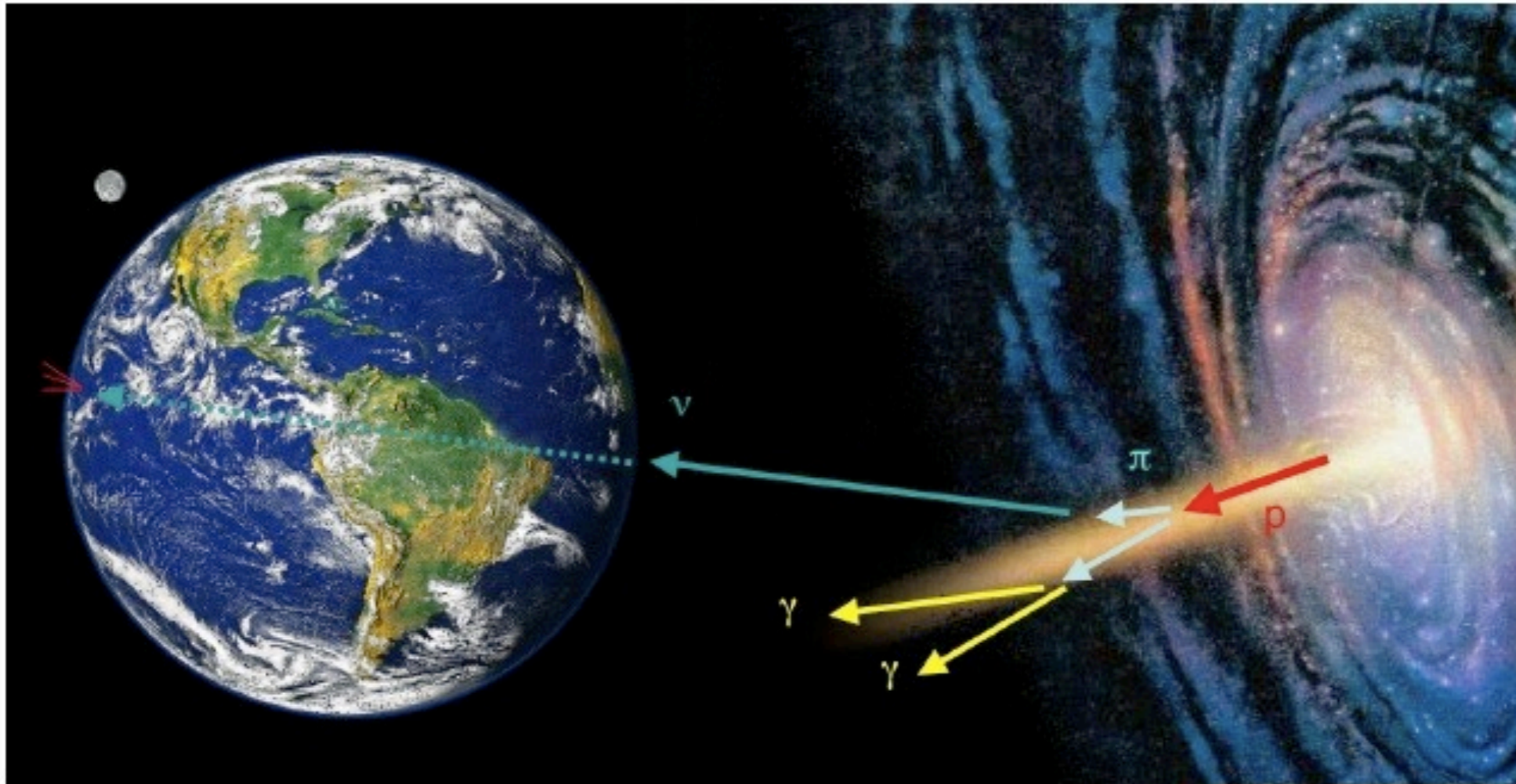


# Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



## 11. Neutrinos II - Atmosphärische, Beschleuniger & Kosmische Neutrinos

01.07.2013

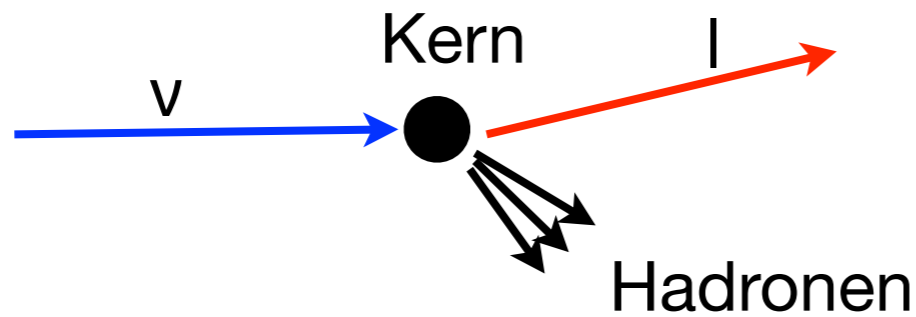


# Detektoren für hochenergetische Neutrinos

- Kleiner Wirkungsquerschnitt der Neutrinos: Grosse Masse!
- Seltene Neutrino-Ereignisse: Gute Abschirmung vor Untergrund-Prozessen:
  - Unterdrückung von natürlicher Radioaktivität: Hohe Reinheit
  - Abschirmung kosmischer Myonen
- Beispiel: Kamiokande, Super-Kamiokande (**Kamioka Nucleon Decay Experiment**)
  - Suche nach Protonzerfall mit 3000 t reinem Wasser (ab 1983)
  - kosmische, atmosphärische und solare Neutrinos (ab 1985)
    - 1987: 11 Neutrinos von SN1987A gesehen
  - Upgrade zu Super-K beendet 1996
    - 50 000 t reines Wasser, davon 32 000 t aktiv, 18 000 t Veto
    - 11 200 PMTs (50 cm Durchmesser)

# Super-Kamiokande Messprinzip

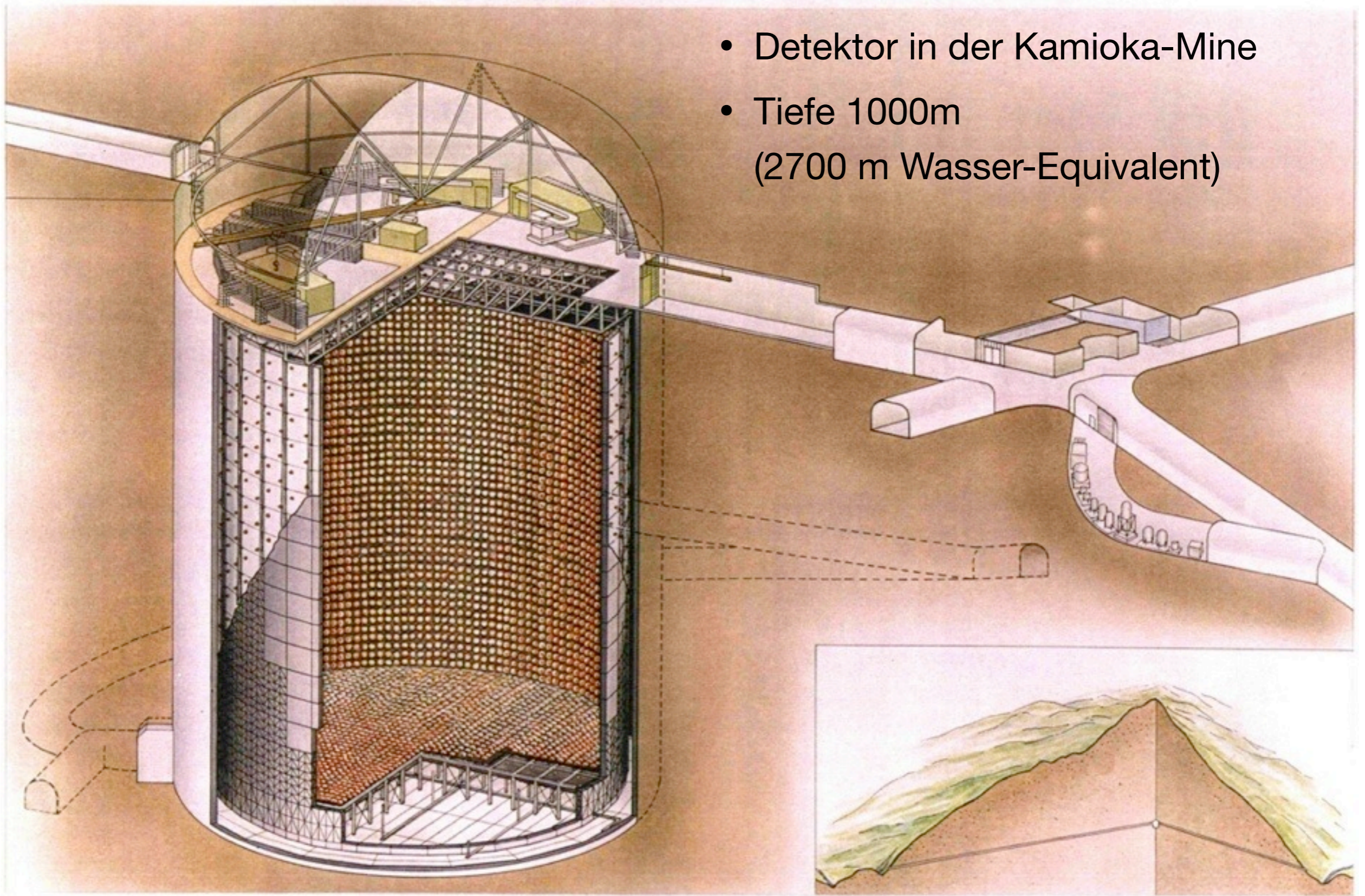
- Neutrinos erzeugen über geladene Ströme die entsprechenden Leptonen



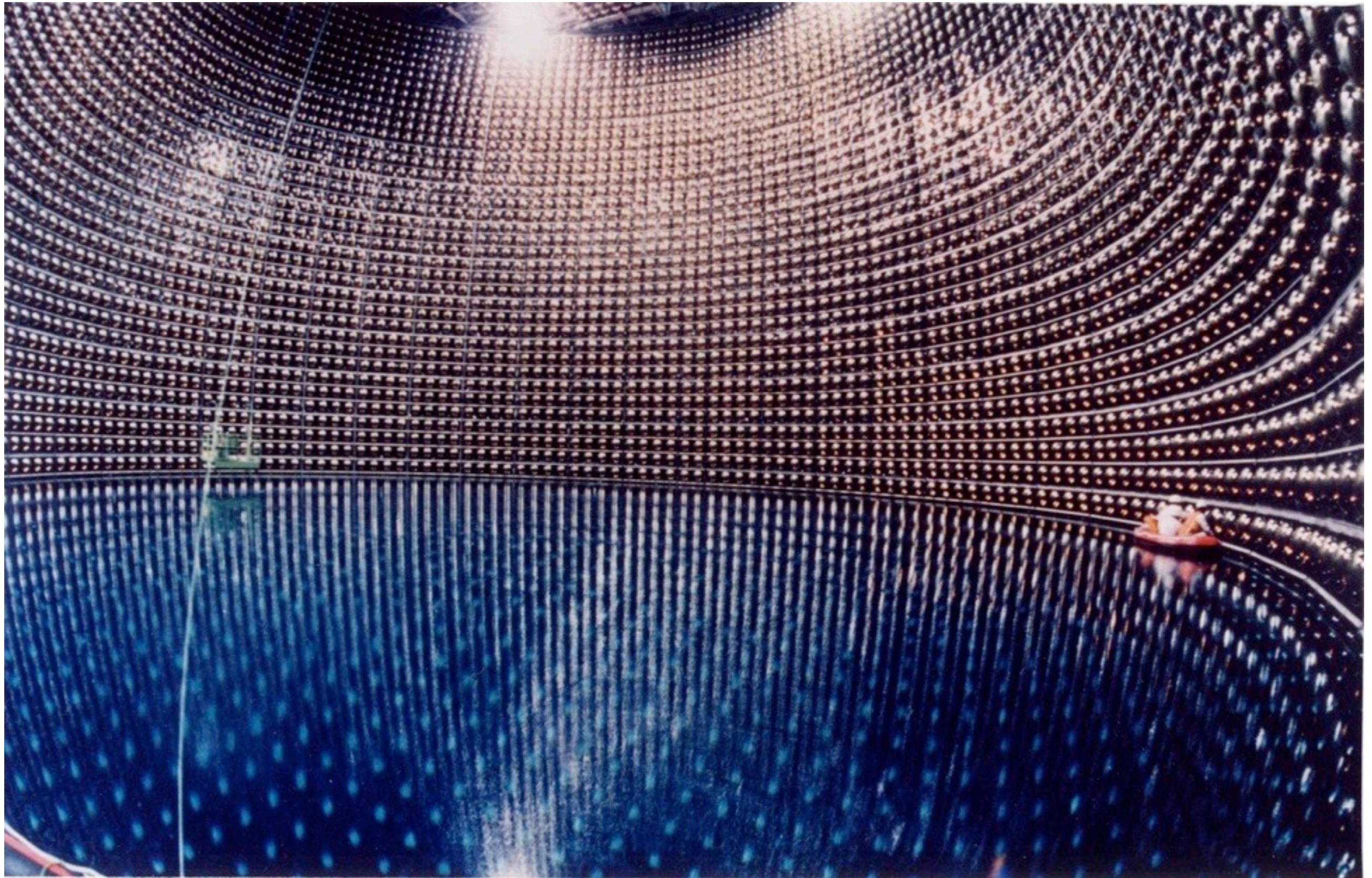
- Hohe Energieschwelle für  $\tau$  - Erzeugung durch hohe Masse (1.777 GeV), daher nur Nachweis von Elektronen und Myonen
- Erzeugung von Cherenkov-Licht durch geladene Leptonen in Wasser (Brechungsindex 1.33)
  - Nachweis des Cherenkovlichtes:
    - Lichtverteilung ermöglicht Teilchenidentifikation ( $\mu$  oder  $e$ )
    - Lichtmenge und Spurlänge ermöglicht Energiemessung, damit auch Energie und Richtungsbestimmung des Neutrinos

# Super-Kamiokande

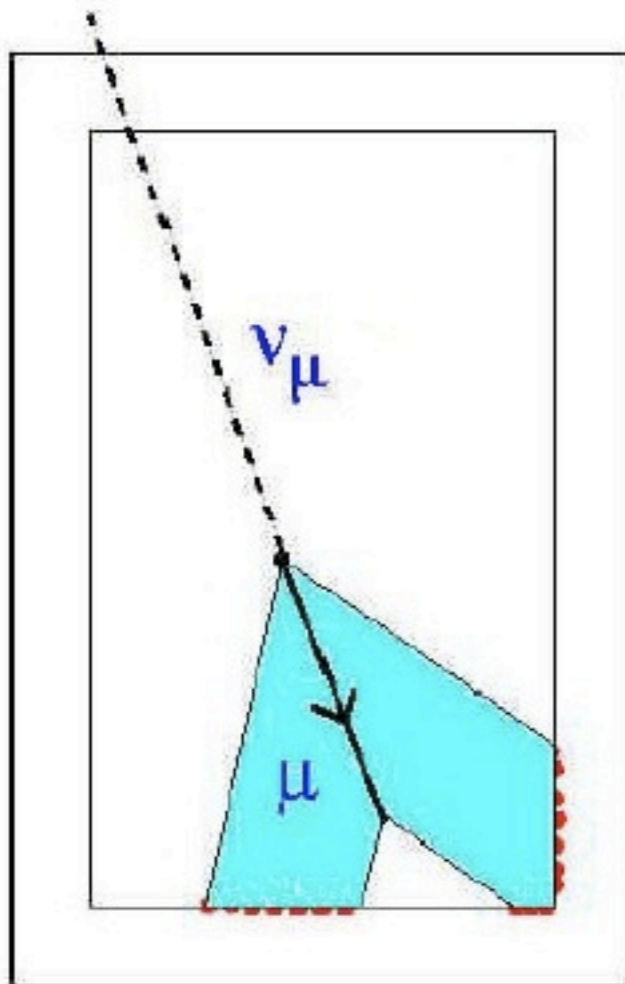
- Detektor in der Kamioka-Mine
- Tiefe 1000m  
(2700 m Wasser-Äquivalent)



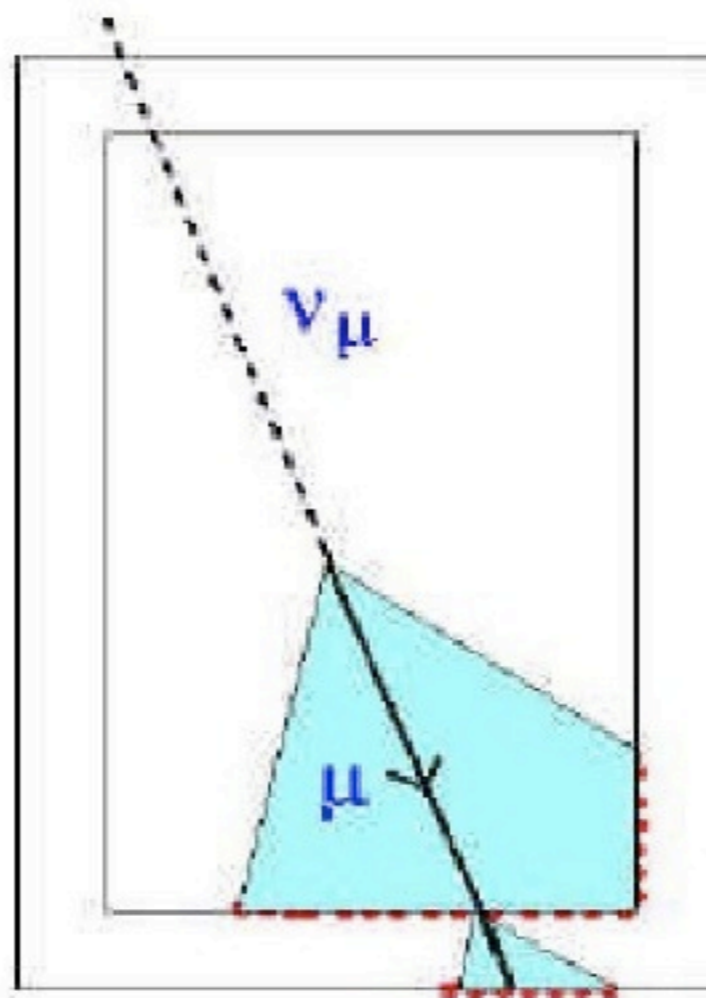
# Super-Kamiokande



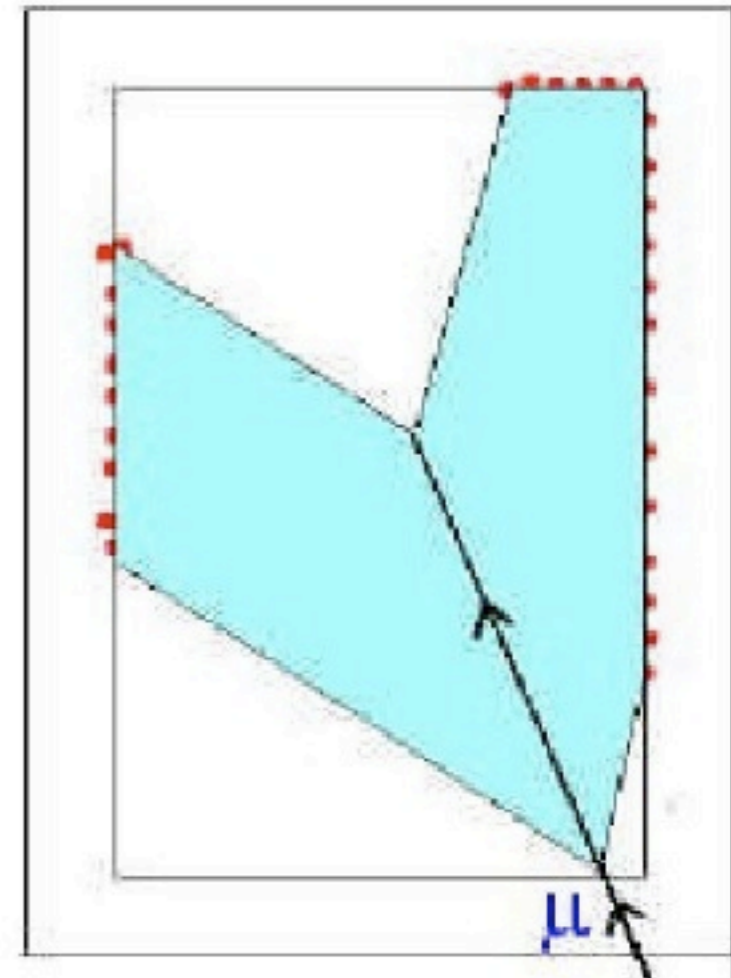
# Super-Kamiokande Messprinzip



gestopptes Myon  
("fully contained")



nicht gestopptes Myon  
("partially contained")

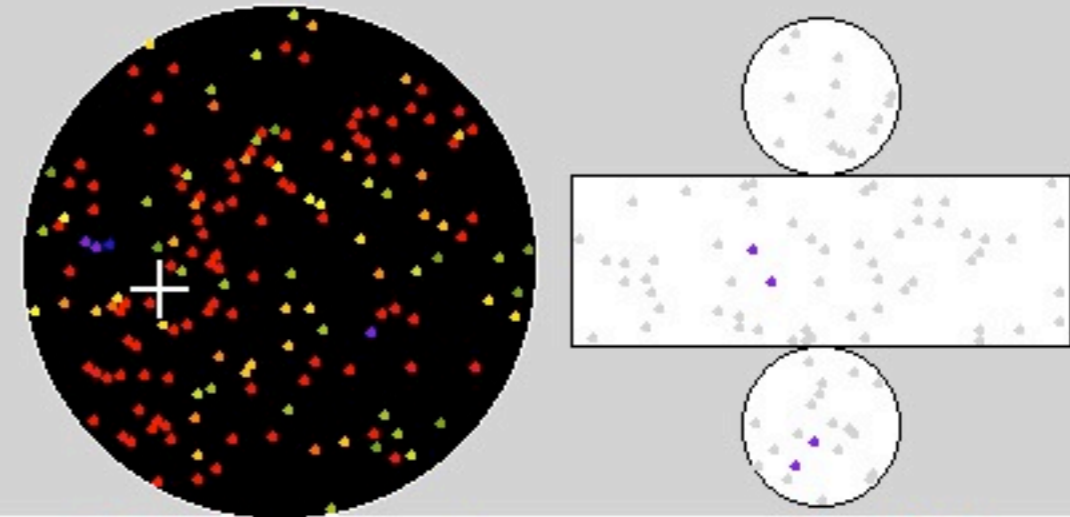


Myon von unten aus  
Neutrino-Reaktion im Fels  
unter dem Detektor

# Super-Kamiokande Messprinzip

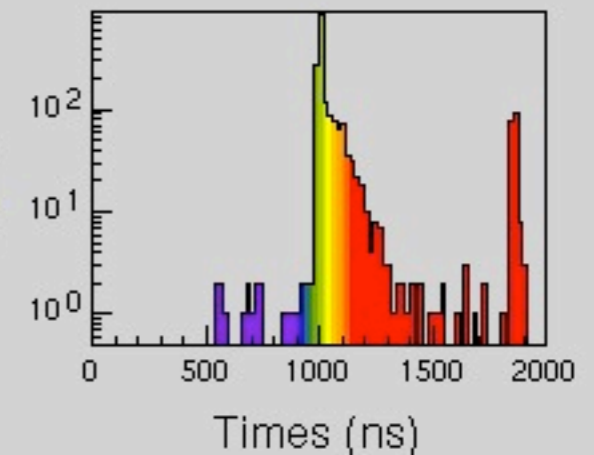
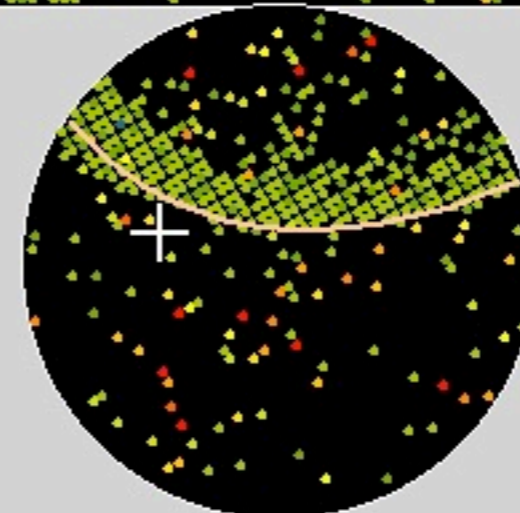
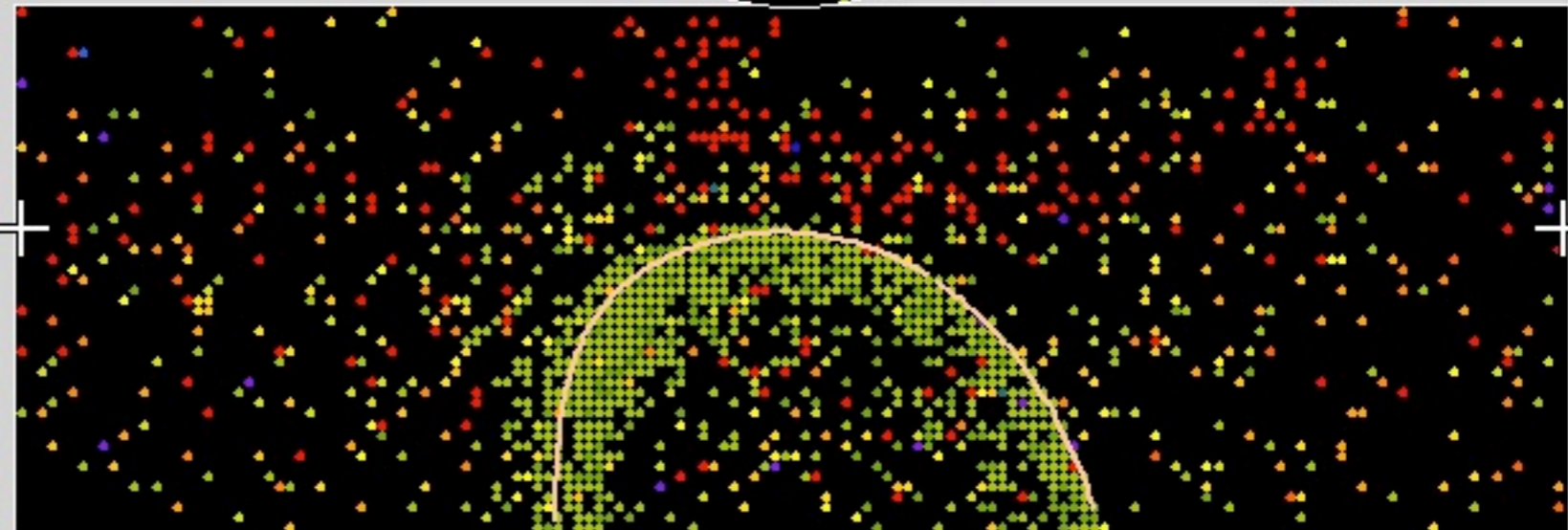
## Super-Kamiokande

