

Pomiary prędkości neutrin

Katarzyna Grzelak
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Seminarium Zakładu Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
7.10.2011

Wynik eksperymentu OPERA

neutrino wysyłane z CERN, po przebyciu drogi 730km rejestrowane w Gran Sasso δt nanosekund wcześniej, niż gdyby poruszały się z prędkością światła:

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (60.7 \pm 6.9(\text{stat.}) \pm 7.4(\text{sys.}))\text{ns}$$

- Precyzyjne pomiary geodezyjne odległości od źródła neutrin do detektora
- Pomiar czasu przelotu (TOF) neutrin

Wstęp: Osiągane dokładności, statystyka

- Duża statystyka (~ 16000 przypadków) - dane zebrane w latach 2009-2011 ($\sim 10^{20}$ pot)
- Synchronizacja czasu CERN-Gran Sasso na poziomie $\sim 1\text{ns}$ (znaczące unowocześnienie systemu w 2008 roku)
- Pomiar odległości od źródła neutrin do detektora (730km) z dokładnością 20cm (nowy pomiar w 2010 roku)

W rezultacie dokładność czasu przelotu (TOF) rzędu 10ns (podobnie dla niepewności statystycznych i systematycznych)

The OPERA Collaboration 160 physicists, 30 institutions, 11 countries



Belgium

IIHE-ULB Brussels



Italy

LNGS Assergi
Bari



Korea

Jinju



Croatia

IRB Zagreb



Bologna
LNF Frascati
L'Aquila
Naples
Padova
Rome
Salerno

Russia

INR RAS Moscow
LPI RAS Moscow
ITEP Moscow
SINP MSU Moscow
JINR Dubna



France

LAPP Annecy
IPNL Lyon
IPHC Strasbourg



Germany

Hamburg



Japan

Aichi
Toho
Kobe
Nagoya
Utsunomiya



Switzerland

Bern
ETH Zurich



Israel

Technion Haifa



Turkey

METU Ankara



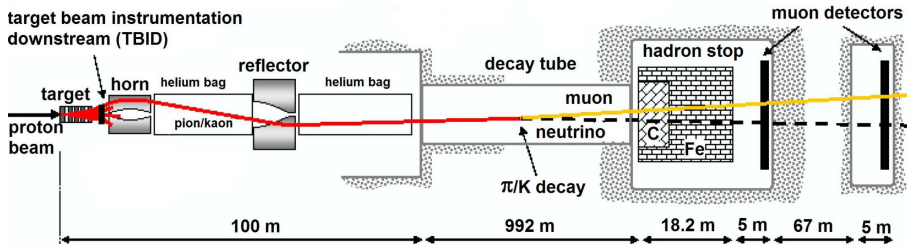
<http://operaweb.lngs.infn.it/scientists/?lang=en>

Wiązka neutrin CNGS

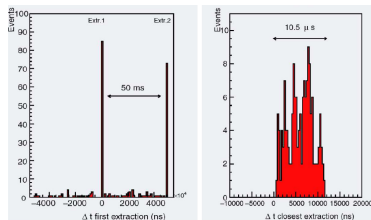
Wiązka neutrin CNGS (CERN-Gran Sasso)



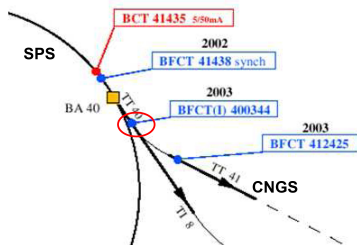
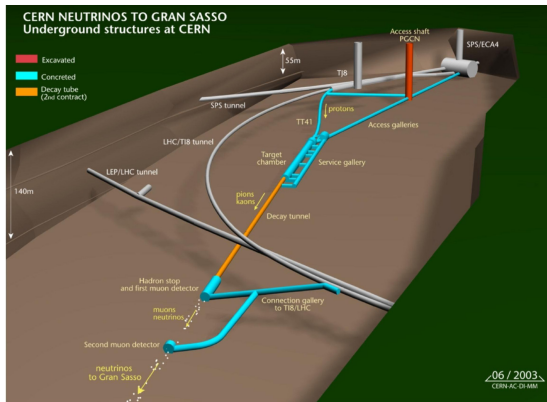
Wiązka neutrin CNGS



- Protony z SPS: 400 GeV
- Dwie $10.5 \mu\text{s}$ ekstrakcje protonów, rozdzielone o 50 ms
- Intensywność wiązki: 2.4×10^{13} protonów/ekstrakcję
- Wiązka neutrin: ν_μ z domieszką $\bar{\nu}_\mu$ (2.1%) i $\nu_e/\bar{\nu}_e$ (1%)
- $\langle E_\nu \rangle = 17 \text{ GeV}$



