

Pomiary prędkości neutrin

Katarzyna Grzelak

Instytut Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytet Warszawski

Seminarium w Centrum Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
Toruń 5.03.2012

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:

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (57.8 \pm 7.8(\text{stat.}) \pm_{-5.9}^{+8.3}(\text{sys.}))\text{ns}$$

Od 23 września 2011, od ogłoszenia wyniku, w bazie preprintów pojawiło się ponad 180 publikacji komentujących/próbujących wyjaśnić powyższy wynik.

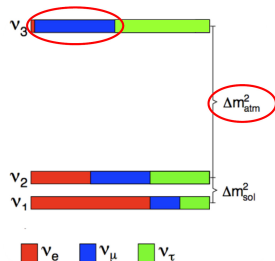
Wstęp: Program fizyczny eksperymentu OPERA

Model oscylacji neutrin

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} =$$



$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{neutrina atmosferyczne}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{poszukiwane, wynik T2K ?}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{deficyt neutrin słonecznych}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

neutrina
atmosferyczne

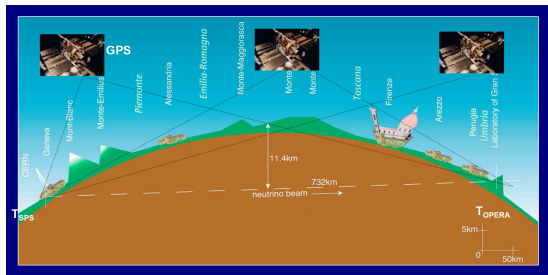
poszukiwane, wynik T2K ?

deficyt
neutrin słonecznych

$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $\delta \rightarrow$ faza łamania CP

Wstęp: Program fizyczny eksperymentu OPERA

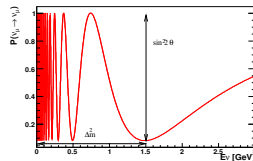
Badanie zjawiska oscylacji w eksperymentach akceleratorowych z długą bazą



- Obserwacje znikania ν_μ z wiązki

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu}$$

- **OPERA**: Obserwacje pojawiania się ν_τ w wiązce ν_μ

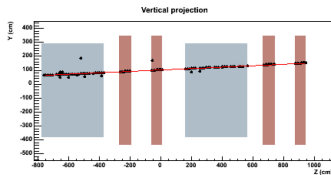
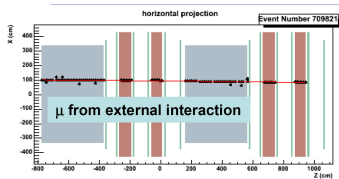
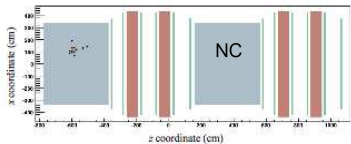
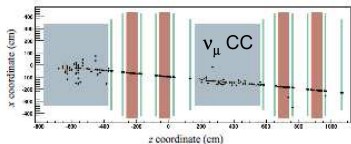


Różne typy oddziaływań w detektorze) (internal i external)

Neutrino identyfikowane są poprzez ich oddziaływania w detektorze:

oddziaływania CC: $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- X$ and $\nu_\tau N \rightarrow \tau^- X$

oddziaływania NC: $\nu N \rightarrow \nu X$



Wstęp: Podstawy pomiaru prędkości neutrin

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

Wstęp: Osiągane dokładności, statystyka

w eksperymencie OPERA

- Duża statystyka (~ 15223 przypadków) - dane zebrane w latach 2009-2011
- 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