Run 4234 Event 367257  
 97-06-16:23:32:58  
 Inner: 1904 hits, 5179 pE  
 outer: 5 hits, 6 pE (in-time)  
 Trigger ID: 0x07  
 D wall: 885.0 cm  
 FC mu-like,  $p = 766.0 \text{ MeV}/c$



### Resid(ns)

- > 137
- 120- 137
- 102- 120
- 85- 102
- 68- 85
- 51- 68
- 34- 51
- 17- 34
- 0- 17
- -17- 0
- -34- -17
- -51- -34
- -68- -51
- -85- -68
- -102- -85
- < -102



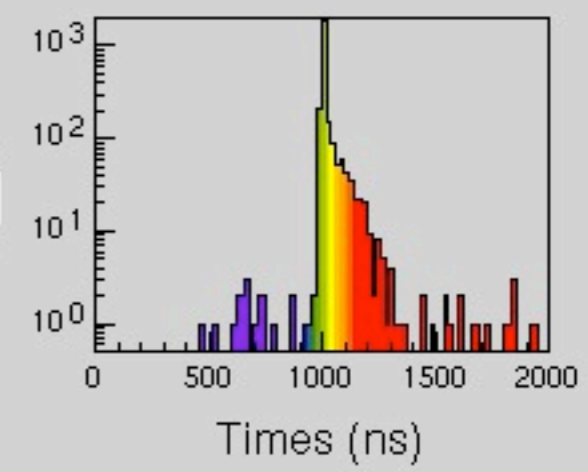
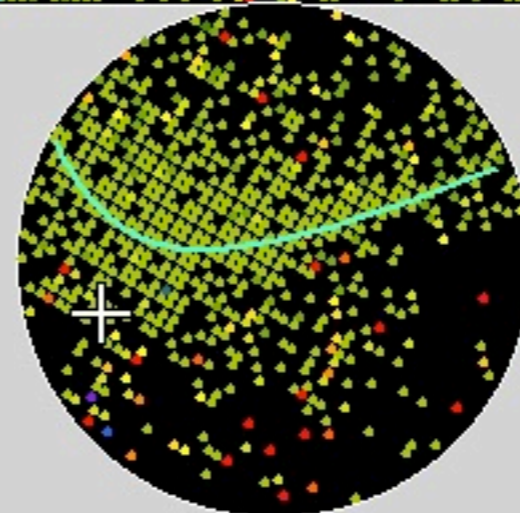
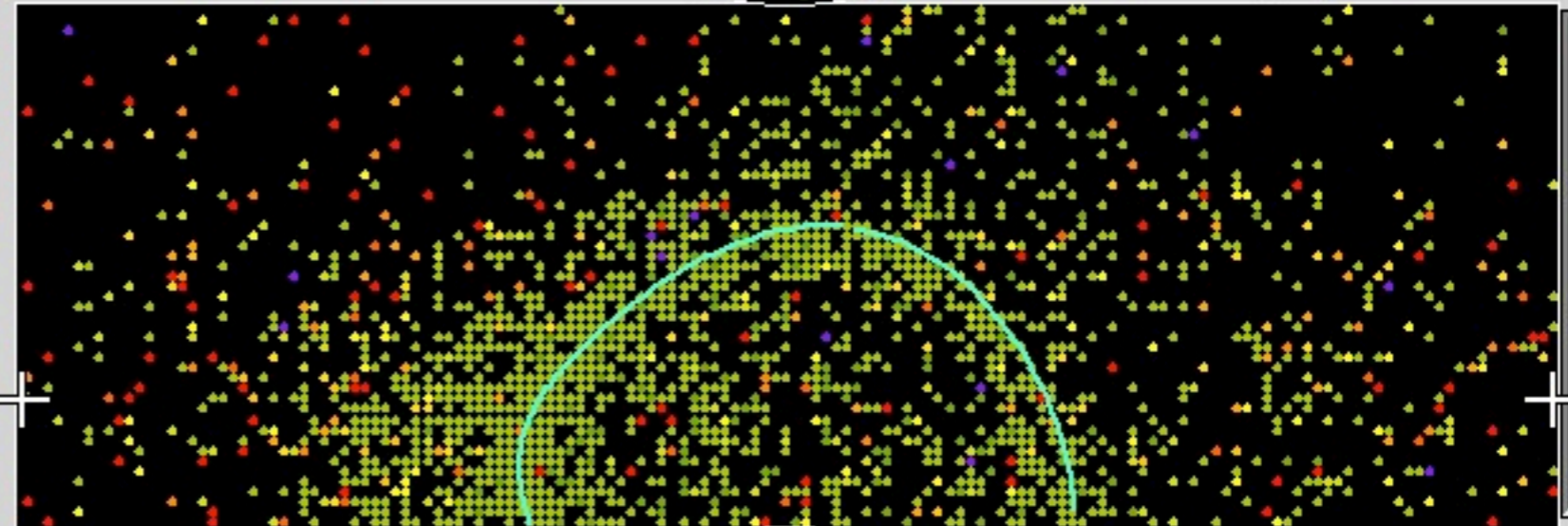
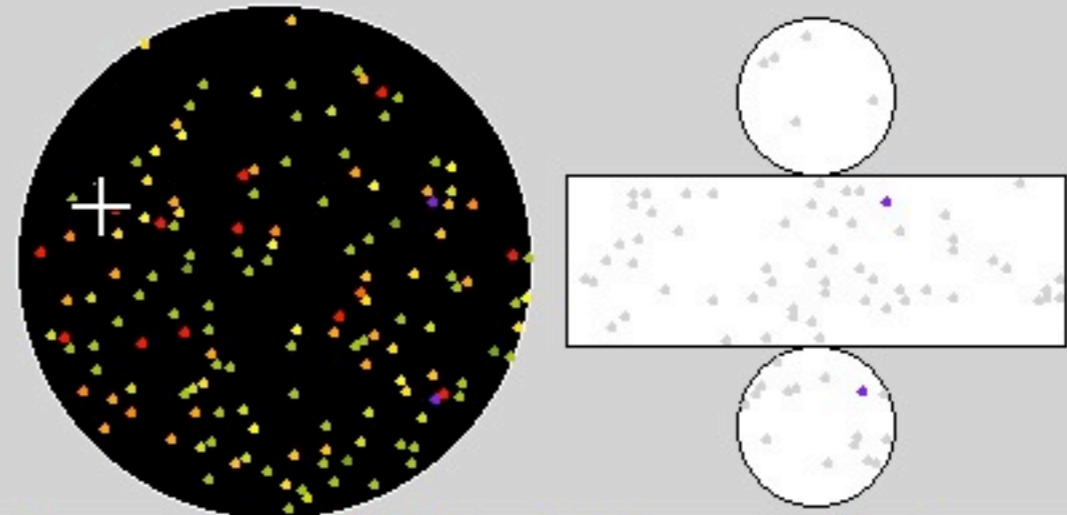
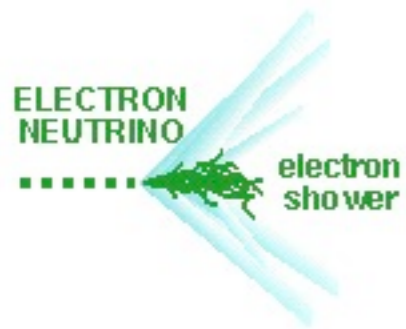
# Super-Kamiokande Messprinzip

## Super-Kamiokande

Run 4268 Event 7899421  
 97-06-23:03:15:57  
 Inner: 2652 hits, 5741 pE  
 outer: 3 hits, 2 pE (in-time)  
 Trigger ID: 0x07  
 D wall: 506.0 cm  
 FC e-like, p = 621.9 MeV/c

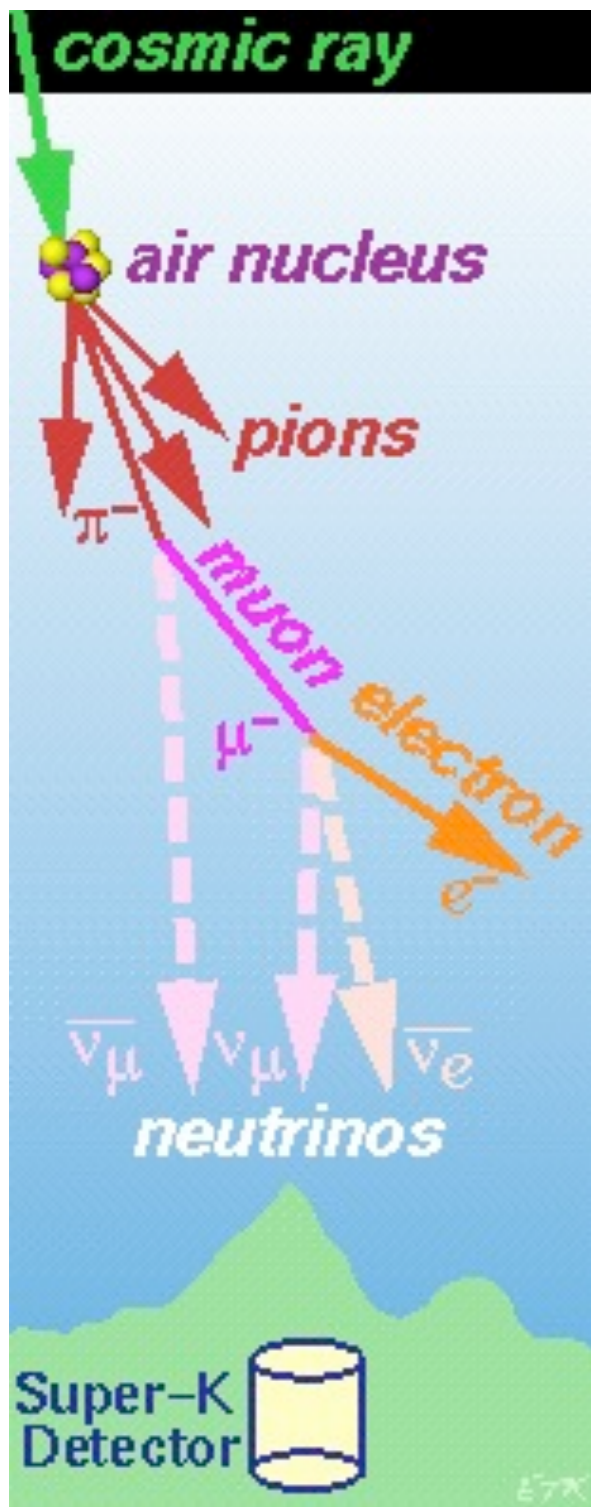
### Resid(ns)

- > 137
- 120- 137
- 102- 120
- 85- 102
- 68- 85
- 51- 68
- 34- 51
- 17- 34
- 0- 17
- -17- 0
- -34- -17
- -51- -34
- -68- -51
- -85- -68
- -102- -85
- <-102

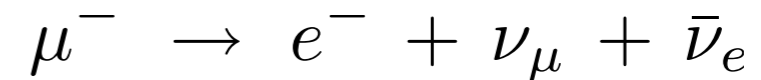
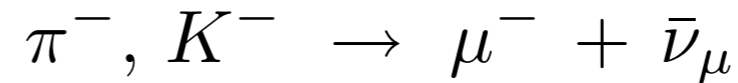




# Atmosphärische Neutrinos



- Atmosphärische Neutrinos entstehen in Luftschauern beim Pion/Kaon und Myonzerfall:



- Lebensdauer des Myons:  $c\tau_\mu \approx 660 \text{ m}$
- Man misst (da keine Ladungsidentifikation erfolgt):

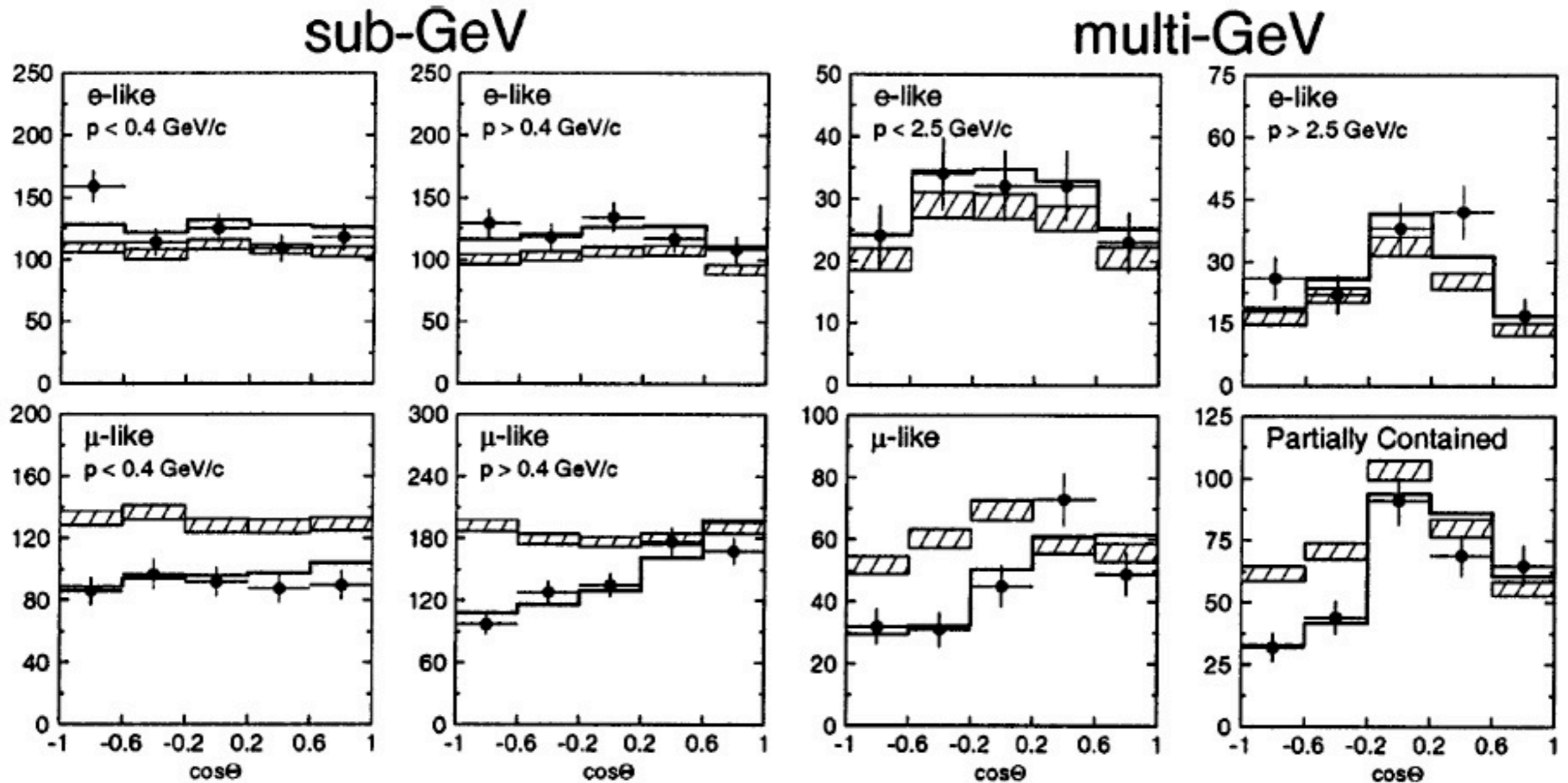
$$\frac{\mu}{e} \equiv \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$

- Wenn alle Myonen zerfallen (also bei niedrigen Energien):

$$\frac{\mu}{e} \approx 2$$

- Bei hohen Energien:  $\frac{\mu}{e} > 2$

# Oszillation Atmosphärischer Neutrinos

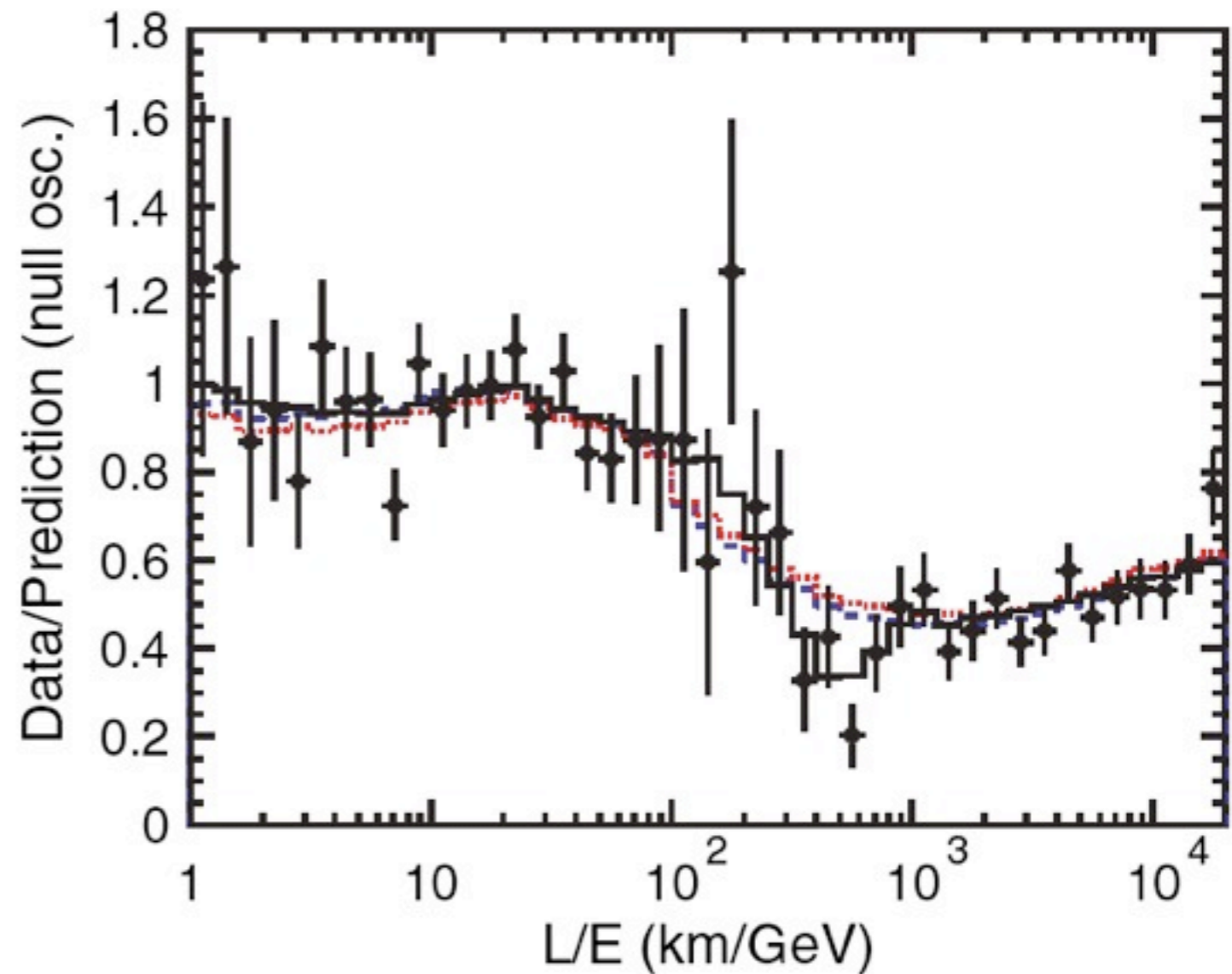
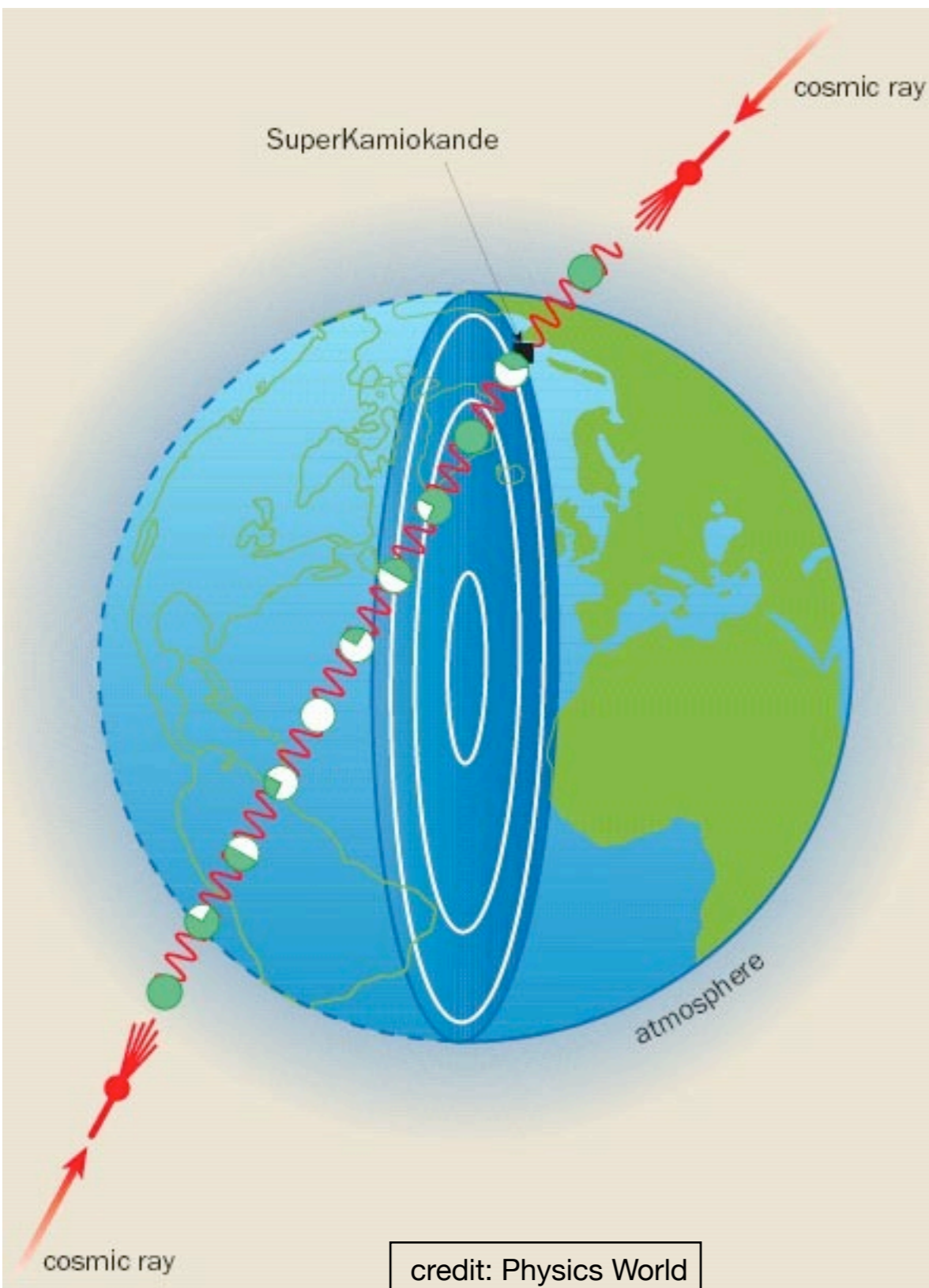


Phys.Rev.Lett. 81, 1562 (1998)

- Defizit von Myon-Neutrinos beobachtet, Elektron-Neutrinos stimmen mit Erwartungen überein
- Abhängigkeit vom Zenitwinkel

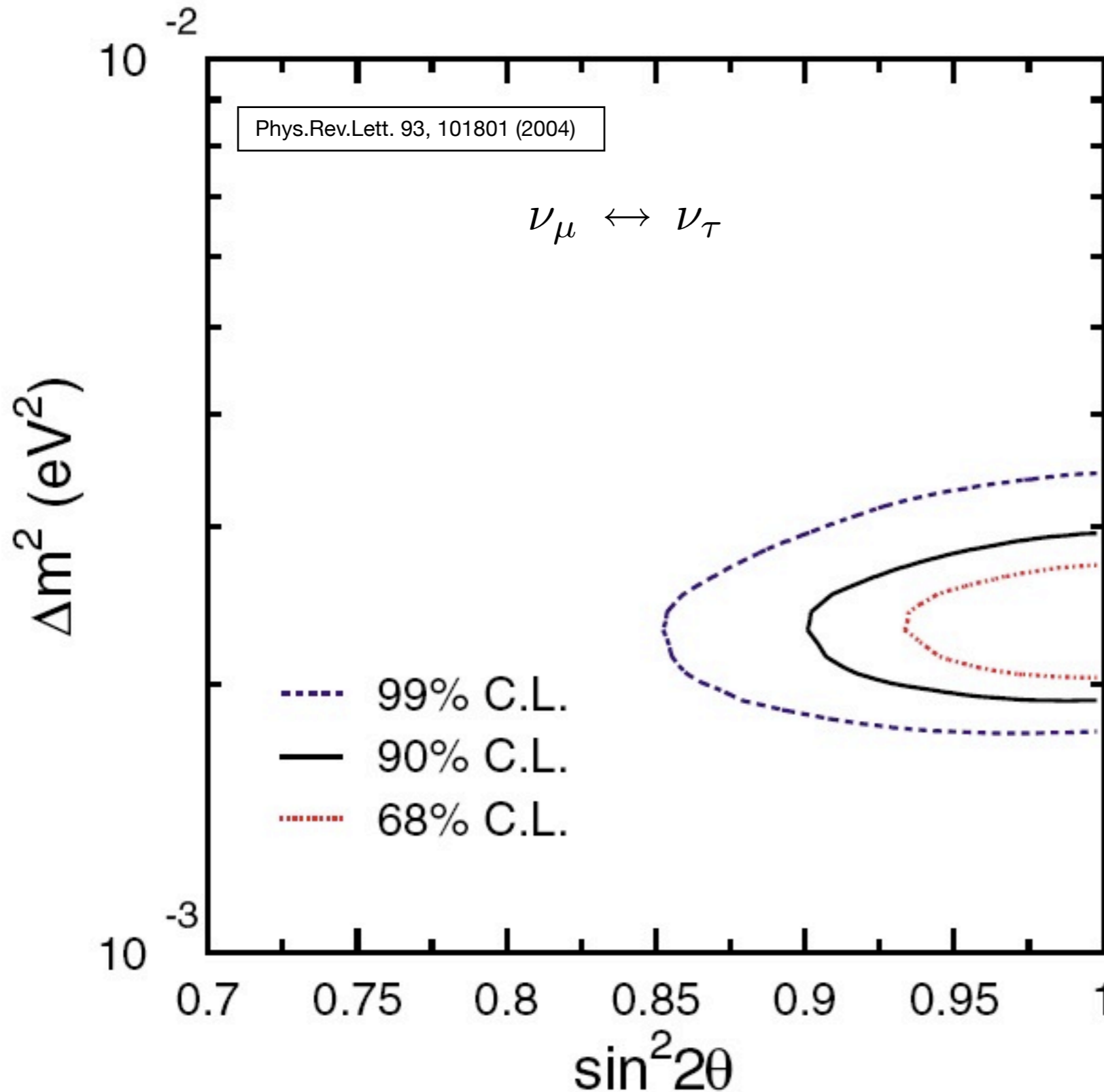
# Oszillation Atmosphärischer Neutrinos

- Interpretation: Auf dem Weg durch die Erde wandeln sich Myon-Neutrinos in Tau-Neutrinos um



