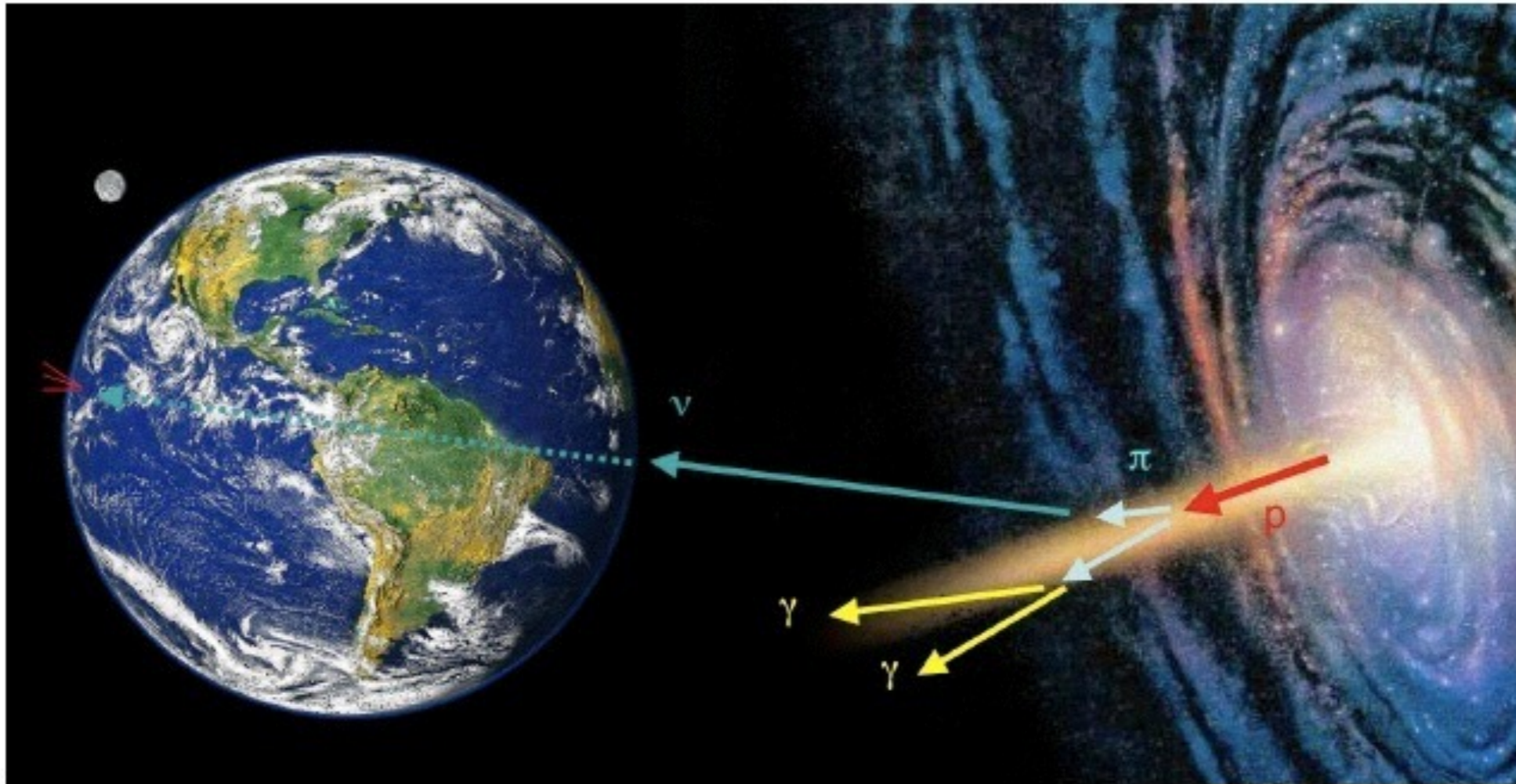


# Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



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

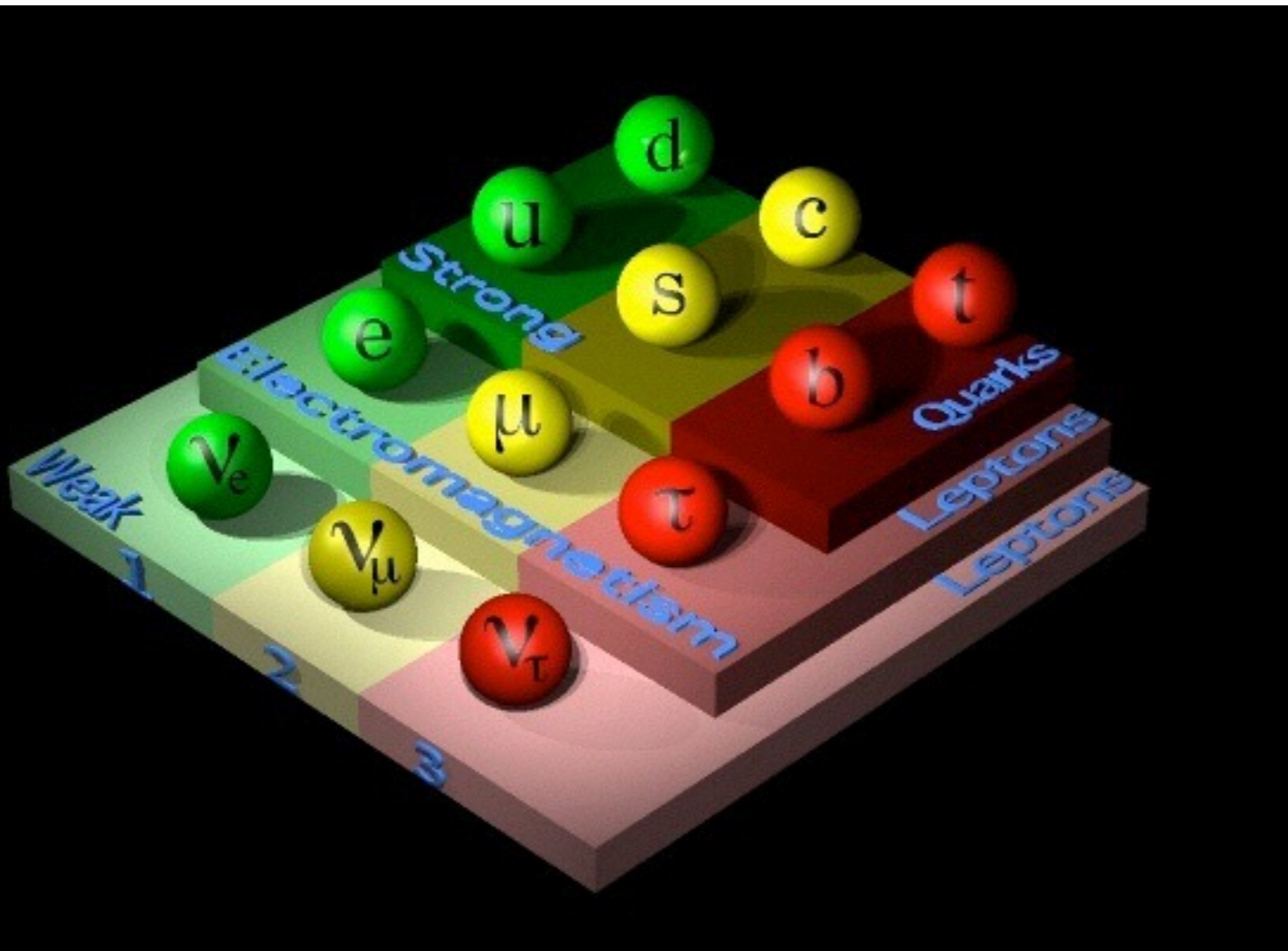
29.06.2015



# Neutrinos: Zeitleiste

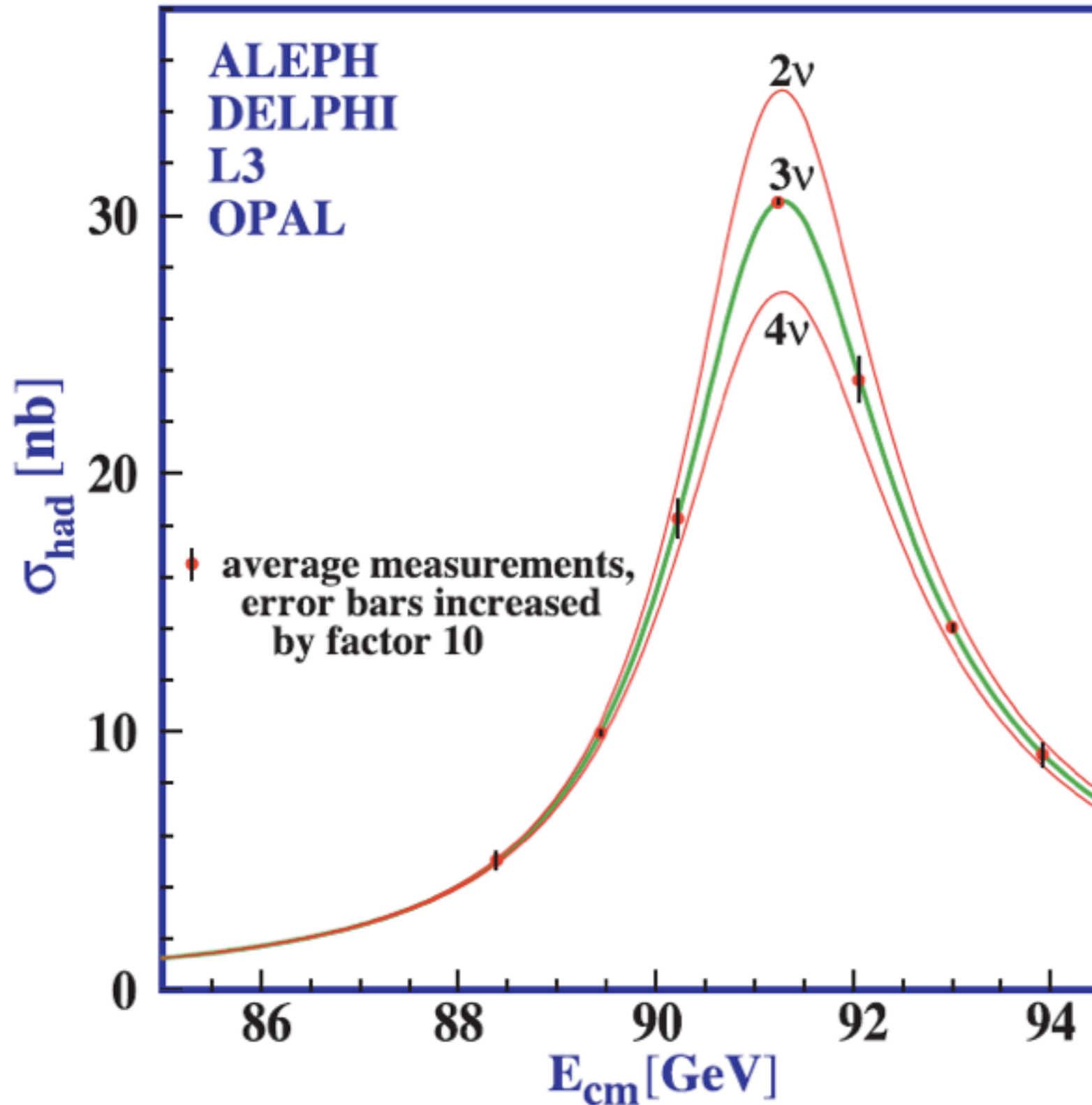
- 1931 W. Pauli postuliert Existenz des Neutrinos in  $\beta$ -Zerfall
- 1934 E. Fermi stellt Theorie des  $\pi$ -Zerfalls vor (inkl. Neutrino)
- 1959 Entdeckung des  $\nu_e$  (Reines und Cowan; Nobelpreis 1995)
- 1962 Entdeckung des  $\nu_\mu$
- 1968 Erste Messung der Sonnenneutrinos ( $\nu_e$ ): weniger als 50% der erwarteten Intensität („solares Neutrino-Problem“)
- 1987 Kamiokande und IMB (Protonzerfallsexperimente) sehen Neutrinos von SN 1987a
- 1988 Kamiokande sieht nur 60% der erwarteten atmosphärischen  $\nu_\mu$
- 1990 LEP-Experimente beweisen Existenz von genau 3 Generationen leichter Neutrinos
- 1998 Super-Kamiokande zeigt Evidenz für Neutrino-Oszillationen ( $\nu_\mu$ ), -> Neutrinos haben endliche Masse (Nobelpreis an Koshiba 2002)
- 2000 explizite Bestätigung und Beobachtung des  $\nu_\tau$
- 2001 Bestätigung des solaren  $\nu_e$  Defizits und der Neutrino-Oszillationen durch SNO
- 2011 Erste Hinweise auf von Null verschiedenes  $\Theta_{13}$  durch T2K & MINOS
- 2012 Beobachtung von PeV - Neutrinos bei IceCube

# Neutrinos: Allgemein



- 3 bekannte Familien von Elementarteilchen:
  - 3 Neutrinos als Partner zu den geladenen Leptonen
  - Im einfachen Standard-Modell sind Neutrinos masselos
  - Experimentelle Grenzen:  
 $M(\nu_e) < 2 \text{ eV}$   
 $M(\nu_\mu) < 0.19 \text{ MeV}$   
 $M(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV}$

# Zahl der Neutrinos



- Aus Präzisions-Messungen der  $Z^0$  - Resonanz an LEP:
- 3 leichte Neutrinos (leichter als  $\sim 45$  GeV), die der schwachen Wechselwirkung unterliegen

# Neutrino-Quellen

- **Solare Neutrinos**

(Entstehen bei den Fusionsreaktionen in der Sonne), ca  $2 \times 10^{38}$  /s,  
Fluss auf der Erde  $\sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- **Kosmische Hintergrundneutrinos**

Ausfrieren aus thermischen Gleichgewicht  $\sim 1\text{s}$  nach dem Urknall  
Temperatur  $\sim 1.9 \text{ K}$ ,  $\langle E \rangle \sim 5 \times 10^{-4} \text{ eV}$ ,  $\sim 330/\text{cm}^3$

- **Kosmische Neutrinoquellen**

Supernova-Explosionen, Aktive Galaxien, GRBs...

- **Atmosphärische Neutrinos**

Entstehung in Luftschauern kosmischer Strahlung

- **Geo-Neutrinos**

Radioaktiver Zerfall in der Erde, Gesamt-Leistung  $\sim 20 \text{ TW}$ , Fluss  $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- **Von Menschen erzeugte Neutrinos**

Reaktor-Neutrinos (MeV-Bereich), Beschleuniger (MeV  $\rightarrow$  GeV)

# Neutrinos: Allgemein

---

- Neutrinos sind speziell: Sie wechselwirken nur durch die schwache Wechselwirkung
  - Maximale Paritätsverletzung der schwachen WW bedeutet:  
Neutrinos sind immer linkshändig (Helizität  $-1$ )  
Anti-Neutrinos sind immer rechtshändig (Helizität  $+1$ )

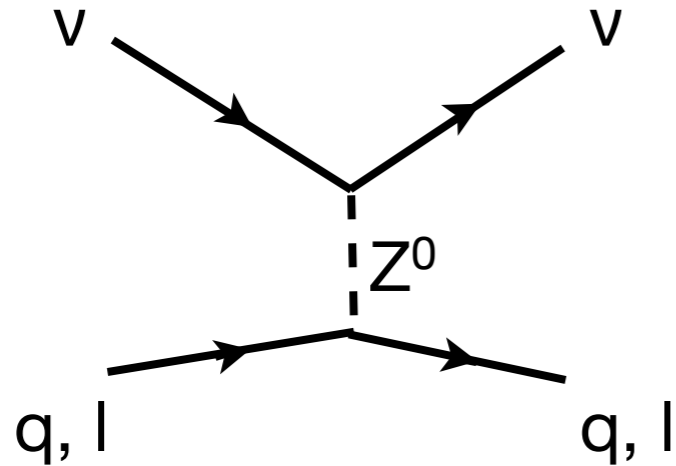
# Neutrinos: Allgemein

---

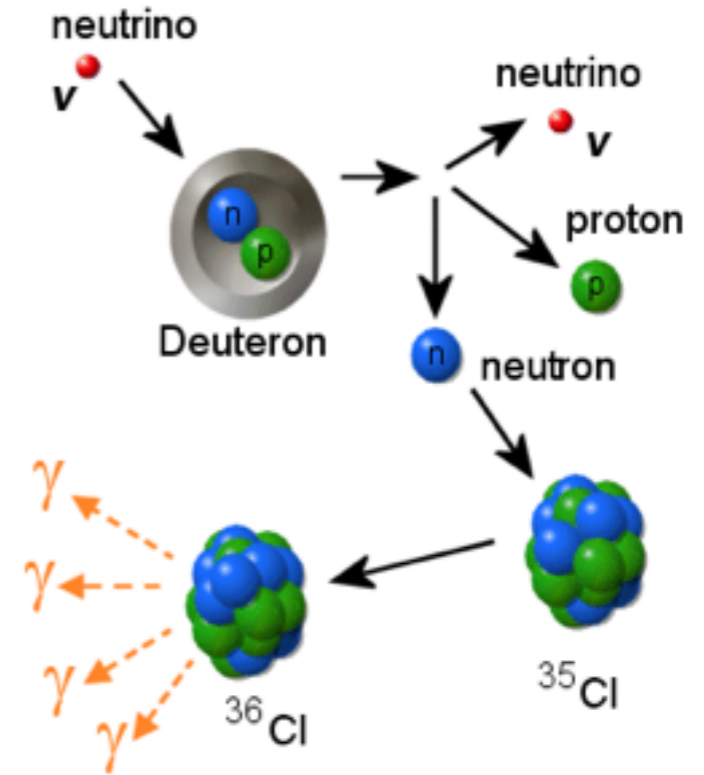
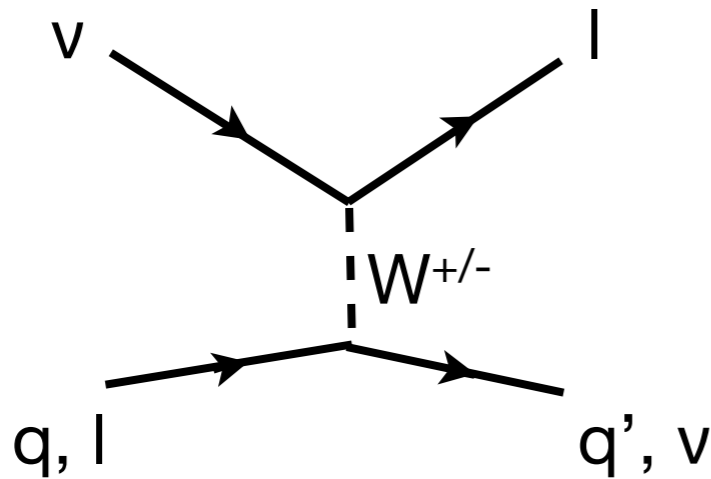
- Neutrinos sind speziell: Sie wechselwirken nur durch die schwache Wechselwirkung
  - Maximale Paritätsverletzung der schwachen WW bedeutet:  
Neutrinos sind immer linkshändig (Helizität  $-1$ )  
Anti-Neutrinos sind immer rechtshändig (Helizität  $+1$ )
- Mögliche Konsequenz:
  - Neutrinos könnten ihre eigenen Anti-Teilchen sein, sog. Majorana-Teilchen
    - Ein Neutrino wäre dann ein linkshändiges Majorana-Neutrino, ein Anti-Neutrino ein rechtshändiges Majorana-Neutrino
    - ▶ Die Unterscheidung, ob Neutrinos Majorana-Teilchen sind oder nicht ist nur möglich, wenn Neutrinos Masse haben

# Neutrinos: Wechselwirkung mit Materie

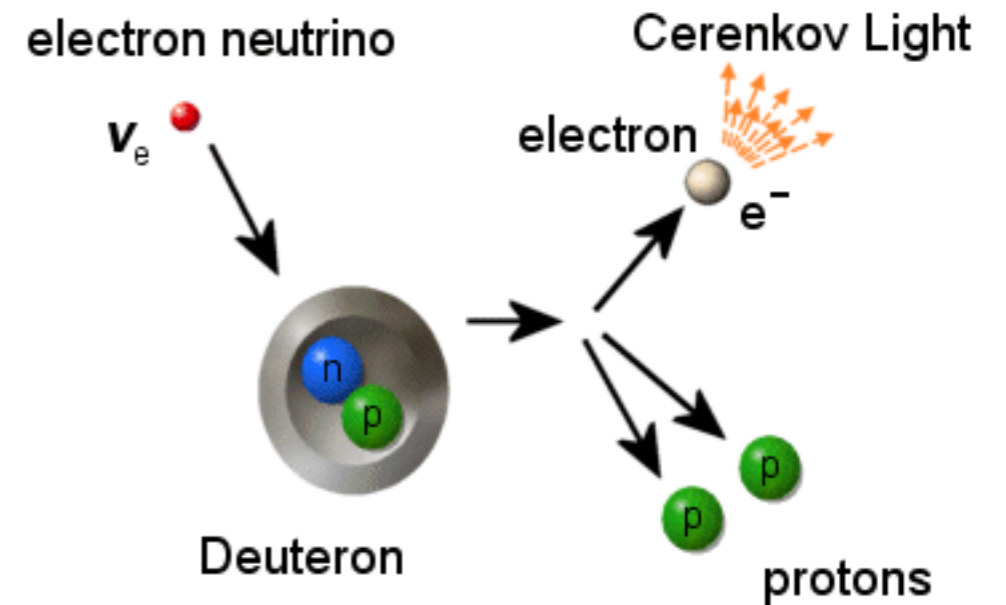
- Neutraler Strom



- Geladener Strom



SNO



SNO



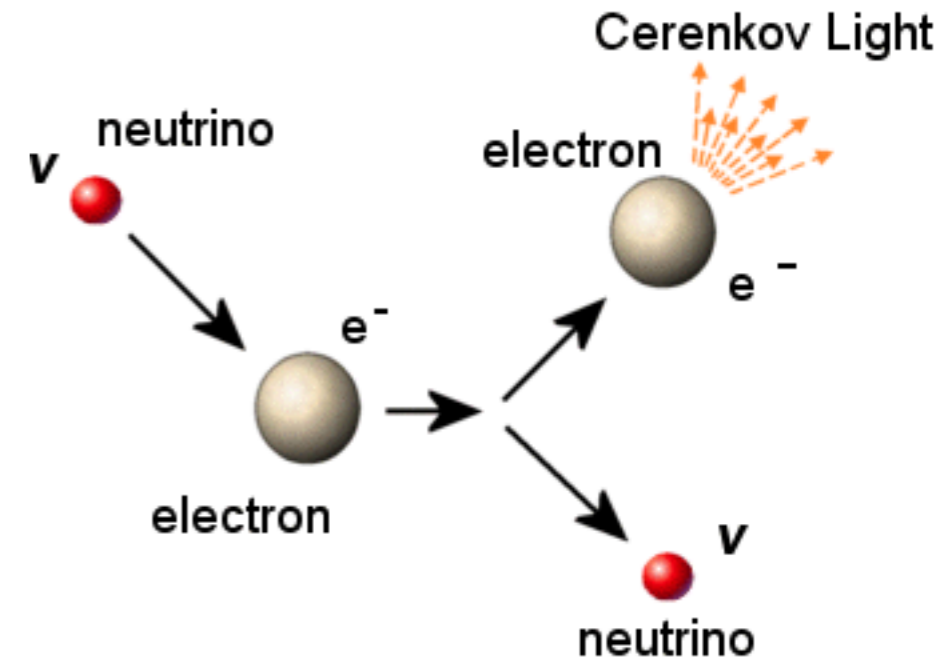
# Neutrino-Elektron-Streuung

- Spezieller Fall:
  - Für  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  läuft dieser Prozess nur über den neutralen Strom
  - Für  $\nu_e$  trägt sowohl der neutrale als auch der geladene Strom bei

- Wirkungsquerschnitte

- $\nu_\mu e$ :  $\sim 1.5 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$
- $\nu_e e$ :  $\sim 10 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$

▶  $\sim$  drei Größenordnung kleiner als Neutrino-Nukleon-Streuung



SNO

# Neutrino-Elektron-Streuung

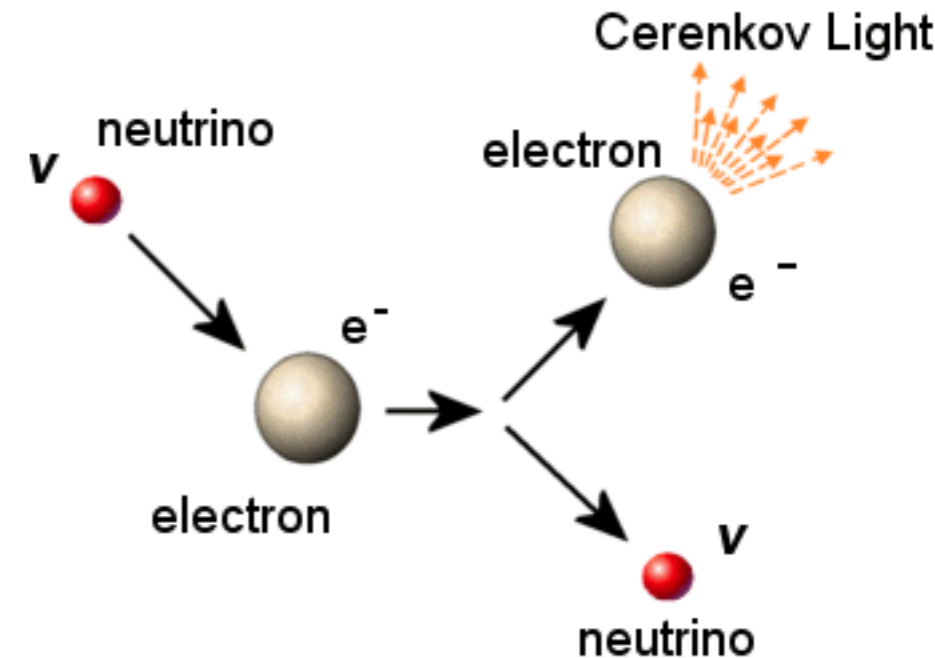
- Spezieller Fall:
  - Für  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  läuft dieser Prozess nur über den neutralen Strom
  - Für  $\nu_e$  trägt sowohl der neutrale als auch der geladene Strom bei

- Wirkungsquerschnitte

- $\nu_\mu e$ :  $\sim 1.5 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$
- $\nu_e e$ :  $\sim 10 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$

▶  $\sim$  drei Größenordnung kleiner als Neutrino-Nukleon-Streuung

Allgemein: Neutrino-Wechselwirkungsquerschnitte sind proportional zur Neutrino-Energie!