Bologna

LNF Frascati

L'Aquila

Naples

Padova

Rome

Salerno



Korea

Jinju



Croatia

IRB Zagreb



France

LAPP Annecy

IPNL Lyon

IPHC Strasbourg



Russia

INR RAS Moscow

LPI RAS Moscow

ITEP Moscow

SINP MSU Moscow

JINR Dubna



Germany

Hamburg



Japan

Aichi

Toho

Kobe

Nagoya

Utsunomiya



Switzerland

Bern

ETH Zurich



Israel

Technion Haifa



Turkey

METU Ankara



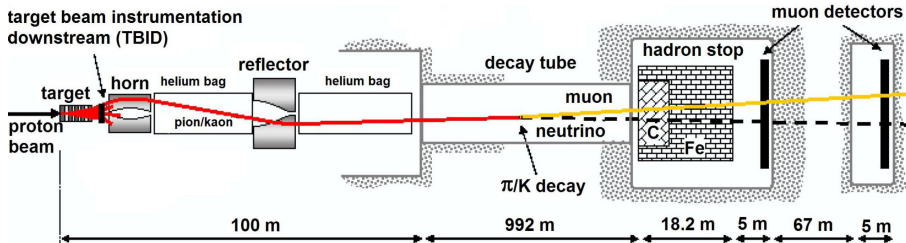
<http://operaweb.lngs.infn.it/scientists/?lang=en>

Wiązka neutron CNGS

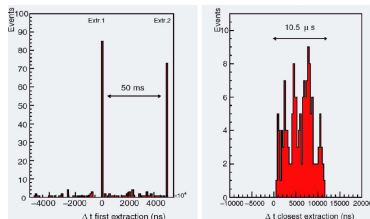
Wiązka neutrin CNGS (CERN-Gran Sasso)



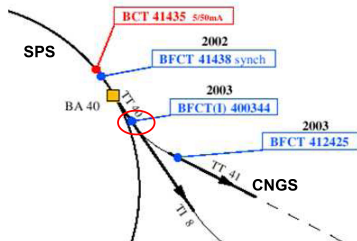
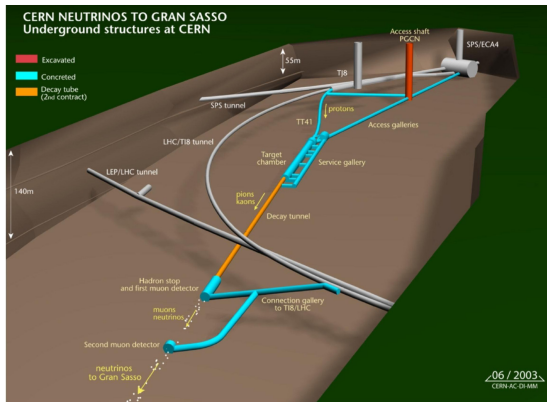
Wiązka neutron CNGS



- 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 neutron: ν_μ z domieszką $\bar{\nu}_\mu$ (2.1%) i $\nu_e/\bar{\nu}_e$ (1%)
- $\langle E_\nu \rangle = 17 \text{ GeV}$



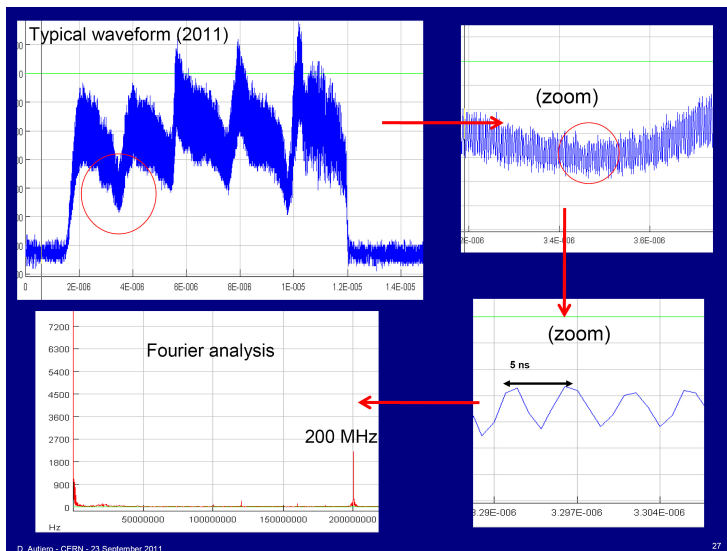
Wiązka neutrin CNGS



BCT (Beam Current Transformer):

- sygnał proporcjonalny do natężenia wiązki protonowej
- położenie $(743.391 \pm 0.002)\text{m}$ przed tarczą.

