

Pomiary prędkości neutrin

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
IFD UW

Seminarium Fizyka Jądra Atomowego
20.10.2011

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:

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

Przez miesiąc od opublikowania wyniku, pojawiło się 95 publikacji komentujących/próbujących wyjaśnić powyższy wynik.

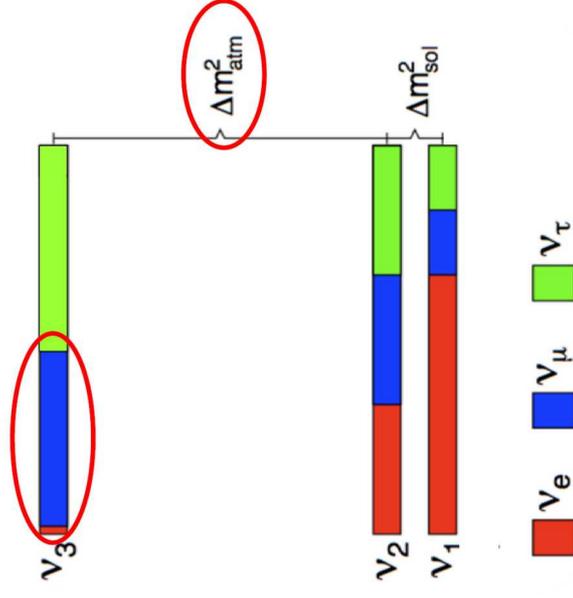
Wstęp: Program fizyczny eksperymentu OPERA

Model oscylacji neutrin

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

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

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



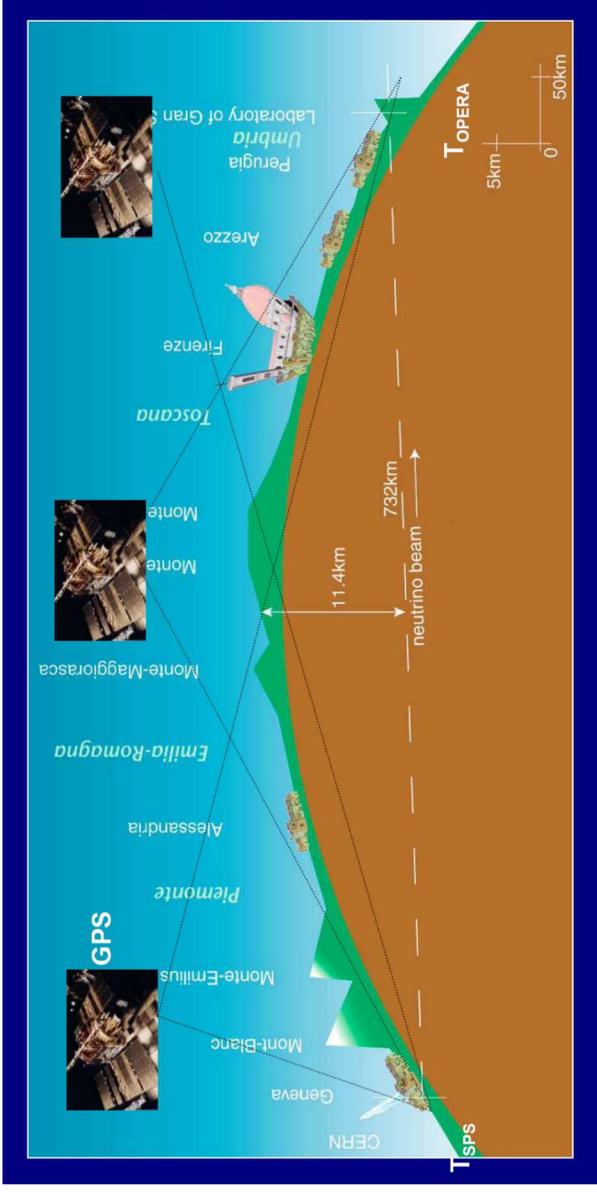
$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{neutrina atmosferyczne}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{poszukiwane, wynik T2K ?}} \underbrace{\begin{pmatrix}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

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

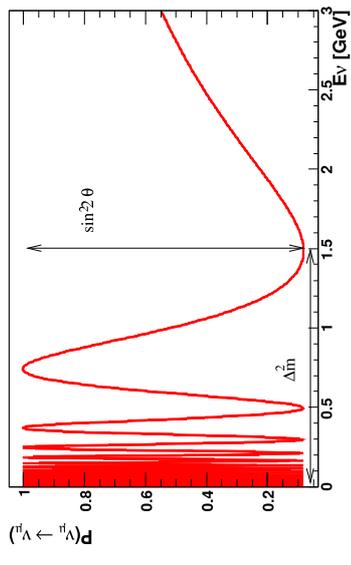
Badanie zjawiska oscylacji w eksperymentach akceleratorowych z długą bazą



- 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 wiążce ν_μ



Wstęp: Podstawy pomiaru prędkości neutron

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

Wstęp: Osiągane dokładności, statystyka

w eksperymencie OPERA

- 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 neutron 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



Croatia
IRB Zagreb



France
LAPP Annecy
IPNL Lyon
IPHC Strasbourg



Germany
Hamburg



Israel
Technion Haifa



Italy
LNGS Assergi
Bari

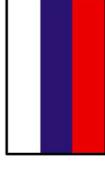


Bologna
LNF Frascati
L'Aquila
Naples
Padova
Rome
Salerno

Korea
Jinju



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



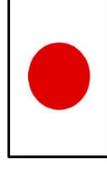
Switzerland
Bern
ETH Zurich



Turkey
METU Ankara

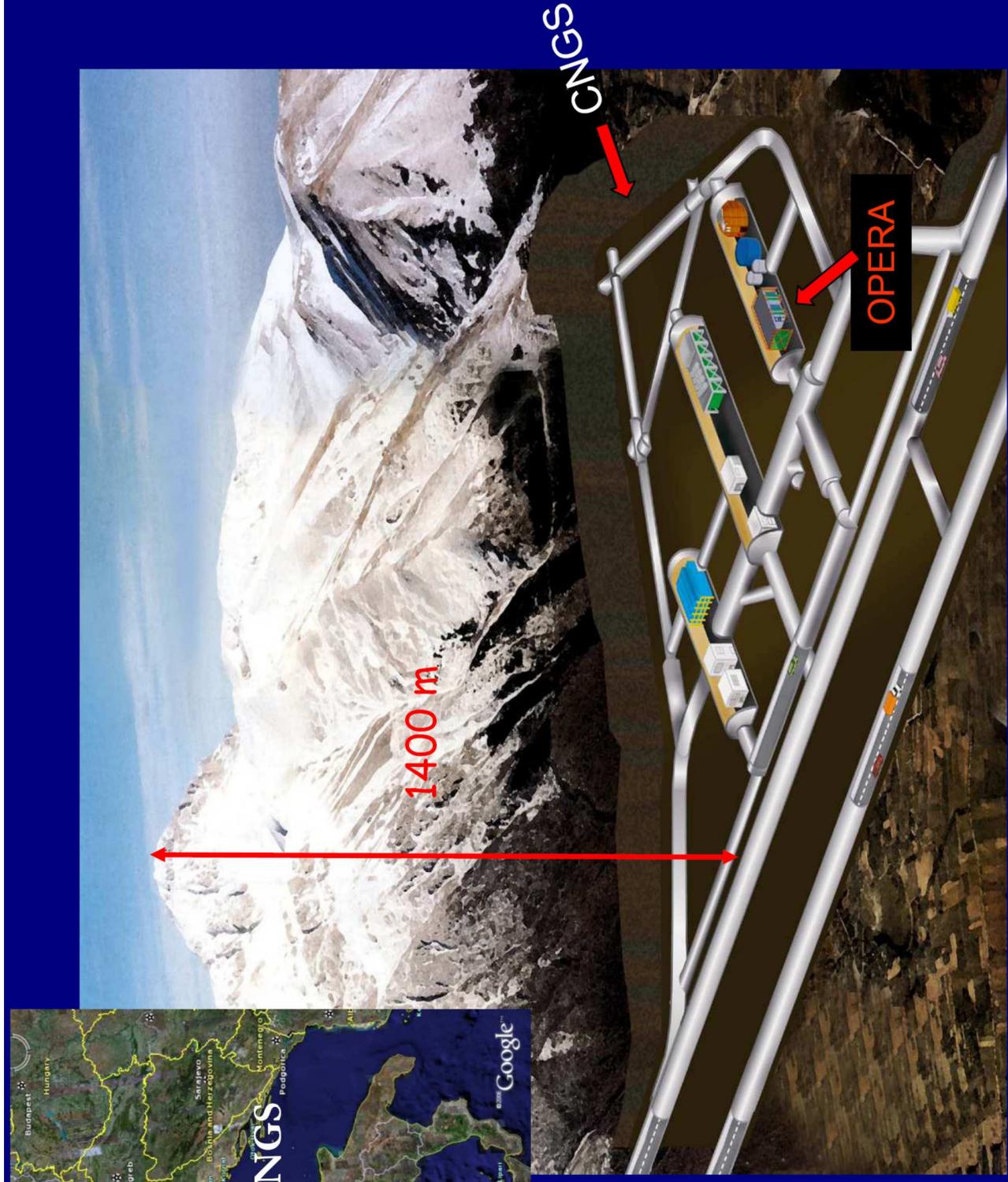


Japan
Aichi
Toho
Kobe
Nagoya
Utsunomiya

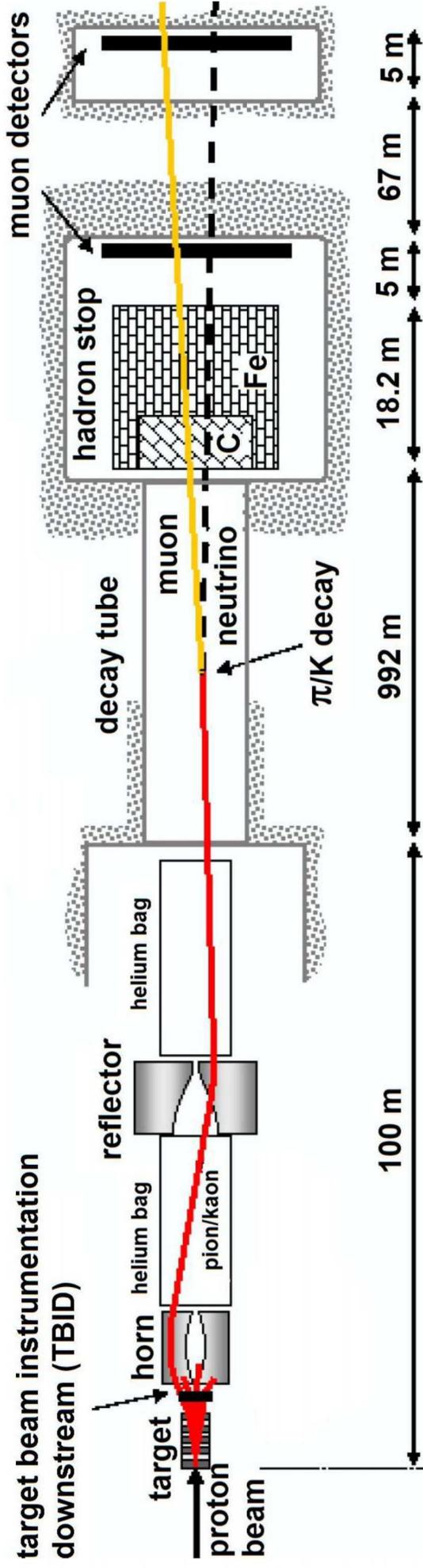


Wiązka neutron CNGS

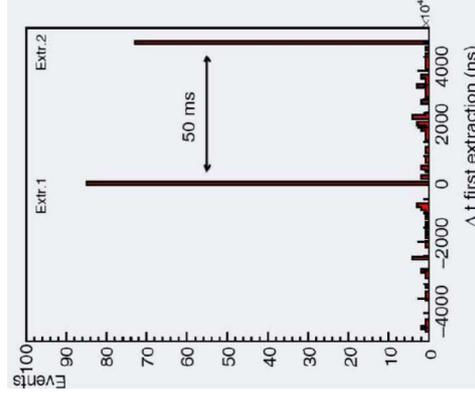
Wiązka neutron CNGS (CERN-Gran Sasso)