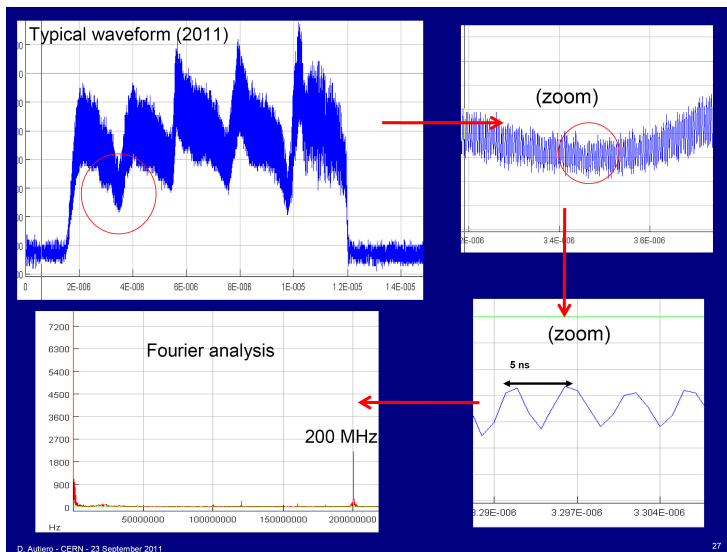
Wiązka neutrin CNGS



BCT (Beam Current Transformer):

- sygnał proporcjonalny do natężenia wiązki protonowej
- położenie (743.391 ± 0.002) m przed tarczą.

OPERA: Profil czasowy paczki protonów



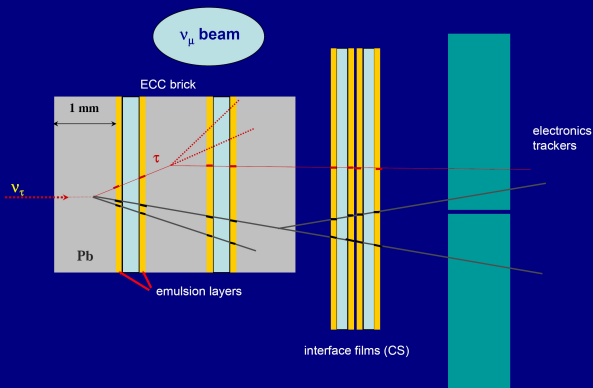
200 MHz: częstość radiowa SPS

Detektor OPERA

OPERA - poszukiwanie oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ a budowa detektora

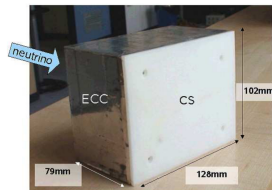
THE DESIGN OF THE OPERA EXPERIMENT

ECC BRICKS + ELECTRONIC DETECTORS FOR $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ OSCILLATION STUDIES



D. Autiero - CERN - 23 September 2011

6

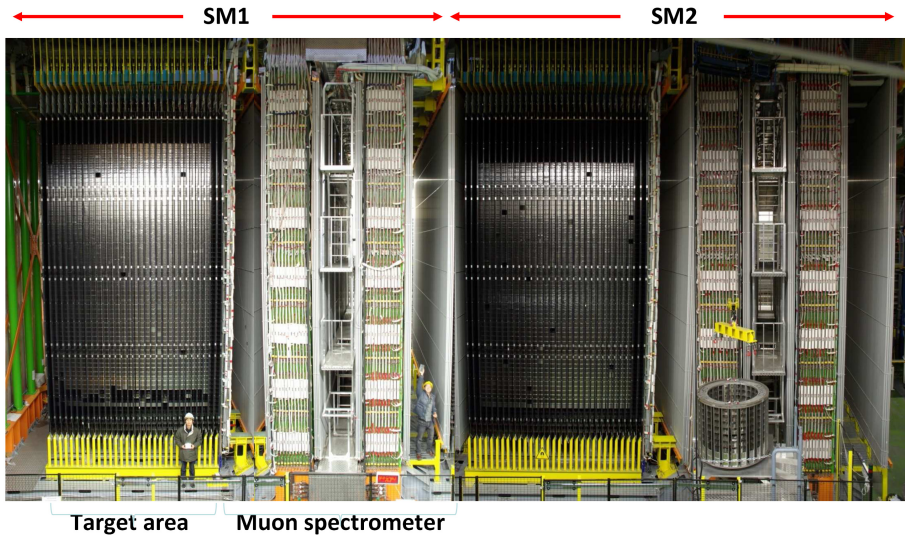


150000 cegieł z 56 płaszczyznami ołowiu o grubości 1 mm (całkowita masa 1.25 kton), poprzekładanymi warstwami emulsji jądrowej