OPERA: Profil czasowy paczki protonów



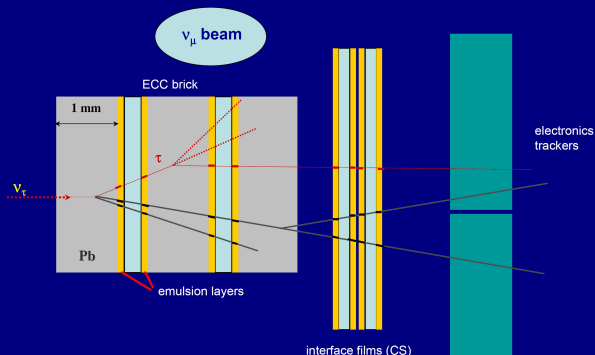
200 MHz: częstość radiowa SPS

Detektor OPERA

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

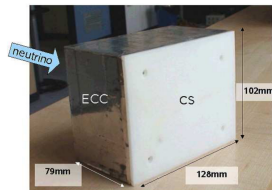
THE DESIGN OF THE OPERA EXPERIMENT

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



D. Autiero - CERN - 23 September 2011

6

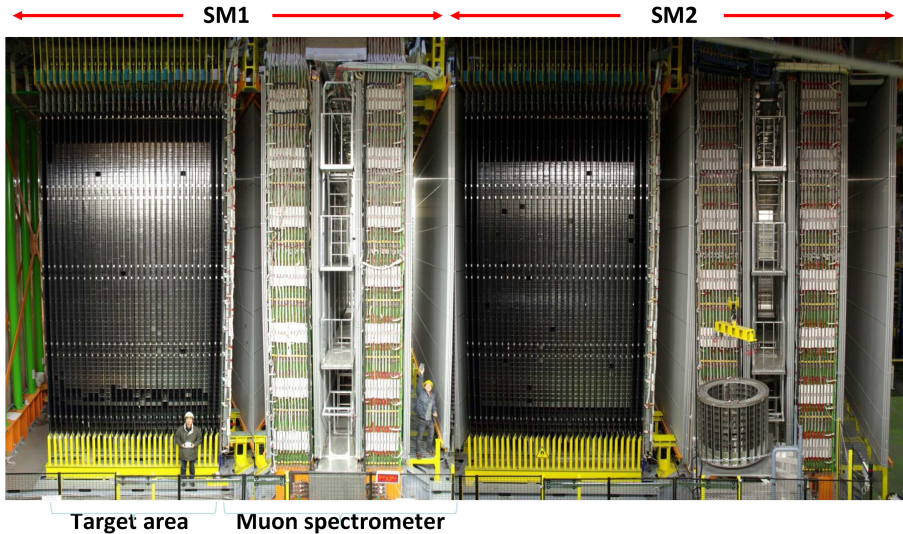


150000 cegieł z 56 płaszczyznami ołowiu o grubości 1 mm (całkowita masa 1.25 kton), poprzekadanymi warstwami emulsji jądrowej

Dla taonu

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

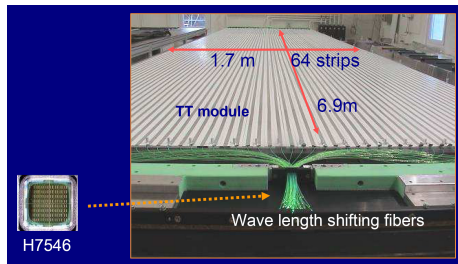
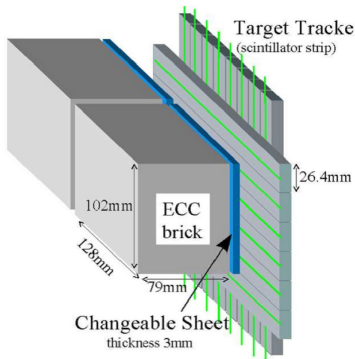
Detektor OPERA



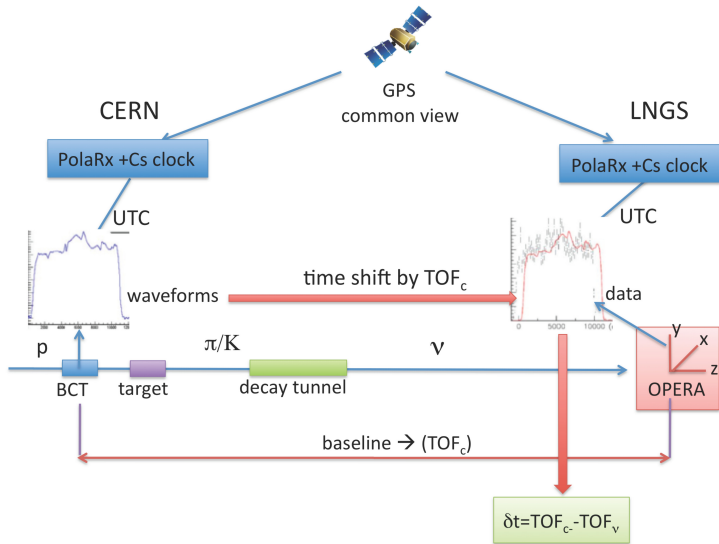
TT (Target Tracker)

