



# Das OPERA-Experiment

## Suche nach Neutrino-Oszillationen

### – Gruppenbericht –

**Annika Hollnagel**

(annika.hollnagel@desy.de)

für die OPERA-Arbeitsgruppe Hamburg

Universität Hamburg  
Institut für Experimentalphysik

DPG Frühjahrstagung 2012, Göttingen





# Überblick



- 1 Das OPERA-Experiment
- 2  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen
- 3 Performance & Statistik
- 4 Ausblick



# Das OPERA-Experiment



# Das OPERA-Experiment

**OPERA: Oscillation Project with Emulsion Tracking Apparatus.**

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \sim \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left( \Delta m_{23}^2 \frac{L}{4E} \right)$$

## Appearance-Messung:

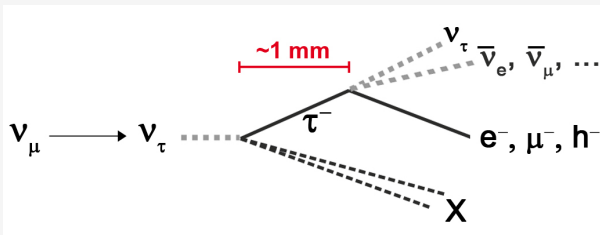
- Erster direkter Nachweis von  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen.
- ▷ **Nachweis von Entstehung & Zerfall von  $\tau$ -Leptonen.**

## Realisierung:

- Hochenergetischer long-baseline  $\nu_\mu$ -Strahl.
- Große Target-Masse:
  - ▷ **Instrumentierung mit elektronischen Detektorelementen (ED).**
- $\mu\text{m}$ -Präzision:
  - ▷ **Emulsion Cloud Chamber-Photoemulsionen (ECC).**

# $\nu_\tau$ -Nachweis:

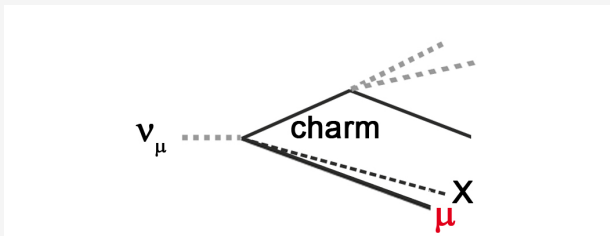
## $\nu_\tau$ -Signal:



- $\tau$ -Erzeugung in  $\nu_\tau$  CC-Wechselwirkungen.
  - Zerfall des  $\tau^-$ -Leptons nach  $\sim 600 \mu\text{m}$ .
- ▷ **Charakteristische 'Knick'-Topologie.**

# $\nu_\tau$ -Nachweis:

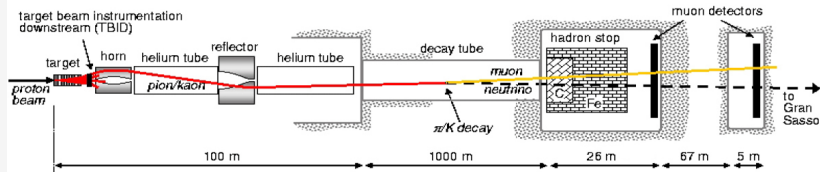
## Hintergrundprozesse:



- $\nu_\mu$  CC-Wechselwirkungen mit charm-Produktion und nicht detektiertem primärem  $\mu$ .
- Hadronische Wechselwirkungen in Blei.
- $\mu$ -Streuung unter großem Winkel.