Dla taonu

$$c\tau = 87.11 \mu\text{m}$$

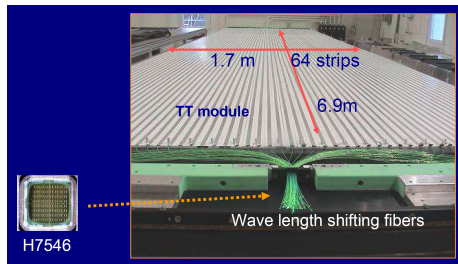
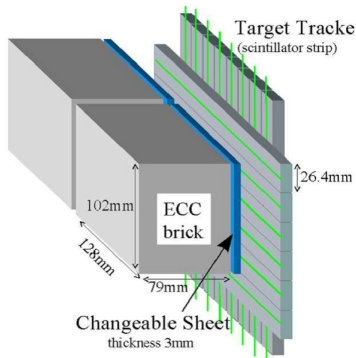
Detektor OPERA



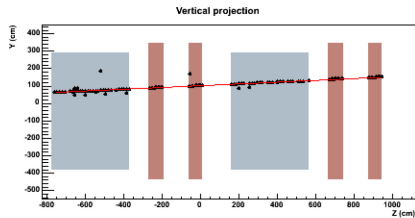
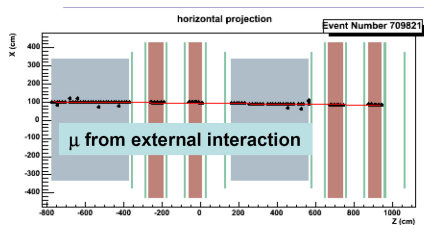
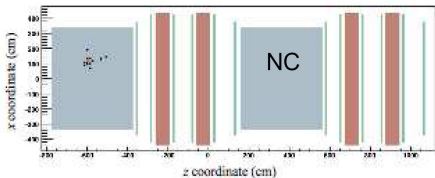
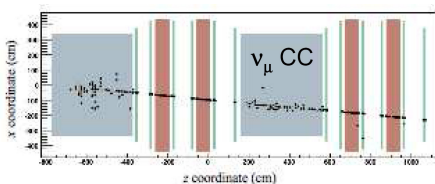
TT (Target Tracker)

TT(Target Tracker): dwie płaszczyzny scyntylatora, z paskami scyntylatora ułożonymi prostopadłe do siebie.

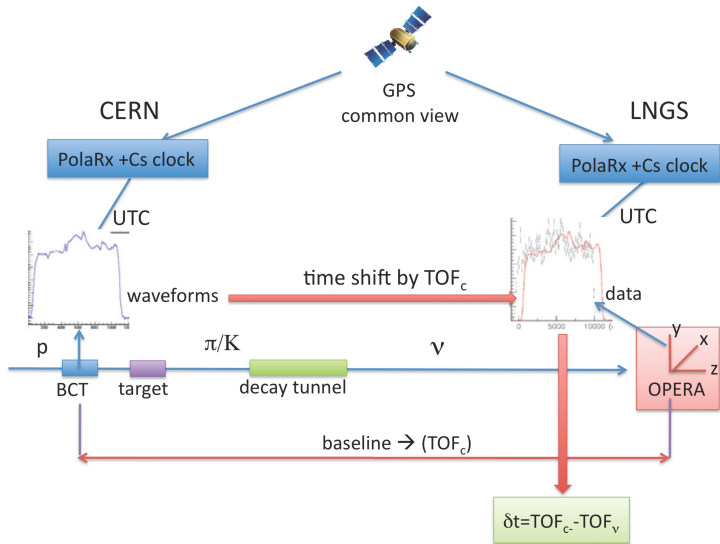
Zadania: **wstępna lokalizacja oddziaływań neutrin i pomiar czasu w którym zaszło oddziaływanie**



OPERA: Różne typy oddziaływań w detektorze

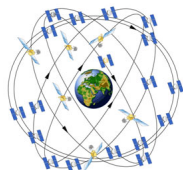


OPERA: Schemat pomiaru czasu przelotu neutrin



Global Positioning System

Dygresja: GPS (Global Positioning System)



- Minimum 24 satelity (od czerwca 2011 27 satelitów) na wysokości 20 200 km (okraczają Ziemię 2 razy dziennie)
- Sygnały wysyłane z satelit na dwóch podstawowych częstościach: 1575.42 MHz (L1) i 1227.6 MHz (L2)
- Zawartość wysyłanego sygnału:
 - czas wysłania wiadomości
 - informacja o przewidywanej orbicie satelity (almanac)
 - informacja o odchyleniach od przewidywanej orbity (ephemeris)
 - różnica pomiędzy UTC (Universal Coordinated Time) a *Czasem GPS* (obecnie 15s)
- Zegary atomowe na satelitach pokazują *Czas GPS* (nie poprawiany na obrót Ziemi)