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**

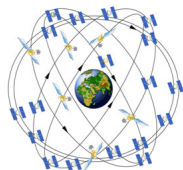


OPERA: Schemat pomiaru czasu przelotu neutrin



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 częstotliwościach: 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 częstotliwościach jednocześnie: dokładności **< 1cm** (z poprawką różnicową)

Dygresja: pomiar położenia - ITRF/ETRF

Terminologia:

ITRF/ETRF:

International/European

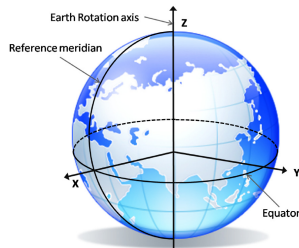
Terrestrial Reference Frame

ITRS/ETRS:

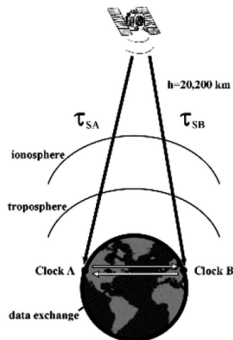
International/European

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



Dygresja: GPS - precyzyjna synchronizacja zegarów

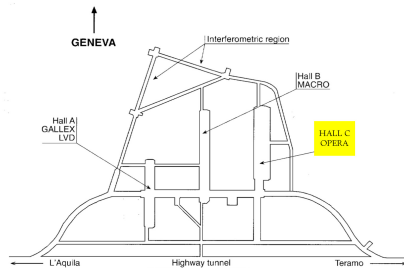
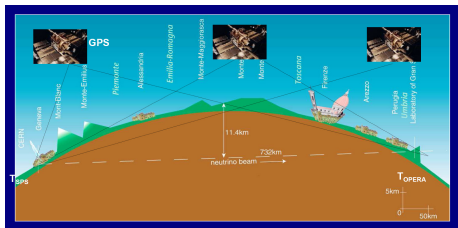


Metoda Common-View

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

Pomiar odległości

CNGS: Pomiary geodezyjne

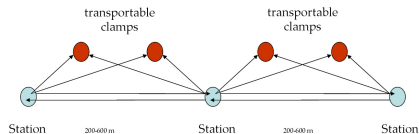
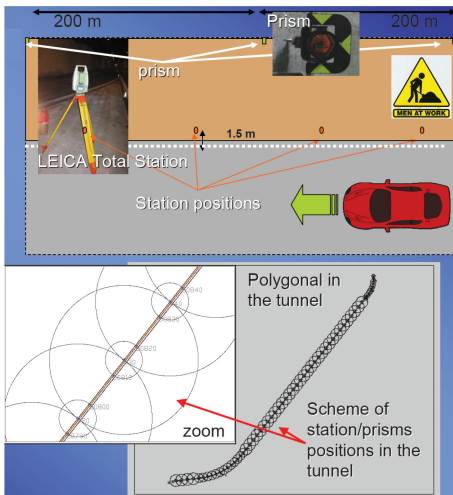


Pomiary geodezyjne w Gran Sasso:

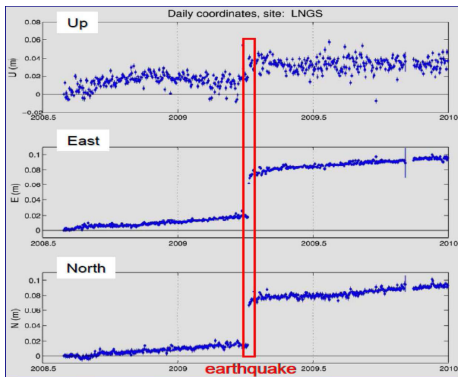
- Pomiary pozycji dwóch punktów referencyjnych na obu brzegach 10 km tunelu za pomocą precyzyjnych odbiorników GPS
- Pomiary odległości pod ziemią metodą triangulacji (przeniesienie pomiarów zrobionych za pomocą GPS do detektora pod ziemię)