SNO

# Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

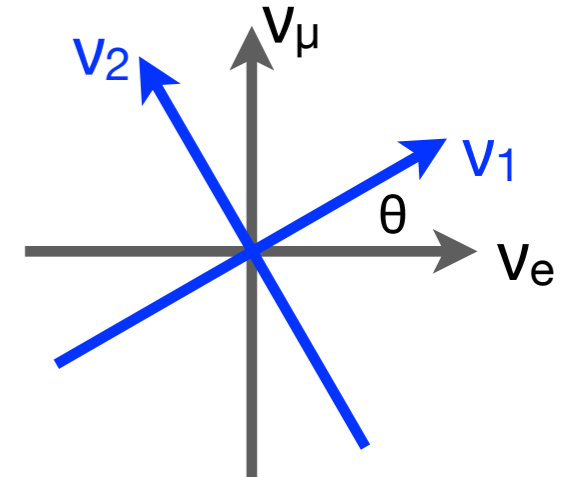
---

- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
  - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände

# Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

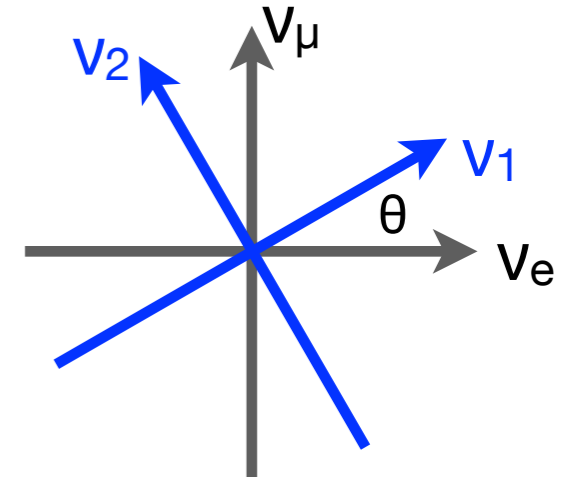
- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
  - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände
- Beispiel: Welt mit 2 Neutrinos:
  - Die Eigenzustände der schwachen WW  $\nu_\mu$  und  $\nu_e$  sind nicht gleich den Masseneigenzuständen  $\nu_1$  und  $\nu_2$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$



# Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
  - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände
- Beispiel: Welt mit 2 Neutrinos:
  - Die Eigenzustände der schwachen WW  $\nu_\mu$  und  $\nu_e$  sind nicht gleich den Masseneigenzuständen  $\nu_1$  und  $\nu_2$



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

- Die Eigenzustände der schwachen WW  $\nu_\mu$  und  $\nu_e$  (die wir messen und identifizieren können) sind eine Mischung der Masseneigenzustände:

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

# Neutrino-Oszillationen: Zwei Neutrinos

- Die Zeitentwicklung im Vakuum wird von den Masseneigenzuständen bestimmt:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta (|\nu_1\rangle e^{-iE_1t}) + \cos\theta (|\nu_2\rangle e^{-iE_2t})$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

# Neutrino-Oszillationen: Zwei Neutrinos

- Die Zeitentwicklung im Vakuum wird von den Masseneigenzuständen bestimmt:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta (|\nu_1\rangle e^{-iE_1t}) + \cos\theta (|\nu_2\rangle e^{-iE_2t})$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

- ▶ Haben die beiden Masseneigenzustände unterschiedliche Massen, dann ändert sich die Zusammensetzung mit der Zeit, ein  $\nu_\mu$  kann sich in ein  $\nu_e$  umwandeln!
- ▶ Die Oszillationswahrscheinlichkeit ist:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

# Neutrino-Oszillationen: Zwei Neutrinos

- Die Zeitentwicklung im Vakuum wird von den Masseneigenzuständen bestimmt:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta (|\nu_1\rangle e^{-iE_1t}) + \cos\theta (|\nu_2\rangle e^{-iE_2t})$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

- ▶ Haben die beiden Masseneigenzustände unterschiedliche Massen, dann ändert sich die Zusammensetzung mit der Zeit, ein  $\nu_\mu$  kann sich in ein  $\nu_e$  umwandeln!
- ▶ Die Oszillationswahrscheinlichkeit ist:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

- ▶ Die Übergangswahrscheinlichkeit als Funktion der zurückgelegten Strecke ergibt sich zu:

$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2}{\text{eV}^2} \frac{L/\text{m}}{E/\text{MeV}} \right)$$

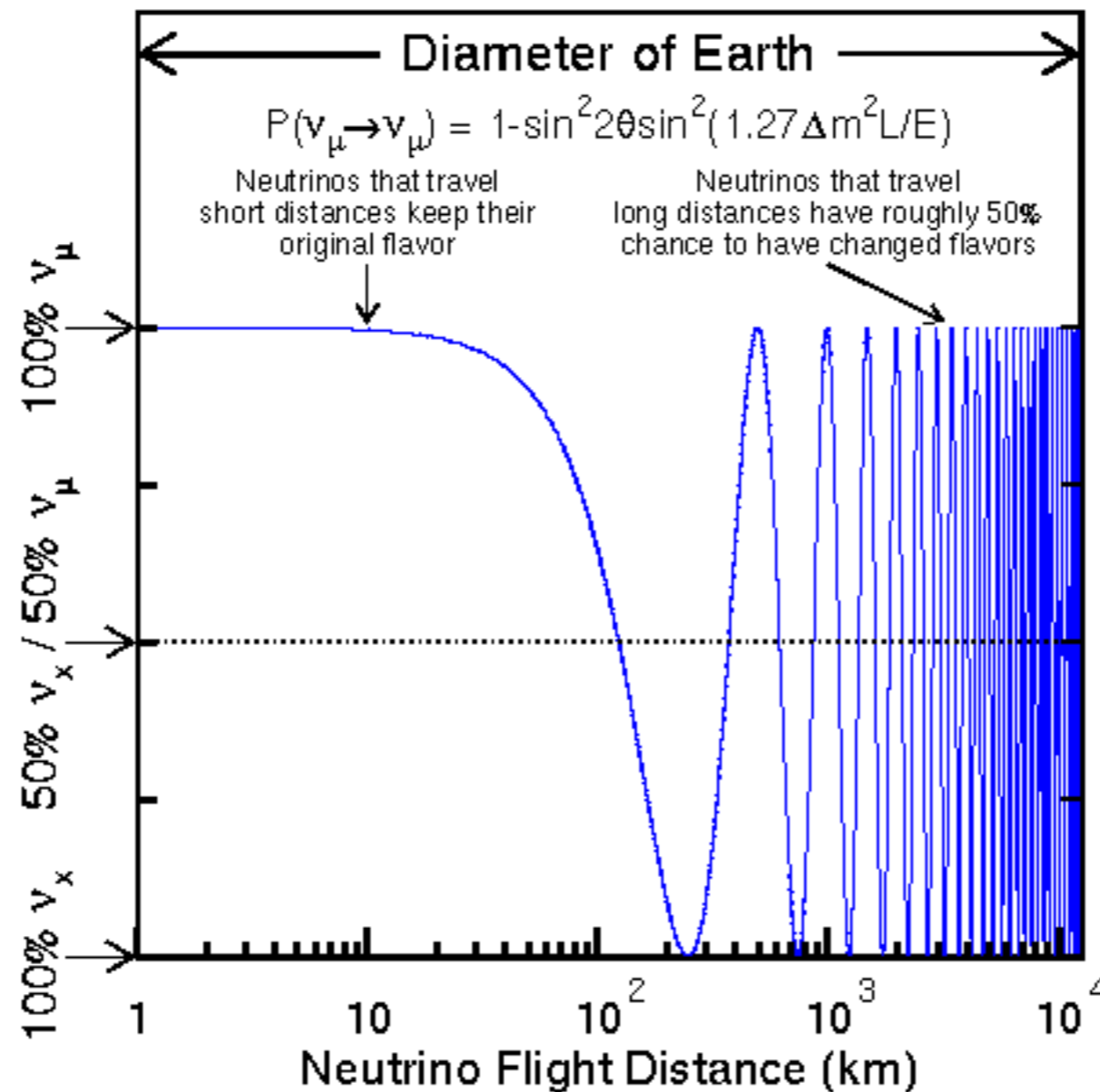
$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$$



# Neutrino-Oszillationen

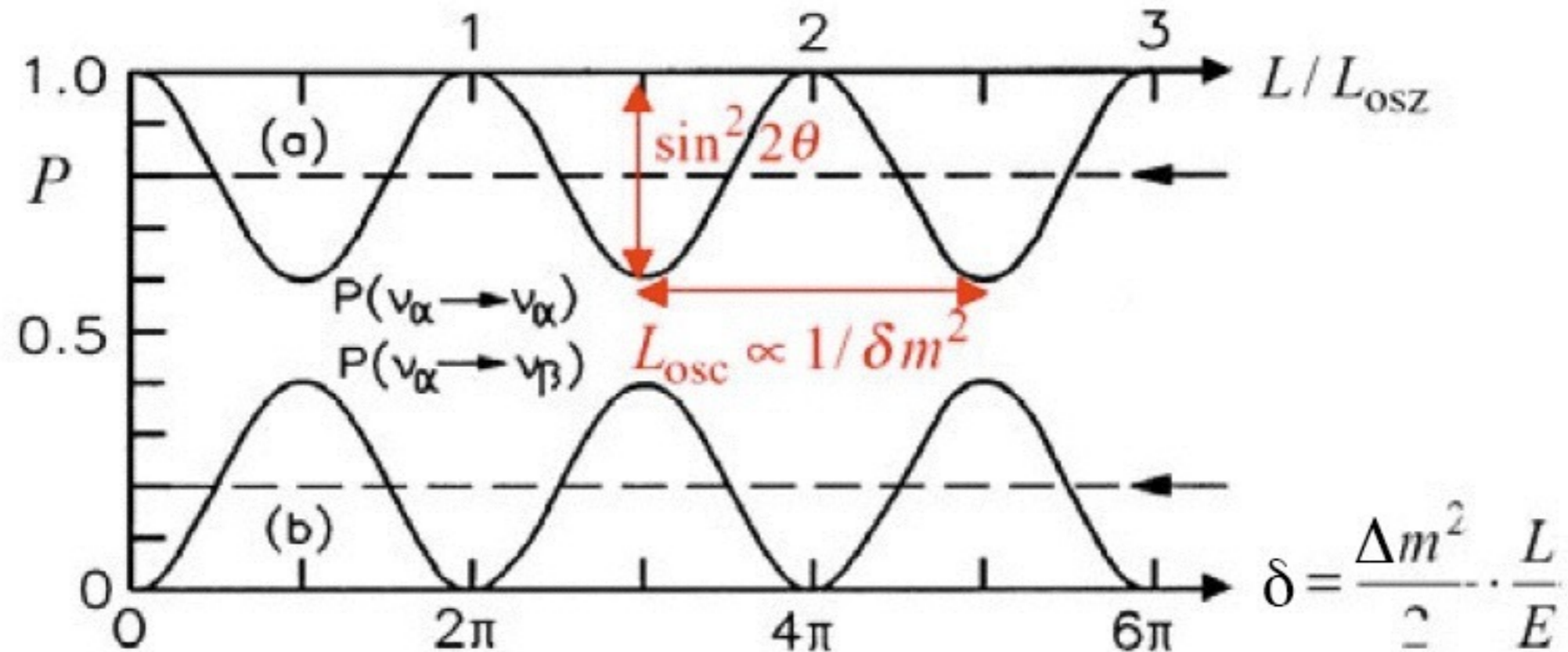
- Neutrino Oszillationen als Funktion des Abstands

$$\Delta m^2 = 0.005 \text{ eV}^2, \quad \sin^2 2\theta = 1, \quad E = 1 \text{ GeV}$$



# Neutrino-Oszillationen

- Einfluss des Mischungswinkels:



- Der Mischungswinkel bestimmt die maximale Umwandlung, der Massenunterschied die "Geschwindigkeit" der Oszillation

# Neutrino-Oszillationen: Allgemeiner Fall

- n Flavor-Eigenzustände  $|\nu_\alpha\rangle$  mit  $\alpha = e, \mu, \tau, \dots$
- n Massen-Eigenzustände  $|\nu_i\rangle$  mit  $i = 1, 2, 3, \dots$
- Die Zustände sind über eine unitäre  $n \times n$  Mischungsmatrix verknüpft:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

- $(n-1)^2$  Unabhängige Parameter der Mischungsmatrix:
  - $n(n-1)/2$  Mischungswinkel
  - $(n-1)(n-2)/2$  CP-verletzende Phasen
- Für  $n = 3$ :
  - 3 Mischungswinkel:  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
  - 1 Phase

# Allgemeine Beschreibung des 3-v-Falls

- Beschreibung des 3 - Neutrino-Falls durch eine unitäre 3 x 3 Matrix (Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix  $MNS$ ):
  - 3 Winkel und eine CP-verletzende Phase
- analog dem Quark-Fall, CKM-Matrix

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$

CP-Verletzung im Bereich von  $\Theta_{13}$

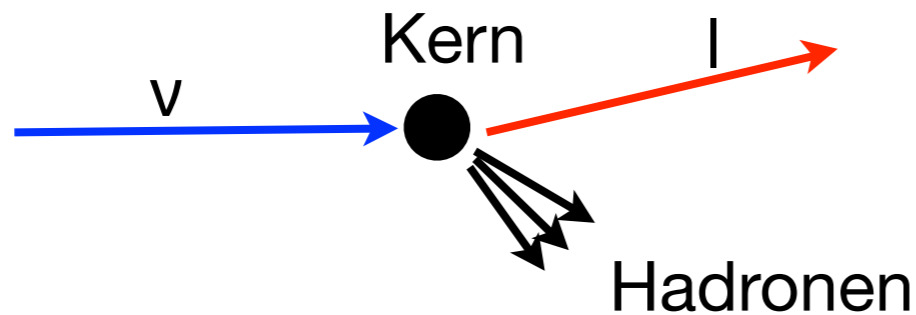
$$= \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & \\ & 1 & \\ & & s_{13}e^{-i\delta} \\ & -s_{13}e^{i\delta} & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

# 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)

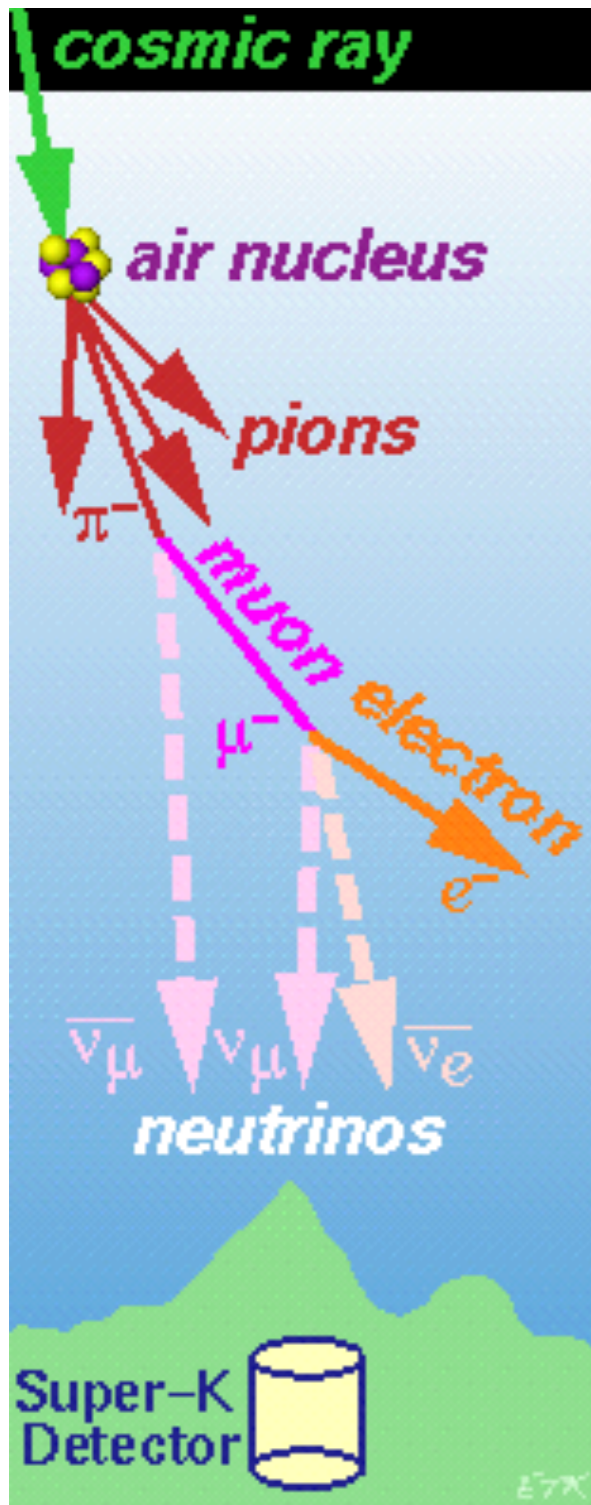
# Super-Kamiokande Messprinzip

- Neutrinos erzeugen über geladene Ströme die entsprechenden Leptonen

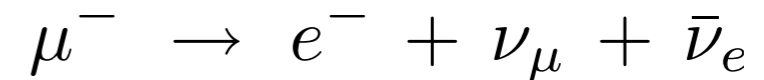
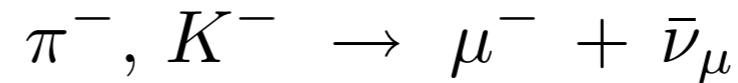


- Hohe Energieschwelle für  $\tau$  - Erzeugung durch hohe Masse (1.777 GeV), daher nur Nachweis von Elektronen und Myonen
- Erzeugung von Cherenkov-Licht durch geladene Leptonen in Wasser (Brechungsindex 1.33)
  - Nachweis des Cherenkovlichtes:
    - Lichtverteilung ermöglicht Teilchenidentifikation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

# 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):

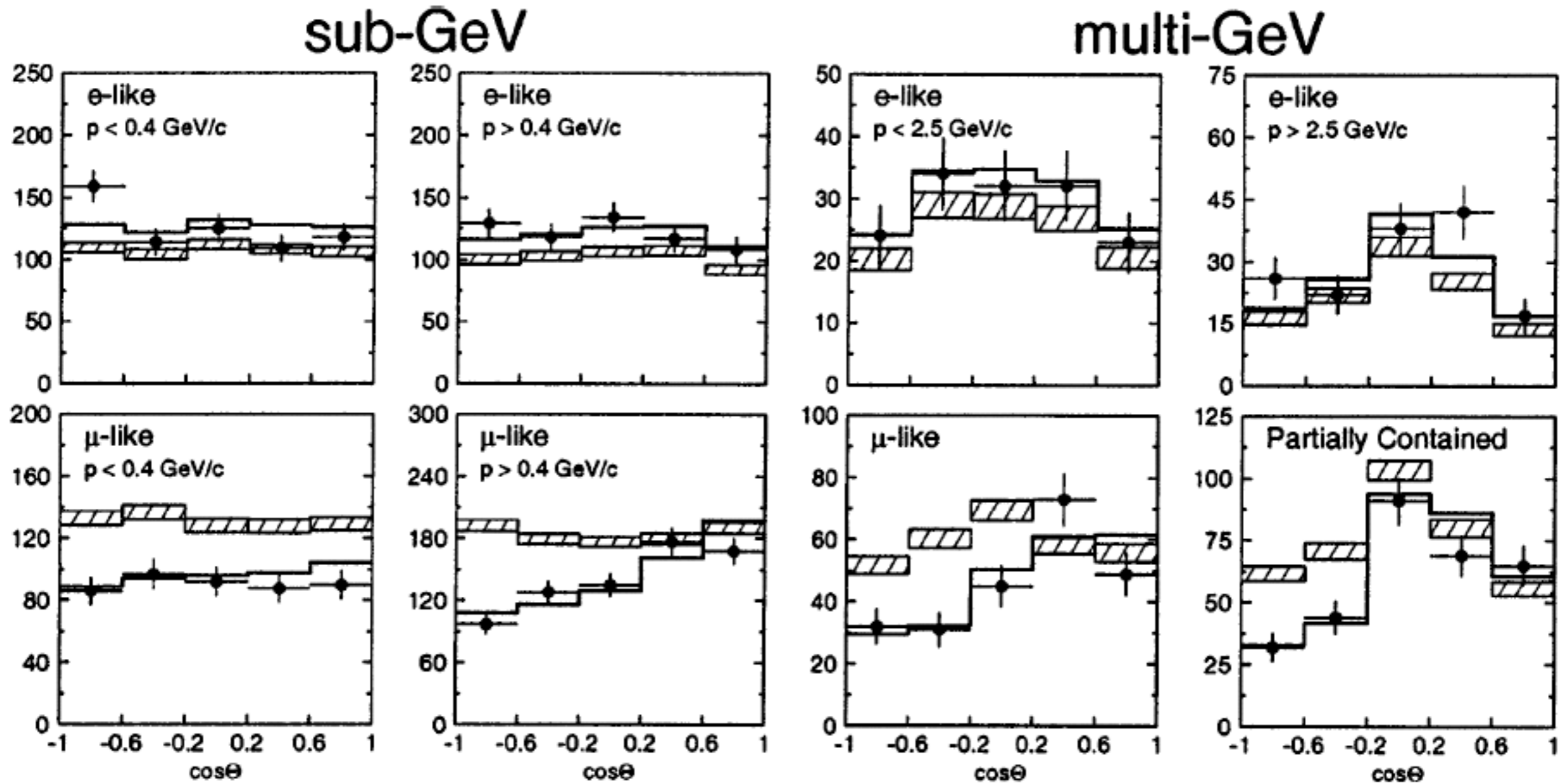
$$\frac{\mu}{e} \equiv \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$