Phys.Rev.Lett. 93, 101801 (2004)

# Oszillation Atmosphärischer Neutrinos: Ergebnis



- Beste Werte für Massendifferenz und Mischungswinkel:

$$\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 1.0$$

- ▶ Maximale Mischung
- ▶ Oszillationslänge  
 $\sim 1000 \text{ km } E_\nu/\text{GeV}$

# Neutrino Oscillations - Status

- Two distinct types of oscillations (with quite different mass splittings) have been observed:
  - Atmospheric - disappearance of  $\nu_\mu$ ,  $\Delta m^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
  - Solar (last week in detail) - disappearance of  $\nu_e$ ,  $\Delta m^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- ▶ Choice of convention: small splitting between  $\nu_1$  and  $\nu_2$ , big between  $\nu_1/\nu_2$  and  $\nu_3$
- ▶ The data tell us: mixing between  $\nu_1$  and  $\nu_3$  is small
  - ▶ In solar oscillations, we observe  $\nu_1 \rightarrow \nu_2$  oscillations,  $\nu_1$  has to have a big  $\nu_e$  component
  - ▶ In atmospheric oscillations, we observe  $\nu_2 \rightarrow \nu_3$ , with maximal mixing:  $\nu_3$  is (almost) a 50-50 mixture of  $\nu_\tau$  and  $\nu_\mu$

# Neutrino Oscillations - Status

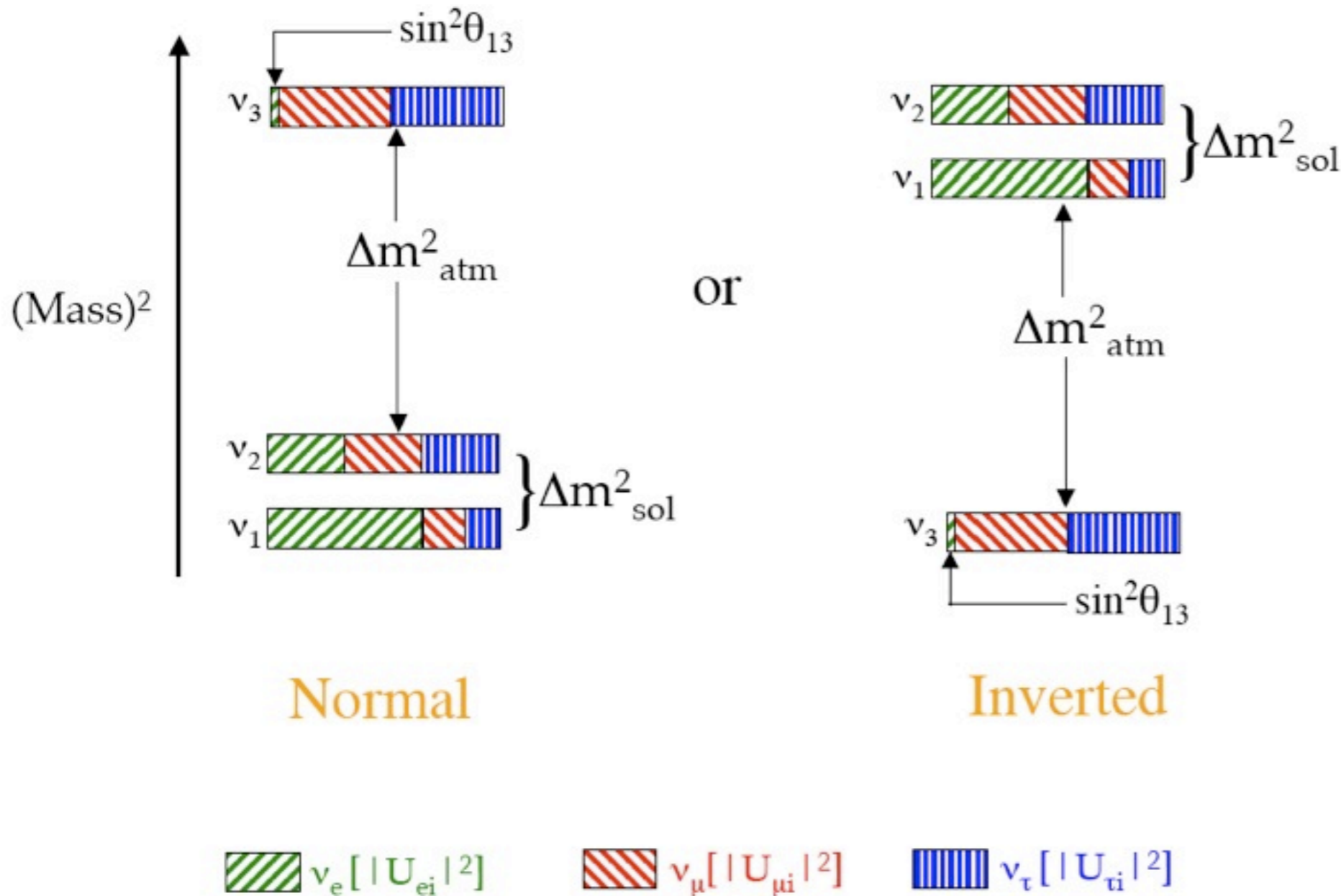
- Two distinct types of oscillations (with quite different mass splittings) have been observed:
  - Atmospheric - disappearance of  $\nu_\mu$ ,  $\Delta m^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
  - Solar (last week in detail) - disappearance of  $\nu_e$ ,  $\Delta m^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- ▶ Choice of convention: small splitting between  $\nu_1$  and  $\nu_2$ , big between  $\nu_1/\nu_2$  and  $\nu_3$
- ▶ The data tell us: mixing between  $\nu_1$  and  $\nu_3$  is small
  - ▶ In solar oscillations, we observe  $\nu_1 \rightarrow \nu_2$  oscillations,  $\nu_1$  has to have a big  $\nu_e$  component
  - ▶ In atmospheric oscillations, we observe  $\nu_2 \rightarrow \nu_3$ , with maximal mixing:  $\nu_3$  is (almost) a 50-50 mixture of  $\nu_\tau$  and  $\nu_\mu$

$$\text{U}_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \begin{pmatrix} c_{23} & s_{23} \\ -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} & & \\ & & 1 & \\ & & & \begin{pmatrix} c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{13}e^{i\delta} & c_{13} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \end{pmatrix} & \\ & 1 \end{pmatrix}$$

atmospheric/  
accelerator

solar/  
reactor

# Neutrino-Oscillations: The Resulting Picture



$$\Delta m^2_{\text{sol}} \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

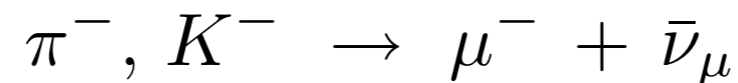
$$\Delta m^2_{\text{atm}} \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

One neutrino has to have a mass of at least  $\sim 0.05 \text{ eV}$ !

- Absolute masses and hierarchy not known yet! Two possible arrangements...

# Neutrinos an Beschleunigern

- Neutrino-Erzeugung:
  - Analog zu Luftschauern: Hadronische Schauer beim Auftreffen von hochenergetischen Protonen auf ein Produktionstarget
  - Erzeugung von Pionen, die in einem Zerfallstunnel zerfallen:



- Tunnel nicht lang genug für Zerfall der Muonen, daher praktisch reiner  $\nu_{\mu}$  Strahl
- Es wurde eine Vielzahl an Experimenten mit Beschleuniger-Neutrinos durchgeführt, u.a. zur
  - Untersuchung der schwachen Wechselwirkung
  - Untersuchung der Quark-Zusammensetzung von Atomkernen
  - Entdeckung des  $\nu_{\tau}$
  - Bestätigung der atmosphärischen Messungen
  - ...

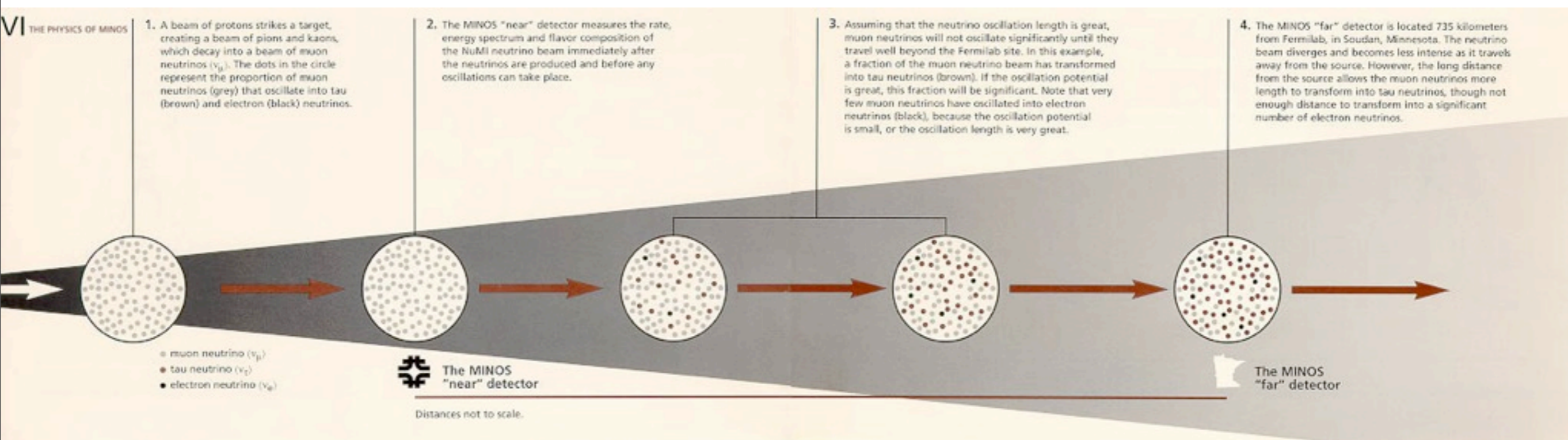


# Long-Baseline Experimente

- Neutrinostrahl wird an Beschleuniger erzeugt
- Referenz-Messung mit einem "Near Detector"
- Nachweis der Neutrinos mit einem "Far Detector"
- ▶ Wahl der Entfernung und der Energie bestimmt den untersuchten Bereich der Mischungsmatrix

Die Zusammensetzung des Strahls ändert sich von der Quelle zum Detektor

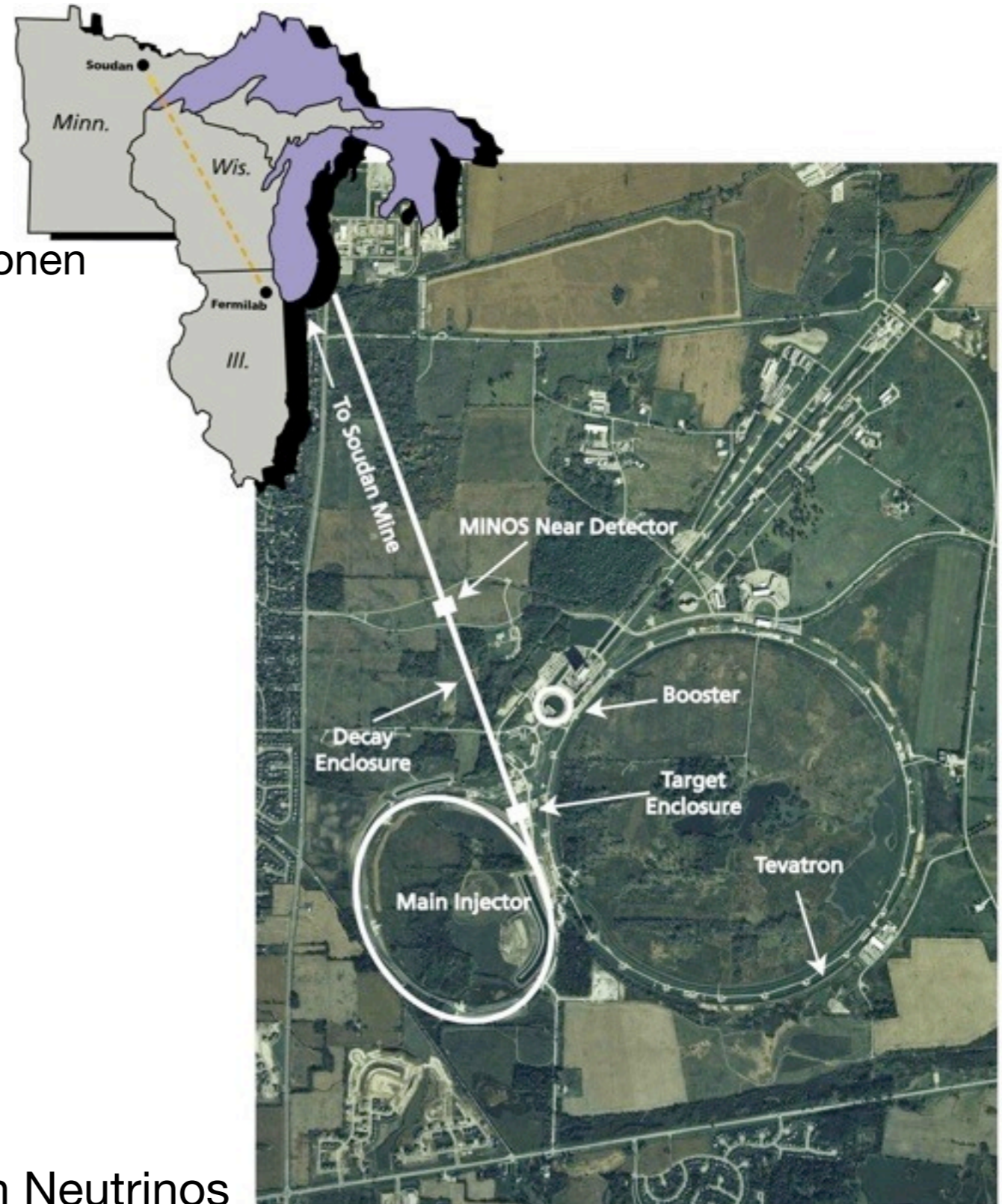
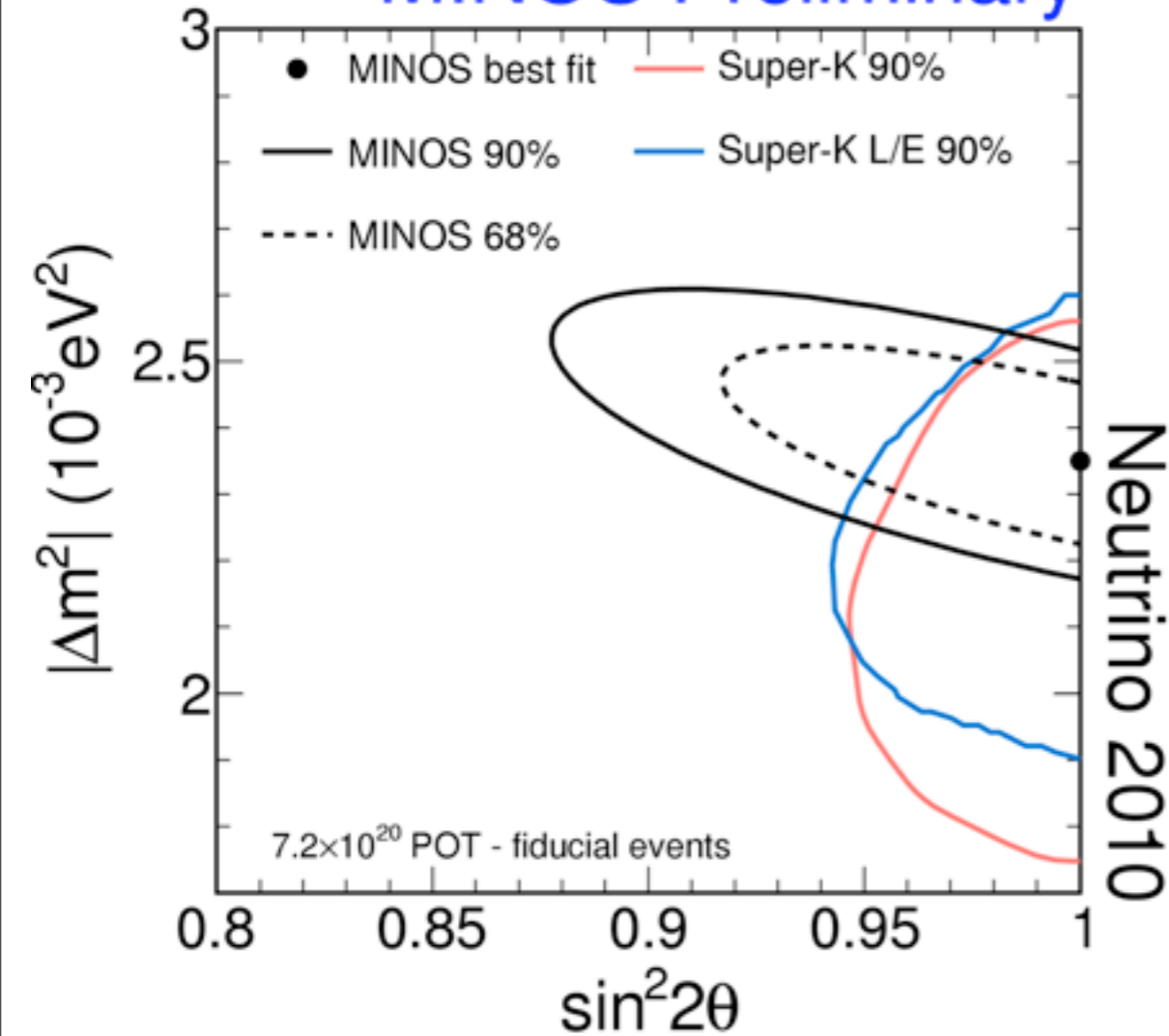
Von einem reinem  $\nu_\mu$  Strahl zu einer Mischung aus  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  und etwas  $\nu_e$  ( $\theta_{13} \neq 0$ )



# Long-Baseline Experimente: NuMI/MINOS

- Fermilab -> Soudan Mine
- Baseline 724 km
- 1. Maximum der atmosphärischen Oszillationen

## MINOS Preliminary

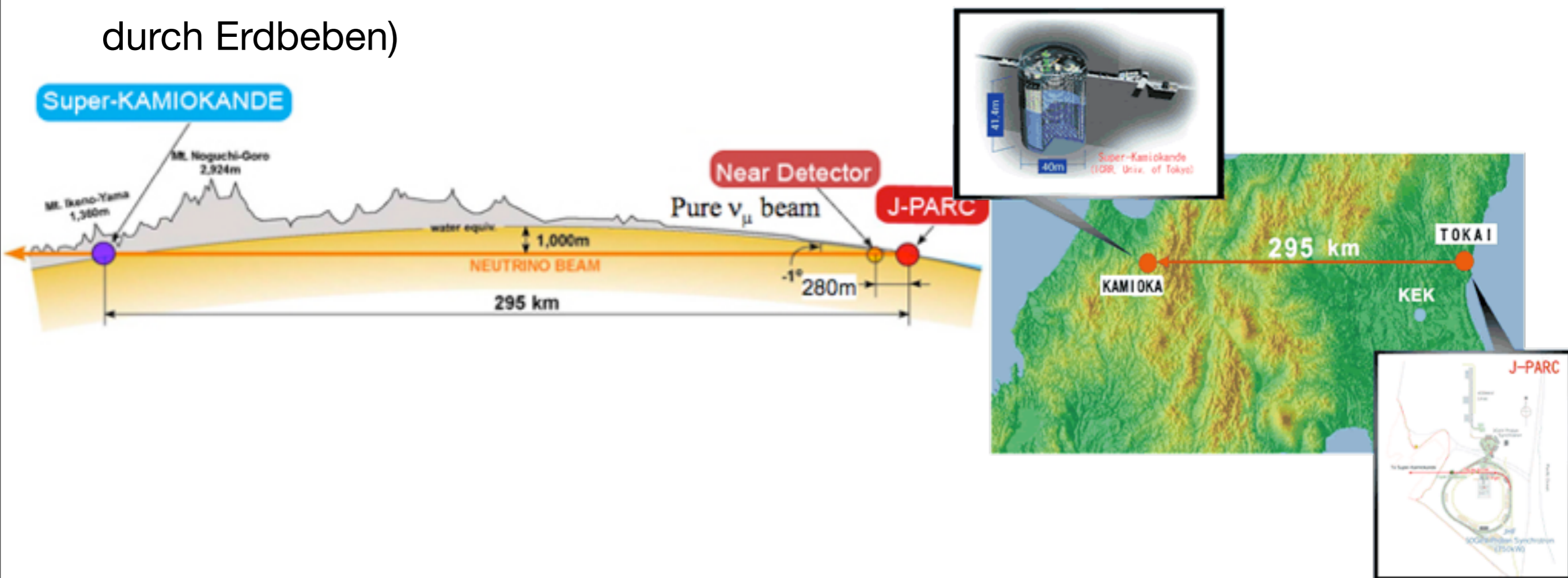


Bestätigt Messungen mit atmosphärischen Neutrinos

FERMILAB #98-1321D

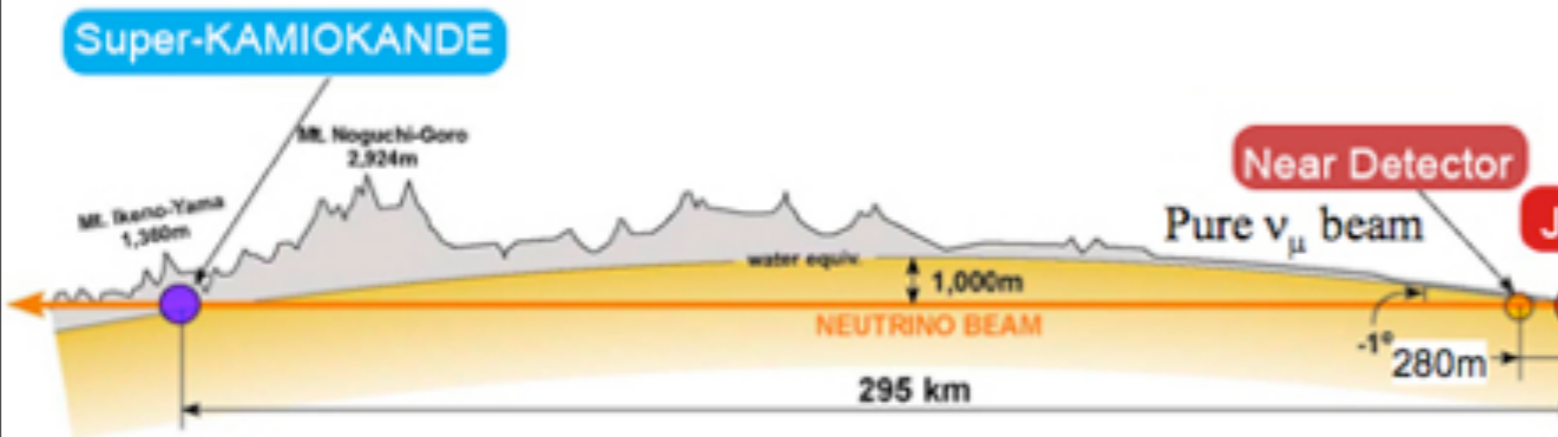
# T2K: Neutrino-Strahl nach SuperK

- Ziel: Präzise Messung der atm. Oszillationen,  $\theta_{13}$ , mögliche CP-Verletzung
- Läuft seit 2010 (mit 1 Jahr Unterbrechung durch Erdbeben)