- 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



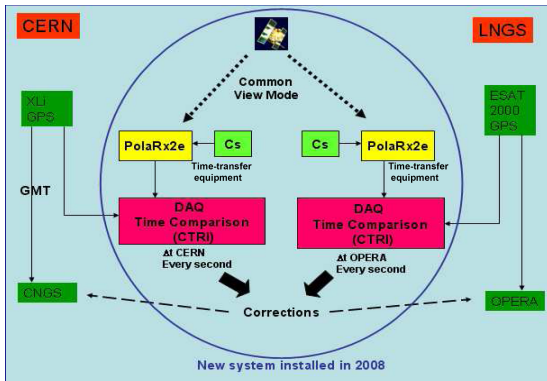
- Końcowa analiza w układzie ETRF2000
- Odległość pomiędzy tarczą a detektorem OPERA:
 $d_{TO} = (730534.61 \pm 0.20)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorem BCT a tarczą:
 $d_{BT} = (743.391 \pm 0.002)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorami: BCT i OPERA:
 $d_{BO} = d_{BT} + d_{TO} = (731278.0 \pm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

OPERA: Pomiary czasu

Pomiar czasu:

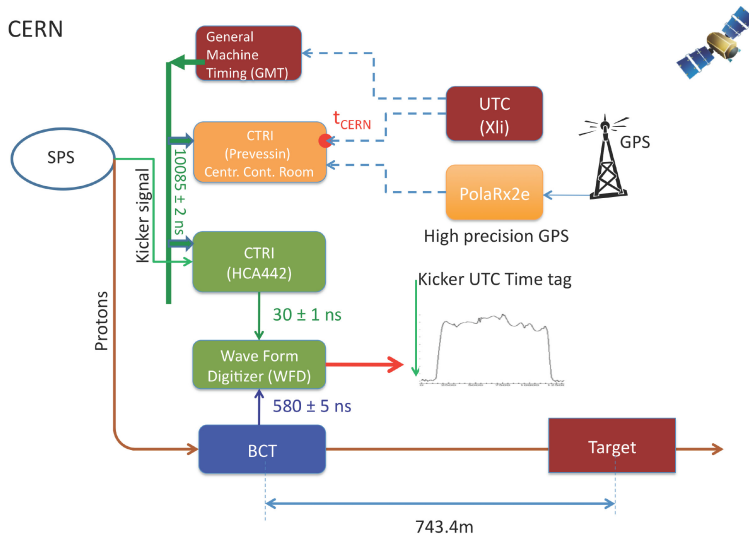
- synchronizacja pomiędzy pomiarami czasu w CERN i Gran Sasso (odbiorniki GPS pracujące w trybie Common-View)
- poprawki na opóźnienia propagacji sygnału w CERN i Gran Sasso

System pomiaru czasu

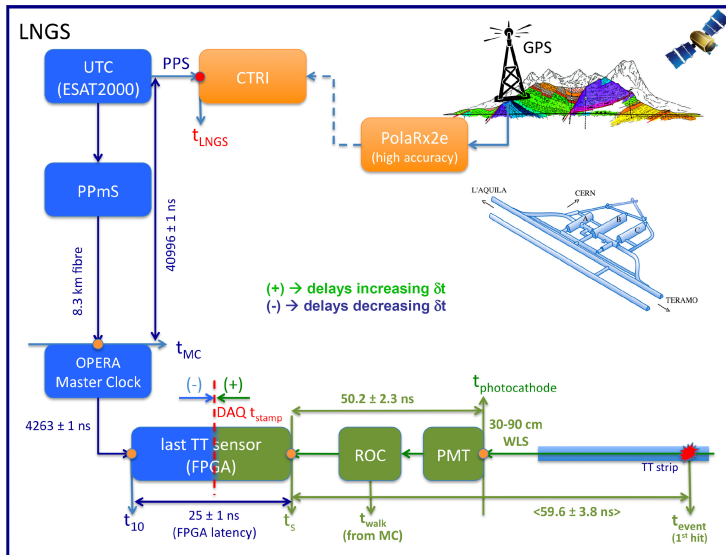


- CERN i Gran Sasso: dwa precyzyjne GPS + 2 atomowe Cs zegary
- Standardowe GPS'y (dokładność $\sim 100\text{ns}$) - czas UTC przekazywany do eksperymentu i systemu akceleratora
- Porównywanie (co 1s) precyzyjnego UTC i UTC ze standardowego systemu

