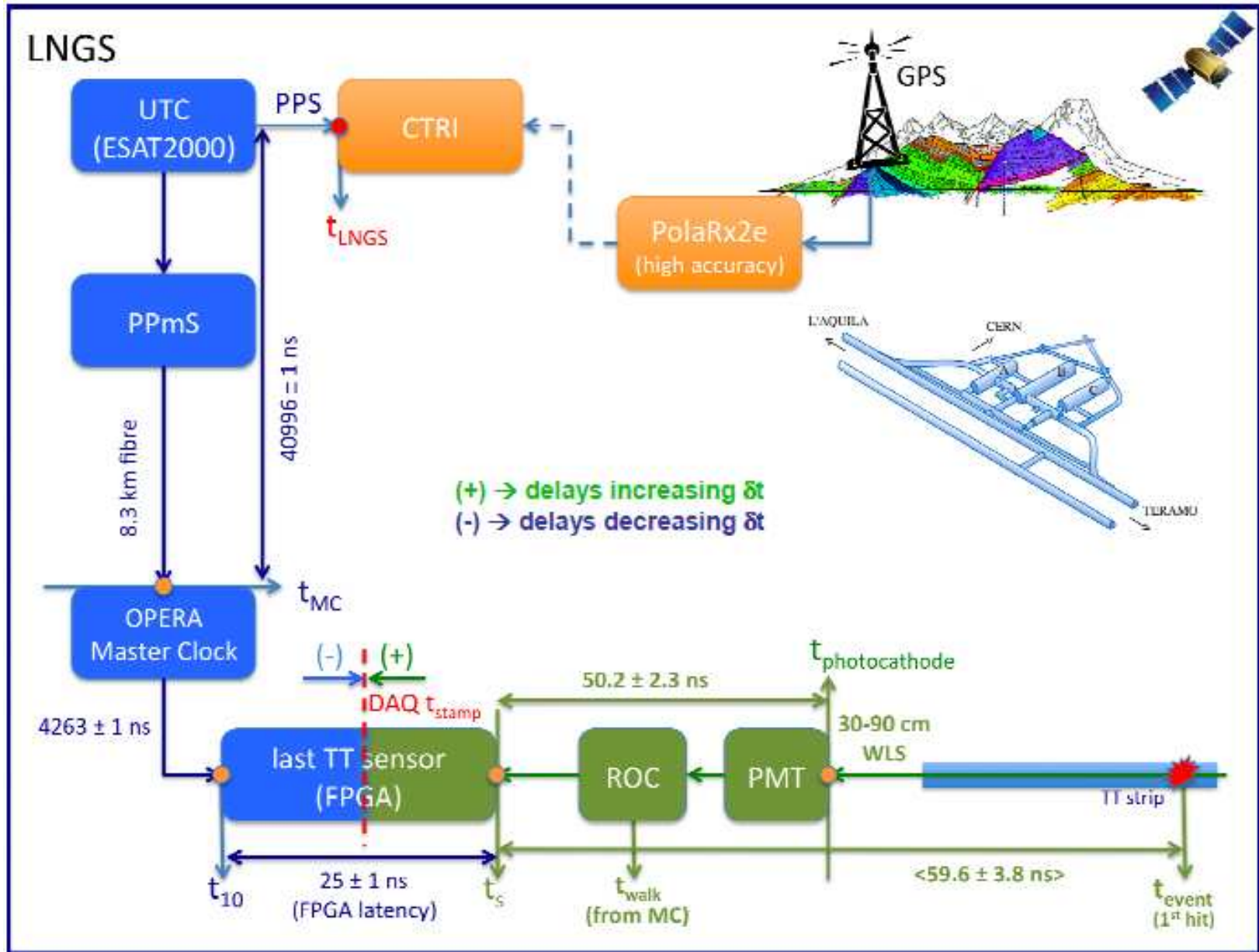
OPERA: kicker mágnes (proton)

Állandó CERN \leftrightarrow OPERA időkapcsolat (~ 1 ns)

OPERA: időmérés CERN-ben



OPERA: időmérés Gran Sasso-ban



Távolság- és időmérés hitelesítése

Távolságmérés:

European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)
(Eurázsiai földrészhez rögzített rendszerben)
Protontarget fókuszpontja \leftrightarrow 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: vak analízis