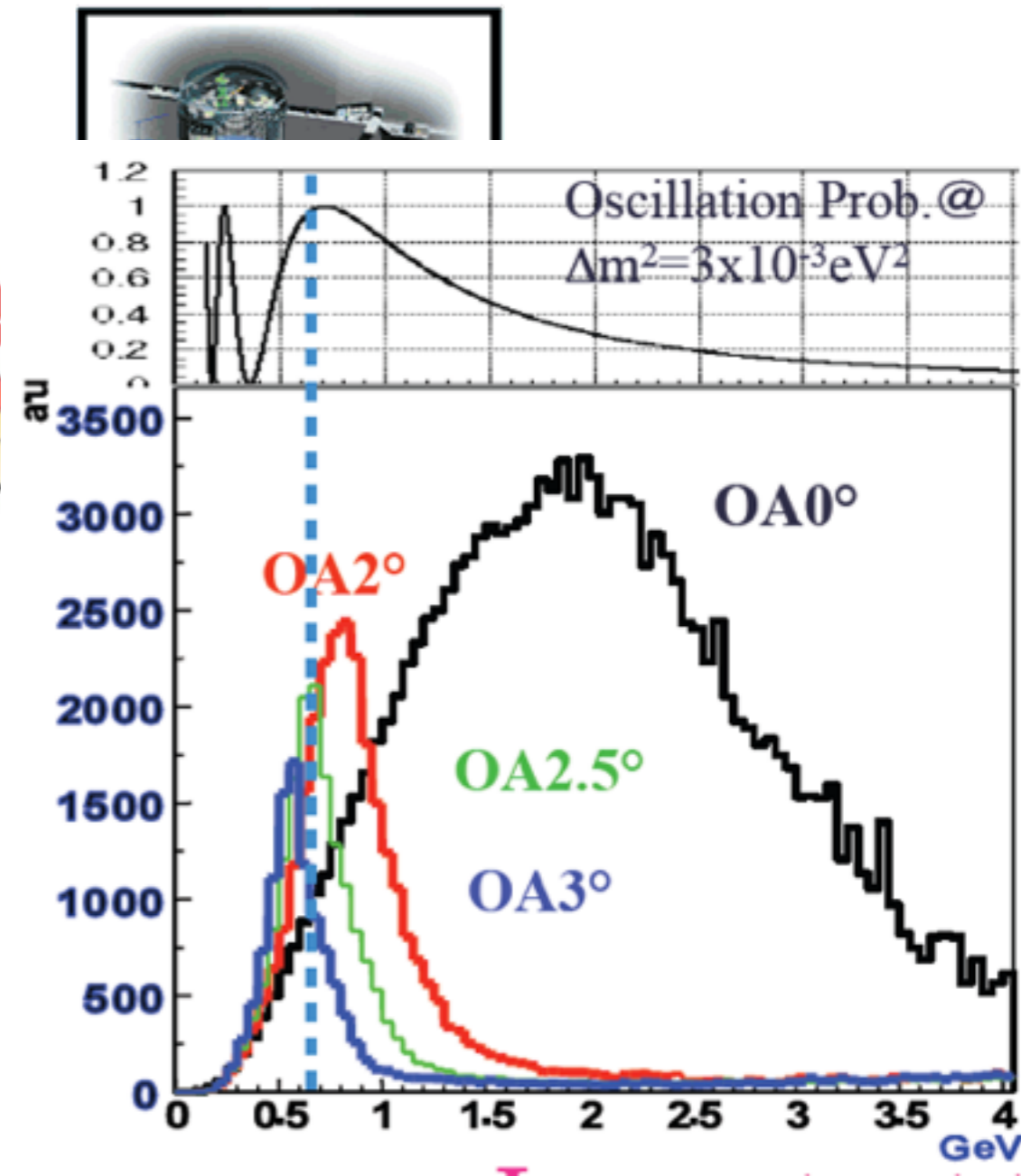
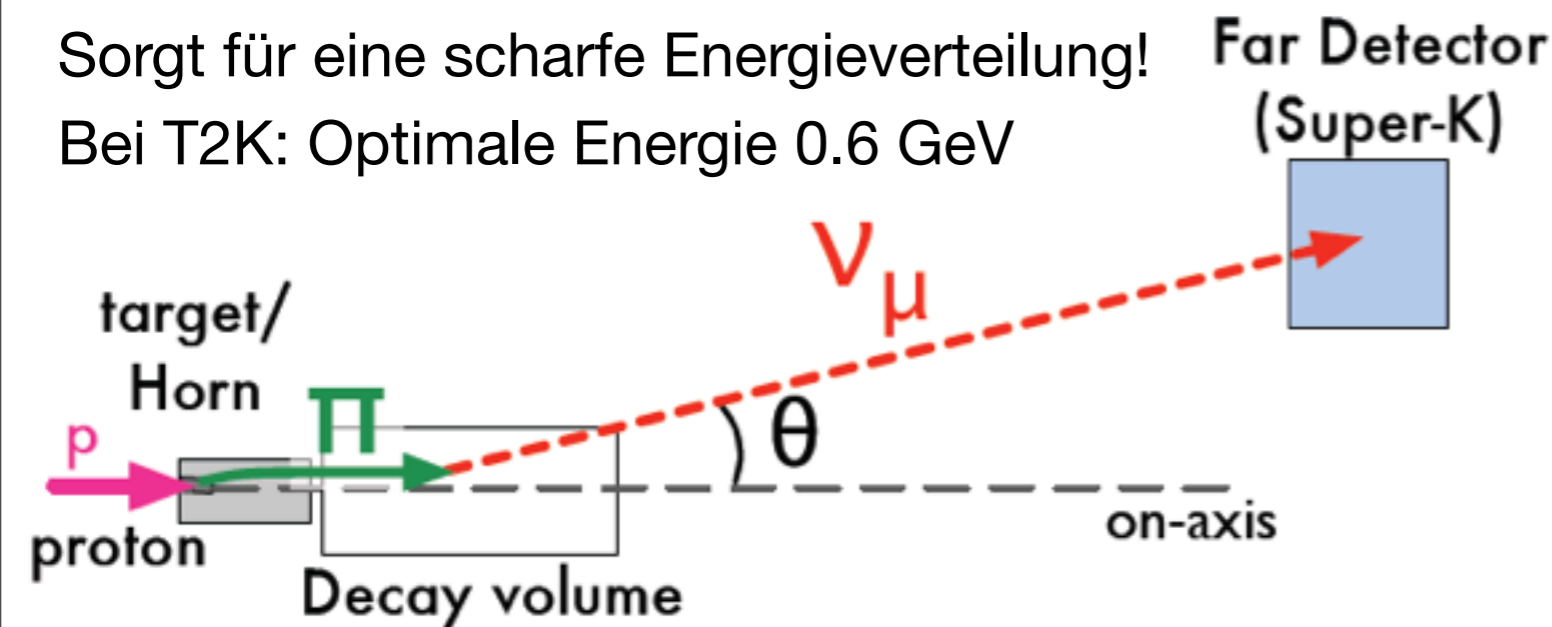


# T2K: Neutrino-Strahl nach SuperK

- Ziel: Präzise Messung der atm. Oszillationen,  $\theta_{13}$ , mögliche CP-Verletzung
- Läuft seit 2010 (mit 1 Jahr Unterbrechung durch Erdbeben)



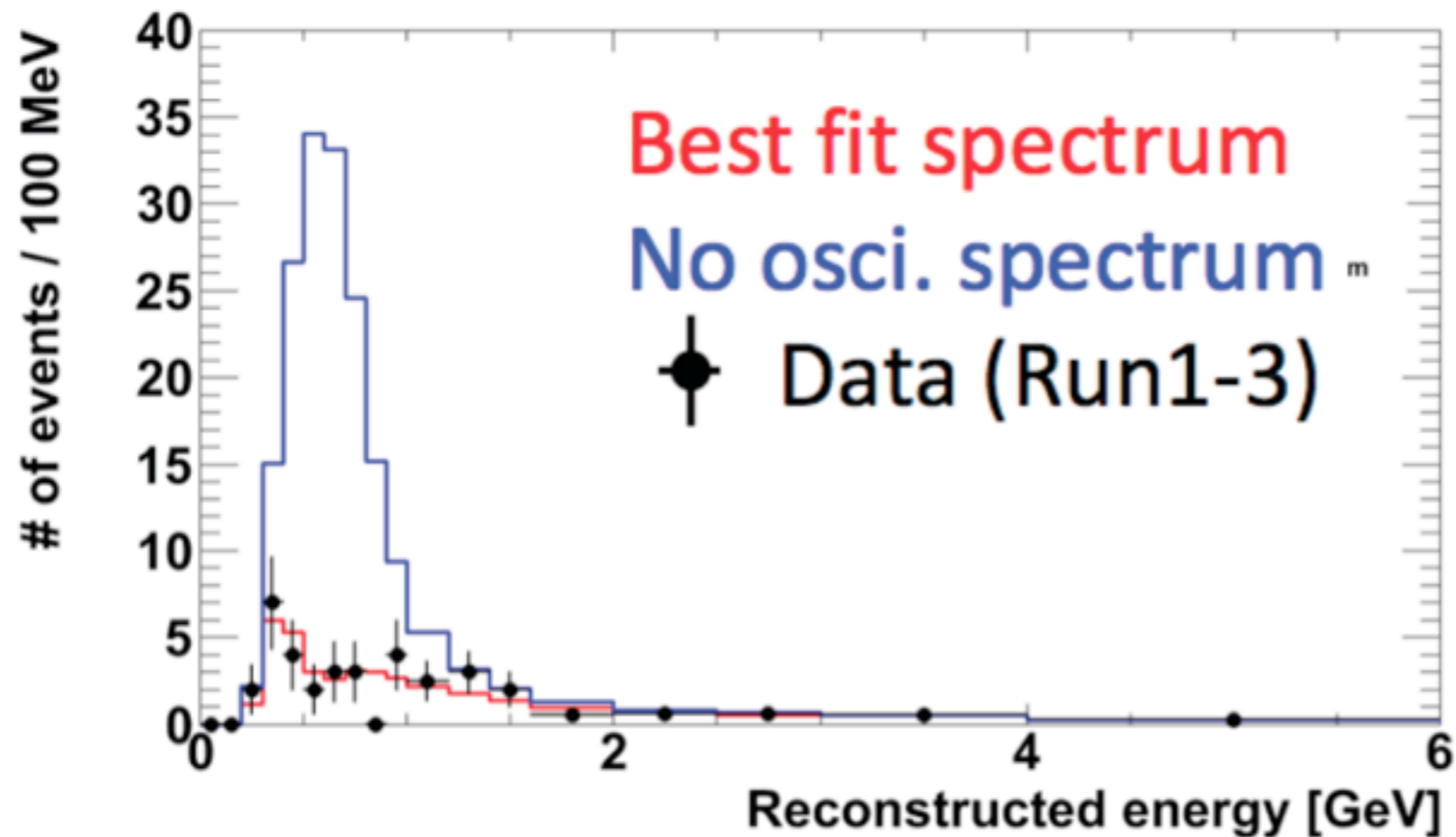
Moderne Experimente sind "off-axis"- Beams: Ziehlen nicht direkt auf den Far Detektor -  
Sorgt für eine scharfe Energieverteilung!  
Bei T2K: Optimale Energie 0.6 GeV



Ken Sakashita, KEK Seminar

# T2K - Die Wahl der richtigen Baseline

- Fast vollständiges verschwinden der  $\nu_\mu$ :

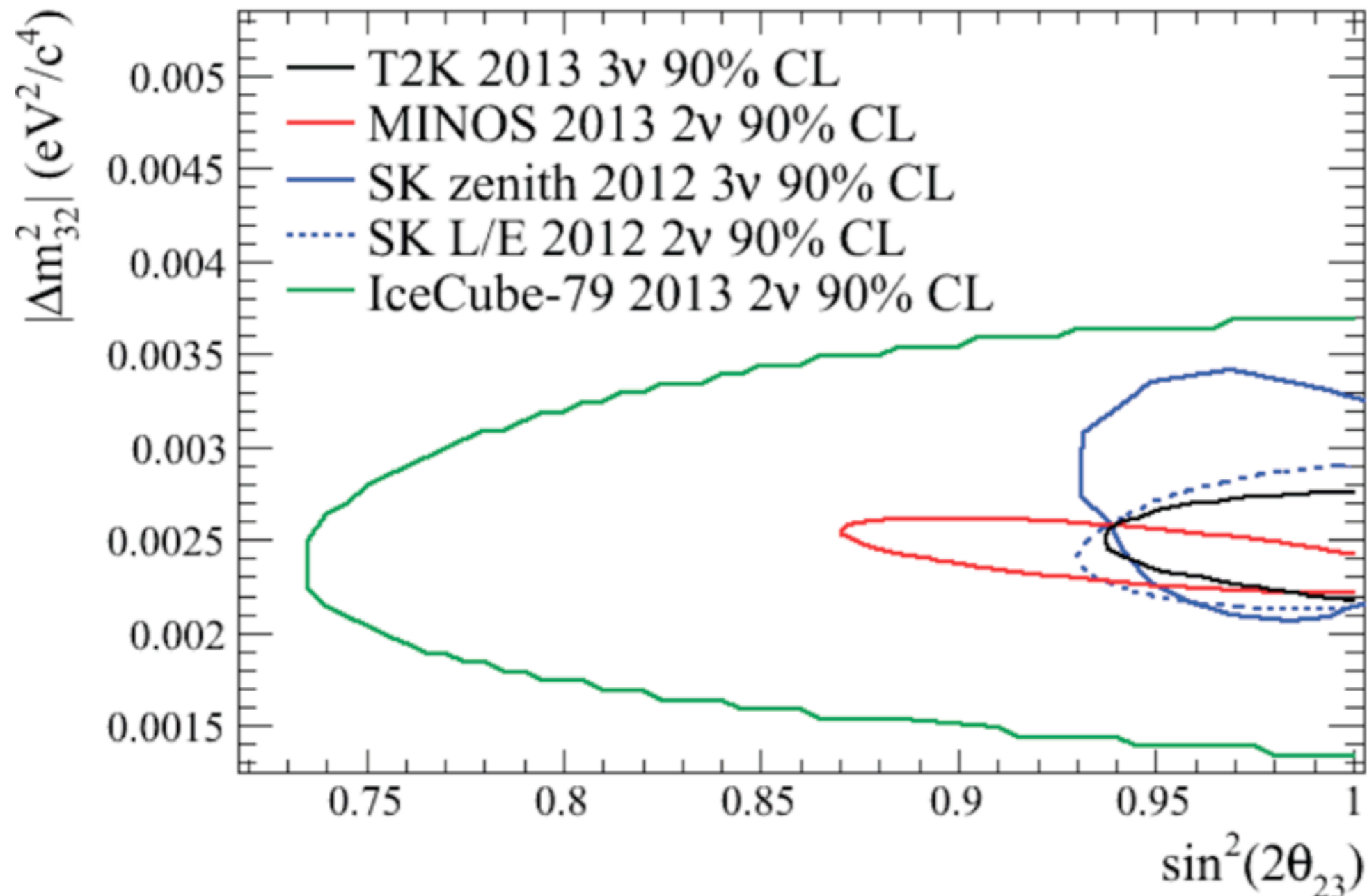


205 Ereignisse ohne  
Oszillation erwartet,  
58 gesehen

Ist auch optimal, um  
 $\theta_{13}$  zu messen!

# Atmosphärisch & Beschleuniger: Das Bild

- Super-K & IceCube atmosphärisch verglichen mit Beschleunigern: alles passt, Beschleuniger erreichen inzwischen die höchste Genauigkeit



# CNGS / OPERA - Bestätigung

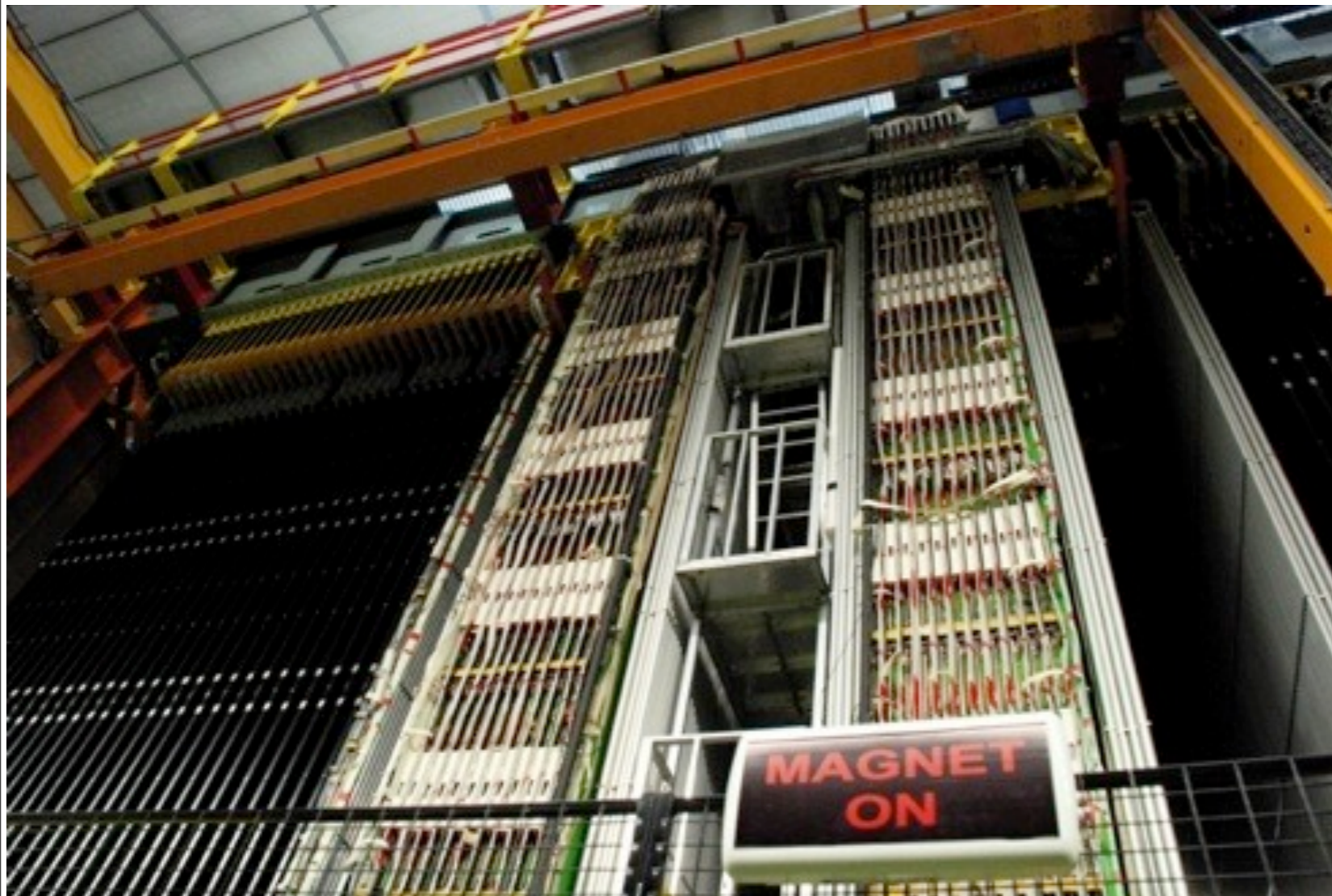
- Eines der Ziele: Direkte Beobachtung der Oszillation von  $\nu_\mu$  nach  $\nu_\tau$  durch Nachweis von  $\nu_\tau$  in einem  $\nu_\mu$  Long Baseline Beam (CERN  $\rightarrow$  Gran Sasso)



- Magnetspektrometer zur Spur- und Energierekonstruktion, dazwischen Blöcke mit Foto-Emulsion zur genauen Vermessung der Spuren am Vertex
- Bei interessanten Ereignissen im Spektrometer wird der entsprechende Block extrahiert und untersucht

# CNGS / OPERA - Bestätigung

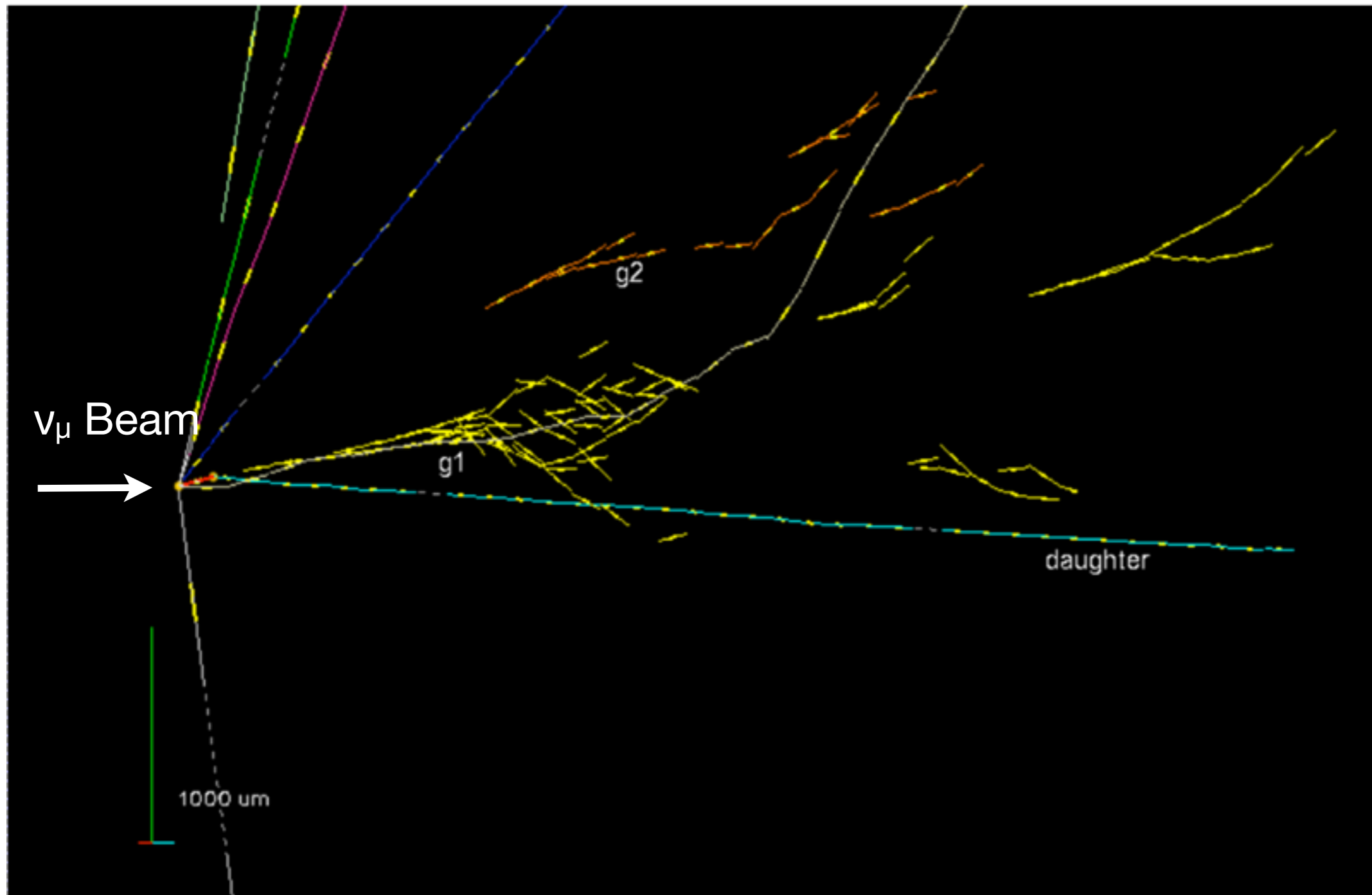
- Eines der Ziele: Direkte Beobachtung der Oszillation von  $\nu_\mu$  nach  $\nu_\tau$  durch Nachweis von  $\nu_\tau$  in einem  $\nu_\mu$  Long Baseline Beam (CERN  $\rightarrow$  Gran Sasso)



- Magnetspektrometer zur Spur- und Energierekonstruktion, dazwischen Blöcke mit Foto-Emulsion zur genauen Vermessung der Spuren am Vertex
  - Bei interessanten Ereignissen im Spektrometer wird der entsprechende Block extrahiert und untersucht



# OPERA: Erster $\nu_\tau$ Kandidat

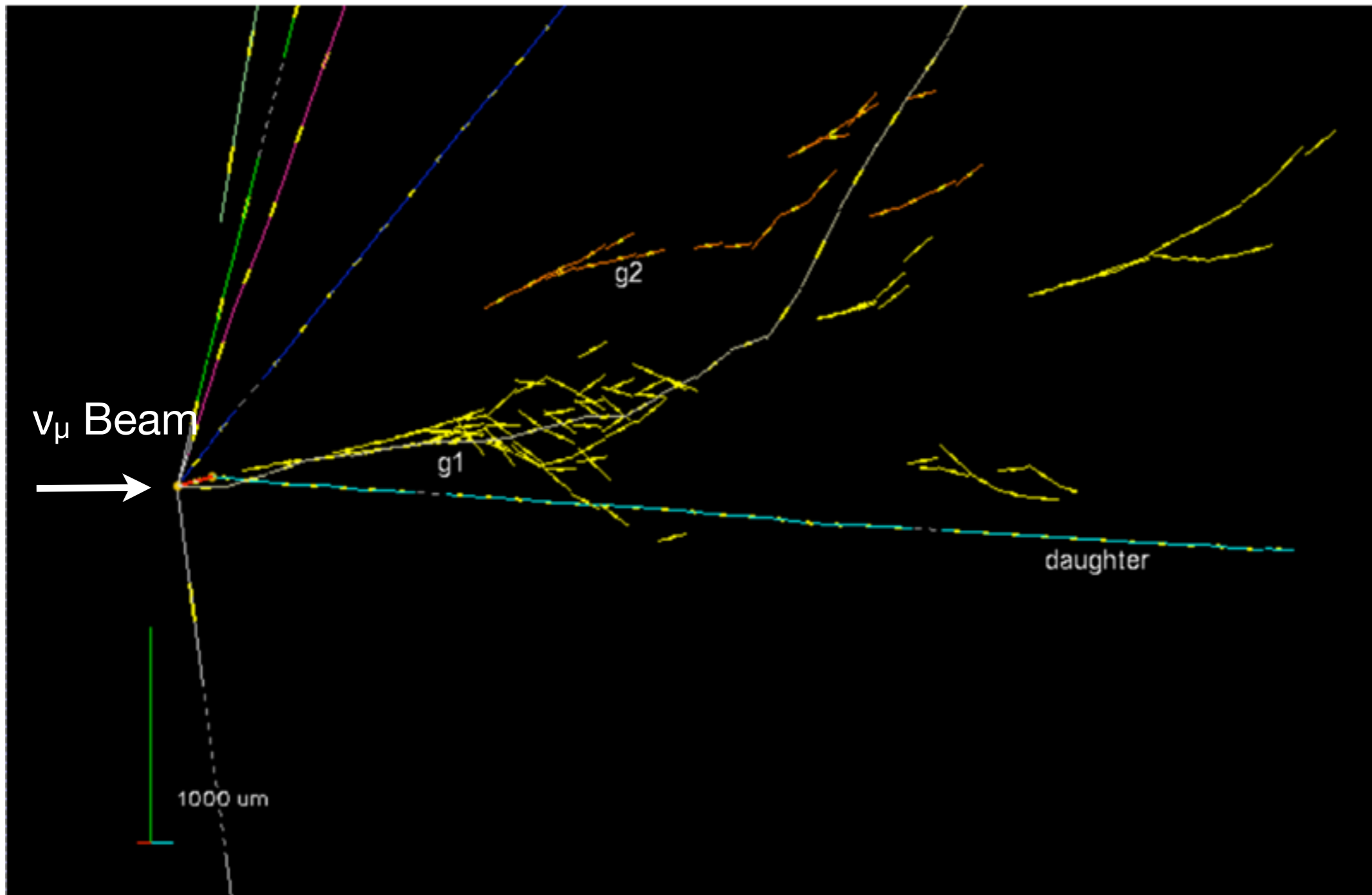


$\nu_\tau$  erzeugt  $\tau$ , schneller Zerfall in  $\mu$  und  $\nu_s$

⇒ Beweis, dass die atmosphärische Oszillation  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  ist

OPERA Press Release, 31.05.2010

# OPERA: Erster $\nu_\tau$ Kandidat



Inzwischen wurden zwei weitere  $\nu_\tau$  gesehen: stimmt mit Erwartung überein!