Dygresja: pomiar położenia za pomocą GPS

- Podstawowa dokładność pomiaru położenia: **50-100 metrów**
- Differential Correction (Poprawka różnicowa) - dane zebrane przez lokalny GPS porównywane do danych zebranych przez GPS w znanym punkcie (referencyjnym): dokładność **1-5 metrów**
- Odbiorniki zbierające i analizujące sygnały z satelit na dwóch częstościach jednocześnie: dokładności **< 1cm**

Dygresja: pomiar położenia - ITRF/ETRF

Terminologia:

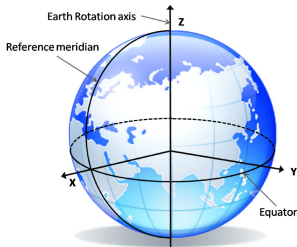
ITRF/ETRF:

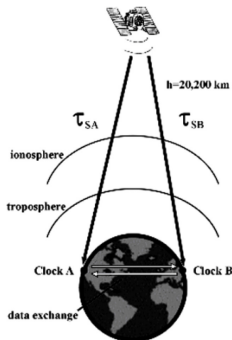
International/European
Terrestrial Reference Frame

ITRS/ETRS:

International/European
Terrestrial Reference System

- ITRF/ETRF - sieć precyzyjnie zmierzonych punktów referencyjnych (współrzędne kartezjańskie w 3D); aktualizowana co 1-3 lata
- ITRF/ETRF definiuje układy współrzędnych ITRS/ETRS:
 - układy geocentryczne
 - jednostka metr
 - obracają się razem z Ziemią



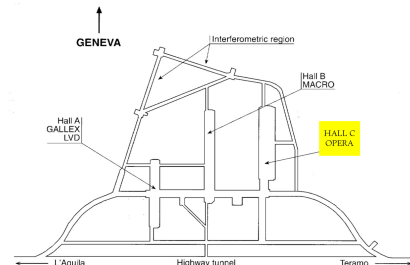
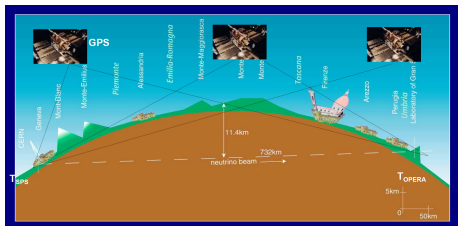


Metoda Common-View

- Satelita widziany jednocześnie przez dwa odbiorniki GPS
- Każdy odbiornik porównuje otrzymany sygnał do lokalnego zegara
- Następnie wymiana danych pomiędzy odbiornikami. Wynik:
(Zegar A - Zegar B) - $(\tau_{SA} - \tau_{SB})$

Pomiar odległości

CNGS: Pomiar geodezyjne

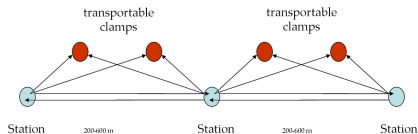
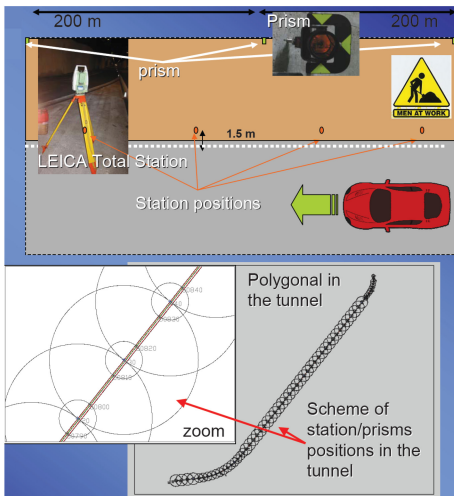


Pomiary geodezyjne w Gran Sasso:

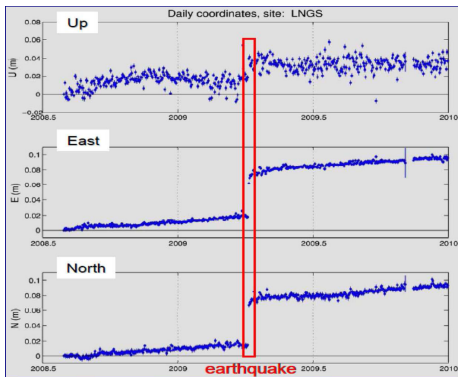
- Pomiary pozycji dwóch punktów referencyjnych na obu brzegach 10 km tunelu za pomocą precyzyjnych odbiorników GPS
- Pomiary odległości pod ziemię metodą triangulacji (przeniesienie pomiarów zrobionych za pomocą GPS do detektora pod ziemię)