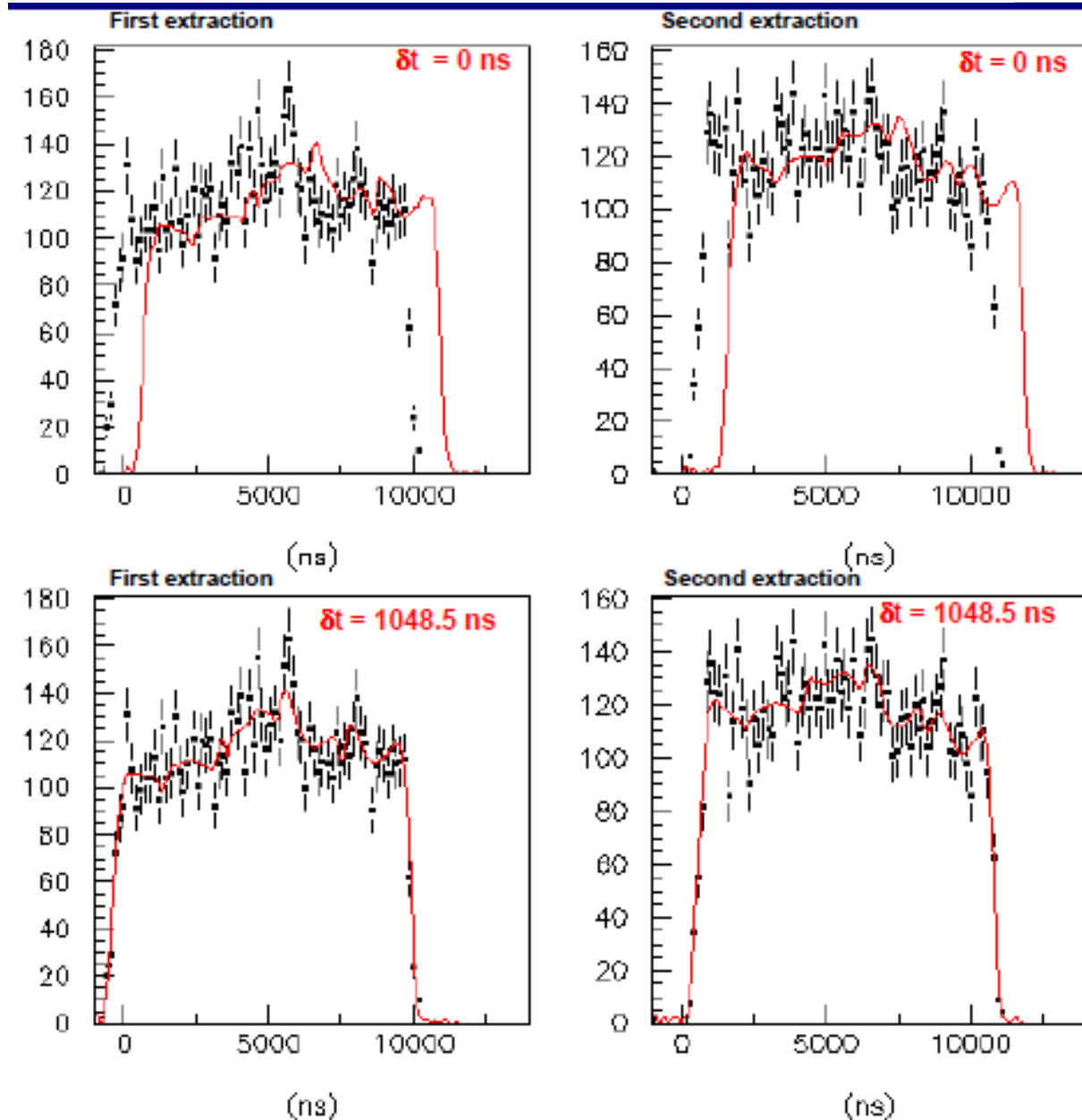
Illesztés előtt: $\delta t = 0$

Késleltetés illesztése:
 $\delta t = 1048.5$ ns

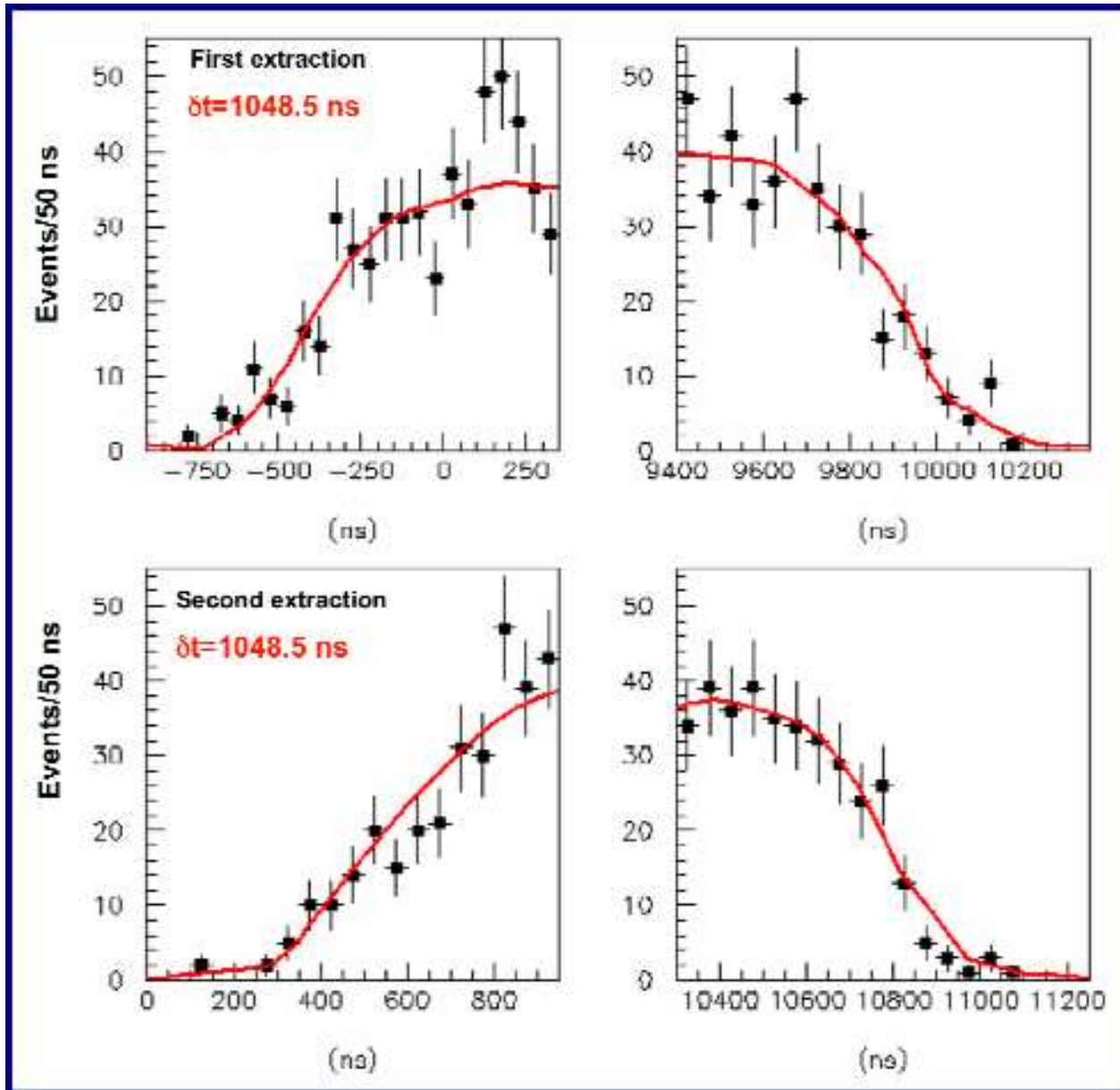
χ^2/df :

1.06 (1. protoncsomag)

1.12 (2. protoncsomag)



OPERA: időspektrum illesztése



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 cikk 1 hónap alatt a témában

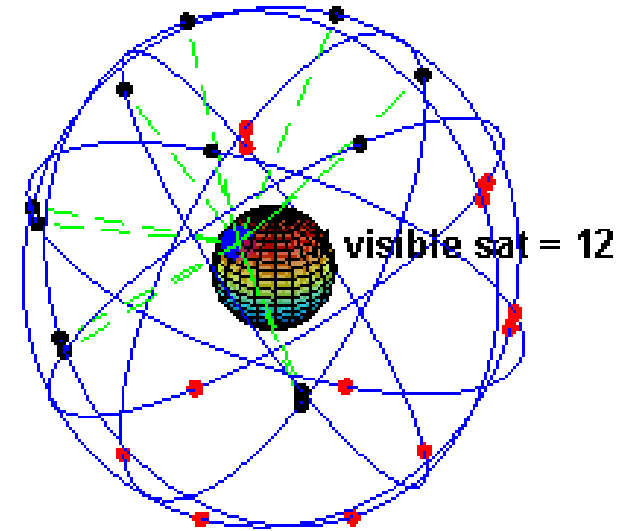
Rengeteg különbség SN-1987A és OPERA között:

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: órácipelés

Atomórák összehangolása odavittel nem jó:

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

De: GPS-sel folyamatosan szinkronizáltak

Komoly ellenvetés: fékezési sugárzás

Andrew G. Cohen and Sheldon L. Glashow:
Pair Creation Constrains Superluminal Neutrino
Propagation.

Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 181803

Fénynél gyorsabb neutrínó gyenge kh-ban e^+e^- párokat
keltve gyorsan elveszti az energiáját. $E(\nu_\mu) > 12.5$ GeV
nem érkezhethet meg Gran Sasso-ba.

Viszont a Szuperkamiokande látott a Földet átszelt
 $E(\nu_\mu) \sim 1$ TeV neutrínókat, az IceCube pedig
 $E(\nu_\mu) \sim 10 \dots 100$ TeV felfelé menőket. Ez megerősíti az
SN1987A megszorítást és ellentmond az OPERÁ-nak.

LNGS: ICARUS-kísérlet

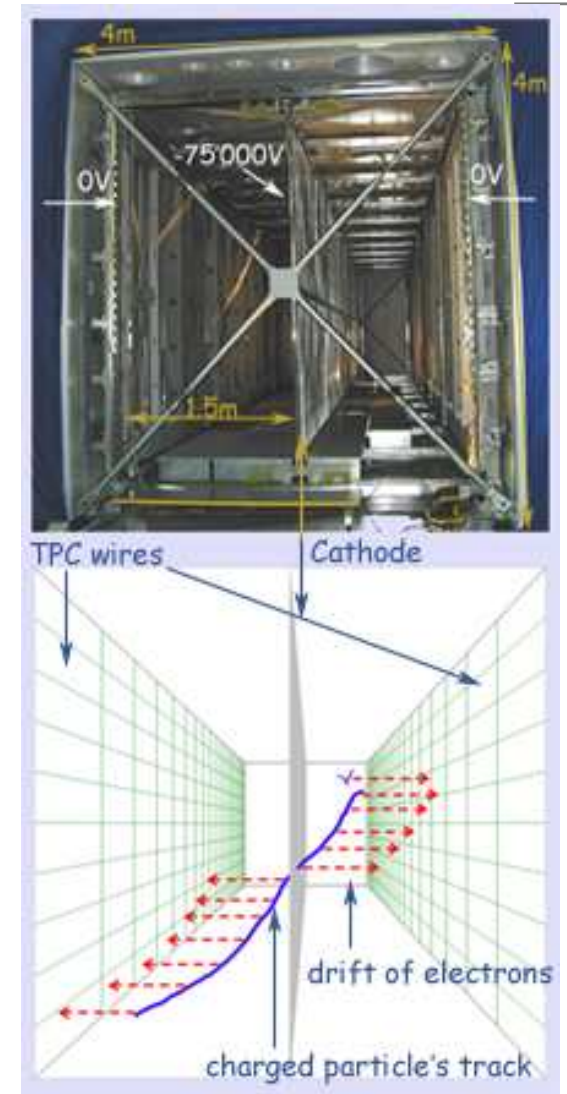
Imaging **C**osmic **A**nd **R**are **U**nderground
Signals

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

ICARUS Collaboration (M. Antonello et al.):
[arXiv:1110.3763v2](https://arxiv.org/abs/1110.3763v2)

*A search for the analogue to Cherenkov
radiation by high energy neutrinos at
superluminal speeds in ICARUS*

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



ICARUS: 2 modul

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

Komoly ellenvetés: ν_μ tachion?

