

OPERA und die Neutrino-Geschwindigkeitsmessung

Präsentiert von Björn Wonsak



bmb+f - Förderschwerpunkt

OPERA

Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung

- Das OPERA-Experiment
- Die Tau-Suche
- Messung der Neutrino-geschwindigkeit
- Zusammenfassung

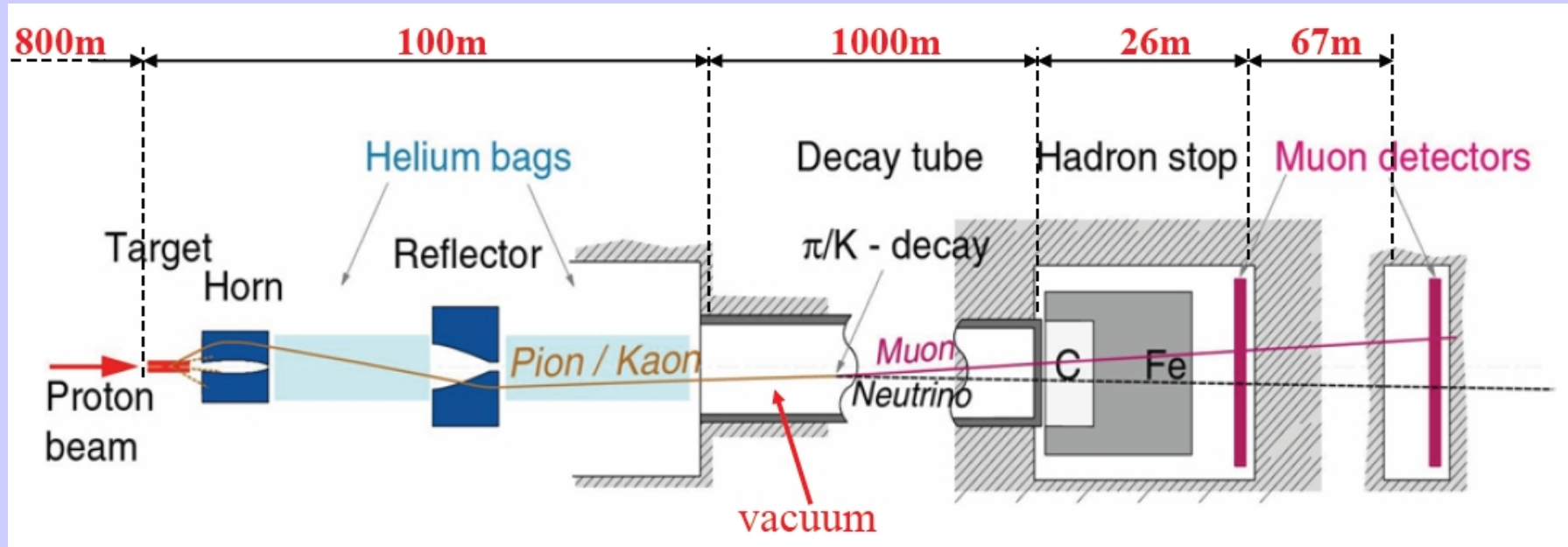
'Long baseline'-Neutrino-Oszillations-Experiment

Sehr reiner ν_{μ} -Strahl vom CERN zum LNGS

Ziel: Beobachtung des Auftauchens von ν_{τ}



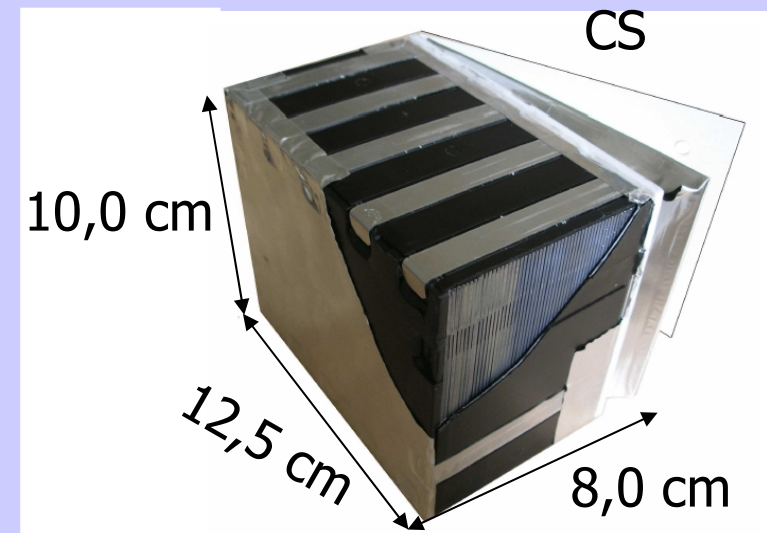
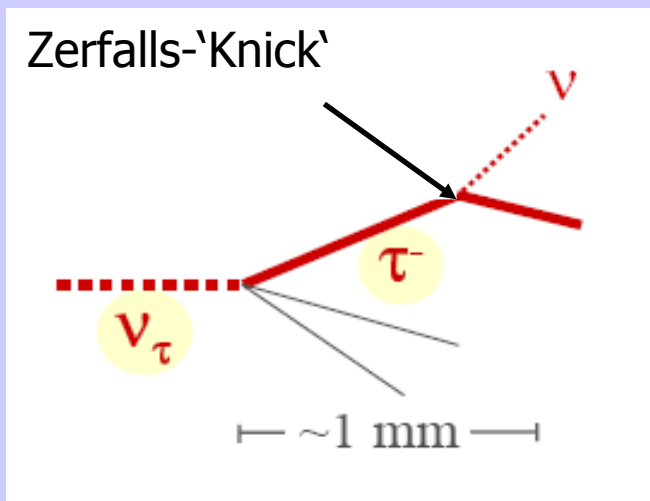
Siehe Vortrag von Annika Hollnagel: T 31.1 Fr 9:20

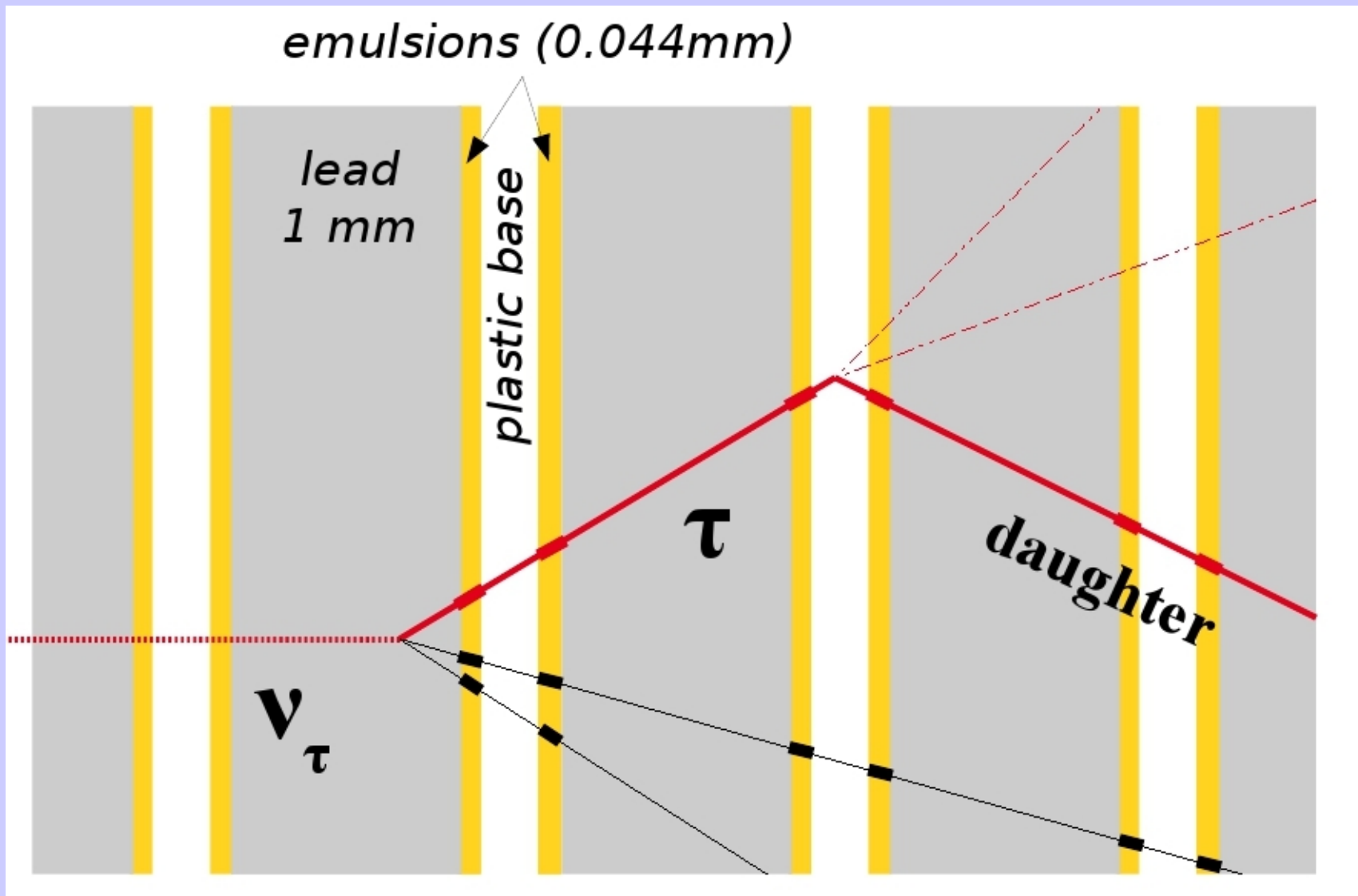


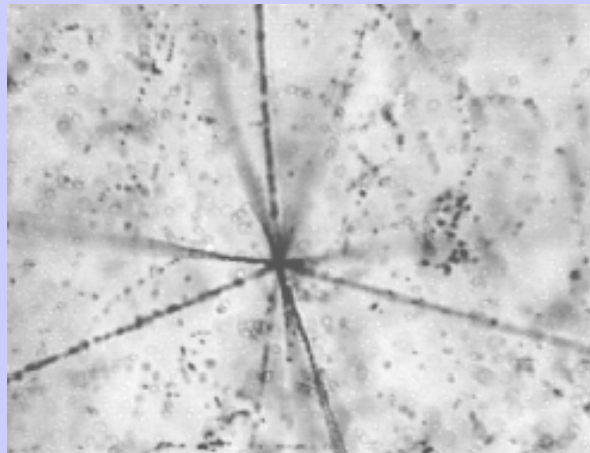
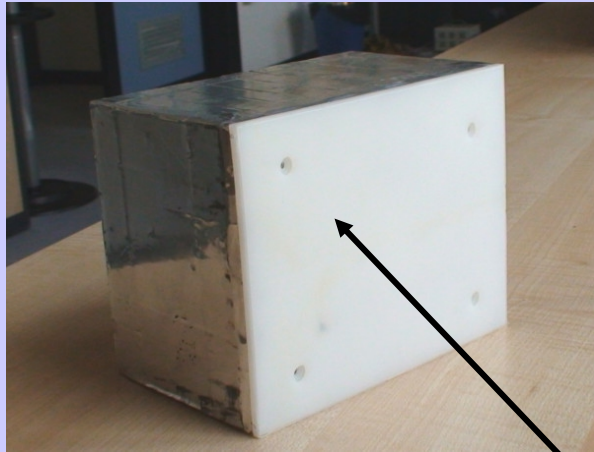
- Energie SPS-Protonen: 400 GeV/c \rightarrow Neutrinoenergie $\langle E \rangle = 17$ GeV
- \sim reiner Muon-Neutrino-Strahl:

– $\bar{\nu}_\mu/\nu_\mu$	2,4 %	} Bezogen auf Anzahl der CC-WW
– ν_e/ν_μ	0,89 %	
– $\bar{\nu}_e/\nu_\mu$	0,06 %	
– ν_τ/ν_μ	$< 10^{-4}$ %	

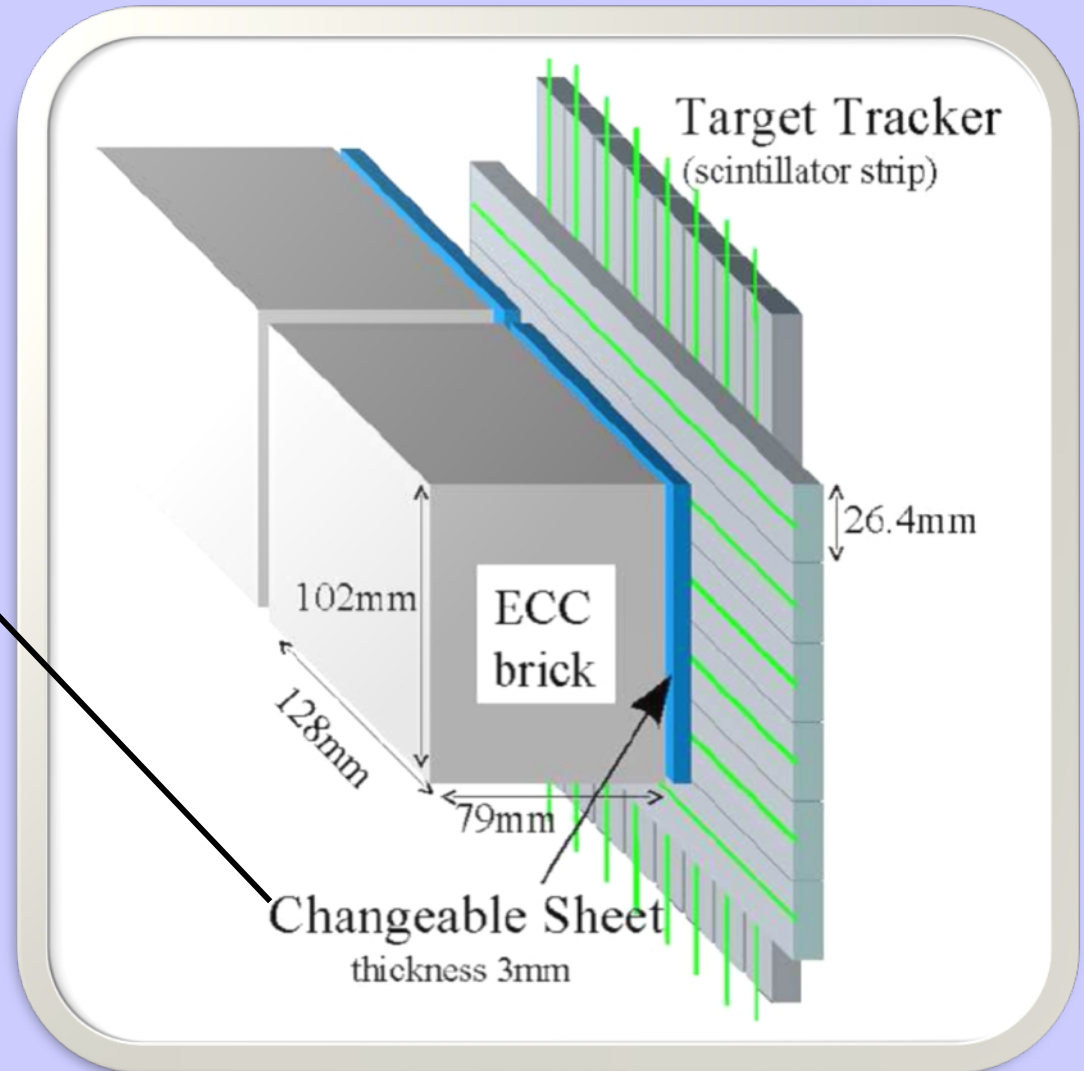
- Emulsion Cloud Chamber (ECC-)Ziegel:
 - 57 beidseitig beschichtete Emulsionsfilme (0.2mm)
 - 56 Bleischichten (1mm)
 - 2 Changeable Sheets (CS)
 - Ortsauflösung (Vertex): $\sim 1\mu\text{m}$
 - Winkelauflösung (Spur): $\sim 2\text{mrad}$