- Odbiorniki GPS, Leica GX1230 i Topcon TPS E_GGD
 - Pomiar różnicowy
 - Użycie dwóch częstości jednocześnie
 - Dokładność pomiaru pozycji: $< 1\text{ cm}$
- Tachimetr Leica TS30
 - Mierzone światło laserowe, po odbiciu od siatki retroreflektorów
 - Dokładność pomiaru odległości do retroreflektora: $0.6\text{ mm} + 1\text{ ppm}$
 - Dokładność pomiaru kąta $0.5''$

Pomiary geodezyjne



- Względne odległości elementów wiązki CNGS znane z milimetrową dokładnością. Po przetransformowaniu do układu ETRF2000 - z dokładnością do 2 cm



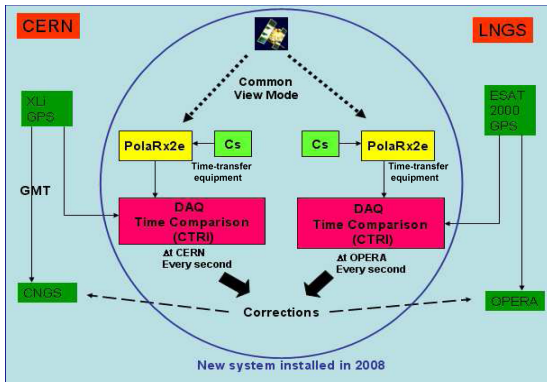
- Końcowa analiza w układzie ETRF2000
- Odległość pomiędzy tarczą a detektorem OPERA:
 $d_{TO} = (730534.61 \pm 0.20)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorem BCT a tarczą:
 $d_{BT} = (743.391 \pm 0.002)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorami: BCT i OPERA:
 $d_{BO} = d_{BT} + d_{TO} = (731278.0 \pm 0.2)\text{m}$

OPERA: Pomiary czasu

Pomiar czasu:

- synchronizacja pomiędzy pomiarami czasu w CERN i Gran Sasso (odbiorniki GPS pracujące w trybie Common-View)
- poprawki na opóźnienia propagacji sygnału w CERN i Gran Sasso

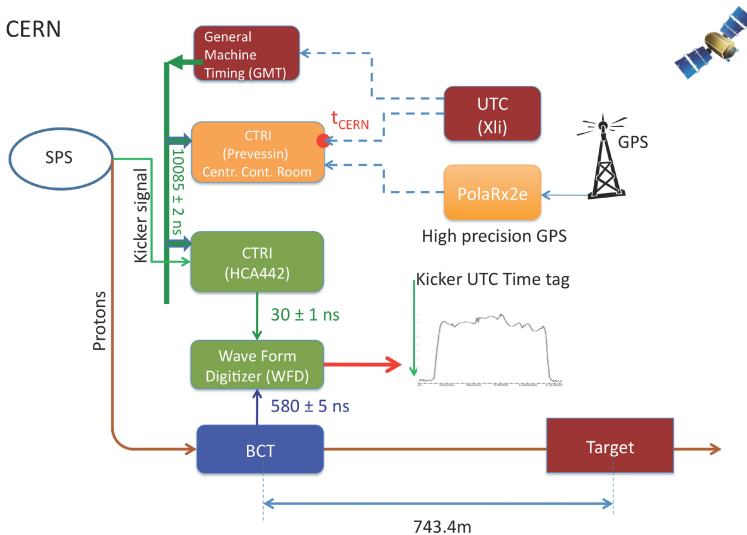
System pomiaru czasu



- CERN i Gran Sasso: dwa precyzyjne GPS + 2 atomowe Cs zegary
- Standardowe GPS'y (dokładność $\sim 100\text{ns}$) - czas UTC przekazywany do eksperymentu i systemu akceleratora
- Porównywanie (co 1s) precyzyjnego UTC i UTC ze standardowego systemu

System pomiaru czasu: CERN

CERN



Techniki kalibracji pomiaru czasu

Time calibration techniques



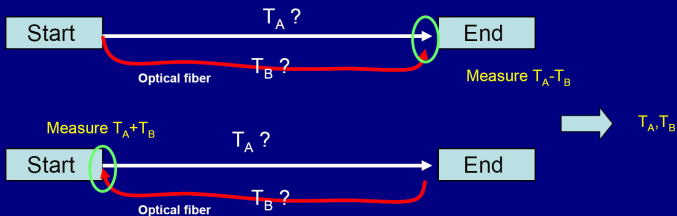
- **Portable Cs-4000:**

Comparison: time-tags vs 1PPS signal (Cs clock)
at the start- and end-point of a timing chain