Daniele Fargion, Daniele D'Armiento:
Inconsistence of super-luminal Opera neutrino speed with
SN1987A neutrinos burst and with flavor neutrino mixing
arXiv:1109.5368

Tachion: fénynél gyorsabb részecske,
kisebb energia \Rightarrow nagyobb sebesség

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

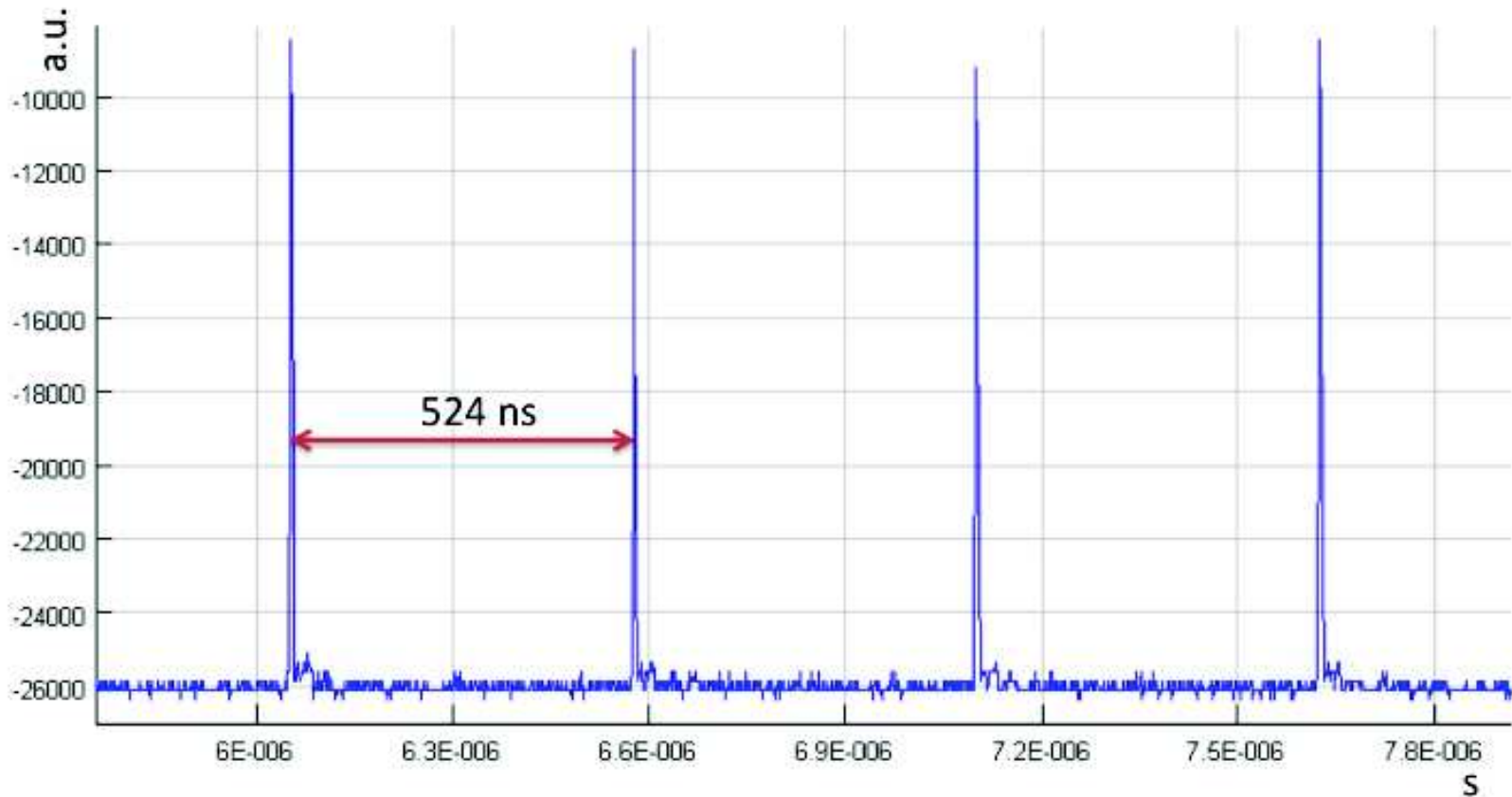
Ha minden neutrínó éppen ennyit siet, kellene látni 4,2
évvel korábban SN1987A neutrínóit.

