

# 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  $\delta t$  nanosekund wcześniej, niż gdyby poruszały się z prędkością światła:

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

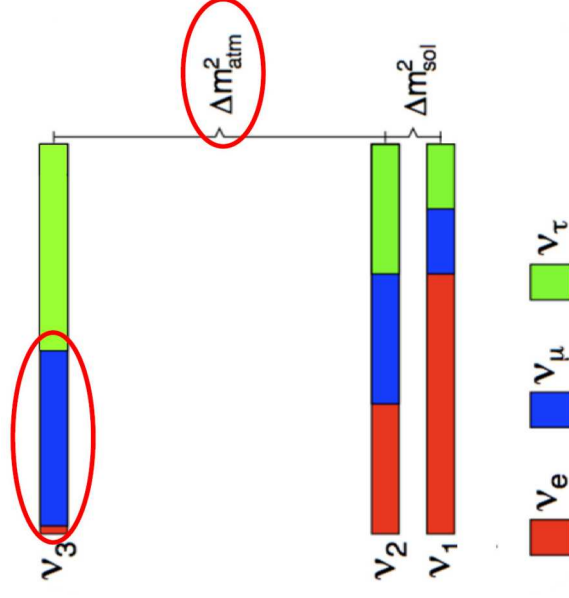
Przez miesiąc od opublikowania wyniku, pojawiło się 95 publikacji komentujących/próbujących wyjaśnić powyższy wynik.

# Wstęp: Program fizyczny eksperymentu OPERA

## Model oscylacji neutrin

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

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



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

neutrina atmosferyczne

poszukiwane, wynik T2K ?

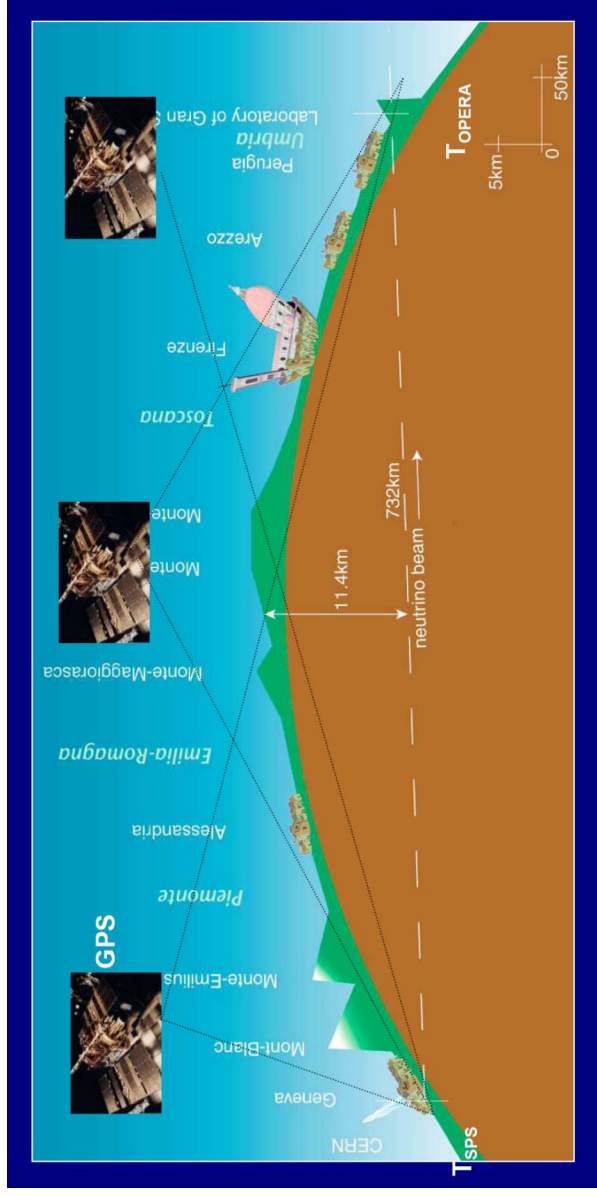
deficyt

neutrin słonecznych

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

# Wstęp: Program fizyczny eksperymentu OPERA

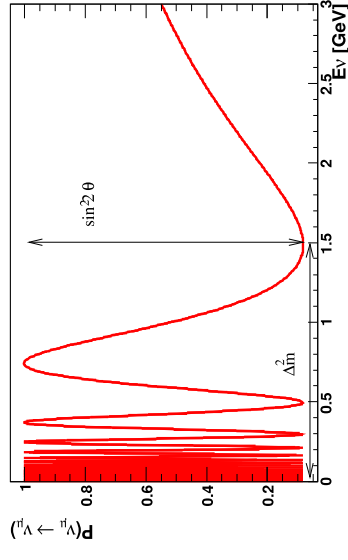
Badanie zjawiska oscylacji w eksperymentach akceleratorowych z długą bazą



- Obserwacje znikania  $\nu_\mu$  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  $\nu_\tau$  w wiążce  $\nu_\mu$



# 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 ( $\sim 16000$  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  $20\text{cm}$  (nowy pomiar w 2010 roku)

W rezultacie dokładność czasu przelotu (TOF) rzędu  $10\text{ns}$  (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

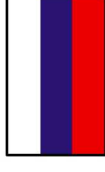


Bologna  
LNF Frascati  
L'Aquila  
Naples  
Padova  
Rome  
Salerno

**Korea**  
Jinju



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



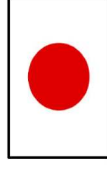
**Switzerland**  
Bern  
ETH Zurich



**Turkey**  
METU Ankara



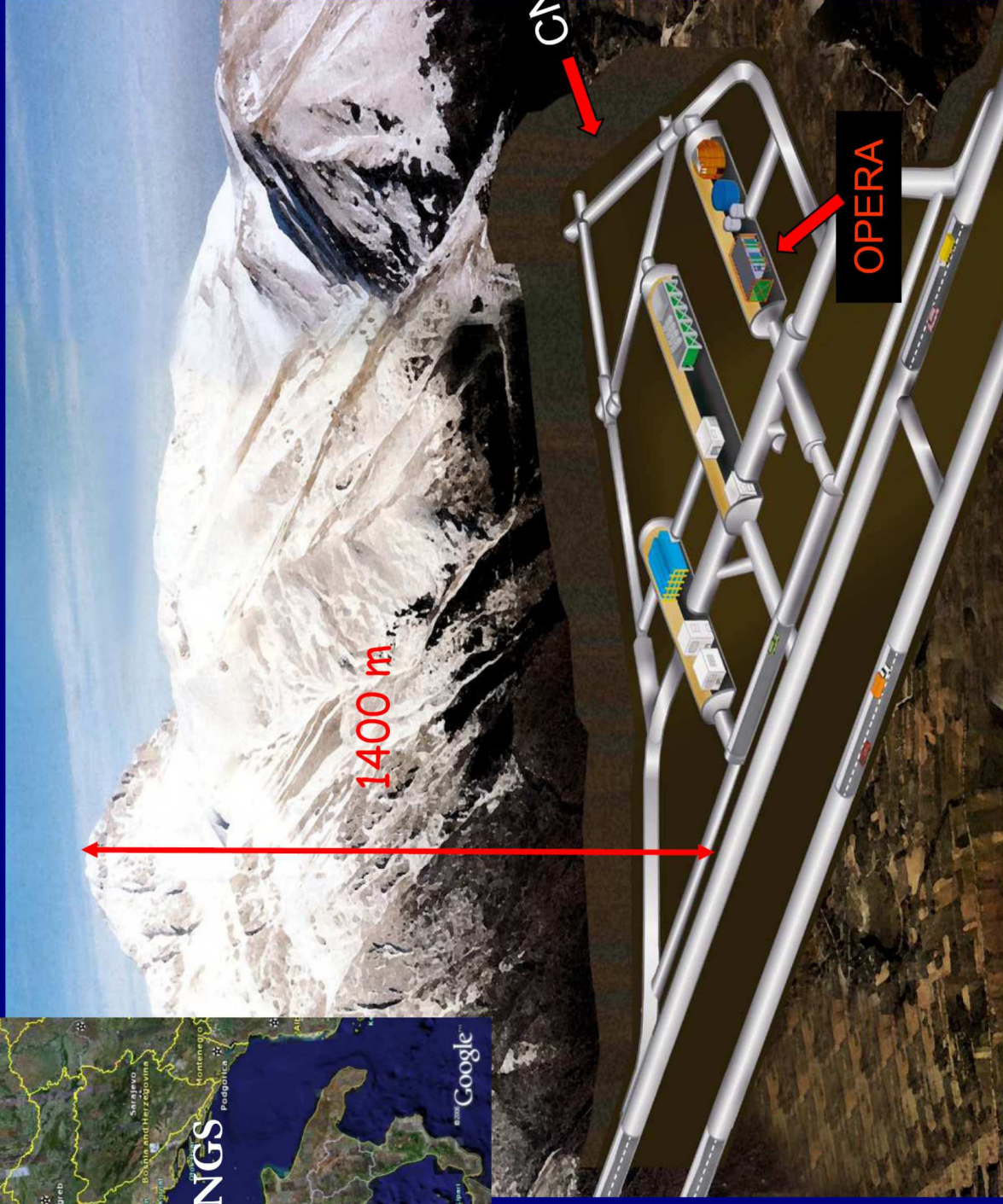
**Japan**  
Aichi  
Toho  
Kobe  
Nagoya  
Utsunomiya



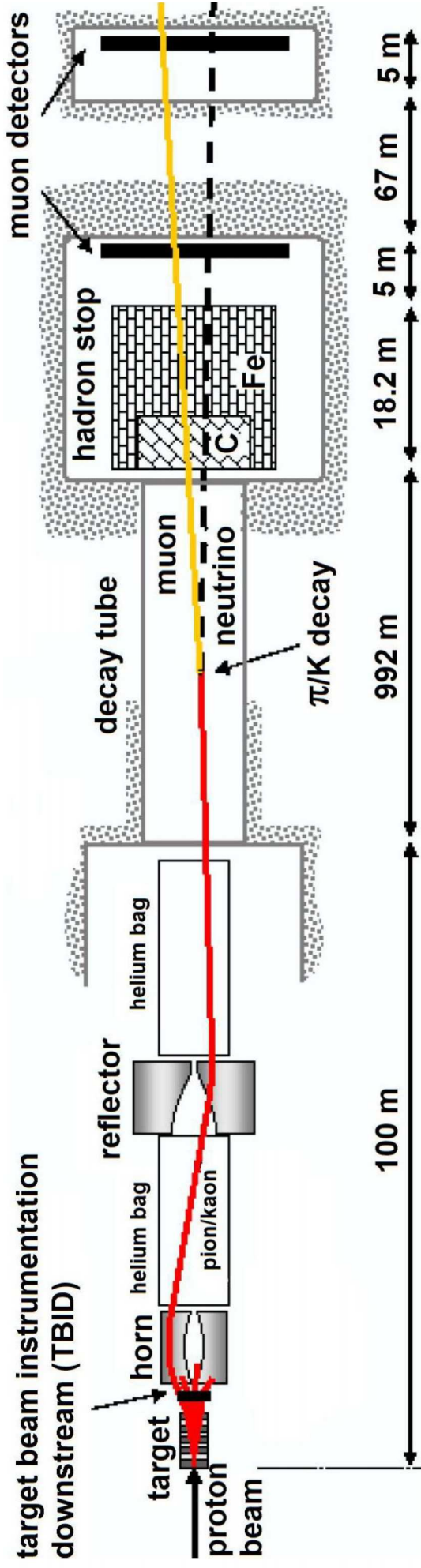
# Wiązka neutron CNGS



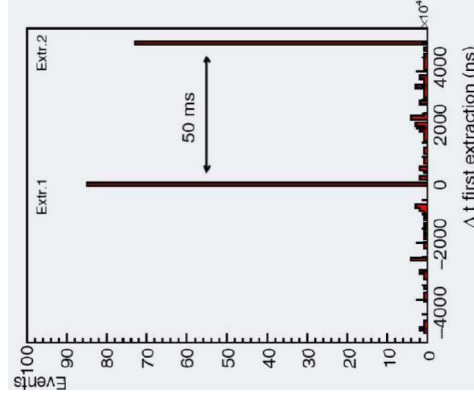
# Wiązka neutron CNGS (CERN-Gran Sasso)