- **Double path fibers measurement:**

by swapping Tx and Rx component of the opto-chain



Dokładności pomiaru opóźnień

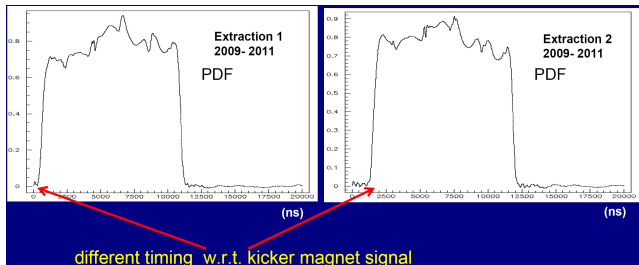
Delay calibrations summary

Item	Result	Method
CERN UTC distribution (GMT)	10085 ± 2 ns	<ul style="list-style-type: none">• Portable Cs• Two-ways
WFD trigger	30 ± 1 ns	Scope
BTC delay	580 ± 5 ns	<ul style="list-style-type: none">• Portable Cs• Dedicated beam experiment
LNGS UTC distribution (fibers)	40996 ± 1 ns	<ul style="list-style-type: none">• Two-ways• Portable Cs
OPERA master clock distribution	4262.9 ± 1 ns	<ul style="list-style-type: none">• Two-ways• Portable Cs
FPGA latency, quantization curve	24.5 ± 1 ns	Scope vs DAQ delay scan (0.5 ns steps)
Target Tracker delay (Photocathode to FPGA)	50.2 ± 2.3 ns	UV picosecond laser
Target Tracker response (Scintillator-Photocathode, trigger time-walk, quantisation)	9.4 ± 3 ns	UV laser, time walk and photon arrival time parametrizations, full detector simulation
CERN-LNGS intercalibration	2.3 ± 1.7 ns	<ul style="list-style-type: none">• METAS PolaRx calibration• PTB direct measurement

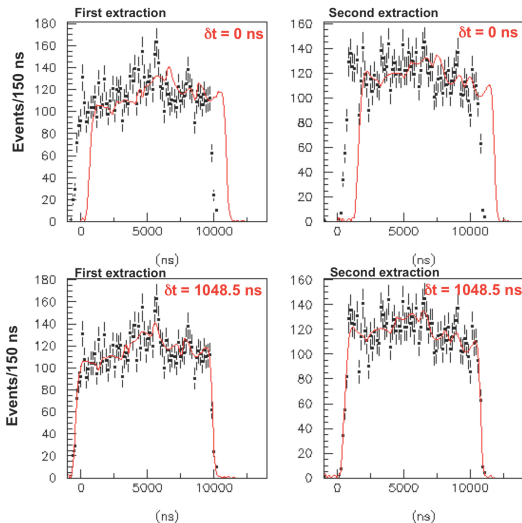
OPERA: Analiza danych

- Najwcześniejszy zarejestrowany sygnał w detektorze TT = czas oddziaływania neutrina
- Pozycja oddziaływania przesuwana do jednego punktu (średnia poprawka 140cm (4.7ns))
- Przypadki *internal* (wierzchołek oddziaływania wewnątrz detektora): taka sama selekcja jak przy badaniu oscylacji neutrin: **7586 przypadków**
- Przypadki *external* (oddziaływania neutrin w skale): zrekonstruowany 3D tor mionu : **8525 przypadków**

- Analiza *na ślepo* (blind analysis): dane analizowane bez znajomości realistycznych opóźnień sygnałów; używano pozycji nie względem BCT, ale innego punktu na osi wiązki; użyto starej synchronizacji czasu CERN-Gran Sasso.
- Dla każdego oddziaływania neutrina w detektorze używany odpowiadający temu oddziaływaniu profil czasowy paczki protonowej



- Znormalizowana do liczby przypadków, suma wybranych czasowych profili paczek protonowych = przewidywany rozkład czasu dla oddziaływań neutrin
- Porównanie z rozkładami czasu dla oddziaływań zarejestrowanych w detektorze OPERA

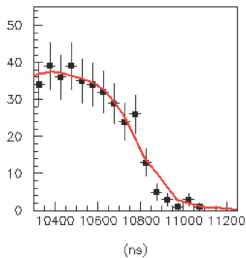
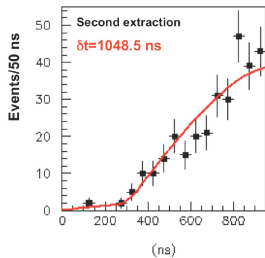
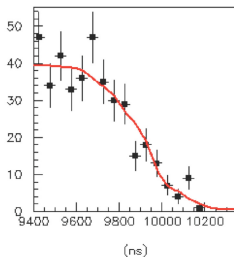
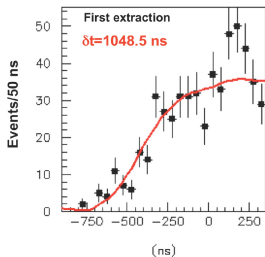


Różnica czasu (bez poprawek, wynik analizy *na ślepo*):

$$\delta t_b = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (1048.5 \pm 6.9)\text{ns}$$

$\frac{\chi^2}{ndof} = 1.06$ dla pierwszej ekstrakcji

$\frac{\chi^2}{ndof} = 1.12$ dla drugiej ekstrakcji



Powiększenie końców
rozkładów.