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

CNGS: rövid neutrínóimpulzusok

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

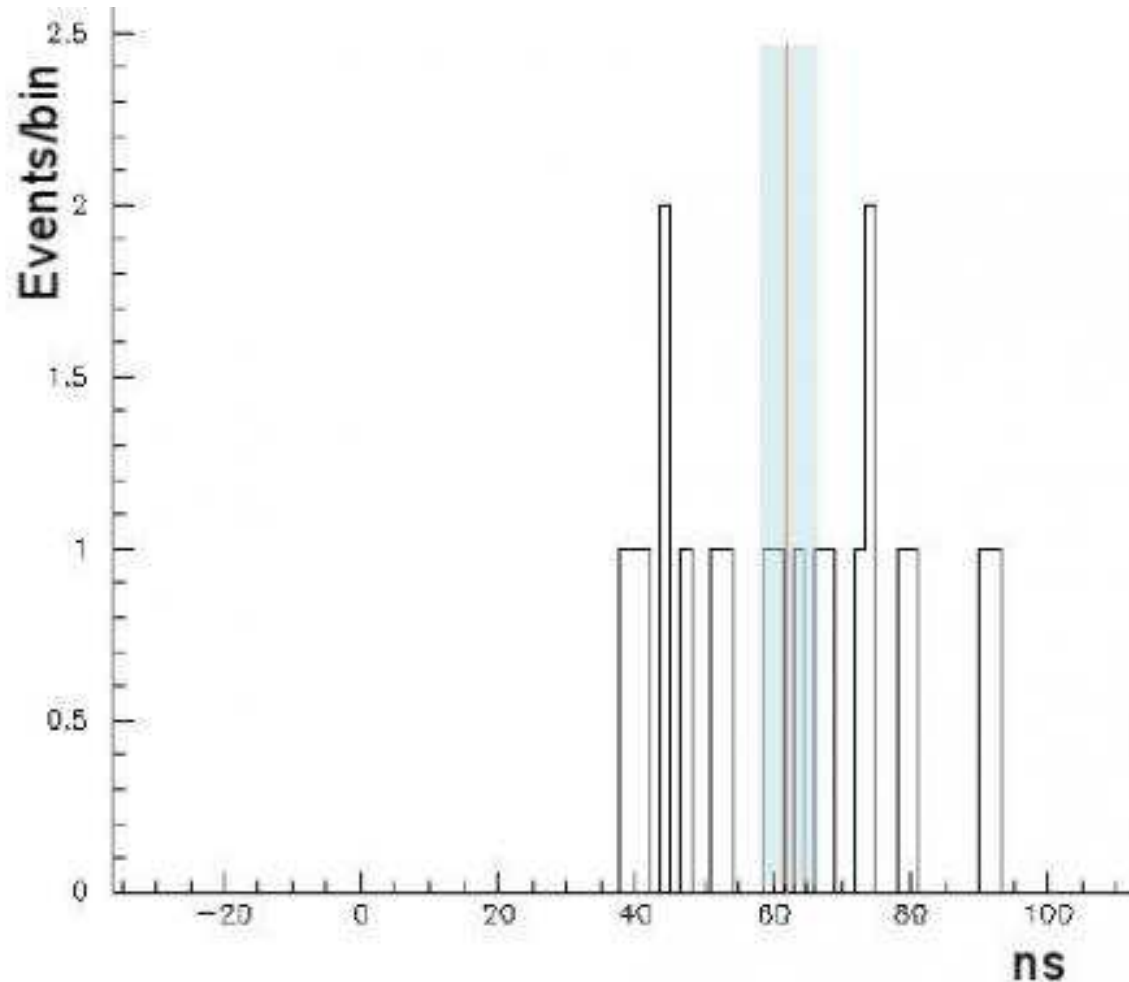
CNGS: 3 ns hosszú ν -impulzusok 524 ns távolságra



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

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

OPERA: 20 új neutrínó



2011 vége: 20 új neutrínó, korábbival egyező időzítés

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

OPERA: belső viták

200 résztvevőből 20 nem adta nevét a cikk első változatához

Részben másik 10 nem szerző a beküldött cikkben

2011 vége: 20 új neutrínó, korábbival egyező időzítés

Kísérleti ellenőrzés, 2012

$\Delta t(\text{CNGS—LNGS})$: optikai kábel?

LNGS: ICARUS és Borexino keres nagyenergiás e^+e^- párokat

Régebbi MINOS-adatokat megnézik, de nincs remény igazi ellenőrzésre

MINOS nekilát pontosabb mérésnek, de 2012 előtt semmi T2K meggondolta magát?

Köszönöm a figyelmet!

Mindannyitoknak

neutrínókkal teli^a, boldog új évet kívánok!

^aEz biztosan teljesül majd, megígérhetem!