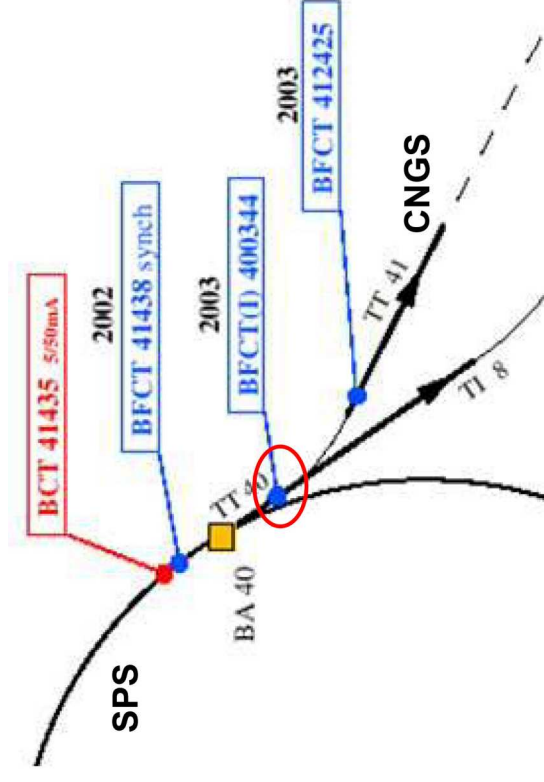
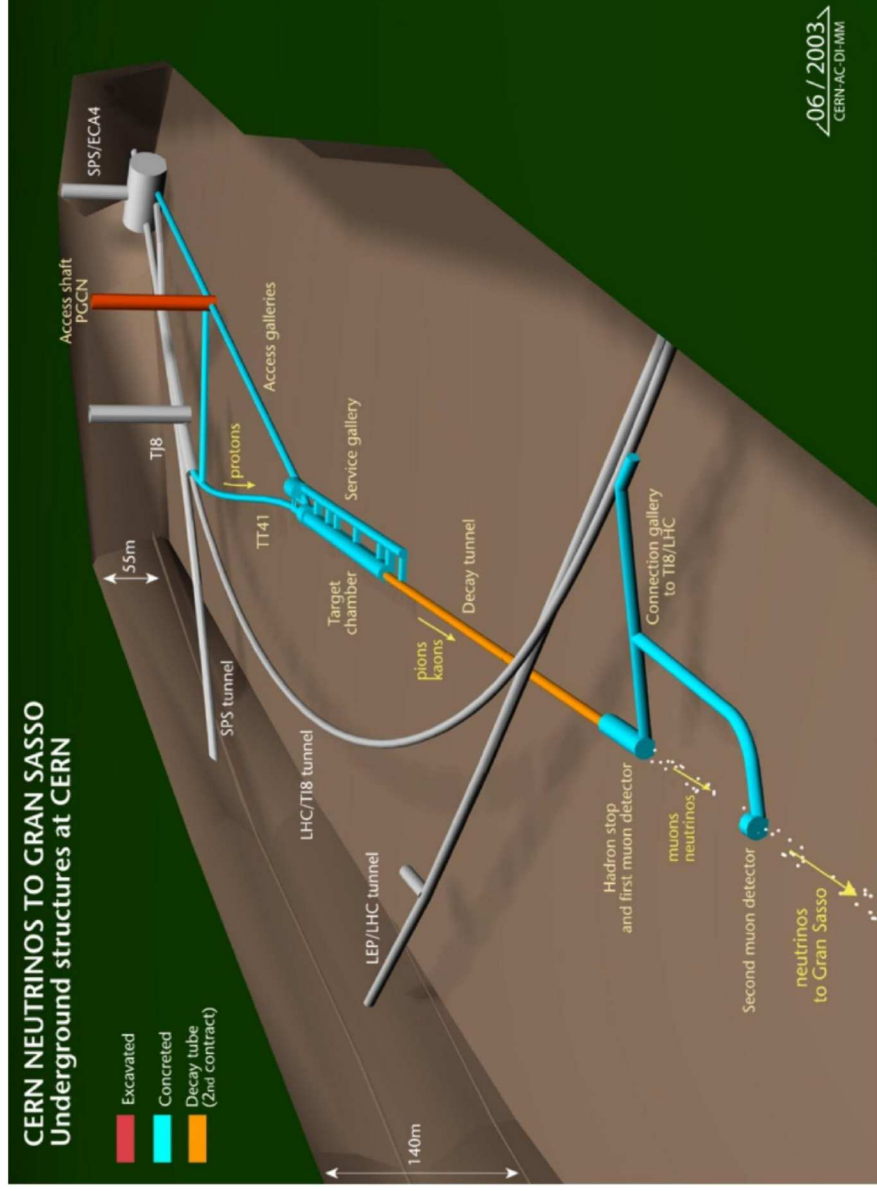
# Wiązka neutron CNGS



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



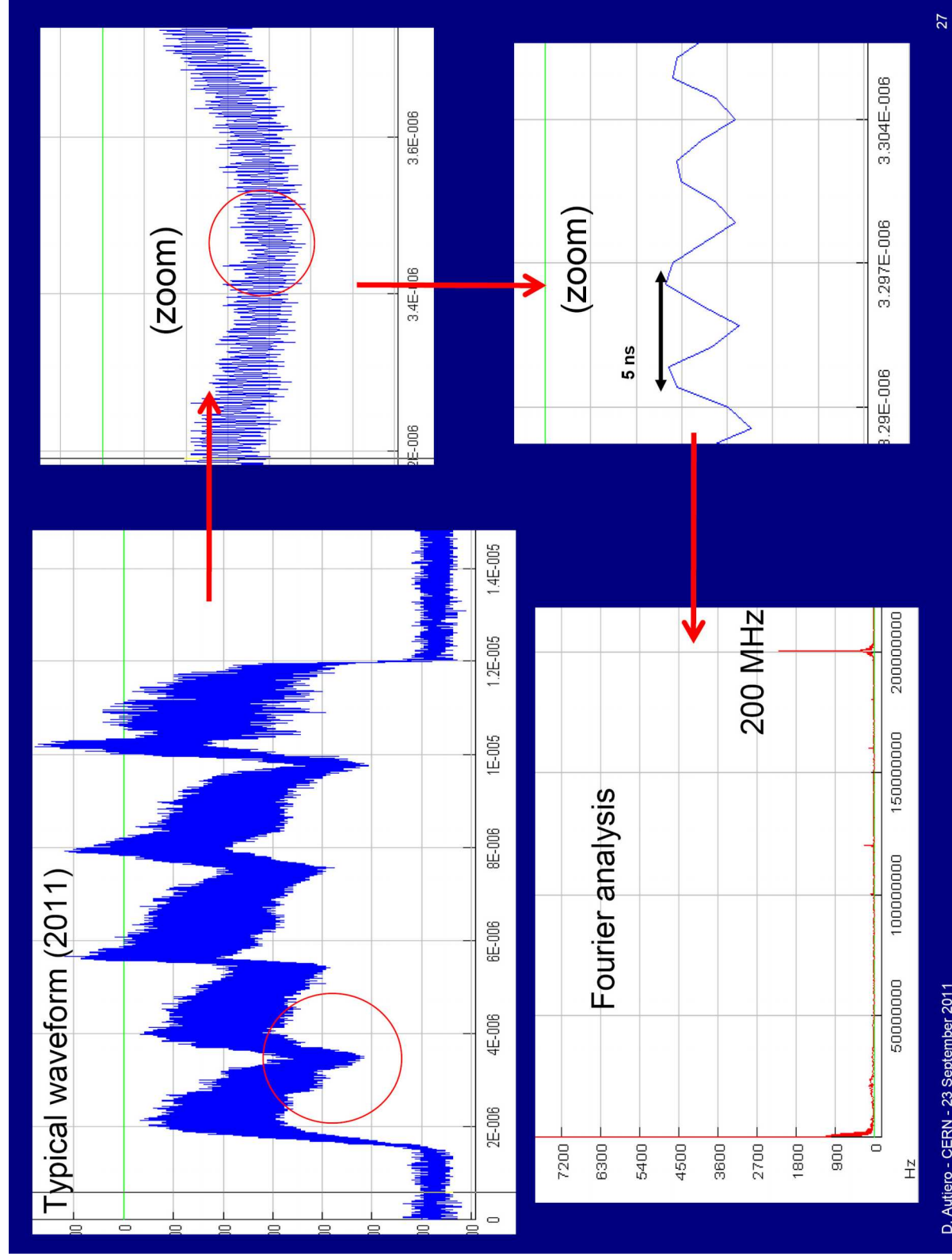
# Wiązka neutrin CNGS



BCT (Beam Current Transformer):