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

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

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

# Oszillation Atmosphärischer Neutrinos



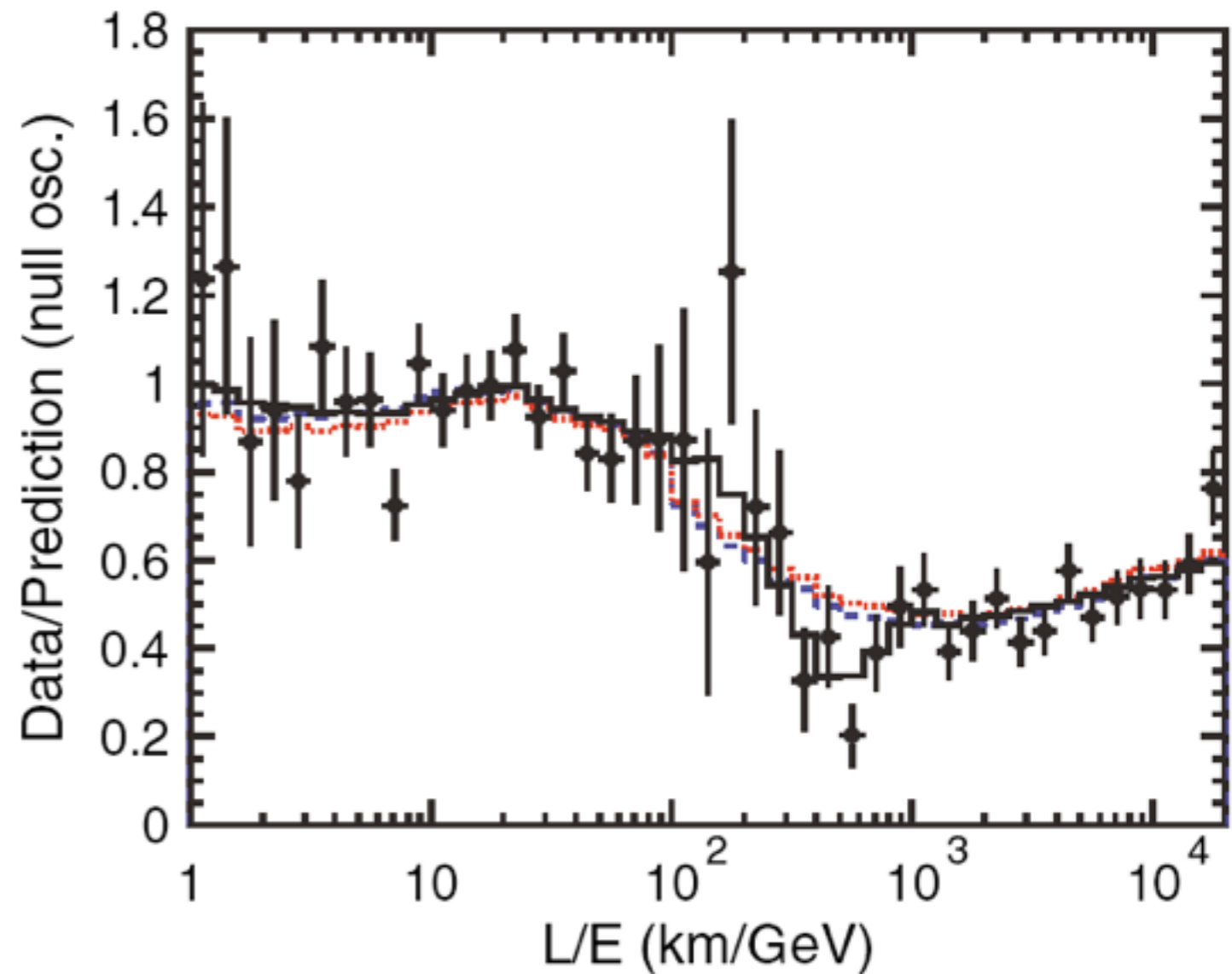
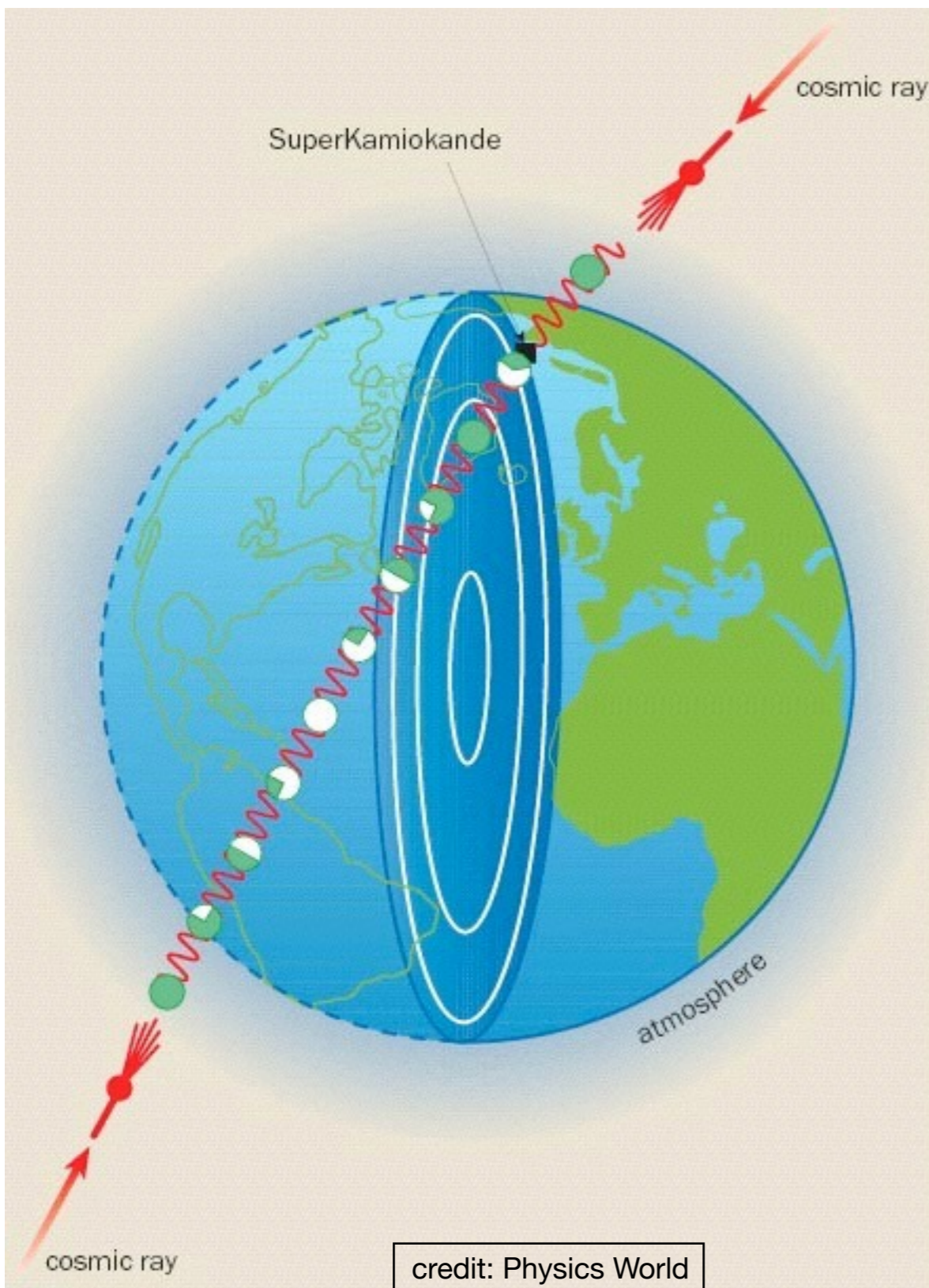
Phys.Rev.Lett. 81, 1562 (1998)

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



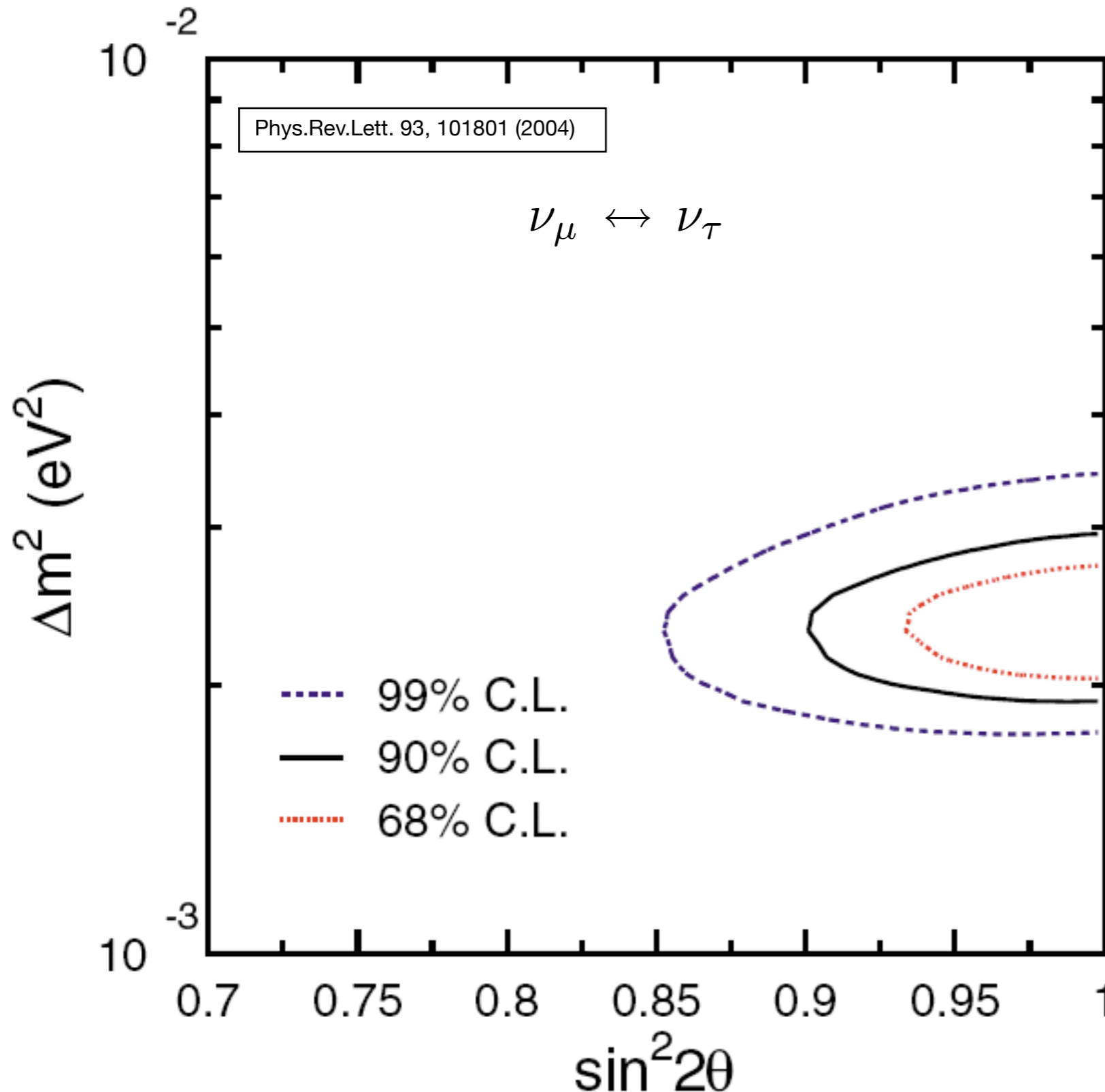
# Oszillation Atmosphärischer Neutrinos

- 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  
~ 1000 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 (next 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

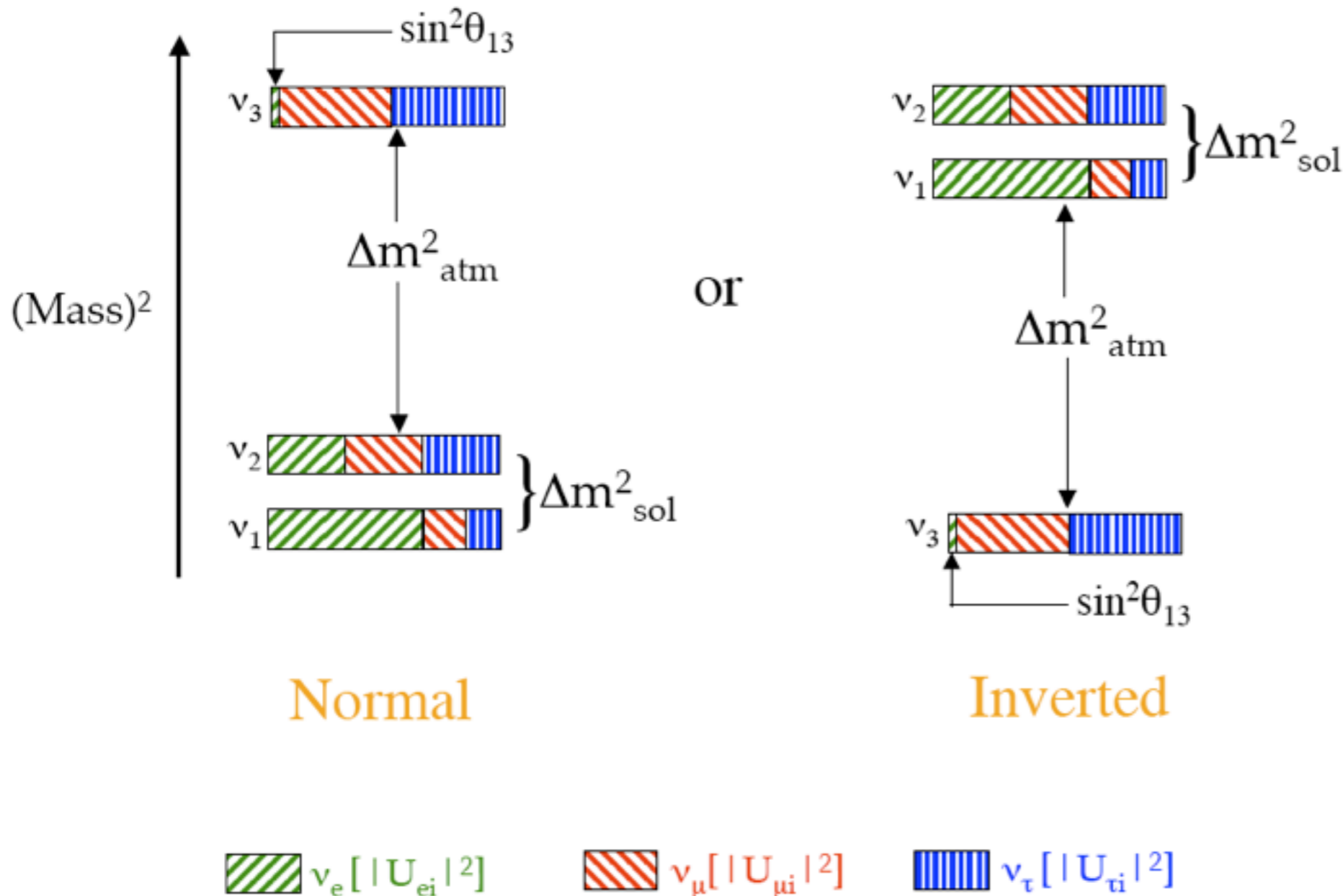
- Two distinct types of oscillations (with quite different mass splittings) have been observed:
  - Atmospheric - disappearance of  $\nu_\mu$ ,  $\Delta m^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
  - Solar (next week in detail) - disappearance of  $\nu_e$ ,  $\Delta m^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- ▶ 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



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

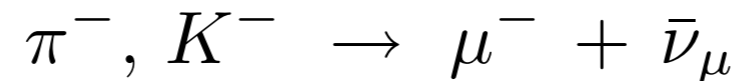
$$\Delta m^2_{\text{atm}} \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

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:

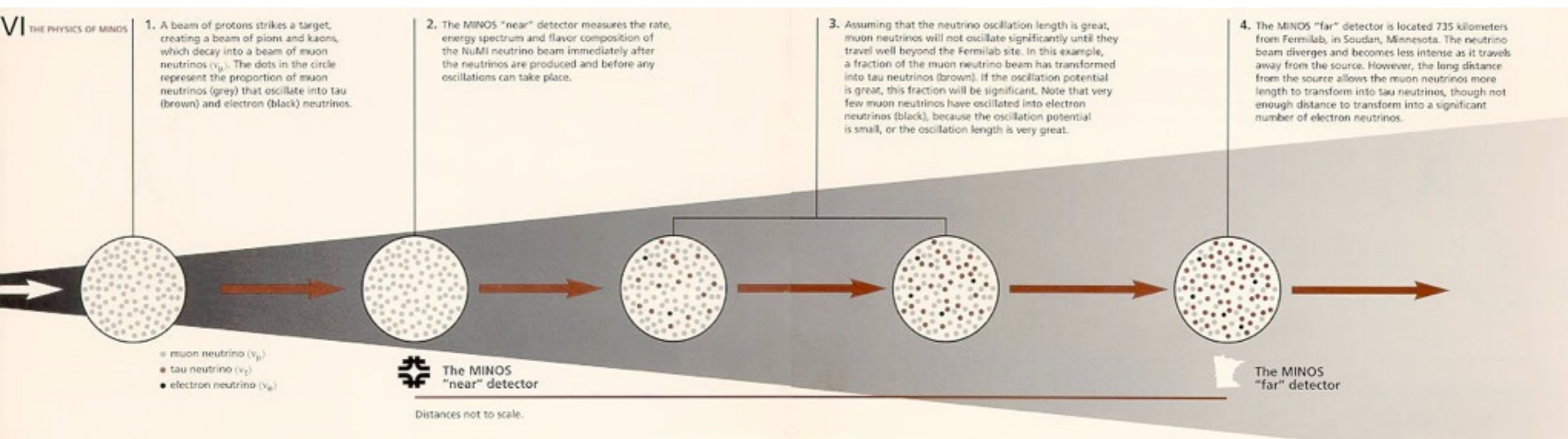


- Tunnel nicht lang genug für Zerfall der Muonen, daher praktisch reiner  $\nu_{\mu}$  Strahl
- Es wurde eine Vielzahl an Experimenten mit Beschleuniger-Neutrinos durchgeführt, u.a. zur
  - Untersuchung der schwachen Wechselwirkung
  - Untersuchung der Quark-Zusammensetzung von Atomkernen
  - Entdeckung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

# Long-Baseline Experimente

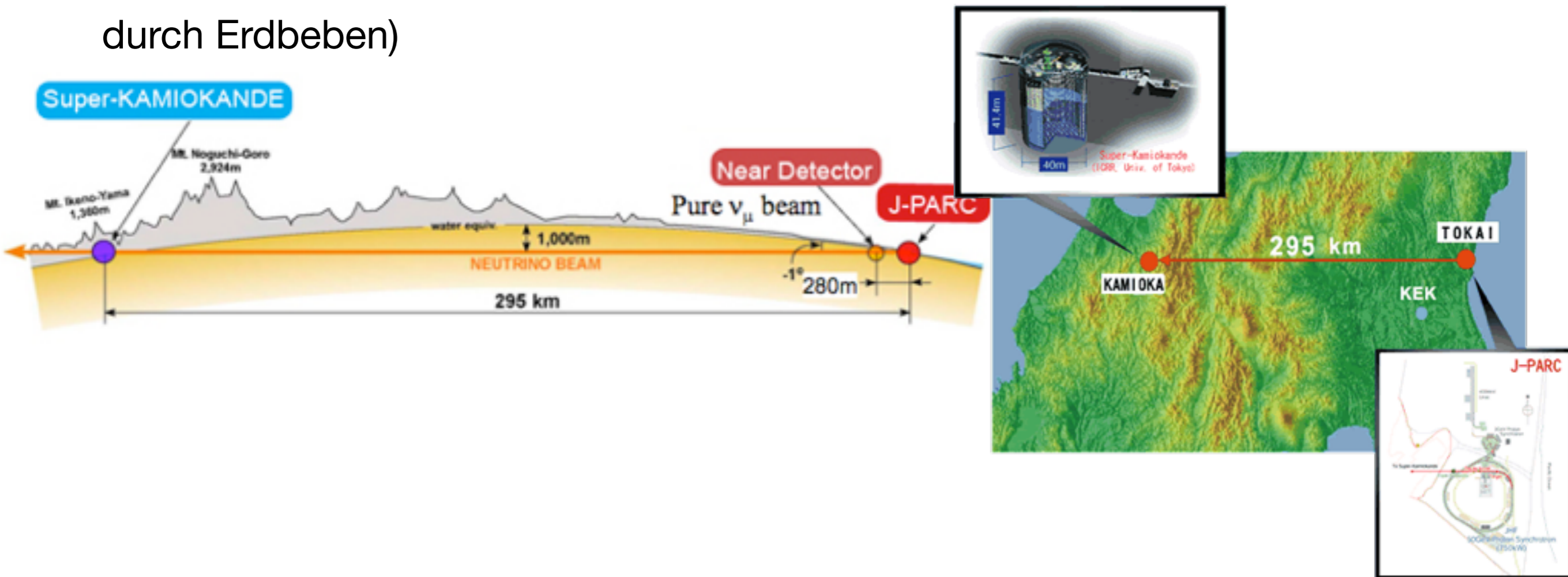
- Neutrinostrahl wird an Beschleuniger erzeugt
- Referenz-Messung mit einem "Near Detector"
- Nachweis der Neutrinos mit einem "Far Detector"
- ▶ Wahl der Entfernung und der Energie bestimmt den untersuchten Bereich der Mischungsmatrix

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  $\nu_e$  ( $\theta_{13} \neq 0$ )



# T2K: Neutrino-Strahl nach SuperK

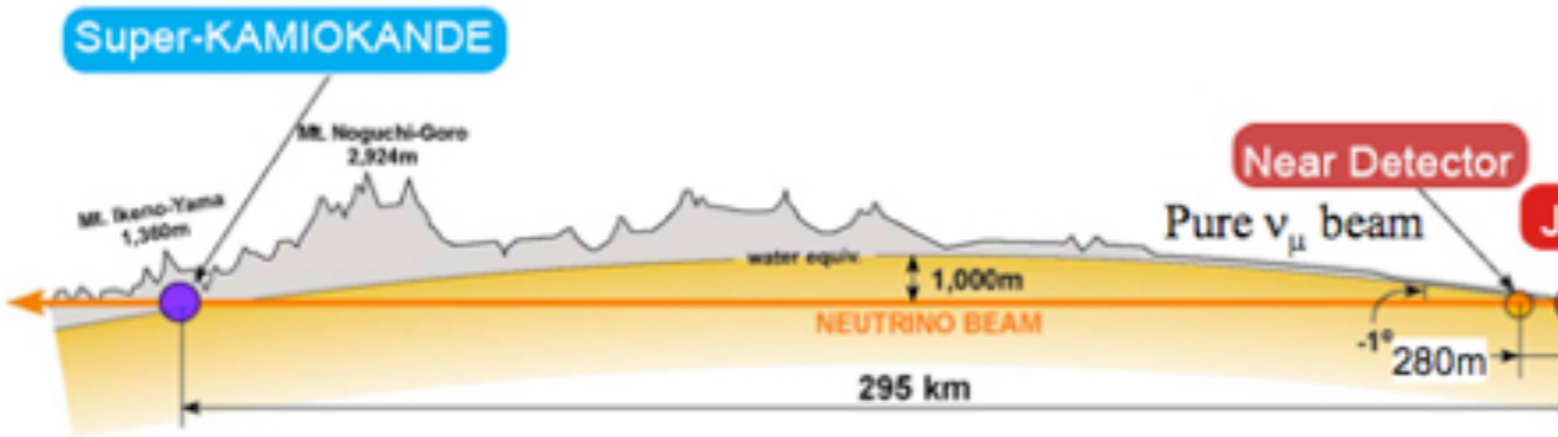
- Ziel: Präzise Messung der atm. Oszillationen,  $\theta_{13}$ , mögliche CP-Verletzung
- Läuft seit 2010 (mit 1 Jahr Unterbrechung durch Erdbeben)