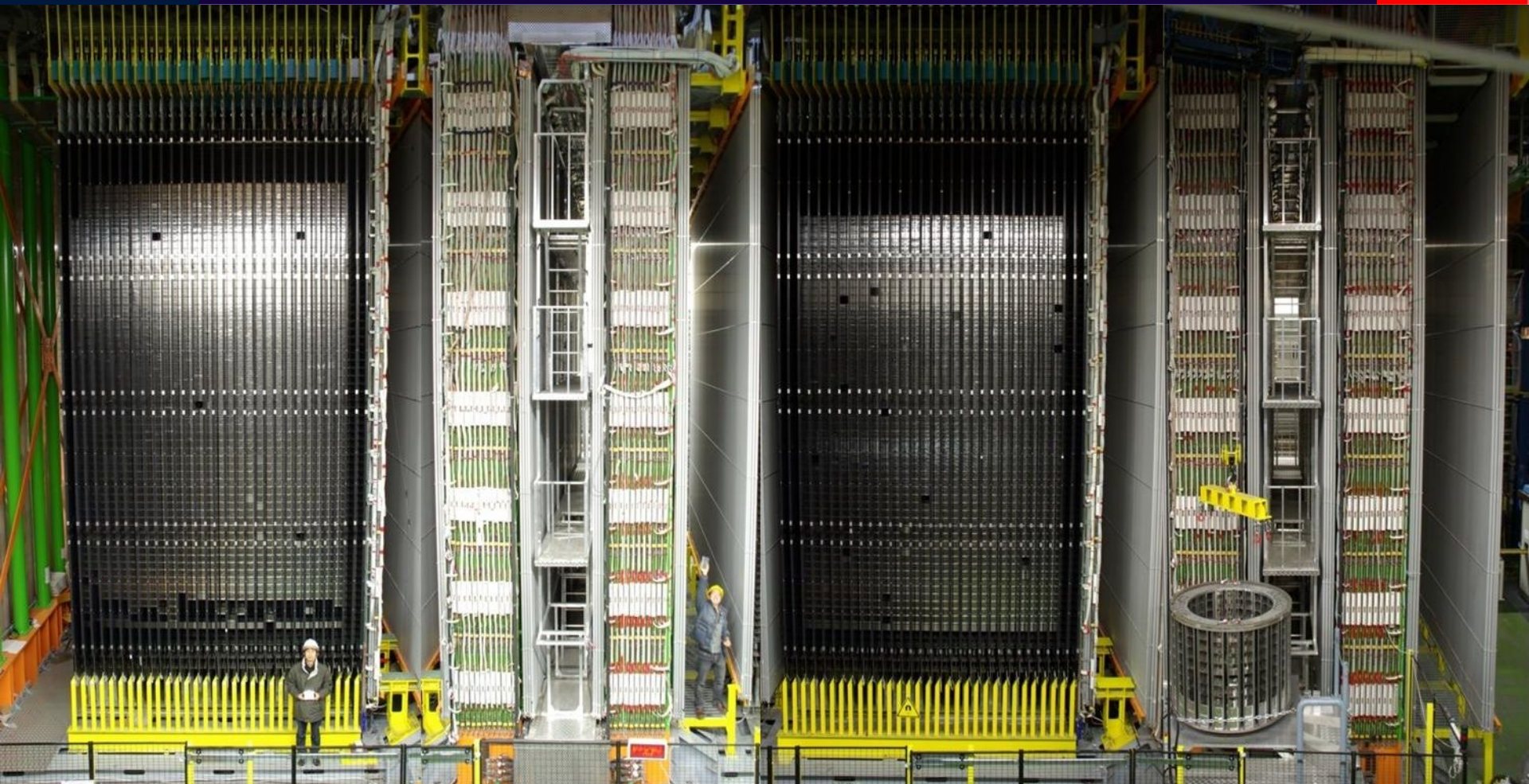


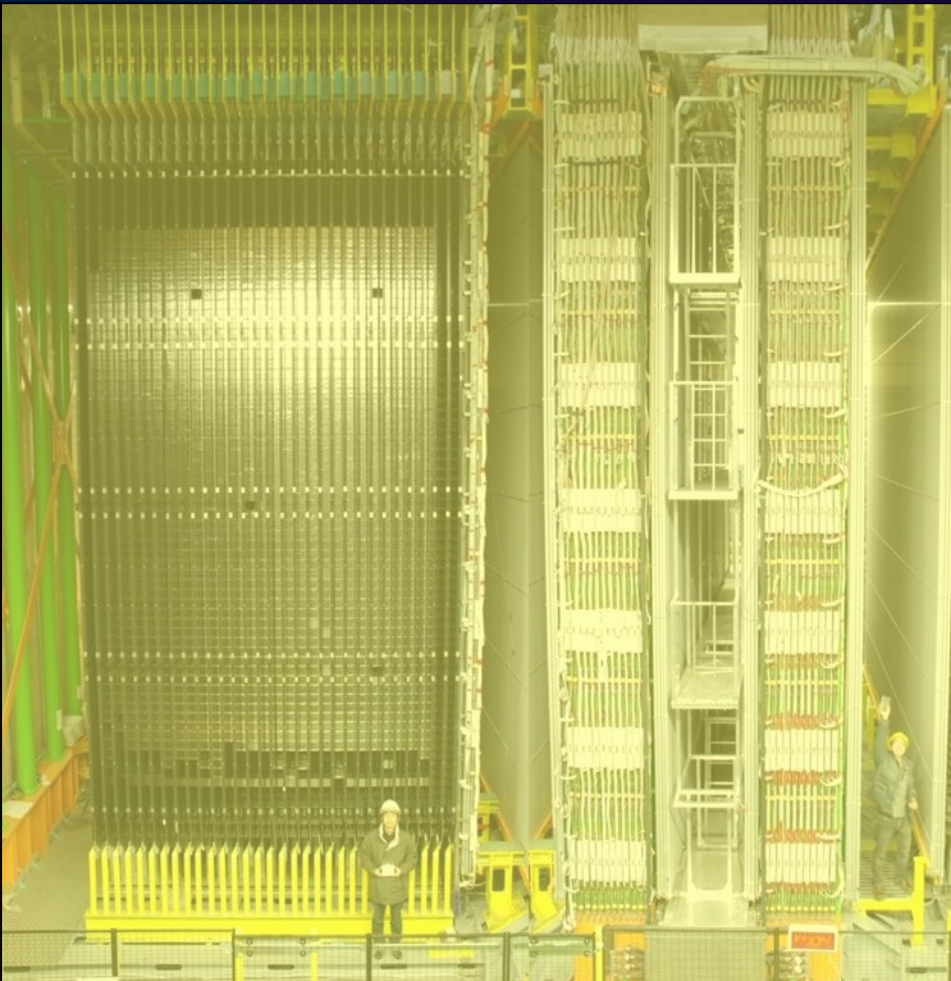




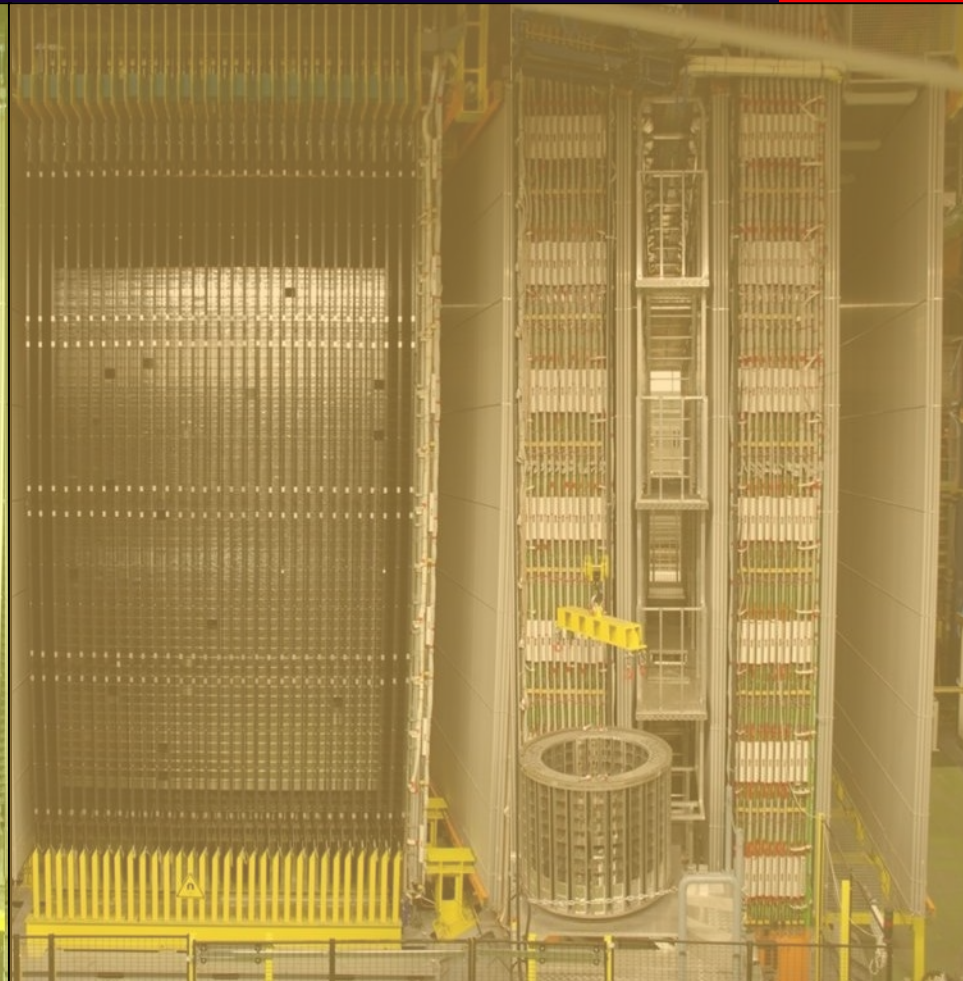
Emulsion Cloud Chambers



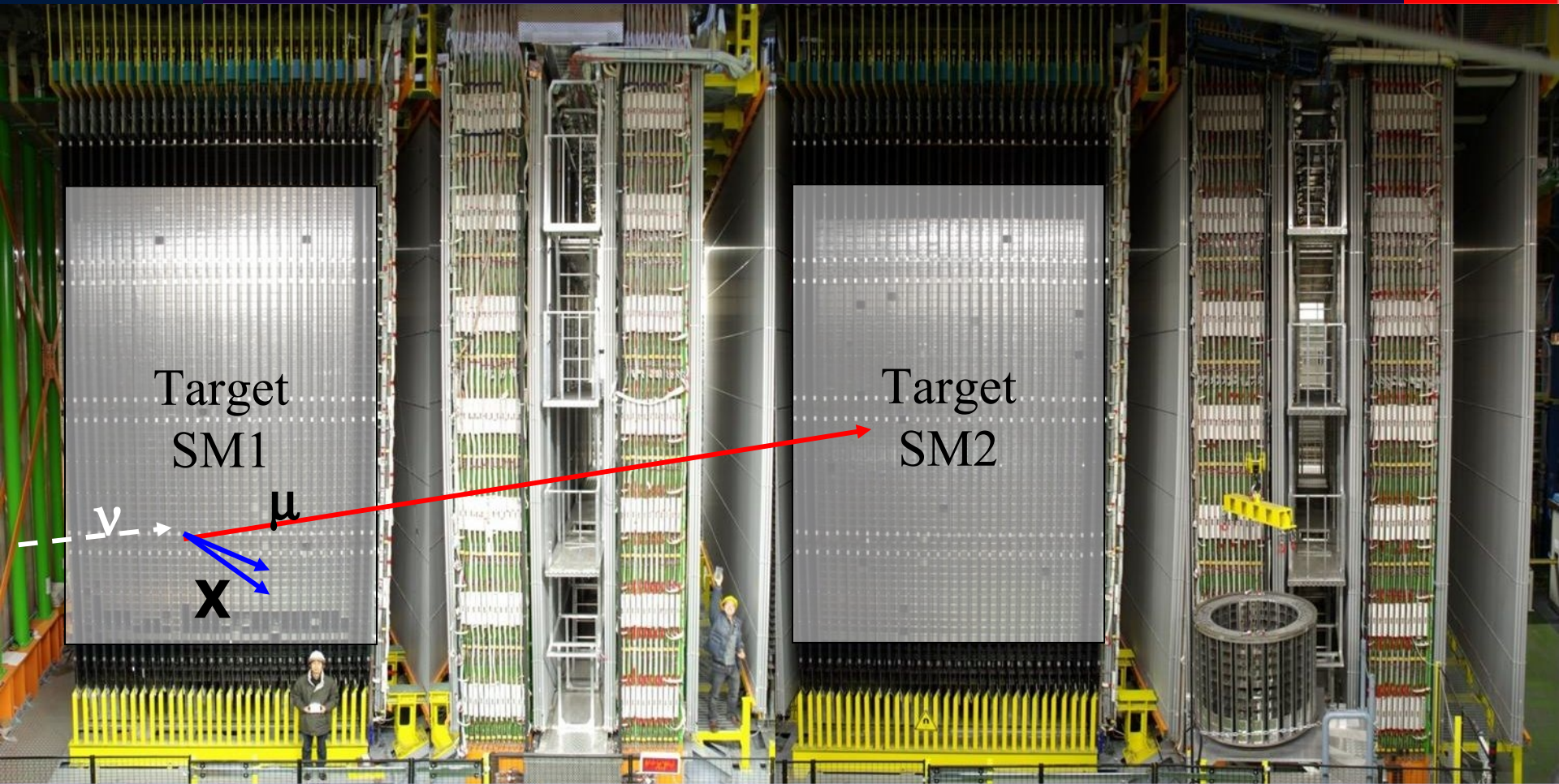




Super-Modul 1 (SM1)



Super-Modul 2 (SM2)



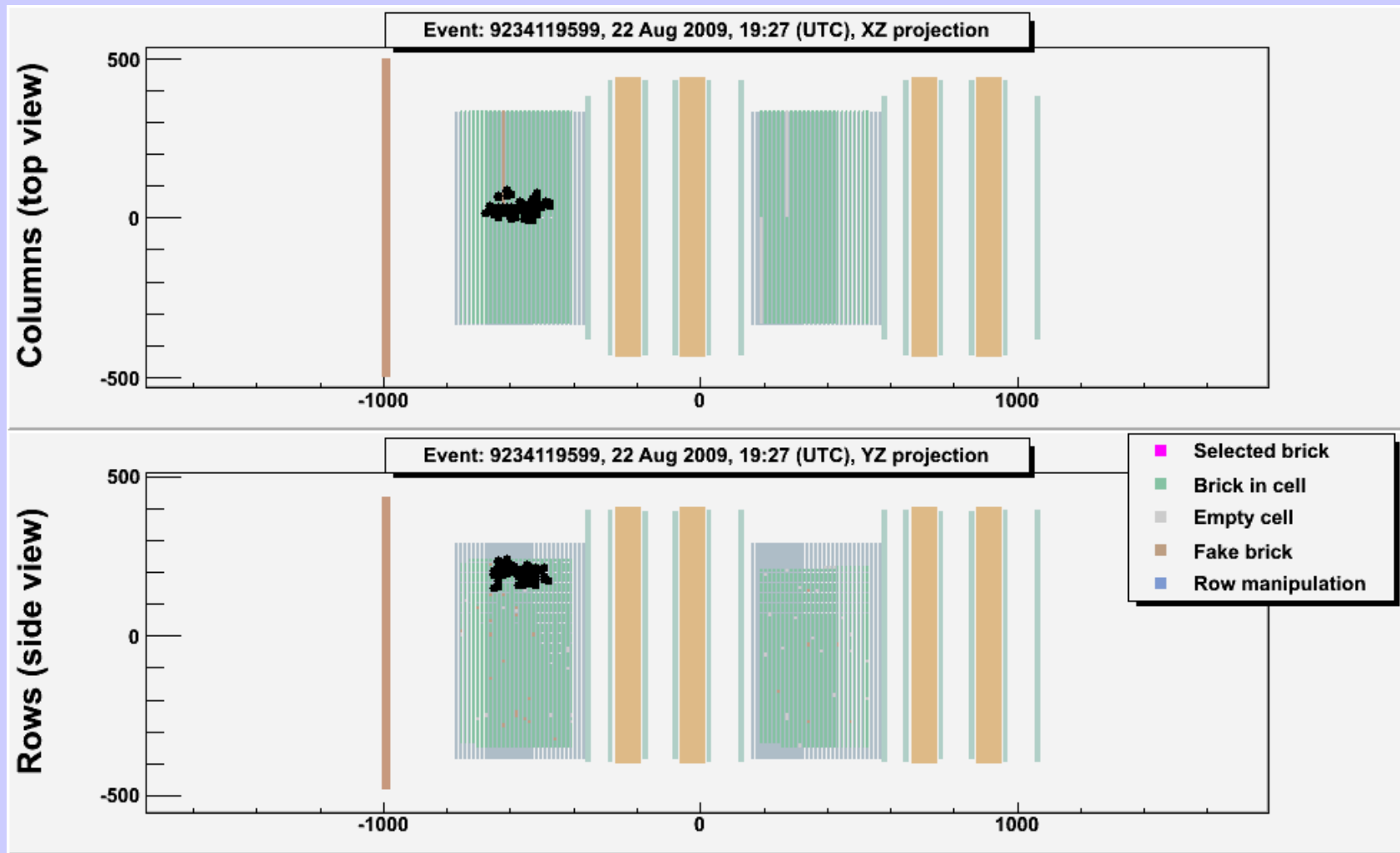
Target-Region:

- Target Tracker(TT) (Szintillator)
- Blei/Emulsions-Ziegel (75.000 pro SM)

Target-Masse: ~1.25 kton

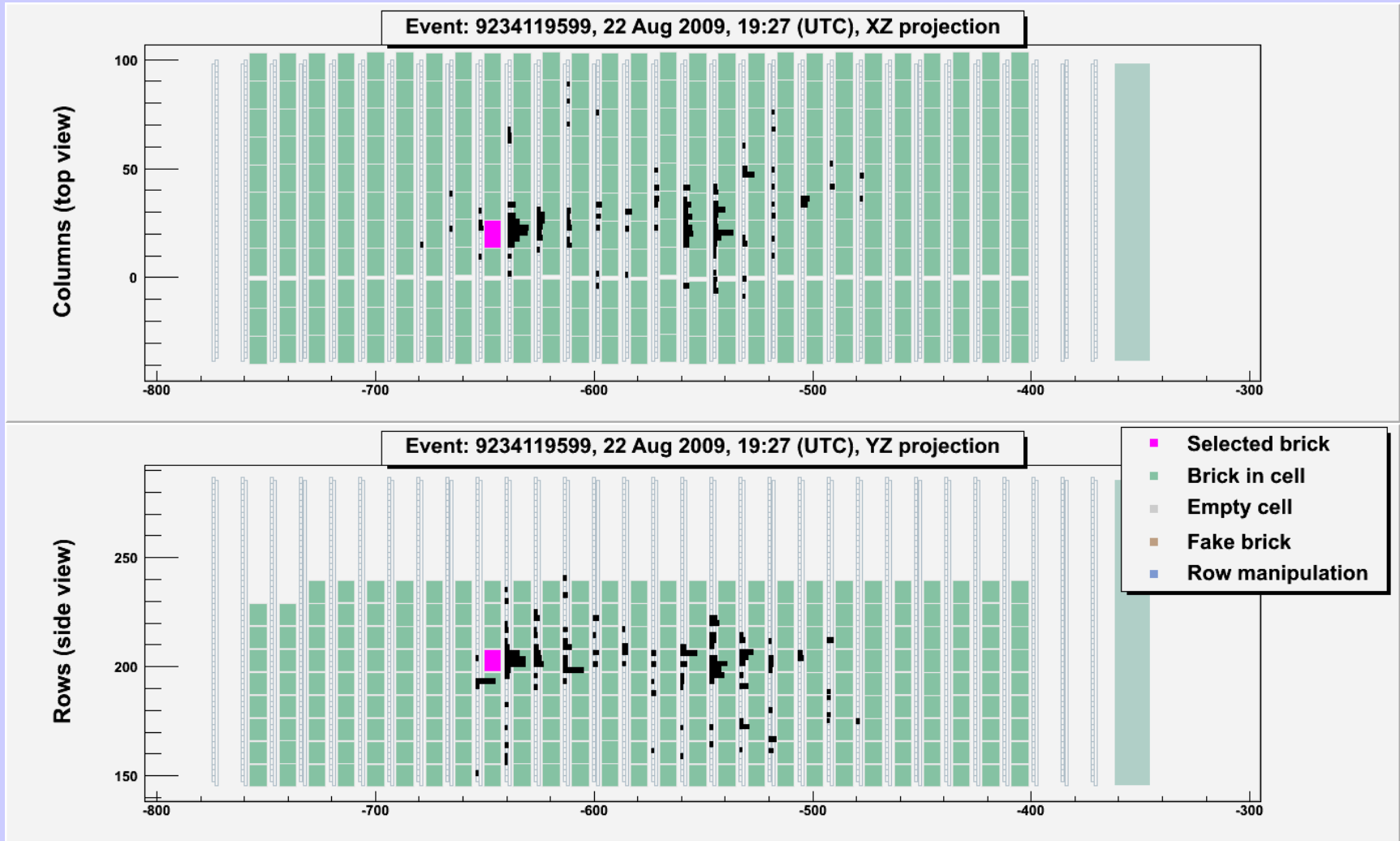
Suchprozedur am Beispiel des ersten Tau-Kandidaten (2010)

Ansicht im elektronischen Detektor:

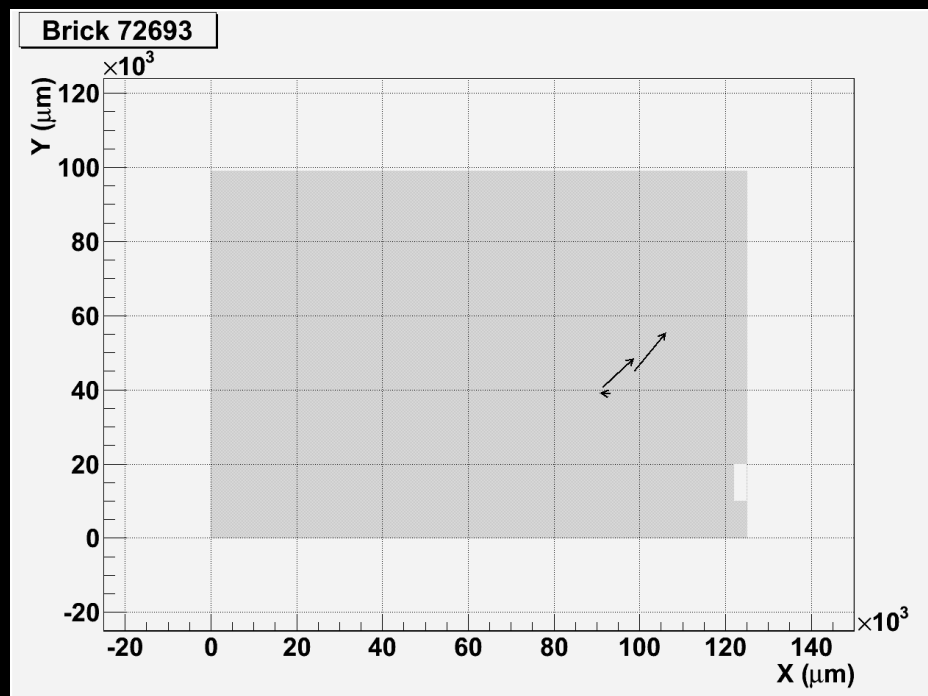


(Datum: 22 August 2009, 19:27 (UTC))

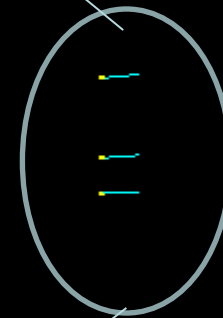
Ansicht im elektronischen Detektor:



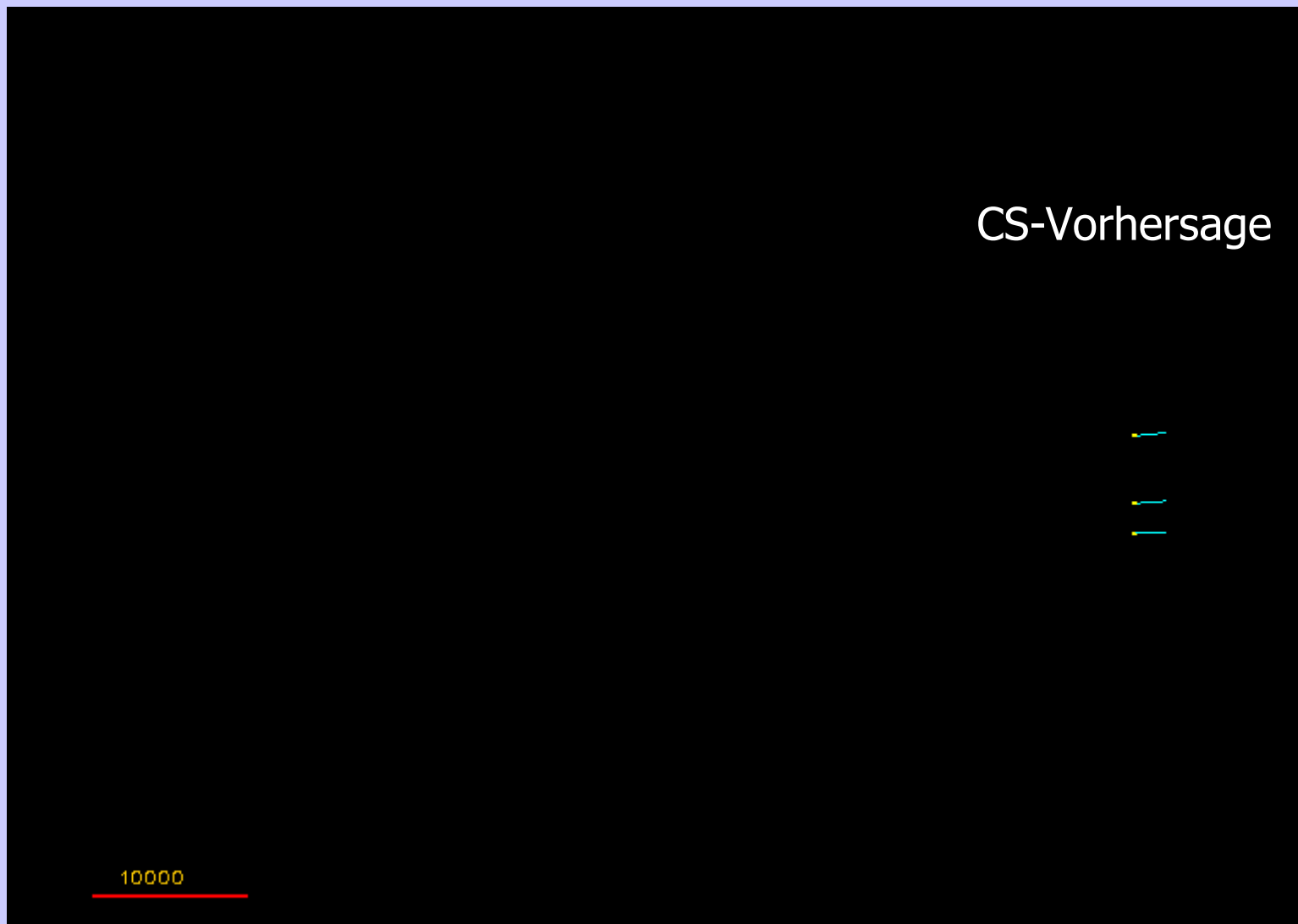
(Datum: 22 August 2009, 19:27 (UTC))