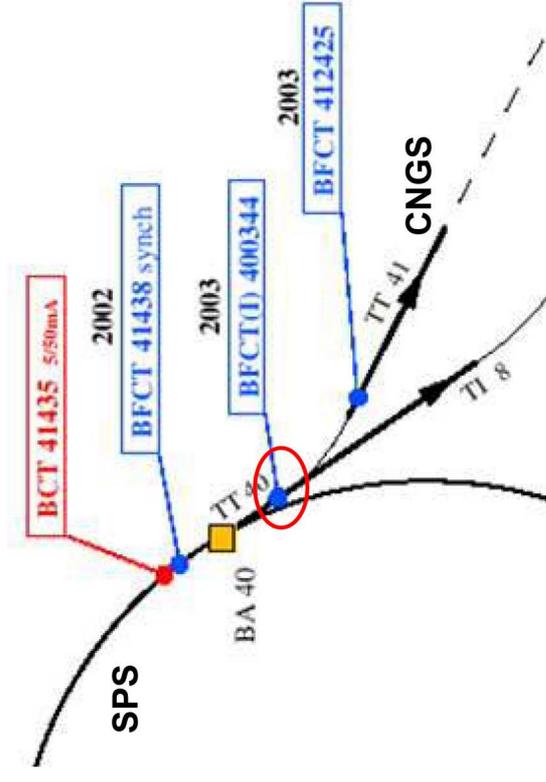
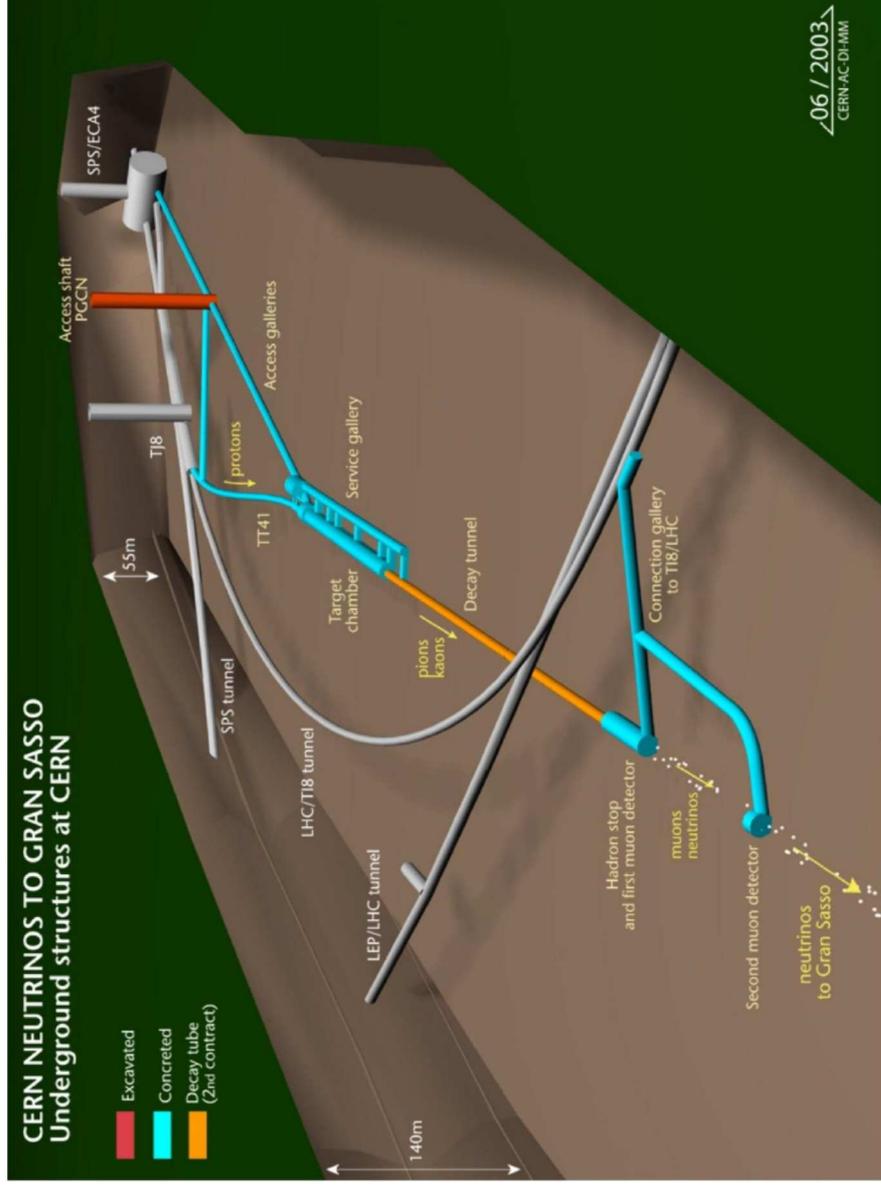
Wiązka neutron CNGS



- Protony z SPS: 400 GeV
- Dwie 10.5 μ 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%)
- $\langle E_\nu \rangle \approx 17$ GeV



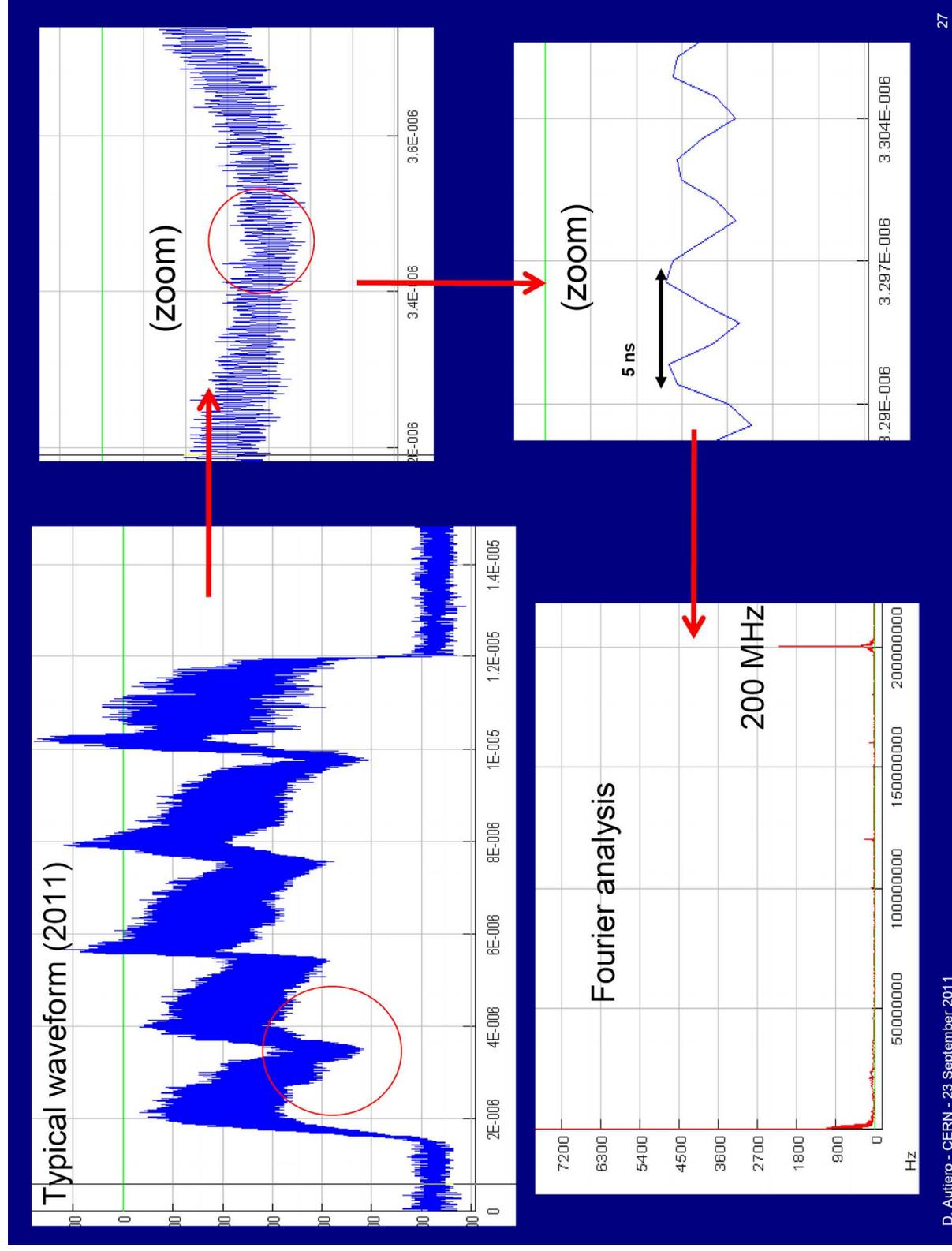
Wiązka neutrin CNGS



BCT (Beam Current Transformer):

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

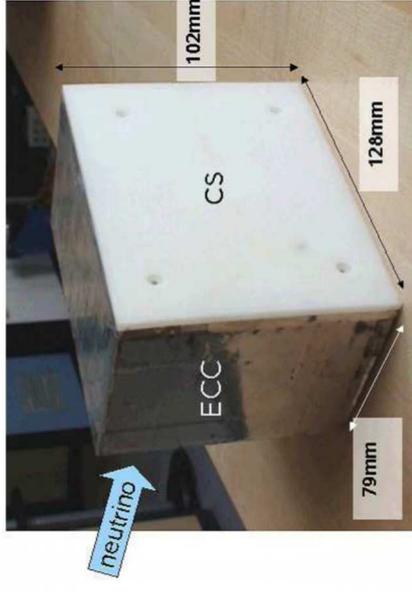
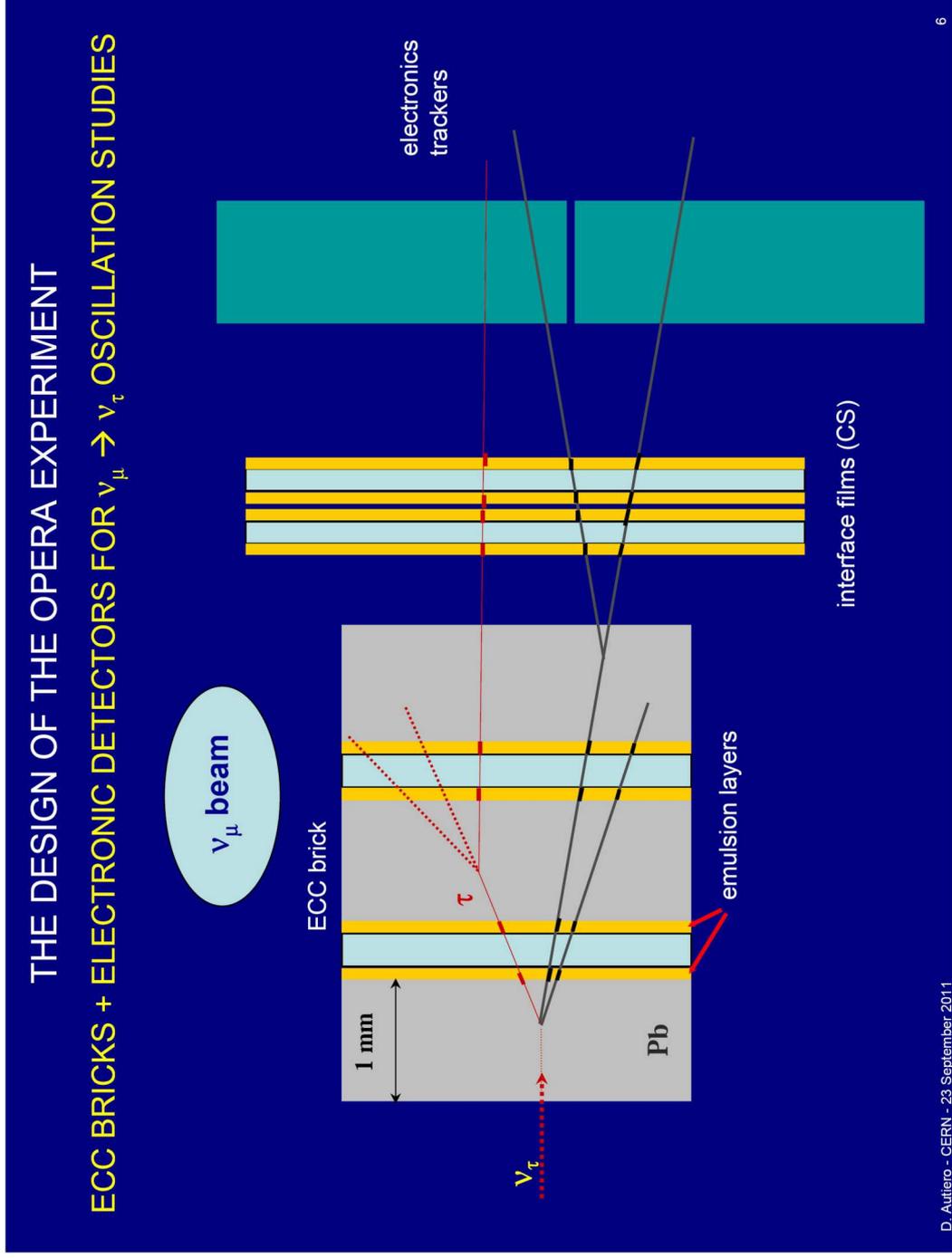
OPERA: Profil czasowy paczki protonów