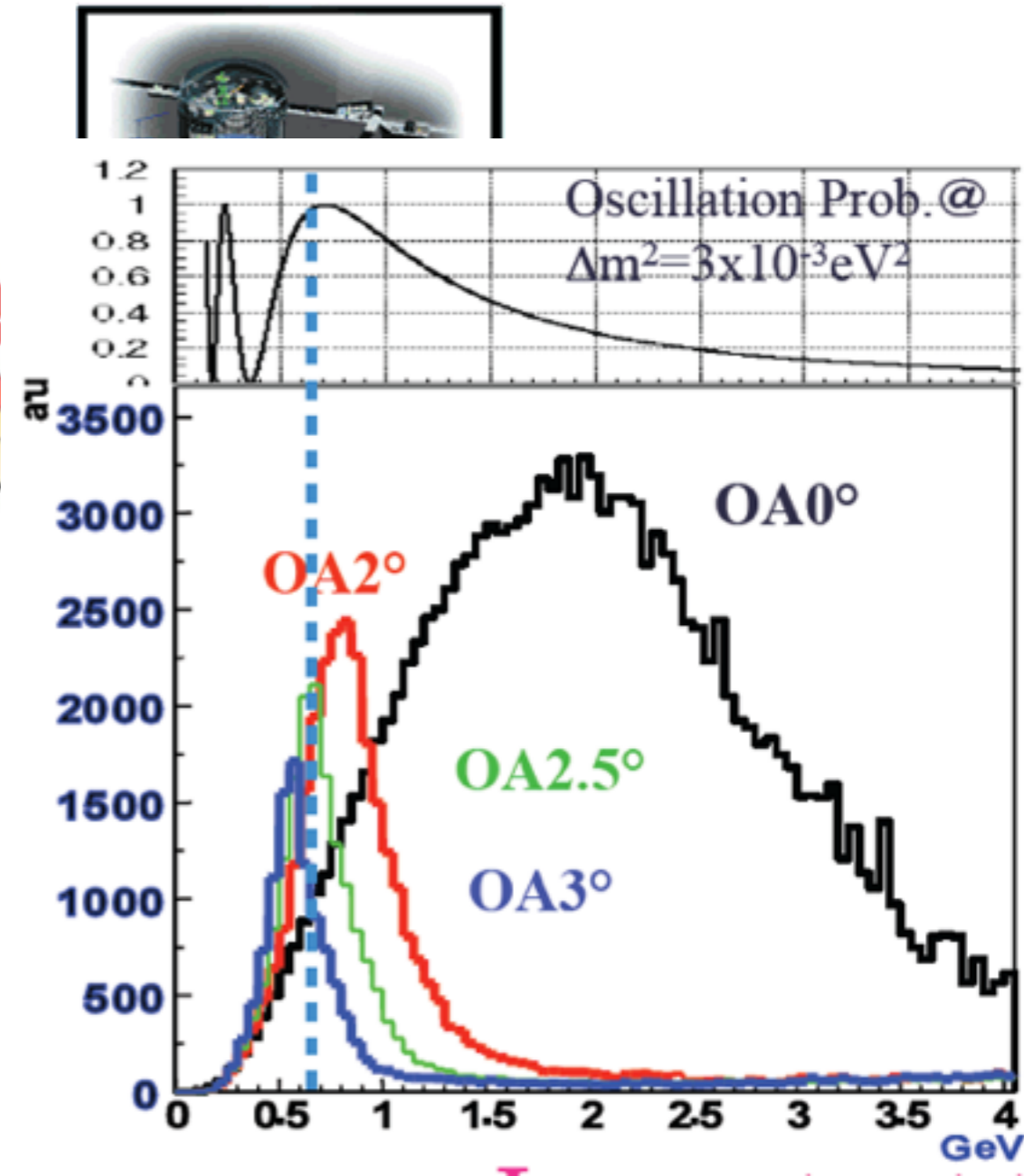
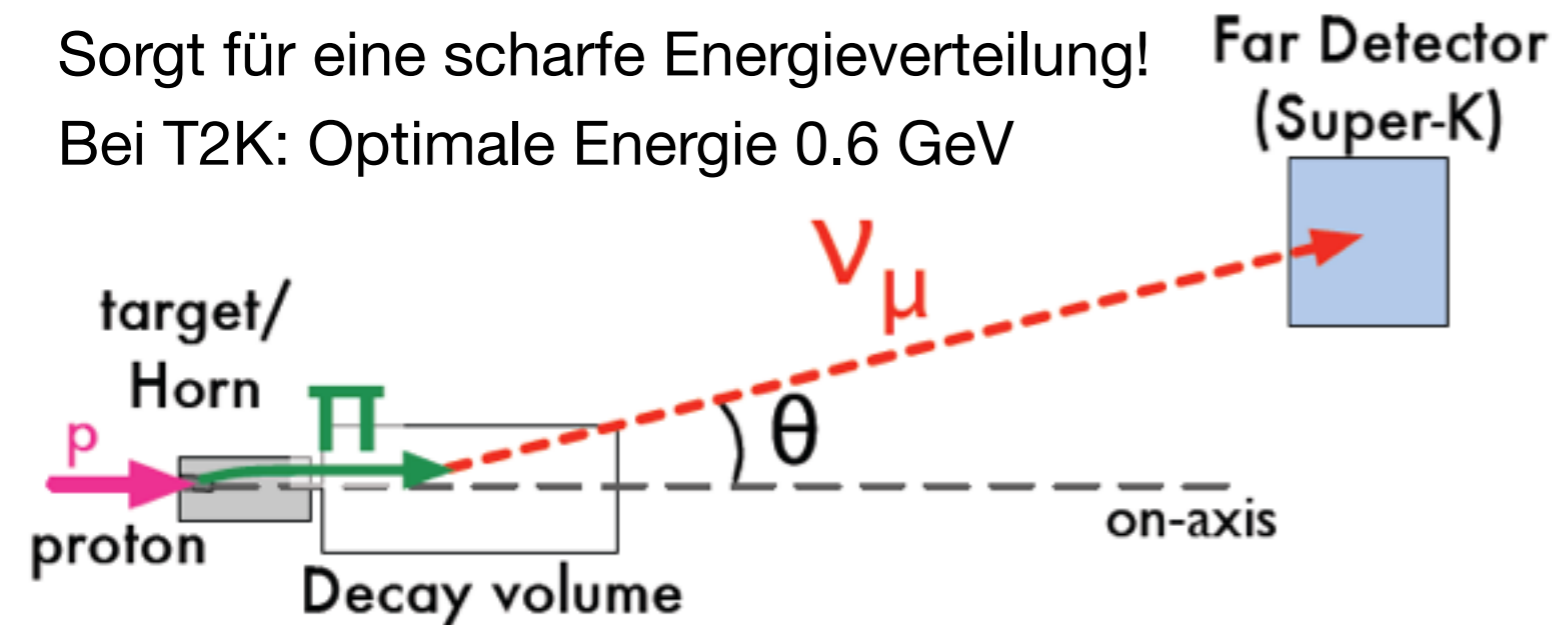


# T2K: Neutrino-Strahl nach SuperK

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



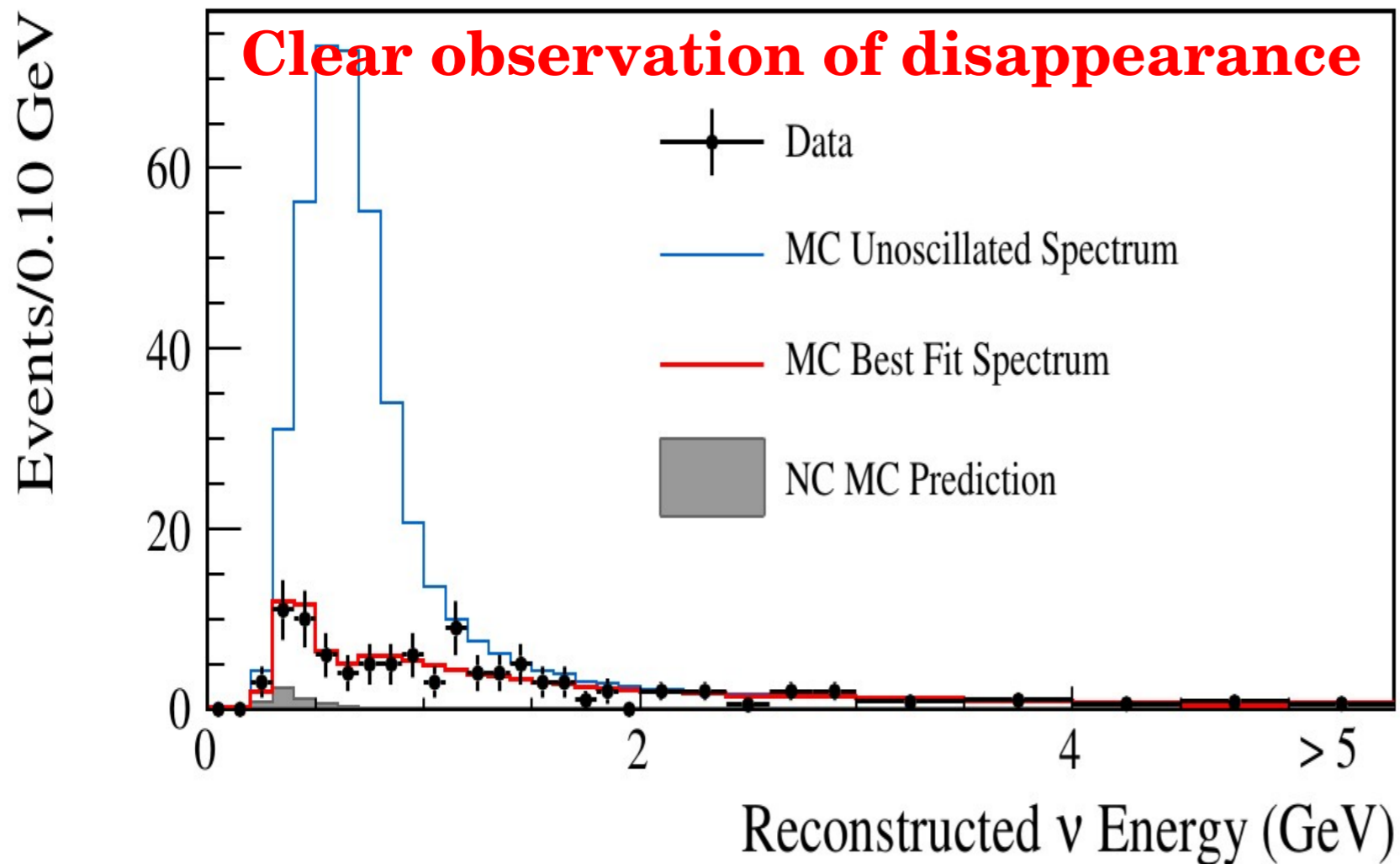
Moderne Experimente sind "off-axis"- Beams: Ziehlen nicht direkt auf den Far Detektor -  
Sorgt für eine scharfe Energieverteilung!  
Bei T2K: Optimale Energie 0.6 GeV



Ken Sakashita, KEK Seminar

# T2K - Die Wahl der richtigen Baseline

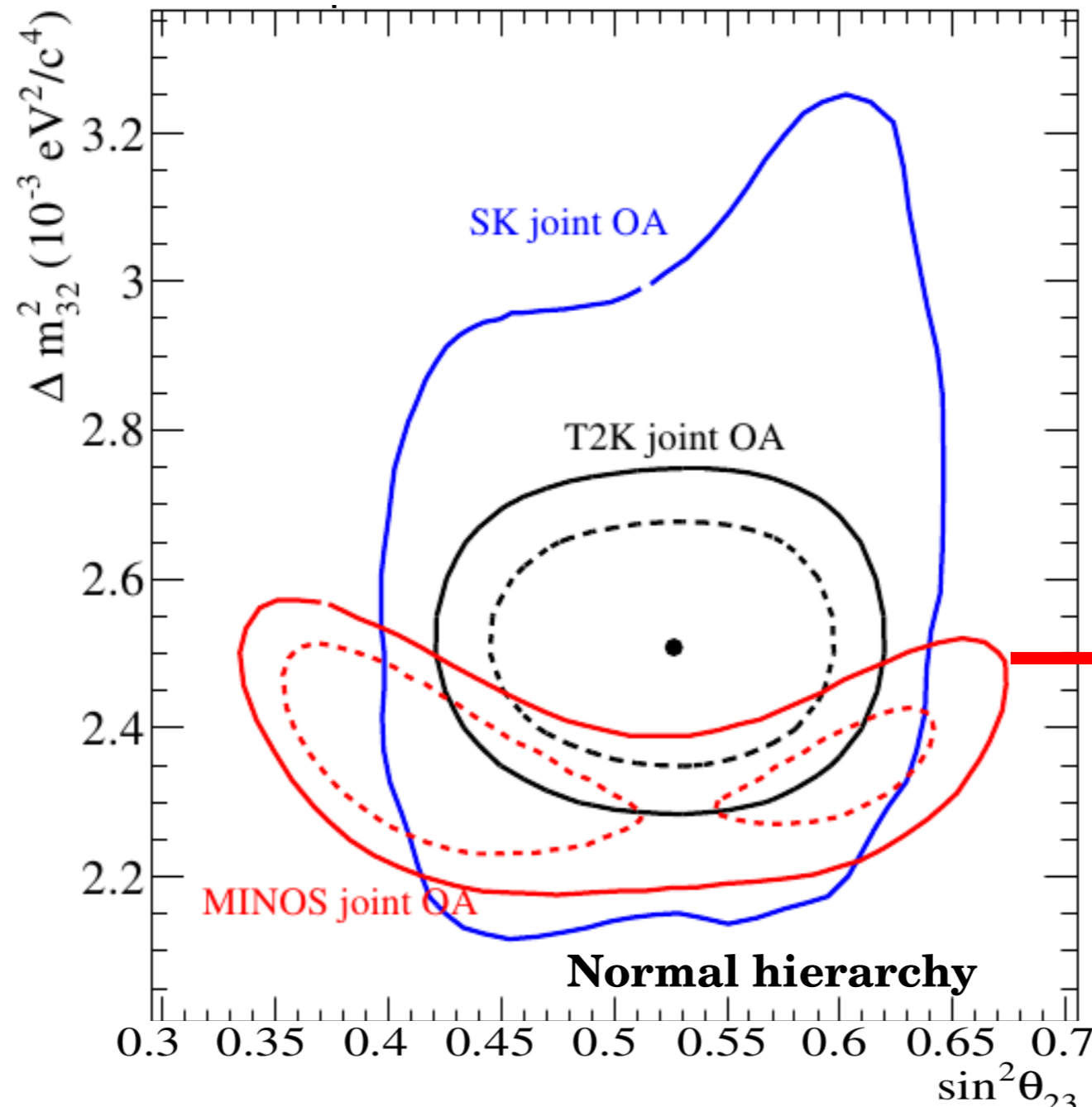
- Fast vollständiges verschwinden der  $\nu_\mu$ :



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

# Atmosphärisch & Beschleuniger: Das Bild

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



# CNGS / OPERA - Bestätigung

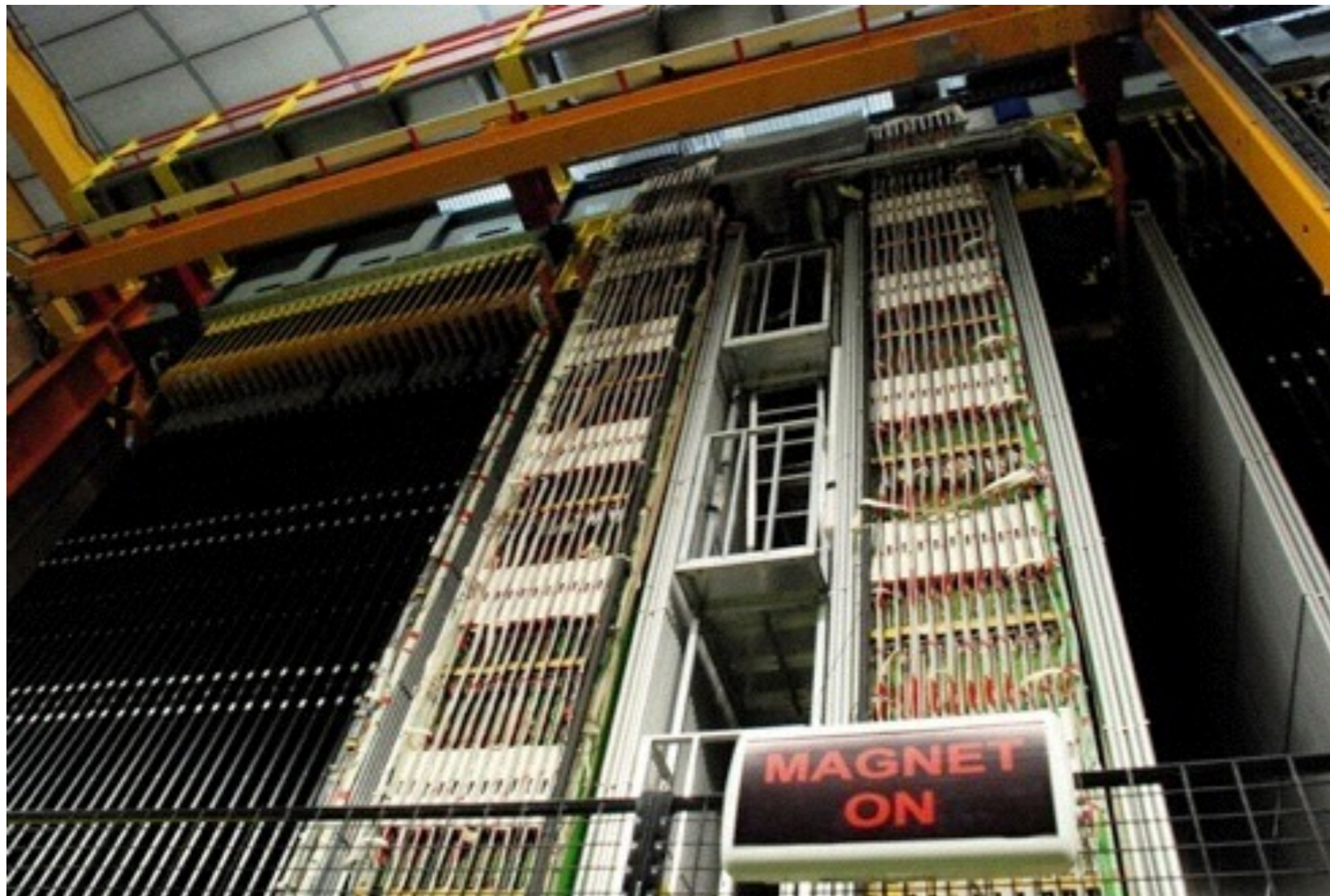
- Eines der Ziele: Direkte Beobachtung der Oszillation von  $\nu_\mu$  nach  $\nu_\tau$  durch Nachweis von  $\nu_\tau$  in einem  $\nu_\mu$  Long Baseline Beam (CERN  $\rightarrow$  Gran Sasso)



- 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

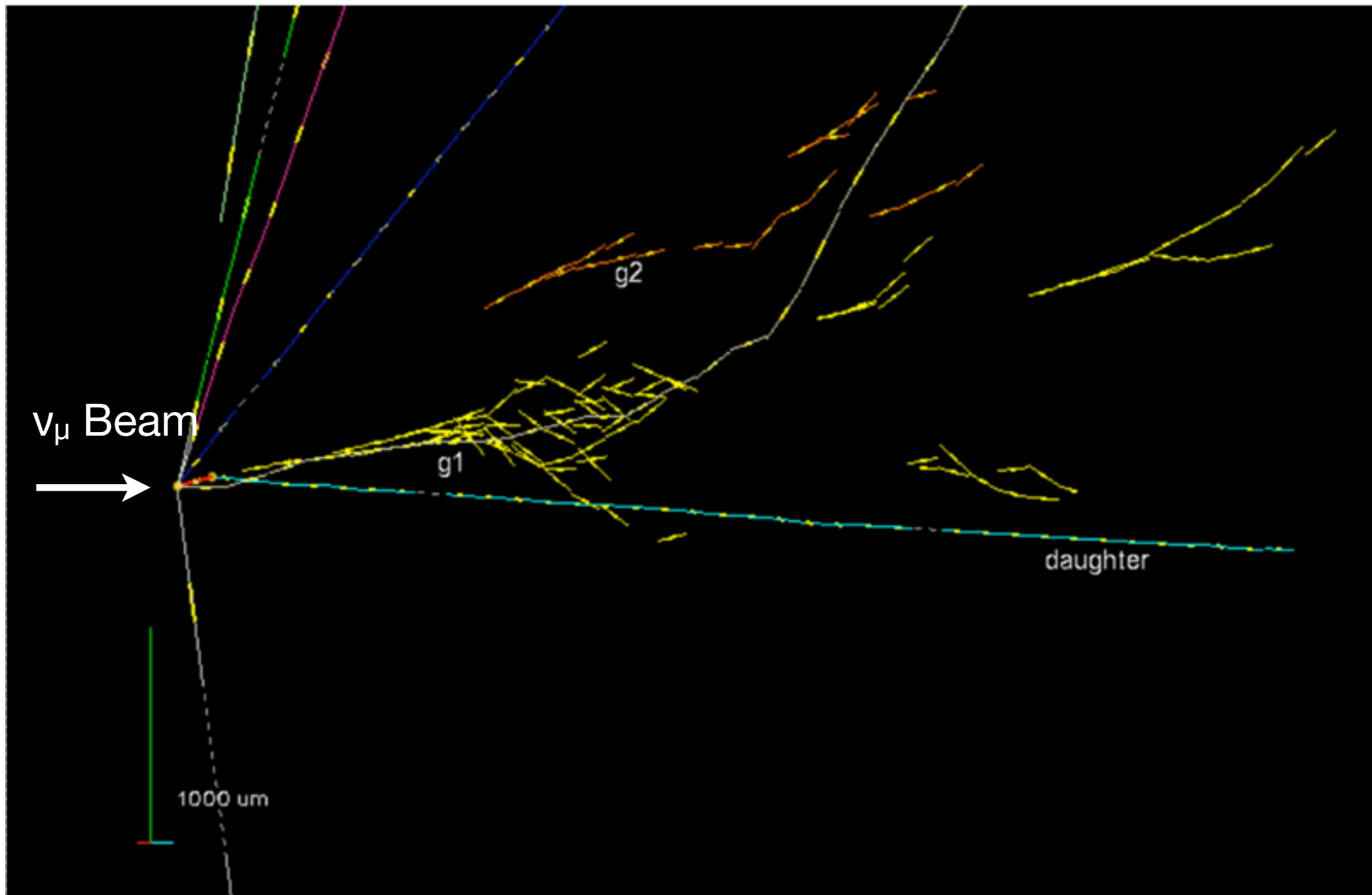
# CNGS / OPERA - Bestätigung

- 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

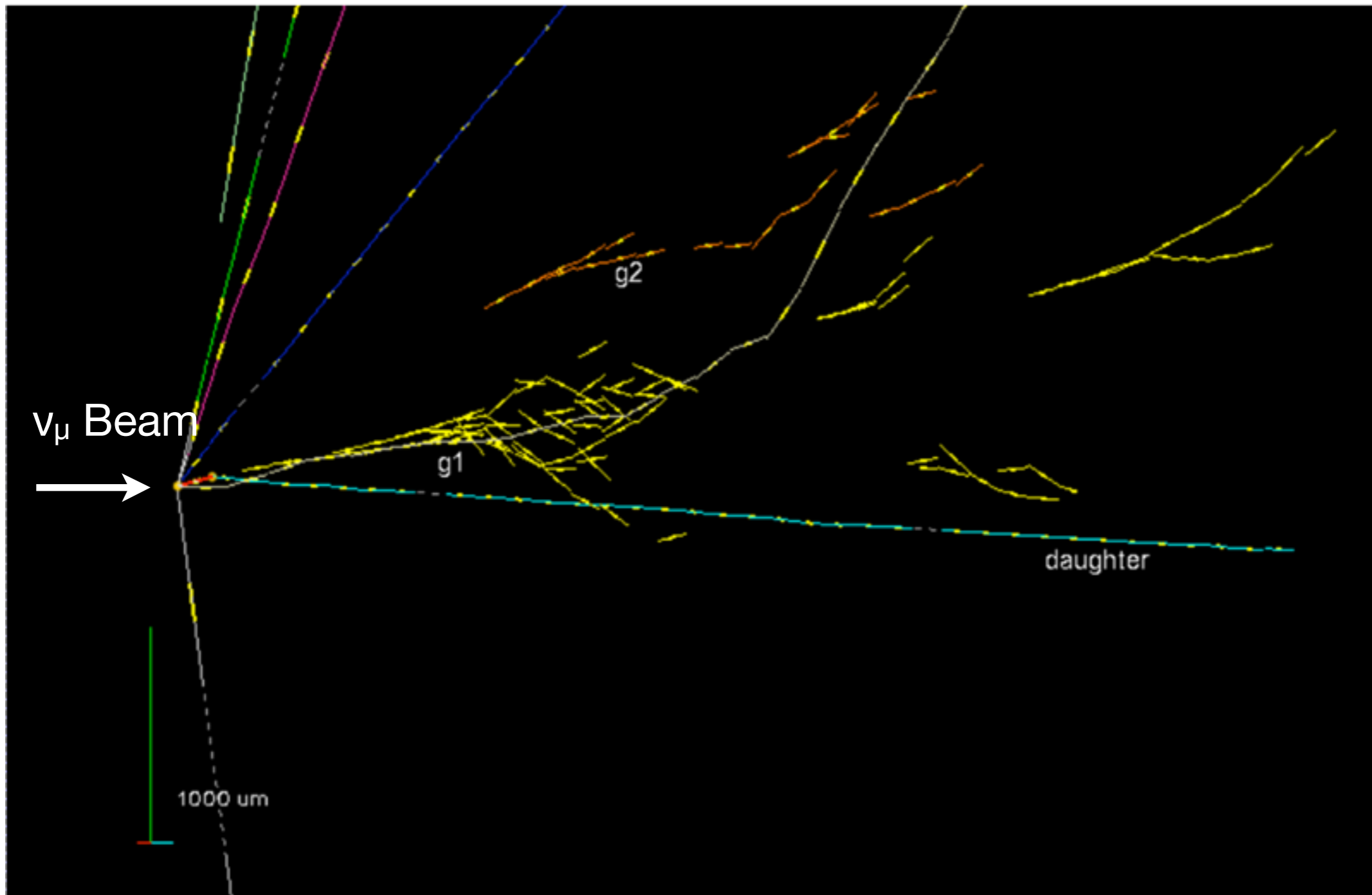


$\nu_\tau$  erzeugt  $\tau$ , schneller Zerfall in  $\mu$  und  $\nu_s$

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

OPERA Press Release, 31.05.2010

# OPERA: Erster $\nu_\tau$ Kandidat



Inzwischen wurden vier weitere  $\nu_\tau$  gesehen - "5-sigma discovery": 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!