# Der CNGS-Strahl

## CNGS: CERN Neutrinos to Gran Sasso.

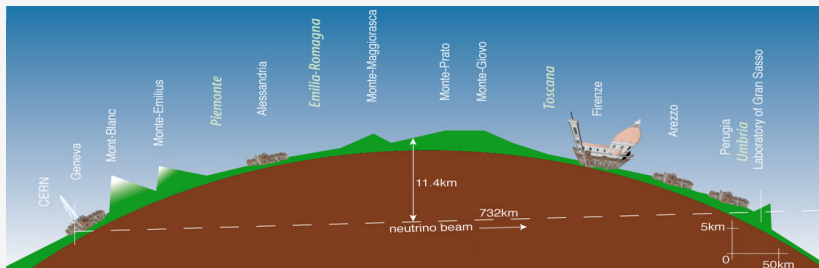


- Durchschnittliche  $p$ -Energie: 400 GeV.
- Durchschnittliche  $\nu$ -Energie: 17.9 GeV.
- $\nu_\tau$ -Strahlkontamination:  $\nu_\tau/\nu_\mu < 10^{-4} \%$ .
- $\nu_e$ -Strahlkontamination:  $\nu_e/\nu_\mu = 0.06 \%$ .
- Erwartete Gesamtintensität\*:  $22.5 \times 10^{19}$  p.o.t.

\*) Nomineller Strahlbetrieb, 5 Jahre Laufzeit.

# LNGS

## LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

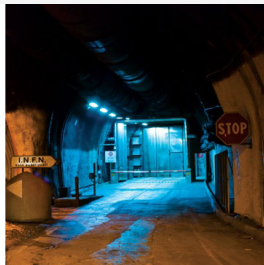


- **Ort:** Unter dem Corno Grande des Gran Sasso in Italien.
- **$\nu$ -Flugstrecke:**  $\sim 730$  km Entfernung zur  $\nu_\mu$ -Quelle am CERN.
- **Vertikale Felsabdeckung:** 1 300 m (3 400 m w.e.).
- **Anzahl kosmischer  $\mu$ :**  $\sim 1 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



# LNGS

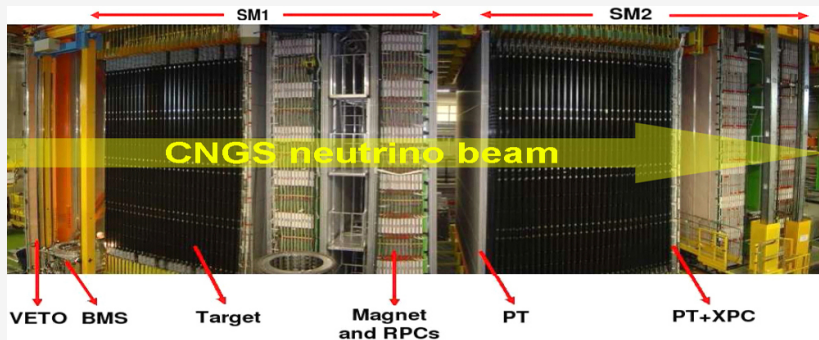
## LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso.



- **Ort:** Unter dem Corno Grande des Gran Sasso in Italien.
- **$\nu$ -Flugstrecke:**  $\sim 730$  km Entfernung zur  $\nu_\mu$ -Quelle am CERN.
- **Vertikale Felsabdeckung:** 1 300 m (3 400 m w.e.).
- **Anzahl kosmischer  $\mu$ :**  $\sim 1 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



# Der hybride OPERA-Detektor

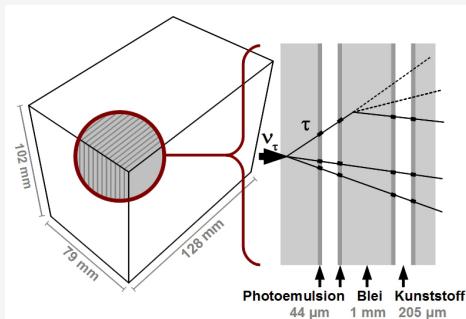


2 identische Super-Module (SM), bestehend aus:

- Target-Bereich (ECC + ED).
- Magnet-Spektrometer (ED).

+  $\mu$ -VETO-System strahlaufwärts des Detektors.