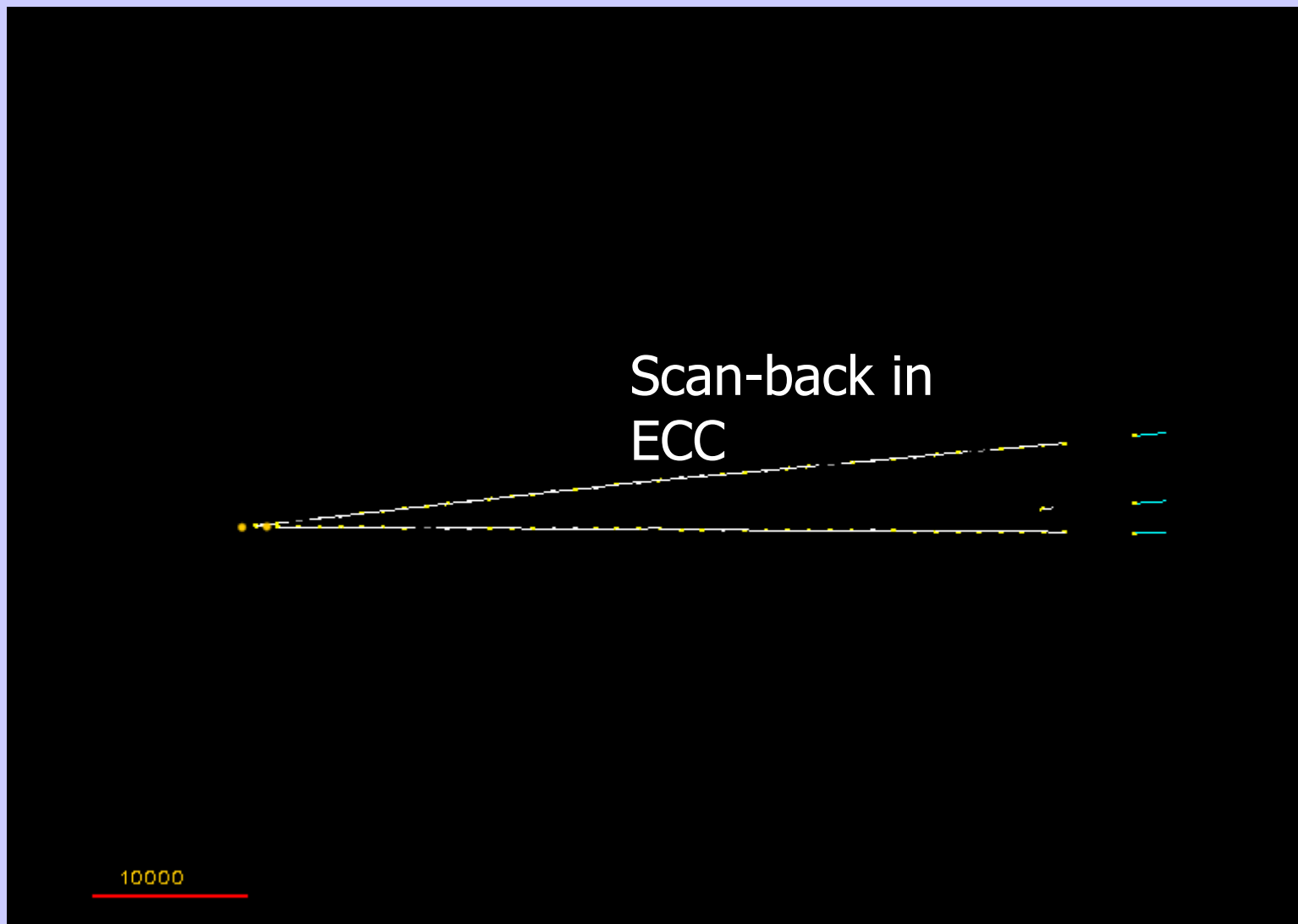


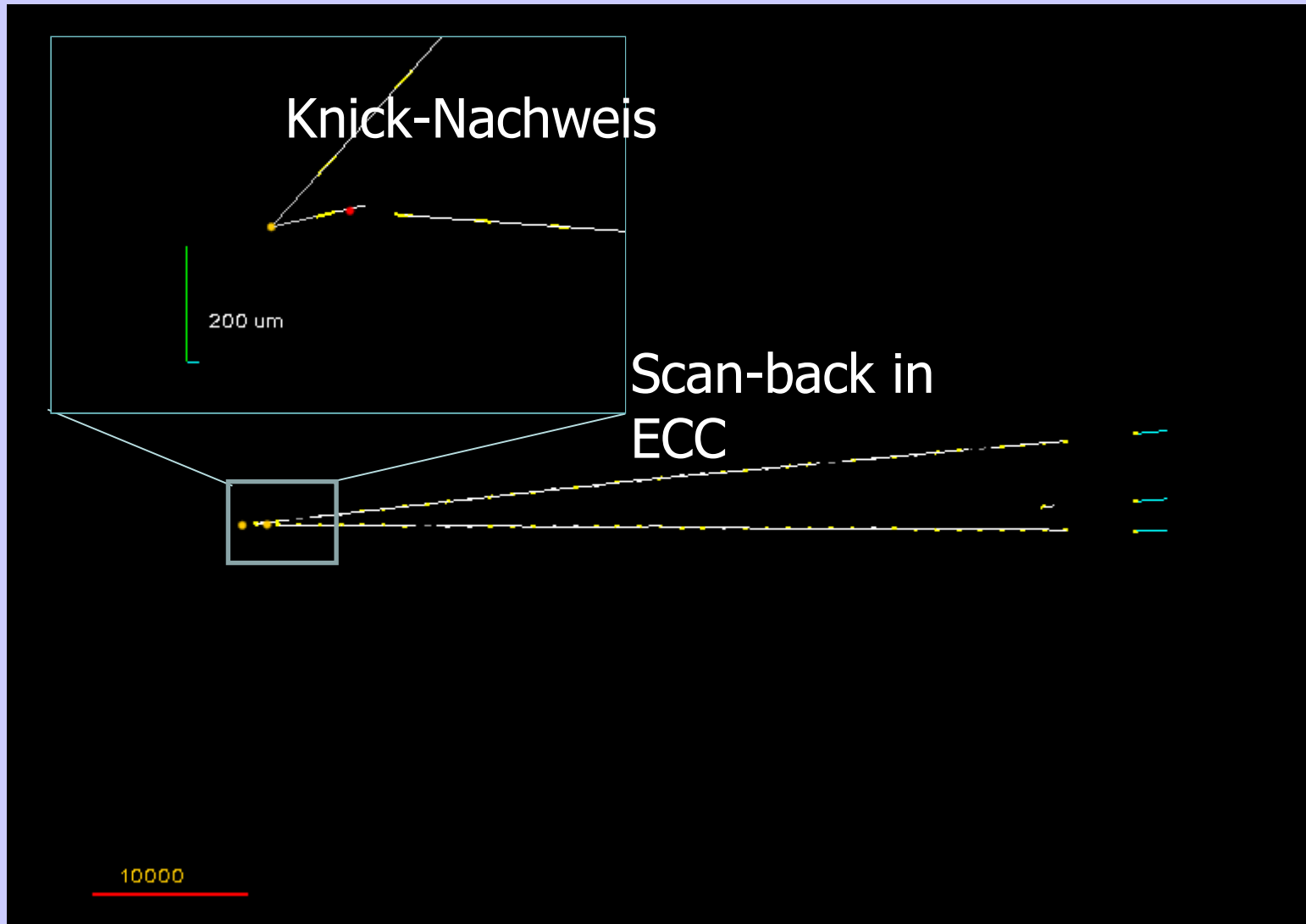
CS-Vorhersage



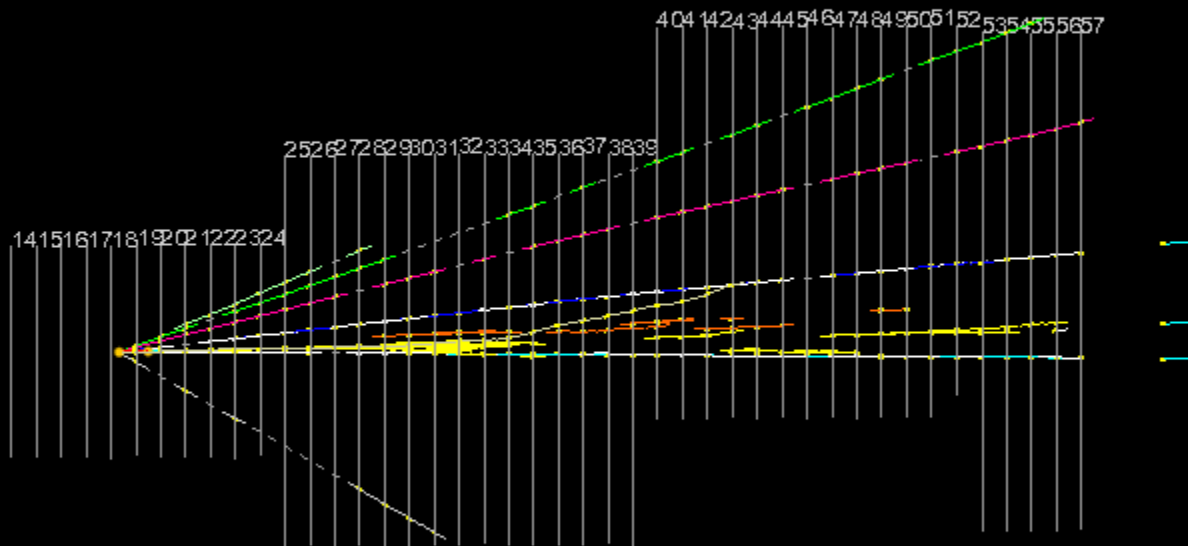
10000





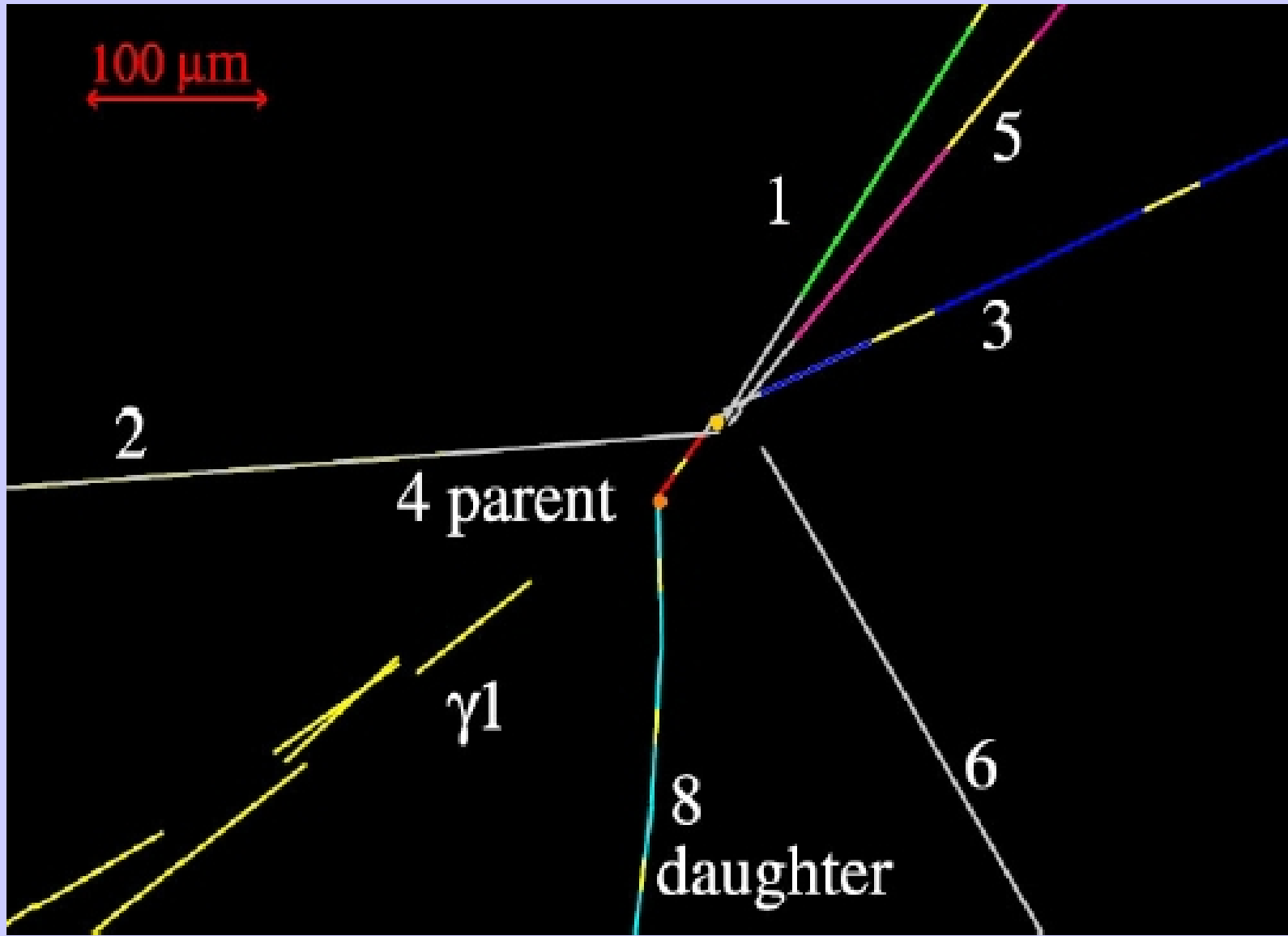


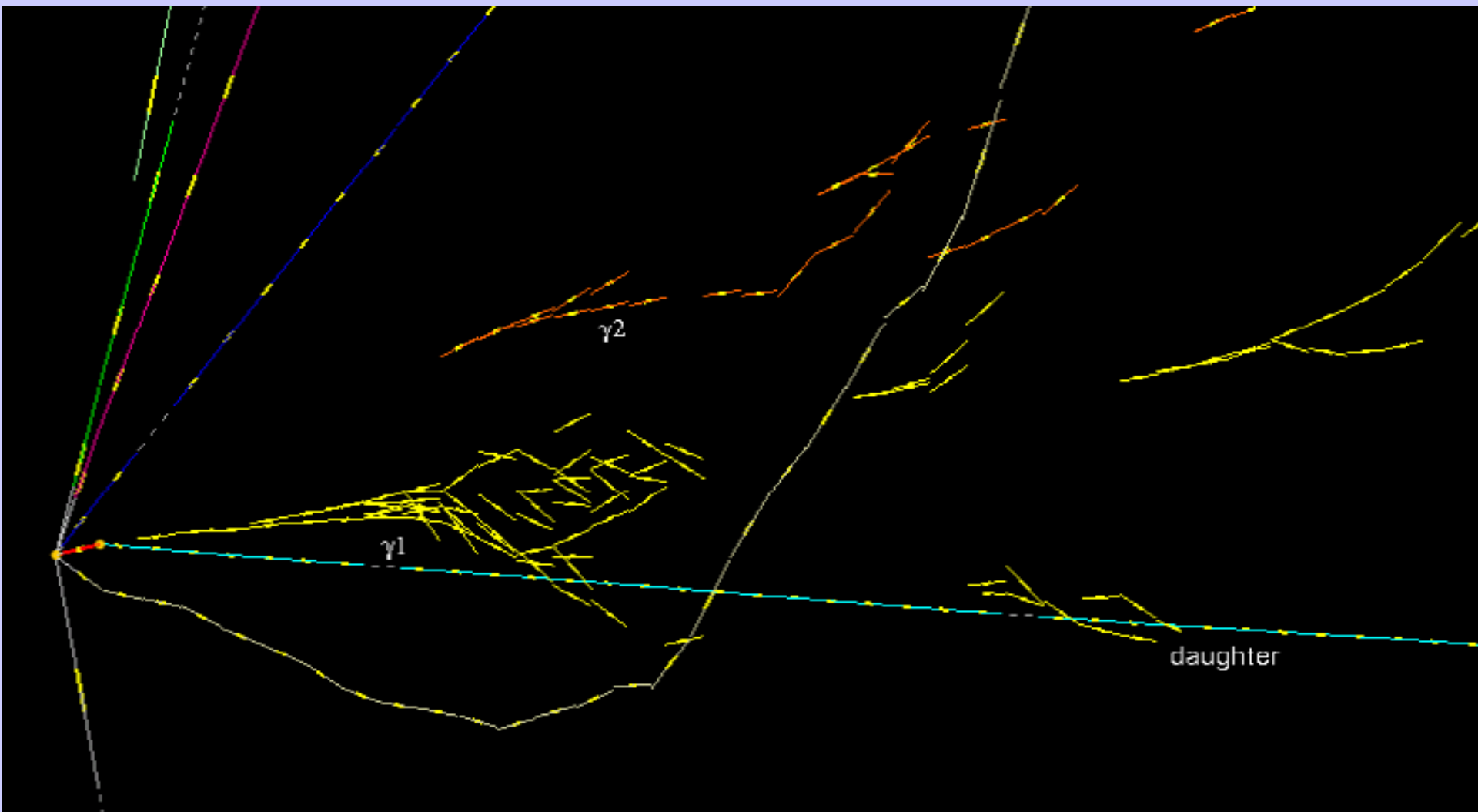
'Large-area'-Scan,
volle Rekonstruktion von Vertices und γ



10000

Der erste Tau-Kandidat





Variable	Cut-off	Value
Missing P_T at primary vertex (GeV/c)	<1.0	$0.57^{+0.32}_{-0.17}$
Angle between parent track and primary hadronic shower in the transverse plane (rad)	$> \pi/2$	3.01 ± 0.03
Kink angle (mrad)	>20	41 ± 2
Daughter momentum (GeV/c)	>2	12^{+6}_{-3}
Daughter P_T when γ -ray at the decay vertex (GeV/c)	>0.3	$0.47^{+0.24}_{-0.12}$
Decay length (μm)	<2 lead plates	1335 ± 35

Muss $>0,6$ GeV/c sein, wenn Ereignis ohne Photon am Zerfallsvertex.

- Zwei elektromagnetische Schauer deuten auf Zerfalls-Vertex, invariante Masse: $(120 \pm 20(\text{stat.}) \pm 35(\text{syst.})) \text{ MeV}/c^2$
 → Hypothese: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ($m_{\pi^0} = 135 \text{ MeV}/c^2$)
- Zerfallstochter ist ein geladenes Hadron (wahrscheinlich Pion) invariante Masse $(\pi + 2\gamma)$: $(640^{+125}_{-80}(\text{stat.})^{+100}_{-90}(\text{syst.})) \text{ MeV}/c^2$
 → Hypothese: $\rho^- \rightarrow \pi^0\pi^-$ ($m_{\rho^-} = 770 \text{ MeV}/c^2$)
- Hadronischer Tau-Zerfall mit einem geladenen Tochterteilchen
 → Hypothese: $\tau^- \rightarrow \rho^- + \nu_\tau$
 $\rho^- \rightarrow \pi^0\pi^-$
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Decay channel	Number of background events expected for							
	22.5×10^{19} p.o.t.				4.88×10^{19} p.o.t.			
	Charm	Hadron	Muon	Total	Charm	Hadron	Muon	Total
$\tau \rightarrow \mu$	0.025	0.00	0.07	0.09 ± 0.04	0.00	0.00	0.02	0.02 ± 0.01
$\tau \rightarrow e$	0.22	0.00	0.00	0.22 ± 0.05	0.05	0.00	0.00	0.05 ± 0.01
$\tau \rightarrow h$	0.14	0.11	0.00	0.24 ± 0.06	0.03	0.02	0.00	0.05 ± 0.01
$\tau \rightarrow 3h$	0.18	0.00	0.00	0.18 ± 0.04	0.04	0.00	0.00	0.04 ± 0.01
Total	0.55	0.11	0.07	0.73 ± 0.15	0.12	0.02	0.02	0.16 ± 0.03

Decay channel	Number of signal events expected for		Interaction vertex location efficiency	Global τ detection efficiency
	22.5×10^{19} p.o.t.	4.88×10^{19} p.o.t.		
$\tau \rightarrow \mu$	1.79	0.39	0.54	0.09
$\tau \rightarrow e$	2.89	0.63	0.59	0.14
$\tau \rightarrow h$	2.25	0.49	0.59	0.04
$\tau \rightarrow 3h$	0.71	0.15	0.64	0.04
Total	7.63	1.65	0.59	0.07

- Daten von 4.88×10^{19} POT analysiert
- 1 Tau-Kandidat gefunden
- Erwarteter Untergrund: 0.05 ± 0.01 Ereignisse für $\tau^- \rightarrow 1h$ Kanal (0.16 ± 0.03 für $\tau^- \rightarrow x$)
- p-Wert für Hypothese dass dies nur Untergrund ist: 5% (15% for $\tau^- \rightarrow x$)
- Erwartung für Oszillationssignal: 0.49 Tau-Kandidaten im $\tau^- \rightarrow 1h$ Kanal (1.65 for $\tau^- \rightarrow x$)
- ν_e -Appearance wird auch untersucht
- Erste Ergebnis vorraussichtlich diesen Sommer

Bisherige Experimente:

Experiment	Energie	ν -typ	$(v-c)/c$
FNAL	$> 30 \text{ GeV}$	ν_{μ}	$\leq 4 \times 10^{-5}$
SN1987A	$\sim 10 \text{ MeV}$	$\bar{\nu}_e$	$\leq 2 \times 10^{-9}$
MINOS	$\sim 3 \text{ GeV}$ +Ausläufer	ν_{μ}	$5.1 \pm 2.9 \times 10^{-5}$

Für den CNGS- ν_{μ} -Strahl, $\langle E \rangle = 17$ GeV:

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

Relative Abweichung der Neutrino-Geschwindigkeit bzgl. c :

$$(\nu - c)/c = \delta t / (\text{TOF}_c - \delta t) = (2.37 \pm 0.32 \text{ (stat.) } {}^{+0.34}_{-0.24} \text{ (sys.)}) \times 10^{-5}$$

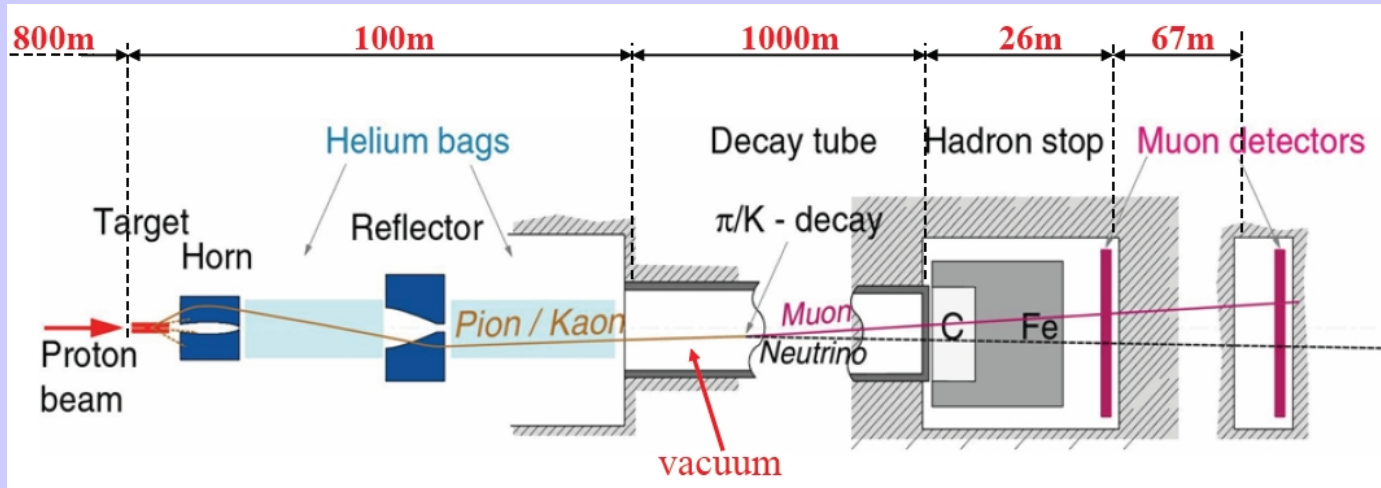
(Distanz zum durchschnittlichen Entstehungspunkt der Neutrinos: 730085 m)

Sept. 2011 Pre-Print: arXiv:1109.4897 [hep-ex]

“The OPERA Collaboration, by continuing its campaign of verifications on the neutrino velocity measurement, has identified two issues that could significantly affect the reported result. The first one is linked to the **oscillator used to produce the events time-stamps in between the GPS synchronizations**. The second point is related to the **connection of the optical fiber** bringing the external GPS signal to the OPERA master clock.