200 MHz: częstość radiowa SPS

Detektor OPERA

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



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

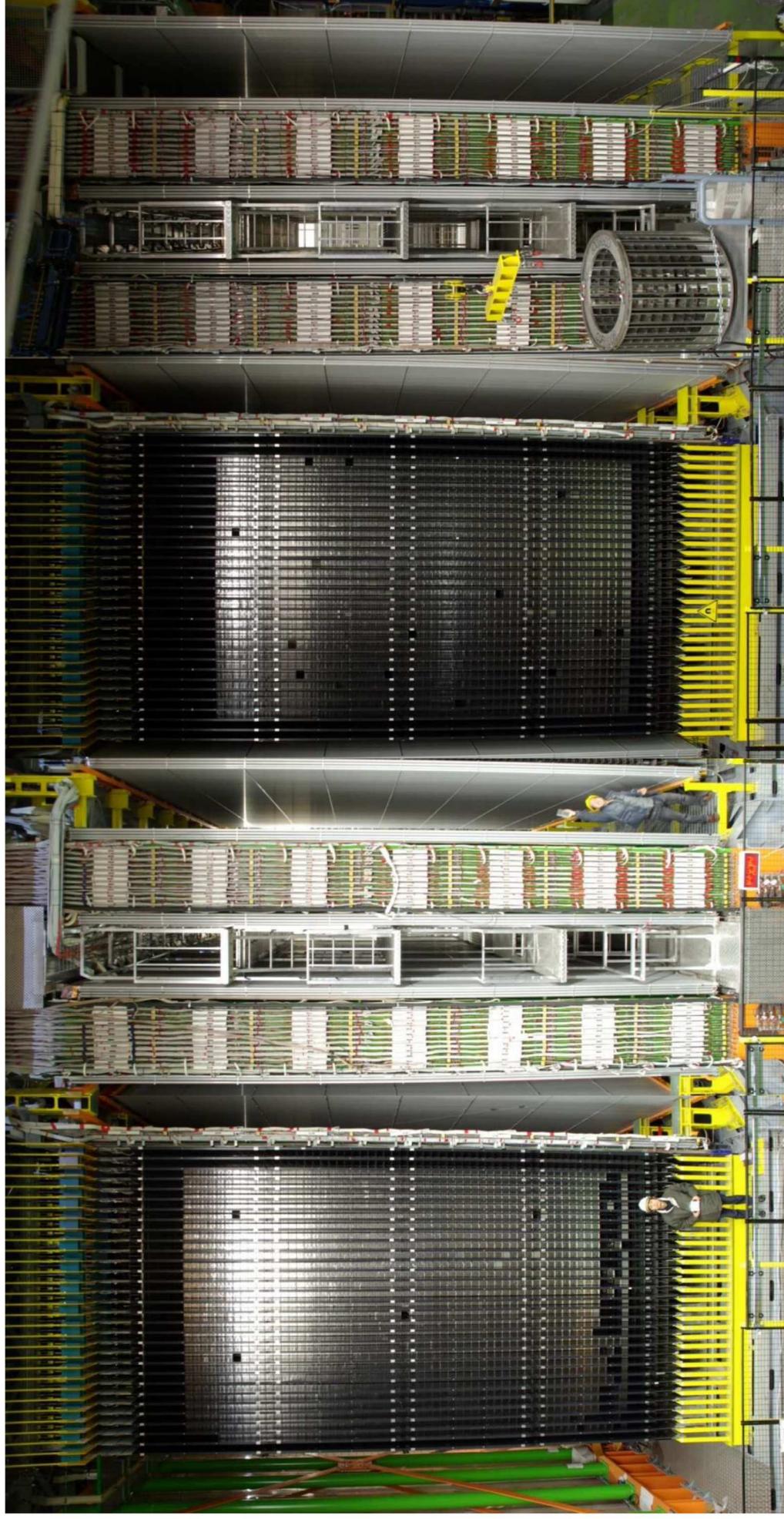
Dla taonu

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

Detektor OPERA

SM1

SM2



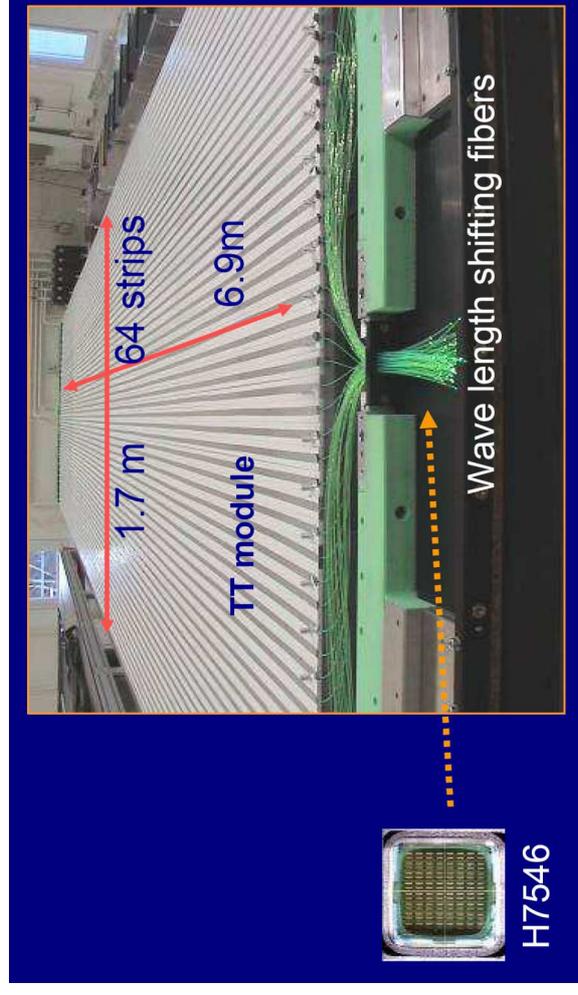
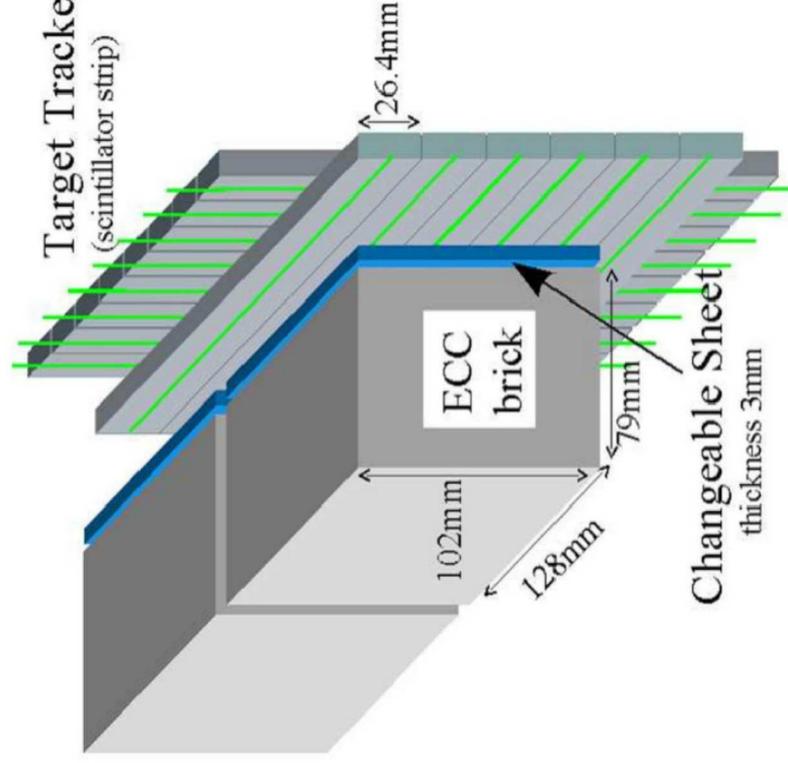
Target area