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

# OPERA: Profil czasowy paczki protonów

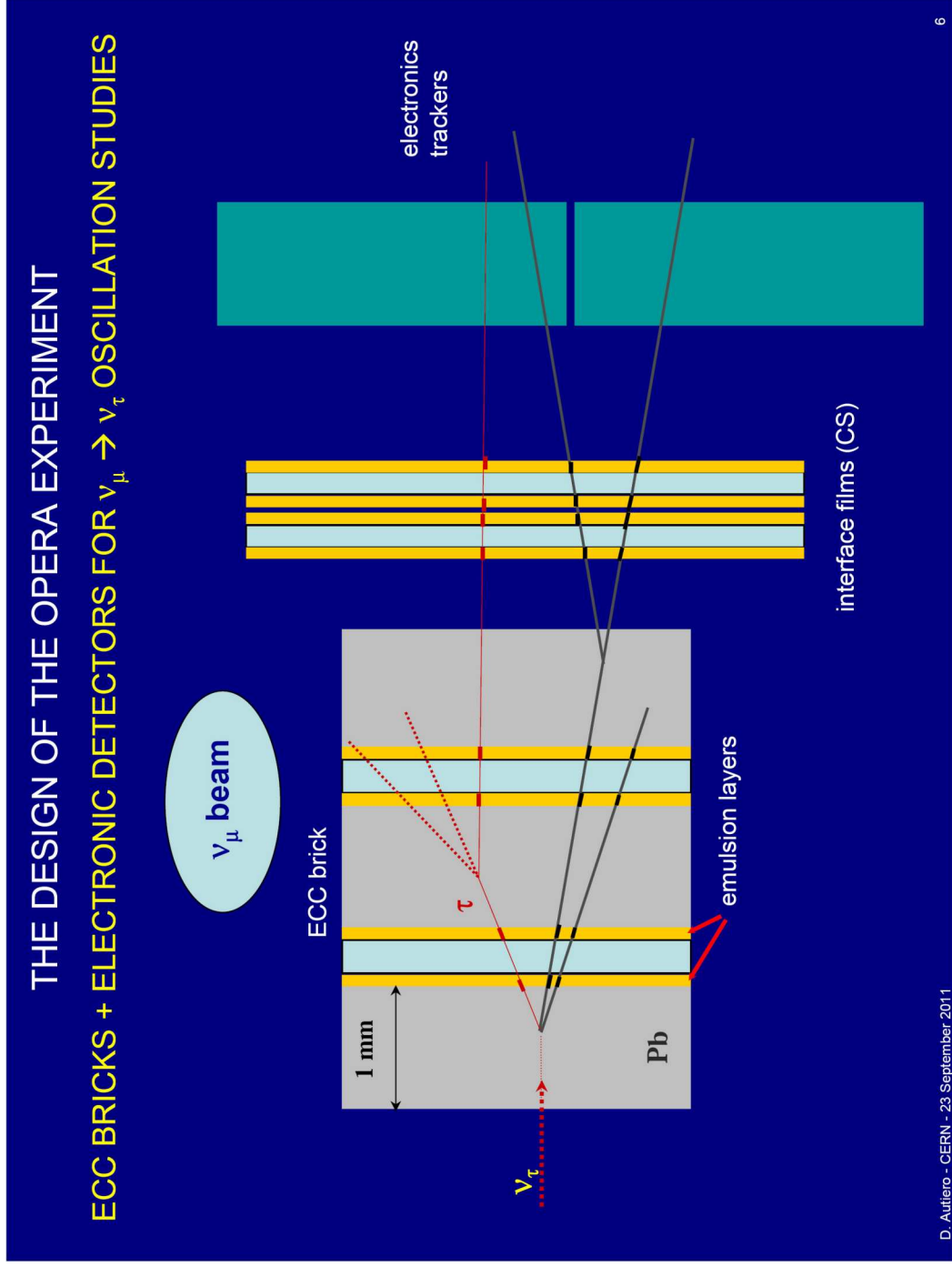


D. Autiero - CERN - 23 September 2011

## 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

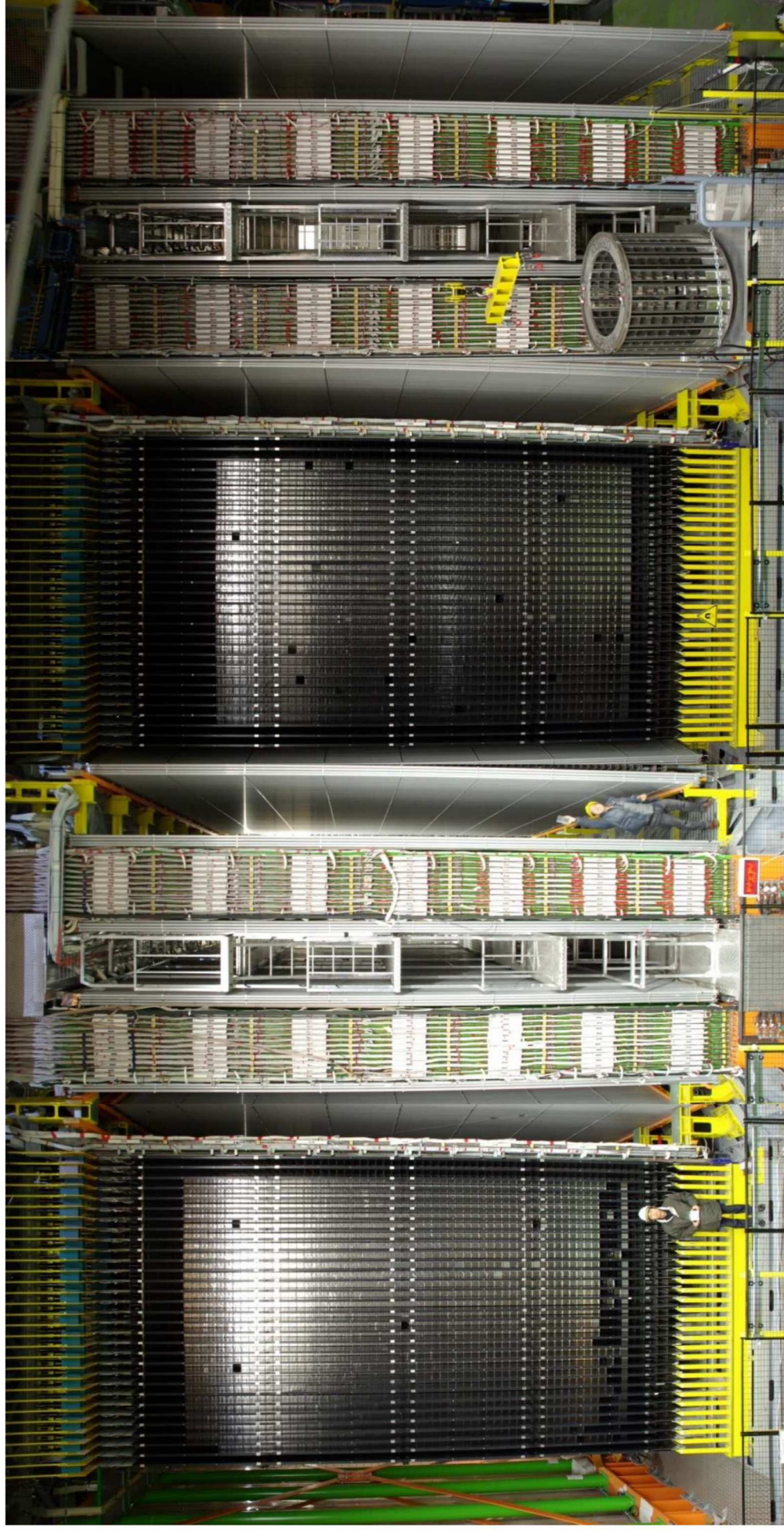
Dla taonu

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

# Detektor OPERA

SM1

SM2



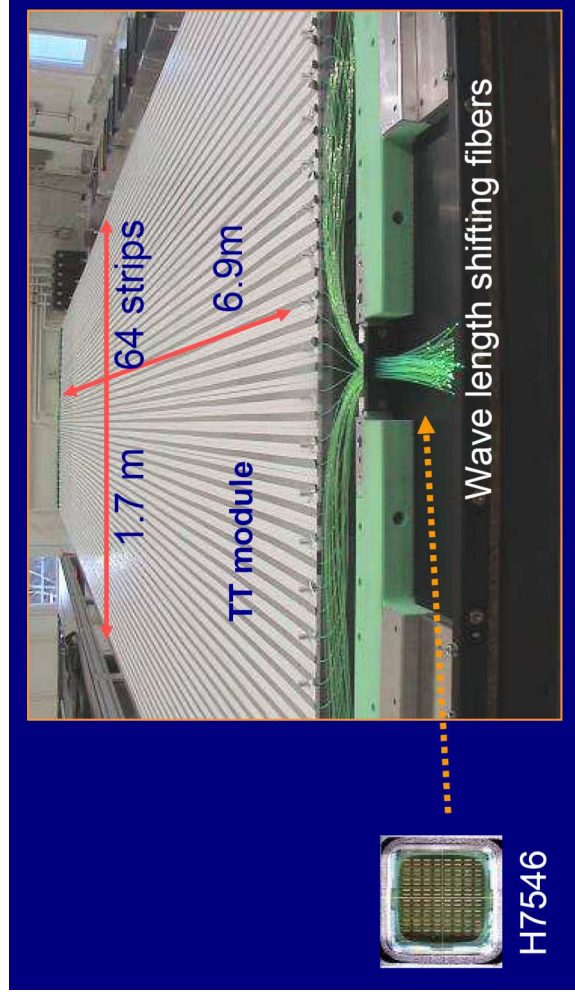
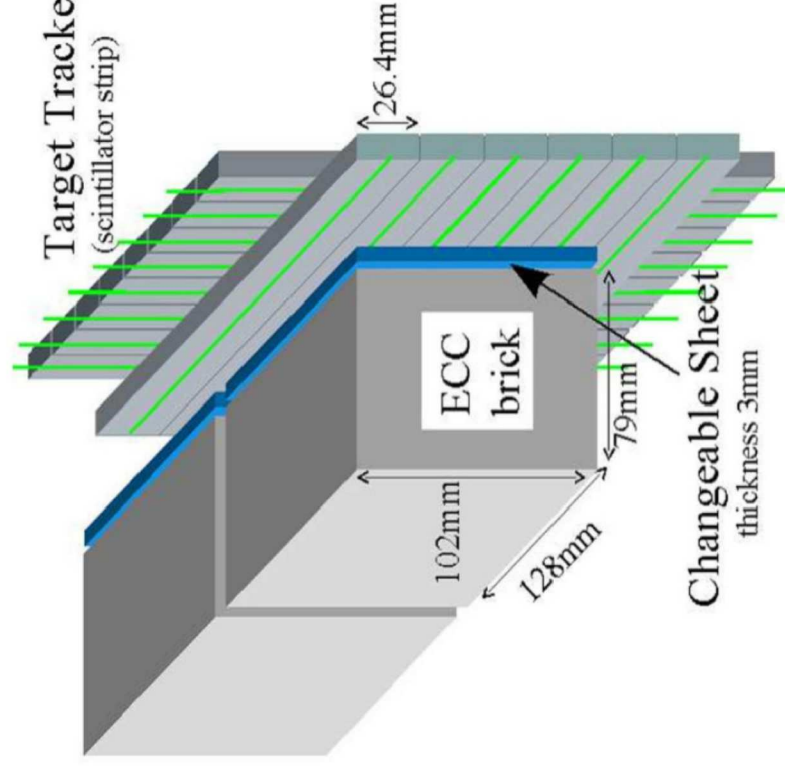
Target area