$\nu_\tau$  erzeugt  $\tau$ , schneller Zerfall in  $\mu$  und  $\nu_s$

⇒ Beweis, dass die atmosphärische Oszillation  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  ist

OPERA Press Release, 31.05.2010

# Measuring $\theta_{13}$ at Accelerators

- $\theta_{13}$  describes  $\nu_1 \rightarrow \nu_3$  oscillations: Squared mass differences (almost) as in the atmospheric case, but transitions involving  $\nu_e$  (large  $\nu_e$  component in  $\nu_1$ !)
  - With a  $\nu_\mu$  beam,  $\theta_{13}$  is accessible through the subdominant oscillation from  $\nu_\mu$  to  $\nu_e$  (the dominant oscillation is  $\nu_\mu$  to  $\nu_\tau$ )

Oscillation probability: 
$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E} \right)$$

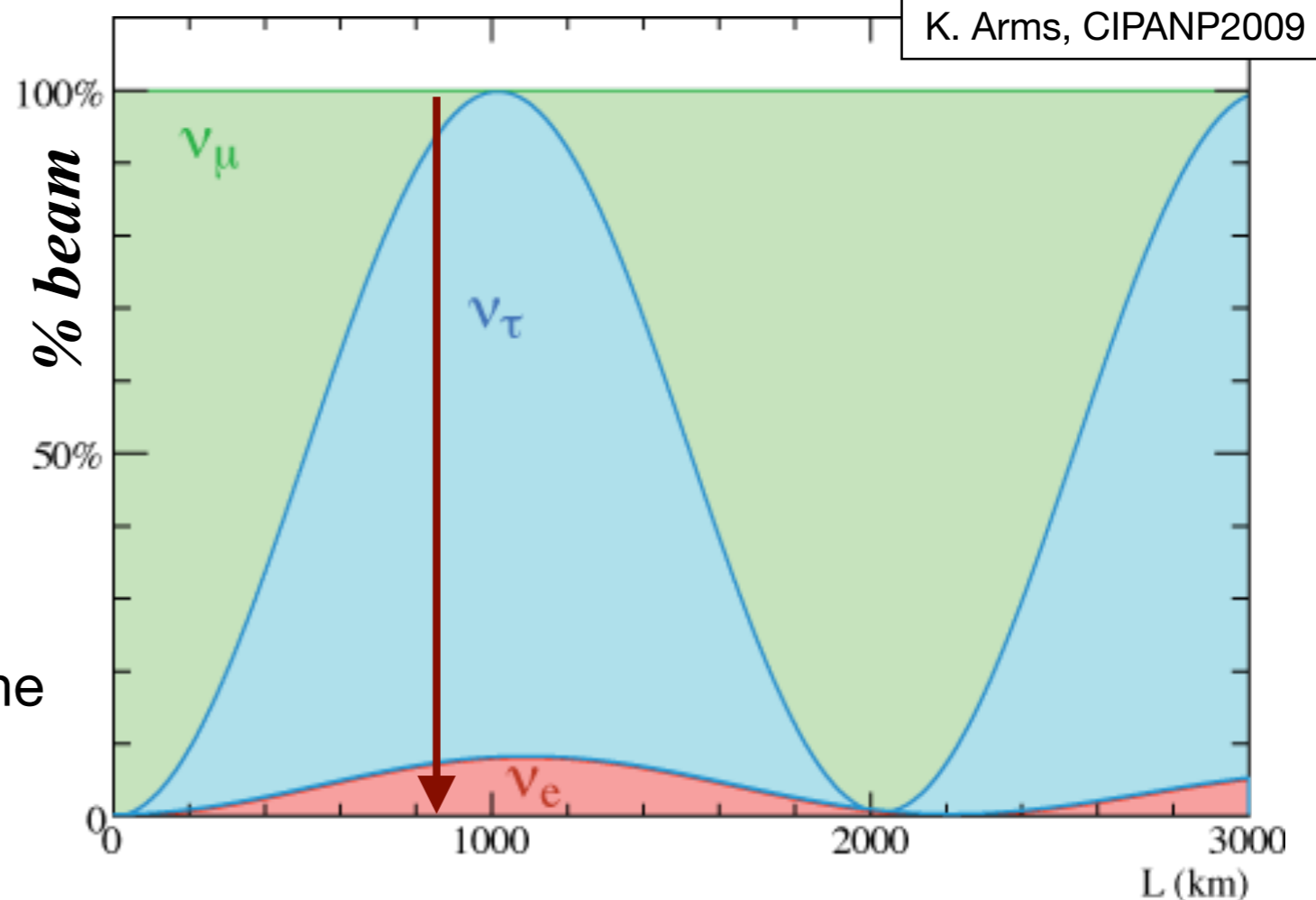
Strongly suppressed

compared to

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillations: Looking for small effects!

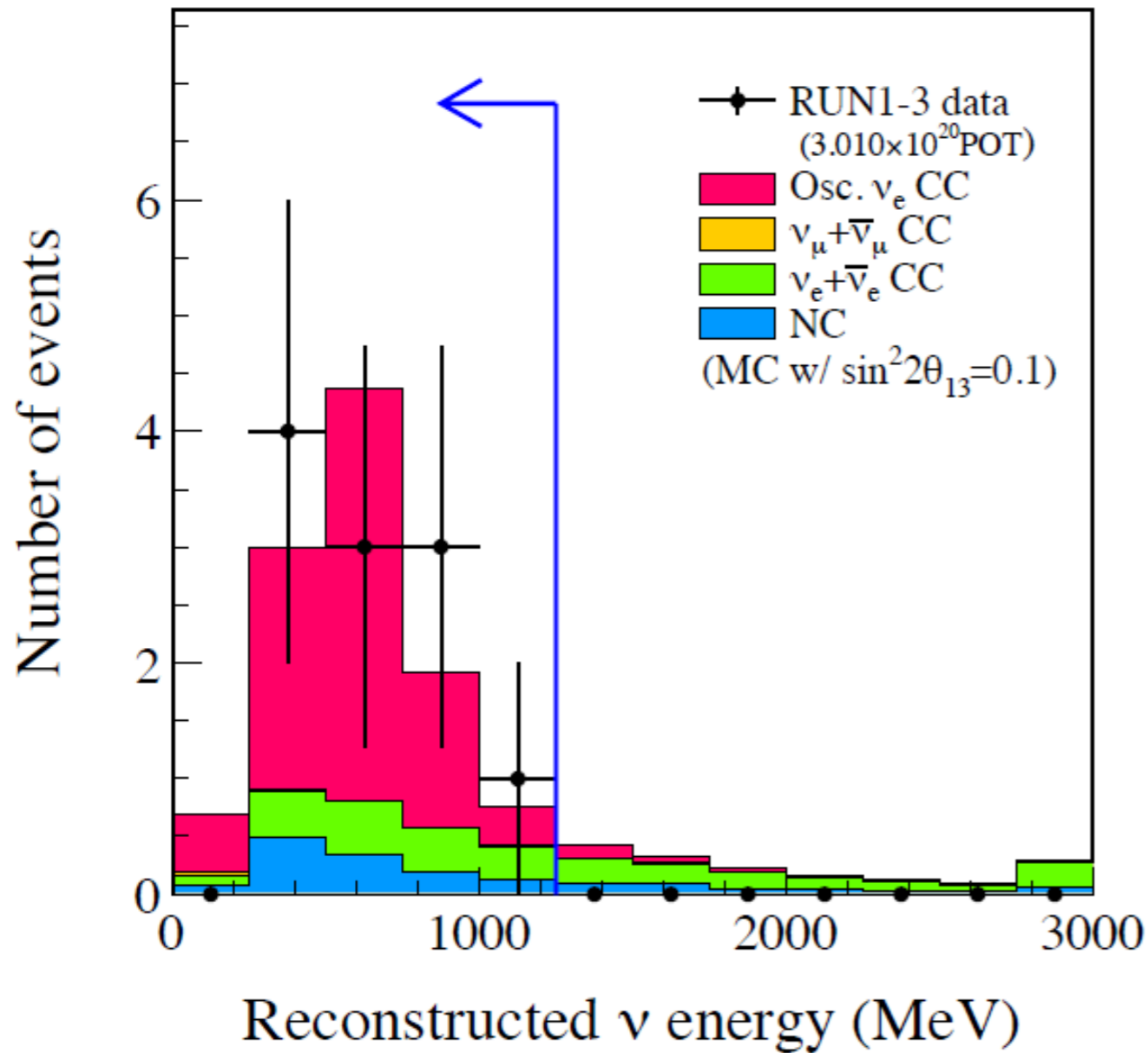
length scale depends on  $\nu$  energy  
here: shown for the planned NOvA experiment at FNAL

Important: Energy matched to baseline  
Narrow energy distribution

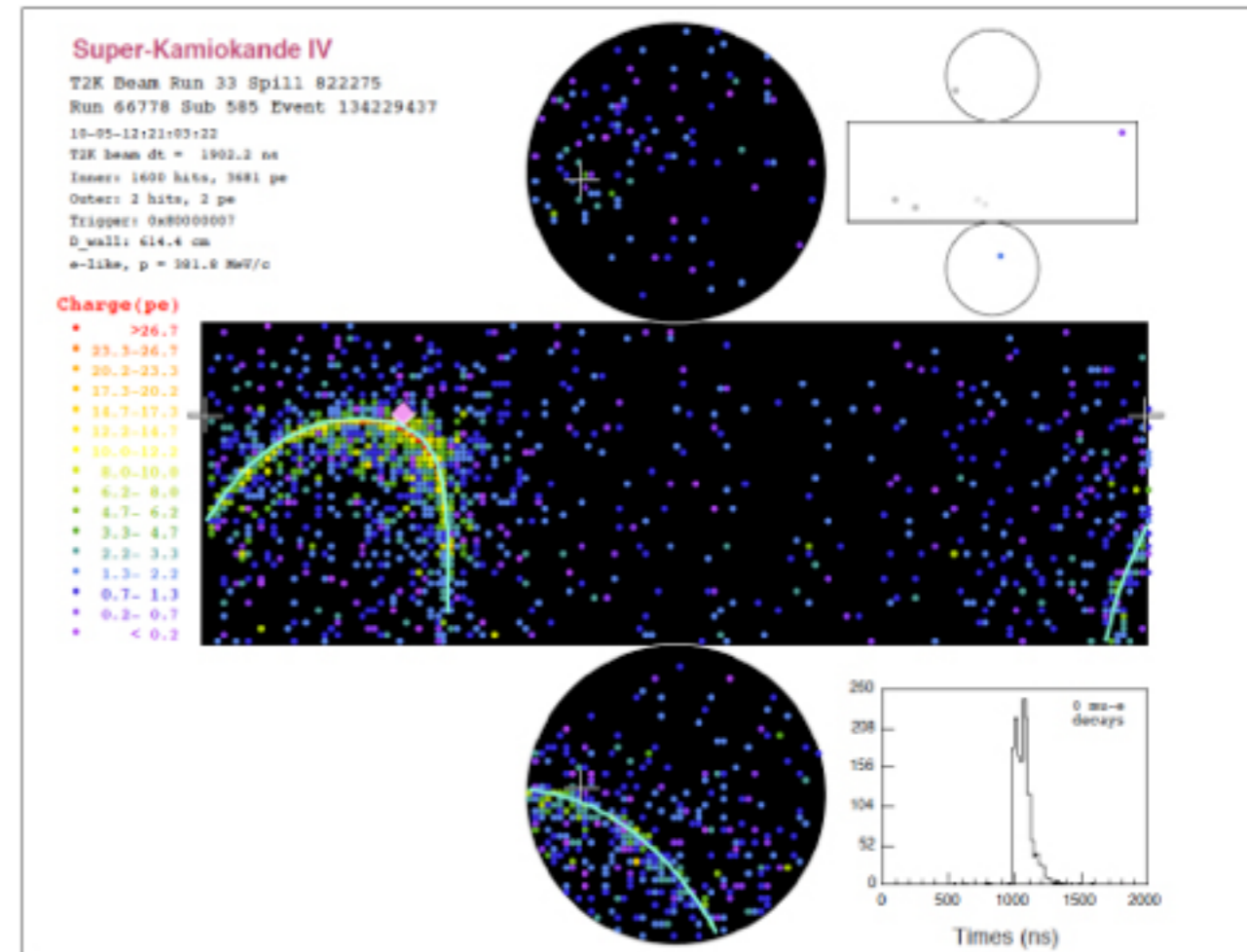


# T2K - Oszillationsergebnisse

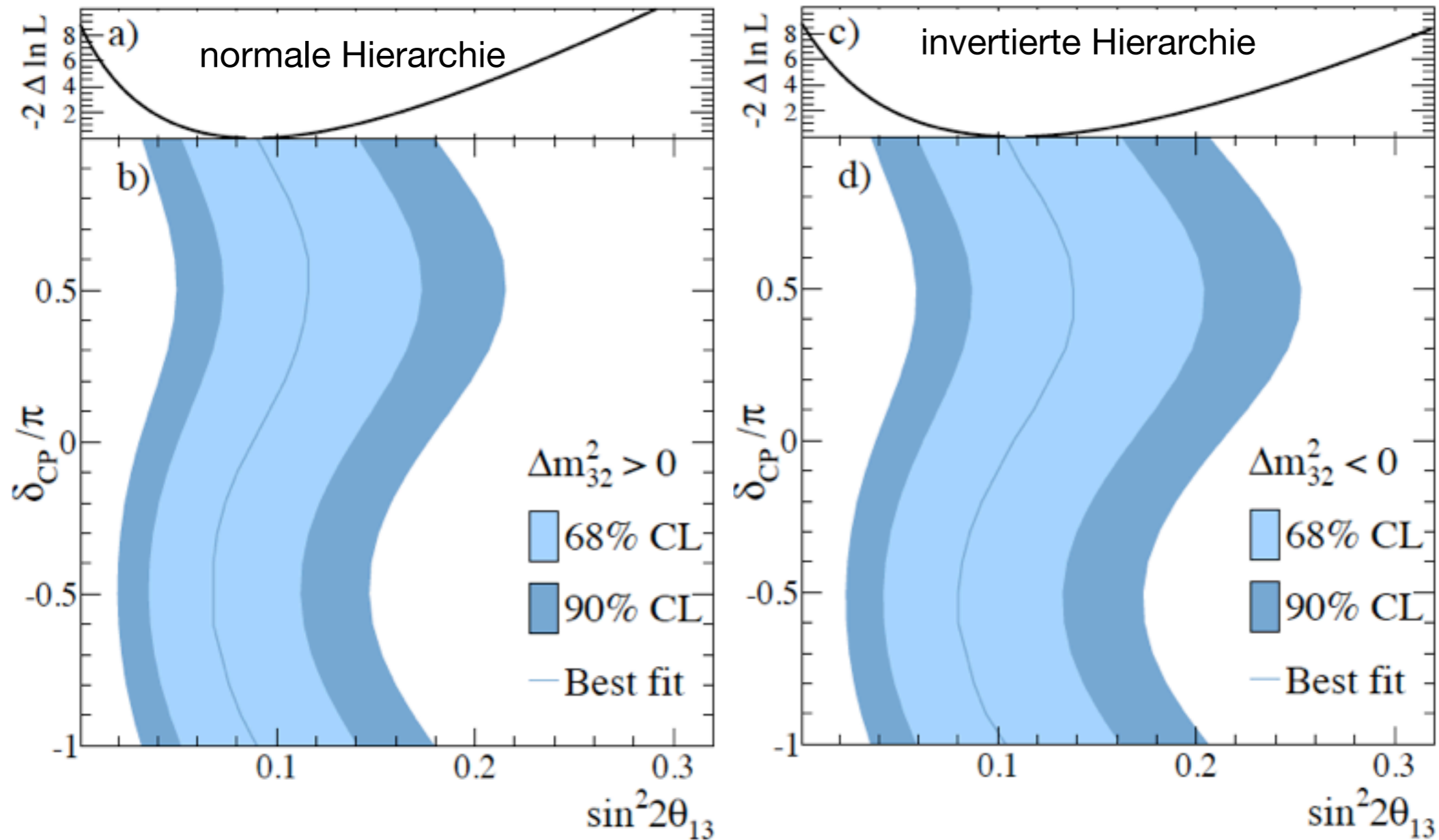
- Beobachtung von  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  Oszillationen :



11 Ereignisse ( $3.2 \sigma$  dass  $\theta_{13}$  nicht 0 ist)



# T2K Oszillationsergebnisse



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.088^{+0.049}_{-0.039} \quad (\text{normal hierarchy})$$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.108^{+0.059}_{-0.046} \quad (\text{inverted hierarchy})$$

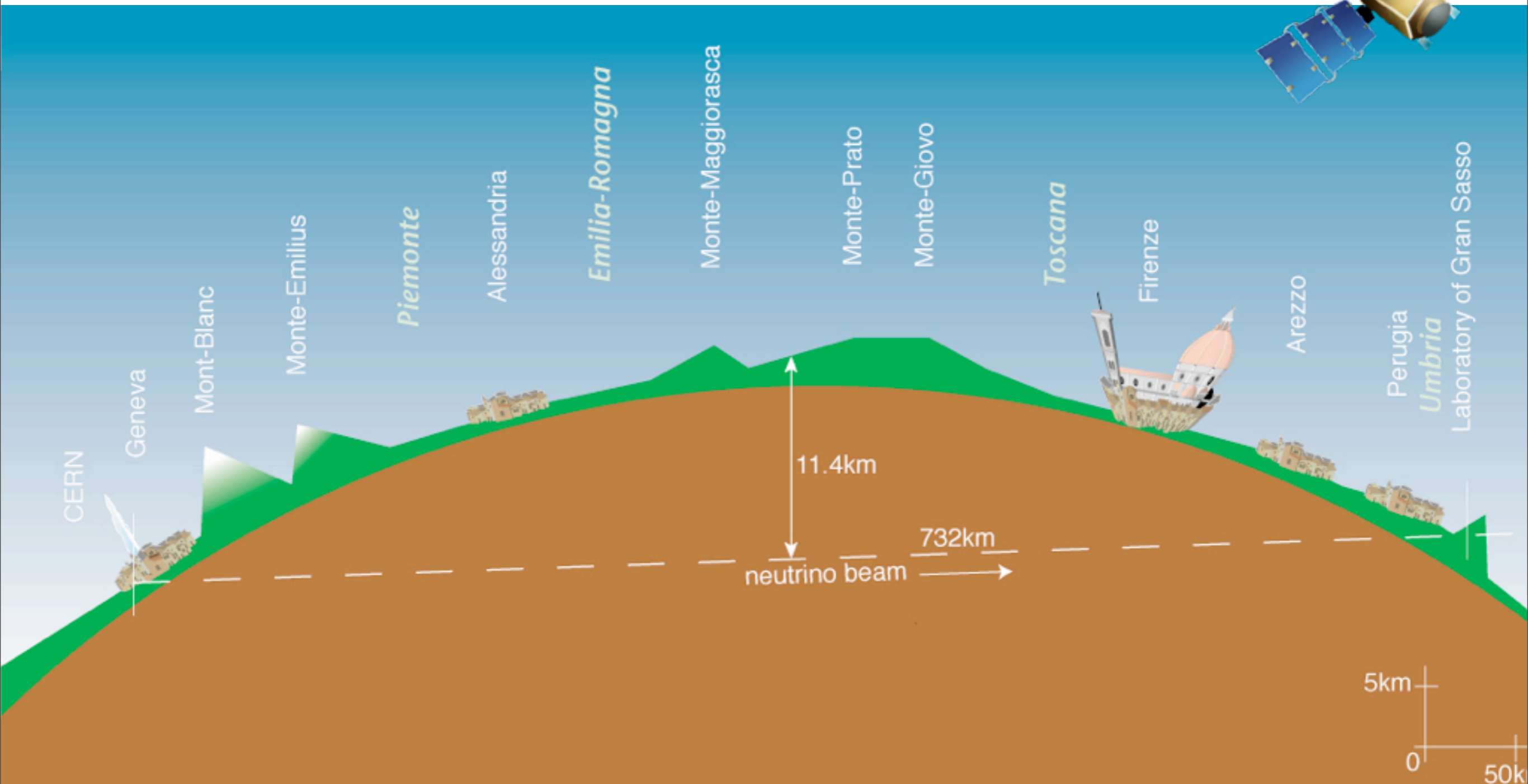
(Annahme:  $\delta_{CP} = 0$ )

Daya Bay:  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$

- Konsistent mit Daya Bay (Reaktor), Fehler noch deutlich größer

# Neutrino-Geschwindigkeit

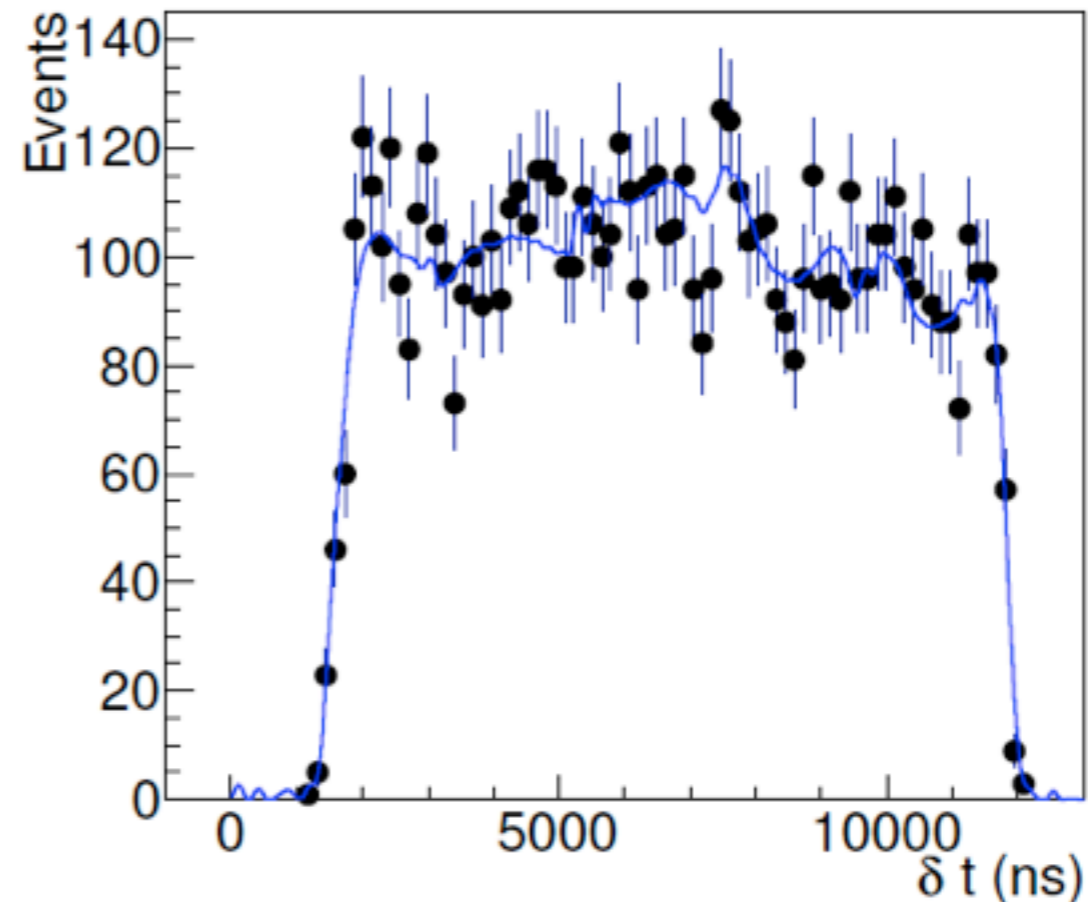
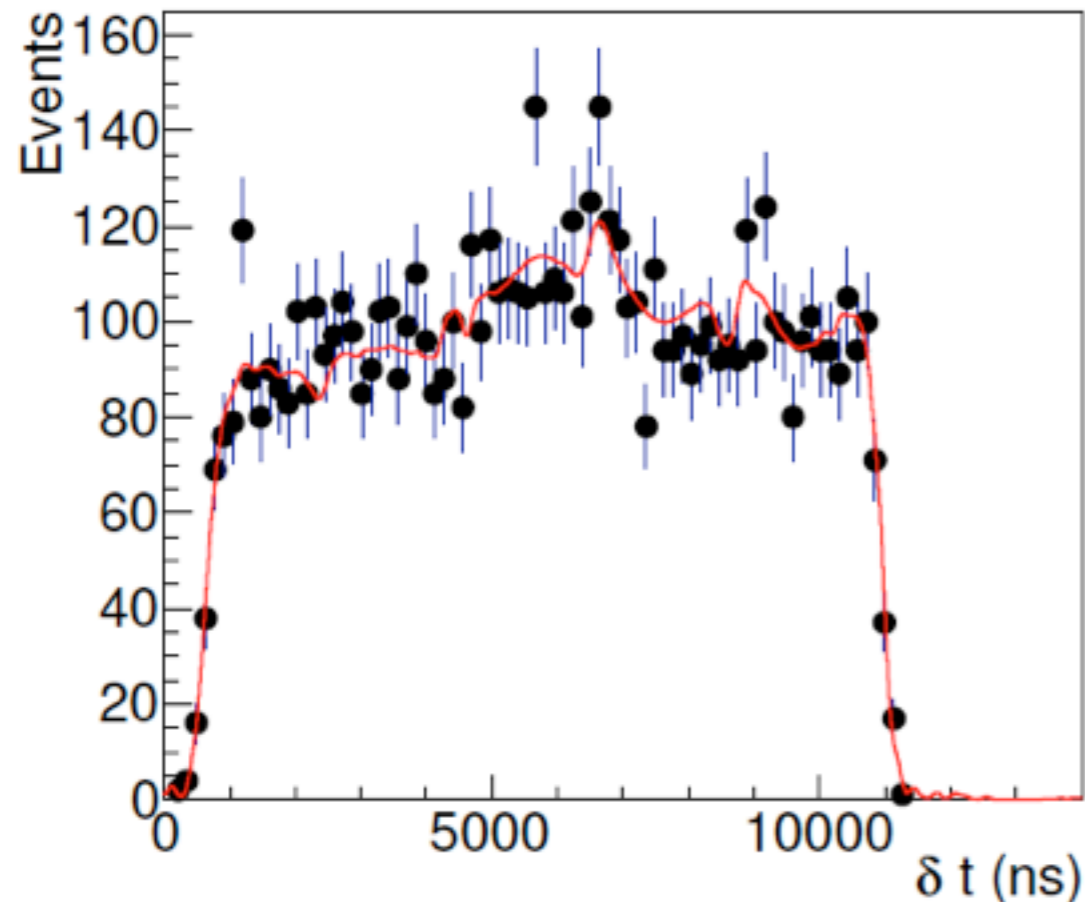
- Messung der Neutrino-Laufzeit - Synchronisation von CERN und Opera mit GPS