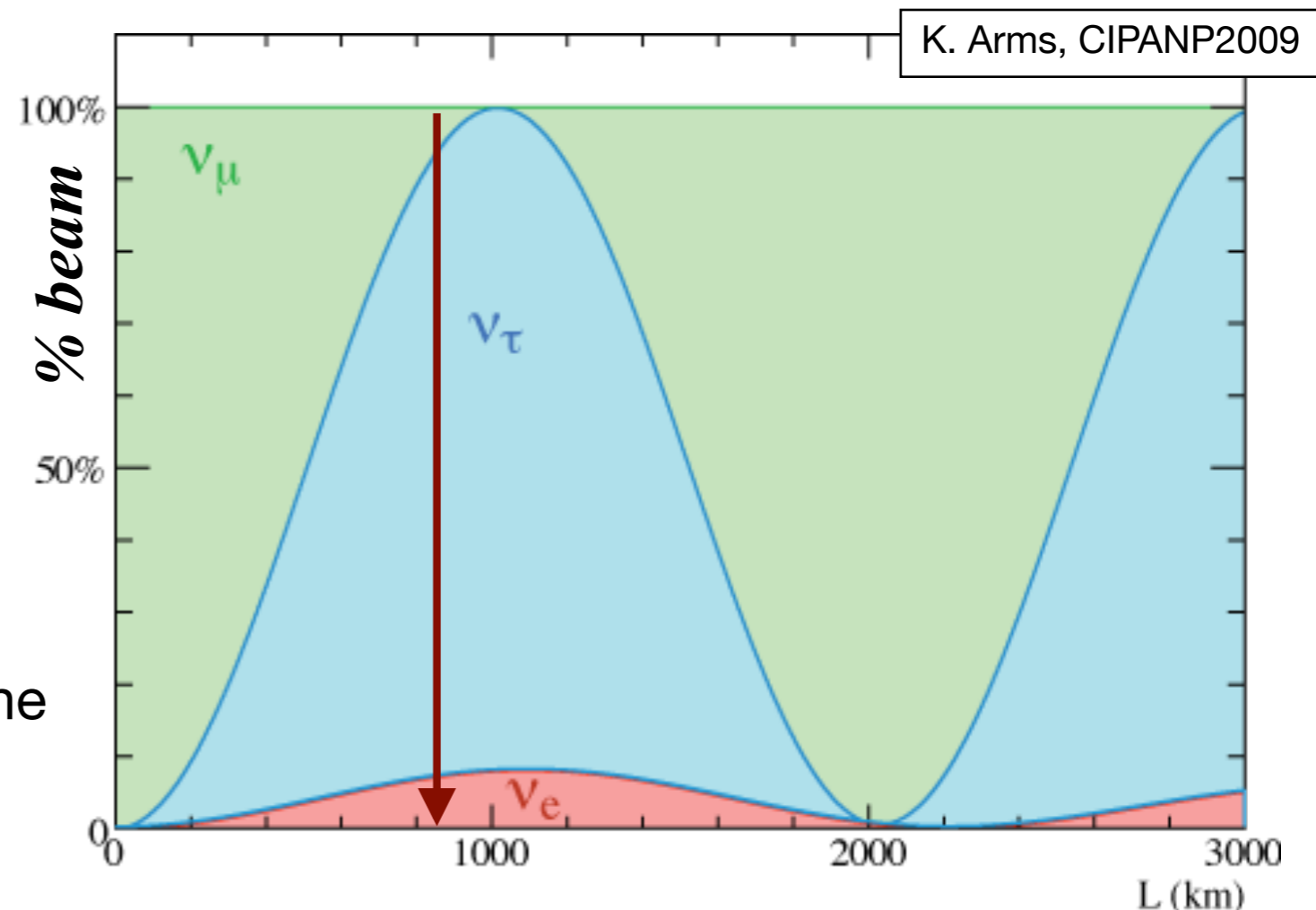
length scale depends on  $\nu$  energy

here: shown for the NOvA

experiment at FNAL

Important: Energy matched to baseline

Narrow energy distribution

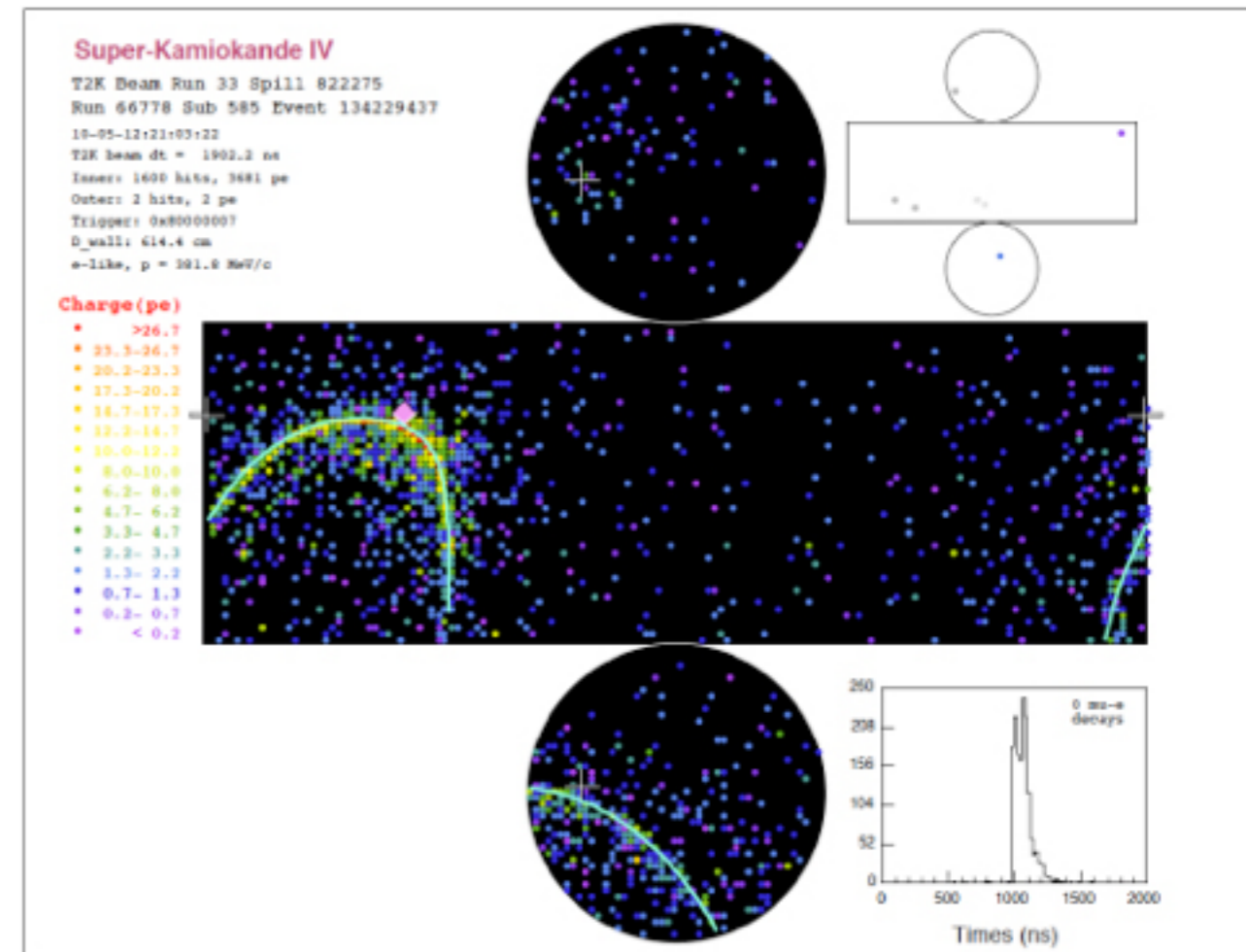
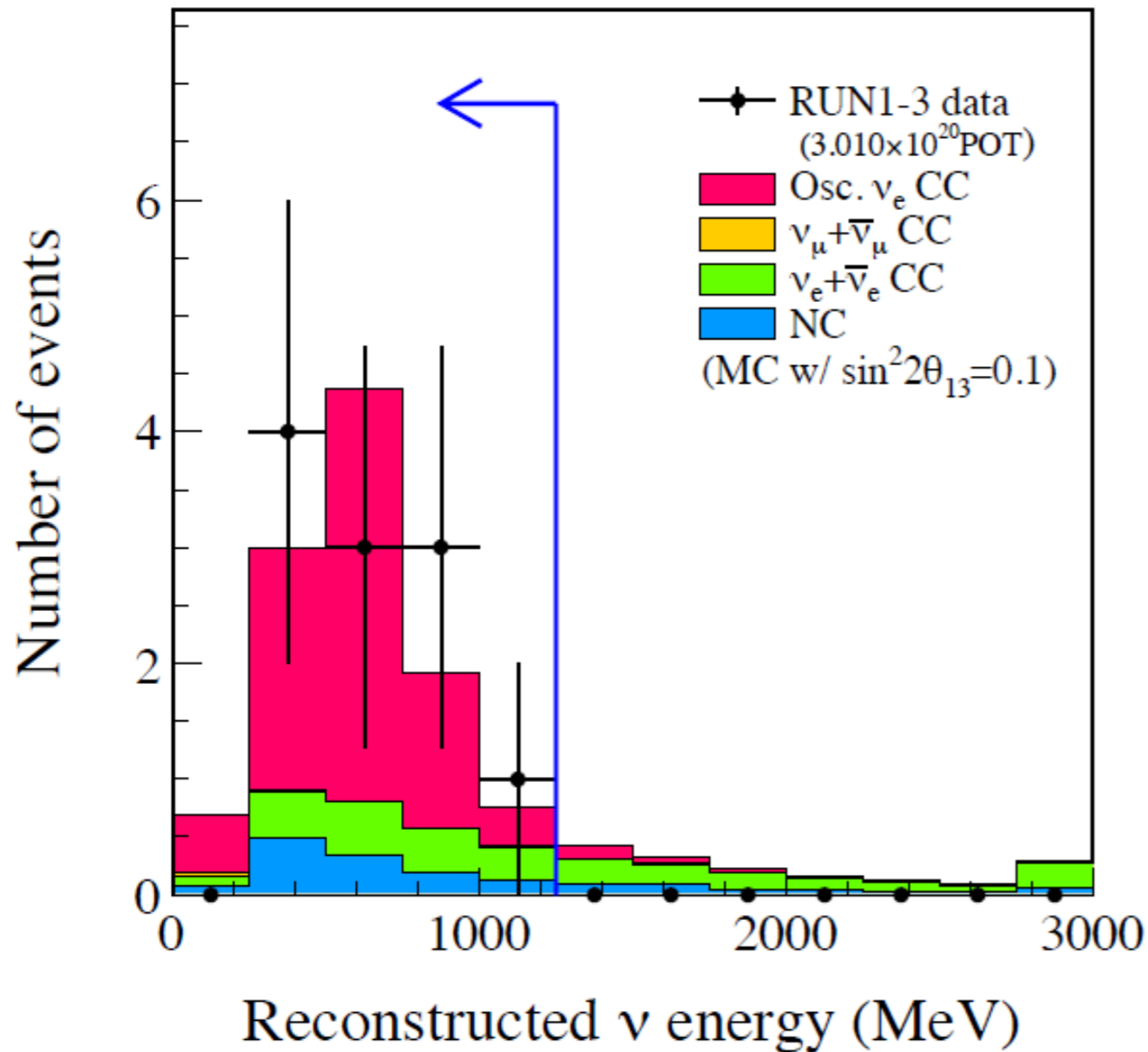




# T2K - Oszillationsergebnisse

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

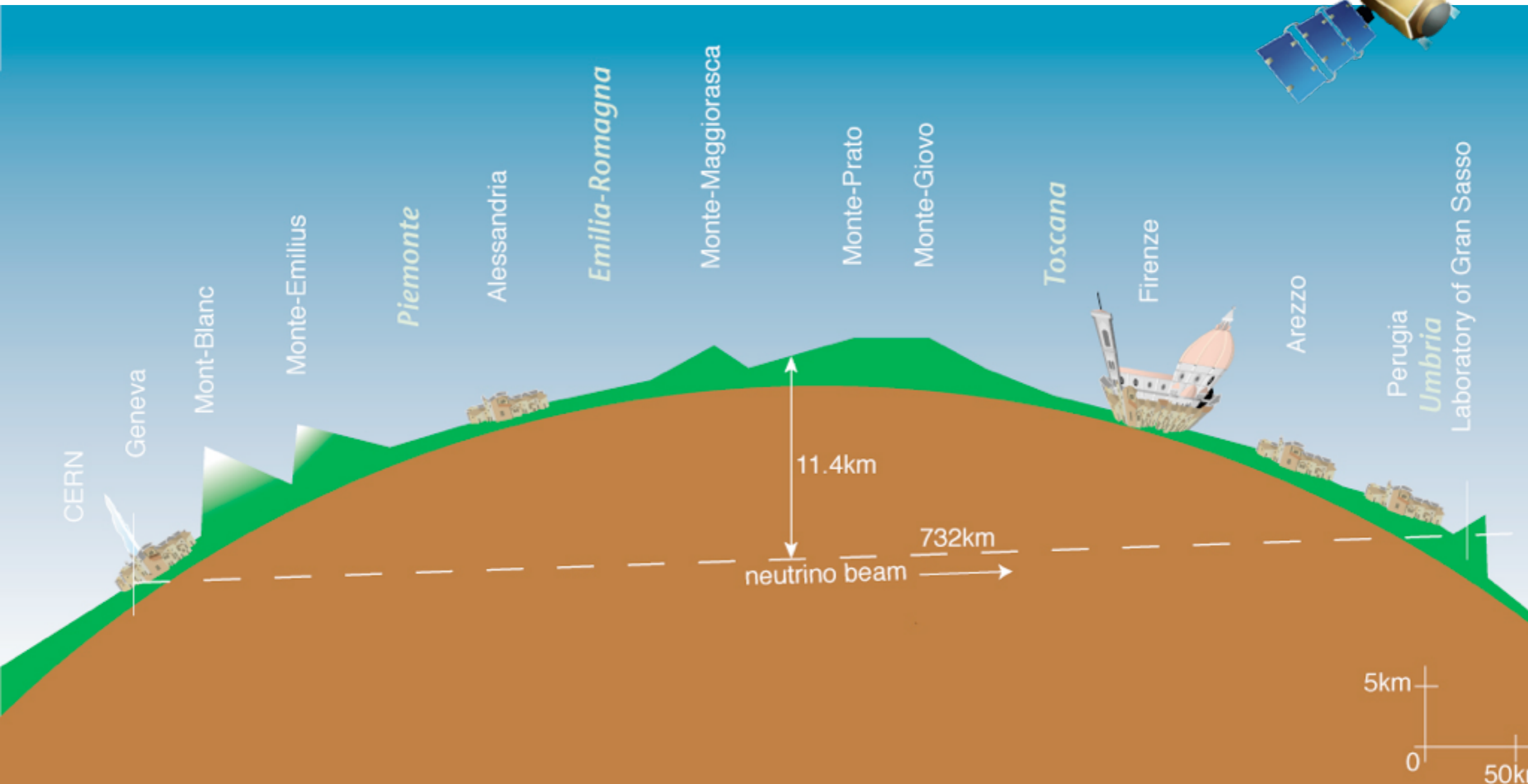
11 Ereignisse ( $3.2 \sigma$  dass  $\theta_{13}$  nicht 0 ist)



Aktuell beste Ergebnisse von Reaktoren (nächste Woche)

# Neutrino-Geschwindigkeit

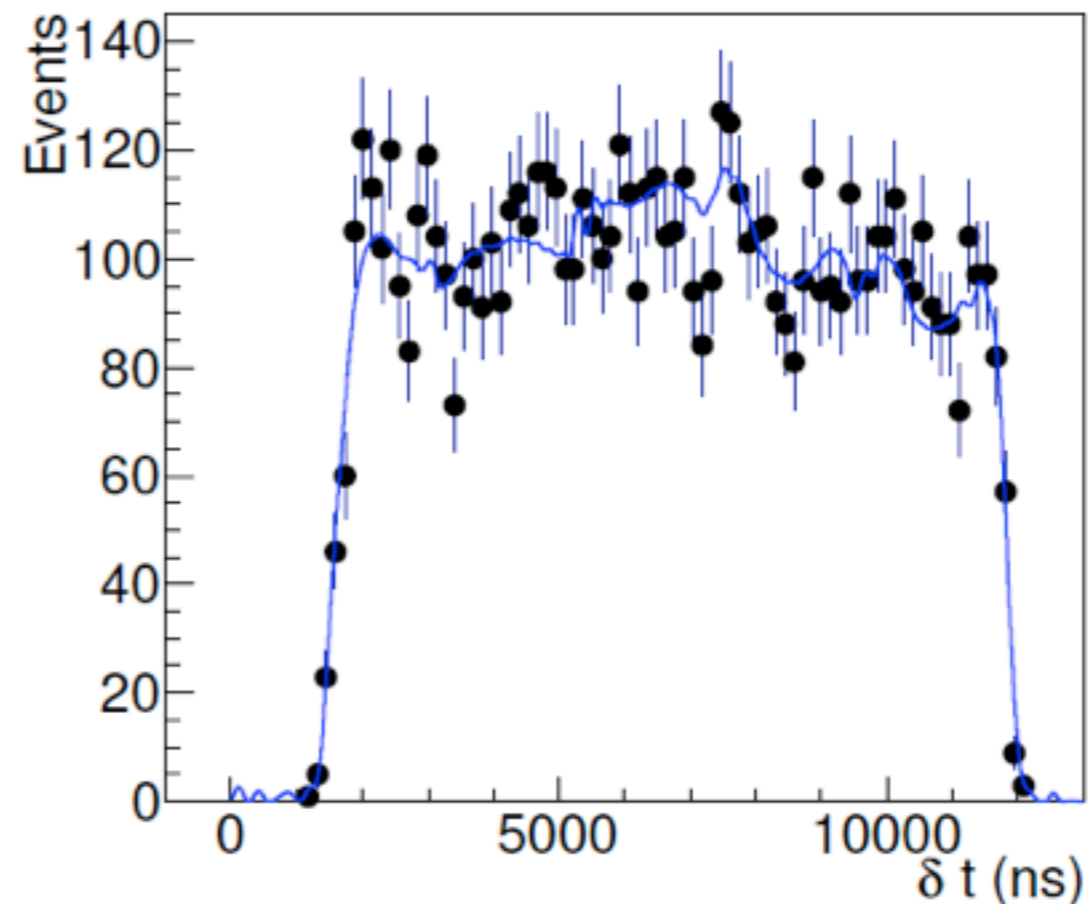
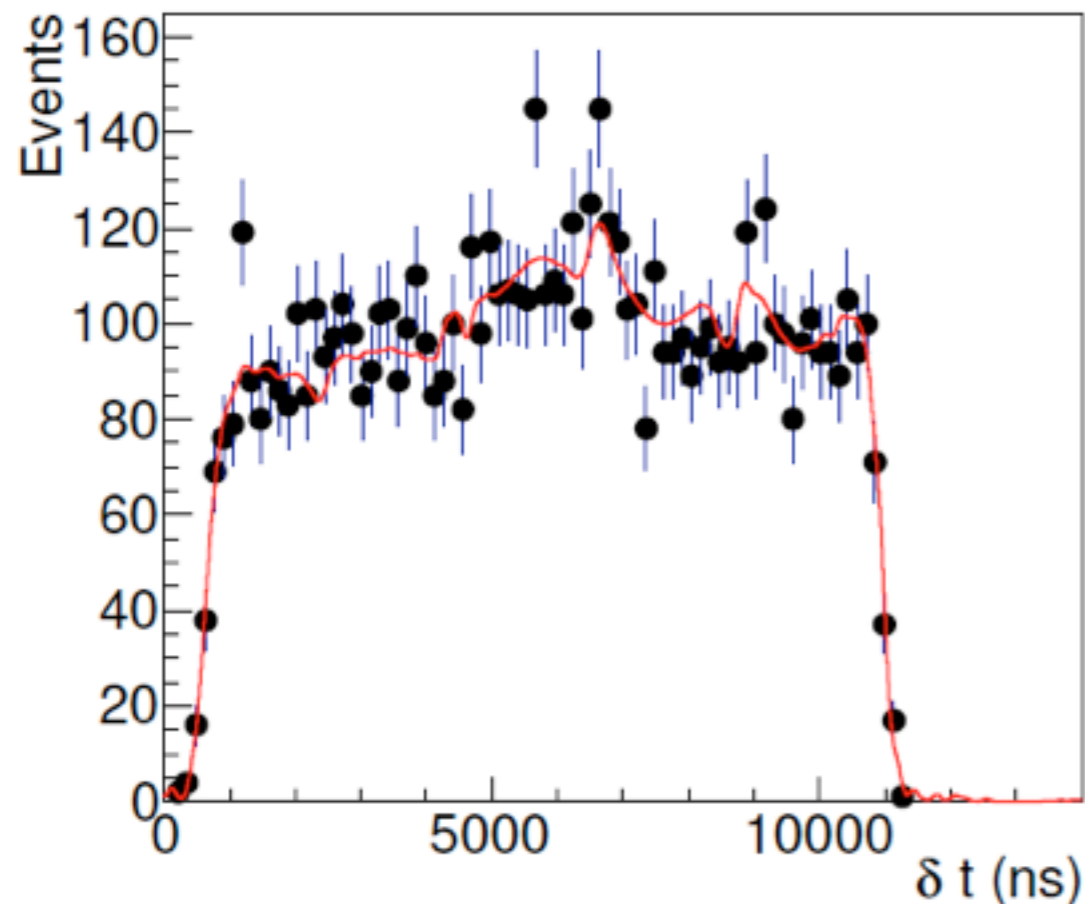
- Messung der Neutrino-Laufzeit - Synchronisation von CERN und Opera mit GPS



# Erster Versuch - Spektakuläres Resultat

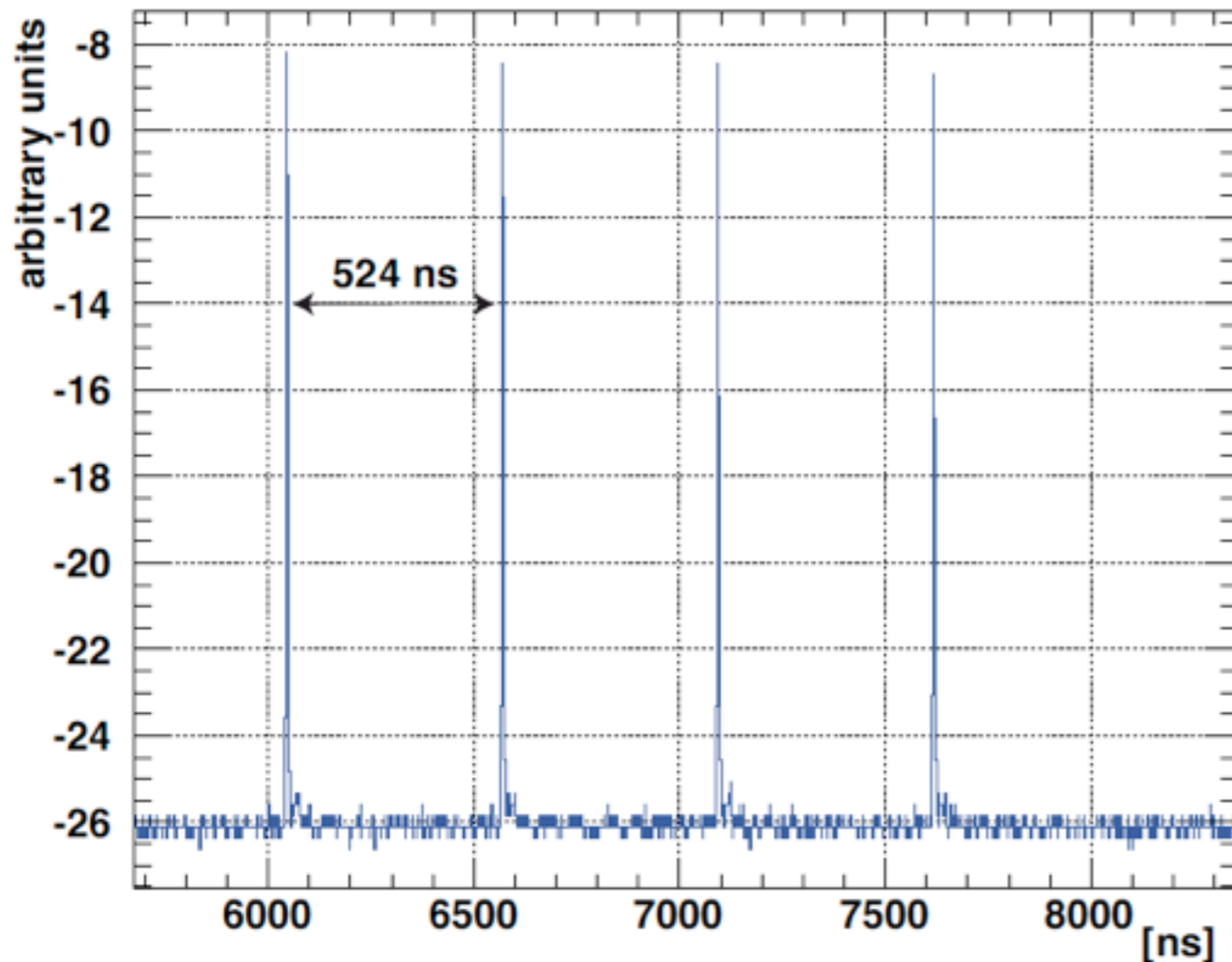
- September 2011: Opera beobachtet, dass die Neutrinos 60 ns zu schnell sind (bei einem Fehler von gut 10 ns).