Muon spectrometer

# TT (Target Tracker)

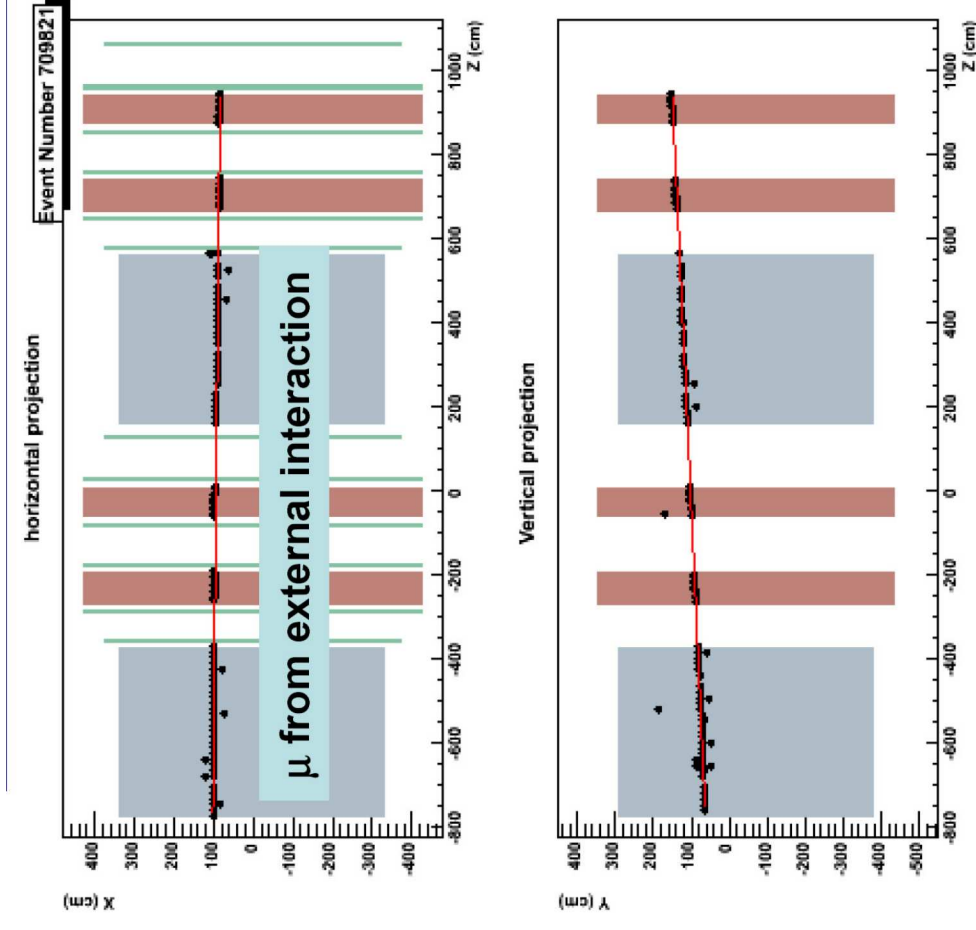
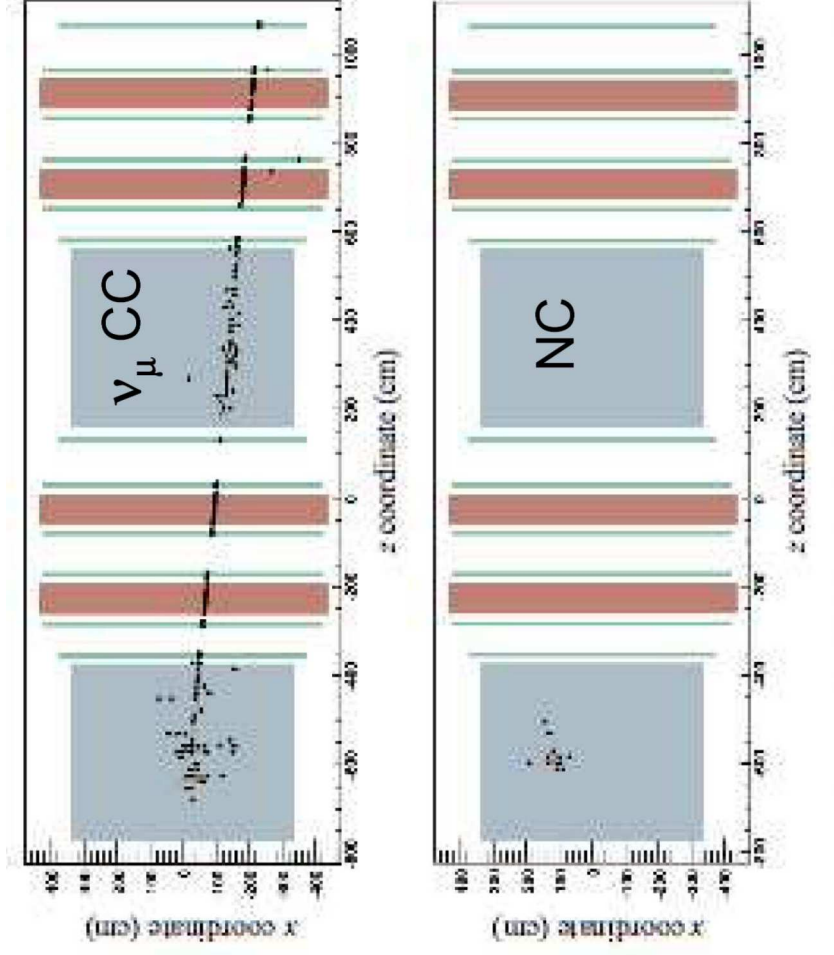
TT(Target Tracker): dwie płaszczyzny scyntylatora, z paskami scyntylatora ułożonymi prostopadłe do siebie.

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

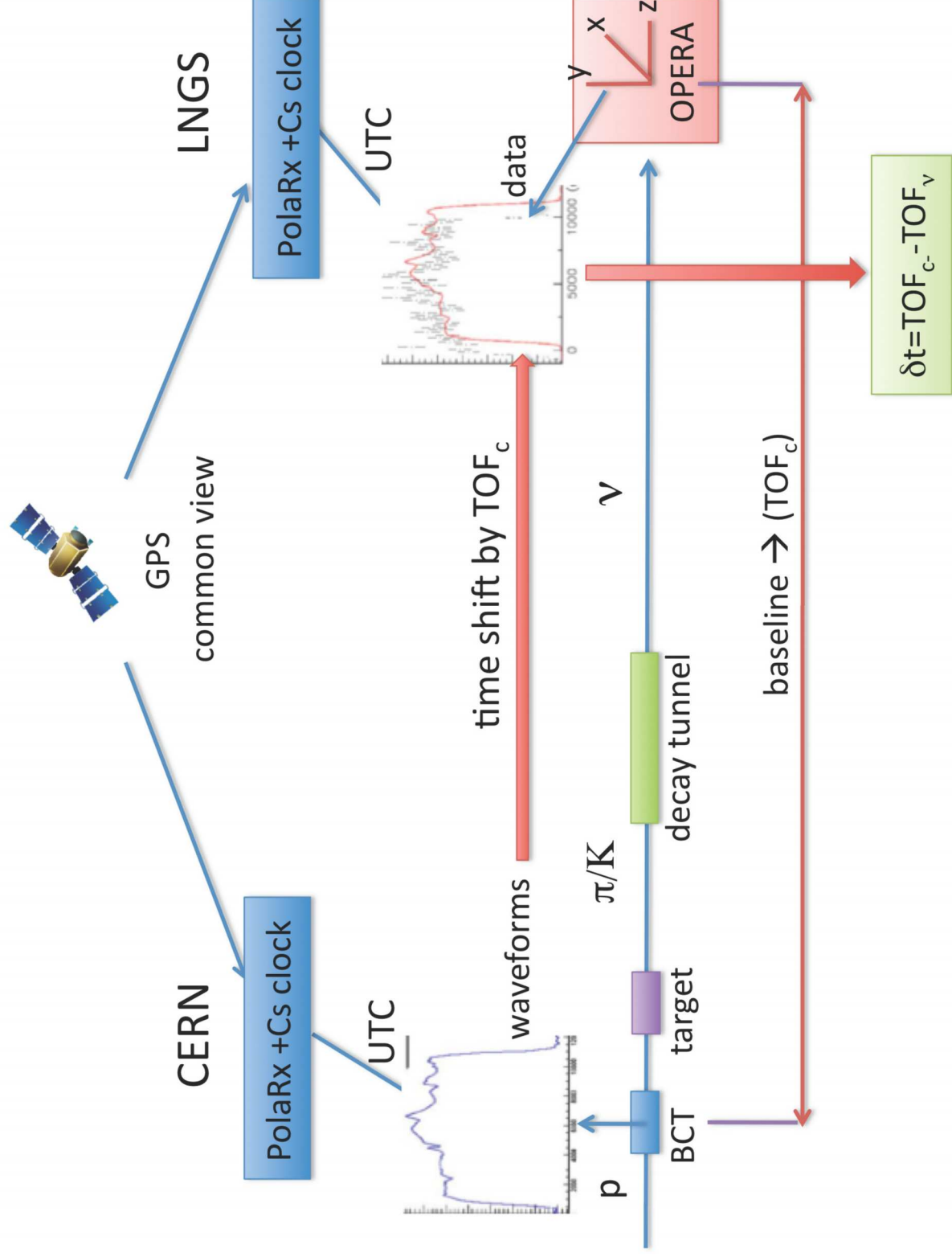




# OPERA: Różne typy oddziaływań w detektorze

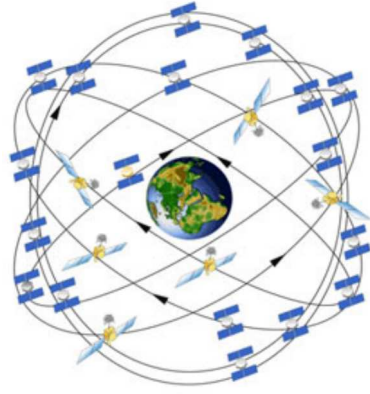


# OPERA: Schemat pomiaru czasu przelotu neutrin



# 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:

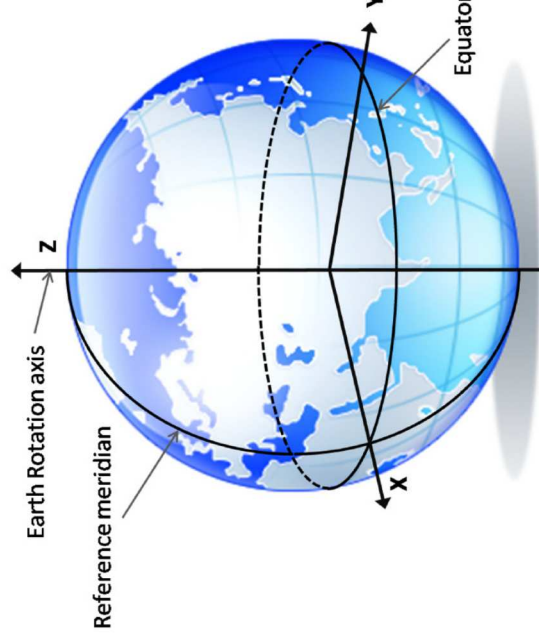
International/European

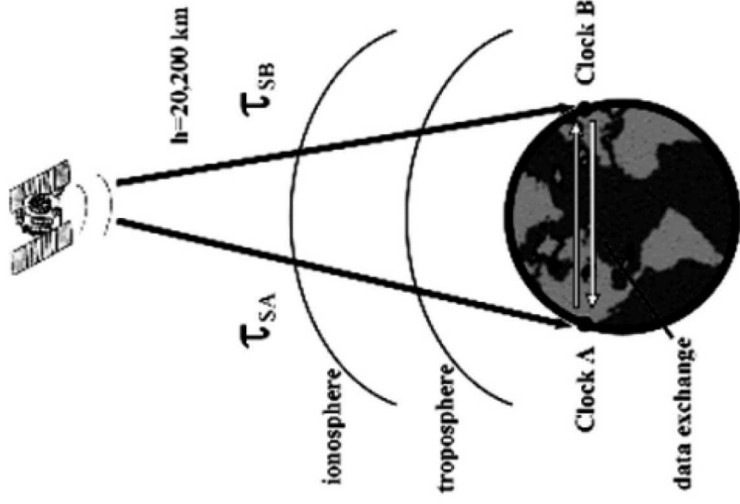
Terrestrial Reference Frame

ITRS/ETRS:

International/European

Terrestrial Reference System



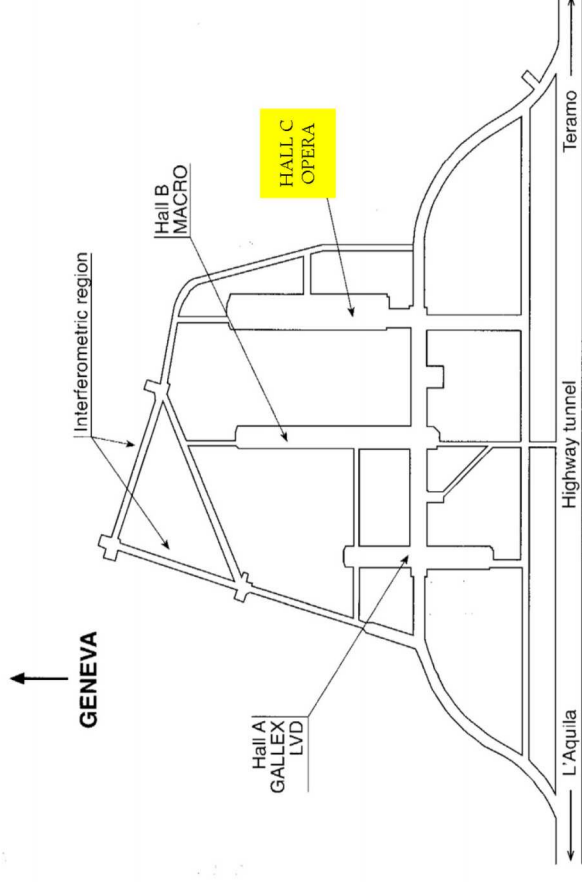
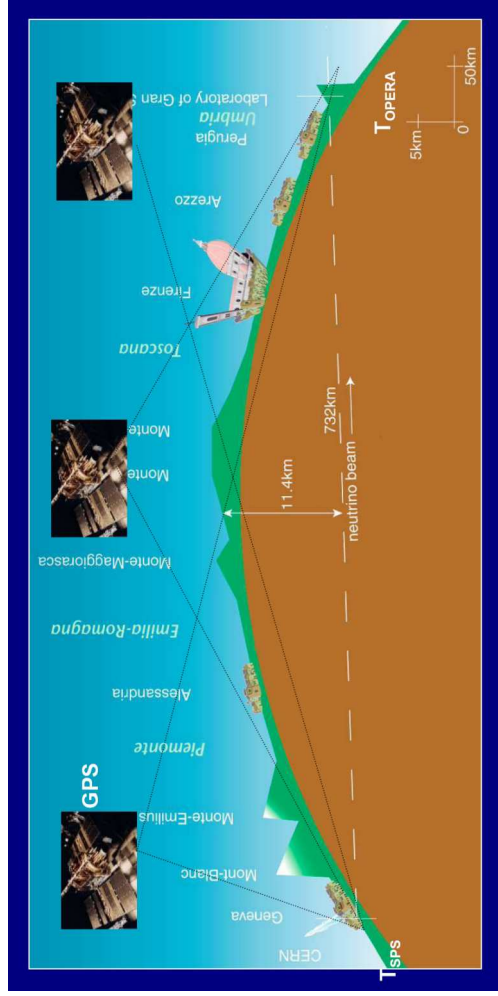