System pomiaru czasu: CERN



System pomiaru czasu: Gran Sasso



Dokładności pomiaru opóźnień

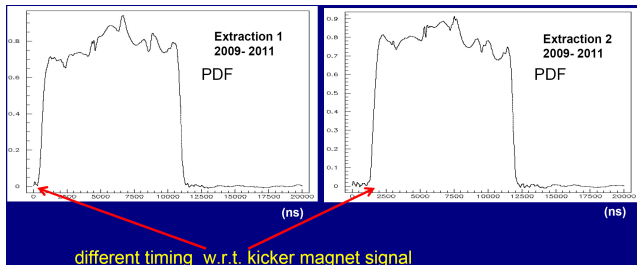
Delay calibrations summary

Item	Result	Method
CERN UTC distribution (GMT)	10085 ± 2 ns	• Portable Cs • Two-ways
WFD trigger	30 ± 1 ns	Scope
BTC delay	580 ± 5 ns	• Portable Cs • Dedicated beam experiment
LNGS UTC distribution (fibers)	40996 ± 1 ns	• Two-ways • Portable Cs
OPERA master clock distribution	4262.9 ± 1 ns	• 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	• METAS PolaRx calibration • PTB direct measurement

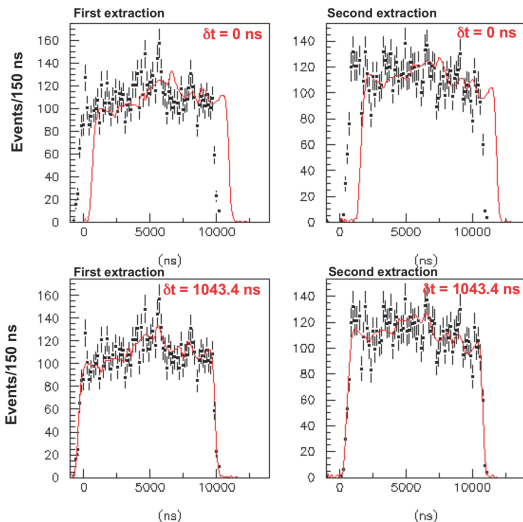
OPERA: Analiza danych

- 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



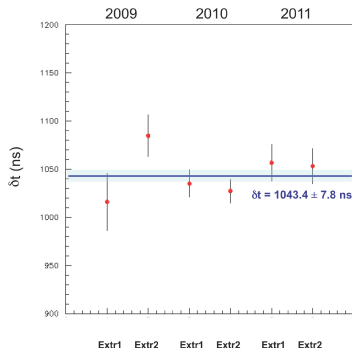
- Suma wybranych profili czasowych wiązki protonowej = oczekiwany rozkład czasu dla oddziaływań neutrin
- Porównanie z rozkładami czasu dla oddziaływań zarejestrowanych w detektorze OPERA



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

$$\delta t_b = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (1043.4 \pm 7.8(\text{stat.}))\text{ns}$$

- Wyniki dla różnych lat, dla różnych ekstrakcji protonów



- Przypadki internal vs external:

Wszystkie przypadki: $\delta t_b = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (1043.4 \pm 7.8(\text{stat.}))\text{ns}$

Tylko przypadki internal:

$\delta t_b = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (1045.1 \pm 11.3(\text{stat.}))\text{ns}$

- ... wiele innych testów ...