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!



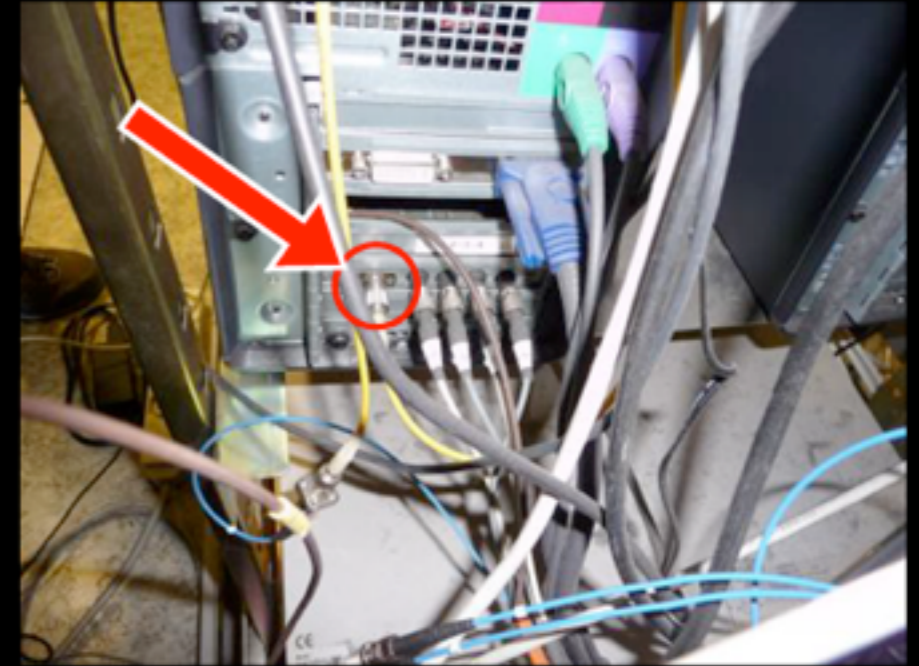
Bestätigt ursprüngliches Ergebnis:  
Strahlstruktur als Ursache  
ausgeschlossen

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

... aber Achtung: Fuer Signal-Laufzeiten in der Elektronik gibt es Korrekturen von 40  $\mu$ 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

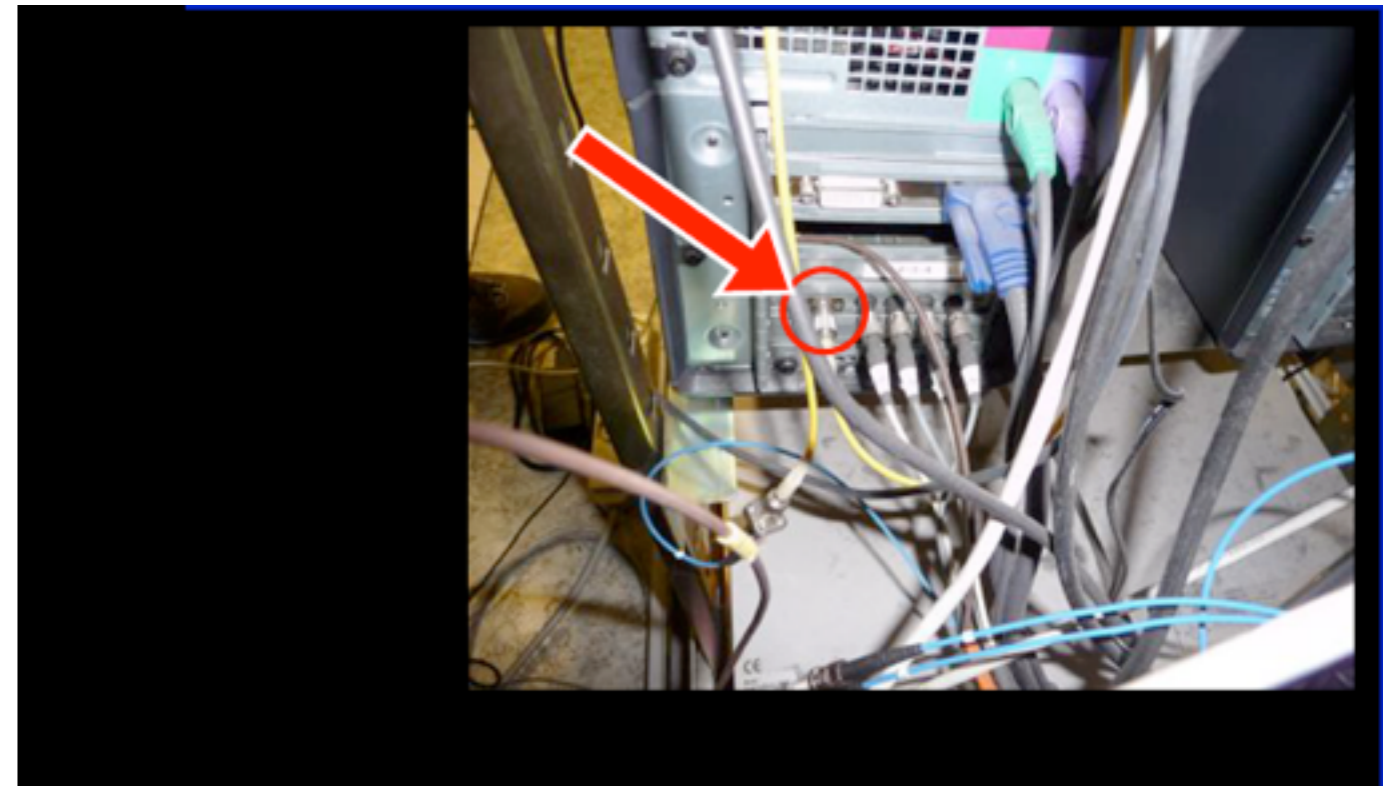


14 December 2011

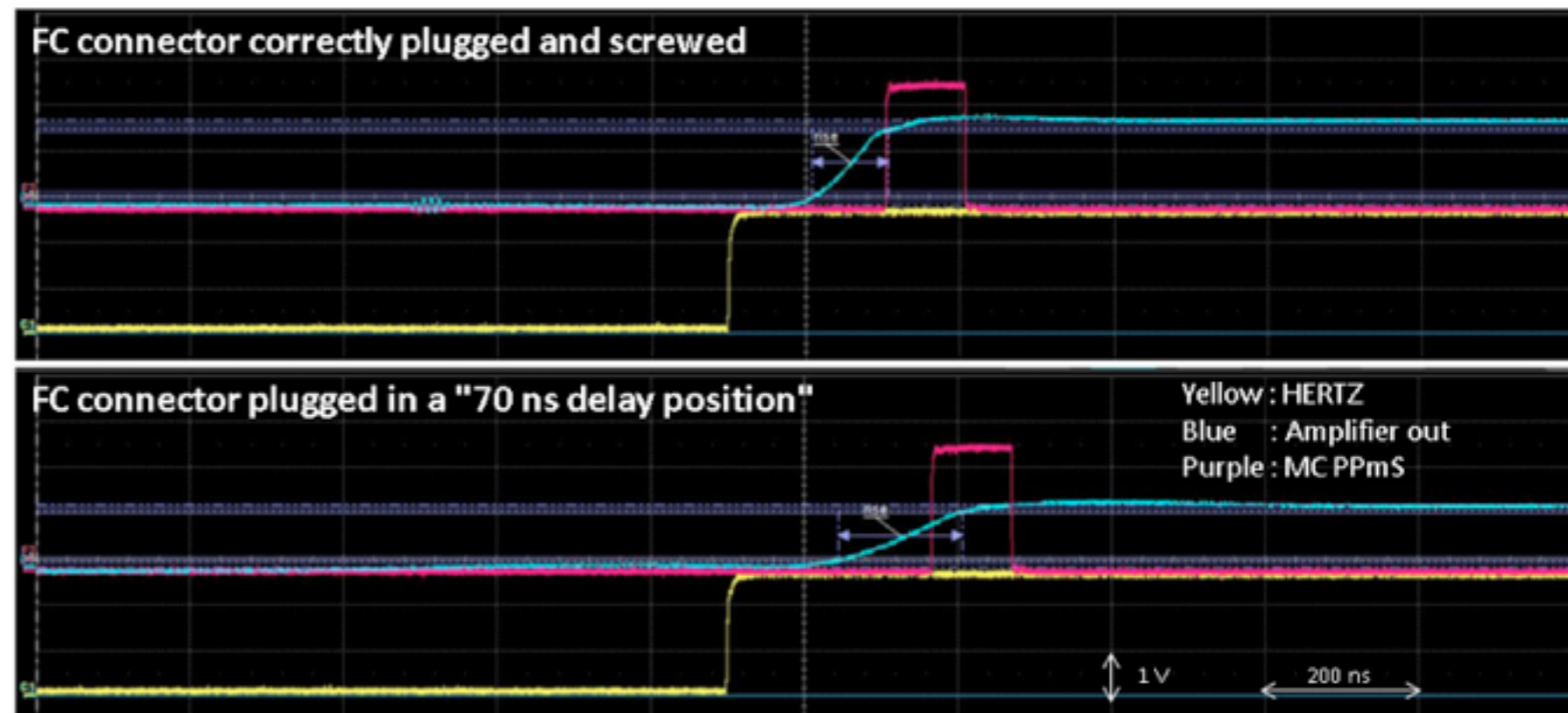
8

# 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...

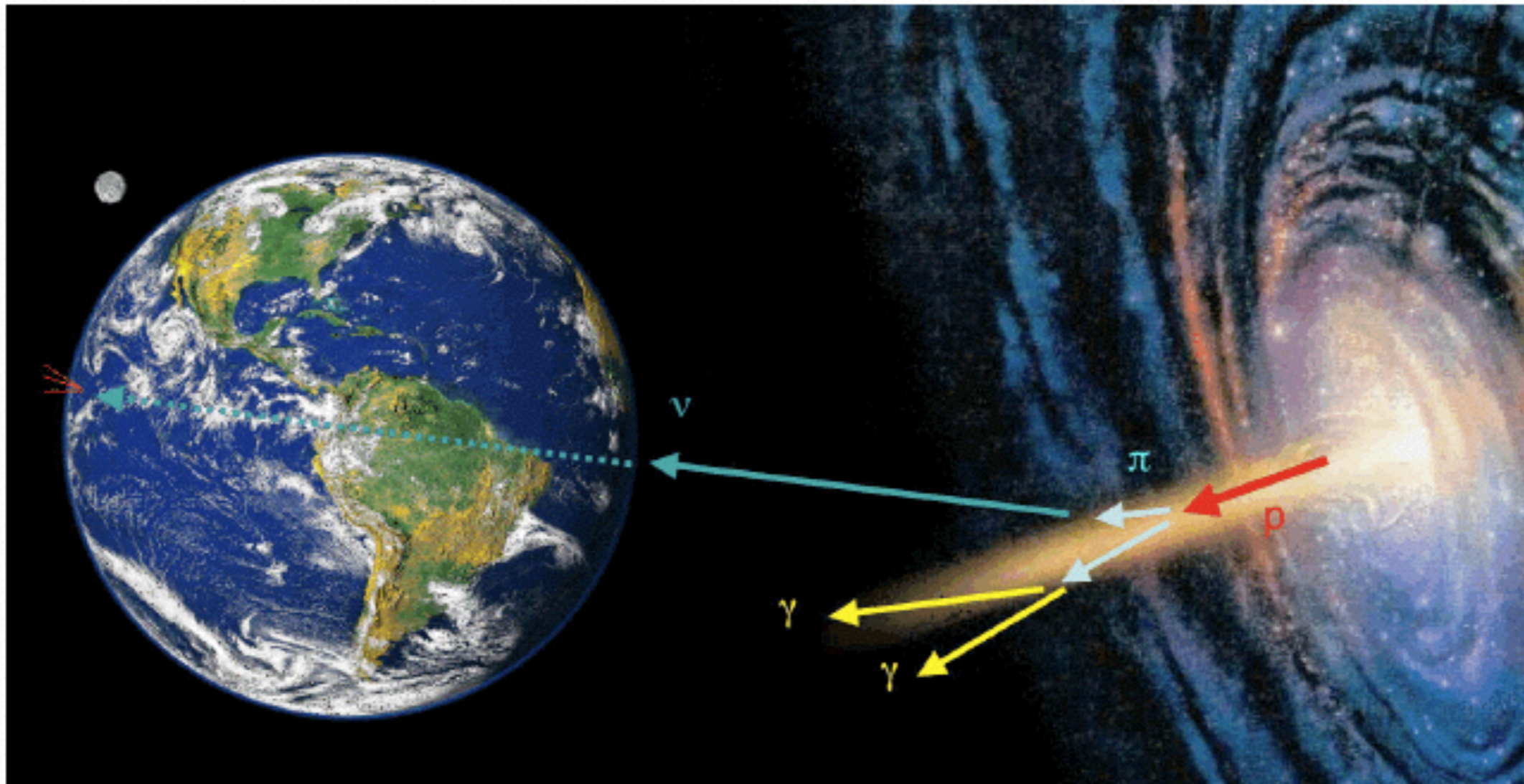


Jetzt: Die Flugzeit ist genau richtig, innerhalb von wenigen ns!



# 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:

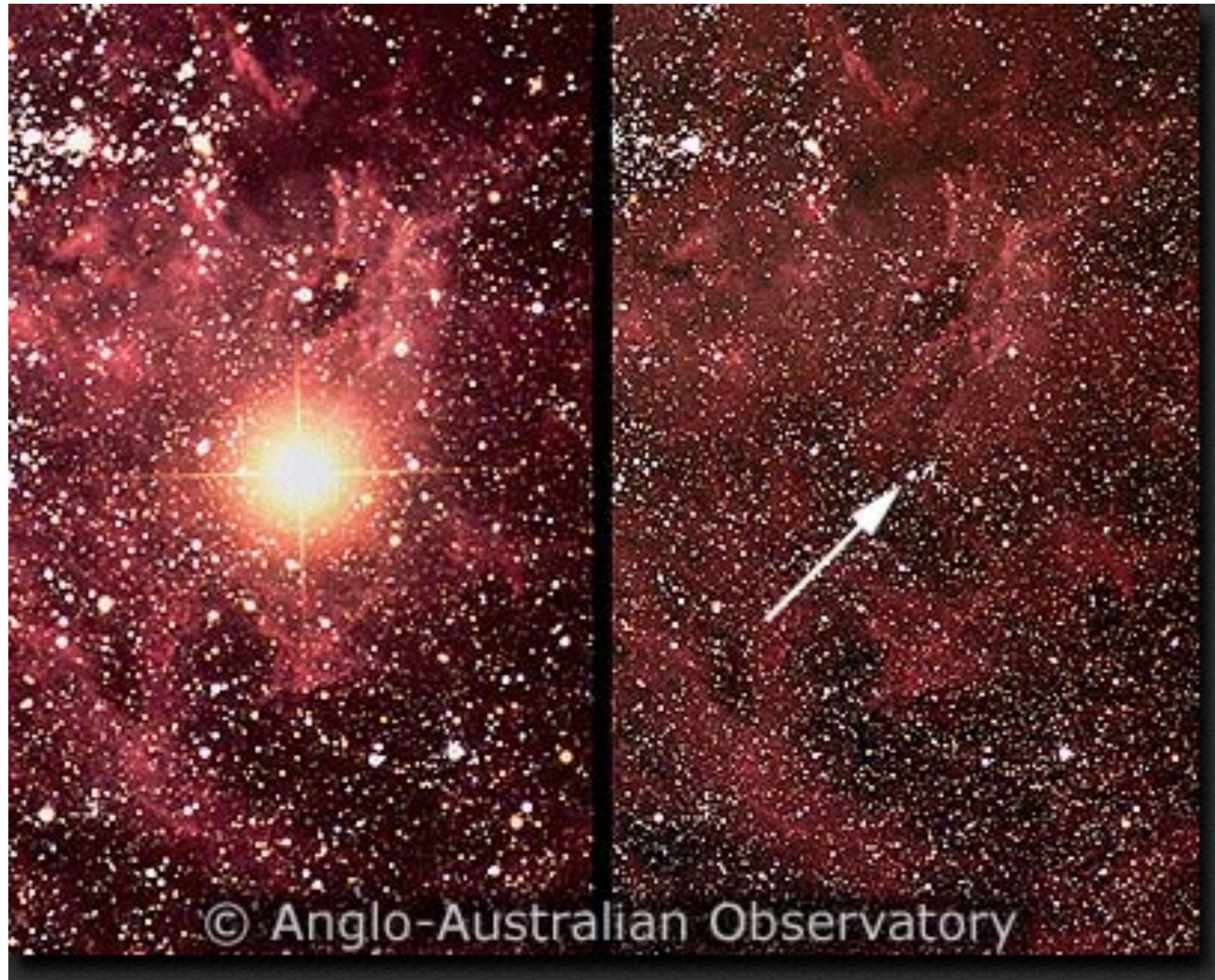
Neutrinos sind erst einmal das einzige, was nach aussen dringen kann, alles andere wird im dichten, kollabierenden Material absorbiert: Das Neutrino-Signal kommt vor dem optischen Signal der SN auf der Erde an!

- ▶ 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



# Eine alte Bekannte: Supernova SN1987a

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

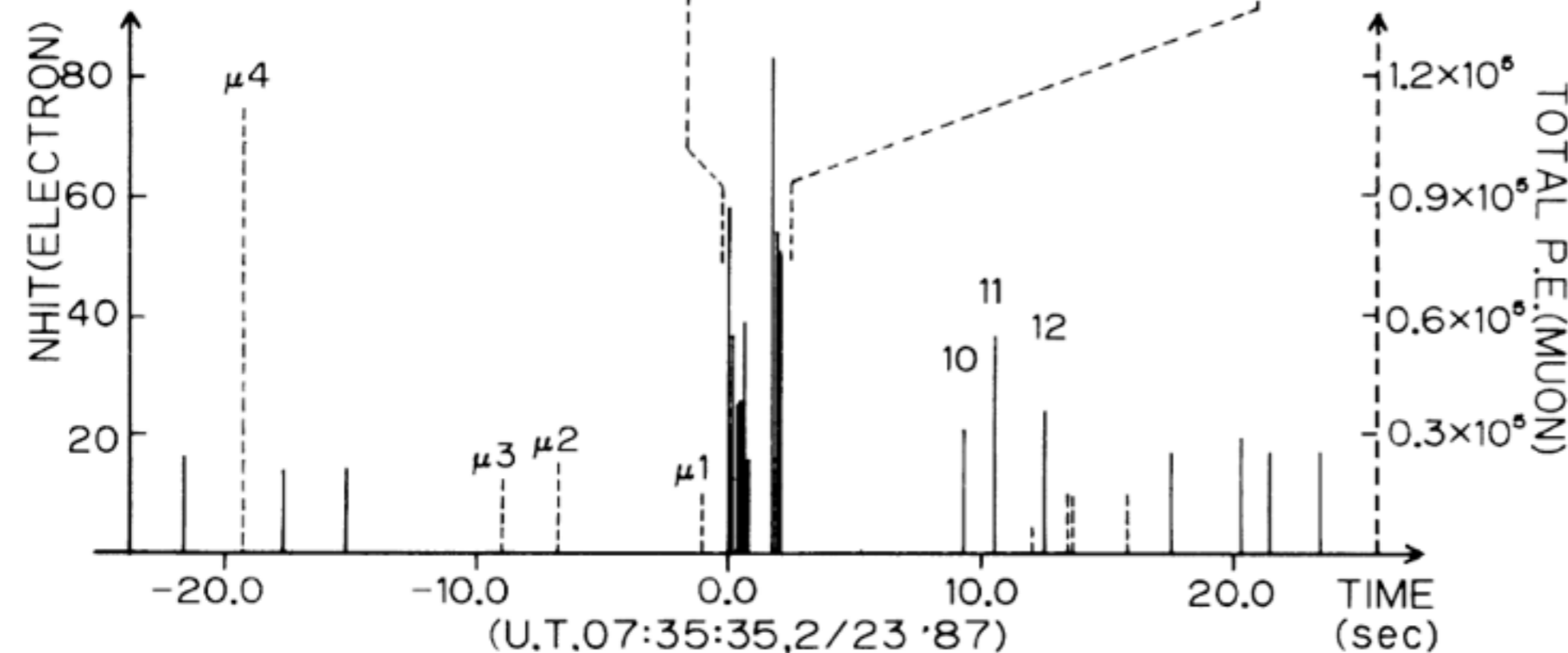
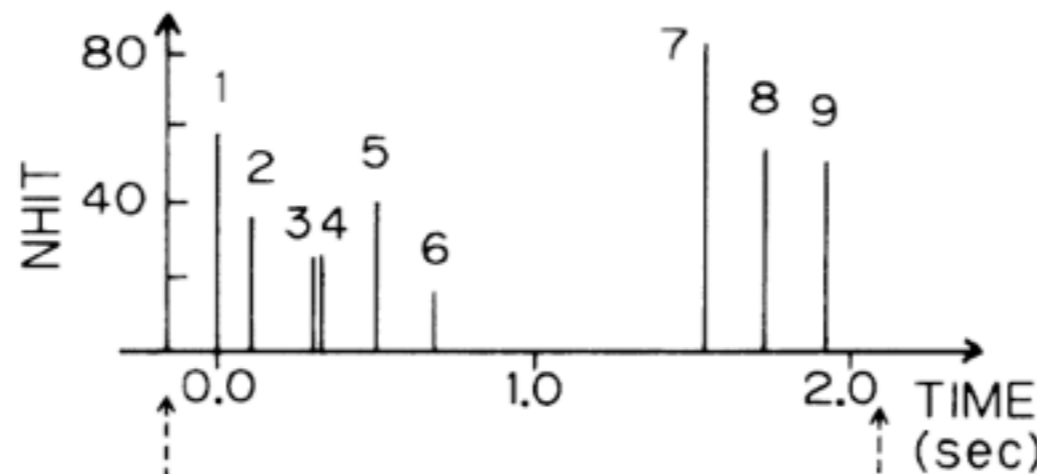