These two issues can modify the neutrino time of flight in opposite directions. While continuing our investigations, in order to unambiguously quantify the effect on the observed result, the Collaboration is looking forward to performing a new measurement of the neutrino velocity as soon as a new bunched beam will be available in 2012. An extensive report on the above mentioned verifications and results will be shortly made available to the scientific committees and agencies.”

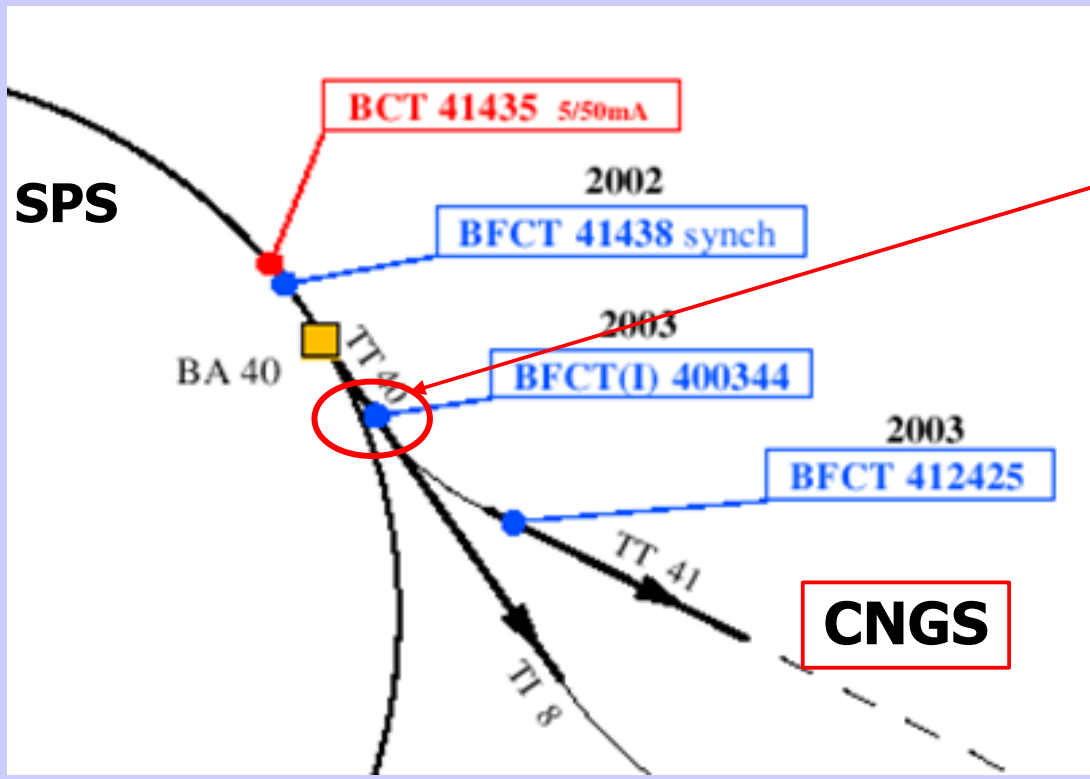
- Entstehungszeitpunkt der Neutrinos (CERN) t_A
- Ankunftszeit im Detektor (LNGS) t_B
- Flugzeit : TOF (time of flight) = $t_B - t_A$
- Flugstrecke L
- Geschwindigkeit $v = L/\text{TOF}$



- Zeitstruktur des CNGS-Strahls:
 - Länge eines Zyklus: 6 s
 - Zwei $10,5 \mu\text{s}$ -Extraktionen (durch den 'Kicker'-Magneten) im Abstand von 50 ms
 - Strahlintensität: $2,4 \cdot 10^{13}$ Protonen/Extraktion

→ Entstehungszeitpunkt eines einzelnen Neutrinos nur auf $10,5 \mu\text{s}$ eingrenzbar

Messe dazu Protonen statt Neutrinos!

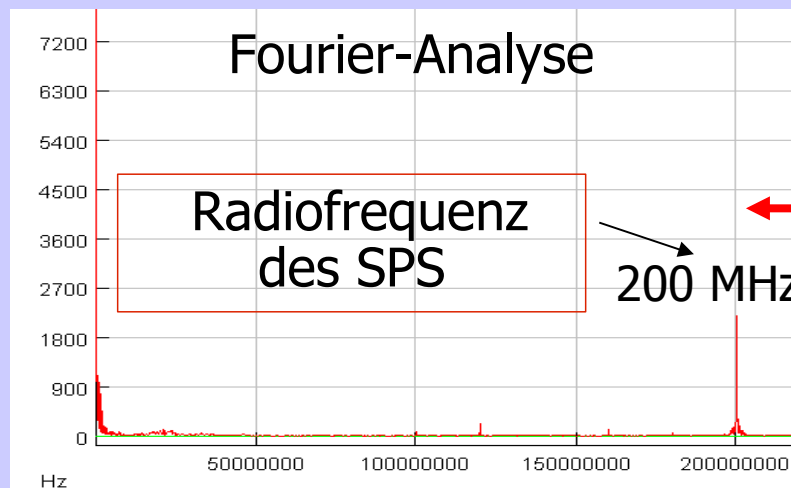
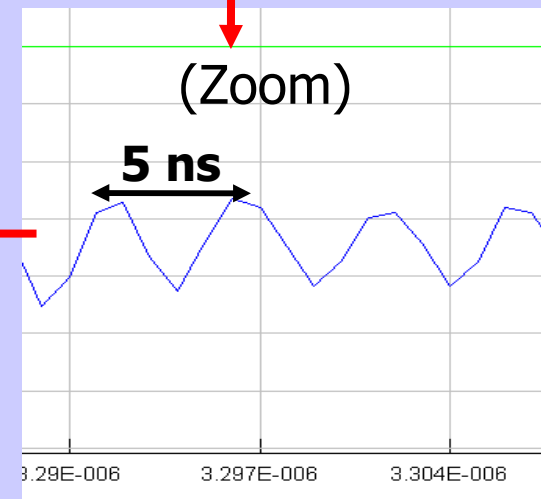
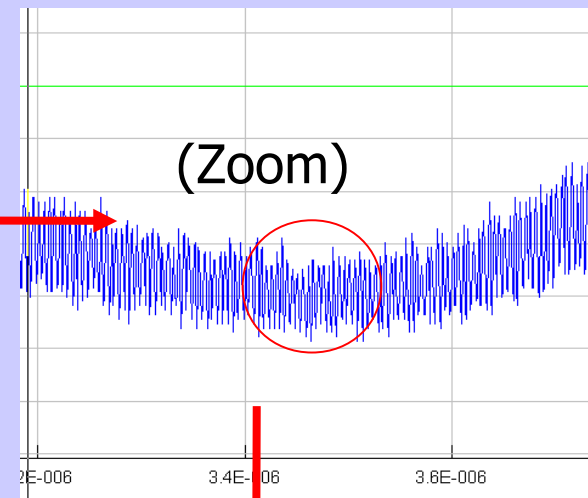
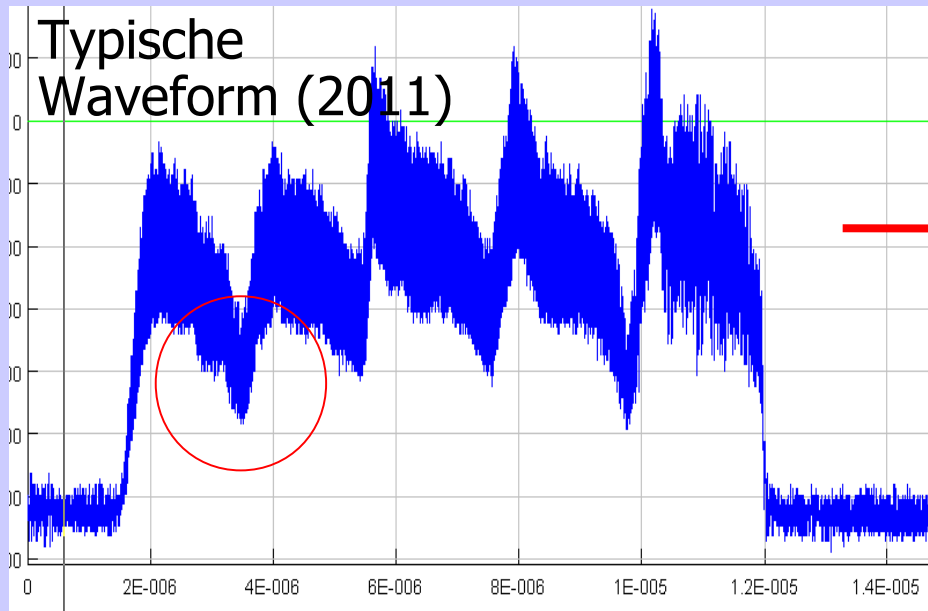


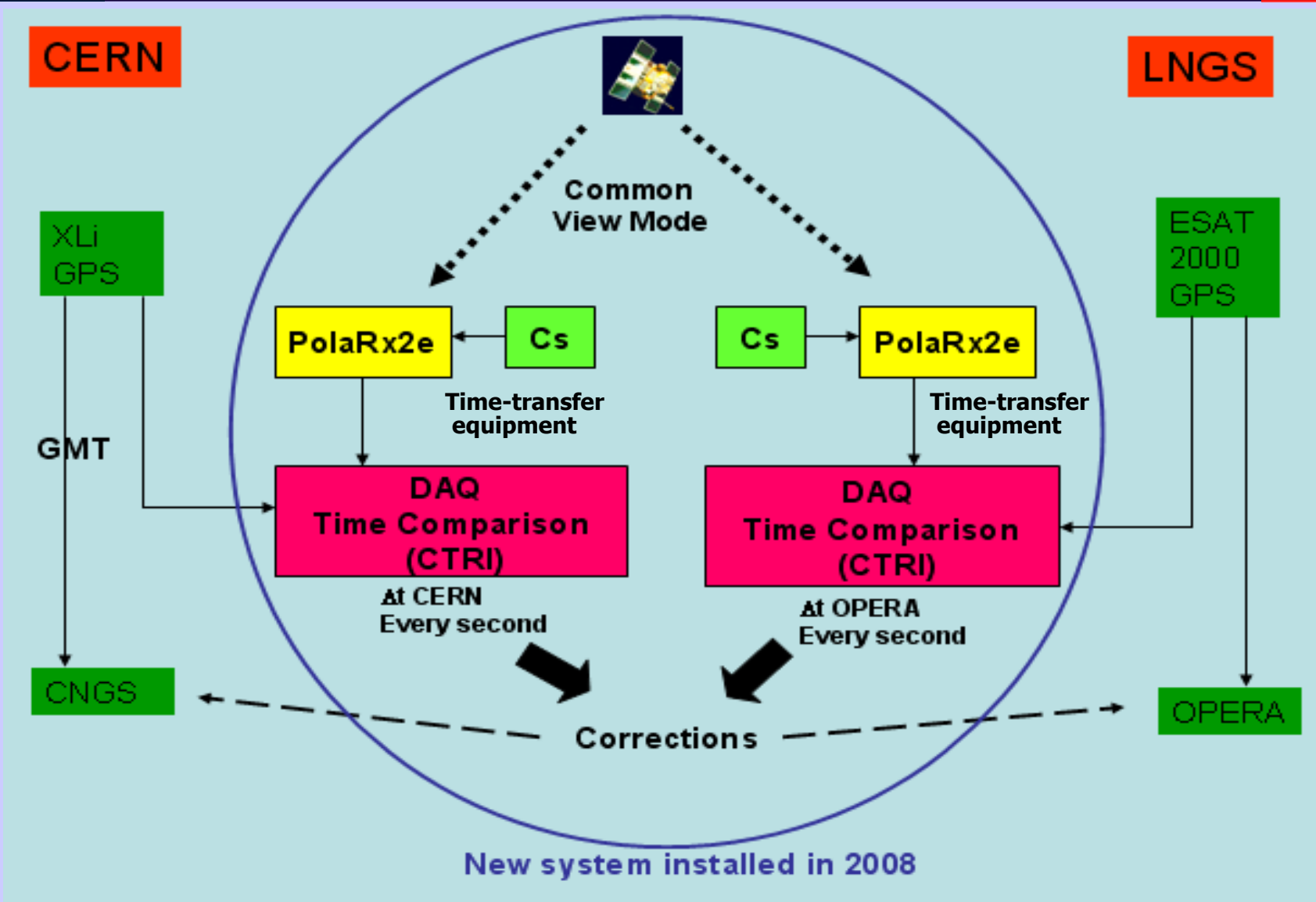
Fast BCT 400344
(~ 400 MHz)

Digitalisierung der Protonenpulse:

- Acqiris DP110 1GS/s waveform digitizer (WFD)
- WFD ausgelöst durch Kopie des Kicker-signals
- 'Waveforms' werden 'UTC-stamped' und in CNGS-Datenbank für Offline-Analyse gespeichert

Form der Protonen-Spills





2008: Installation von hochgenauem Zwillingssystem
kalibriert von METAS (Schweizer Metrology Institut)
→ Septentrio GPS PolaRx2e + Symmetricom Cs-4000

PolaRx2e (GPS-Empfänger):

- Frequenz-Referenz von Cs-Uhr
- Interne zeitliche Markierung eines 1PPS in Bezug auf individuelle Satelliten-Signale
- Offline 'common-view'-Analyse
- Ionosphärenfreier P3-Code

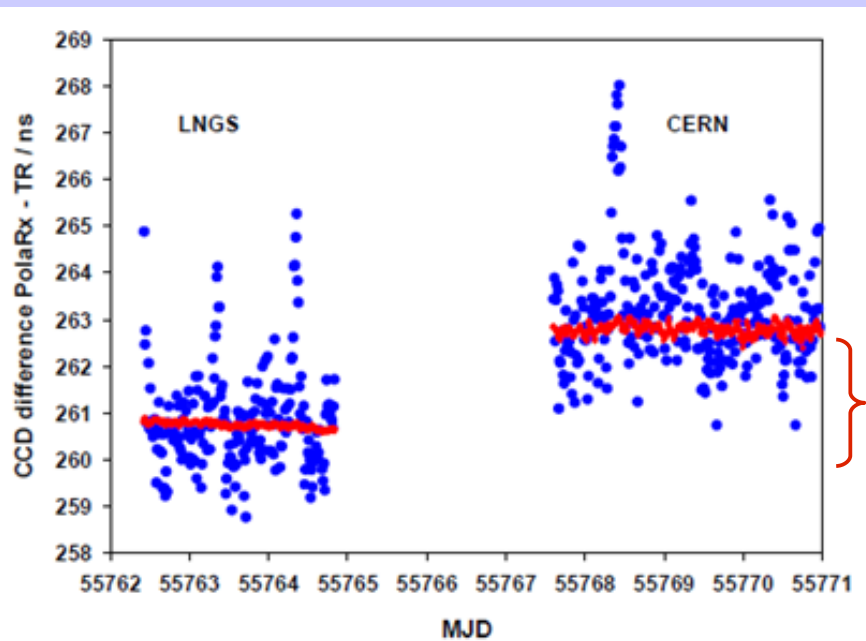
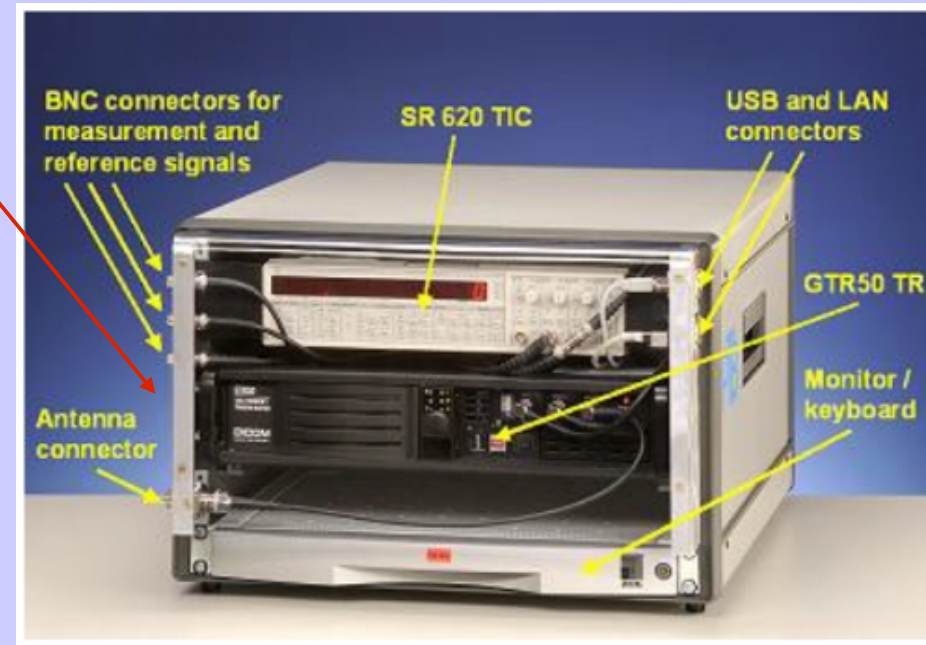
Standardtechnik für hochgenaue Zeittransfers

Permanente zeitliche Verbindung (~ 1 ns) zwischen Referenzpunkten
am CERN und OPERA ('time link')

Unabhängige Kalibration des Zwillingsystems durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

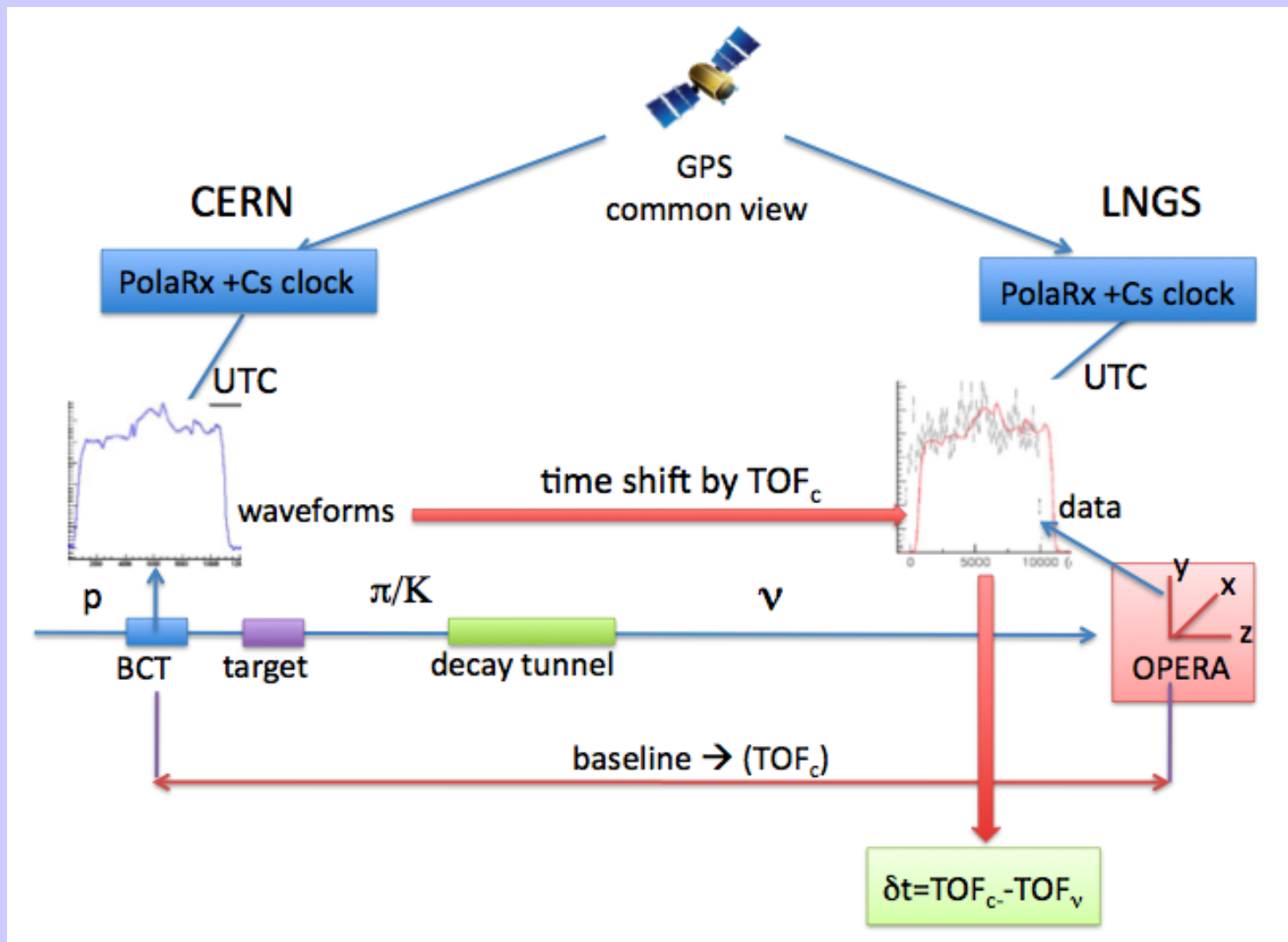
Hochgenauer/-stabiler tragbarer Zeittransfer-aufbau am CERN und LNGS

GTR50 GPS Empfänger, thermalisiert, externe Cs-Frequenzquelle, eingebetteter Zeitintervall-Zähler