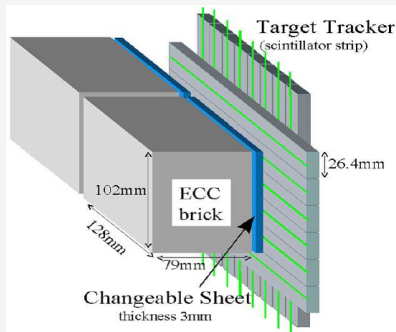
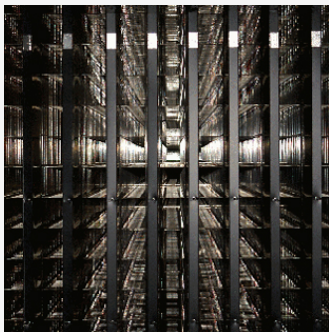
# Target-Bereich



## Emulsion Cloud Chamber-bricks (ECC):

- **Pro brick:**  $57 \times 2$  Photoemulsionen auf Kunststoffbasen ( $\sim 0.3$  mm), 56 Bleiplatten (1 mm), insgesamt  $\sim 10 X_0$ .
- 2 zusätzliche Photoemulsions-Changeable Sheets (CS) pro brick.
- **Gesamt:**  $\sim 150\,000$  bricks zu je 8.3 kg ( $\sim 1.28$  kt Gesamtmasse).

# Target-Bereich

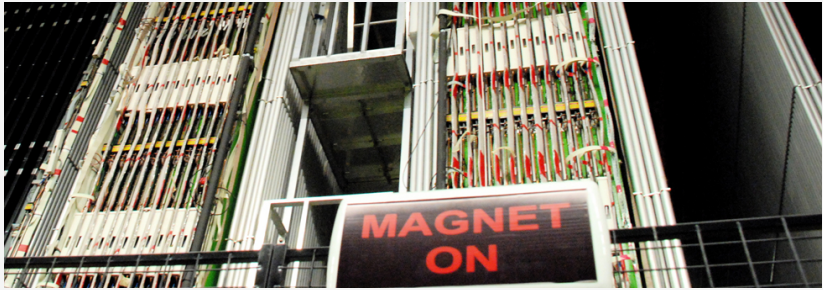


## Target-Bereich:

- Emulsion Cloud Chamber-bricks (ECC).
- Photoemulsions-Changeable Sheets (CS).
- Target Tracker-Szintillatorstreifen (TT).



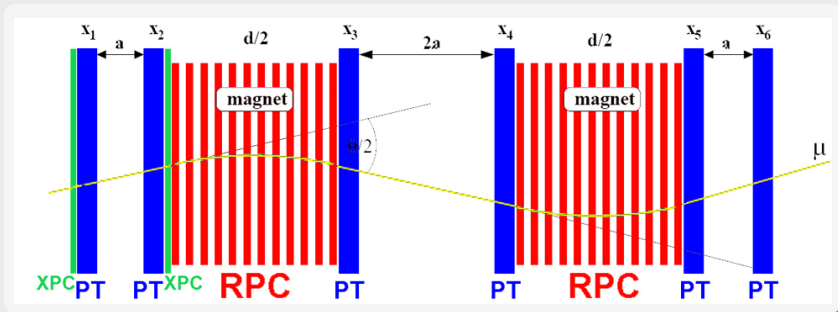
# Magnet-Spektrometer



## Magnet-Spektrometer (2x):

- Pro SM: Strahlabwärts des Target-Bereiches.
- Dipolmagnete.
- Resistive Plate Chamber-Detektoren (RPC & XPC).
- Precision Tracker-Driftröhren (PT).