Muon spectrometer

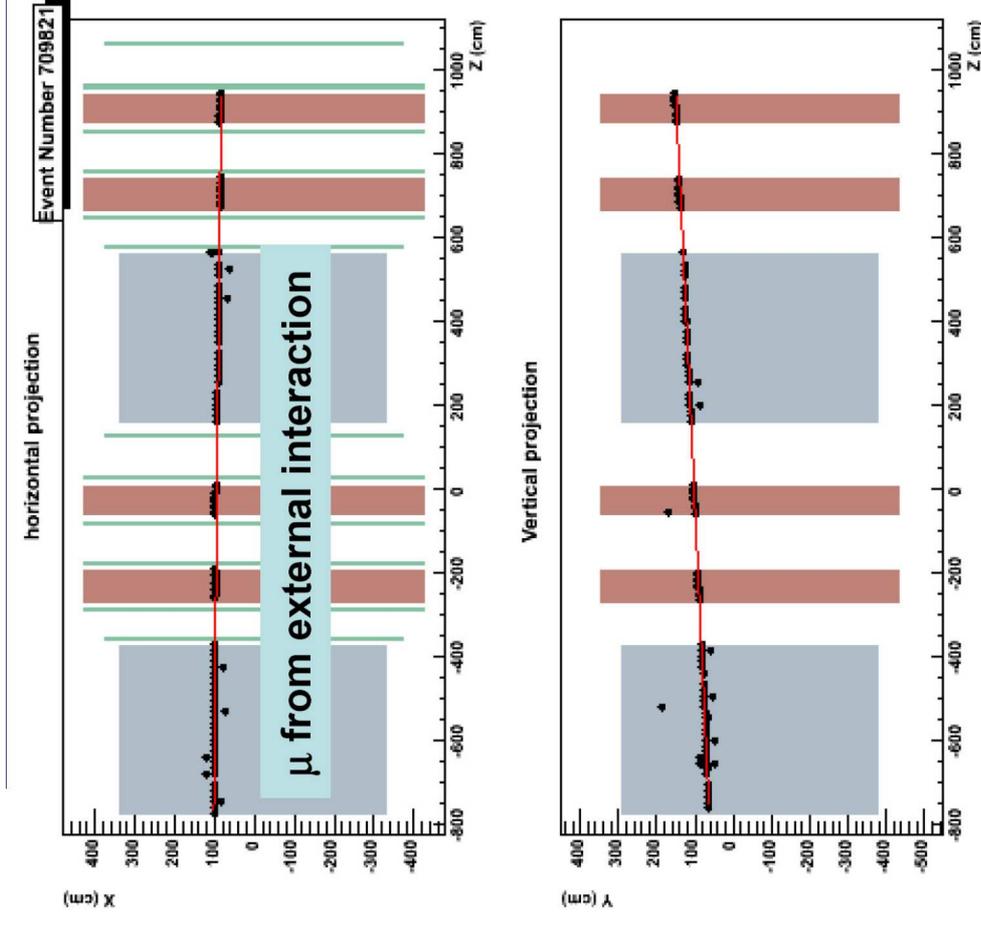
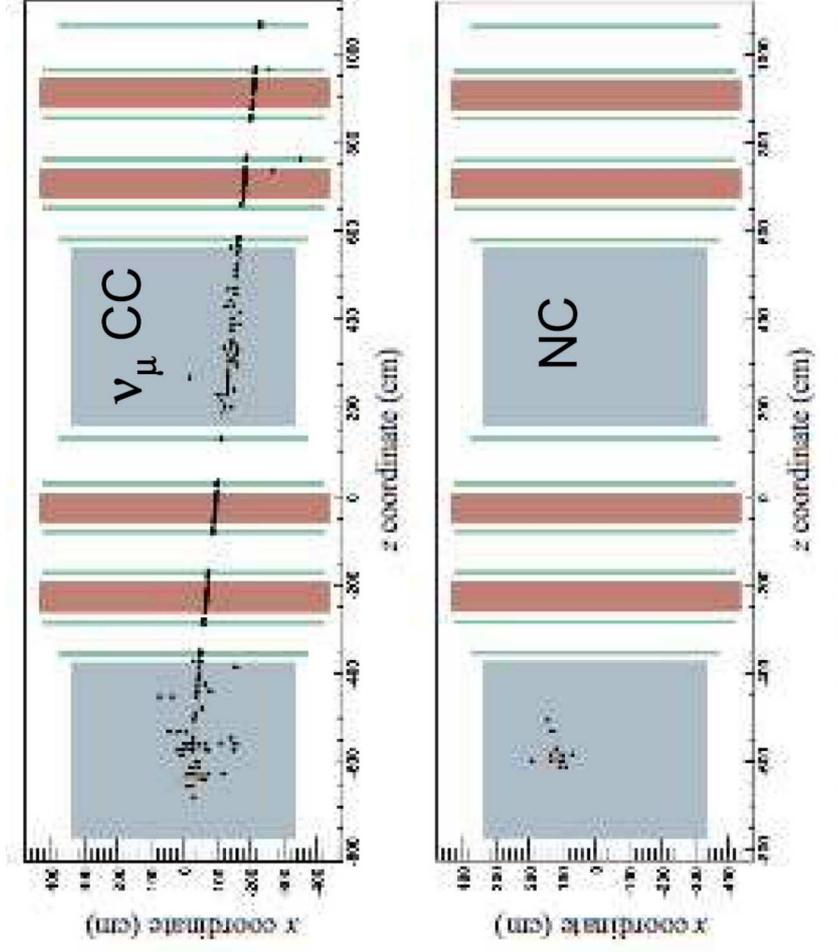
TT (Target Tracker)

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

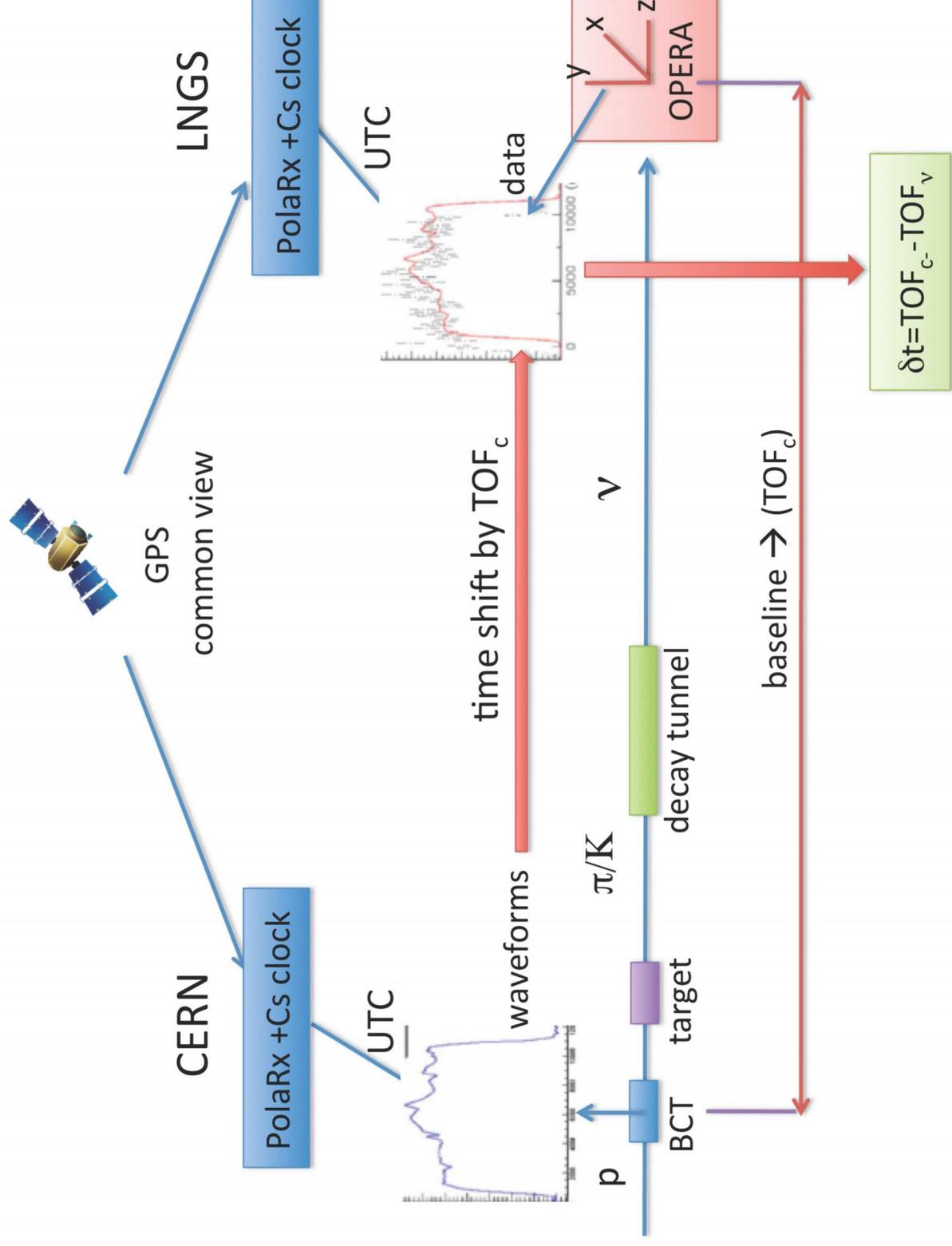
Zadania: **wstępna lokalizacja oddziaływań neutron i pomiar czasu w którym zaszło oddziaływanie**



OPERA: Różne typy oddziaływań w detektorze

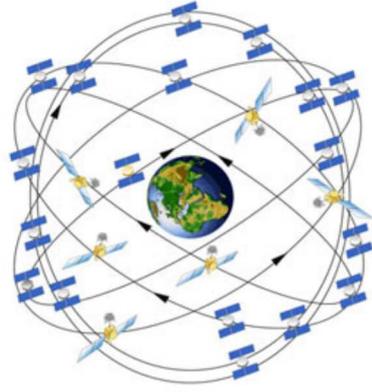


OPERA: Schemat pomiaru czasu przelotu neutrin



Global Positioning System

Dygresja: GPS (Global Positioning System)



- Minimum 24 satelity (od czerwca 2011 27 satelitów) na wysokości 20 200 km (okracają Ziemię 2 razy dziennie)
- Sygnały wysyłane z satelit na dwóch podstawowych częstotściach: 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 częstotściach jednocześnie: dokładności **< 1cm**

Dygresja: pomiar położenia - ITRF/ETRF

- 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

Terminologia:

ITRF/ETRF:

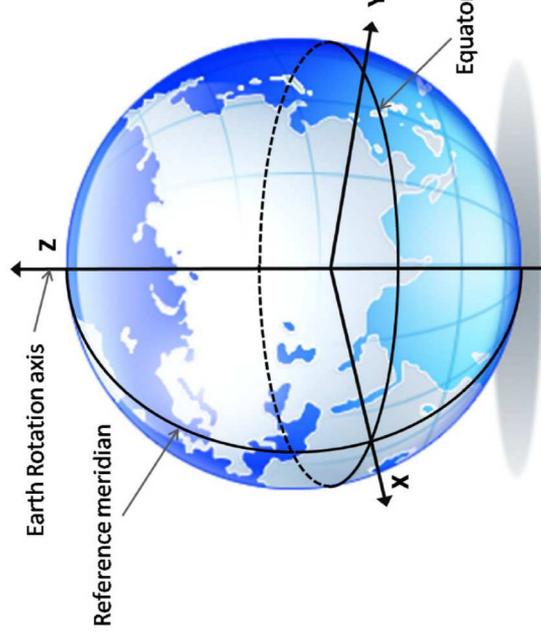
International/European

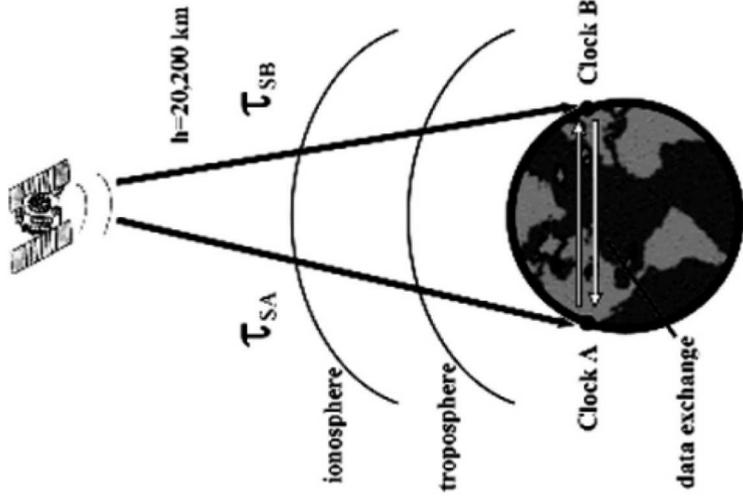
Terrestrial Reference Frame

ITRS/ETRS:

International/European

Terrestrial Reference System

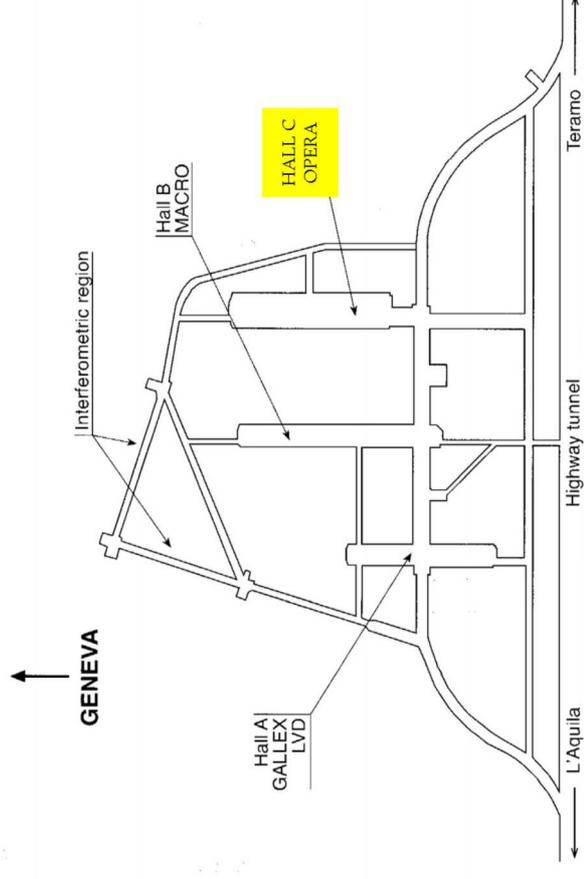
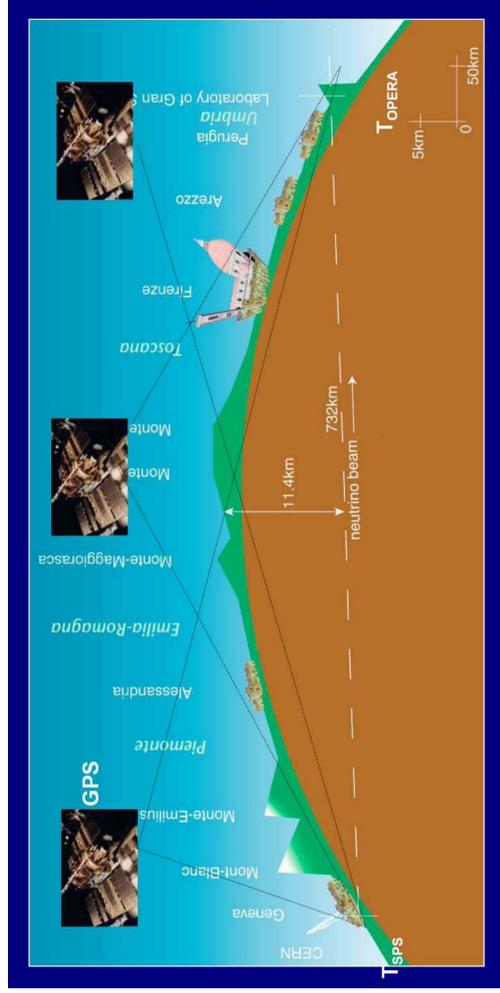




Metoda Common-View

- 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

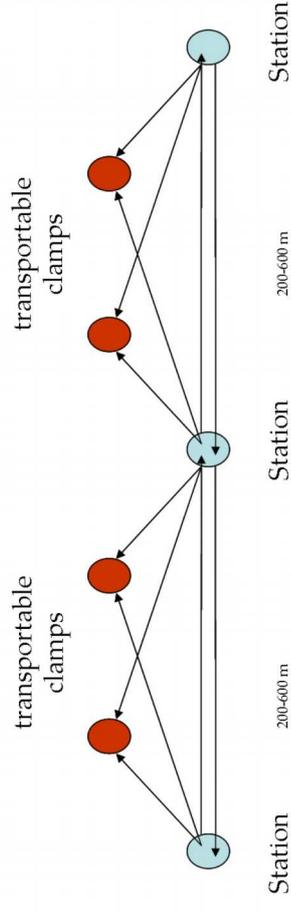
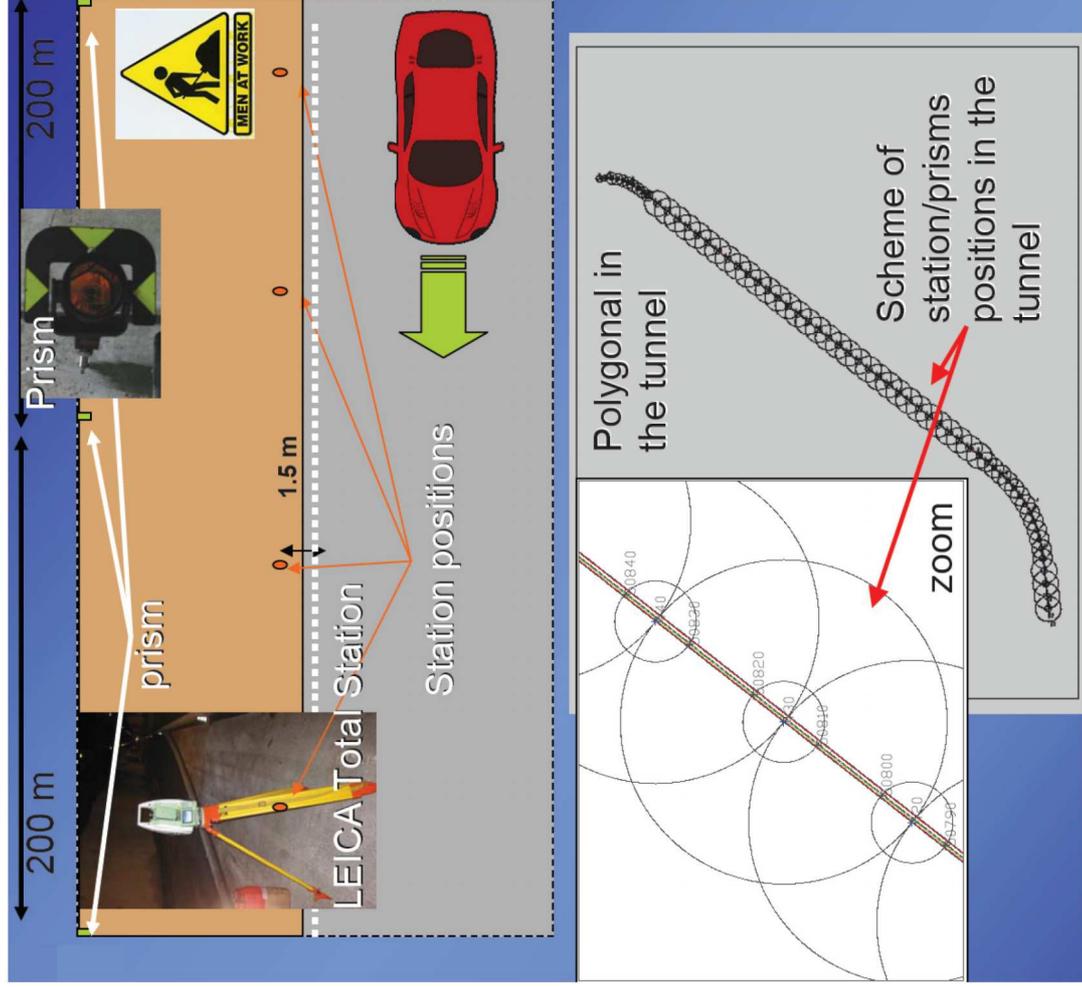


Pomiary geodezyjne w Gran Sasso:

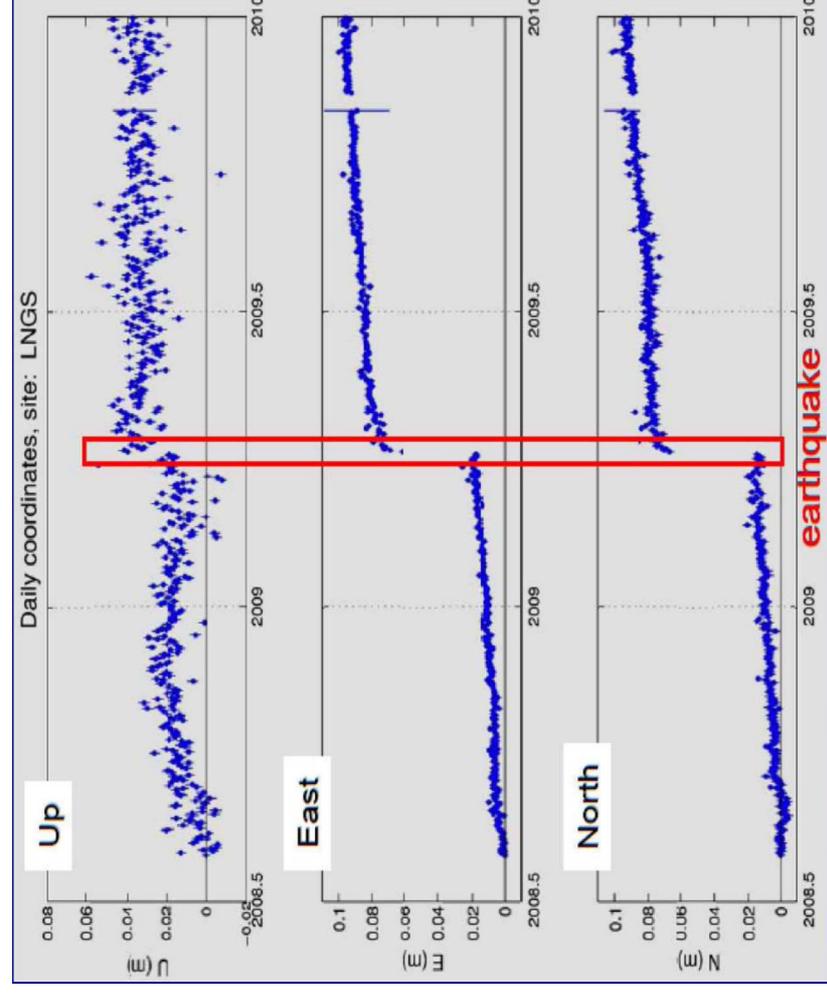
- Pomiary pozycji dwóch punktów referencyjnych na obu brzegach 10 km tunelu za pomocą precyzyjnych odbiorników GPS
- Pomiary odległości pod ziemią metodą triangulacji (przeniesienie pomiarów zrobionych za pomocą GPS do detektora pod ziemię)

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

Pomiar geodezyjny



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



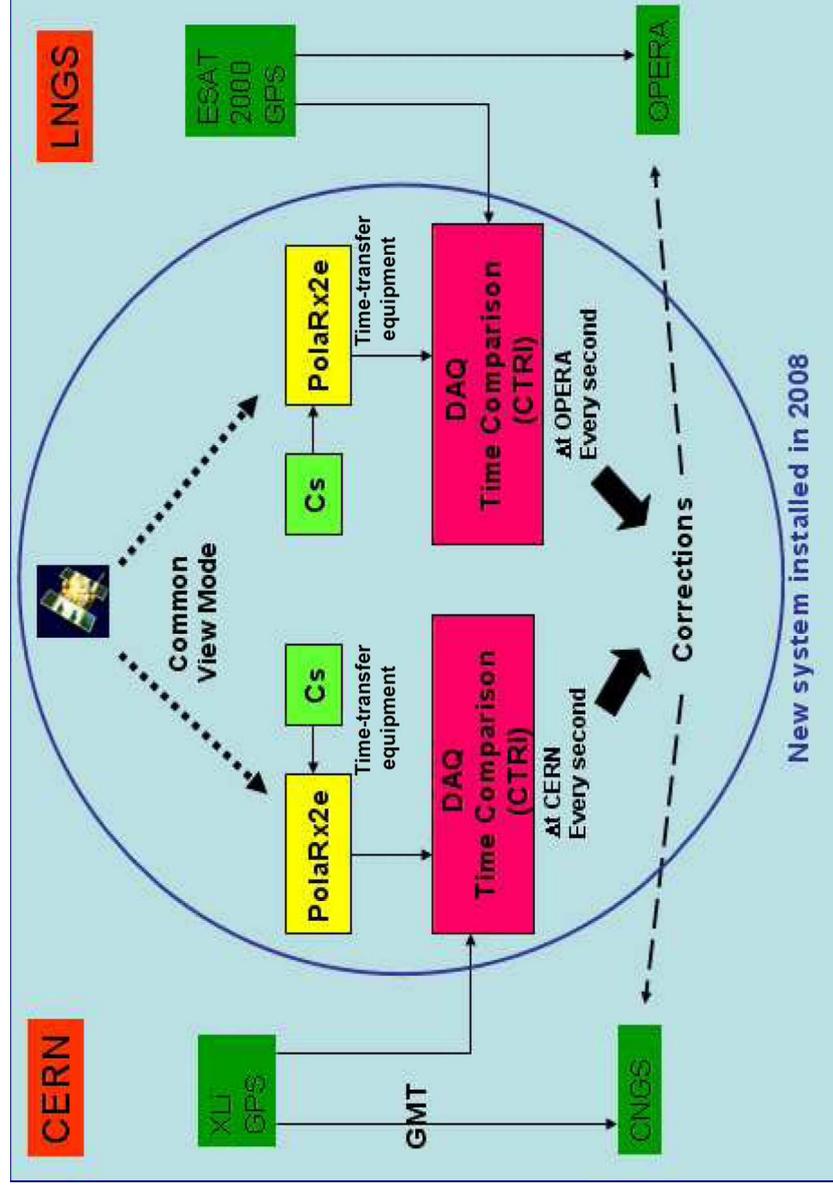
- Końcowa analiza w układzie ETRF2000
- Odległość pomiędzy tarczą a detektorem OPERA:
 $d_{TO} = (730534.61 \pm 0.20)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorem BCT a tarczą:
 $d_{BT} = (743.391 \pm 0.002)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorami: BCT i OPERA:
 $d_{BO} = d_{BT} + d_{TO} = (731278.0 \pm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