# Erster Versuch - Spektakuläres Resultat

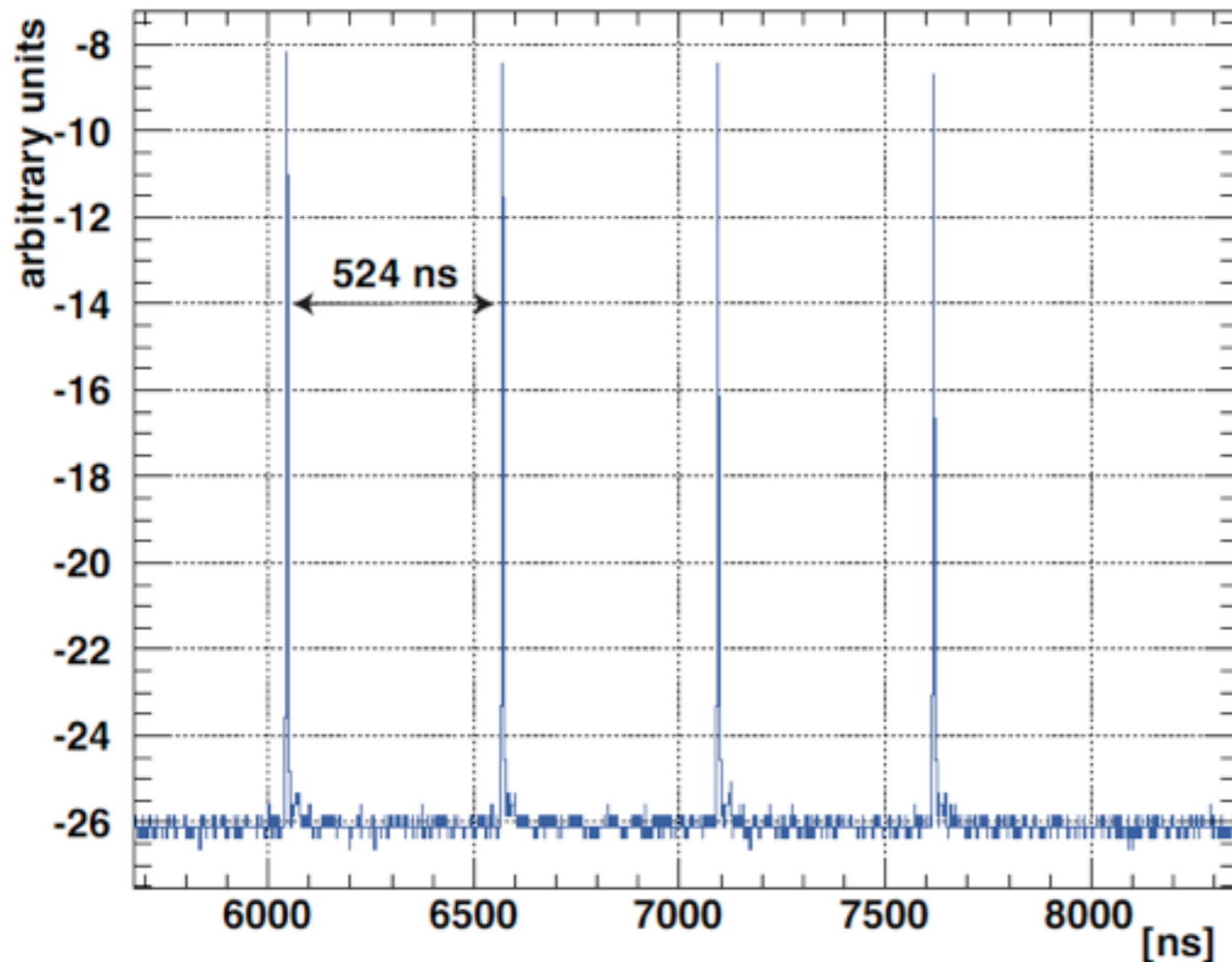
- September 2011: Opera beobachtet, dass die Neutrinos 60 ns zu schnell sind (bei einem Fehler von gut 10 ns).

Technik: “Kanten” der Neutrino-Verteilungen in Opera, relativ zum Proton-Puls am CERN - Statistische Methode, mögliche Unsicherheiten durch Strahl-Fokussierung (Zeitstruktur des Neutrino-Pluses)



# Die Bestätigung

- Neue Messungen mit gepulstem Strahl, Strahlpulse 3 ns FWHM - Direkte Messung!



Bestätigt ursprüngliches Ergebnis:  
Strahlstruktur als Ursache  
ausgeschlossen

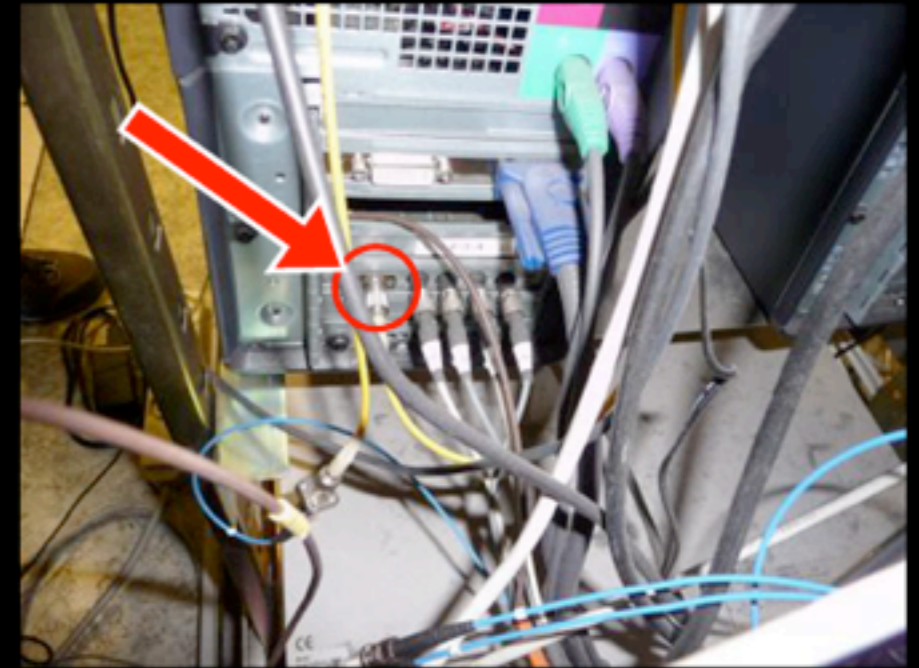
Fehler jetzt nur 4 ns (bei 60 ns  
“Signal”)

... aber Achtung: Für Signal-Laufzeiten in der Elektronik gibt es Korrekturen von 40  $\mu\text{s}$ !



# Die Auflösung

- Wie viele erwartet hatten: Es war ein Messfehler: Ein Glasfaser-Kabel des Timing-Systems war nicht richtig eingesteckt - Dadurch langsamerer Signalanstieg an der entsprechenden Photo-Diode, die Uhr geht etwas nach, voila...



6 December 2011

G. Sirri - INFN BOLOGNA

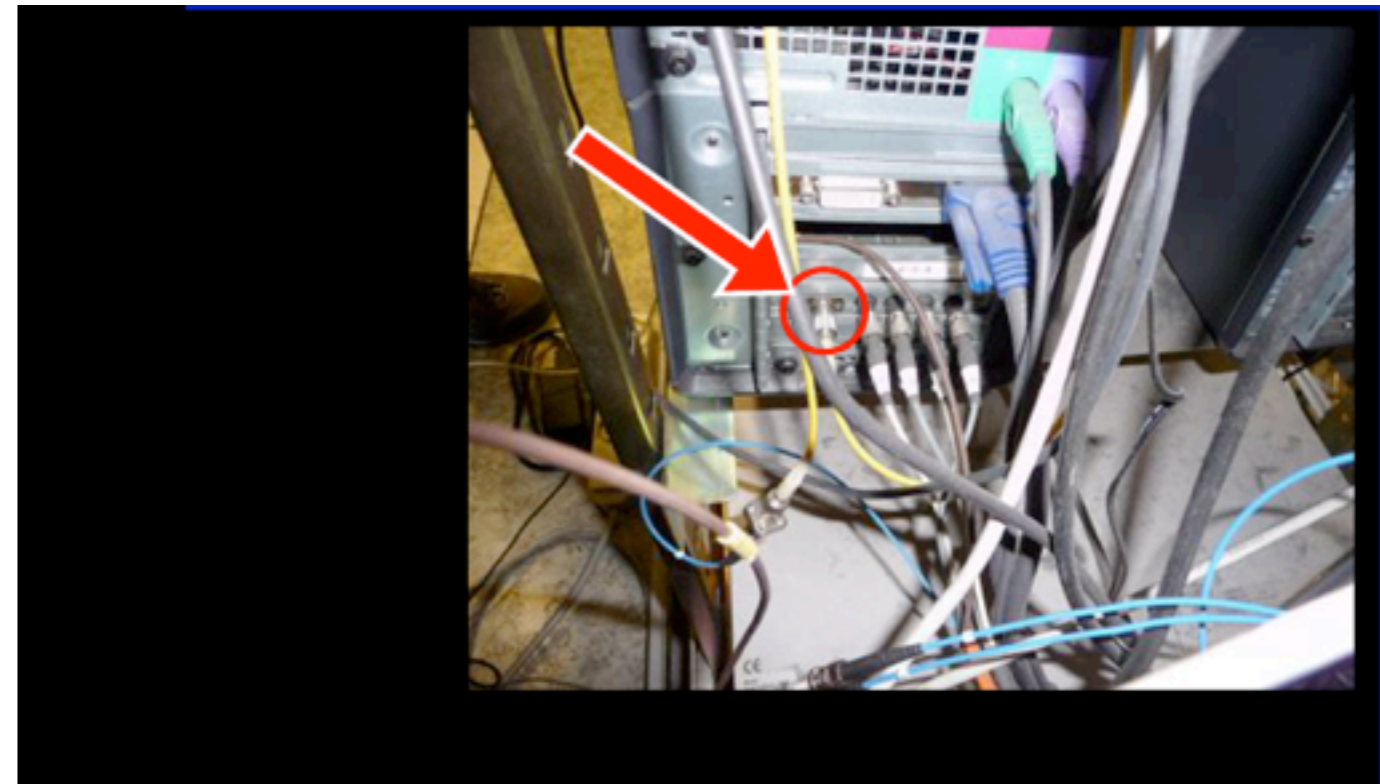


14 December 2011

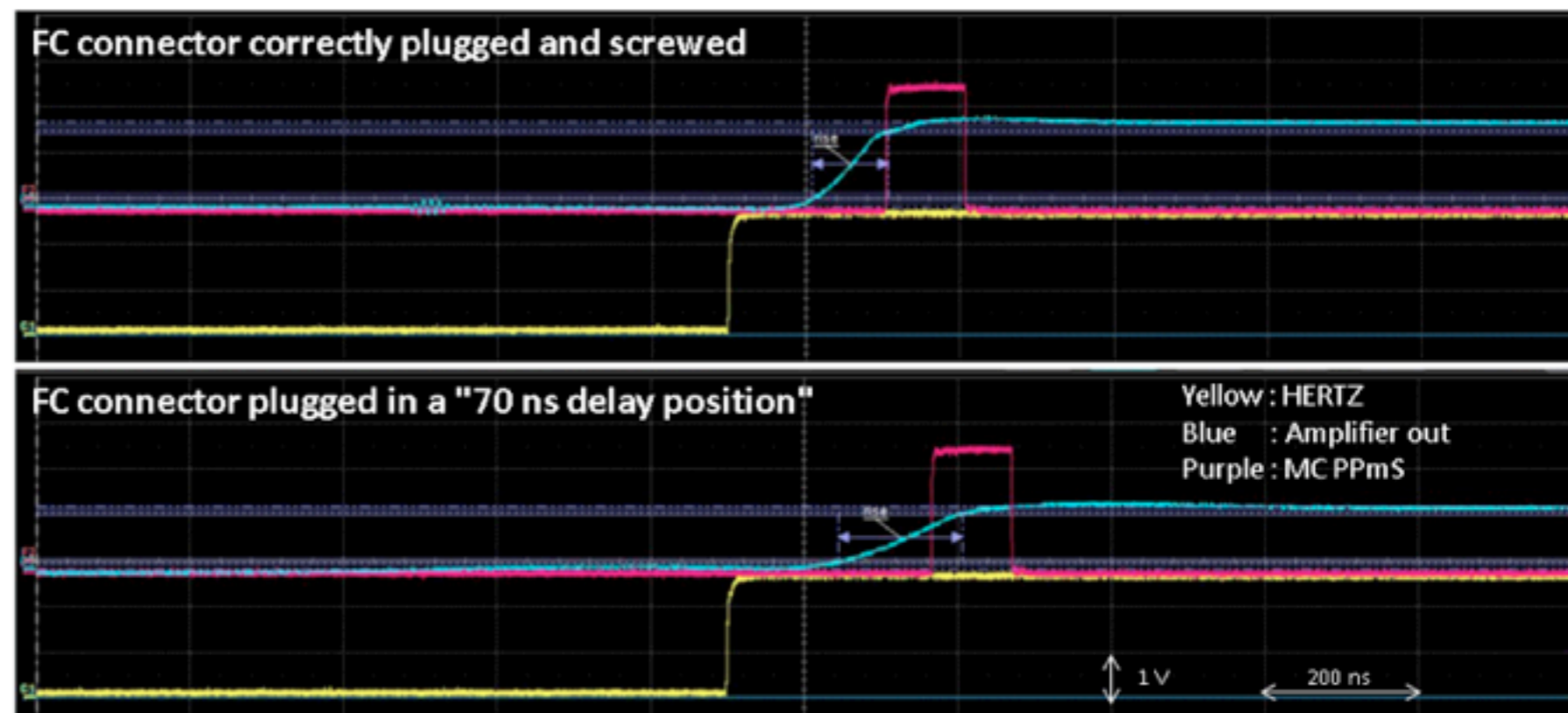
8

# Die Auflösung

- Wie viele erwartet hatten: Es war ein Messfehler: Ein Glasfaser-Kabel des Timing-Systems war nicht richtig eingesteckt - Dadurch langsamerer Signalanstieg an der entsprechenden Photo-Diode, die Uhr geht etwas nach, voila...

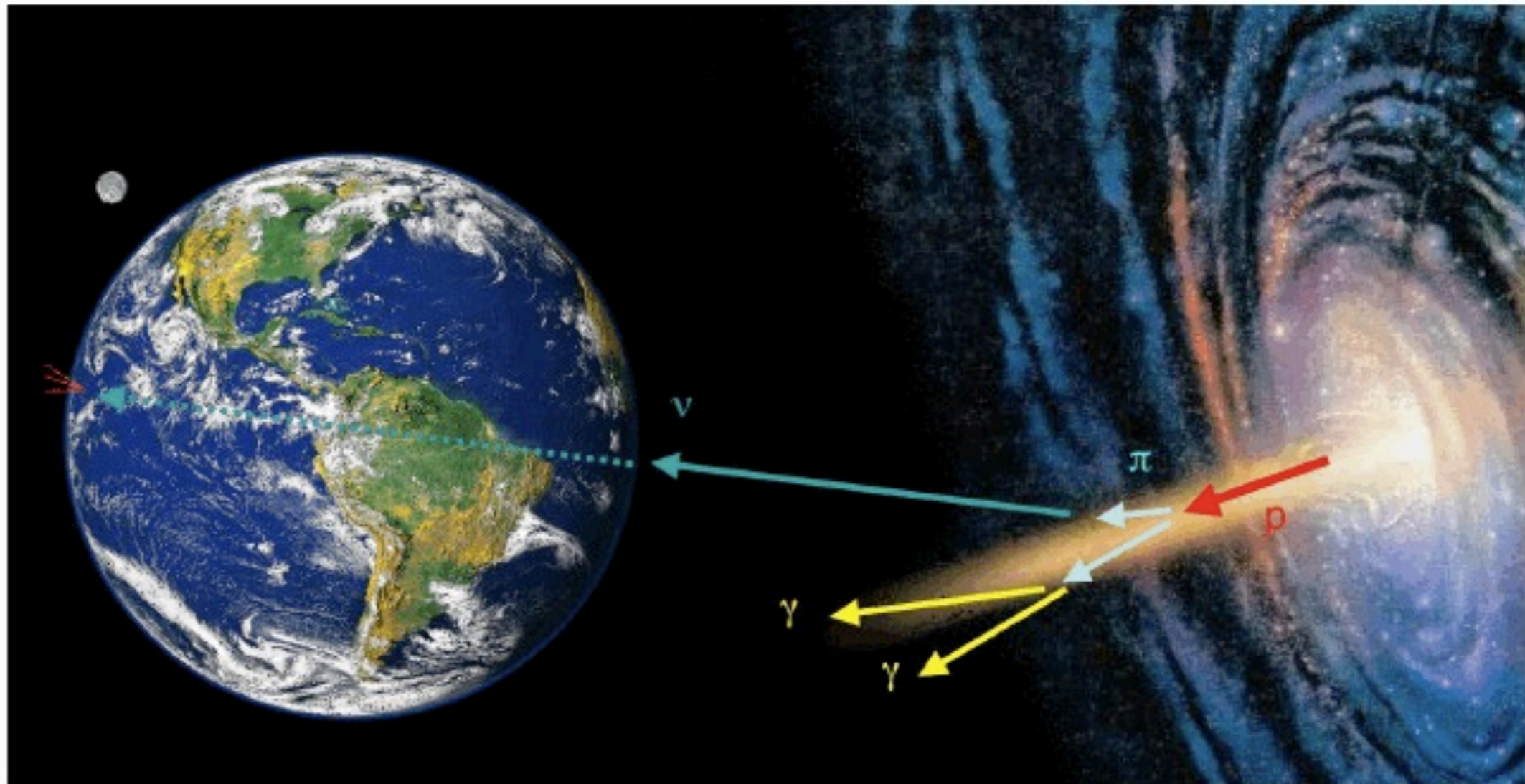


Jetzt: Die Flugzeit ist genau richtig, innerhalb von wenigen ns!



# Kosmische Neutrinos

- Wenige Ereignisse:
  - Riesige Detektoren notwendig
  - Extrem gute Abschirmung: Die ganze Erde
    - geht nicht bei ganz hohen Energien: Neutrino-WQ steigt mit der Energie, ab  $\sim 100$  TeV werden Neutrinos von der Erde absorbiert



# Supernova-Neutrinos

- Bis jetzt das einzige Neutrino-Signal extraterrestrischen Ursprungs, das zweifelsfrei nachgewiesen wurde!

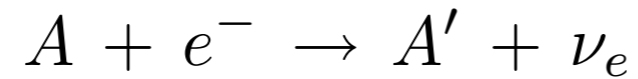
Neutrinos aus dem Core-Collaps eines Sternes:

Neutrinos sind erst einmal das einzige, was nach aussen dringen kann, alles andere wird im dichten, kollabierenden Material absorbiert: Das Neutrino-Signal kommt vor dem optischen Signal der SN auf der Erde an!

- ▶ Es werden alle Neutrino-Flavors in grosser Zahl produziert
- ▶ Ein Grossteil der Gravitationsenergie des Sterns wird mit Neutrinos abgestrahlt, die Energien liegen im Bereich von einigen 10 MeV

# Neutrinos aus Supernovae: Reaktionen

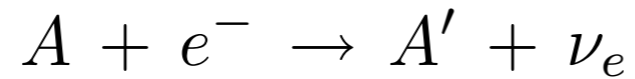
- Bildung eines Neutronensterns durch “Absorption” der Elektronen der Atomhülle



passiert in den ersten Phasen des Kollapses, die Neutrinos können ungehindert entweichen, aber das ist nur ein kleiner Anteil der insgesamt abgestrahlten Neutrinos: ca.  $10^{57}$  Neutrinos aus der Neutronisation / Deleptonisation

# Neutrinos aus Supernovae: Reaktionen

- Bildung eines Neutronensterns durch “Absorption” der Elektronen der Atomhülle

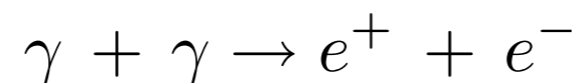


passiert in den ersten Phasen des Kollapses, die Neutrinos können ungehindert entweichen, aber das ist nur ein kleiner Anteil der insgesamt abgestrahlten Neutrinos: ca.  $10^{57}$  Neutrinos aus der Neutronisation / Deleptonisation

Der Neutronenstern akkretiert Material, das extrem aufgeheizt wird:

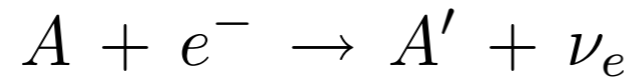
Gravitationsenergie wird in thermische Energie umgewandelt

⇒ Thermische Erzeugung von Elektronen:



# Neutrinos aus Supernovae: Reaktionen

- Bildung eines Neutronensterns durch “Absorption” der Elektronen der Atomhülle

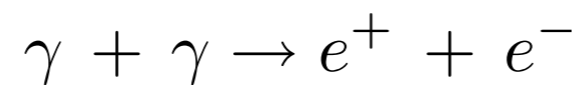


passiert in den ersten Phasen des Kollapses, die Neutrinos können ungehindert entweichen, aber das ist nur ein kleiner Anteil der insgesamt abgestrahlten Neutrinos: ca.  $10^{57}$  Neutrinos aus der Neutronisation / Deleptonisation

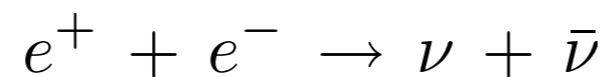
Der Neutronenstern akkretiert Material, das extrem aufgeheizt wird:

Gravitationsenergie wird in thermische Energie umgewandelt

⇒ Thermische Erzeugung von Elektronen:

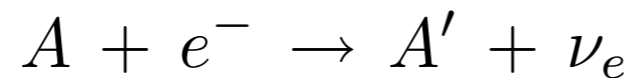


⇒ Erzeugung Neutrinos aller Flavors:



# Neutrinos aus Supernovae: Reaktionen

- Bildung eines Neutronensterns durch “Absorption” der Elektronen der Atomhülle

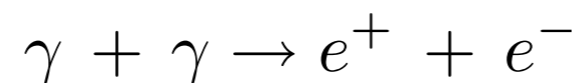


passiert in den ersten Phasen des Kollapses, die Neutrinos können ungehindert entweichen, aber das ist nur ein kleiner Anteil der insgesamt abgestrahlten Neutrinos: ca.  $10^{57}$  Neutrinos aus der Neutronisation / Deleptonisation

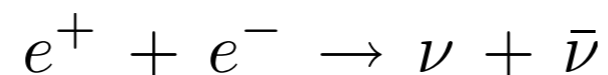
Der Neutronenstern akkretiert Material, das extrem aufgeheizt wird:

Gravitationsenergie wird in thermische Energie umgewandelt

⇒ Thermische Erzeugung von Elektronen:



⇒ Erzeugung Neutrinos aller Flavors:



**99% der gesamten Gravitationsenergie wird als Neutrinos emittiert!**

**Insgesamt ca.  $10^{58}$  Neutrinos!**



# Eine alte Bekannte: Supernova SN1987a

- Supernova-Explosion 1987 in der grossen Magelanschen Wolke (kleine Partnergalaxie der Milchstrasse)

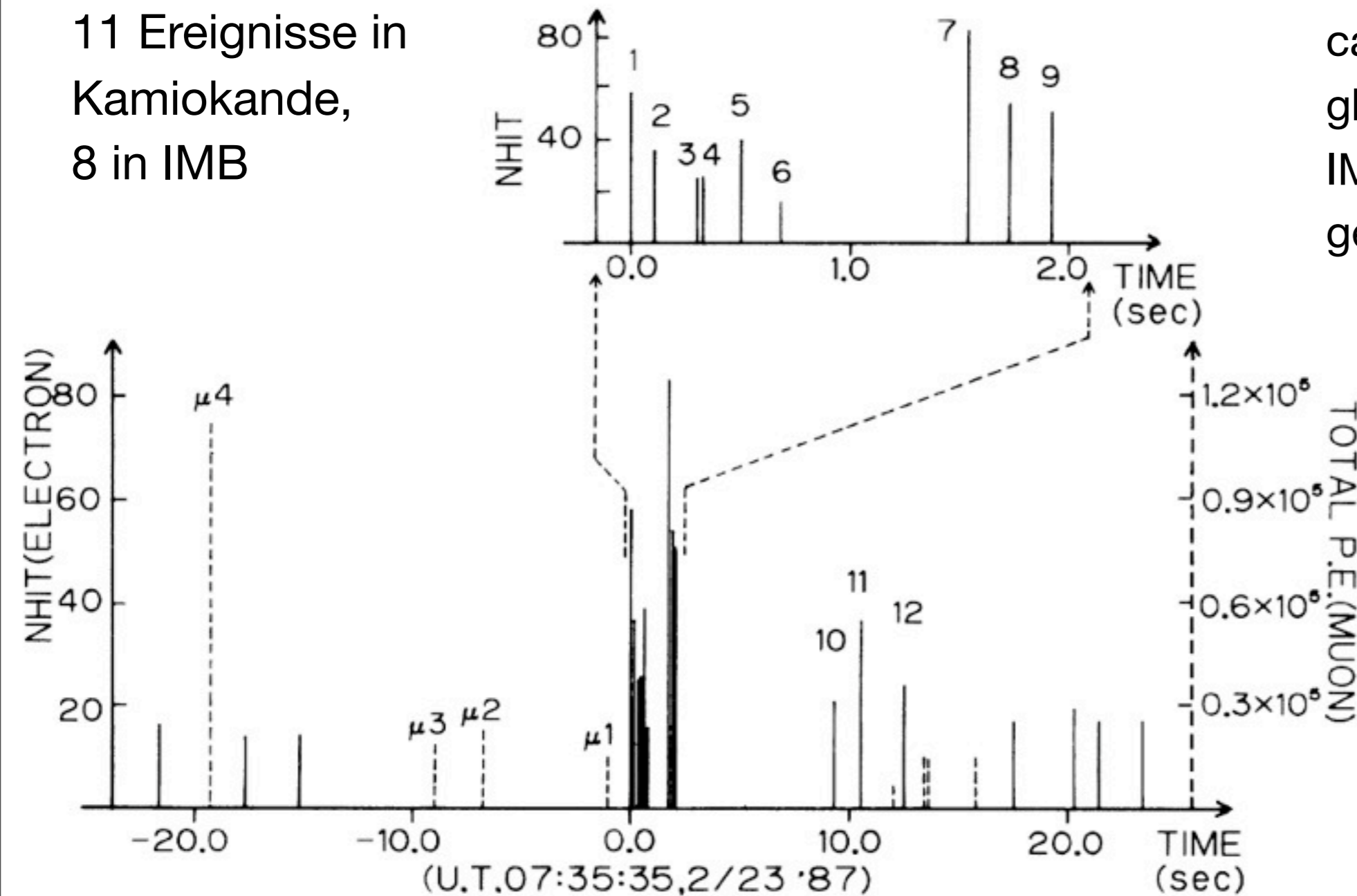


# Kamiokande Signal

- Das einzige bisher nachgewiesene extraterrestrische Neutrinosignal!