Analysis cross-checks

1) Coherence among CNGS runs/extractions

2) No hint for e.g. day-night or seasonal effects:

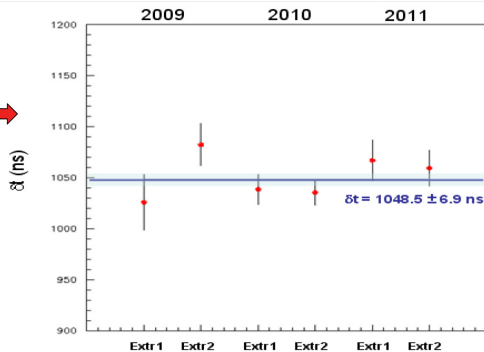
|d-n|: (17.1 ± 15.5) ns

|(spring+fall) – summer|:
 (11.3 ± 14.3) ns

3) Internal vs external events:

All events: δt (blind) = $\text{TOF}_c - \text{TOF}_v = (1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)})$ ns

Internal events only: $(1047.4 \pm 11.2 \text{ (stat.)})$ ns



Po uwzględnieniu prawdziwych opóźnień

	Blind 2006	Final analysis	Correction (ns)
Baseline (ns)	2440079.6	2439280.9	
Correction baseline			-798.7
CNGS DELAYS :			
UTC calibration (ns)	10092.2	10085	
Correction UTC			-7.2
WFD (ns)	0	30	
Correction WFD			30
BCT (ns)	0	-580	
Correction BCT			-580
OPERA DELAYS :			
TT response (ns)	0	59.6	
FPGA (ns)	0	-24.5	
DAQ clock (ns)	-4245.2	-4262.9	
Correction TT+FPGA+DAQ			17.4
GPS synchronization (ns)	-353	0	
Time-link (ns)	0	-2.3	
Correction GPS			350.7
Total			-987.8

Niepewności systematyczne

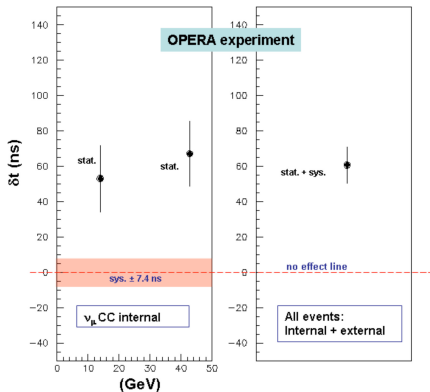
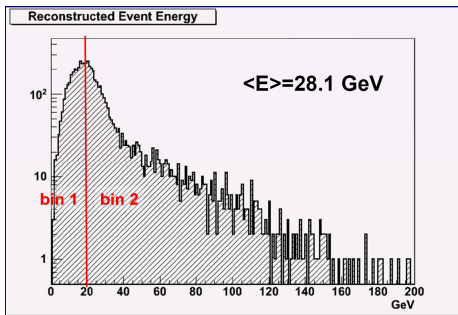
Systematic uncertainties	ns
Baseline (20 cm)	0.67
Decay point	0.2
Interaction point	2.0
UTC delay	2.0
LNGS fibres	1.0
DAQ clock transmission	1.0
FPGA calibration	1.0
FWD trigger delay	1
CNGS-OPERA GPS synchronisation	1.7
MC simulation for TT timing	3.0
TT time response	2.3
BCT calibration	5.0
Total sys. uncertainty (in quadrature)	7.4

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (60.7 \pm 6.9(\text{stat.}) \pm 7.4(\text{sys.}))\text{ns}$$

$$\frac{v - c}{c} = (2.49 \pm 0.28(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

Znaczoność statystyczna na poziomie 6.0σ

Poszukiwanie zależności od energii



- Tylko wewnętrzne oddziaływania ν_{μ} CC: **5489 przypadków**

$$E = E_{\mu} + E_{\text{had}}$$

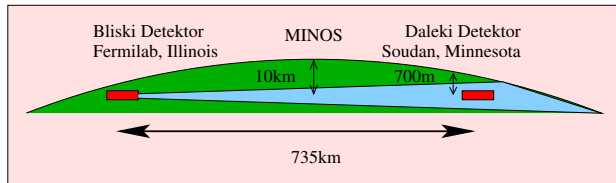
Poprzednie pomiary prędkości neutrin

Neutrino z SN1987a

- Wybuch supernowej SN1987a w Wielkim Obłoku Magellana (odległość 168 tysięcy lat świetlnych = 51.4 kpc):
- Paczka neutrin zarejestrowana w detektorach Kamiokande II, IMB, (Baksan i LSD) przed dotarciem sygnału świetlnego
- Detektor IMB: 8 oddziaływań neutrin (ν_e), energie 20-40 MeV zarejestrowane w czasie 6s
- Detektor Kamiokande II: 12 oddziaływań neutrin (ν_e), energie 7.5-36 MeV, zarejestrowane w czasie 13s
- Ograniczenie na prędkość neutrin:

$$\frac{v - c}{c} \lesssim 2 \times 10^{-9}$$

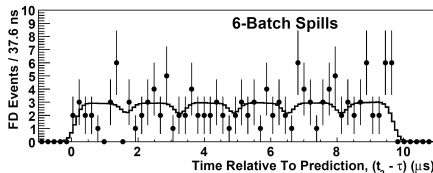
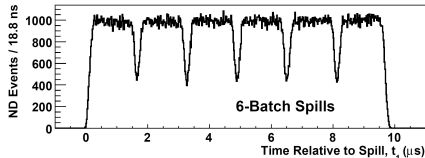
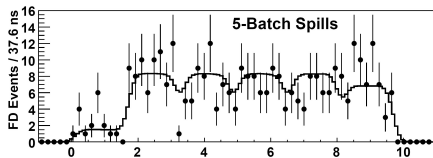
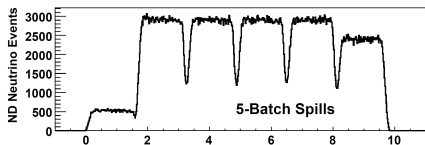
Pomiar w eksperymencie MINOS



- Eksperyment bardzo podobny do OPERY
- Odległość od źródła neutrin do detektora 735km
- Różnice:
 - Dwa detektory: Bliski i Daleki
 - Nie używany czasowy profil paczki protonowej
 - $E_{max} \sim 3 \text{ GeV}$
 - Odbiorniki GPS: dokładność $\sim 100\text{ns}$, podobnie jak w standardowych odbiornikach w eksp. OPERA
 - GPS nie pracowały w systemie Common-View

MINOS: czasy w Bliskim i Dalekim detektorze

Dopasowanie średniego rozkładu w Bliskim Detektorze do danych z Dalekiego Detektora



$$P_2^n(t_2) = \int \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_2 - t')^2}{2\sigma^2}\right) \times P_1^n(t') dt' \quad (n = 5, 6)$$

Nieskorelowany jitter dwóch zegarów GPS jest przyczyną względnej niepewności czasu pomiędzy detektorami o $\sigma = 150$ ns

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (126 \pm 32(\text{stat.}) \pm 64(\text{sys.}))\text{ns}$$

$$\frac{v - c}{c} = 5.1 \pm 2.9(\text{stat.} + \text{sys.}) \times 10^{-5}$$

Description	Uncertainty (68% C.L.)
A Distance between detectors	2 ns
B ND Antenna fiber length	27 ns
C ND electronics latencies	32 ns
D FD Antenna fiber length	46 ns
E FD electronics latencies	3 ns
F GPS and transceivers	12 ns
G Detector readout differences	9 ns
Total (Sum in quadrature)	64 ns

- Eksperyment OPERA, wiązka ν_{μ} , $\langle E \rangle = 17 \text{ GeV}$

- Neutrino rejestrowane δt ns wcześniej, niż gdyby poruszały się z prędkością światła:

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (60.7 \pm 6.9(\text{stat.}) \pm 7.4(\text{sys.}))\text{ns}$$

- Względna różnica pomiędzy prędkością neutrin a prędkością światła:

$$\frac{v - c}{c} = (2.49 \pm 0.28(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

- Pomiary odległości i czasów ze standardowo osiąganymi w miernictwie dokładnościami

- Poprzednie pomiary:

- Eksperyment MINOS, wiązka ν_μ , $E_{max} \sim 3 \text{ GeV}$

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (126 \pm 32(\text{stat.}) \pm 64(\text{sys.}))\text{ns}$$

$$\frac{v - c}{c} = 5.1 \pm 2.9(\text{stat.} + \text{sys.}) \times 10^{-5}$$

- Neutrino z SN1987a, ν_e , $E \in (7.5 - 40) \text{ MeV}$ w czasie $\sim 10\text{s}$

$$\frac{v - c}{c} \lesssim 2 \times 10^{-9}$$

- Perspektywy:

- MINOS - uaktualnienie pomiaru z 2007 roku, nowe dane, nowe odbiorniki GPS
- MINOS+(2013-2015) - modernizacja systemu pomiaru czasu
- T2K - odległość 295km
- ICARUS - ten sam punkt początkowy jak w OPERZE