# Kamiokande Signal

- 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

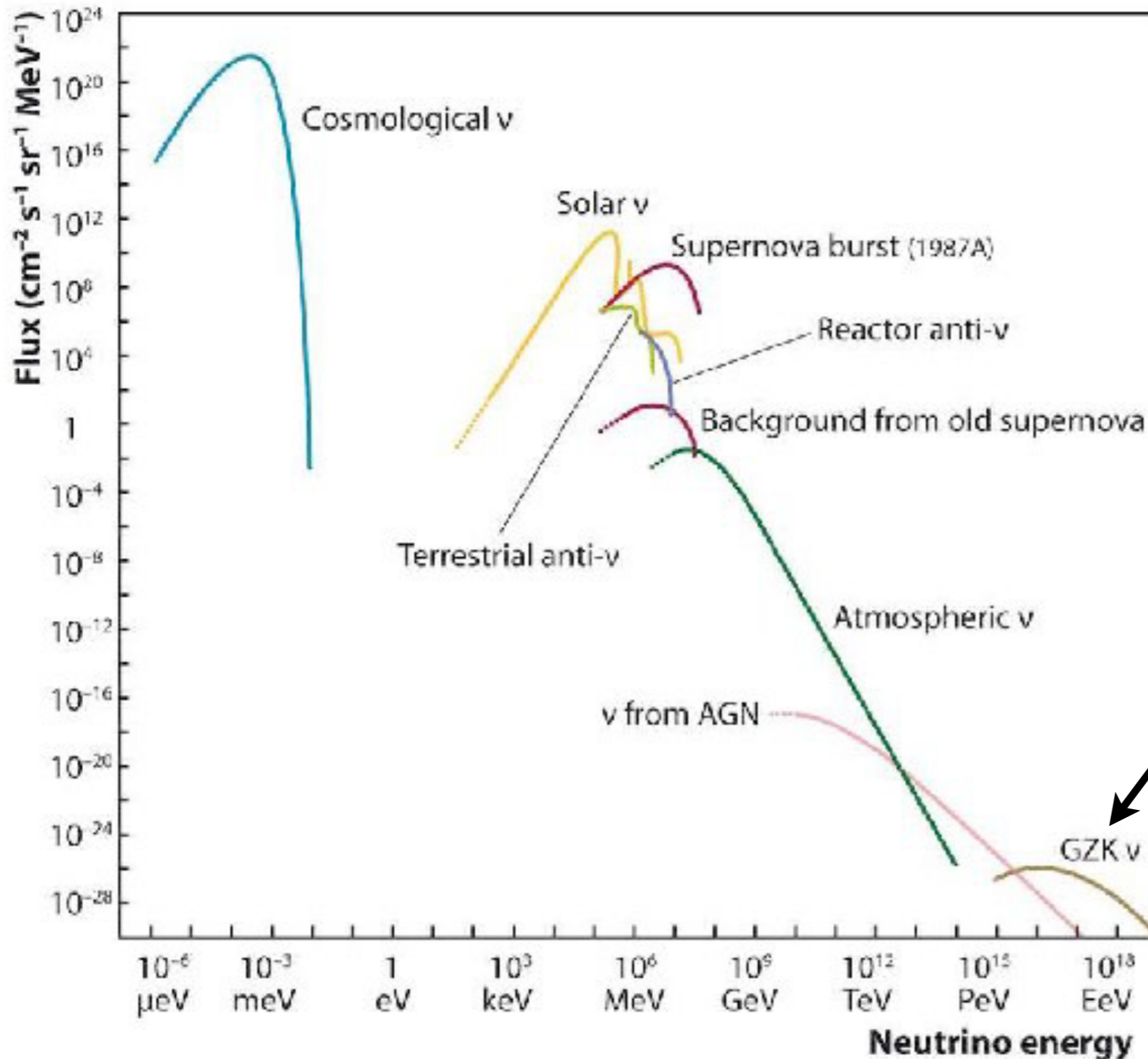


Nur  $\bar{\nu}_e$ : Höchste Nachweiswahrscheinlichkeit, niedrigste Energieschwelle

PRL 58, 1490 (1987)



# Kosmische Neutrinos: Erwartungen



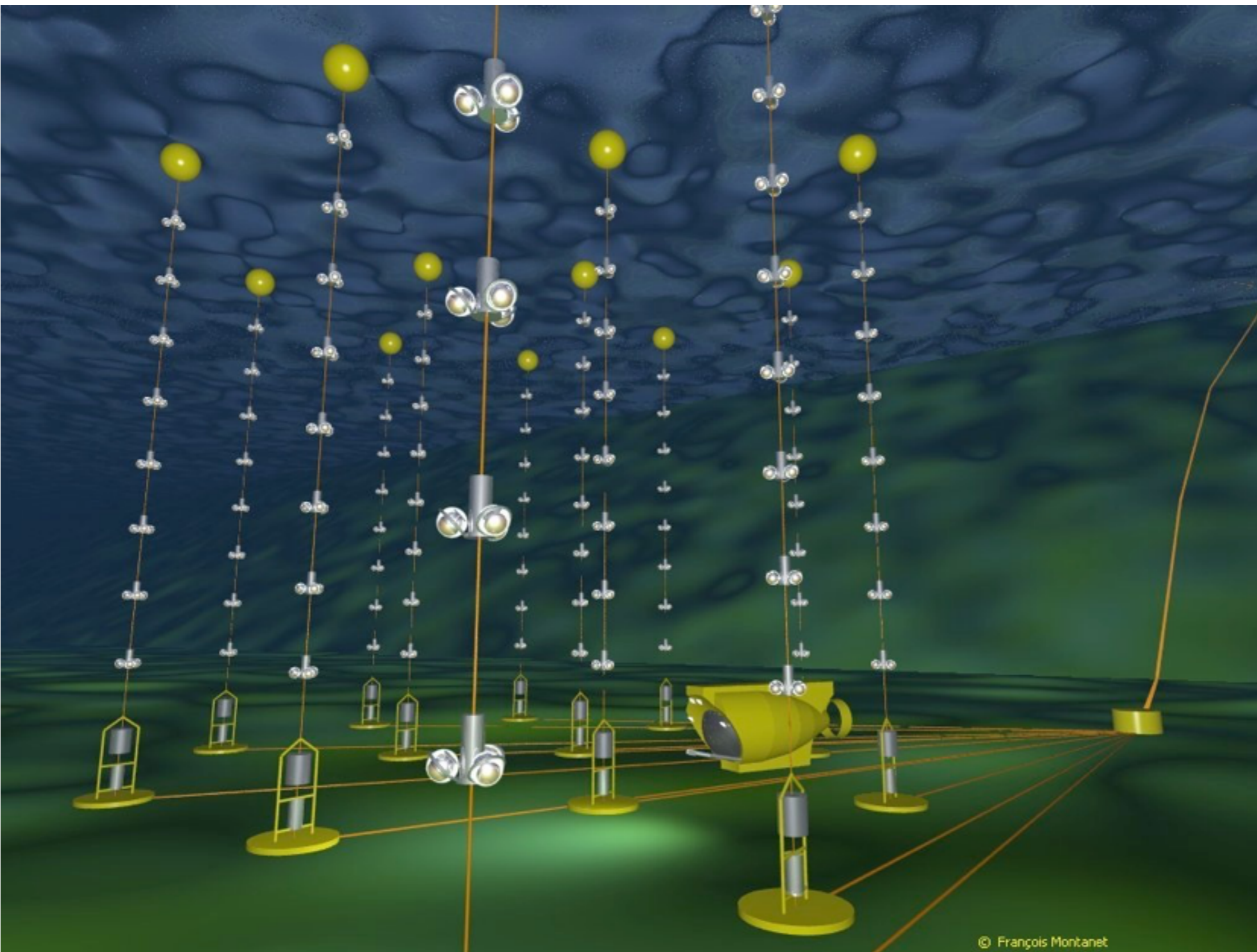
kosmogenische Neutrinos: Erzeugt durch den Zerfall von Pionen aus GZK-Ereignissen: Können Hinweise zu den Quellen der höchstenergetischen Teilchen liefern

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
    - Amanda/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

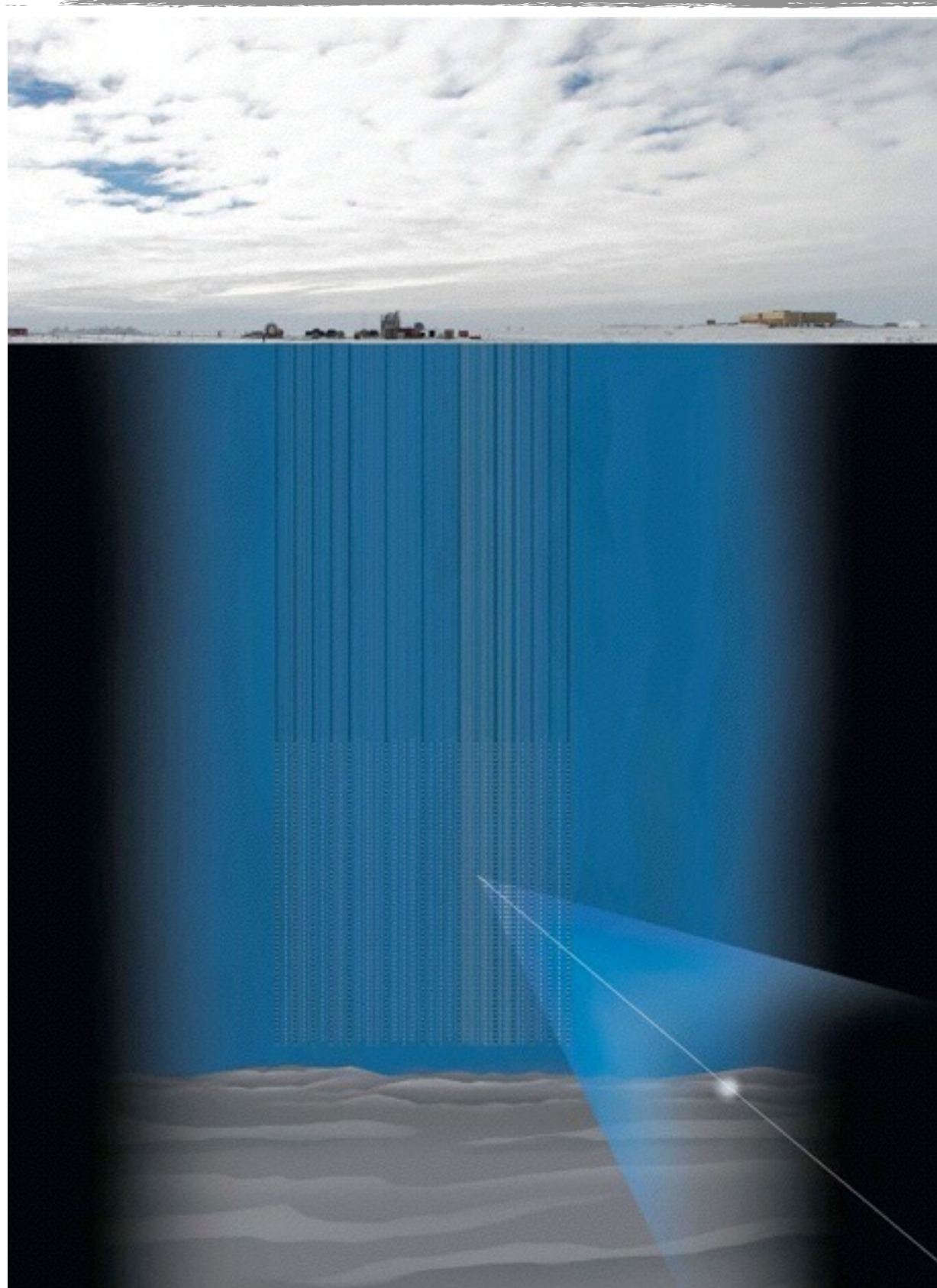
# Antares



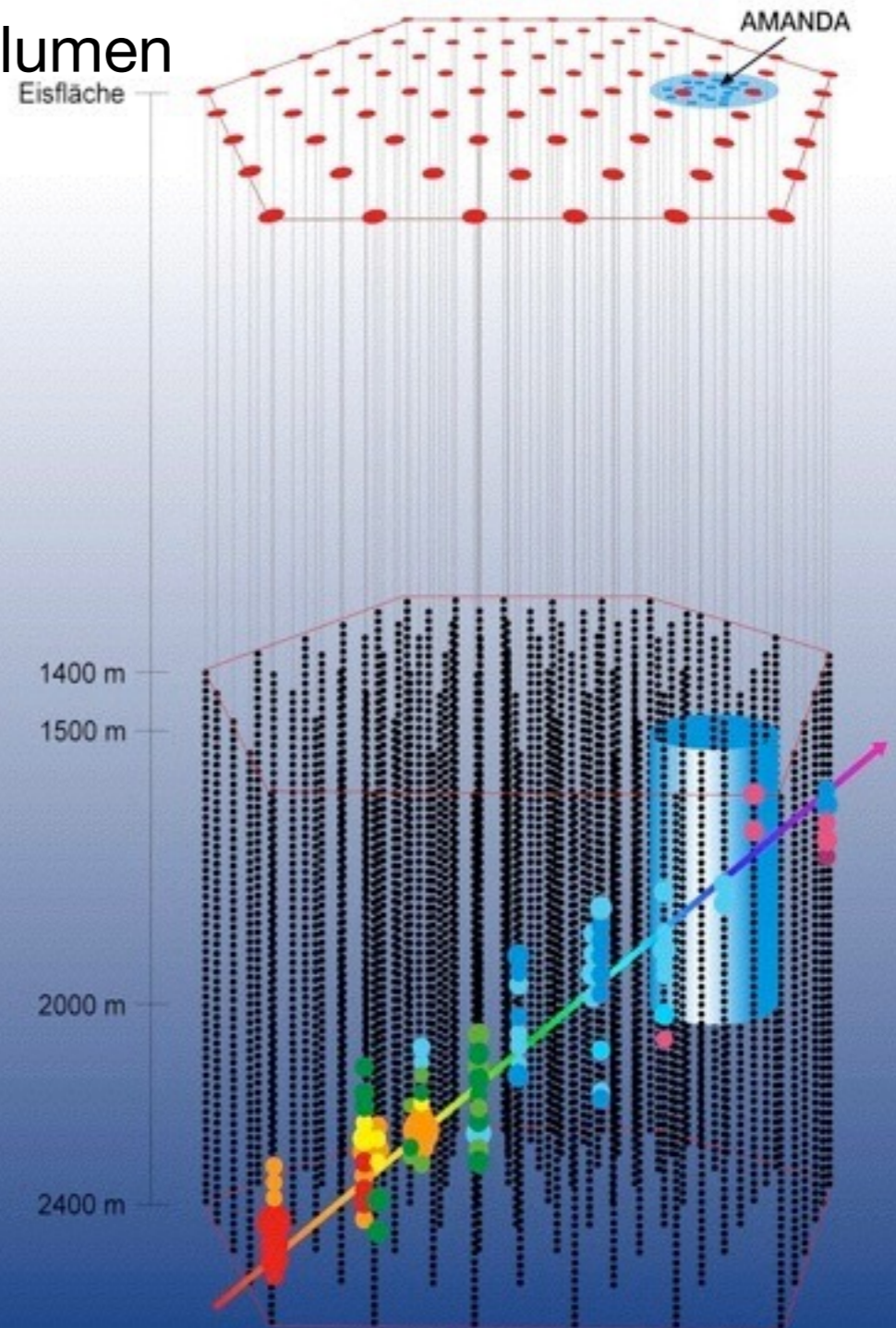
- in 2.5 km Tiefe vor der Küste Südfrankreichs

© François Montanet

# Amanda/IceCube



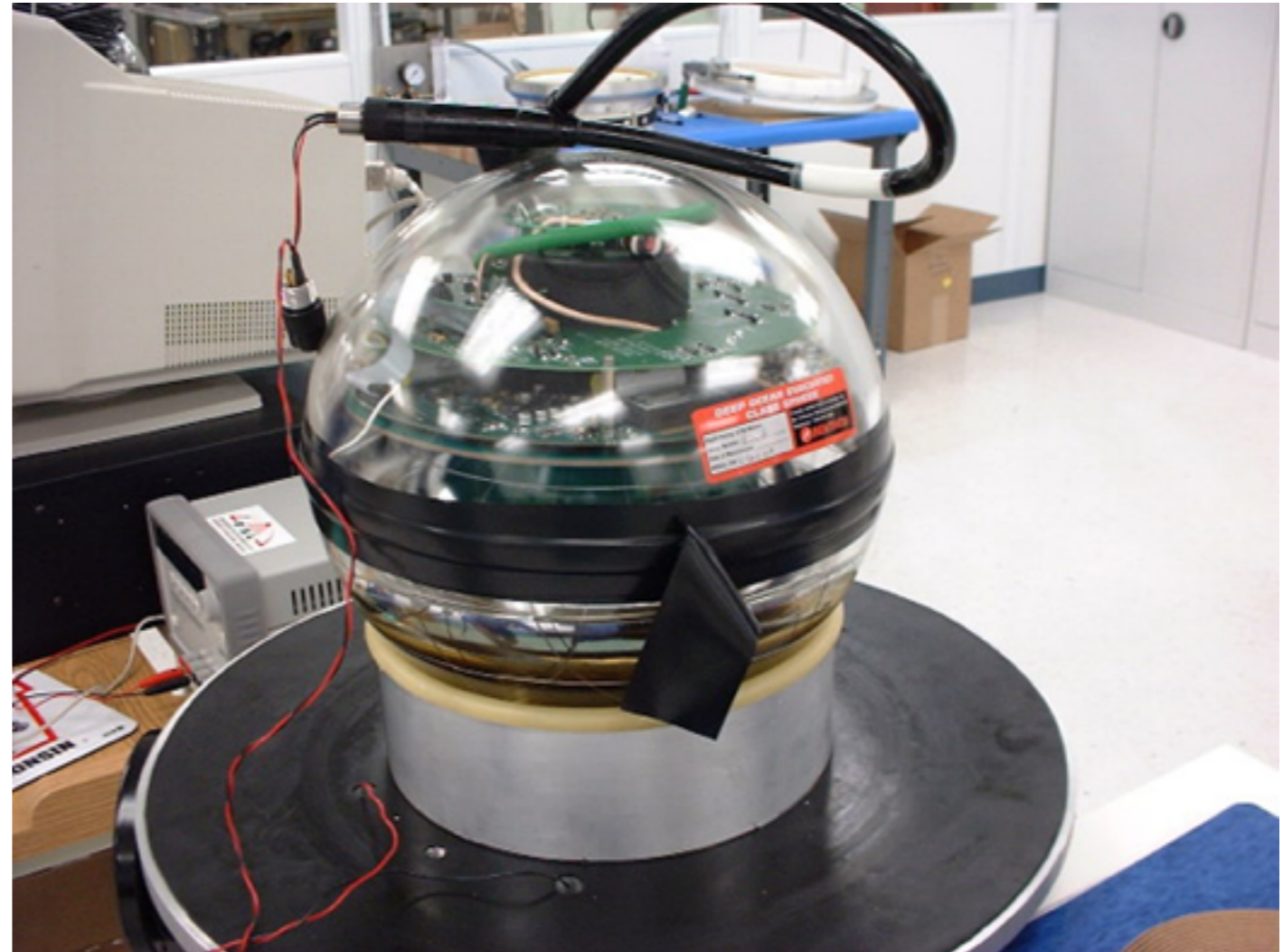
IceCube: 1 km<sup>3</sup> Instrumentiertes  
Volumen



# Amanda/IceCube: Neutrinos am Südpol



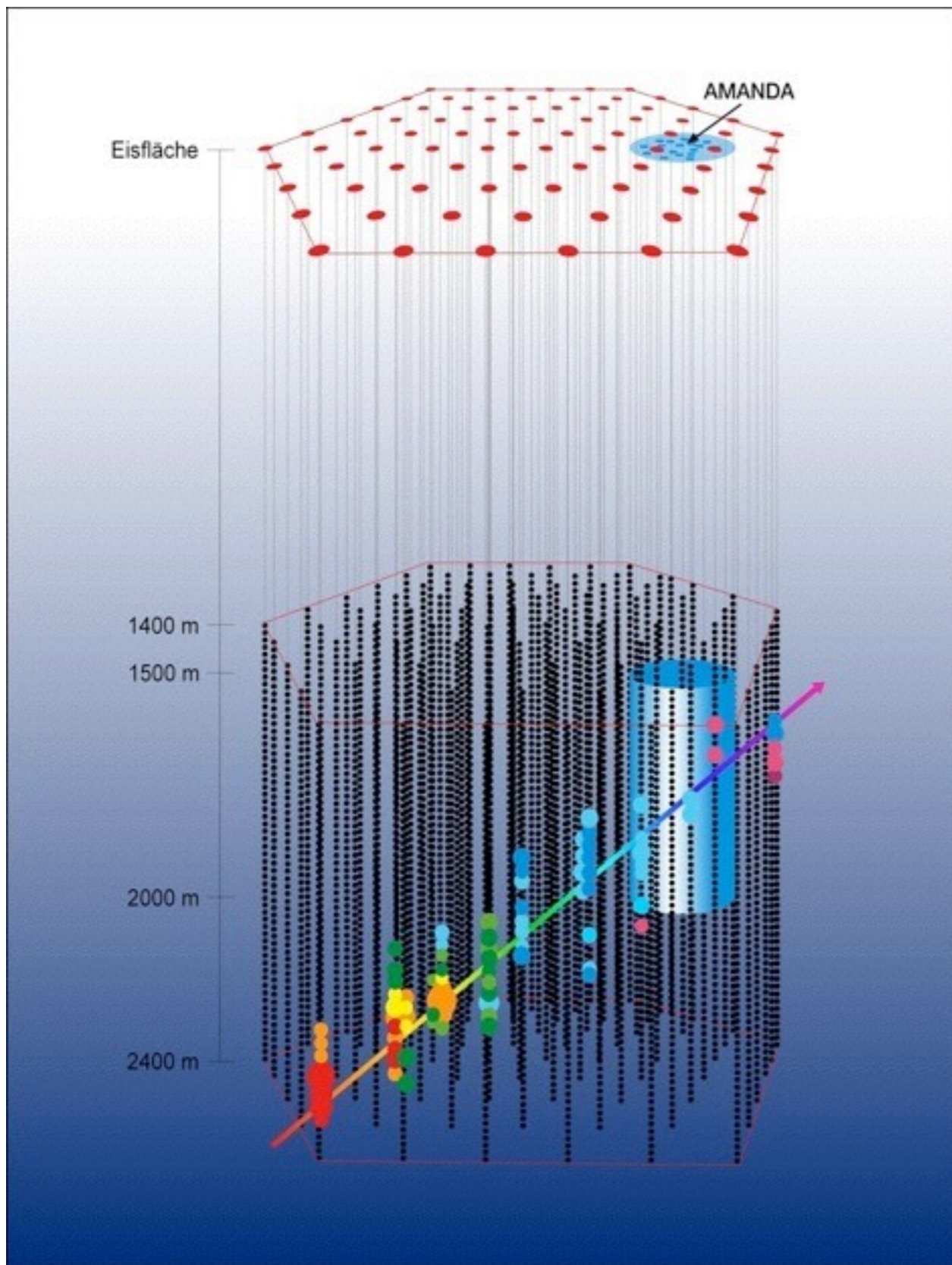
# Amanda/IceCube: Neutrinos am Südpol



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



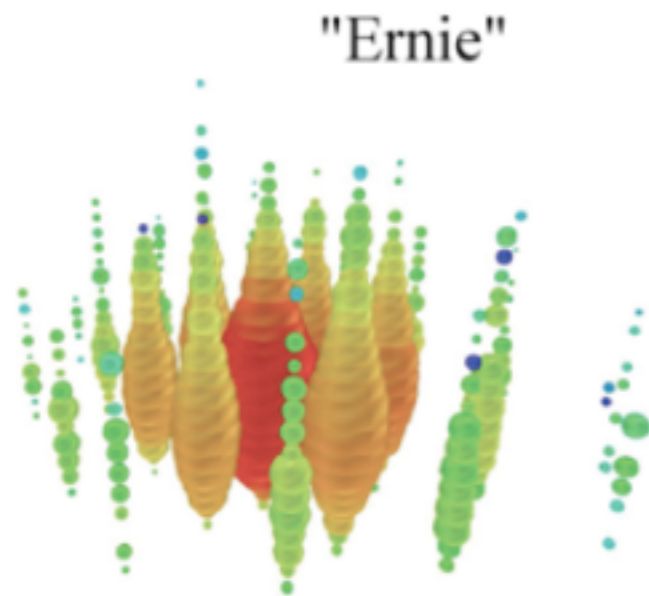
# IceCube-Ereignis



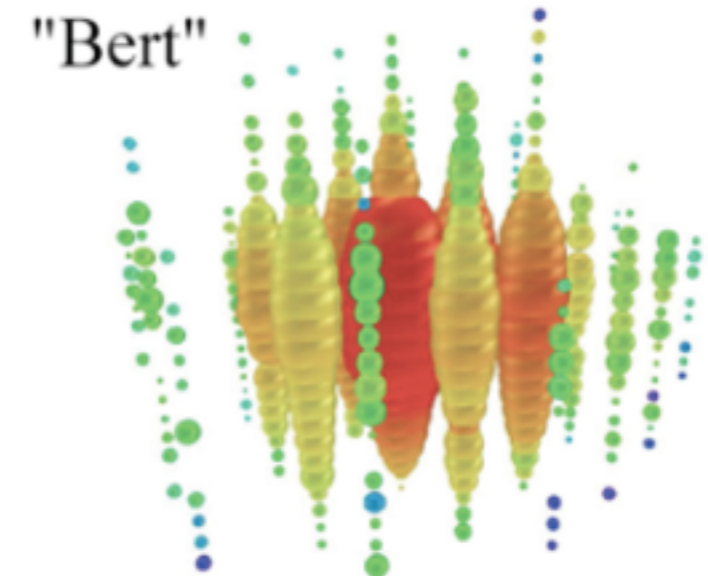
- Ankunftszeiten des Lichts bei den einzelnen Detektoren ermöglicht die Bestimmung der Richtung des Myons und damit der Richtung des Neutrinos