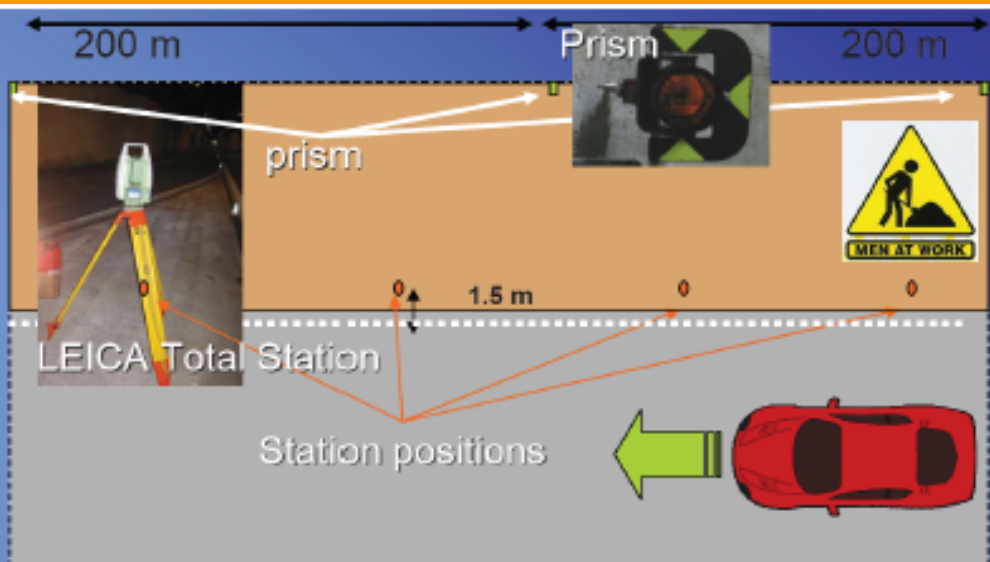


Korrektur auf zeitliche Verbindung:

$$t_{\text{CERN}} - t_{\text{OPERA}} = (2.3 \pm 0.9) \text{ ns}$$



Messwert $\delta t = TOF_c - TOF_v$

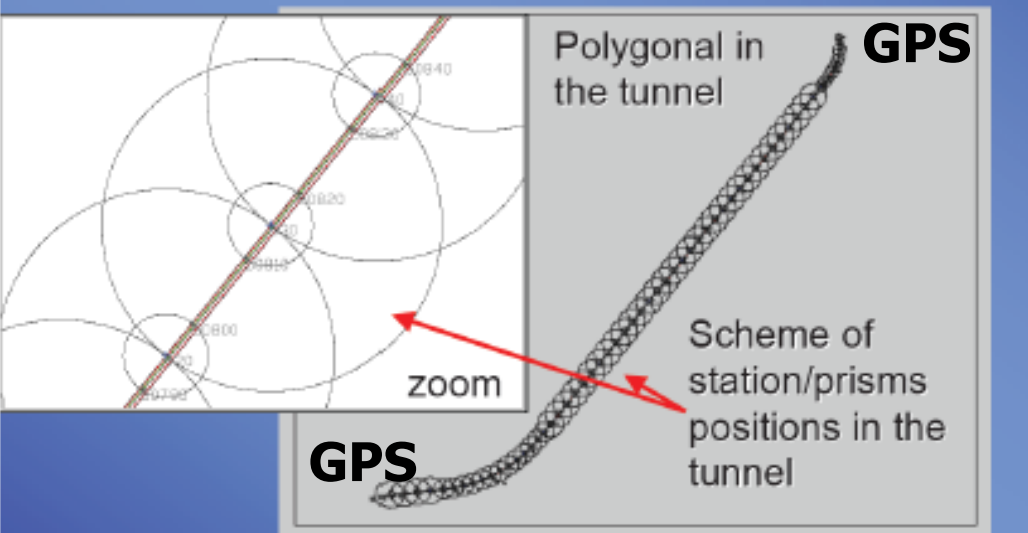


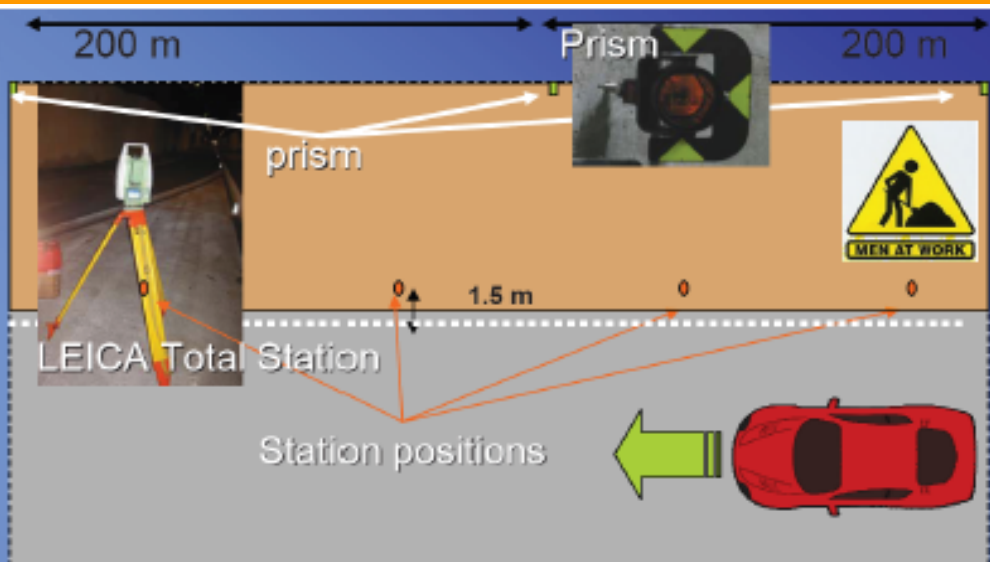
- Dedizierte Messung am LNGS: Juli-Sept. 2010
(Rome Sapienza Geodäsiegruppe)

- 2 neue GPS-Markierungspunkte auf jeder Seite des 10 km Autobahntunnels

- Optischer Transport der GPS-Messung zu OPERA

- Zweite Messung gleichzeitig an CERN/LNGS: Juni 2011



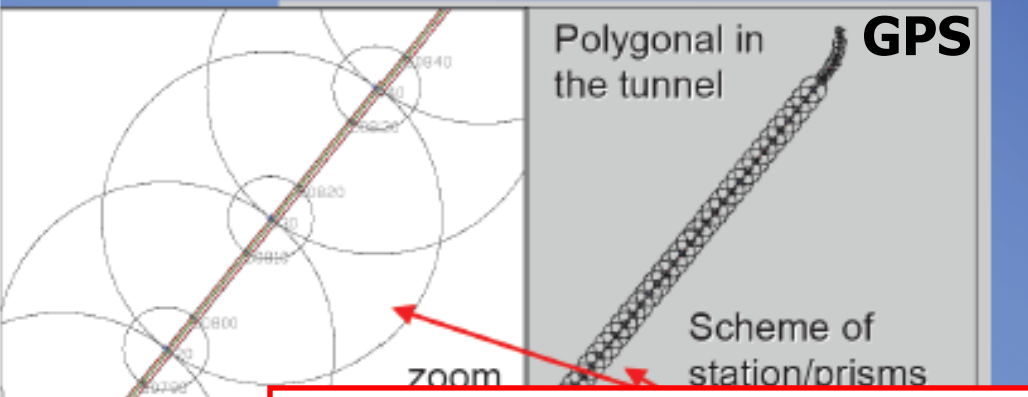


- Dedizierte Messung am LNGS: Juli-Sept. 2010
(Rome Sapienza Geodäsiegruppe)

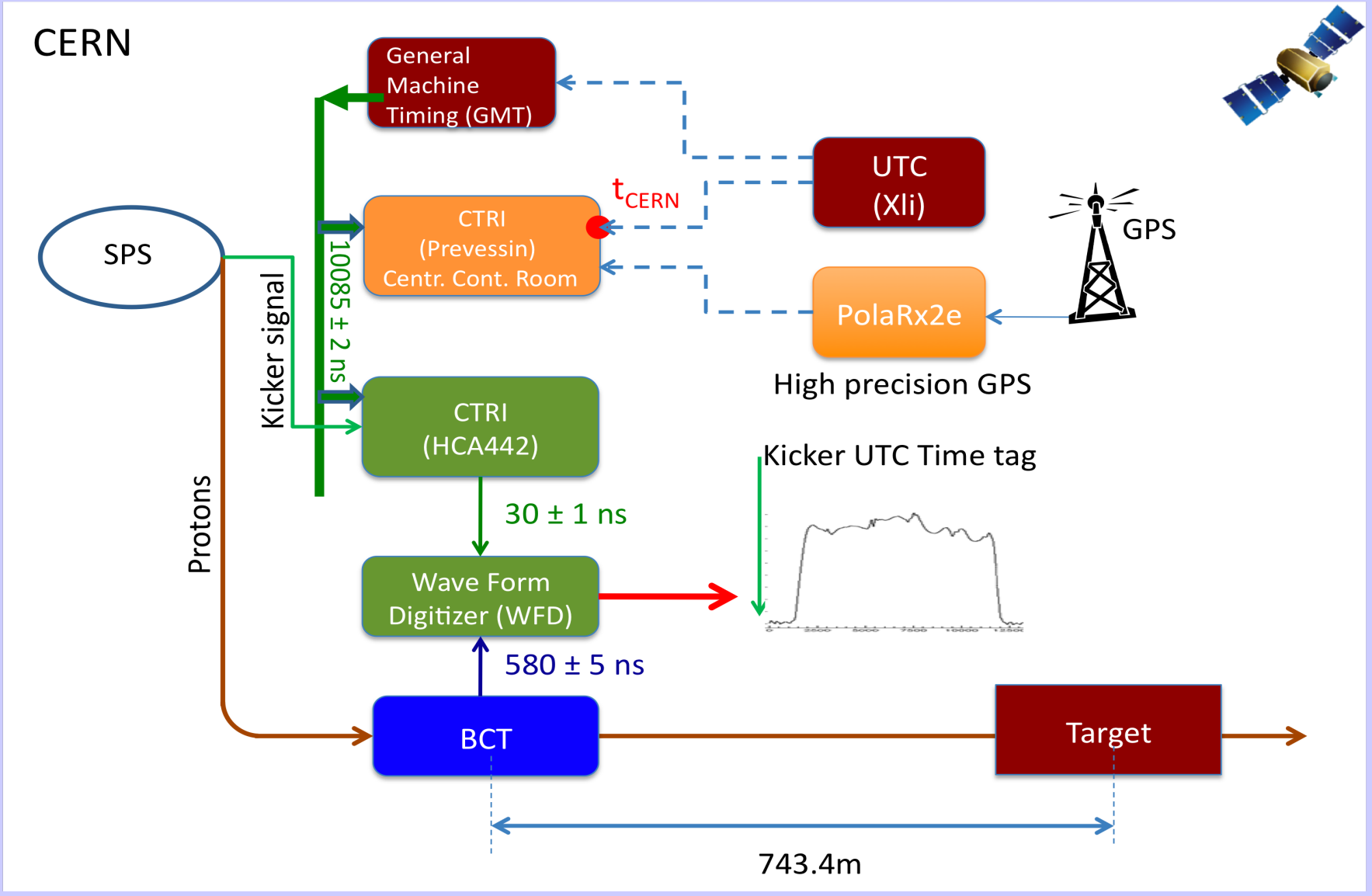
- 2 neue GPS-Markierungspunkte auf jeder Seite des 10 km Autobahntunnels

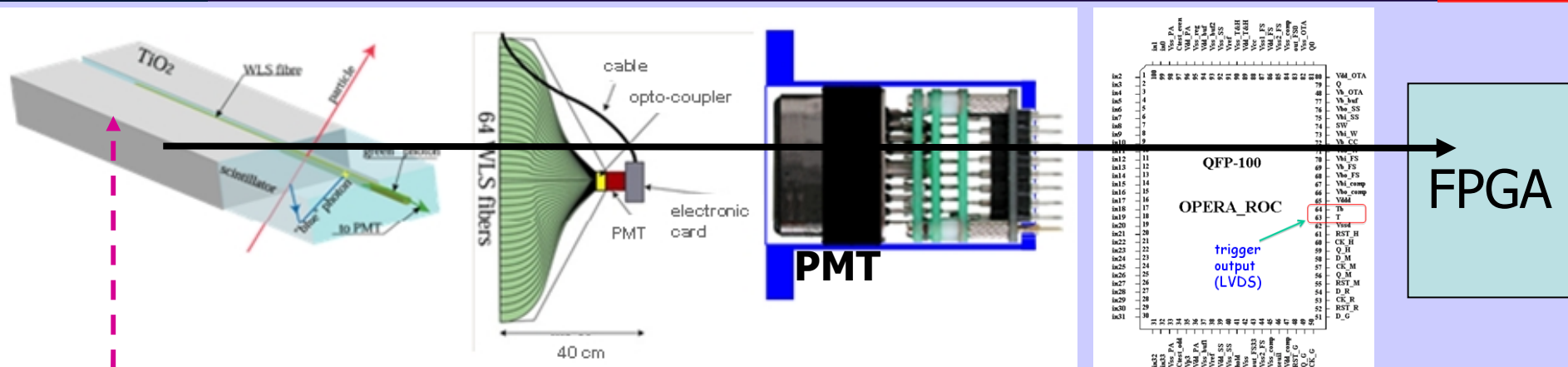
- Optischer Transport der GPS-Messung zu OPERA

- Zweite Messung gleichzeitig an CERN/LNGS: Juni 2011



**Resultierende Distanz (BCT – OPERA Bezugspunkt)
(731278.0 ± 0.2) m**





Szintillator, WLS-Fiber, PMT, analoger FE-chip (ROC) bis zum FPGA-Trigger-Input

Anregung mit UV-Laser:

→ Zeit zwischen Photokathode u. FPGA-Input: 50.2 ± 2.3 ns

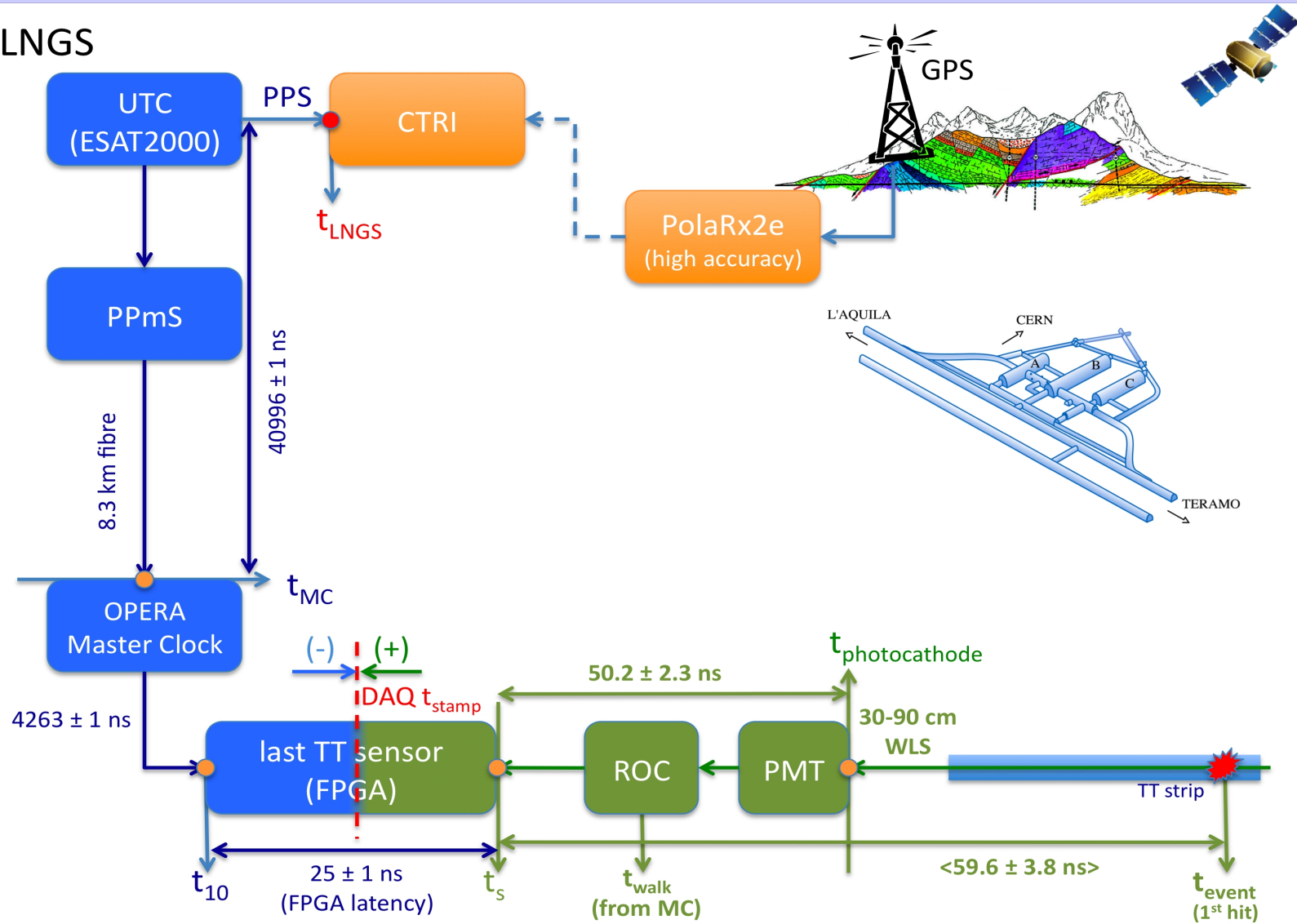
Durchschnittliche Zeitverzögerung: 59.6 ± 3.8 ns (sys)

(Durch Simulation ermittelt. Umfasst u.a. Orts- und p.h.-Abhängigkeit, ROC time-walk, Effekte der Quantisierung der DAQ)

Picosecond Injection Laser (PiLas)

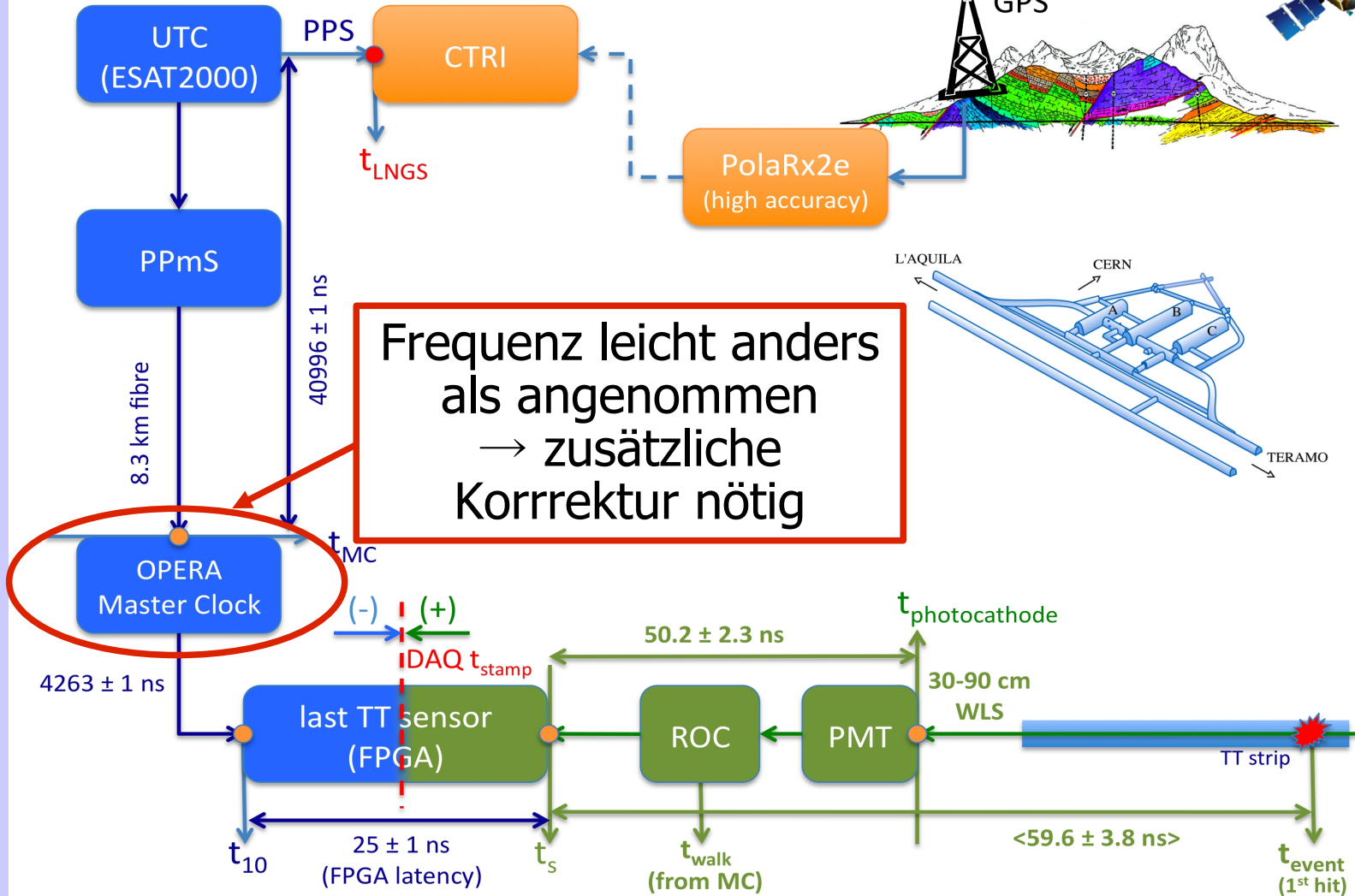


LNGS



- Schlechte optische Verbindung des Glasfaserkabels an OPERA-Master-Clock
 - Faser war scheinbar schräg in O/E-Konverter
 - weniger Licht gelangt in Sensor
 - Verzögerung des Signals
 - Hat δt vergrößert
- Frequenz der Master-Clock leicht höher als angenommen
 - Individuelle Korrektur für jedes Ereignis
 - Hat δt verkleinert

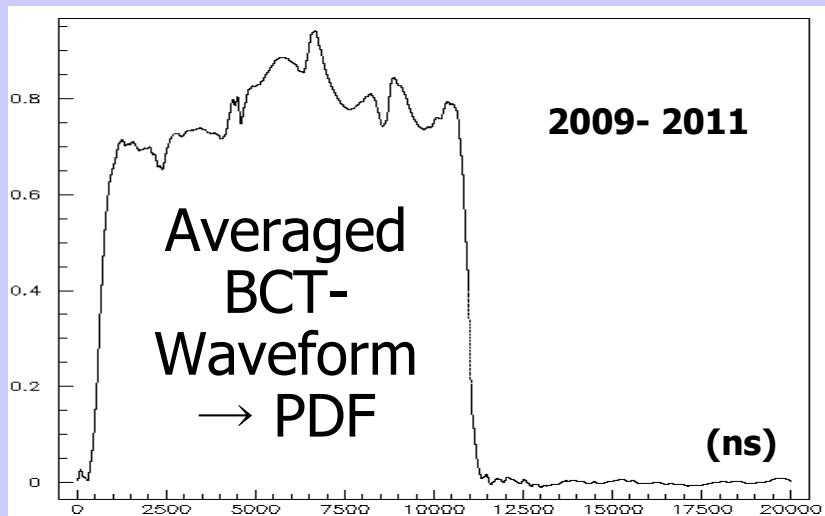
LNGS



- Jedes Ereignis wird mit Waveform des Protonen-Spills assoziiert
- 'Mutter'-Proton unbekannt innerhalb 10.5 μs Extraktionszeit
- Normierte Summe der Waveforms: PDF der erwarteten Zeitverteilung der Neutrino-Ereignisse
- Vergleich mit Zeitpunkt der Neutrino-Ereignisse in OPERA