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	1.0
CNGS-OPERA GPS synchronisation	1.7
MC simulation for TT timing	3.0
TT time response	2.3
BCT calibration	5.0
Total systematic uncertainty	-5.9, +8.3

Po uwzględnieniu prawdziwych opóźnień

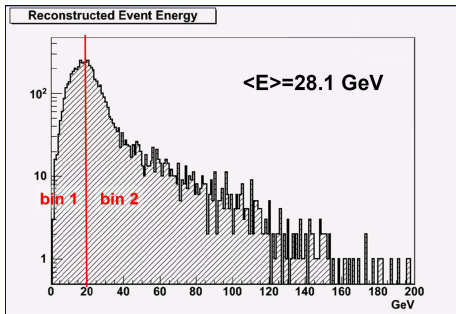
	Blind analysis (ns)	Final analysis (ns)	Correction (ns)
	2006	2011	
Baseline	2440079.6	2439280.9	
Earth rotation		2.2	
Correction baseline			-796.5
CNGS delays:			
UTC calibration	10092.2	10085.0	
Correction UTC			-7.2
WFD	0	30	
Correction WFD			30
BCT	0	-580	
Correction BCT			-580
OPERA Delays:			
TT response	0	59.6	
FPGA	0	-24.5	
DAQ clock	-4245.2	-4262.9	
Correction OPERA			17.4
GPS Corrections:			
Synchronisation	-353	0	
Time-link	0	-2.3	
Correction GPS			350.7
Total correction			-985.6

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = (57.8 \pm 7.8(\text{stat.}) \pm_{-5.9}^{+8.3}(\text{sys.}))\text{ns}$$

$$\frac{v - c}{c} = (2.37 \pm 0.32(\text{stat.}) \pm_{-0.24}^{+0.34}(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

Znaczoność statystyczna na poziomie 6.2σ

Poszukiwanie zależności od energii



Użyte tylko wewnętrzne
oddziaływania ν_μ CC: **5199 events**

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

- Wewnętrzne oddziaływania CC ($\langle E \rangle = 28.2 \text{ GeV}$):

$$\delta t = (61.1 \pm 13.2(\text{stat.})_{-6.9}^{+7.3}(\text{sys.}))\text{ns}$$

- Pierwszy przedział energii ($\langle E \rangle = 13.8 \text{ GeV}$):

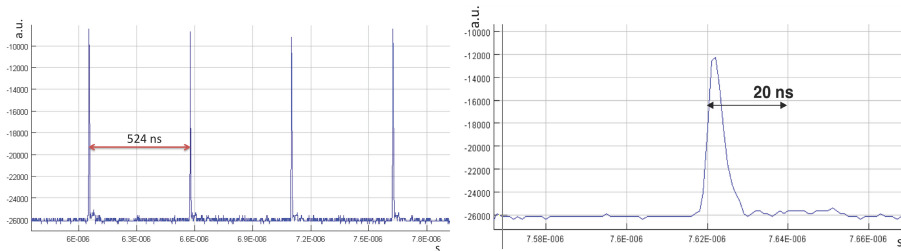
$$\delta t = (54.7 \pm 18.4(\text{stat.})_{-6.9}^{+7.3}(\text{sys.}))\text{ns}$$

- Drugi przedział energii ($\langle E \rangle = 40.7 \text{ GeV}$):

$$\delta t = (68.1 \pm 19.1(\text{stat.})_{-6.9}^{+7.3}(\text{sys.}))\text{ns}$$

Test z BARDZO krótkimi protonowymi paczkami

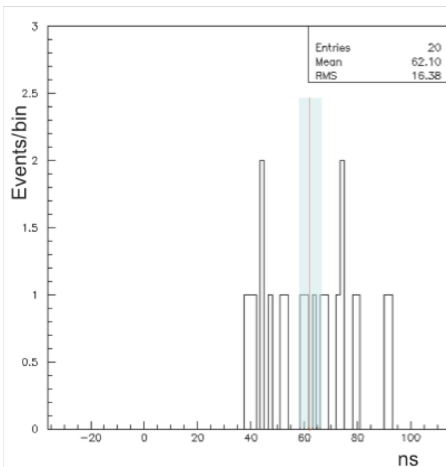
- Dane ze zmodyfikowaną strukturą wiązki zbierane od 22 października do 6 listopada



- W detektorze OPERA zebrano 20 oddziaływań (6 internal i 14 external)
- Każdy przypadek oddziaływania neutrina jednoznacznie przyporządkowany do odpowiedniej protonowej paczki

Test z BARDZO krótkimi protonowymi paczkami

- wynik $\delta t = (62.1 \pm 3.7(stat.)_{ns}$ zgodny z wartością z głównej analizy: $\delta t = (57.8 \pm 7.8(stat.)_{ns}$