## Metoda Common-View

- 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



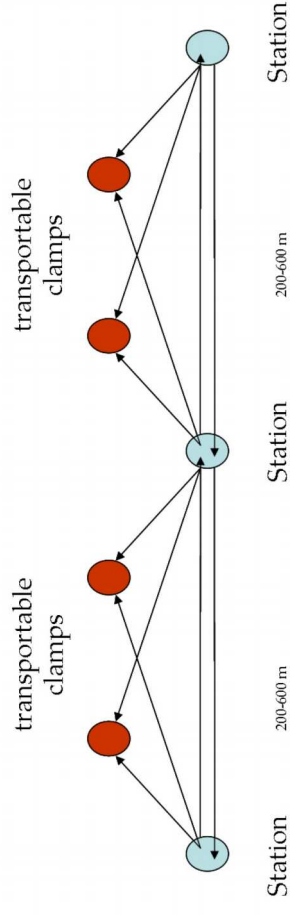
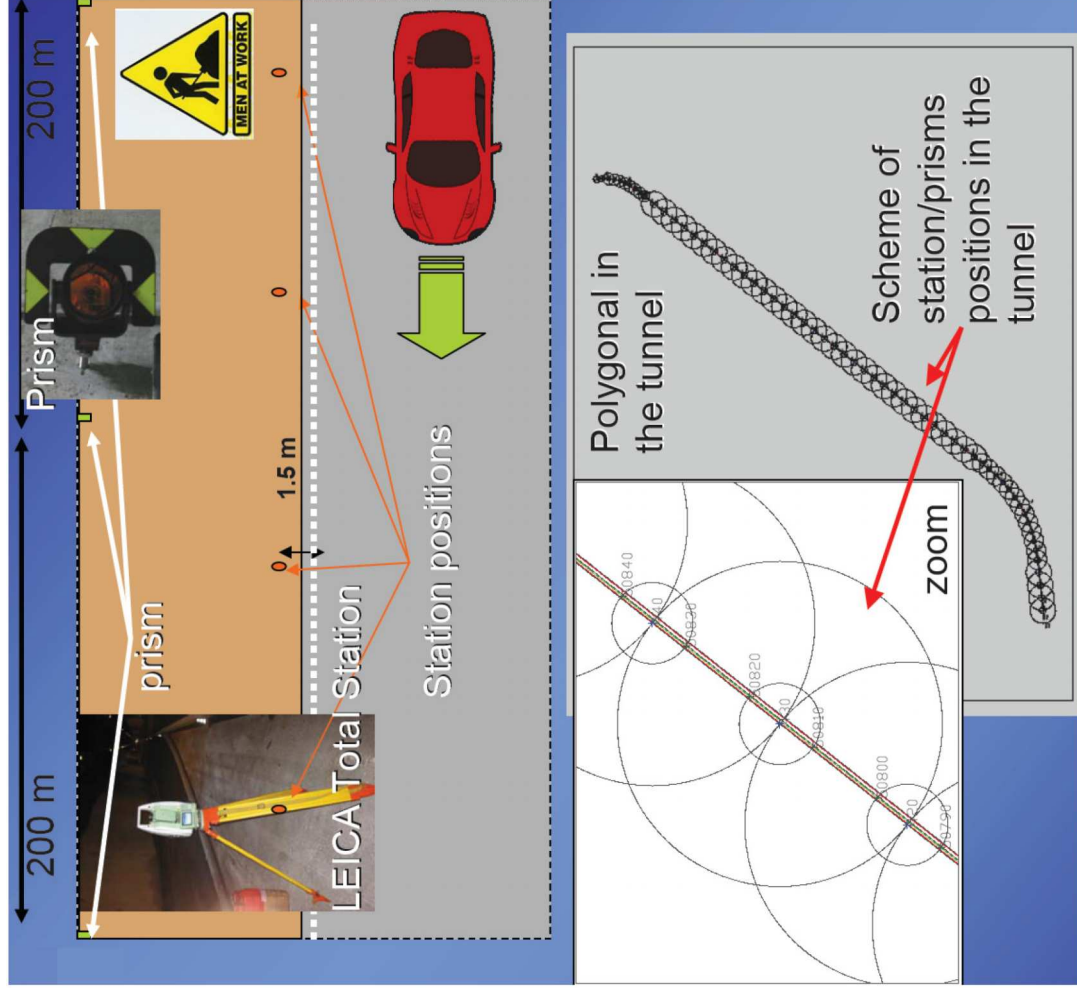


## Pomiary geodezyjne w Gran Sasso:

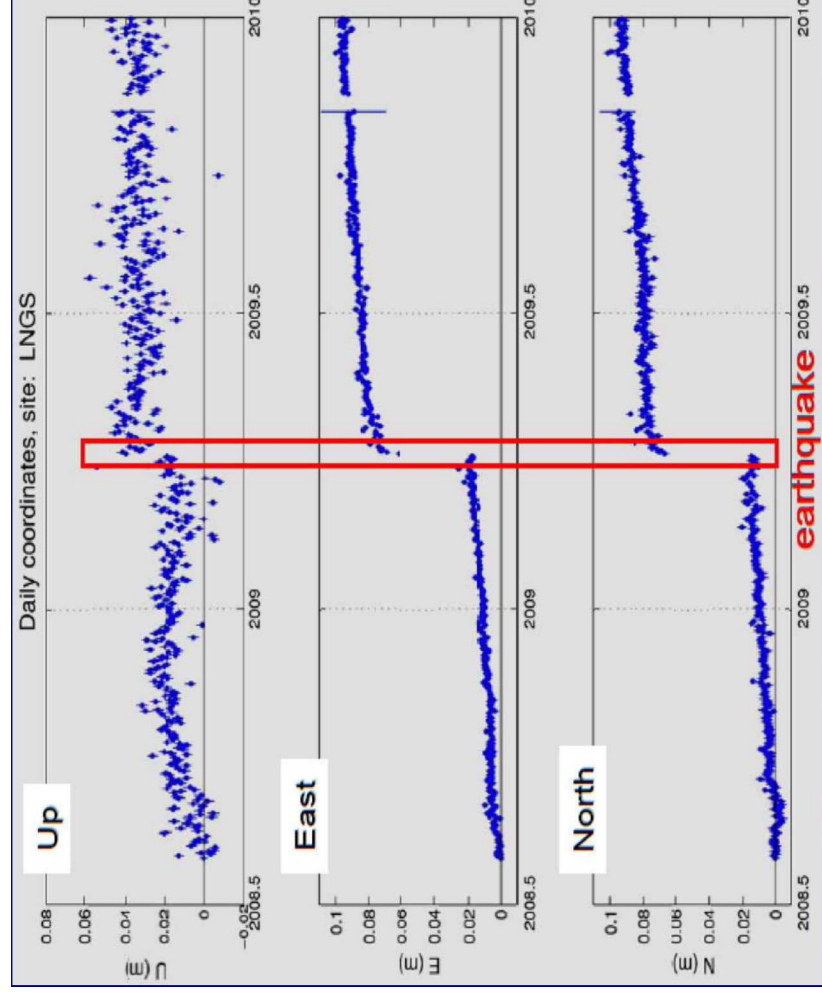
- Pomiary pozycji dwóch punktów referencyjnych na obu brzegach 10 km tunelu za pomocą precyzyjnych odbiorników GPS
- Pomiary odległości pod ziemią metodą triangulacji (przeniesienie pomiarów zrobionych za pomocą GPS do detektora pod ziemię)

- 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"

# Pomiary geodezyjne



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



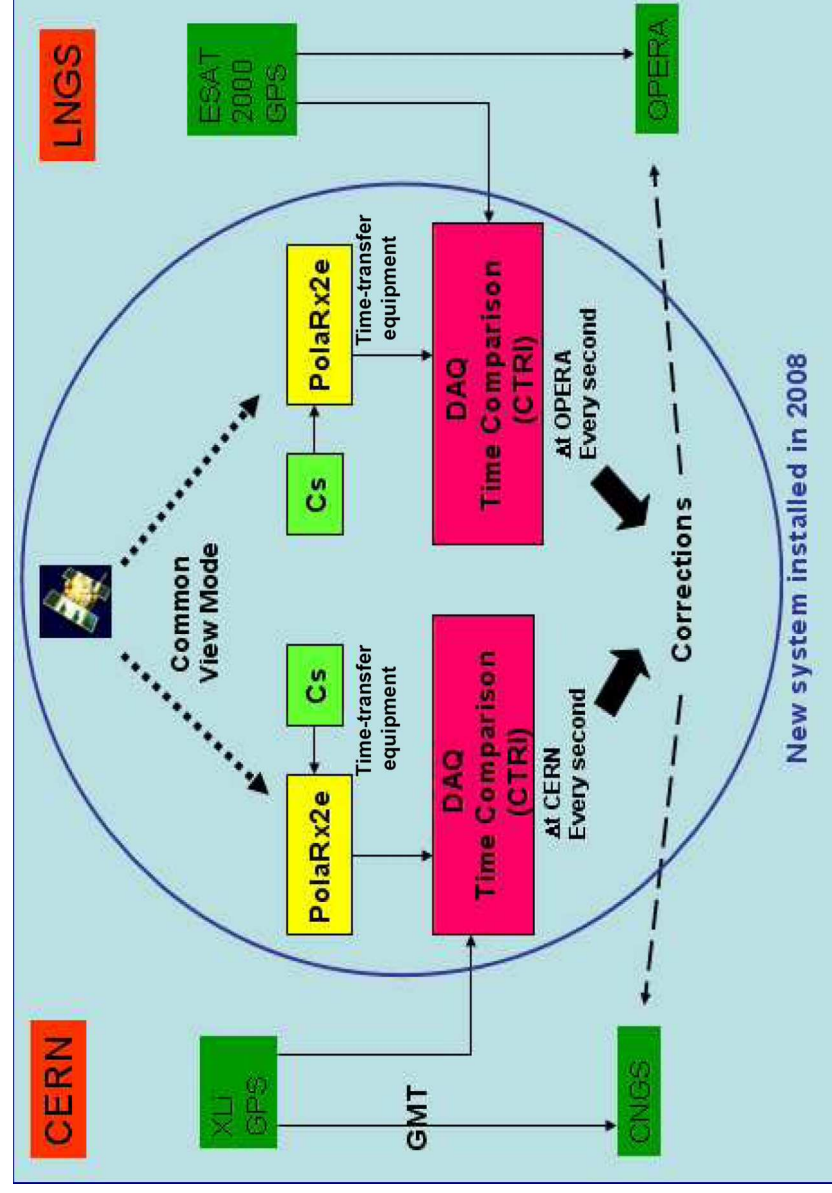
- Końcowa analiza w układzie ETRF2000
- Odległość pomiędzy tarczą a detektorem OPERA:  
 $d_{TO} = (730534.61 \pm 0.20)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorem BCT a tarczą:  
 $d_{BT} = (743.391 \pm 0.002)\text{m}$
- Odległość pomiędzy detektorami: BCT i OPERA:  
 $d_{BO} = d_{BT} + d_{TO} = (731278.0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