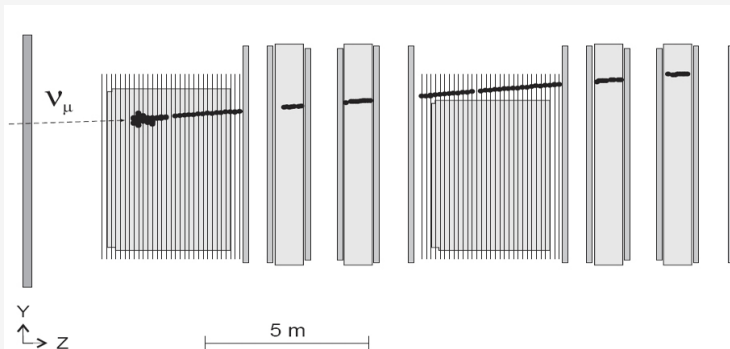
# Magnet-Spektrometer



## Magnet-Spektrometer (2x):

- Pro SM: Strahlabwärts des Target-Bereiches.
- Dipolmagnete.
- Resistive Plate Chamber-Detektoren (RPC & XPC).
- Precision Tracker-Driftröhren (PT).

# Ereignisrekonstruktion

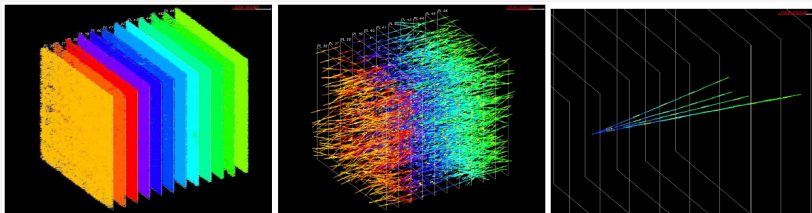


## ED-Ereignisrekonstruktion:

- Lokalisation des  $\nu$ -Wechselwirkungsvertex.
- $\mu$ -Identifikation.

▷ **Triggerfunktion für die ECC-Ereignisrekonstruktion.**

# Ereignisrekonstruktion



## ECC-Ereignisrekonstruktion:

- Vertex-Rekonstruktion.
- Kinematische Analyse.

## Decay search-Prozedur:

- Suche nach Zerfällen innerhalb einer Spur.
- Suche nach zusätzlichen Spuren.



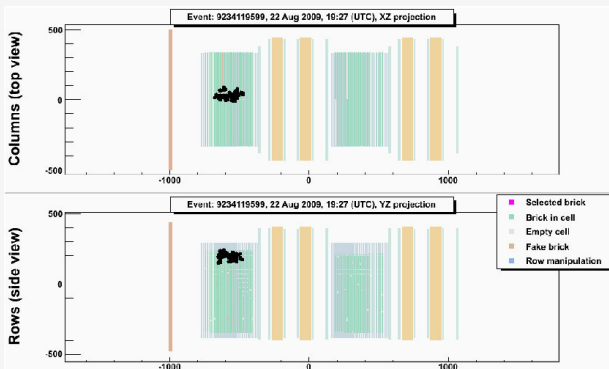


# Suche nach $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen



# Das erste $\nu_\tau$ -Kandidat-Ereignis

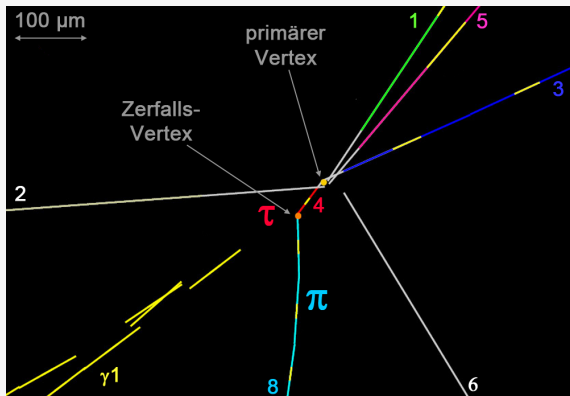
## ED-Ansicht:



- 22. August 2009, 19:27h (UTC).
- $\mu$ -loses Ereignis 9234119599.