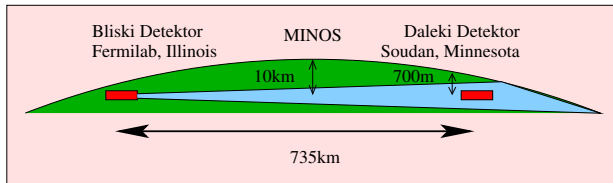
Poprzednie pomiary prędkości neutrin

Neutrina 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) na 4h przed dotarciem sygnału świetlnego (neutrina powinny dotrzeć 4 lata wcześniej, gdyby poruszały się z prędkościami zgodnymi z wynikami eksperymentu OPERA)
- Detektor IMB: 8 oddziaływań neutrin ($\bar{\nu}_e$), energie 20-40 MeV
- Detektor Kamiokande II: 12 oddziaływań neutrin ($\bar{\nu}_e$), energie 7.5-36 MeV
- Ograniczenie na prędkość neutrin:

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

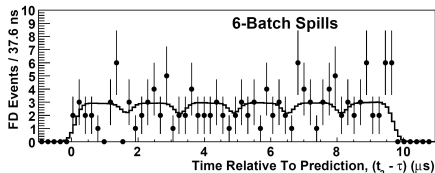
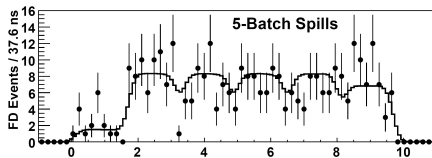
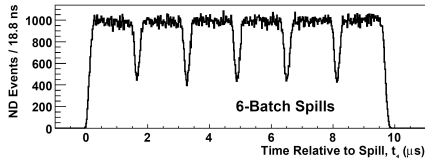
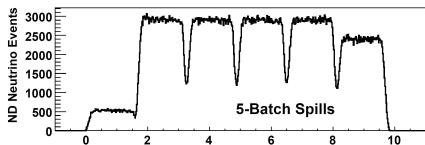
Pomiar w eksperymencie MINOS



- 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



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

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

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

Perspektywy

W roku 2012:

- ta sama, zmodyfikowana struktura wiązki
- więcej eksperymentów: Icarus, Borexino
- wiązka antyneutrinowa ?
- zmodyfikowana energia wiązki ??

- Istotnie krótsza odległość od źródła neutrin do detektora: 295km
- Inne energie neutrin (~ 0.6 GeV)
- Od trzęsienia ziemi w 2011 roku eksperyment nie działał.
Niedługo oczekiwany powrót do normalnego trybu zbierania danych.

Official Statement:

- 1) Based on our initial assessment of our capability, at the moment T2K cannot make any definitive statement to verify the Opera measurement of the speed of neutrino (Opera Anomaly).
- 2) We will assess a possibility to improve our experimental sensitivity for a measurement to cross-check the OPERA anomaly in the future. Such a measurement with an improved system, however, could take a while to achieve.

MINOS powtórzy pomiar TOF → całkowicie niezależne sprawdzenie wyniku eksperymentu OPERA

- **do 6 miesięcy**: ponowne przeanalizowanie zebranych danych (9 razy więcej danych), zmniejszenie dominujących niepewności systematycznych
→ oczekiwana niepewność **18-33 ns sys**
- **do 12 miesięcy**: istotne zmiany w systemie do pomiaru czasu (dla danych z 2012 roku)
→ oczekiwana niepewność **11-18 ns sys**
- **2013+**: dalsze modyfikacje systemu pomiaru czasu
→ oczekiwana niepewność **2-7 ns sys.**

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

- Neutrina 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:

$$\frac{v - c}{c} = (2.37 \pm 0.32(\text{stat.}) \pm_{-0.24}^{0.34}(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

- Duża znaczącość statystyczna wyniku
- Pomiary odległości i czasów ze standardowo osiąganymi w miernictwie dokładnościami
- W maju nowe dane - sprawdzenie wpływu kolejnych dwóch czynników na otrzymany wynik

- 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 $\sim 10\text{s}$

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

- Eksperymenty, które mogą zweryfikować wynik OPERY:

- MINOS(2012)
- MINOS+(2013-2015)
- T2K(?)
- ?