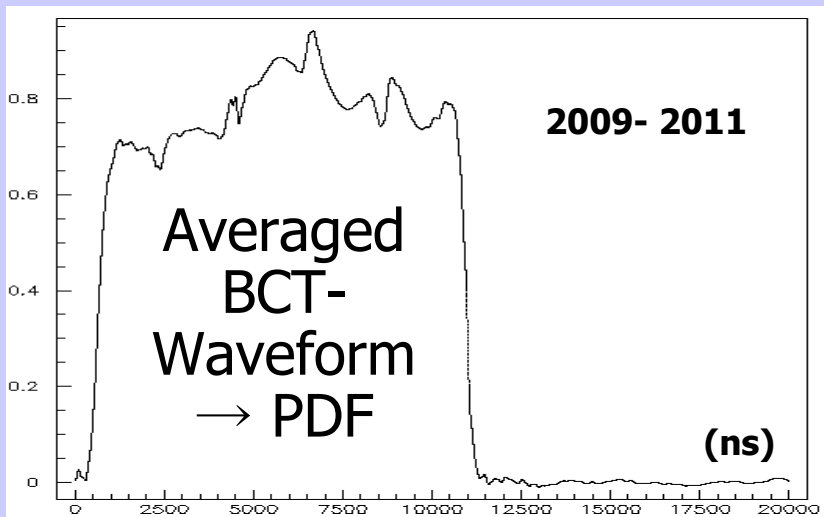
Likelihood-Analyse:

$$L_k(\delta t_k) = \prod_j w_k(t_j + \delta t_k) \quad k=1,2 \text{ extractions}$$



Details im Vortrag von Torben Ferber: T 31.2 Fr 9:40

- Jedes Ereignis wird mit Waveform des Protonen-Spills assoziiert
- 'Mutter'-Proton unbekannt innerhalb 10.5 μs Extraktionszeit
- Normierte Summe der Waveforms: PDF der erwarteten Zeitverteilung der Neutrino-Ereignisse
- Vergleich mit Zeitpunkt der Neutrino-Ereignisse in OPERA



Likelihood-Analyse:

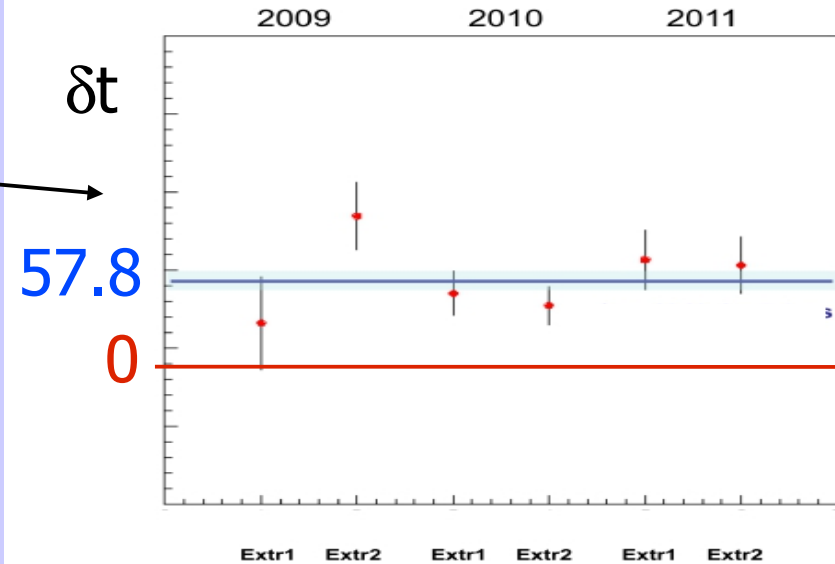
$$L_k(\delta t_k) = \prod_j w_k(t_j + \delta t_k) \quad k=1,2 \text{ extractions}$$

Ergebnis:
 $\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v =$
 $(57.8 \pm 7.8) \text{ ns (stat)}$

Werte werden sich ändern!

Details im Vortrag von Torben Ferber: T 31.2 Fr 9:40

- Kohärenz innerhalb CNGS-Läufe/Extraktionen

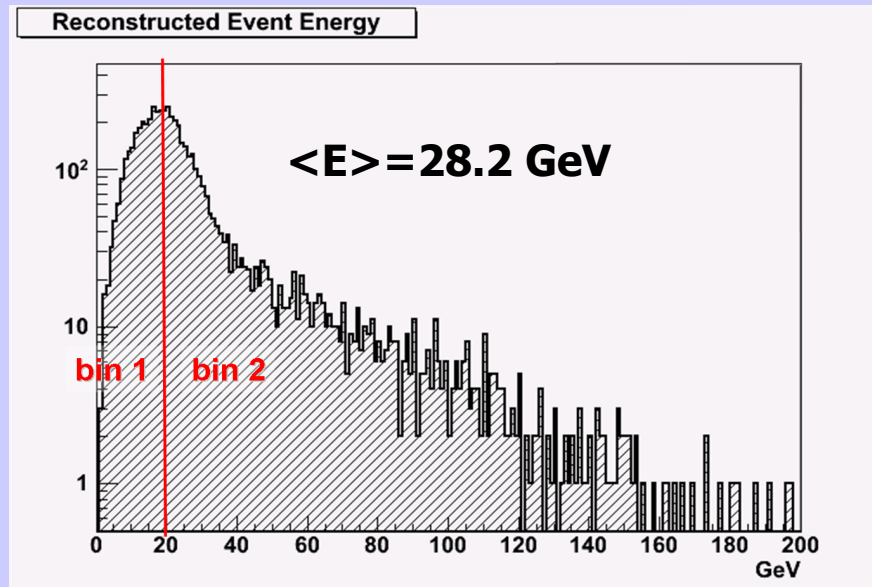


- Extraktionen hoher vs. niedriger Intensität
 - (6.8 ± 16.6) ns

Werte der alten Analyse ohne neue Systematiken!

- Kein Hinweis auf Tag-Nacht oder Jahreszeit-Effekte:
 - $|t-n|$: (16.4 ± 15.8) ns
 - $|(\text{Frühling+Herbst}) - \text{Sommer}|$: (15.6 ± 15.0) ns

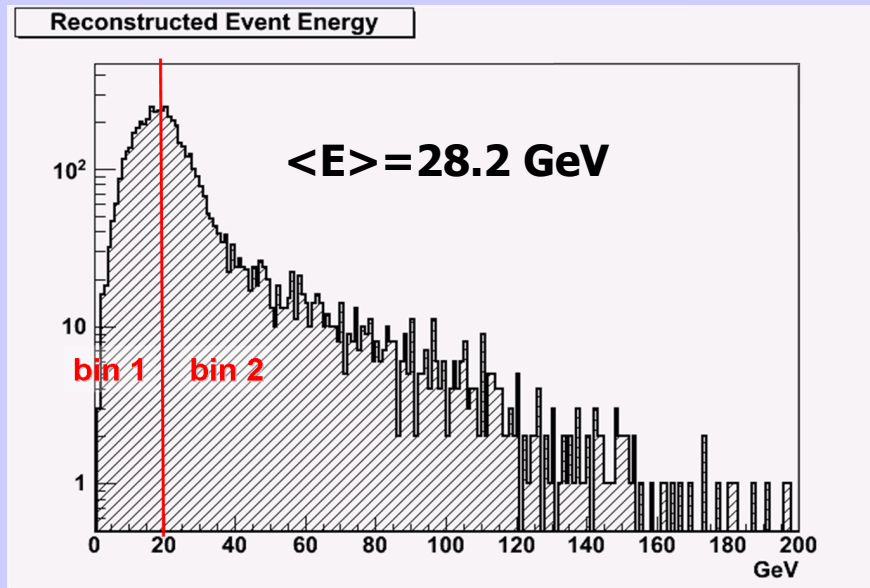
Systematic uncertainties	ns	Error distribution
Baseline (20 cm)	0.67	Gaussian
Decay point	0.2	Exponential (1 side)
Interaction point	2.0	Flat (1 side)
UTC delay	2.0	Gaussian
LNGS fibres	1.0	Gaussian
DAQ clock transmission	1.0	Gaussian
FPGA calibration	1.0	Gaussian
FWD trigger delay	1.0	Gaussian
CNGS-OPERA GPS synchronisation	1.7	Gaussian
MC simulation for TT timing	3.0	Gaussian
TT time response	2.3	Gaussian
BCT calibration	5.0	Gaussian
Total systematic uncertainty	-5.9, +8.3	



Nur interne Muon-Neutrino-CC-Ereignisse für Energiemessung
 $(E = E_{\mu} + E_{\text{had}})$

Volle MC-Simulation: Keine Energieabhängigkeit der zeitlichen Signalentwicklung im Detektor ($<1 \text{ ns}$) \rightarrow Systematische Fehler heben sich auf

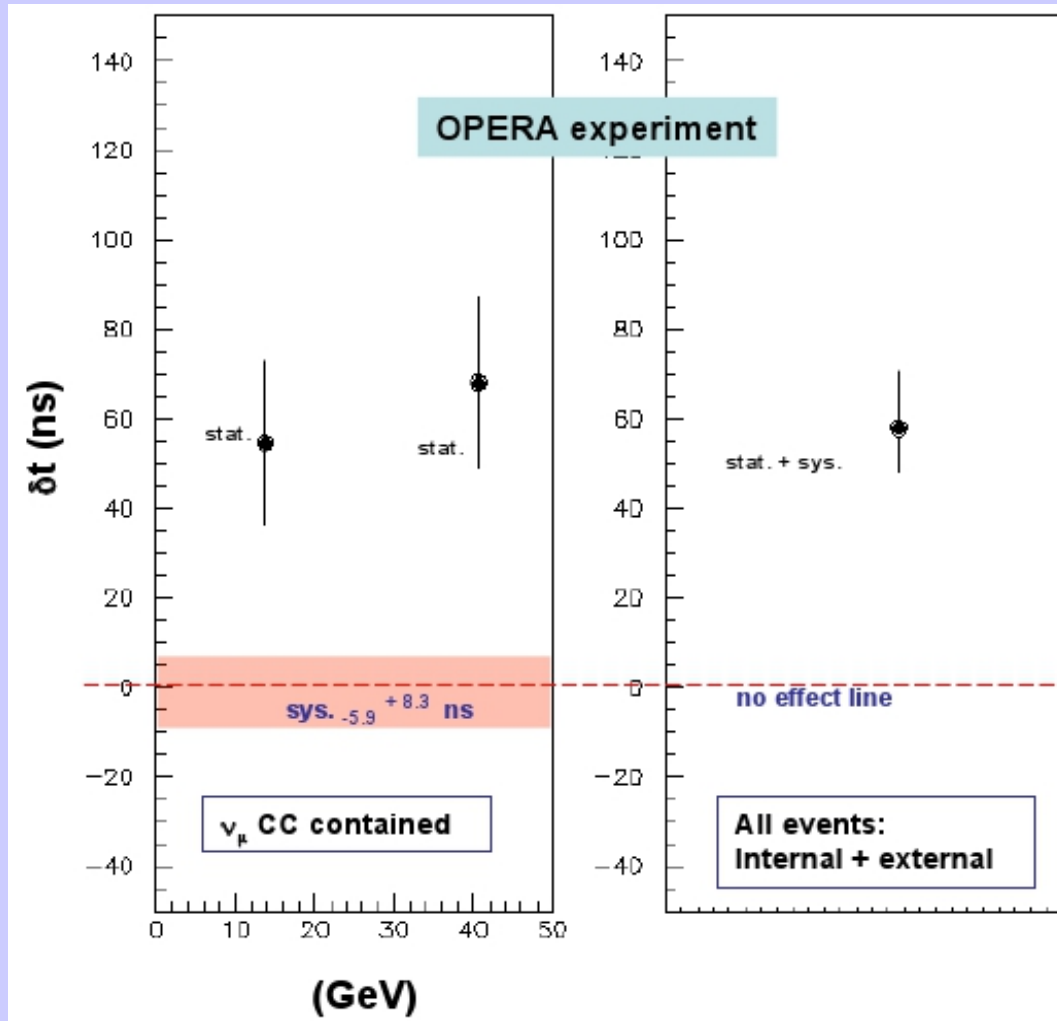
$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v = (61.1 \pm 13.2 \text{ (stat.) } {}^{+7.3}_{-6.9} \text{ (sys.)}) \text{ ns für } \langle E_v \rangle = 28.2 \text{ GeV}$$



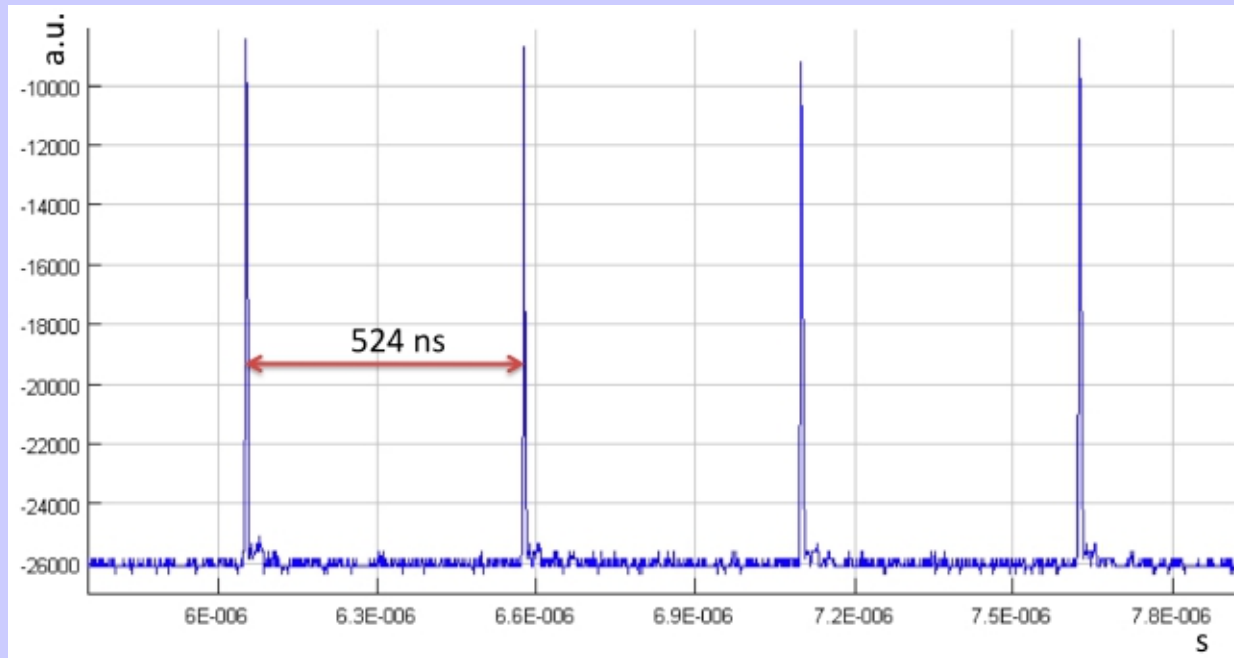
Wert der alten Analyse ohne neue Systematiken!
 Nur zu Vergleichszwecken mit anderen alten Werten.

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v = (61.1 \pm 13.2 \text{ (stat.) } ^{+7.3}_{-6.9} \text{ (sys.)}) \text{ ns für } \langle E_v \rangle = 28.2 \text{ GeV}$$

Keine Hinweise auf eine Energieabhängigkeit innerhalb der derzeitigen Sensitivität und dem betrachteten Energiebereich

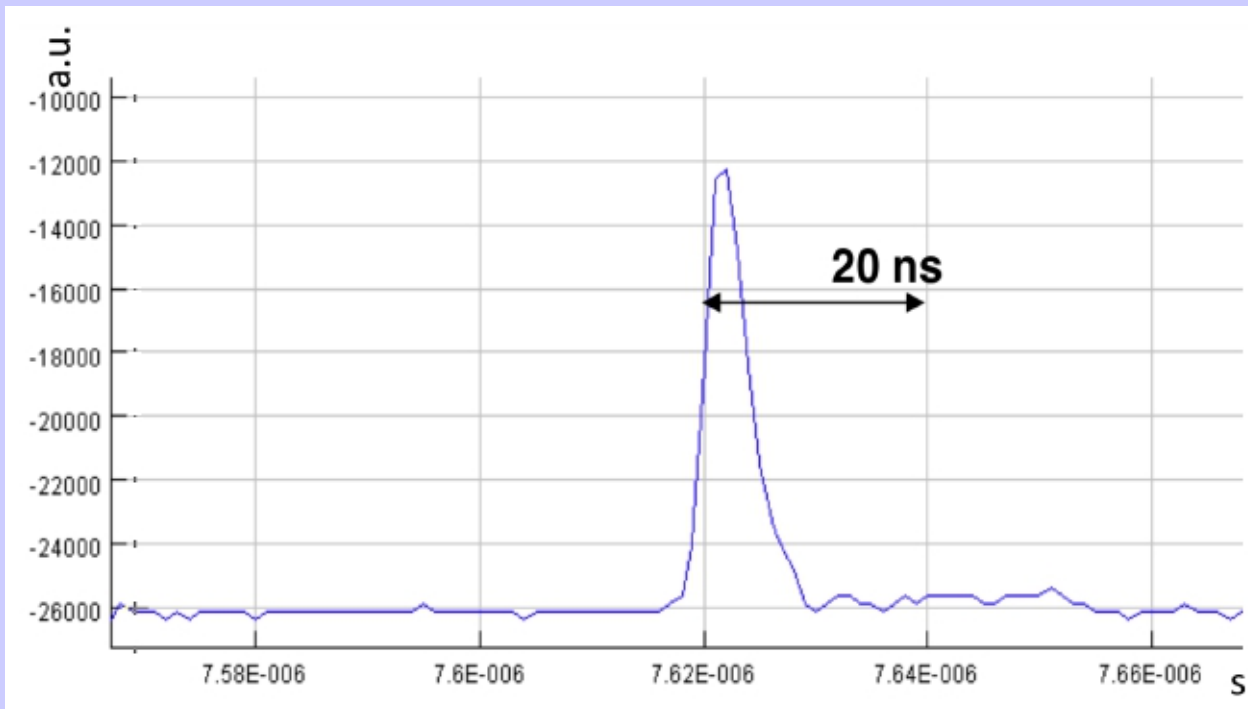


- 1 Extraktion pro Zyklus mit $\sim 1.1 \cdot 10^{12}$ pot
 - 4 Pakete pro Extraktion mit FWHM 3 ns
 - Pakete durch 524 ns getrennt
- Intensität $\sim 1/60$ normale Intensität

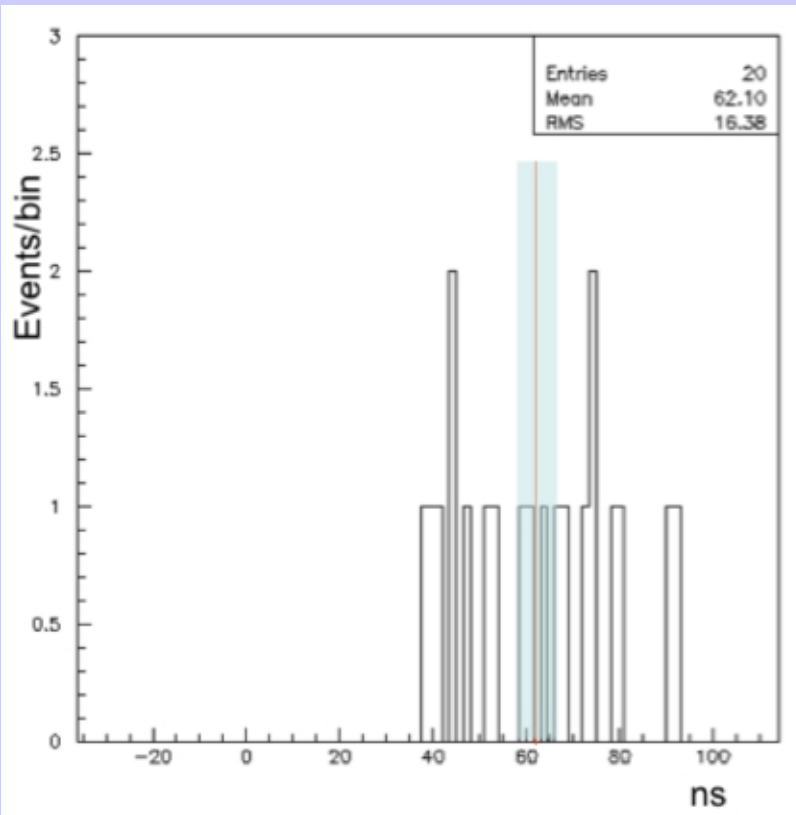


→ Messung der Flugzeit für einzelne Ereignisse!

- 22. Oktober - 10. November
- Totale integrierte Intensität $4 \cdot 10^{16}$ pot
- Normale Auswahl der Ereignisse:
→ 20 Ereignisse



- RMS = 16.4 ns
- Durchschnitt: $\delta t = (62.1 \pm 3.7 \text{ (stat.) } ^{+8.3}_{-5.9} \text{ (sys.)}) \text{ ns}$
- Gleichverteilt auf die 4 Pakete des Strahls



Werte der alten Analyse ohne neue Systematiken!

- Als Fehlerquellen können ausgeschlossen werden:
- Analysemethode
 - Lange Protonen-Waveform
 - Bei der Analyse verwendete Filter

- Laufende/geplante Maßnahmen:
 - Diamant-Detektoren hinter Zerfallstunnel
 - Stoppsignal mit anderen Subdetektoren
 - Andere Experimente planen Messungen:
 - LNGS: Borexino, LVD, Icarus
 - Minos, T2K, ...
 - Uhrensynchronisation mit anderer Methode testen (Borexino)
 - Distanz noch mal vermessen (Borexino)

- OPERA hat das Potential die Neutrino-geschwindigkeit mit der bisher besten Genauigkeit im Labor zu messen
- Methode: Vergleich von Proton-Waveform mit Neutrino-Ankunftszeit
- Messung mit gepulstem Strahl war sehr erfolgreich












- Bisherige Ergebnisse zeigten ein verfrühtes Ankommen (ca. 60 ns) der Neutrinos in Bezug auf die Lichtgeschwindigkeit
- Kürzlich zwei neue systematische Einflüsse identifiziert:
 - Schlechte Faserverbindung am O/E-Konverter
 - Leicht andere Frequenz der Master-Clock
- Beide zusammen reichen möglicherweise um die Abweichung von der Lichtgeschwindigkeit zu erklären
- Gewissheit erst nach weiteren Messungen
 - Am besten mit gepulstem Strahl (Mai)

A photograph of a large industrial facility, likely a particle accelerator, showing complex machinery and a sign that reads "MAGNET ON". The scene is filled with metal structures, pipes, and cables, with a prominent blue banner overlaid in the center.

*Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!*

**MAGNET
ON**

~160 Physiker, 30 Institute, 11 Länder

<p>Belgium IIHE-ULB Brussels</p> 	<p>Italy LNGS Assergi Bari Bologna LNF Frascati L'Aquila Naples Padova Rome Salerno</p> 	<p>Korea Jinju</p> 
<p>Croatia IRB Zagreb</p> 	<p>Japan Aichi Toho Kobe Nagoya Utsunomiya</p> 	<p>Russia INR RAS Moscow LPI RAS Moscow ITEP Moscow SINP MSU Moscow JINR Dubna</p> 
<p>France LAPP Ancecy IPNL Lyon IPHC Strasbourg</p> 	<p>Switzerland Bern ETH Zurich</p> 	
<p>Germany Hamburg</p> 	<p>Turkey METU Ankara</p> 	
<p>Israel Technion Haifa</p> 		

Zusätzliche Unterstützung für diese Studie:

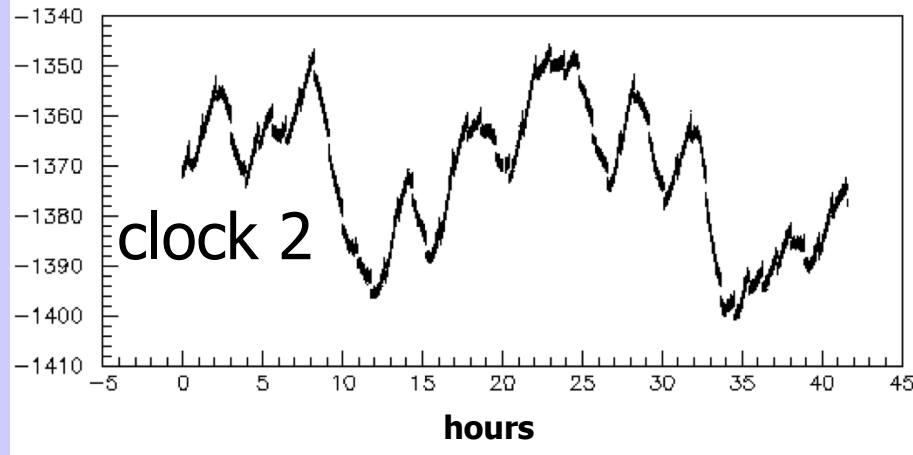
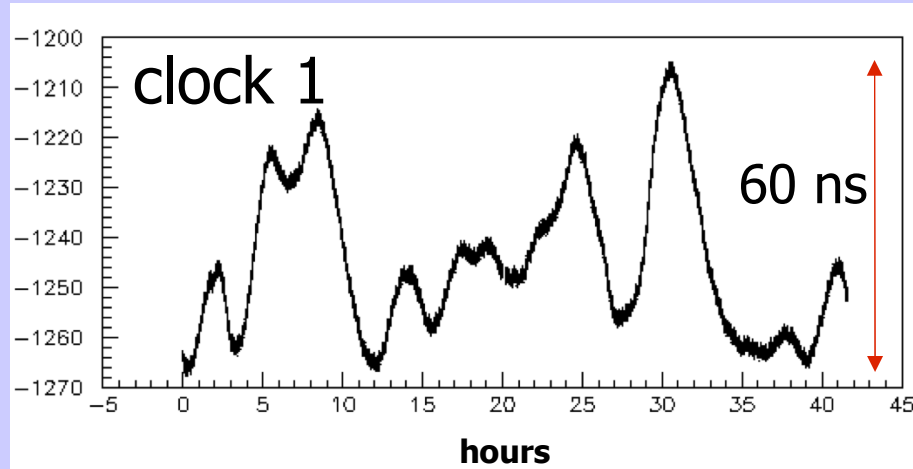
CERN: CNGS-, Vermessungs-, Zeitmess- und PS-Gruppen

PTB (Nationales Metrology Institut, Deutschland)

METAS (Nationales Metrology Institut, Schweiz)

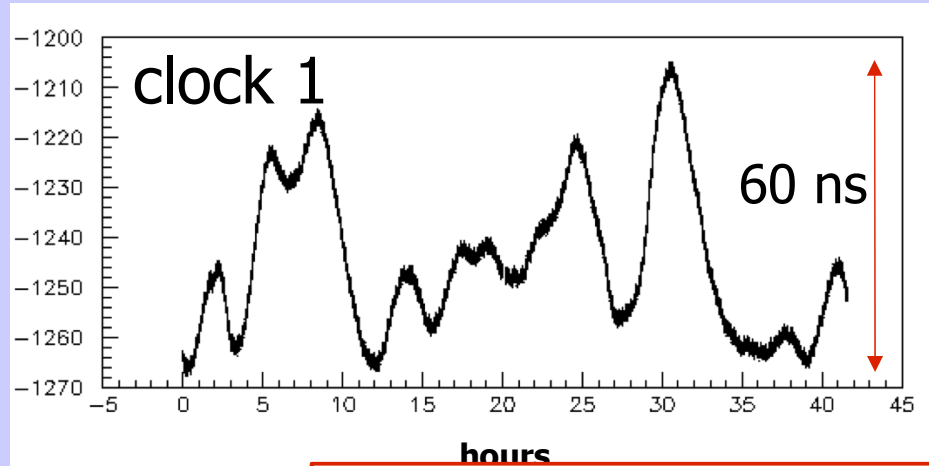
Uni versità Sapi enza (Universität Rom (Italien)): Geodäs्य Gruppe

- Benutze Szintillatoren als Trigger und zur Vorhersage des ECC-Ziegels der Neutrino-Vertex enthält
- Extrahiere den Ziegel mit Robotersystem
- Untersuche CS dieses Ziegels, lasse Ziegel im Untergrund
- Vergleiche TT-Vorhersage mit Spuren im CS – wenn sie zueinander passen:
- Scanne Ziegel entlang der vom CS vorhergesagten Spuren
- Vertex Gefunden? Suche nach Zerfallstopologie...



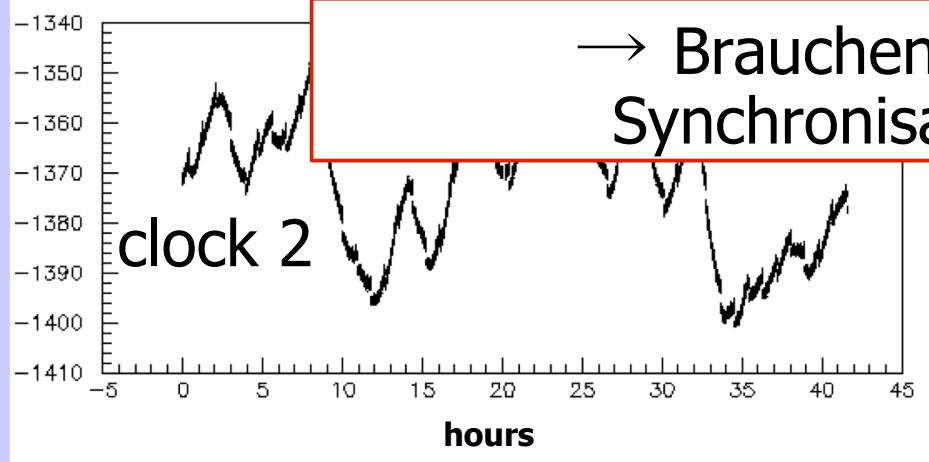
Vergleich mit Cs Uhr:

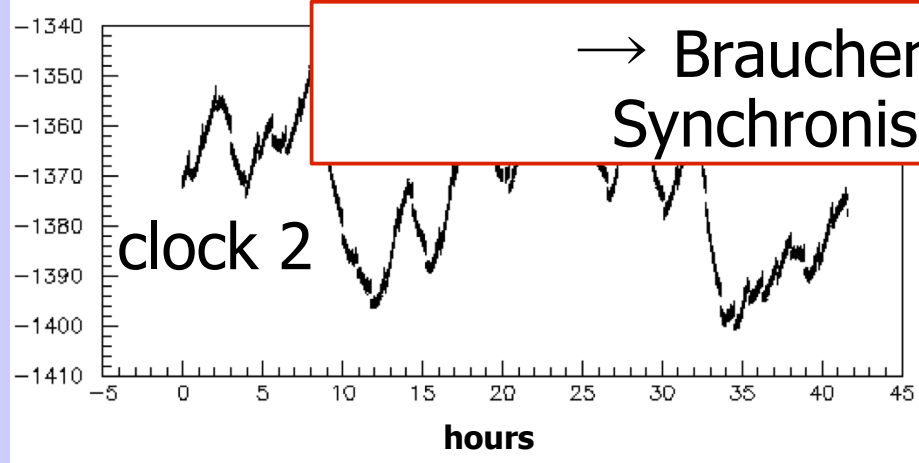
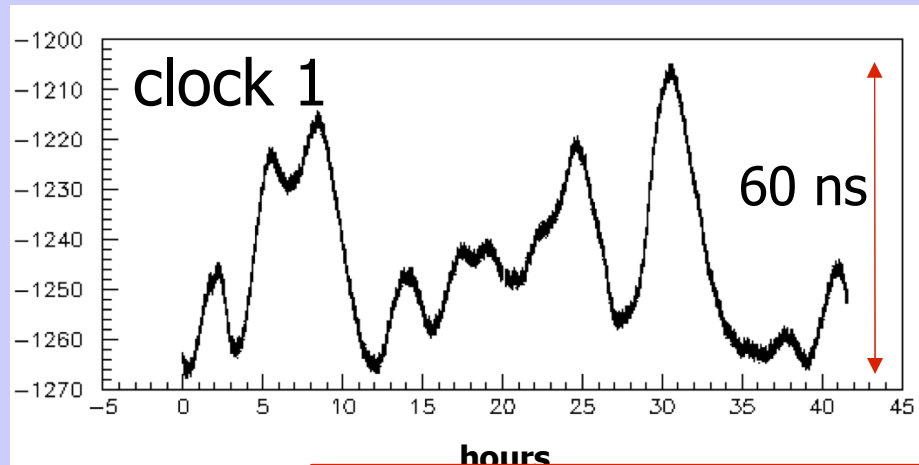
- Große Schwankungen
- Unsicherheiten bzgl. CERN-OPERA Synchronisation



Vergleich mit Cs Uhr:

- Große Schwankungen
- Unsicherheiten bzgl. CERN-OPERA Synchronisation



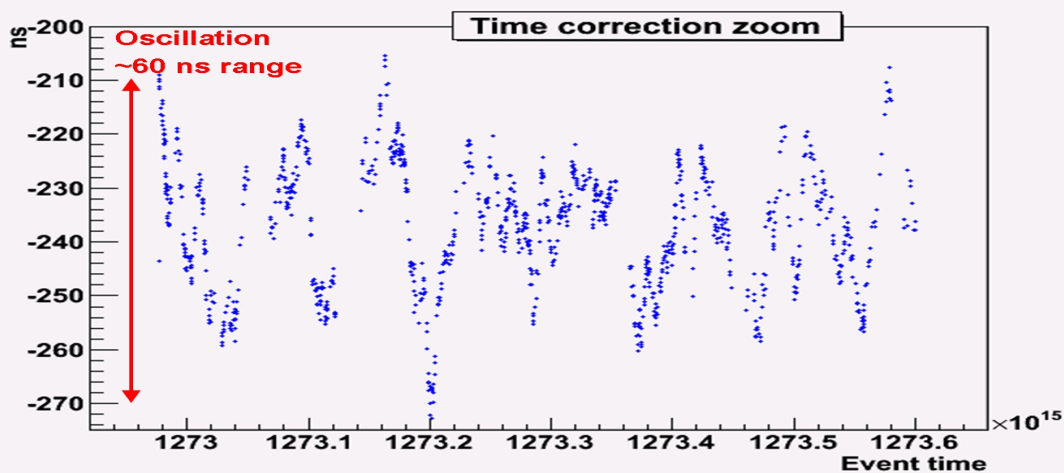
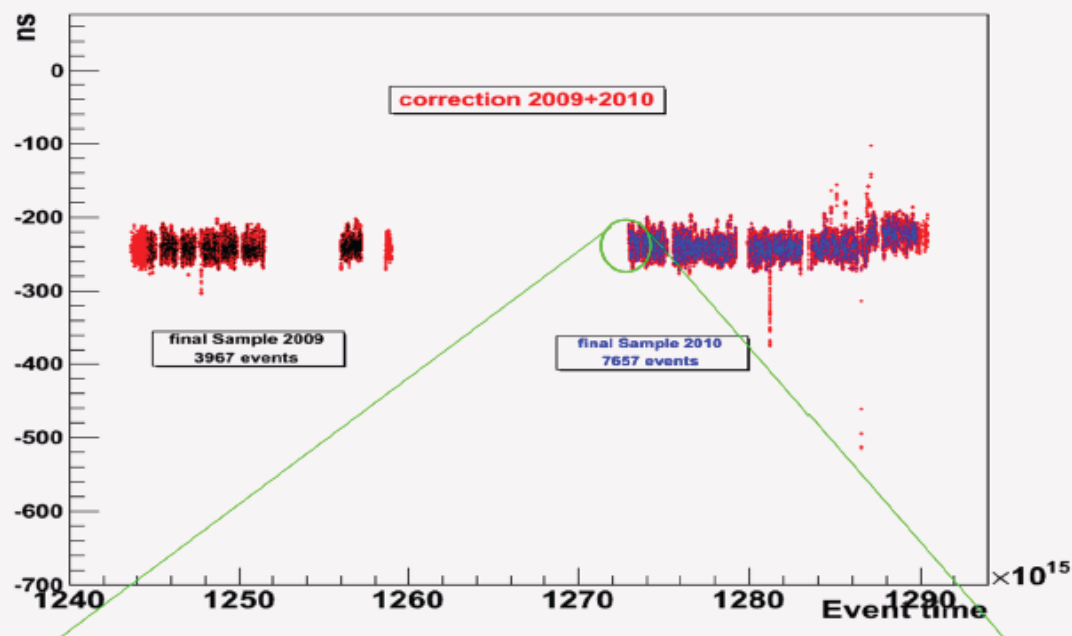


→ Brauchen akkurate Zeit-Synchronisations-System

Vergleich mit Cs Uhr:

- Große Schwankungen
- Unsicherheiten bzgl. CERN-OPERA Synchronisation

- Zusammenarbeit mit CERN timing team seit 2003
- Bedeutende Verbesserung des Systems in 2008



Frühestes TT-Signal eines Ereignisses als "Stop"

Individuelle Korrekturen:

- Time-Link Korrektur (Synchronisation zwischen CERN und LNGS)
- Position bezüglich Referenzpunkt (durschnittliche Korrektur: 140 cm \approx 4.7 ns)

Statistik: 2009-2010-2011 CNGS-Laufzeiten ($\sim 10^{20}$ pot)

Interne Ereignisse:

Selbe Auswahlprozedur wie bei Oszillationssuche: 7586 Ereignisse

Externe Ereignisse:

Wechselwirkung im Fels \rightarrow verlange 3D Muonspur: 8525 Ereignisse

Zusätzliches Säubern: Erstes Signal isoliert bzgl. Zeit oder Position

\rightarrow 5% Ereignisse entfernt \rightarrow 7235 interne und 7988 externe Ereignisse übrig

(Volle Simulation der zeitlichen Signalverarbeitung ergab: 2 ns systematische Unsicherheit durch Hinzunahme externer Ereignisse, ansonsten Übereinstimmung zwischen Daten und MC)

Für jedes Neutrino-Ereignis in OPERA → Wellenform der Protonextraktion (normalisiert)
 Summiere und normalisiere: → PDF $w(t)$ → separate likelihood für beide Extraktionen

$$L_k(\delta t_k) = \prod_j w_k(t_j + \delta t_k) \quad k=1,2 \text{ extractions}$$

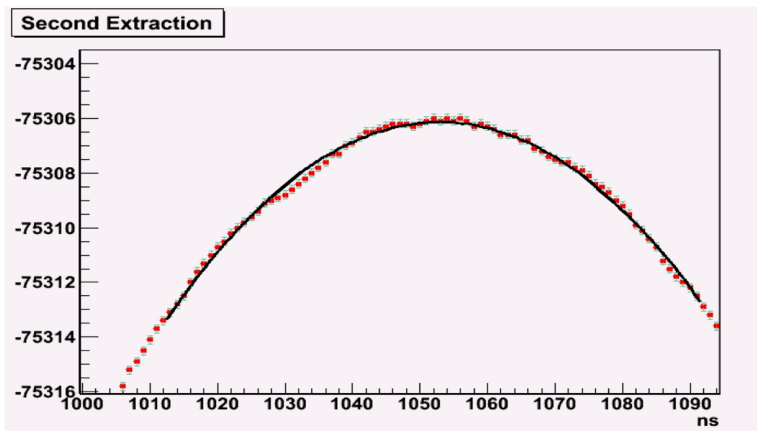
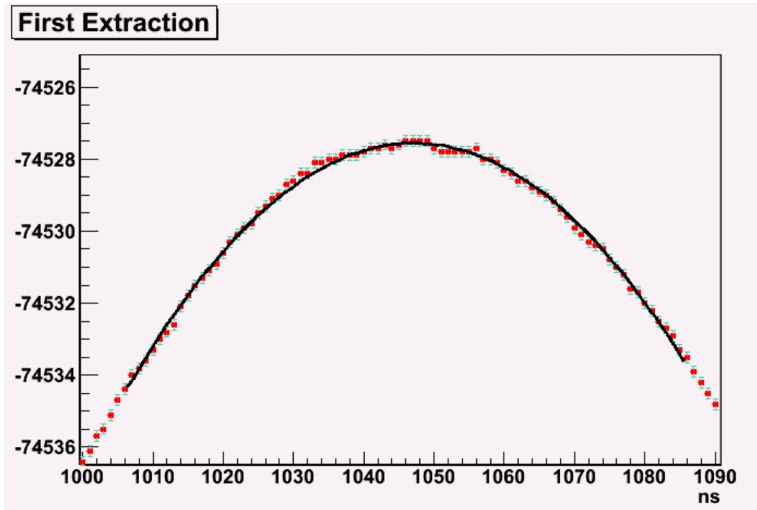
(unbinned, 1 ns scan of δt)

Maximiere bzgl. δt :

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v$$

Positives (negatives) δt → Neutrinos schneller (langsamer) als Licht

Statistischer Fehler ermittelt durch log-likelihood-Kurven



Signalzeit zwischen BCT und WFD:

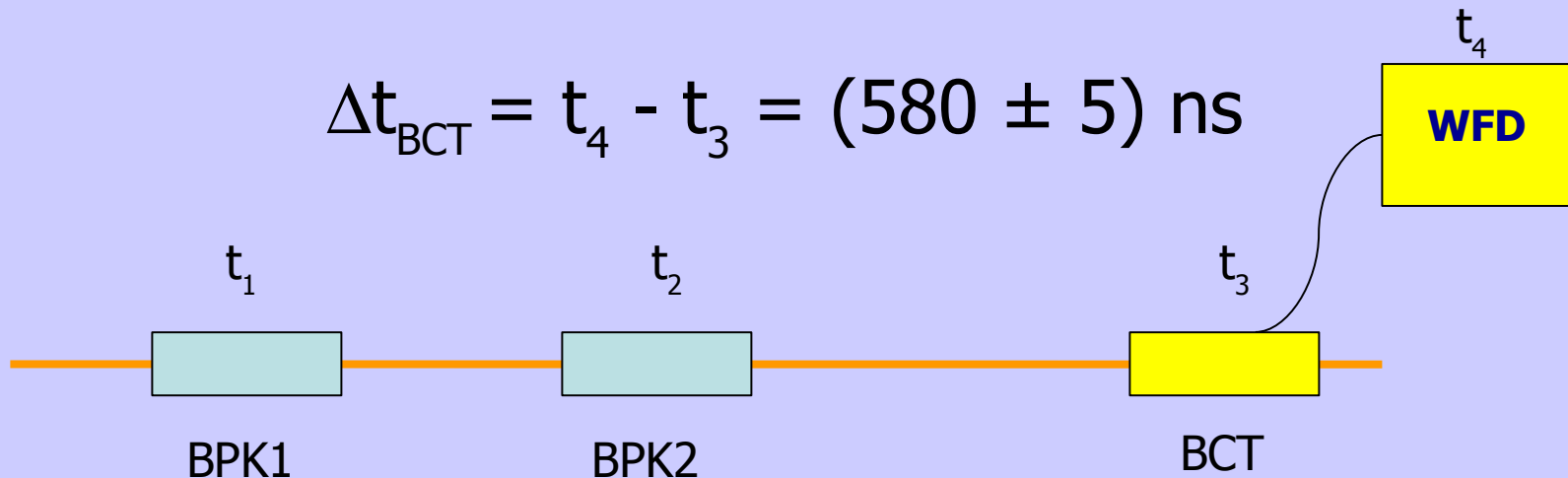
- Standard Kalibrationstechniken (Oscilloscope+Cs-Uhr):

$$\Delta t_{\text{BCT}} = t_4 - t_3 = (581 \pm 10) \text{ ns}$$

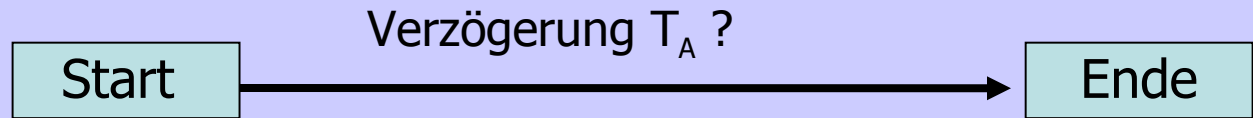
- Dediziertes Strahl-Experiment:

- BCT plus zwei 'beam pick-ups' (BPK) mit ~ 1 ns Zeitauflösung mit LHC-Strahl (12 Packete, 50 ns Abstand)

$$\Delta t_{\text{BCT}} = t_4 - t_3 = (580 \pm 5) \text{ ns}$$

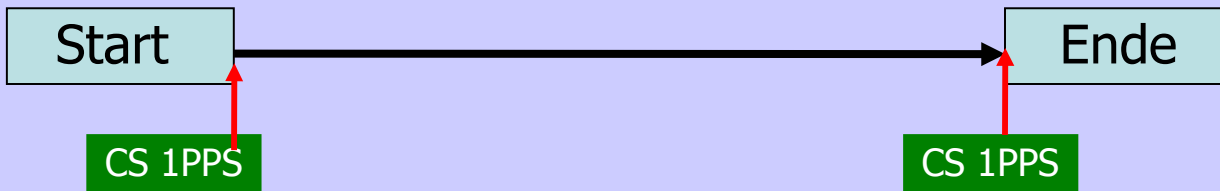


t_3 : ermittelt durch $(t_1 - t_2)$ -Messung und Extrapolation auf BCT-Position

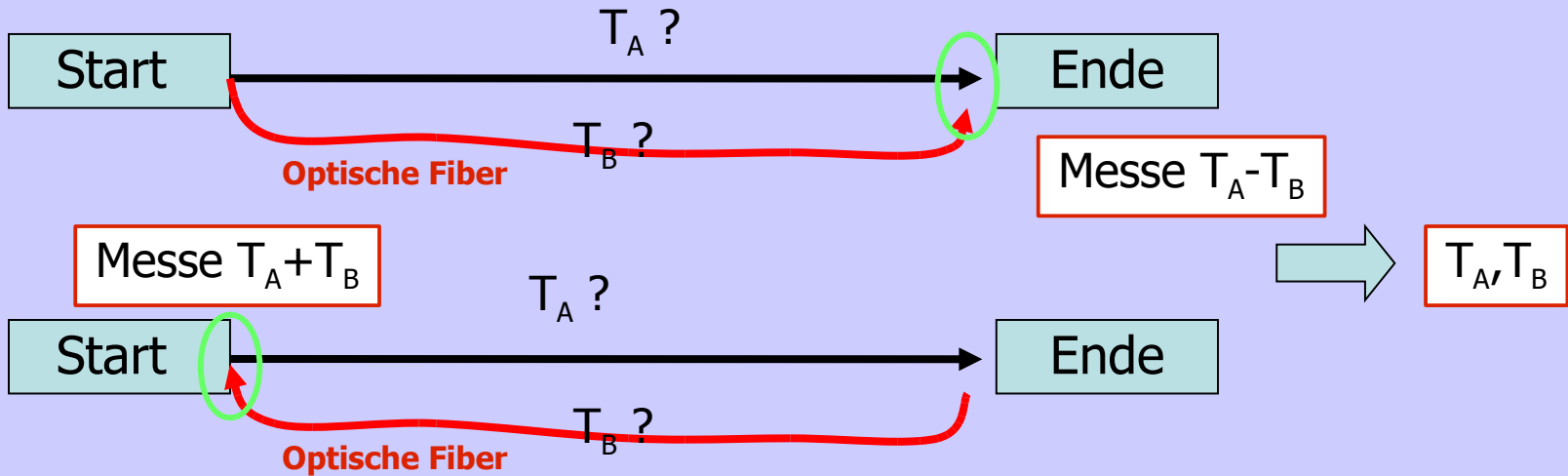


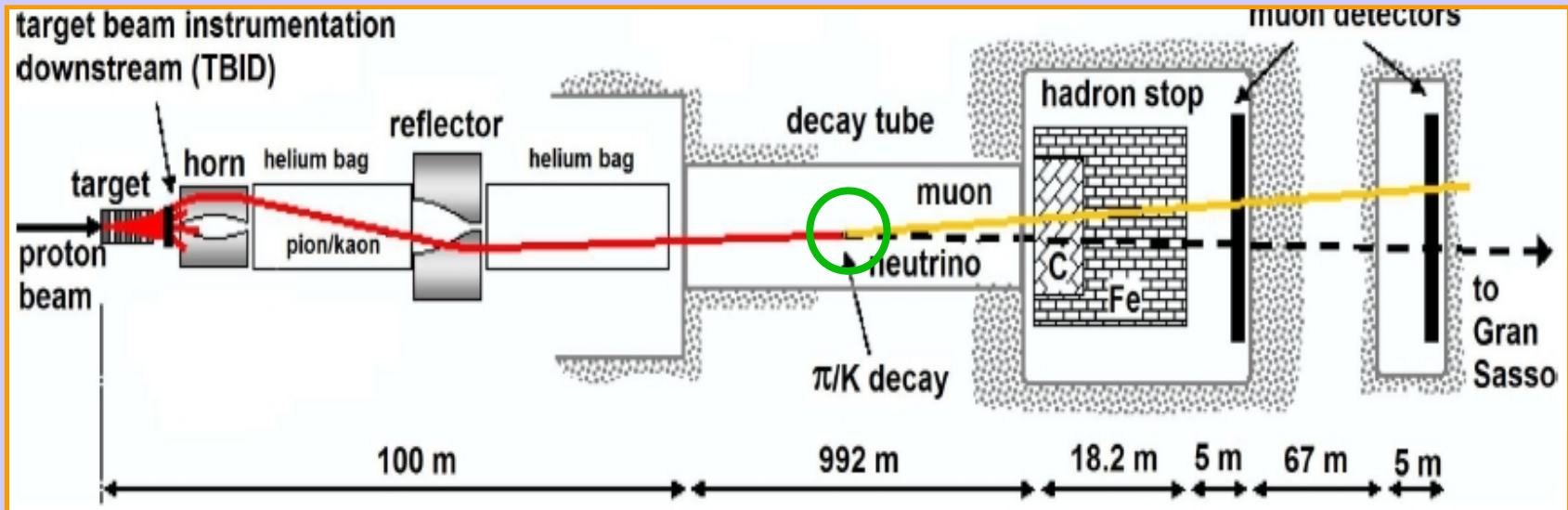
Tragbare Cs-4000:

Vergleiche Zeitmarkierungen vs. 1PPS Signal(Cs-Uhr) am Start- und End-Punkt einer Zeitsignalkette



- Zweiwege Messung bei optischen Fibern:





Unknown neutrino production point:

- accurate UTC time-stamp of protons
- relativistic parent mesons (full FLUKA simulation)

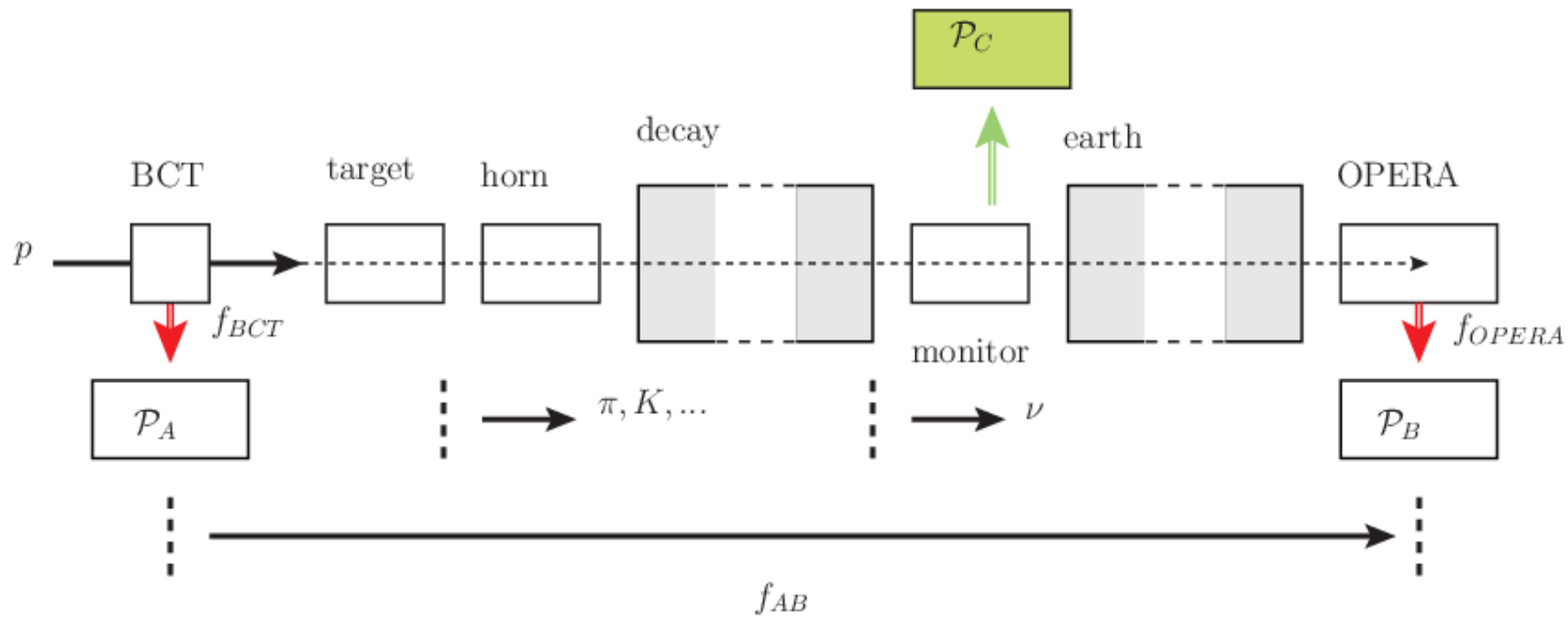
$$\Delta t = \frac{z}{\beta c} - \frac{z}{c} = \frac{z}{c} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \approx \frac{z}{c} \frac{1}{2\gamma^2}$$

TOF_c = assuming c from BCT to OPERA (2439280.9 ns)

TOF_{true} = accounting for speed of mesons down to decay point

$$\Delta t = TOF_{true} - TOF_c$$

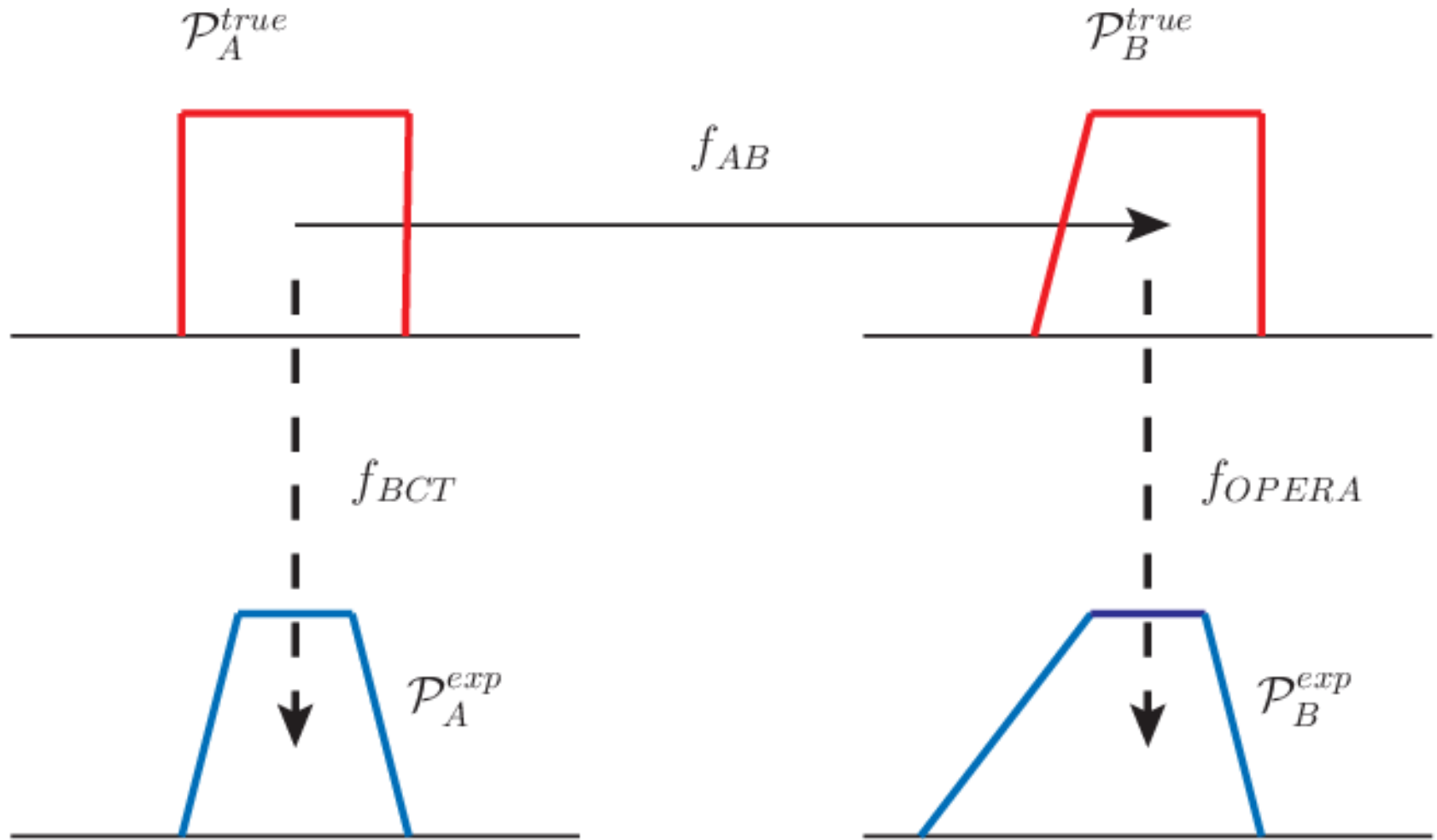
$$\langle \Delta t \rangle = 1.4 \times 10^{-2} \text{ ns}$$



Are there any unknown systematics here?

If yes: Take care of them or introduce systematical error on fit!

From Proton Spill to Neutrino Time Distribution



Additional Considerations:

- Rotation of the Earth
→ Sagnac Effect: +2.2 ns
- Gravitational field of Earth
→ relative effect on Schwarzschild geodesics: 10^{-8}
- Different gravitational potential at CERN and LNGS
→ red-shift, relative effect on synchronisation: 10^{-13}

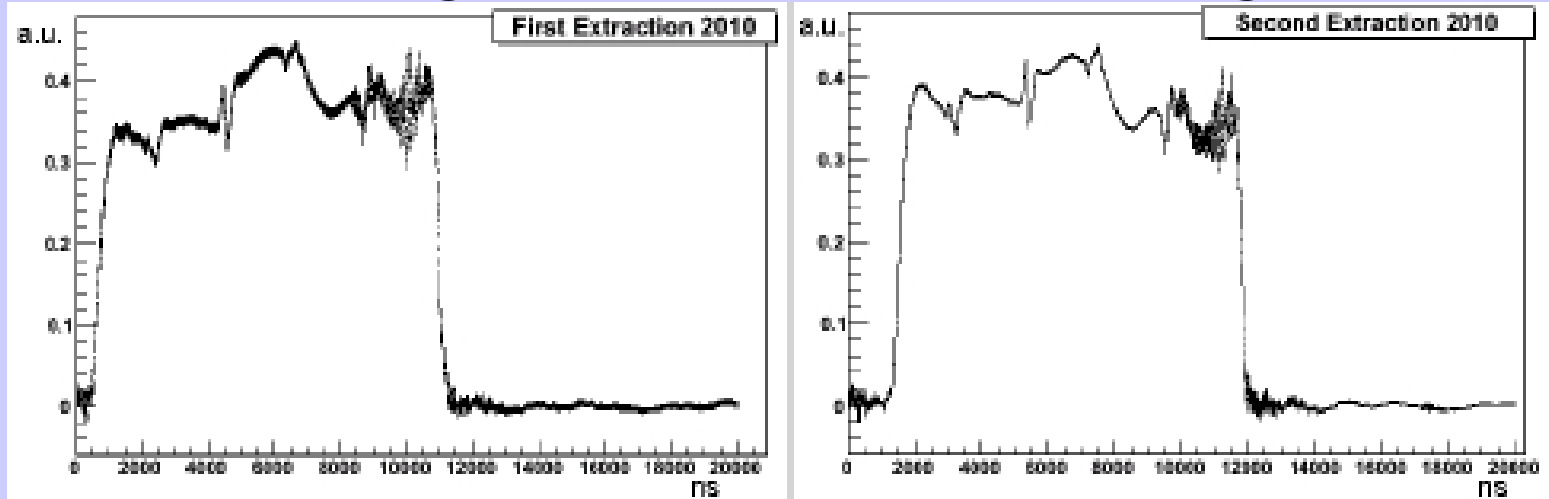
- Normalise each proton waveform
- PDF for associated single event
- Combined likelihood for both extractions

$$L(\delta t) = \prod_j w_j(t_j + \delta t)$$

- Result:
 - Blind: $\delta t = (1040.1 \pm 5.0 \text{ (stat.)} \pm 4.4 \text{ (sys.)}) \text{ ns}$
 - Final: $\delta t = (54.5 \pm 5.0 \text{ (stat.)} {}^{+9.6}_{-7.2} \text{ (sys.)}) \text{ ns}$

Statistical error:
Comparing different filtering conditions and treatments

Average waveform without filtering:

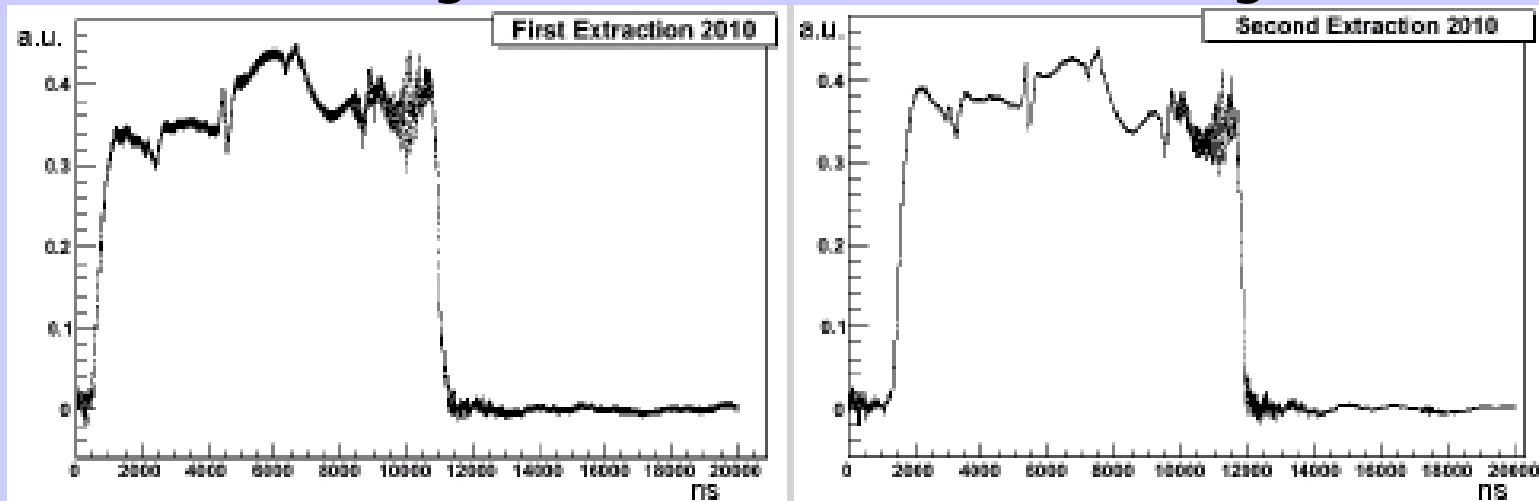


- White noise disappears when building average
- Two overlaid frequencies remain
 - The 200 MHz SPS frequency already mentioned
 - Some oscillations with 25-70 ns mainly 10 μ s after the kicker signal

(also visible if kicker is used without protons)

→ Low pass filter

Average waveform without filtering:

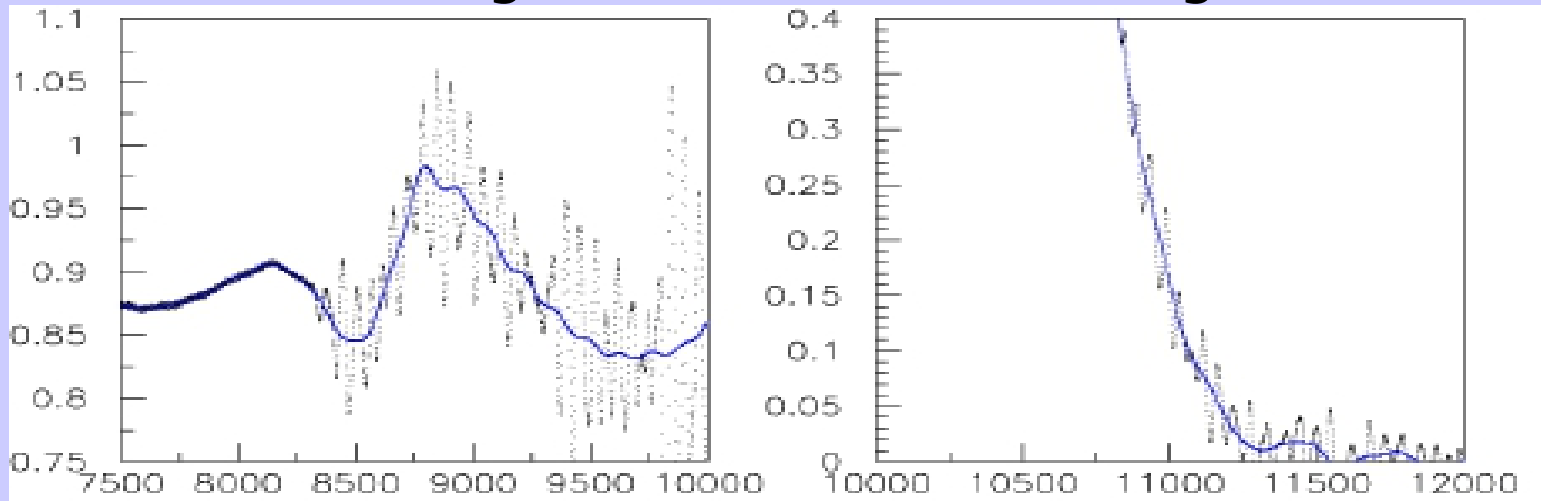


- White noise disappears when building average
- Two overlaid frequencies remain
 - The 200 MHz SPS frequency already mentioned
 - Some oscillations with 25-70 ns mainly 10 μ s after the kicker signal

(also visible if kicker is used without protons)

→ Low pass filter

Average waveform and filtering:



- White noise disappears when building average
- Two overlaid frequencies remain
 - The 200 MHz SPS frequency already mentioned
 - Some oscillations with 25-70 ns mainly 10 μ s after the kicker signal

(also visible if kicker is used without protons)

→ Low pass filter

- Singel waveforms have white noise
 - More sensitive to filtering
- Fit a bit unstable without filtering

- All kind of different filters have been tested
(5MHz-low-pass, 8MHz-low-pass, Butterworth, Bessel, Chebyshev, floating average, Gaussian blur,)

- Comparison of fit results with different filters
- Systematic error of 4.4 ns on fit

Several additional statistical tests performed

- χ^2 -test for different ranges of distribution
(front, back, central, total)
 - $\sim 90\%$ of information in flanks
 - All results in good agreement
 - No systematic effect visible within statistical accuracy
- Goodness of fit for maximum likelihood method also well within expectations
- Kolmogorov-Smirnov test
 - Probabilities for both extractions with δt : 61% and 99%
 - Lower probabilities without δt
- Anderson-Darling test (more sensitive to tails):
 - Probabilities for both extractions with δt : 38% and 51%