# Das erste $\nu_\tau$ -Kandidat-Ereignis

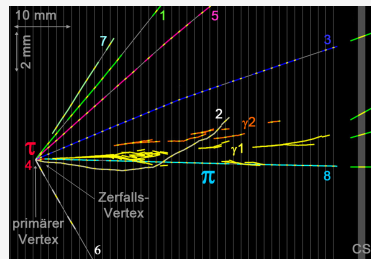
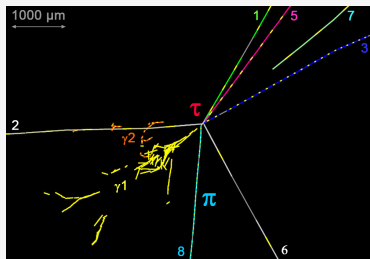
## ECC-Rekonstruktion:



- **Primäre  $\nu$ -Wechselwirkung:** 7 Spuren ausgehend vom primären Vertex.
- **Spuren 4, 8:** Sichtbarer Knick.

# Das erste $\nu_\tau$ -Kandidat-Ereignis

## ECC-Rekonstruktion:



## Elektromagnetische Schauer:

- $\gamma_1, \gamma_2$ : Ausgehend vom sekundären Vertex.

## Kinematische Schnitte (had. 1-prong $\tau$ -Zerfallskanal):

- **Alle kinematischen Schnitte für  $\geq 1 \gamma$  ausgehend vom Zerfallsvertex werden überlebt.**



# Das erste $\nu_\tau$ -Kandidat-Ereignis

## Tochter-Teilchen:

- 2-prong-Zerfall 7 Wände strahlabwärts des Erzeugungsvertex.
  - **Impuls:**  $p = 12_{-3}^{+6}$  GeV.
- ▷ **Hypothese:**  $\pi^-$ .

## Invariante Masse des $\gamma\gamma$ -Systems:

- $(120 \pm 20(\text{stat.}) \pm 35(\text{syst.})) \text{ MeV}/c^2$ .
- ▷ **Konsistent mit der Masse des  $\pi^0$ :**  $m_{\pi^0} = 135 \text{ MeV}/c^2$ .

## Invariante Masse des $\pi^- \gamma\gamma$ -Systems:

- $(640_{-80}^{+125}(\text{stat.})_{-90}^{+100}(\text{syst.})) \text{ MeV}/c^2$ .
- ▷ **Konsistent mit der Masse\* des  $\rho^-(770)$ :**  $m_{\rho^-} = 775 \text{ MeV}/c^2$ .

\*)  $\rho^-(770)$  entstehen in 25% aller  $\tau^-$ -Zerfälle:  $\tau^- \rightarrow \rho^-(\pi^-\pi^0)\nu_\tau$ .



# Signifikanz des $\nu_\tau$ -Nachweises

## Analysierte Datenmenge von 2008 + 2009:

- $2978 \pm 75$  erwartete Ereignisse (inkl. Effizienzen).
- **2738 decay-searched Ereignisse, entsprechend  $4.88 \times 10^{19}$  p.o.t.**  
(92 % der gesamten Daten von 2008 + 2009).
- **1 Signalereignis (hadronischer 1-prong  $\tau$ -Zerfallskanal).**

## Erwartetes Signal\* (hadr. 1-prong $\tau$ -Zerfallskanal):

- $\nu_\tau$  CC:  $0.49 \pm 0.12(\text{syst.})$  Ereignisse.

## Erwartetes Signal\* (alle $\tau$ -Zerfallskanäle):

- $\nu_\tau$  CC:  $1.65 \pm 0.41(\text{syst.})$  Ereignisse.

\*) Annahmen:  $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  und  $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ .



# Signifikanz des $\nu_\tau$ -Nachweises

## Erwarteter Hintergrund (hadr. 1-prong $\tau$ -Zerfallskanal):

- **Gesamt:**  $0.05 \pm 0.01(\text{sys.})$  Ereignisse.
- ▷ **p-Wert (nur Hintergrund):** 5%.
- ▷ **Signifikanz des  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Nachweises:** 95%.