# Höchste Energien - Erste Beobachtung 2012

- 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)
- Erfordert spezielle Ereignis-Auswahl, um atmosphärische Neutrinos auszuschliessen

# Höchste Energien - Erste Beobachtung 2012

- IceCube hat zwei Ereignisse beobachtet:

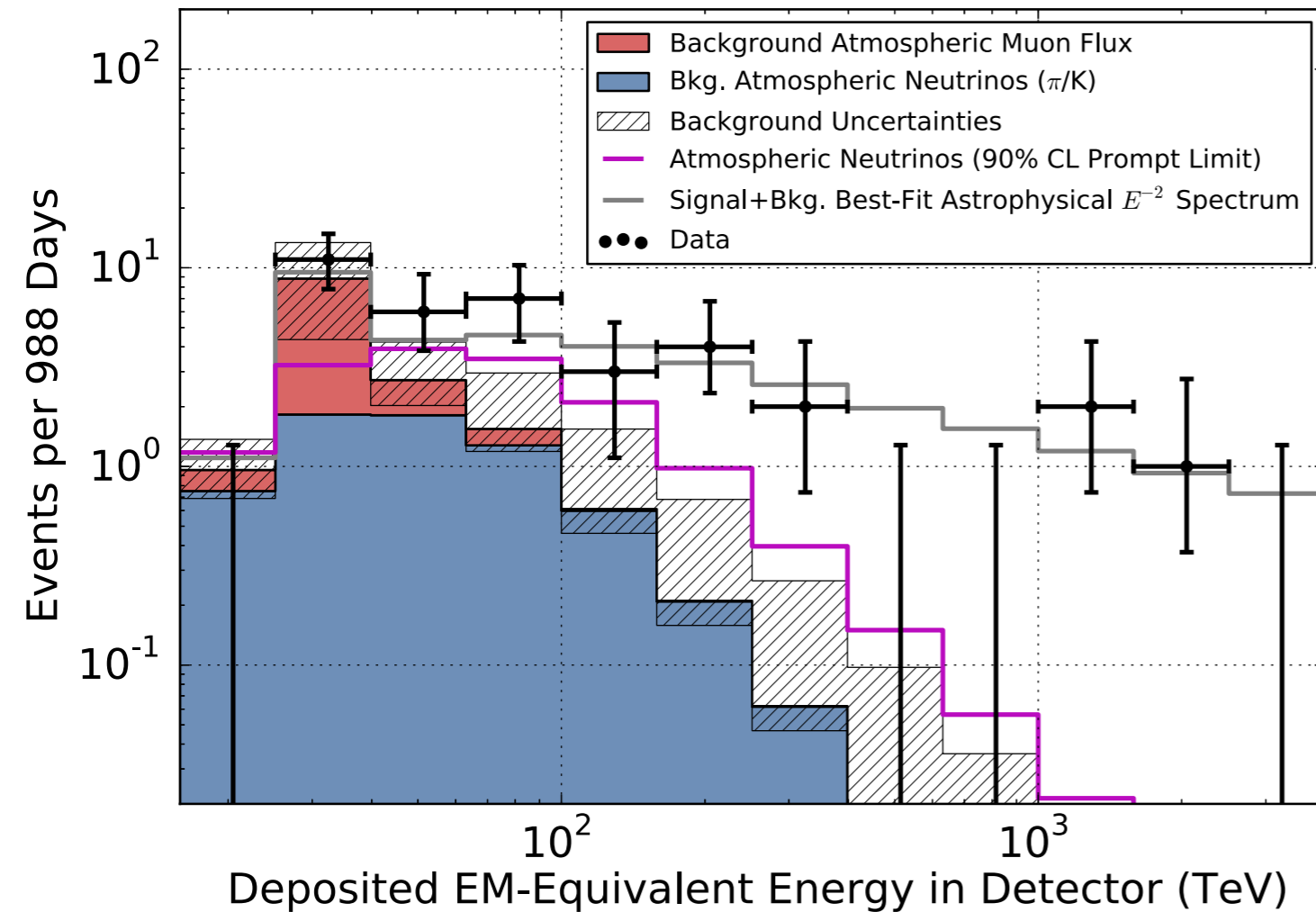


(sichtbare Energie im Detektor, Neutrinoenergie höher)

- Beide Ereignisse sind “down-going” (wie erwartet)
- Erfordert spezielle Ereignis-Auswahl, um atmosphärische Neutrinos auszuschliessen

Inzwischen sogar ein Ereignis bei 2 PeV, insgesamt 37 Ereignisse  $> 30$  TeV

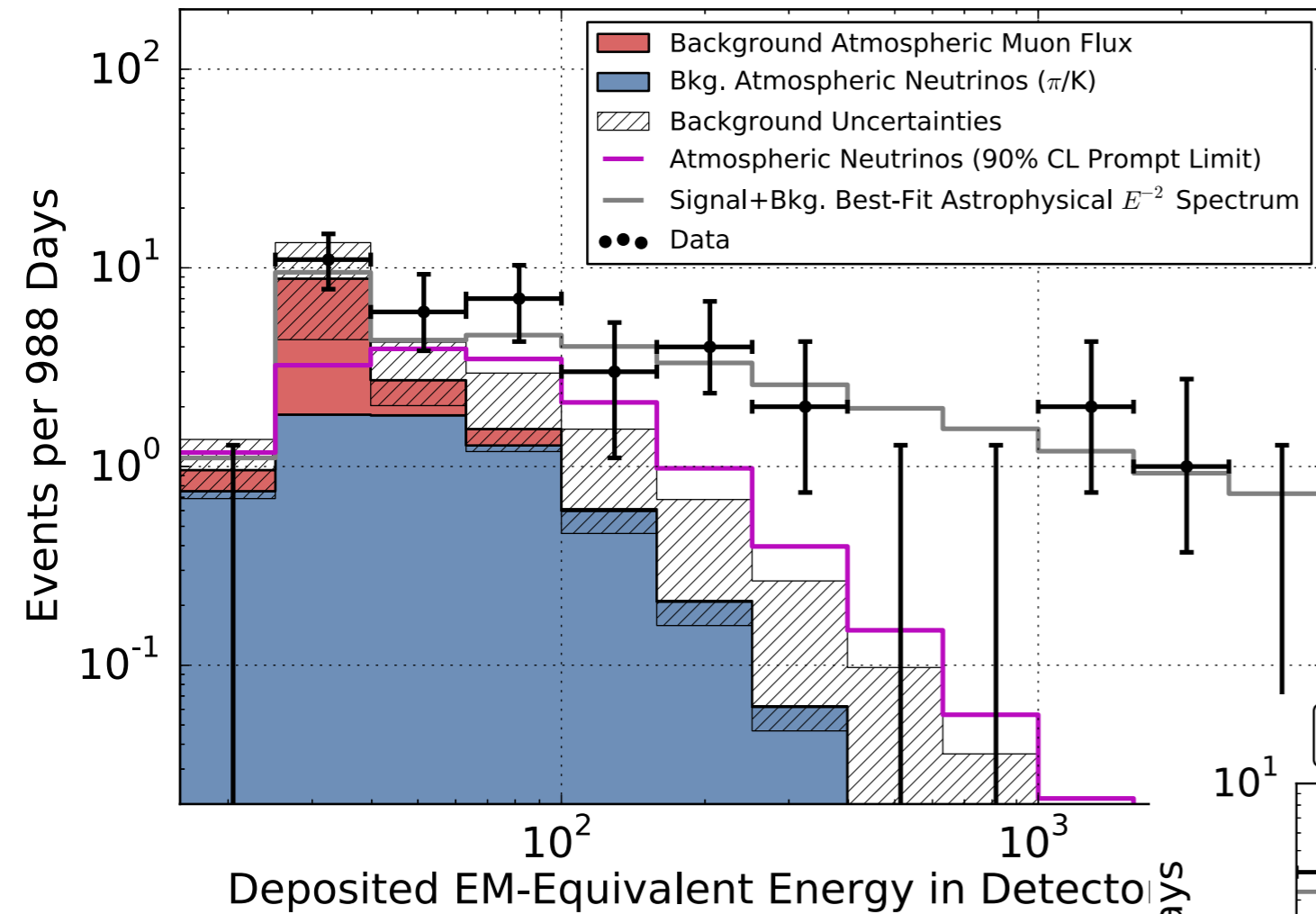
# Neutrinos bei höchsten Energien



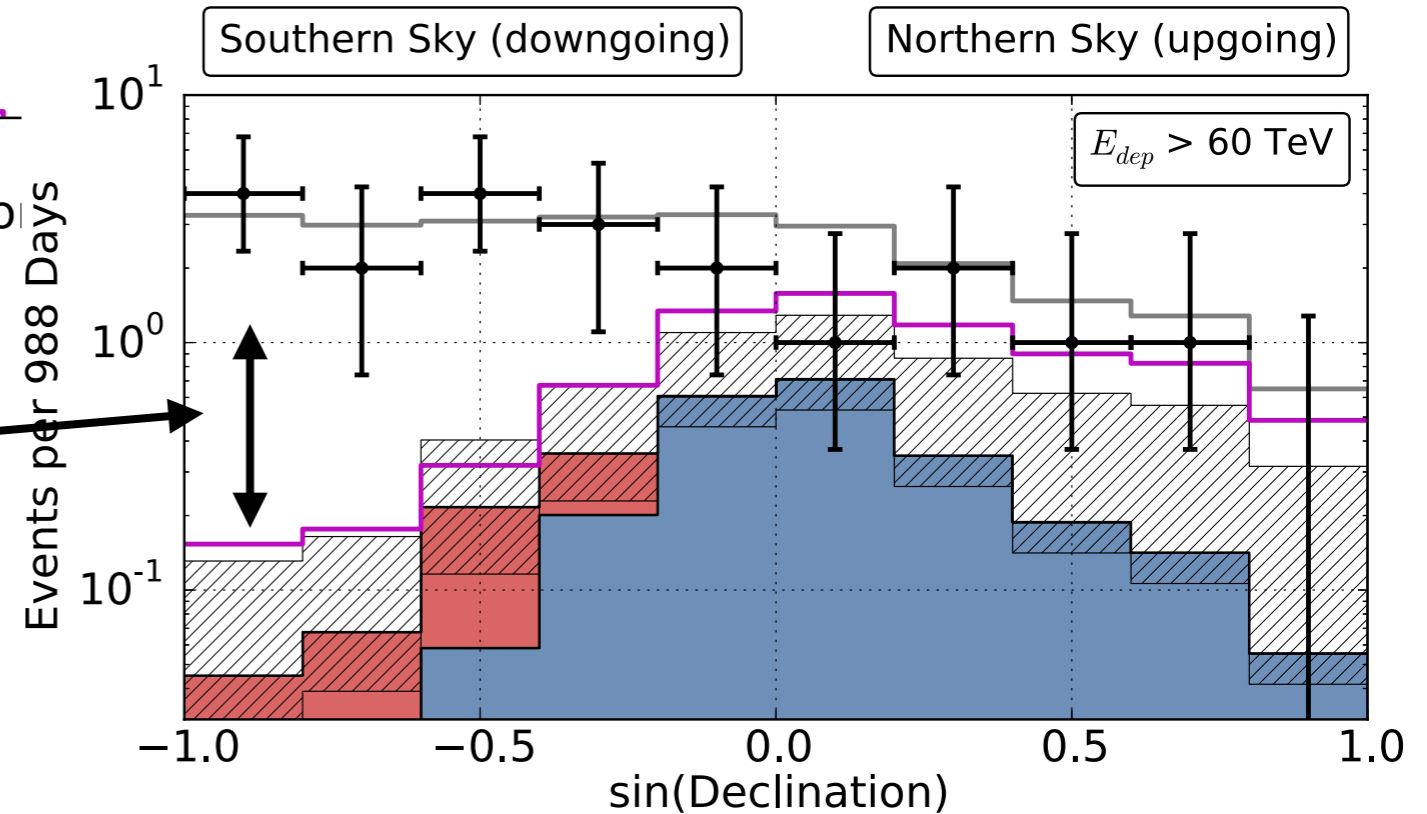
- Atmosphärischer Untergrund mit  $5.7 \sigma$  ausgeschlossen
- Daten konsistent mit einem kosmischen Neutrinofluss mit  $E^{-2}$

Bis jetzt keine einzelnen Quellen /  
Korrelation mit bekannten  
Quellen / deutliche Anisotropien  
beobachtet

# Neutrinos bei höchsten Energien



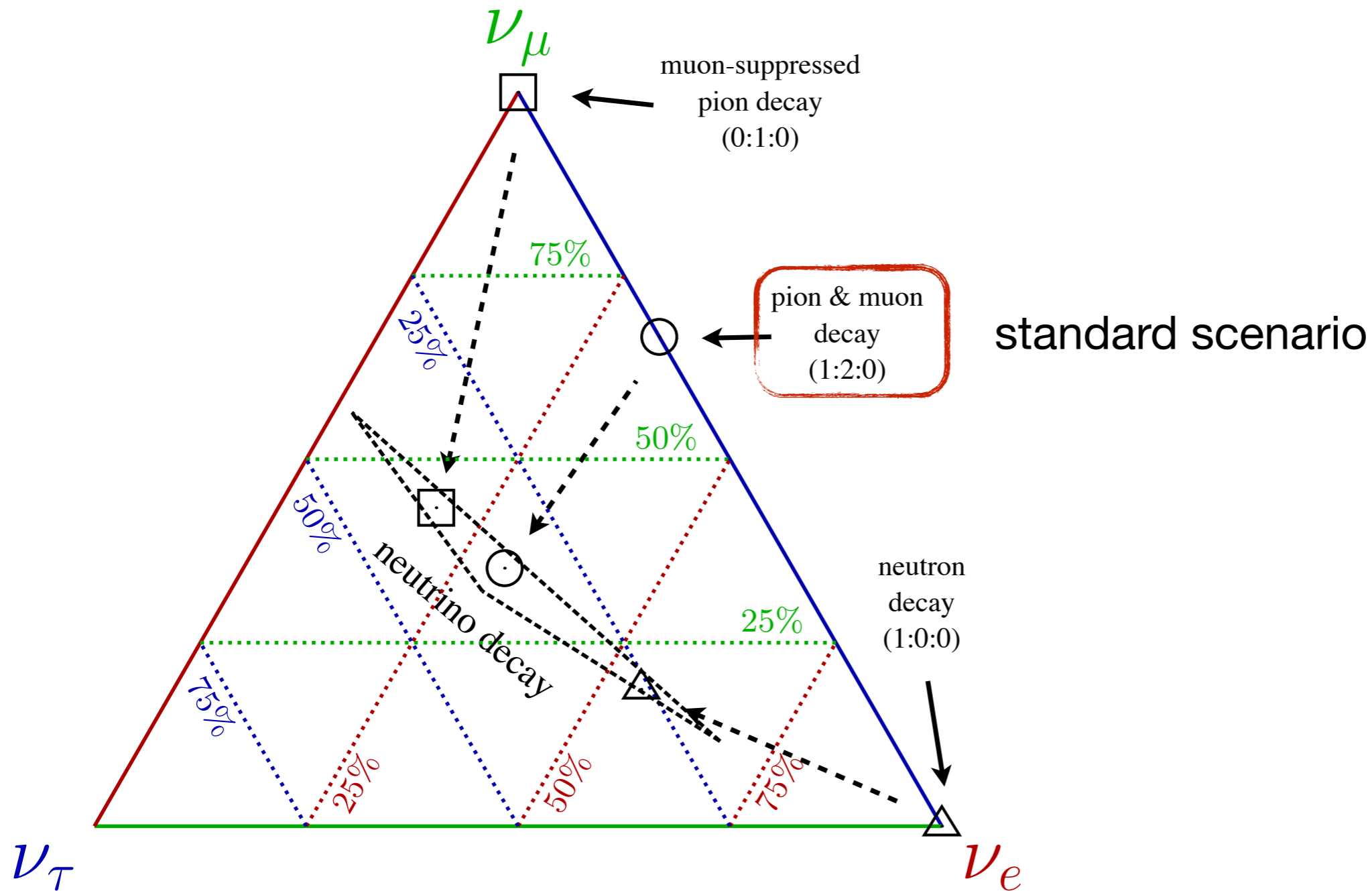
- Atmosphärischer Untergrund mit  $5.7 \sigma$  ausgeschlossen
- Daten konsistent mit einem kosmischen Neutrinofluss mit  $E^{-2}$



Effektivität des Ausschlusses von atmosphärischen Neutrinos  
 Bis jetzt keine einzelnen Quellen / Korrelation mit bekannten Quellen / deutliche Anisotropien beobachtet

# Cosmic Neutrino Sources

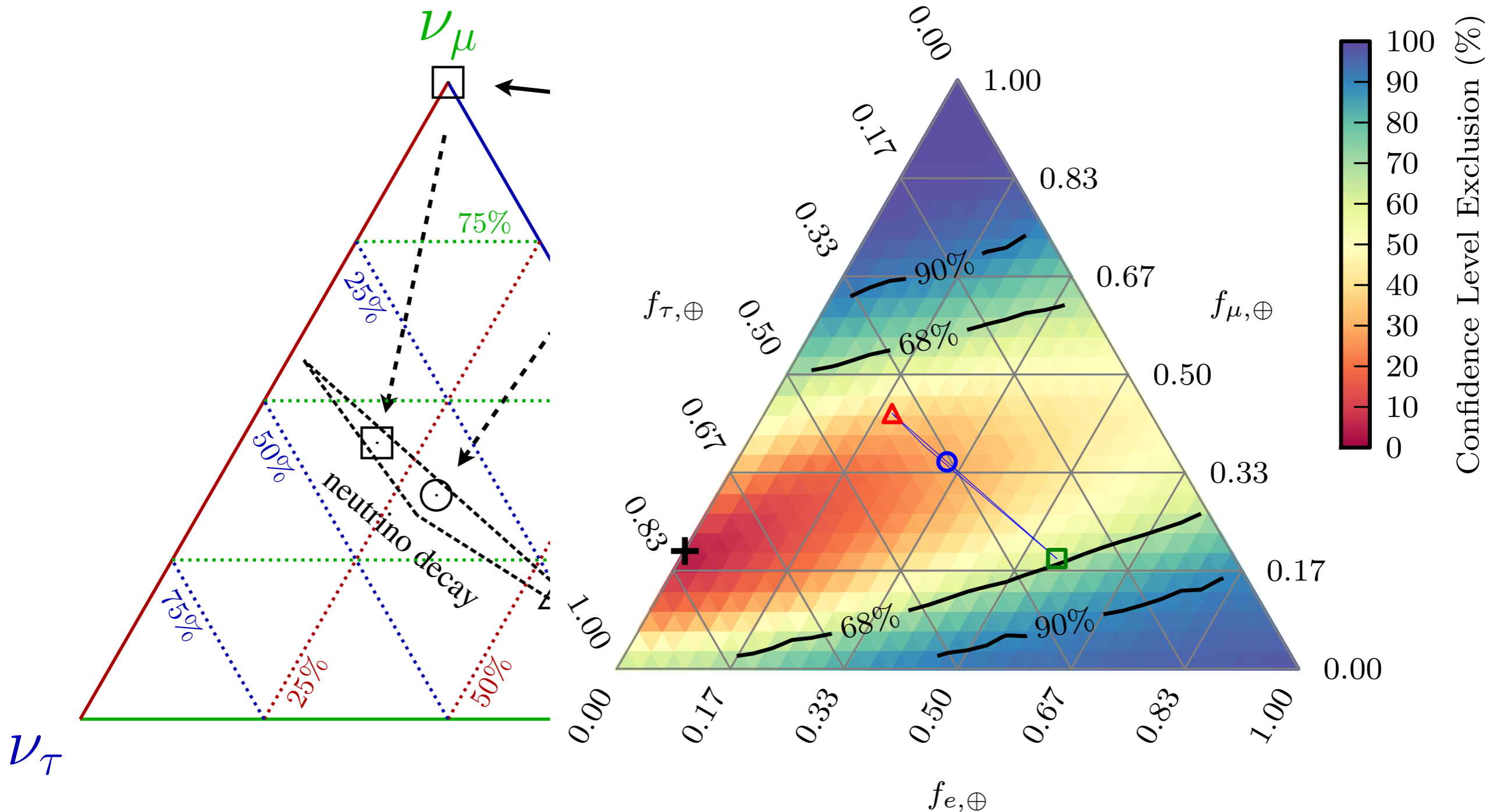
- Standard scenario: pion decay ( $\nu_\mu$ ), then muon decay ( $\nu_\mu + \nu_e$ ):  
Source composition (1 : 2 : 1) - evolves due to neutrino oscillations



standard scenario

# Cosmic Neutrino Sources

- Standard scenario: pion decay ( $\nu_\mu$ ), then muon decay ( $\nu_\mu + \nu_e$ ):  
Source composition (1 : 2 : 1) - evolves due to neutrino oscillations



# Zusammenfassung

---

- Neutrinos sind die leichtesten Teilchen im Standard-Modell
  - Neutrinos haben Masse: Sie oszillieren - Es gibt (mindestens) drei verschiedene Massen-Eigenzustände, die nicht mit dem Flavor-Eigenzuständen identisch sind
  - 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

---

- Neutrinos sind die leichtesten Teilchen im Standard-Modell
  - Neutrinos haben Masse: Sie oszillieren - Es gibt (mindestens) drei verschiedene Massen-Eigenzustände, die nicht mit dem Flavor-Eigenzuständen identisch sind
  - 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: 06.07., “Neutrinos II”, S. Bethke



# Themenübersicht

13.04.	Einführung / Introduction
20.04.	<b>Achtung - keine Vorlesung! No Lecture!</b>
27.04.	Erdgebundene Beschleuniger / Accelerators
04.05.	Detektoren in der Nicht-Beschleuniger-Physik / Detectors
11.05.	Das Standardmodell / The Standard Model
18.05.	QCD und Jet Physik an Lepton Beschleunigern
25.05.	<b>Pfingsten - Keine Vorlesung! No Lecture</b>
01.06.	Kosmische Beschleuniger / Cosmic Accelerators
08.06.	Kosmische Strahlung I / Cosmic Rays I
15.06.	Kosmische Strahlung II / Cosmic Rays II
22.06.	Präzisionsexperimente (g-2) / Precision Experiments
29.06.	Neutrinos I
06.07.	Neutrinos II
13.07.	Dunkle Materie & Dunkle Energie / Dark Matter & Dark Energy