11 Ereignisse in Kamiokande, 8 in IMB

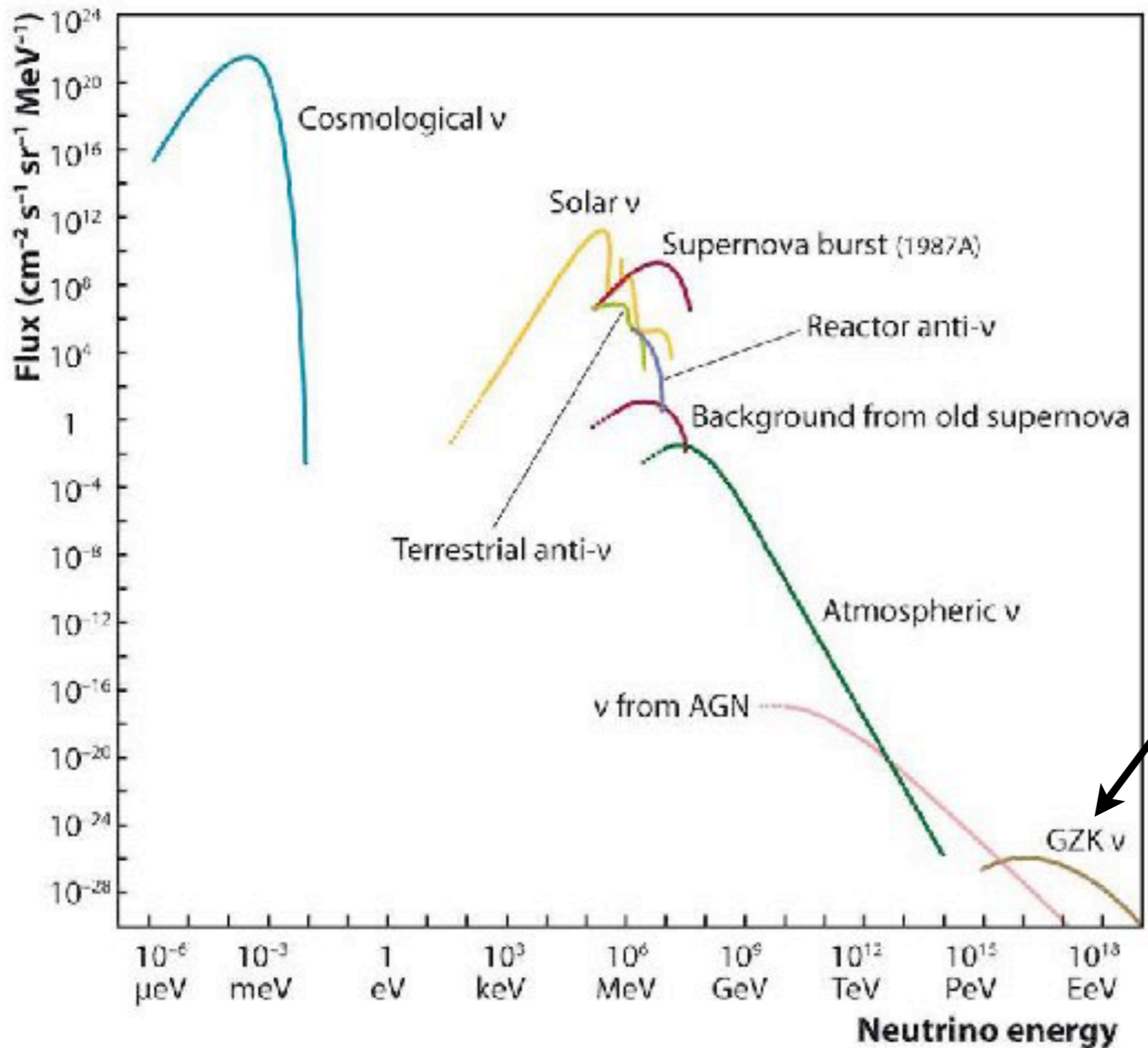
Ein Neutrino-Burst von ca. 10 s Dauer, gleichzeitig auch vom IMB Experiment gesehen



Nur  $\bar{\nu}_e$ : Höchste Nachweiswahrscheinlichkeit, niedrigste Energieschwelle

PRL 58, 1490 (1987)

# Kosmische Neutrinos: Erwartungen



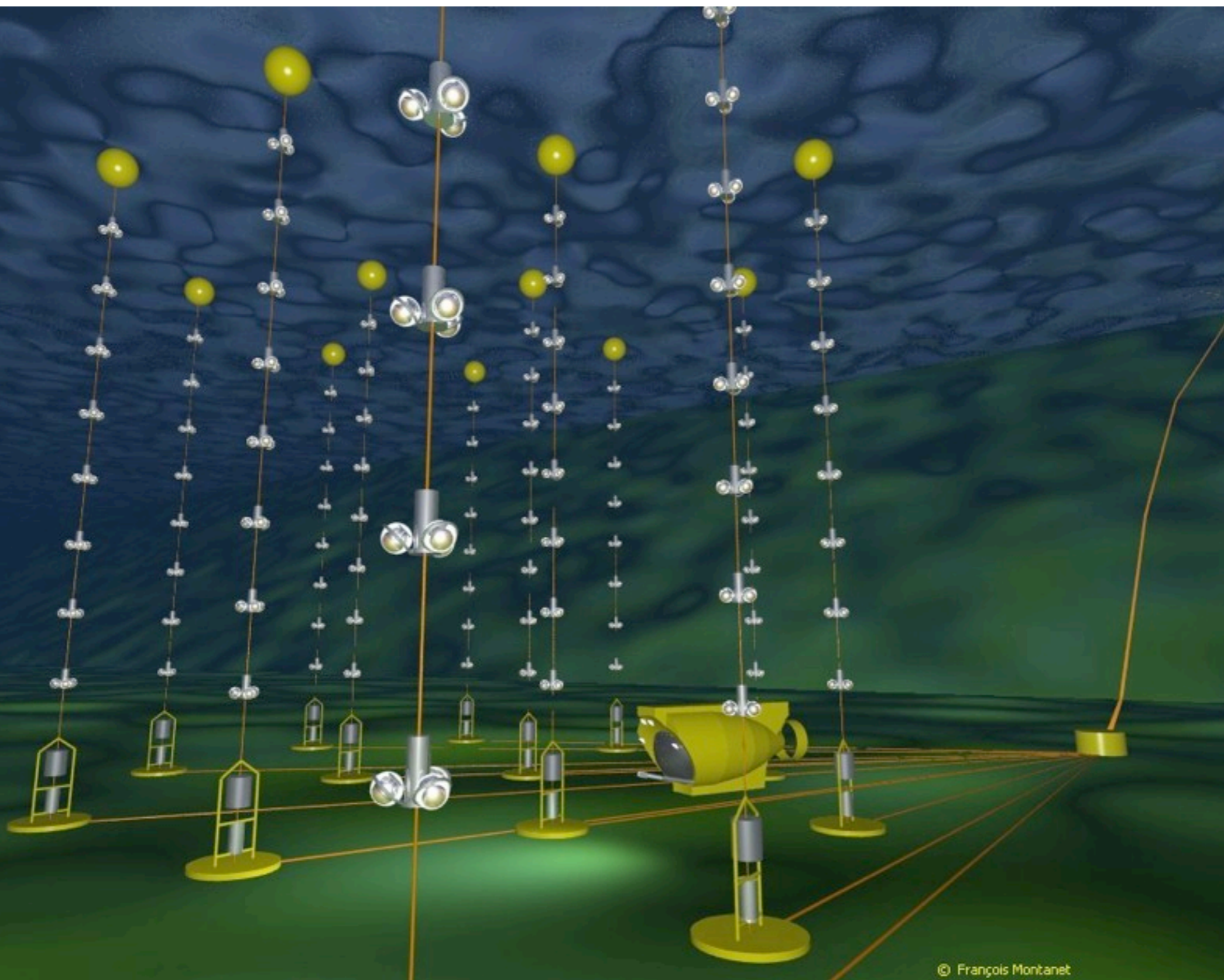
kosmogenische Neutrinos: Erzeugt durch den Zerfall von Pionen aus GZK-Ereignissen: Können Hinweise zu den Quellen der höchstenergetischen Teilchen liefern

eigentlich eine "garantierte" Entdeckung mit genügend Sensitivität...

# Detektoren der Neutrino-Astronomie

- Verschiedene Nachweis-Techniken, je nach Energie und Sensitivität
- Energien im TeV - PeV Bereich:
  - Cherenkov-Detektoren: Starkes Signal, relativ niedrige Energieschwelle, hoher Sensor-Dichte aufgrund von Lichtabsorption nötig
    - Amada/IceCube: Antarktisches Eis als Cherenkov-Medium
    - Antares/Baikal/KM3NeT: Tiefes Meer/See - Wasser als Cherenkov-Medium
- Energien oberhalb von  $10^{17}$  -  $10^{19}$  eV:
  - Optischer Nachweis von Neutrino-induzierten Luftschauern: Auger, EUSO, ...
  - Akustischer Nachweis von Neutrino-induzierten Schauern in Wasser, Eis, Salz:
    - Schallwellen durch Aufheizen des Materials
  - Cherenkov-Radiowellen aus elektromagnetischen Schauern von  $\nu_e$ 
    - hohe Reichweite, bei extremen Energien genug Signal
    - Erste Tests mit RICE im Antarktischen Eis, grössere Sensitivität mit ARIANNA, ARA

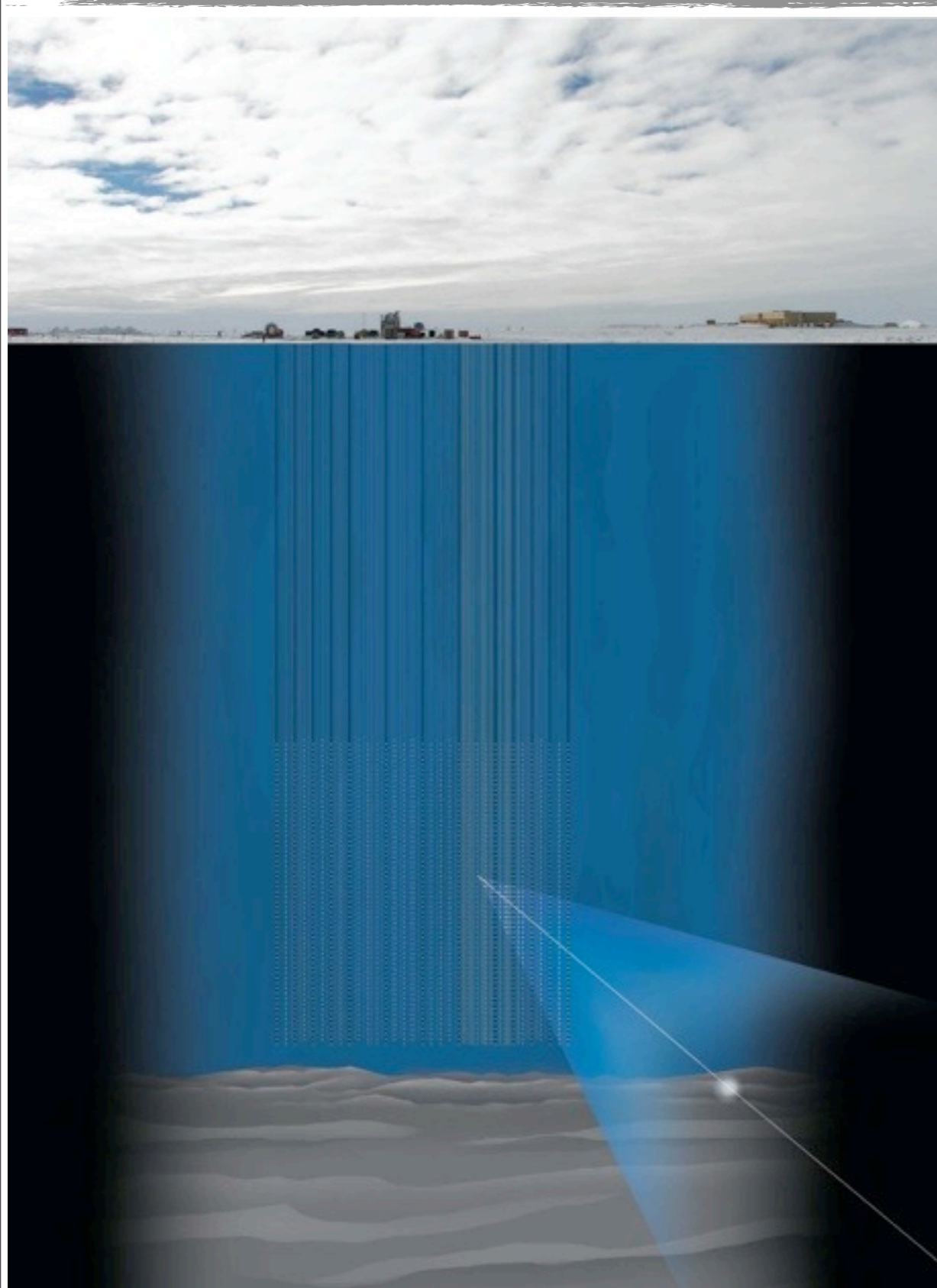
# Antares



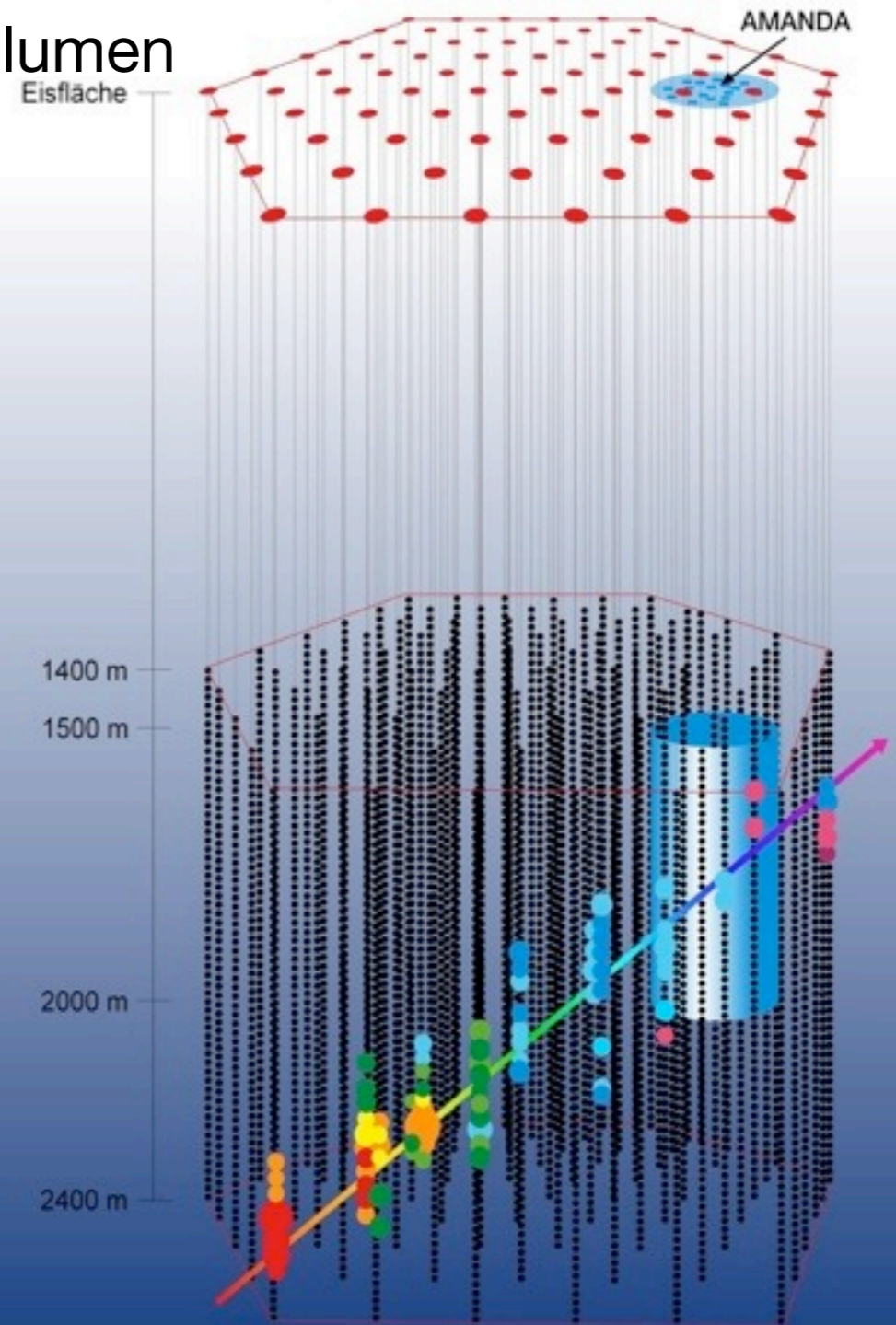
- in 2.5 km Tiefe vor der Küste Südfrankreichs

© François Montanet

# Amanda/IceCube



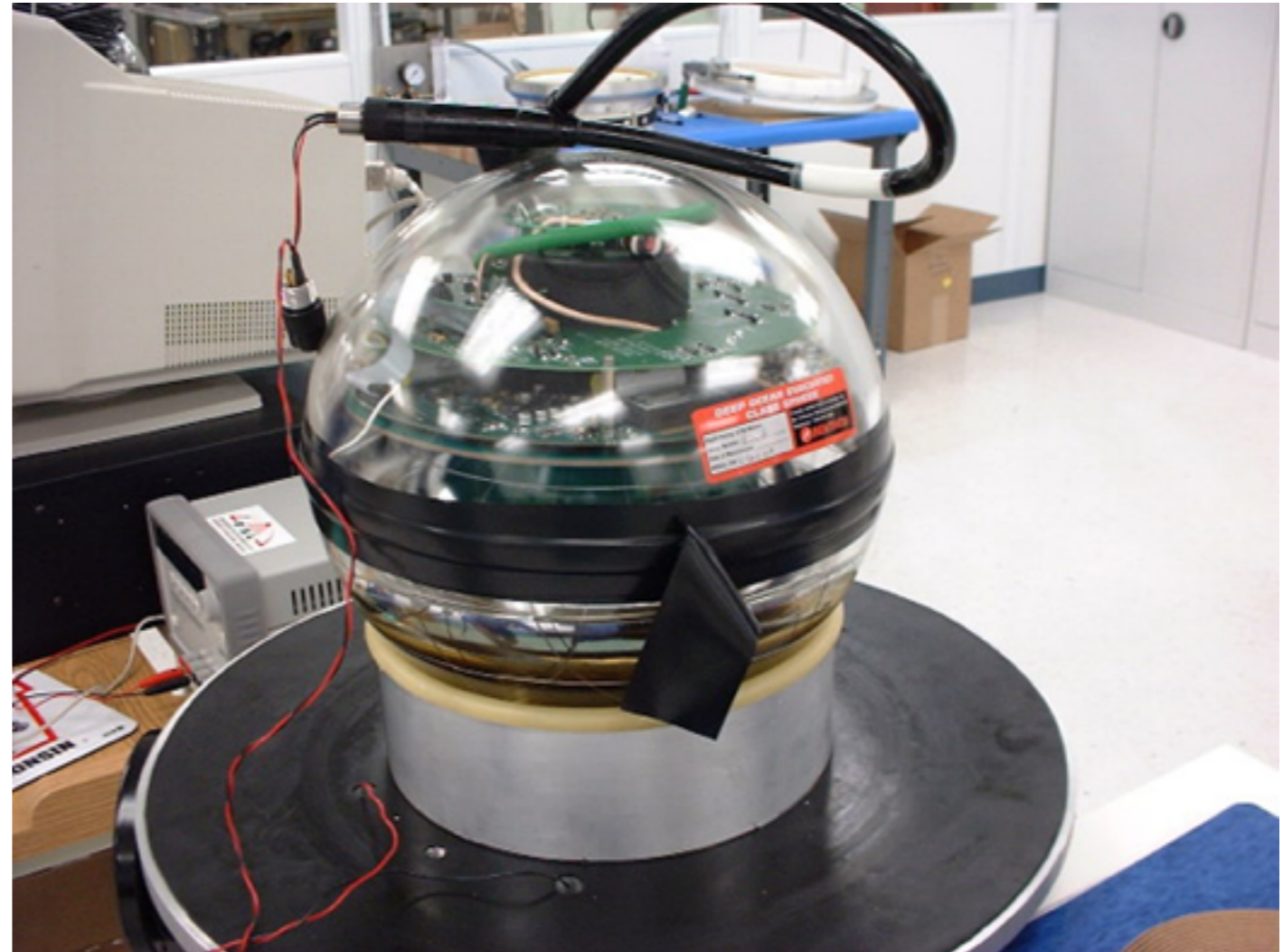
IceCube: 1 km<sup>3</sup> Instrumentiertes  
Volumen



# Amanda/IceCube: Neutrinos am Südpol



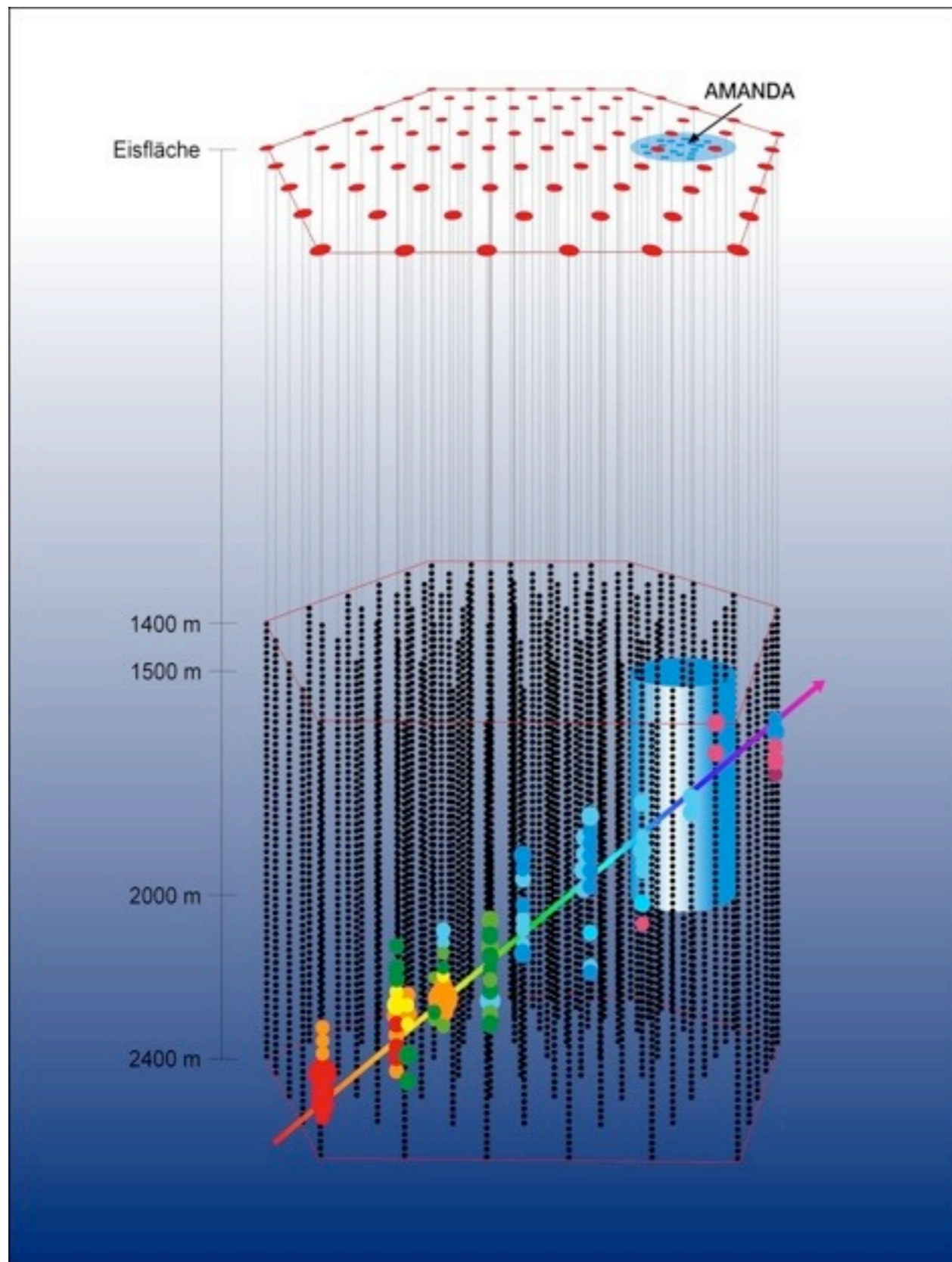
# Amanda/IceCube: Neutrinos am Südpol



- Detektoren für Cherenkov-Licht: DOM (Digital-Optical Module)
- Total: 80 Strings mit je 60 DOMs