# 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

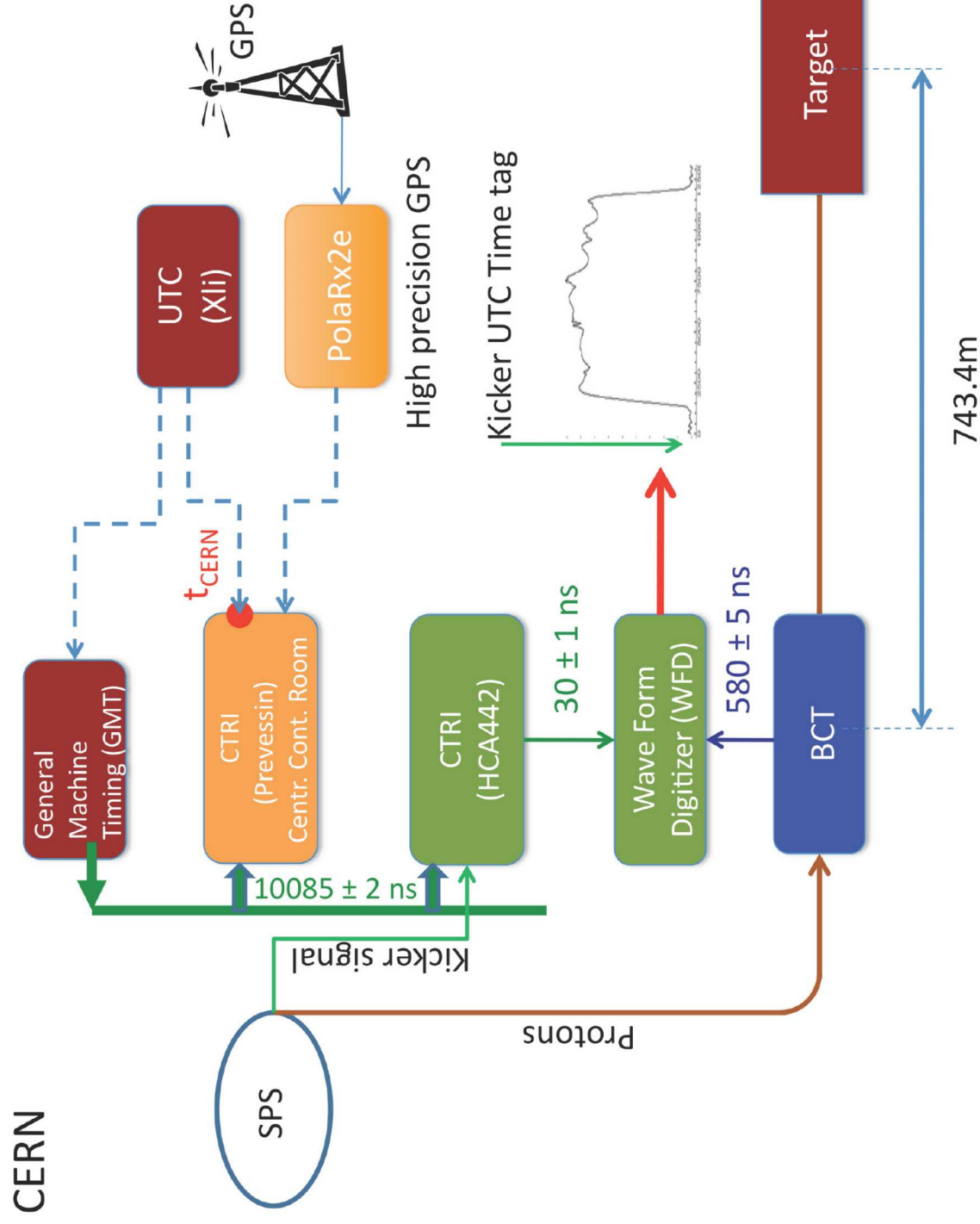
# System pomiaru czasu



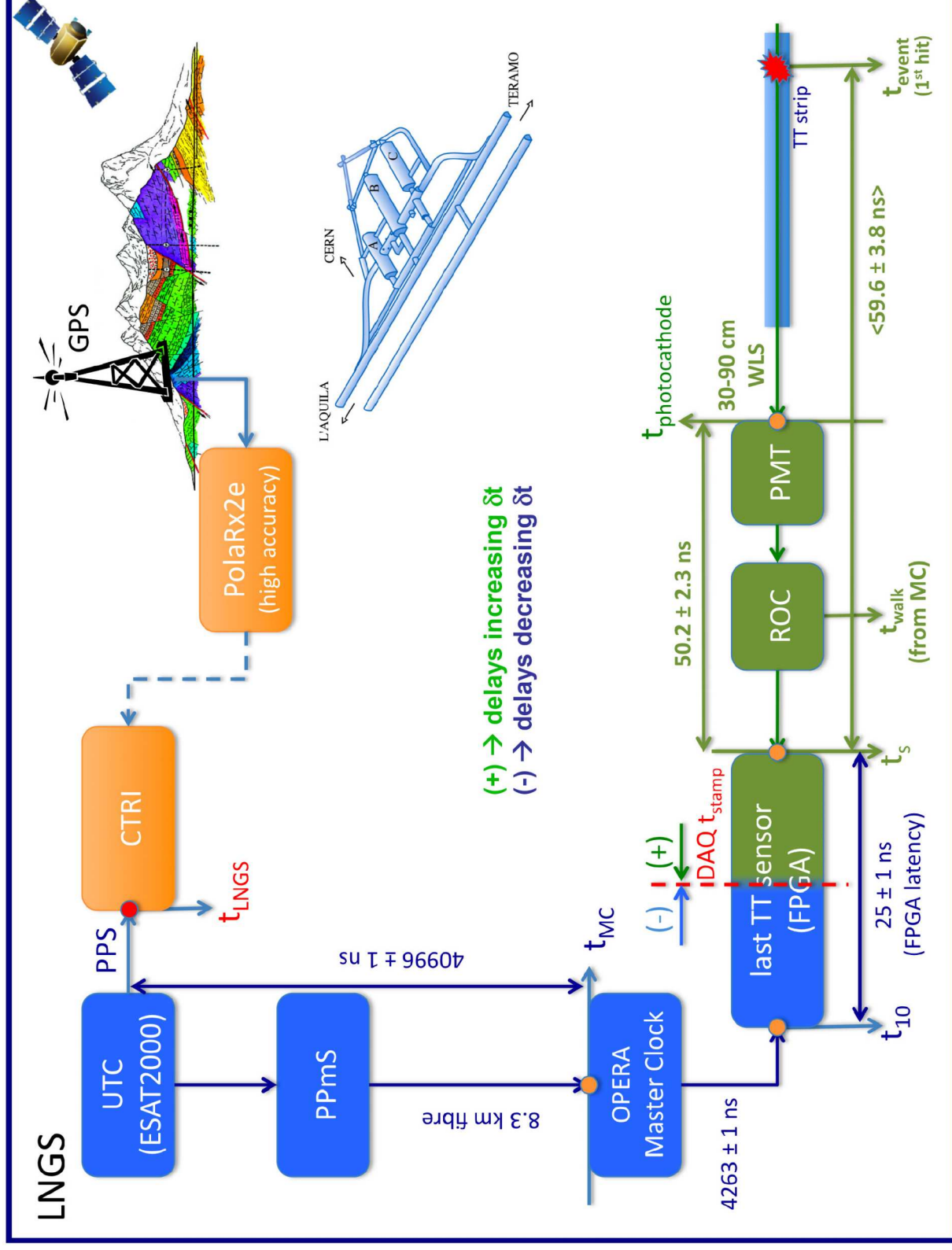
- CERN i Gran Sasso: dwa precyzyjne GPS + 2 atomowe Cs zegary
- Standardowe GPS'y (dokładność  $\sim 100\text{ns}$ ) - czas UTC przekazywany do eksperymentu i systemu akceleratora
- Porównywanie (co 1s) precyzyjnego UTC i UTC ze standardowego systemu