OPERA: Pomiary czasu

Pomiar czasu:

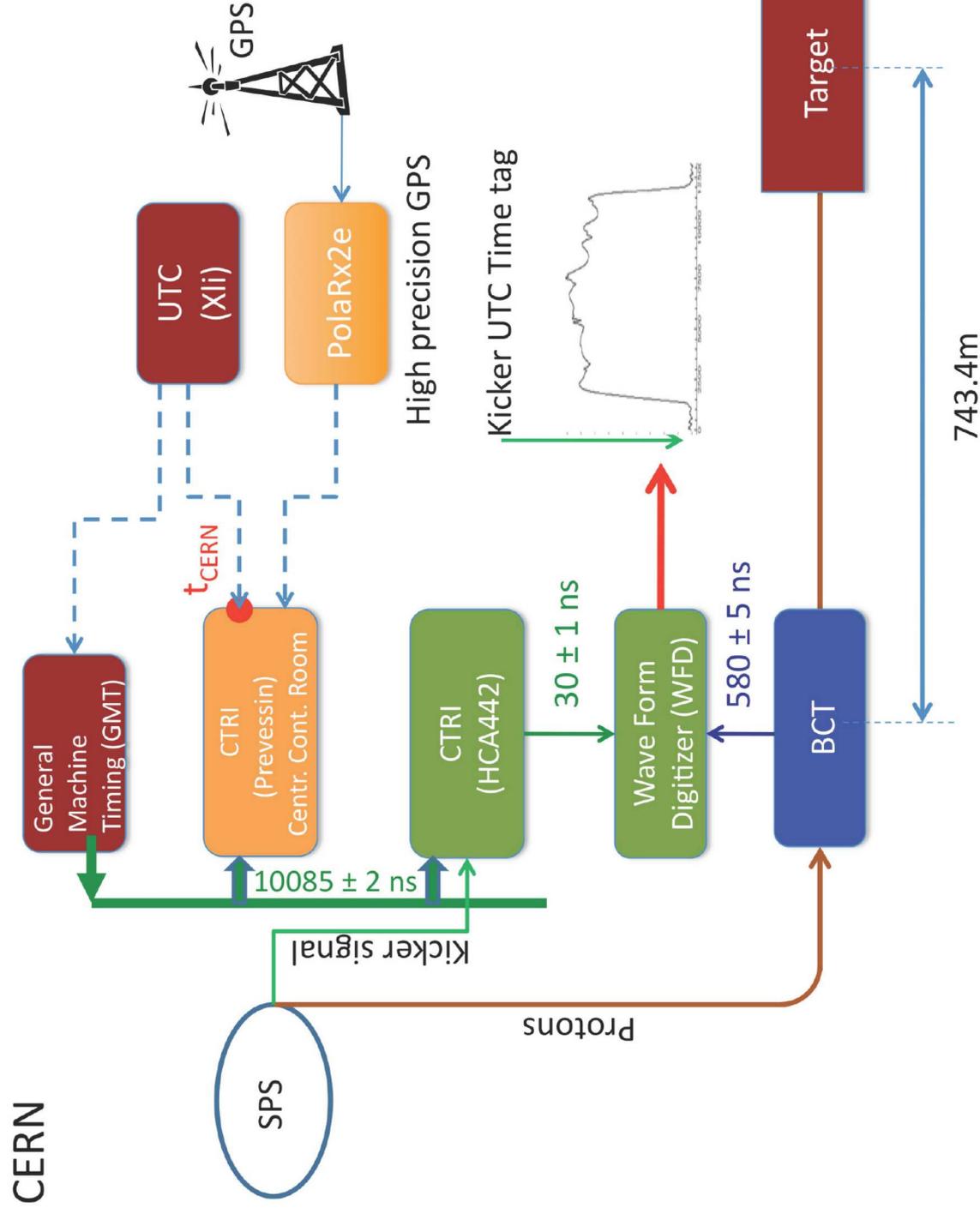
- synchronizacja pomiędzy pomiarami czasu w CERN i Gran Sasso (odbiorniki GPS pracujące w trybie Common-View)
- poprawki na opóźnienia propagacji sygnału w CERN i Gran Sasso

System pomiaru czasu

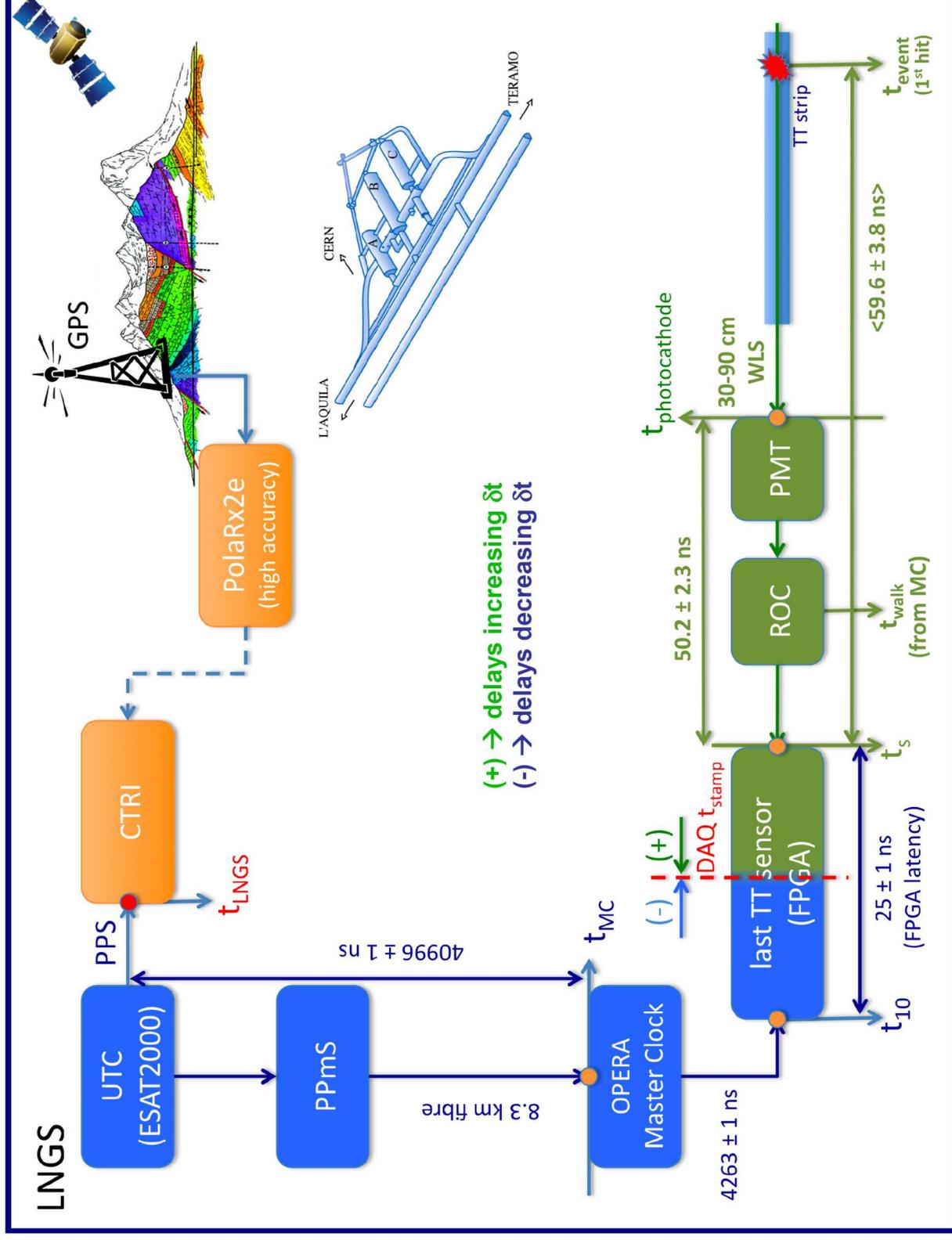


- CERN i Gran Sasso: dwa precyzyjne GPS + 2 atomowe Cs zegary
- Standardowe GPS'y (dokładność $\sim 100\text{ns}$) - czas UTC przekazywany do eksperymentu i systemu akceleratora
- Porównywanie (co 1s) precyzyjnego UTC i UTC ze standardowego systemu