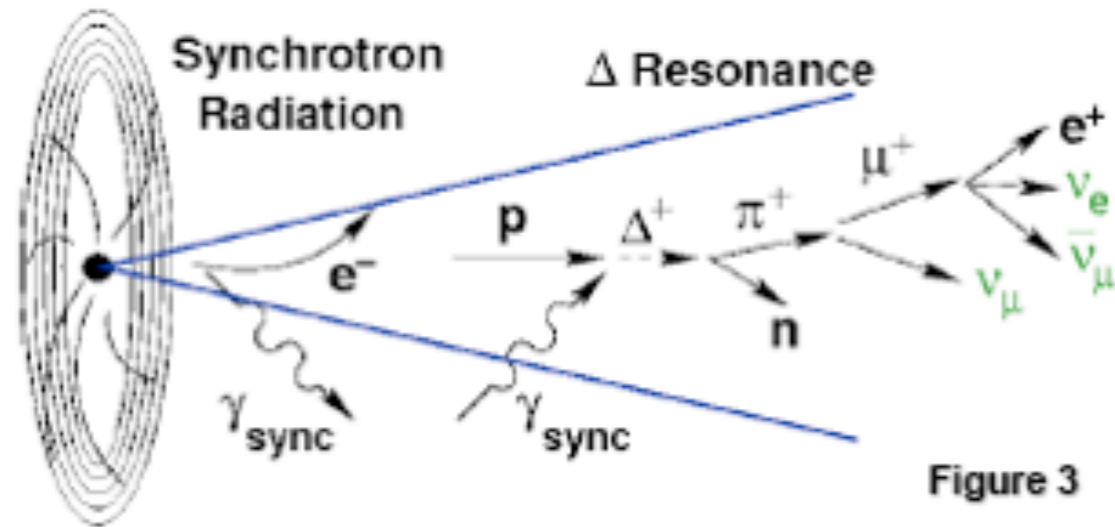
# IceCube-Ereignis



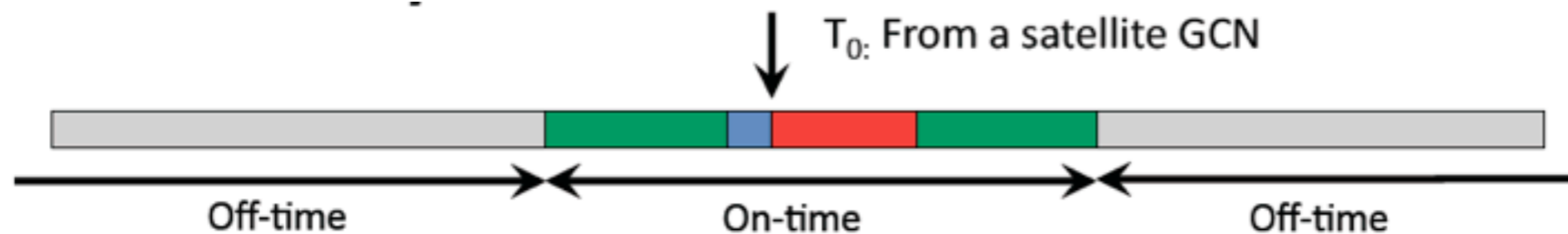
- Ankunftszeiten des Lichts bei den einzelnen Detektoren ermöglicht die Bestimmung der Richtung des Myons und damit der Richtung des Neutrinos

# Neutrinos aus GRBs?

- Von Gamma-Ray-Bursts werden starke Neutrino-Signale erwartet, falls sie wichtige Quellen fuer UHECRs sind



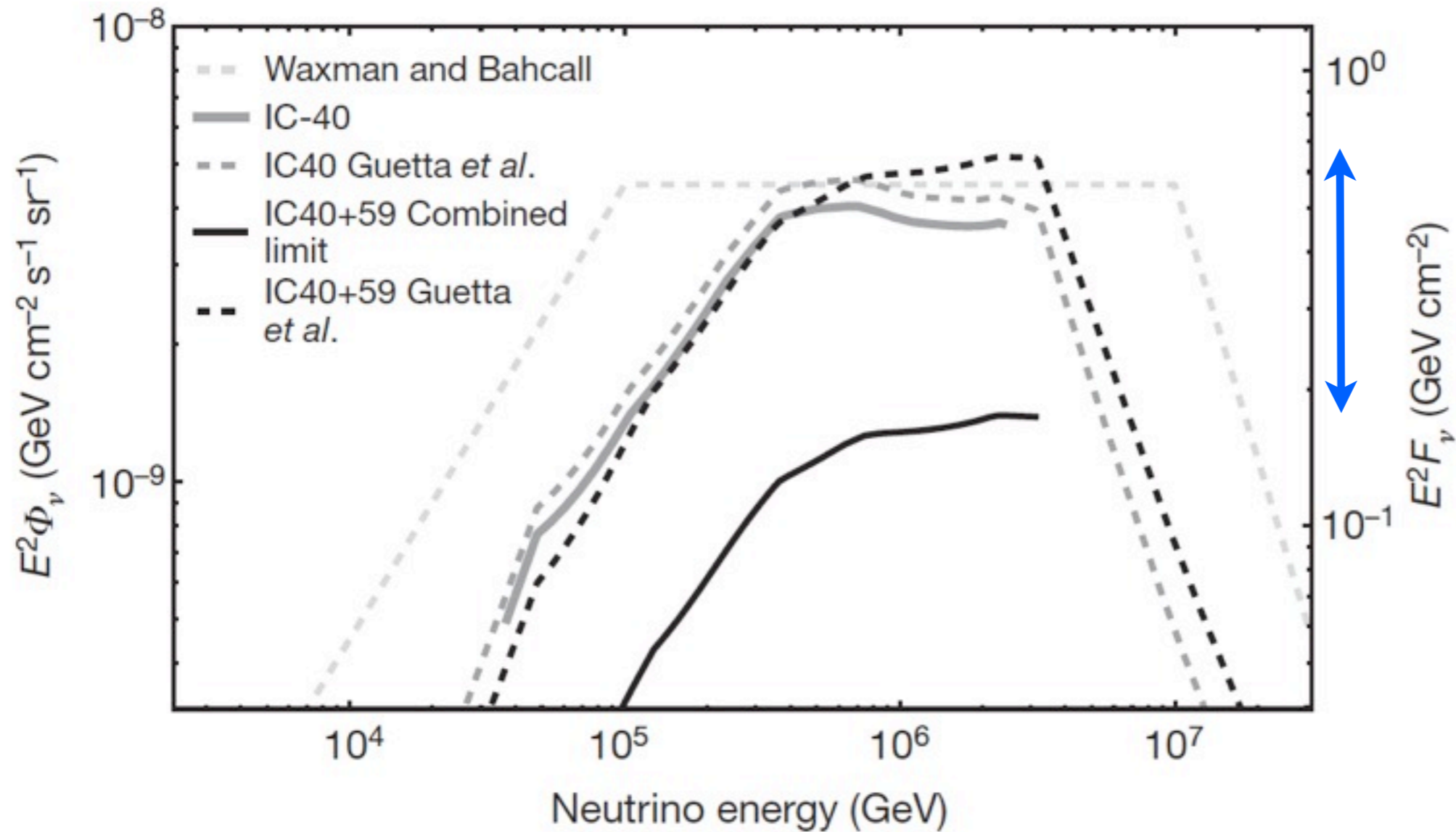
Hochenergetische Neutrinos aus relativistischen Jets



- Precursor (~100 s)
  - Prompt
  - Model Independent (24 h)
  - Background (full year)
- Very low background  
One event can be significant

Satellit liefert "Trigger": Erwartete Ankunftszeit (24 h Fenster, um unabhängiger vom GRB-Modell zu sein)

# Neutrinos aus GRB's?

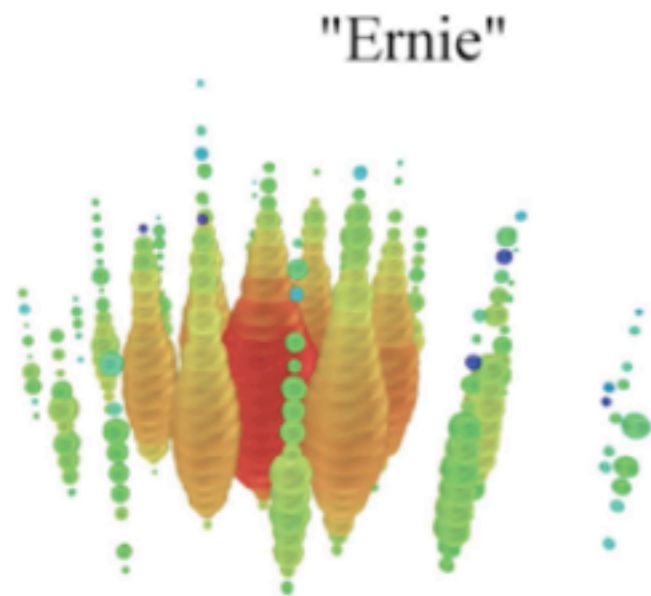


Erreichtes Limit:  
 0.27 der  
 Vorhersage  
 (90% CL)

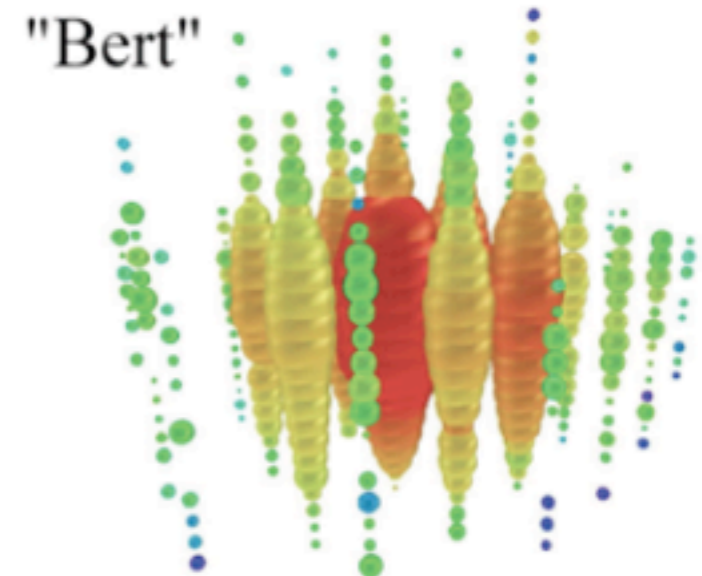
- 105 GRBs im Nord-Himmel fuer IC-59 (117 fuer IC-40)
- Kein einziges Neutrino im Zeitfenster beobachtet, 8.4 erwartet

# Höchste Energien - Erste Beobachtung

- IceCube hat zwei Ereignisse beobachtet:



©2013 Sesame Workshop



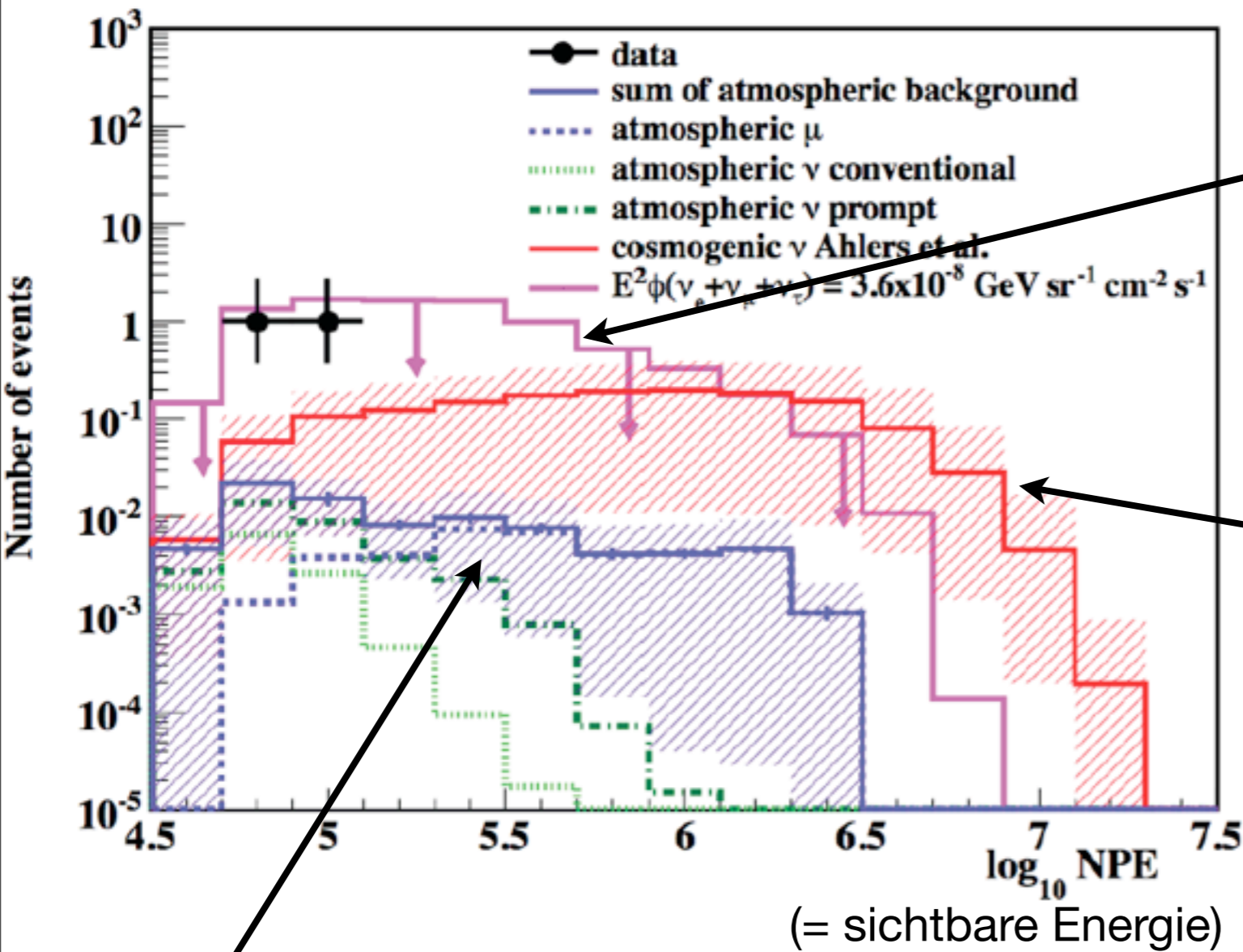
$1.14 \pm 0.17$  PeV

$1.04 \pm 0.16$  PeV

(sichtbare Energie im Detektor, Neutrinoenergie höher)

- Beide Ereignisse sind "down-going" (wie erwartet)
- Myonenbündel aus Luftschauern sind ausgeschlossen

# Höchste Energien - Erste Beobachtung



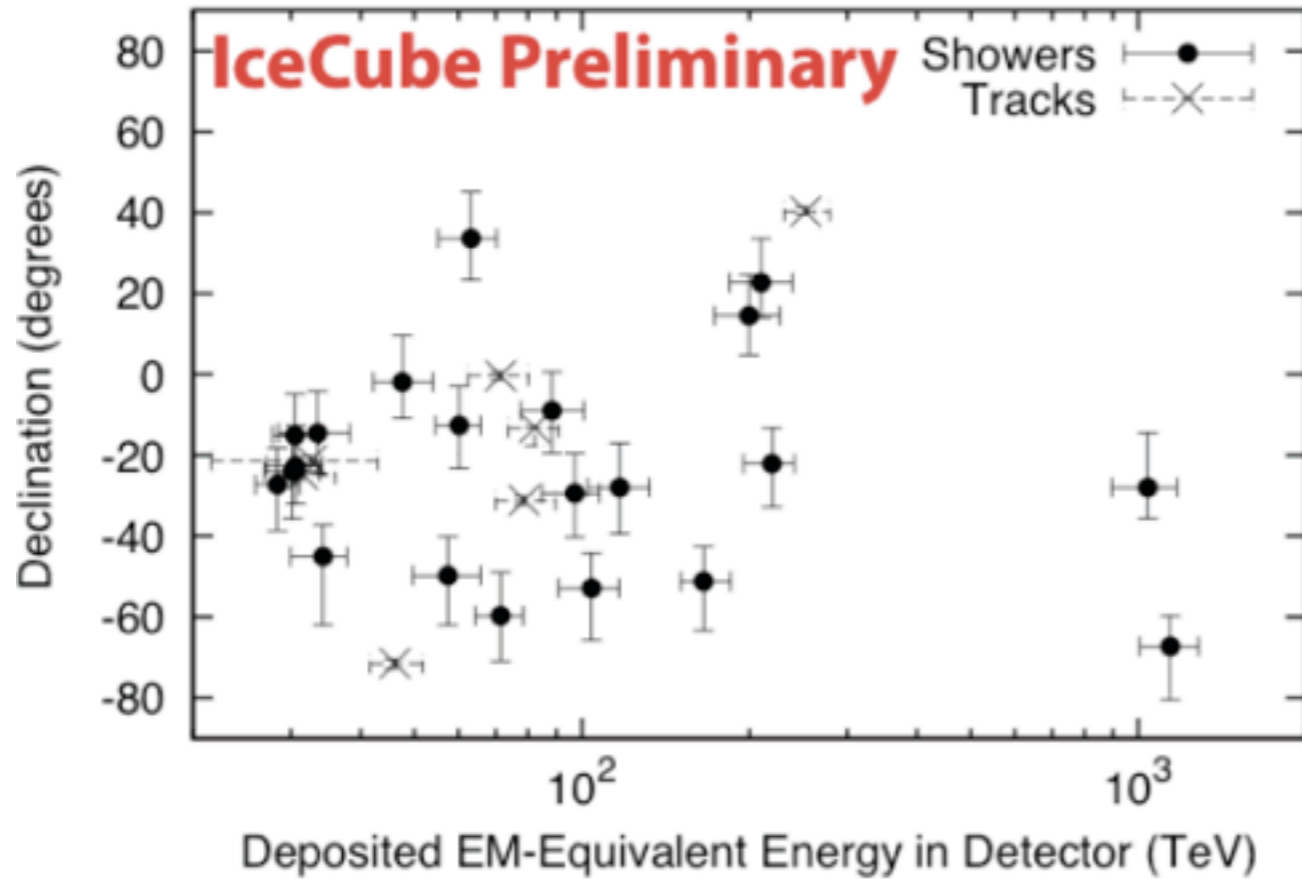
Einfacher  $E^2$  - Fit: Inkonsistent mit Beobachtung, da dann  $\sim 8$  Neutrinos im PeV Bereich und darüber gesehen worden wären

Erwartung für GZK-Neutrinos: Inkonsistent mit Beobachtung, die Rate ist zu hoch

Atmosphärischer Untergrund: Kann es nicht sein (mit  $\sim 3 \sigma$  ausgeschlossen)

Die Herkunft dieser Neutrinos ist unklar!

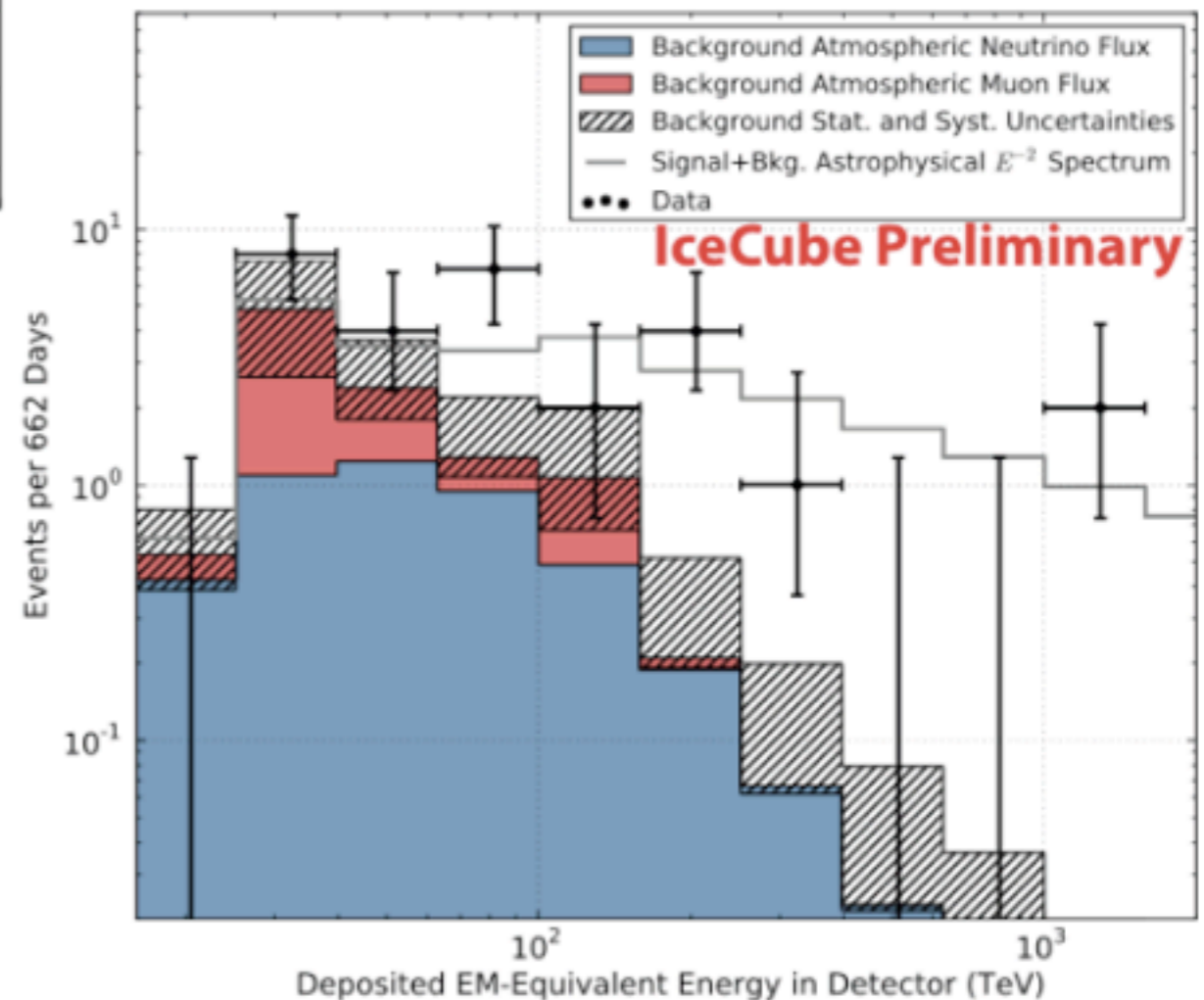
# Höchste Energien - Erste Beobachtung



Note:

- a) "EM-equivalent energy" underestimates the E of  $\nu_x$  NC and  $\nu_\tau$  CC interactions
- b) Energy gap is not statistically significant
- c) For showers  $\sigma(E) \sim 10\%$  &  $\sigma(\varphi) \sim 10^\circ - 15^\circ$

- Verbesserte Analyse mit niedrigerer Energieschwelle:
  - Deutliches Signal über den erwarteten Untergrund hinaus
  - Die Ereignisse kommen von oben, wie erwartet - Noch kein Hinweis auf Quellen



# Zusammenfassung

- Neutrino-Oszillationen wurden mit atmosphärischen Neutrinos (und auch Solaren Neutrinos) nachgewiesen: Neutrinos haben Masse!
- Beschleuniger-Experimente bestätigen die Beobachtungen mit atmosphärischen Neutrinos, Reaktor-Experimente bestätigen die solaren Messungen
- Beschleuniger-Messungen zu  $\theta_{13}$  stimmen mit Reaktor-Beobachtungen überein,  $\theta_{13}$  sehr deutlich von Null verschieden: Möglichkeit zur CP-Verletzung, Untersuchung mit mehr Daten und neuen Experimenten
- Erstes extraterrestrisches Signal: SN1987A
- Bis jetzt wurden noch keine Punktquellen für hochenergetische Neutrinos identifiziert, aber bereits interessante hochenergetische Ereignisse gesehen
- ▶ Verbesserte Präzision in allen Bereichen mit aktuell laufenden und zukünftigen Experimenten erwartet!

# Zusammenfassung

- Neutrino-Oszillationen wurden mit atmosphärischen Neutrinos (und auch Solaren Neutrinos) nachgewiesen: Neutrinos haben Masse!
- Beschleuniger-Experimente bestätigen die Beobachtungen mit atmosphärischen Neutrinos, Reaktor-Experimente bestätigen die solaren Messungen
- Beschleuniger-Messungen zu  $\theta_{13}$  stimmen mit Reaktor-Beobachtungen überein,  $\theta_{13}$  sehr deutlich von Null verschieden: Möglichkeit zur CP-Verletzung, Untersuchung mit mehr Daten und neuen Experimenten
- Erstes extraterrestrisches Signal: SN1987A
- Bis jetzt wurden noch keine Punktquellen für hochenergetische Neutrinos identifiziert, aber bereits interessante hochenergetische Ereignisse gesehen
- ▶ Verbesserte Präzision in allen Bereichen mit aktuell laufenden und zukünftigen Experimenten erwartet!

Nächste Vorlesung: 08.07., “Präzisionsexperimente”, S. Bethke