# System pomiaru czasu: CERN



# System pomiaru czasu: Gran Sasso



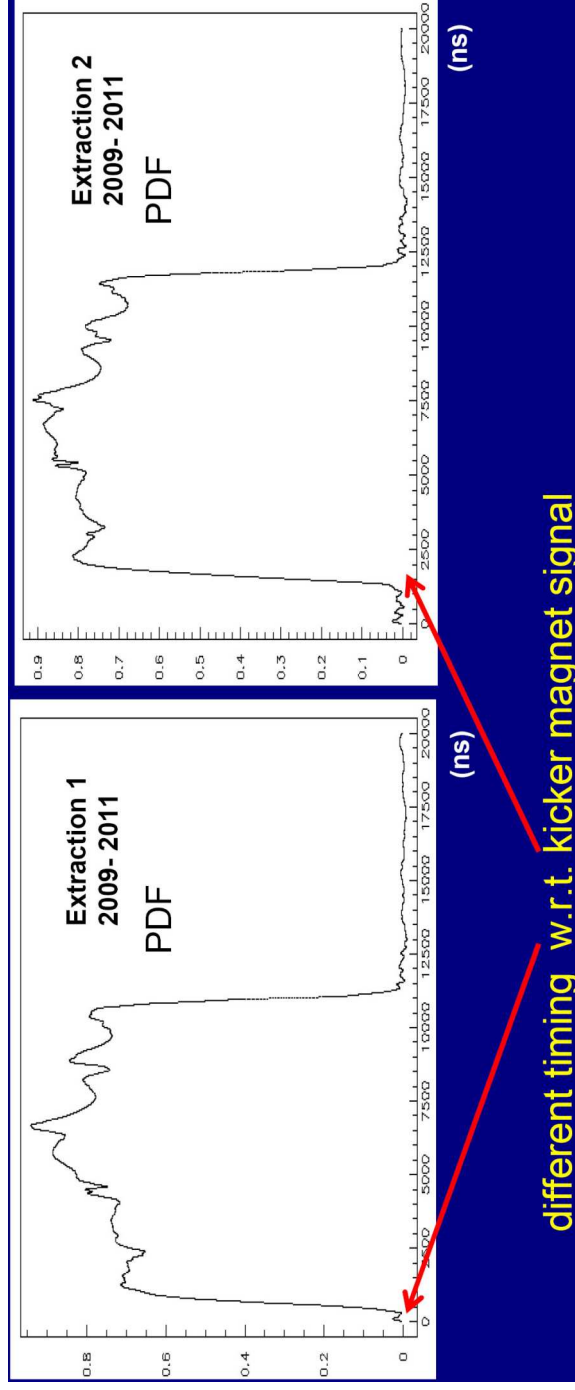
## Delay calibrations summary

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

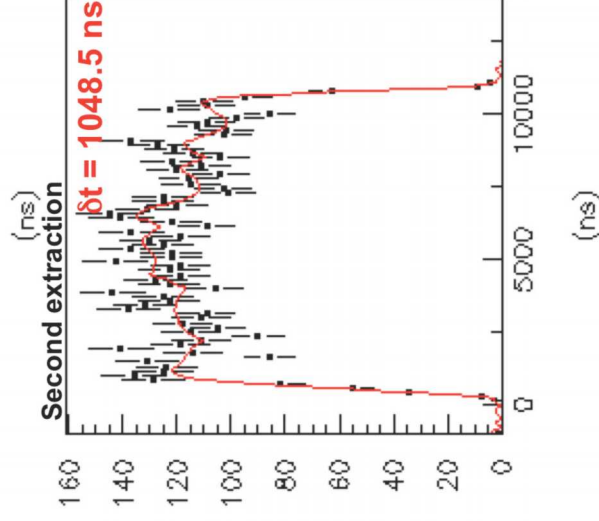
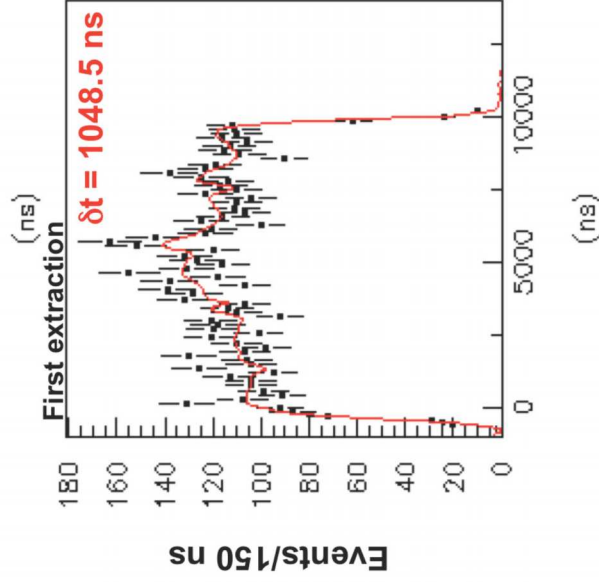
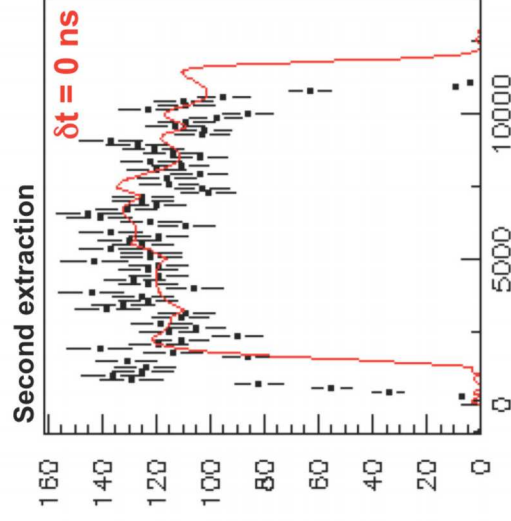
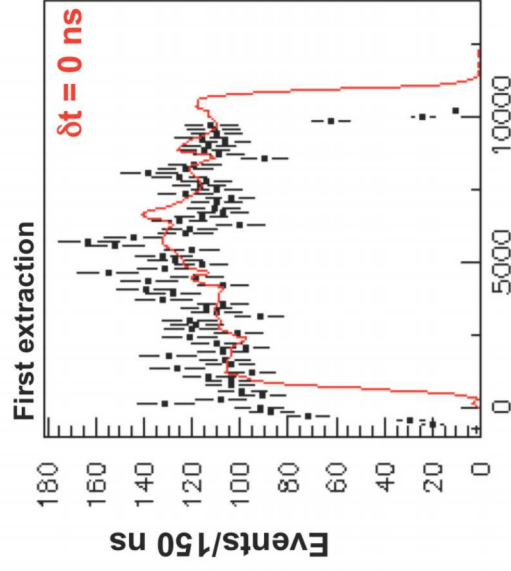
# OPERA: Analiza danych

- 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



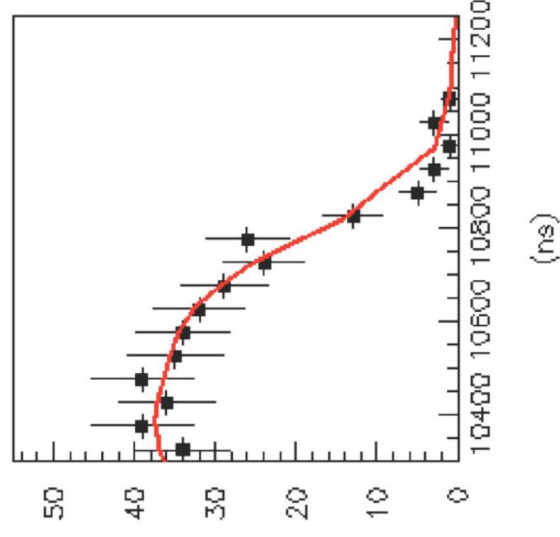
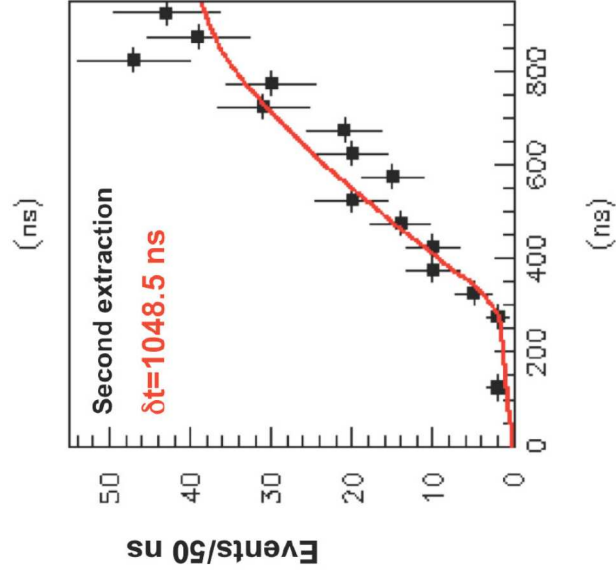
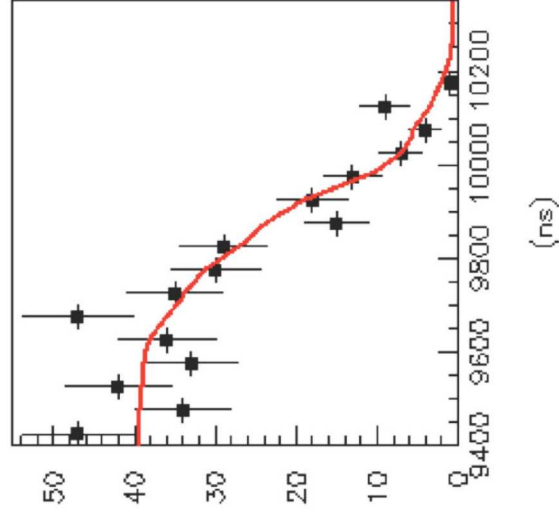
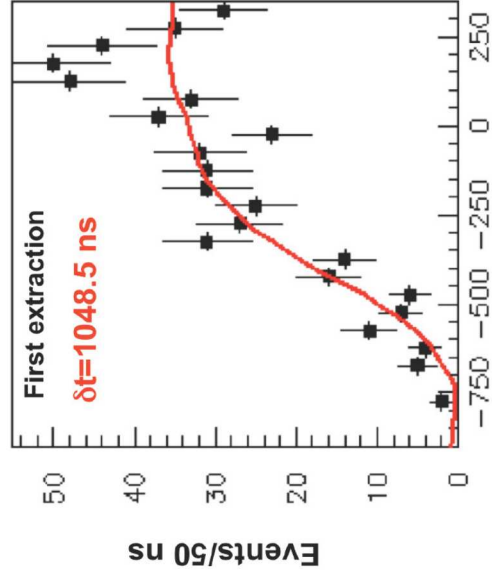
Różnica czasu (bez poprawek, wynik analizy *na ślepo*):

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

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

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





Powiększenie końców  
rozkładów.

## Analysis cross-checks

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

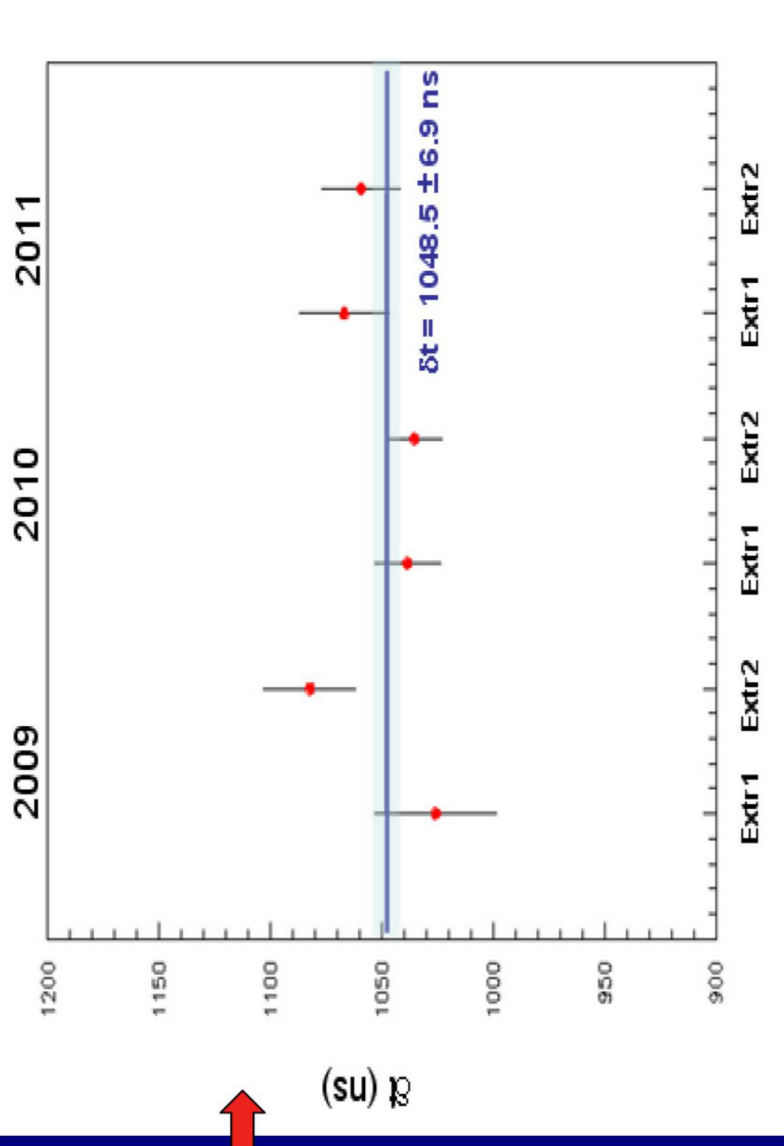
$|\text{d-n}|: (17.1 \pm 15.5) \text{ ns}$

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

- 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
<b>CNGS DELAYS :</b>			
UTC calibration (ns)	10092.2	10085	
Correction UTC			-7.2
WFD (ns)	0	30	
Correction WFD			30
BCT (ns)	0	-580	
Correction BCT			-580
<b>OPERA DELAYS :</b>			
TT response (ns)	0	59.6	
FPGA (ns)	0	-24.5	
DAQ clock (ns)	-4245.2	-4262.9	
Correction TT+FPGA+DAQ			17.4
<b>GPS synchronization (ns)</b>			
Time-link (ns)	-353	0	
Correction GPS	0	-2.3	
			350.7
<b>Total</b>			<b>-987.8</b>