System pomiaru czasu: CERN



System pomiaru czasu: Gran Sasso



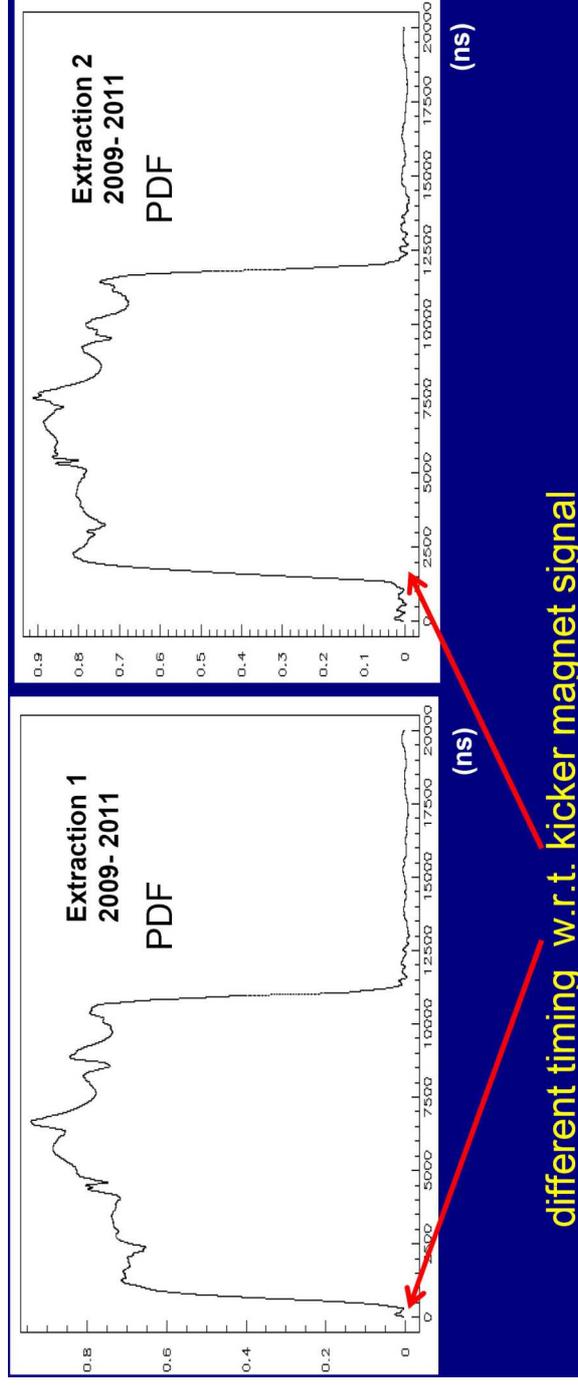
Delay calibrations summary

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

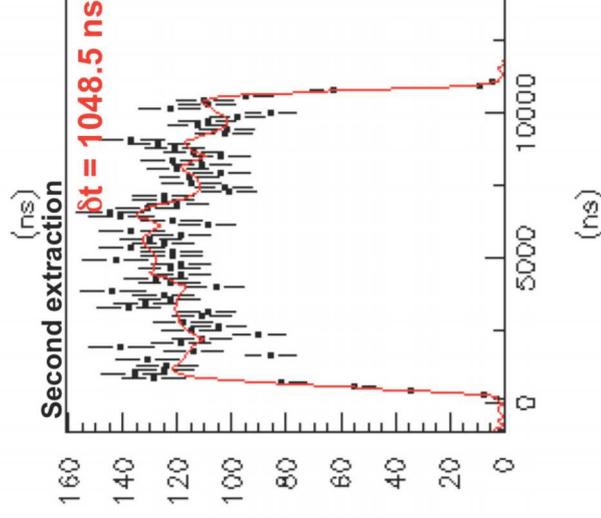
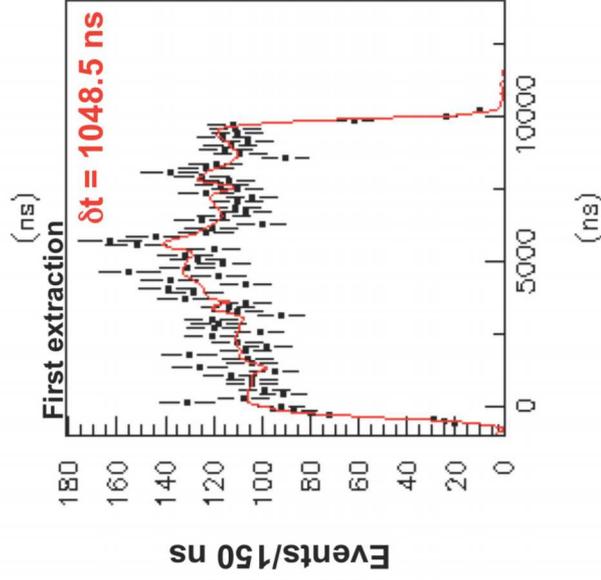
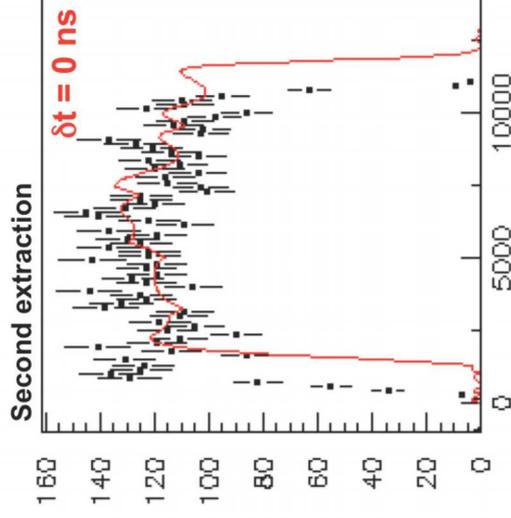
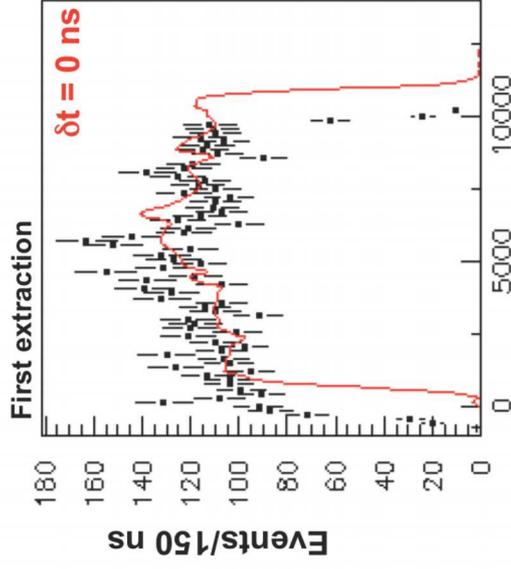
OPERA: Analiza danych

- 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

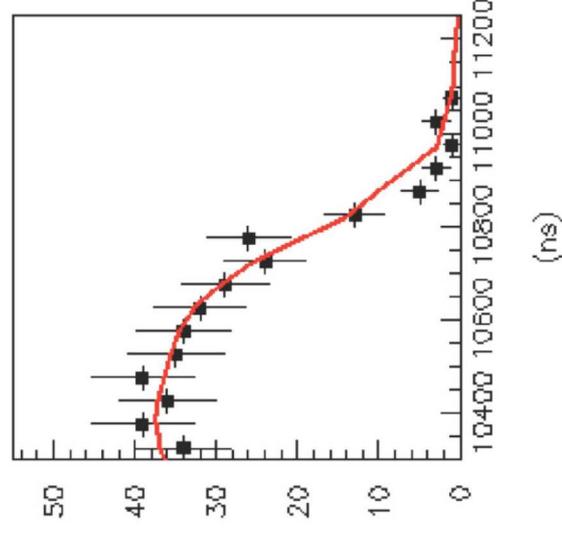
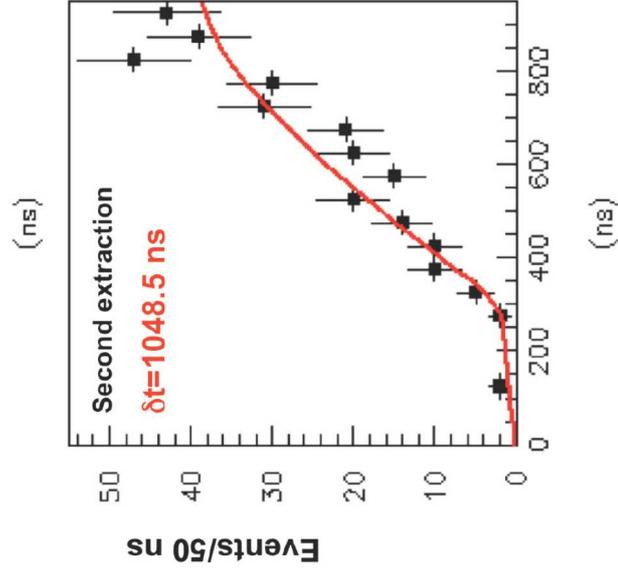
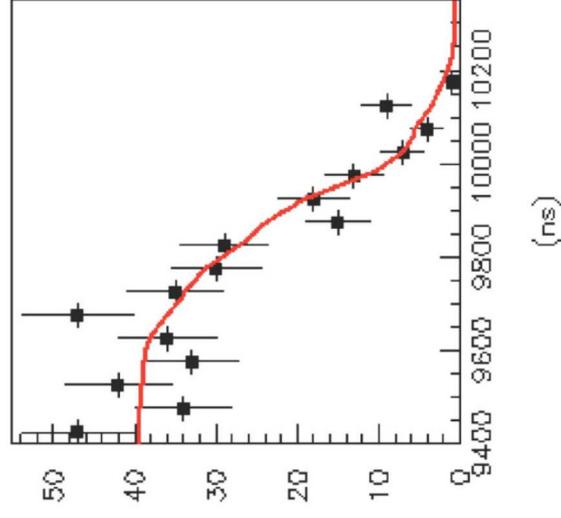
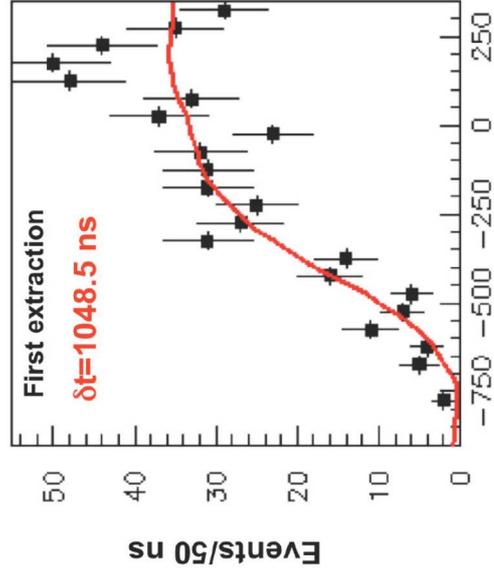


Różnica czasu (bez poprawek, wynik analizy *na ślepo*):

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

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

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



Powiększenie końców
rozkładów.

Analysis cross-checks

- 1) Coherence among CNGS runs/extractions
- 2) No hint for e.g. day-night or seasonal effects:

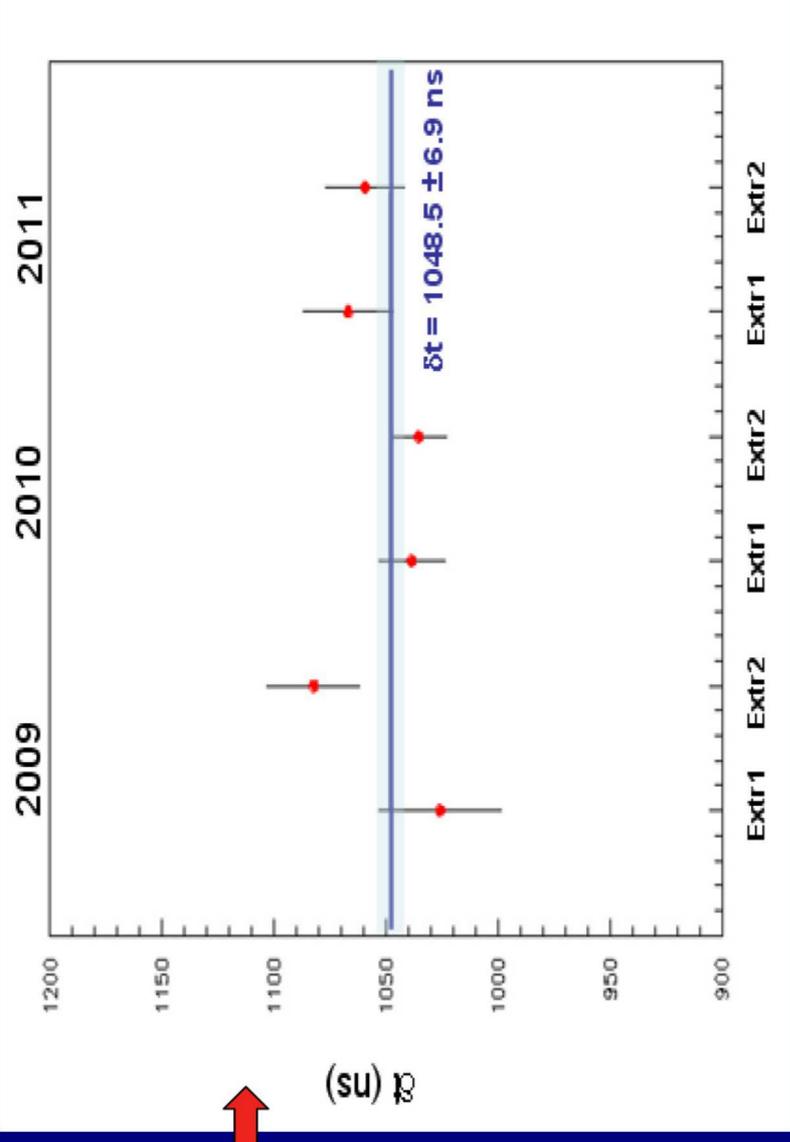
$|\text{d-n}|: (17.1 \pm 15.5) \text{ ns}$

$|\text{(spring+fall)} - \text{summer}|: (11.3 \pm 14.3) \text{ ns}$

- 3) Internal vs external events:

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

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



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)			
Time-link (ns)	-353	0	
Correction GPS	0	-2.3	
			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