## Erwarteter Hintergrund (alle $\tau$ -Zerfallskanäle):

- **Gesamt:**  $0.16 \pm 0.03(\text{sys.})$  Ereignisse.
- ▷ **p-Wert (nur Hintergrund):** 15%.
- ▷ **Signifikanz des  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Nachweises:** 85%.

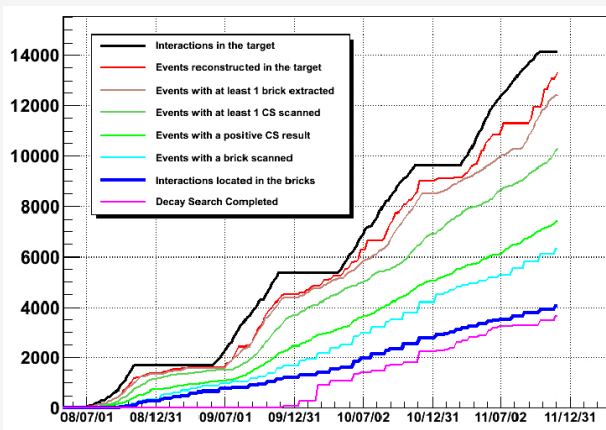


# Performance & Statistik



# Ereignis-Statistik

## Analysestand Dezember 2011 (Run-Jahre 2008 – 2011)



- **Vertex lokalisiert:** 4 056 Ereignisse.
- **Decay search durchgeführt:** 3 662 Ereignisse.



# OPERA: Erwartete Performance

## Annahmen:

- $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ .
- $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ .
- $22.5 \times 10^{19}$  p.o.t.

## Erwartete $\nu$ -Wechselwirkungen im Target:

- $\nu_\mu$  CC + NC-Wechselwirkungen:  $\sim 23\,600$ .
- $\nu_e + \bar{\nu}_e$  CC-Wechselwirkungen:  $\sim 160$ .
- $\nu_\tau$  CC-Wechselwirkungen:  $\sim 115$ .

## Erwartete nachgewiesene Signal- und Hintergrundereignisse:

- $\nu_\tau$  CC Signal (alle Zerfallskanäle): **7.63 Ereignisse.**
- **Hintergrund (alle Zerfallskanäle):  $0.73 \pm 0.15(\text{ syst.})$  Ereignisse.**



# Ausblick



# Ausblick

## Ausblick:

- Analyse der in 2010 + 2011 gesammelten Daten (entsprechend  $8.88 \times 10^{19}$  p.o.t.) in vollem Gange.
- Start des CNGS-run 2012 in diesem Monat.
- LHC geschlossen wegen Wartungsarbeiten und Upgrade in 2013.

## Andere Forschungsthemen:

- Suche nach  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ -Oszillationen (Appearance).
- Messung der  $\nu$ -Geschwindigkeit.
- Untersuchung der Oszillation atmosphärischer  $\nu$ .
- Messung des Ladungsverhältnisses atmosphärischer  $\mu$ .



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



# Die OPERA-Kollaboration

**11 Länder, 30 Institute, 154 Physiker:**

## Belgien:

- IIHE-ULB Brussels

## Kroatien:

- IRB Zagreb

## Frankreich:

- LAPP Annecy
- IPHC Strasbourg
- IPNL Lyon

## Deutschland:

- Universität Hamburg

## Israel:

- Technion Haifa

## Italien:

- INFN-LNGS Assergi
- University & INFN Bari
- University & INFN Bologna
- University & INFN-LNF Frascati
- University & INFN l'Aquila
- University & INFN Naples
- University & INFN Padova
- University & INFN Rome
- University & INFN Salerno

## Japan:

- University Aichi
- University Toho
- University Kobe
- University Nagoya
- University Utsunomiya

## Korea:

- University Jinju

## Russland:

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

## Schweiz:

- LHEP Bern
- ETH Zurich

## Türkei:

- METU Ankara