# 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
<b>Total sys. uncertainty (in quadrature)</b>	<b>7.4</b>

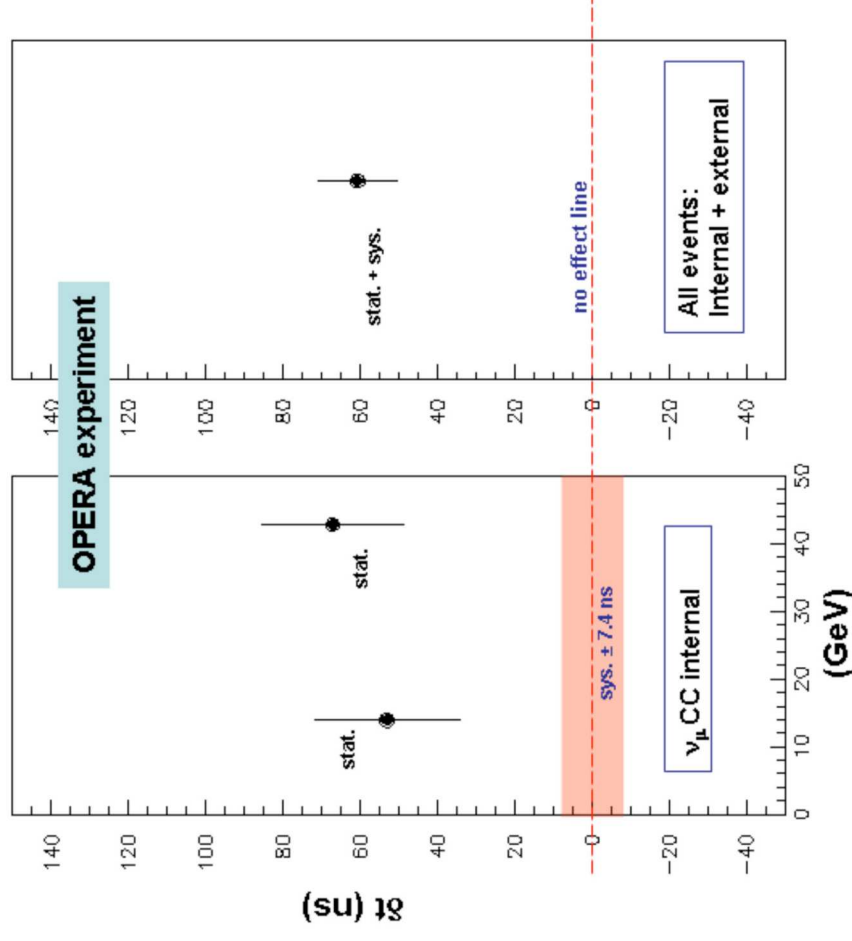
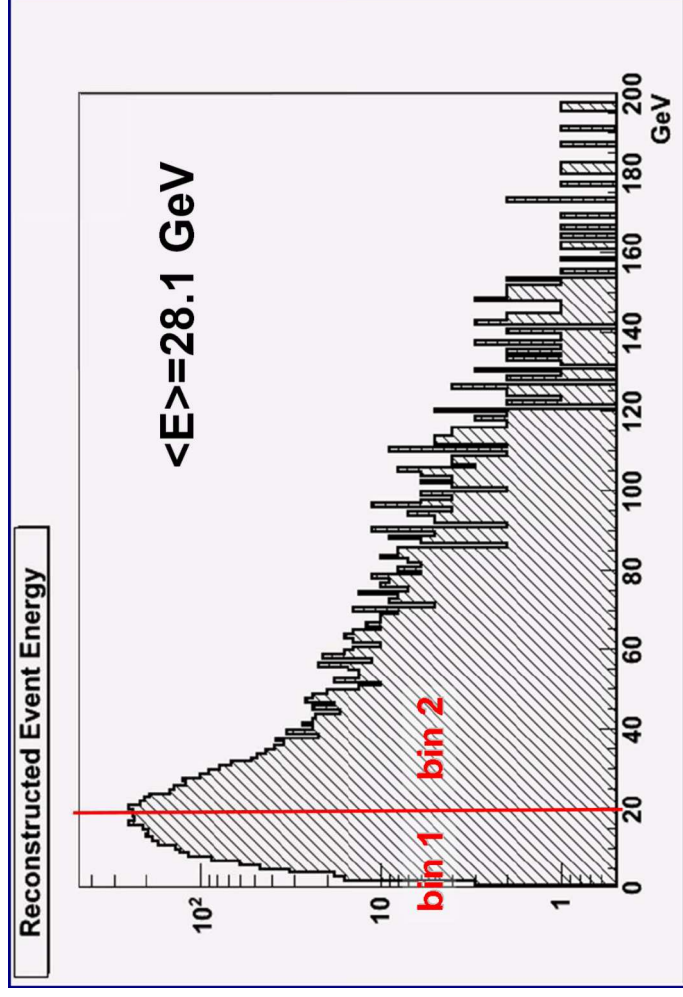
# Końcowy wynik

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

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

Znaczoność statystyczna na poziomie  $6.0\sigma$

# Poszukiwanie zależności od energii



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

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

# Poprzednie pomiary prędkości neutrin

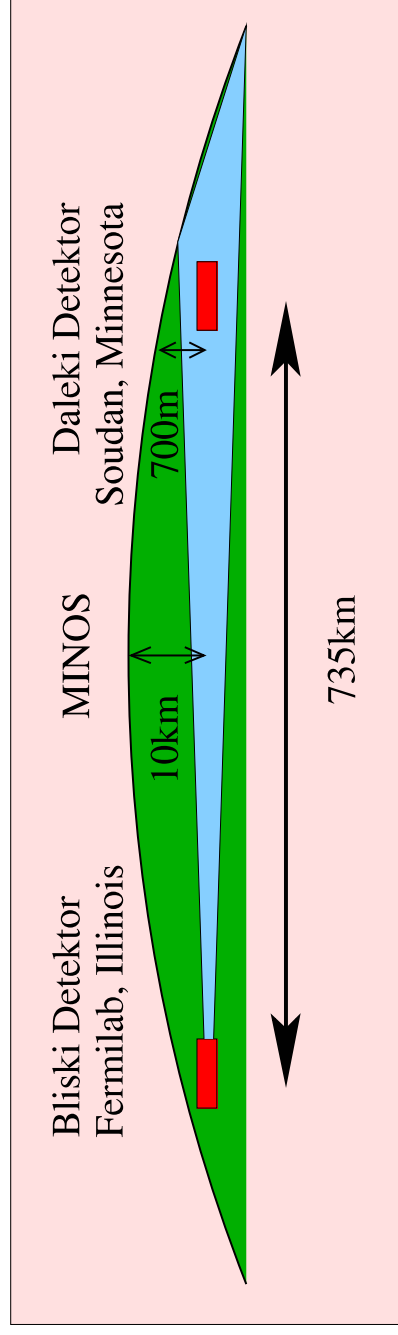
# Neutrino z SN1987a

- Wybuch supernowej SN1987a w Wielkim Obłoku Magellana (odległość 168 tysięcy lat świetlnych = 51.4 kpc):
- Paczka neutrino zarejestrowana w detektorach Kamiokande II, IMB, (Baksan i LSD) na 4h przed dotarciem sygnału świetlnego (neutrino powinny dotrzeć 4 lata wcześniej, gdyby poruszały się z prędkościami zgodnymi z wynikami eksperymentu OPERA)
- Detektor IMB: 8 oddziaływań neutrino ( $\bar{\nu}_e$ ), energie 20-40 MeV zarejestrowane w czasie 6s
- Detektor Kamiokande II: 12 oddziaływań neutrino ( $\bar{\nu}_e$ ), energie 7.5-36 MeV, zarejestrowane w czasie 13s
- Ograniczenie na prędkość neutrino:

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



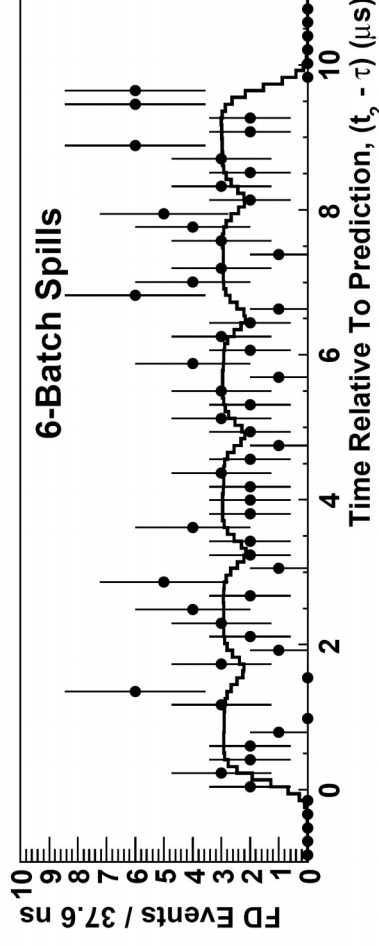
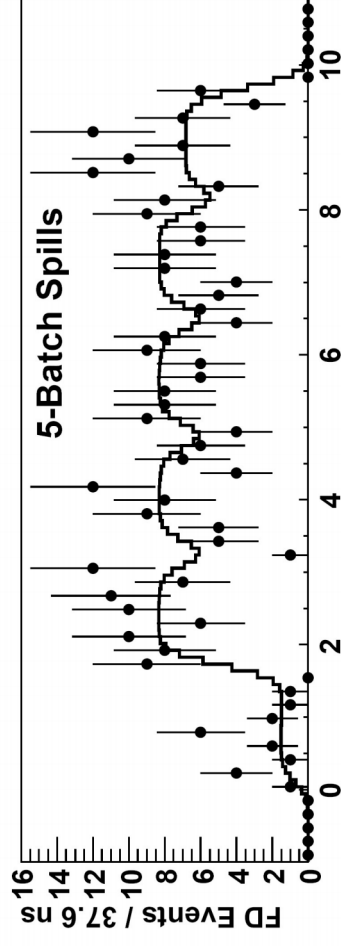
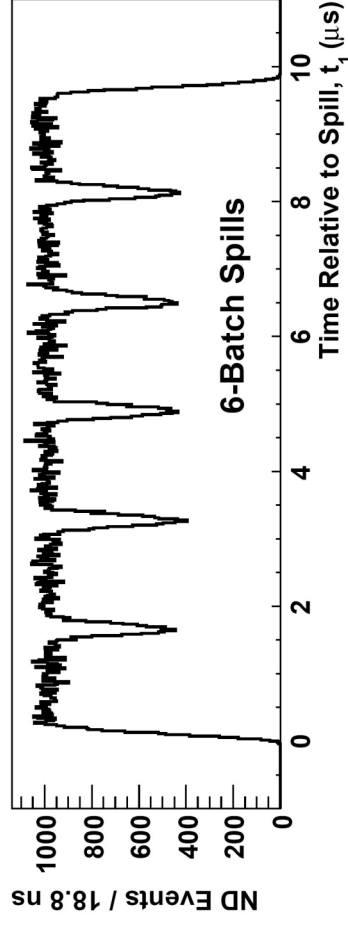
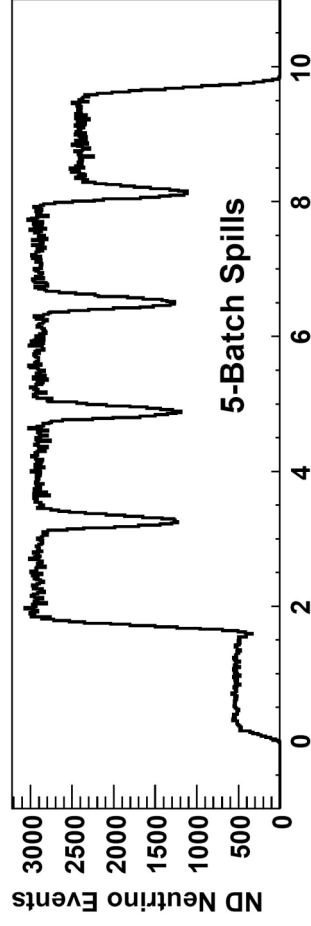
# Pomiar w eksperymencie MINOS



- 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  $\sim 1$  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 ( $\sim 0.6$  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  $\nu_{\mu}$ ,  $\langle E \rangle = 17 \text{ GeV}$**
- Neutrino rejestrowane  $\delta t$  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  $\nu_\mu$ ,  $E_{max} \sim 3 \text{ GeV}$

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

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

- Neutrino z SN1987a,  $\nu_e$ ,  $E \in (7.5 - 40) \text{ MeV}$  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