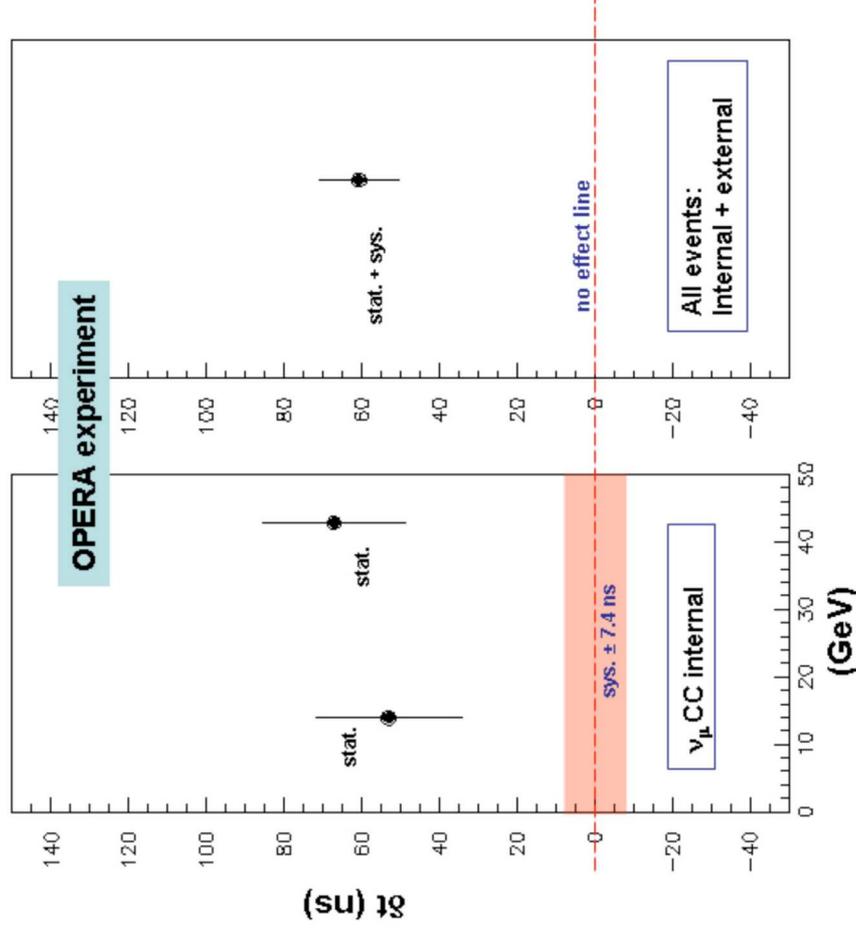
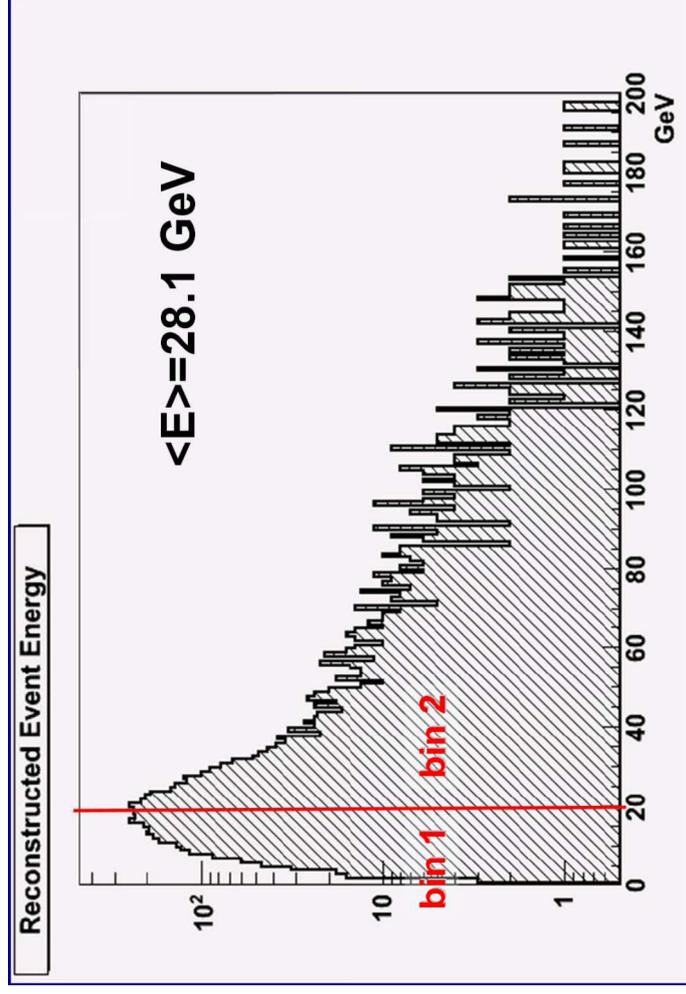
Końcowy wynik

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

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

Znaczoność statystyczna na poziomie 6.0σ

Poszukiwanie zależności od energii



- Tylko wewnętrzne oddziaływania $\nu_\mu \text{ CC}$: 5489 przypadków

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

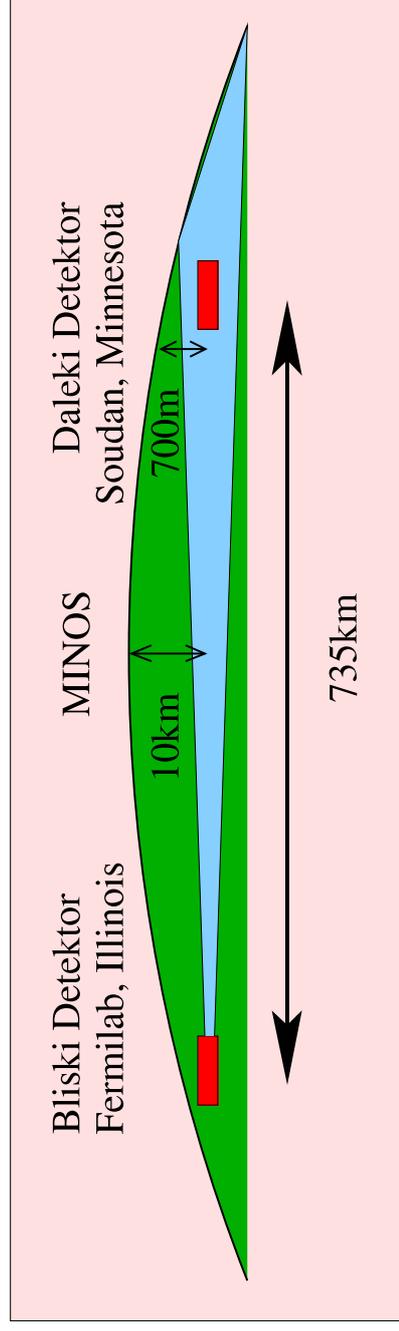
Poprzednie pomiary prędkości neutrin

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 zarejestrowane w czasie 6s
- Detektor Kamiokande II: 12 oddziaływań neutrin ($\bar{\nu}_e$), energie 7.5-36 MeV, zarejestrowane w czasie 13s
- Ograniczenie na prędkość neutrin:

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

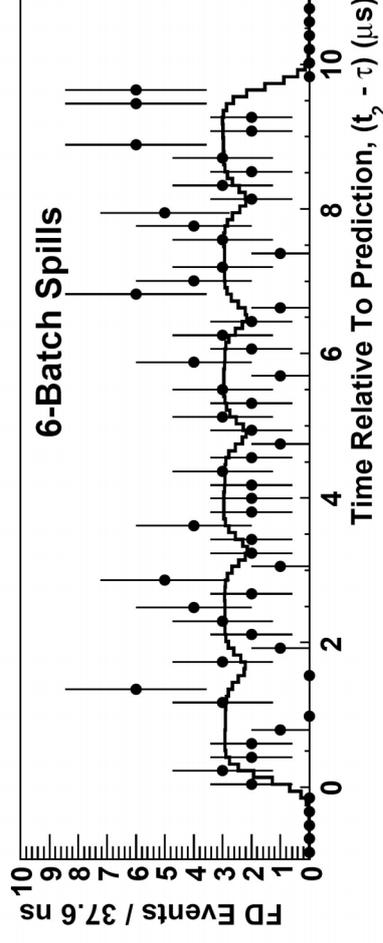
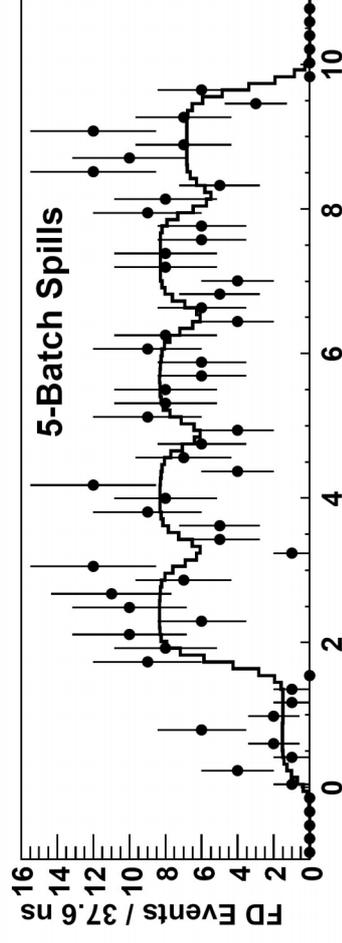
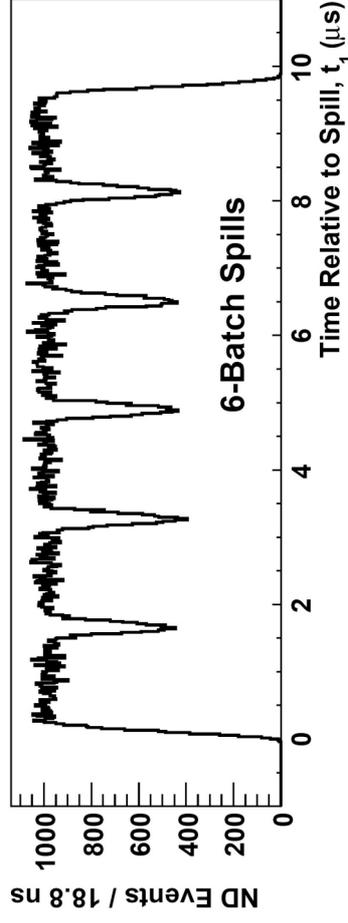
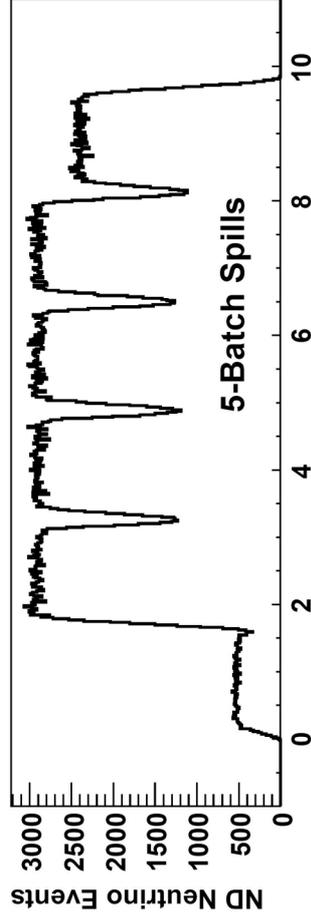
Pomiar w eksperymencie MINOS



- 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



MINOS - funkcja prawdopodobieństwa

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

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

Perspektywy

MINOS:

- Wynik za 6-9 miesięcy:
 - zwiększenie statystyki w stosunku do pomiaru z 2007 roku
 - lepsze wykorzystanie czasowej struktury wiązki
 - zmniejszenie największych niepewności systematycznych
- Wynik za ~ 1 rok:
 - Modernizacja systemu pomiaru czasu
 - Analiza nowych danych: mała statystyka, ale lepsza precyzja
 - Bezpośrednie sprawdzenie pomiaru OPERY przez użycie czasowego profilu wiązki
- MINOS+(2013+):
 - Cel: dokładność rzędu 1ns

T2K (eksperyment w Japonii):

- odległość od źródła neutrin do dalekiego detektora 295km
- dwa detektory bliski i daleki
- mniejsze energie (~ 0.6 GeV)
- obecna synchronizacja czasu nieco lepsza niż MINOS'a (rzędu 50 ns)
- mała statystyka, ponowne zbieranie danych od 2012 roku
- obecnie próby zrozumienia jak poprawić dokładność eksperymentalną

- **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:

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

- Duża znaczącość statystyczna wyniku
- 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 $\sim 10\text{s}$

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

- Eksperymenty, które mogą zweryfikować wynik OPERY:
 - MINOS
 - MINOS+(2013-2015)
 - T2K - odległość 295km