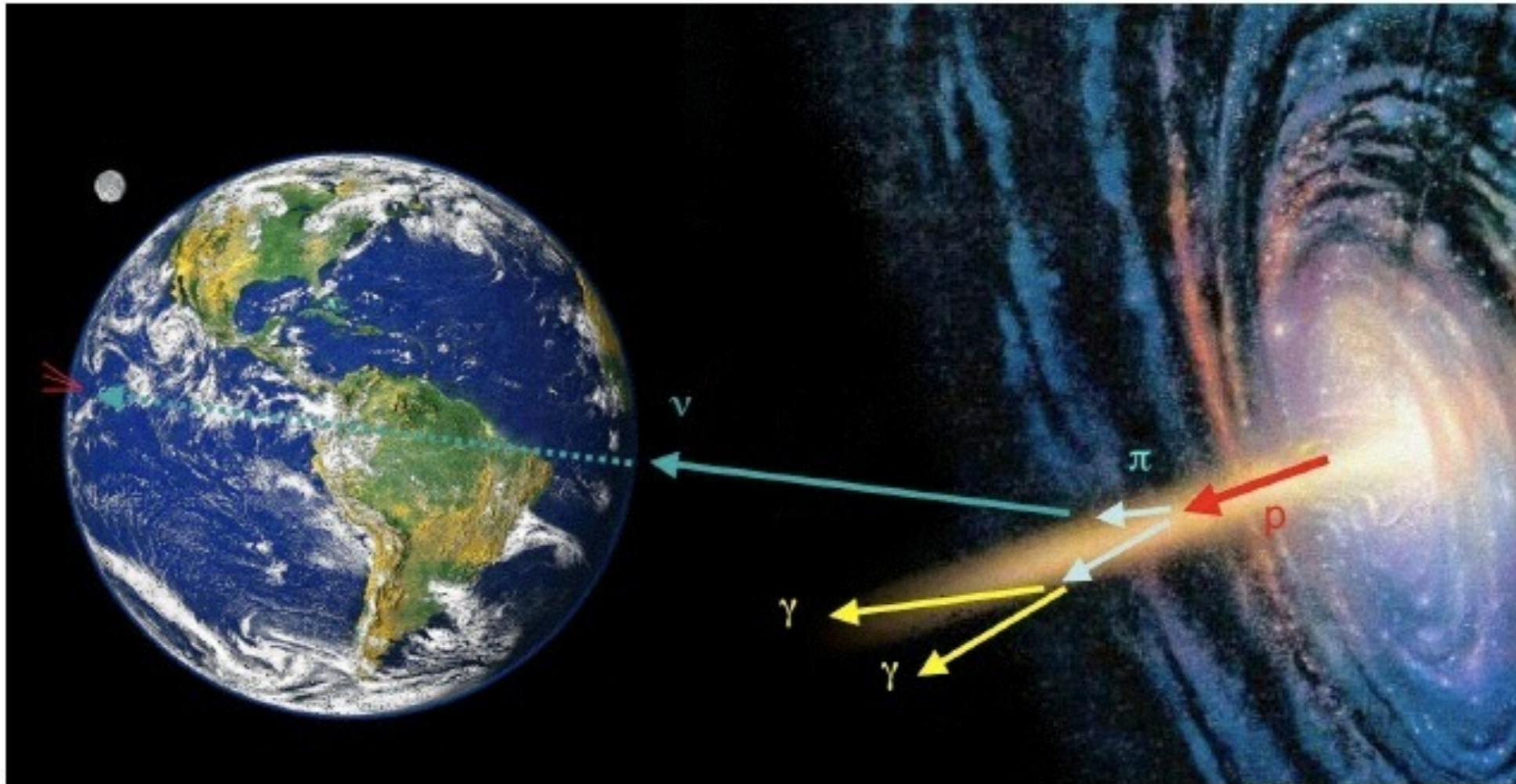


Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



11. Neutrinos I - Atmosphärische, Beschleuniger & Kosmische Neutrinos

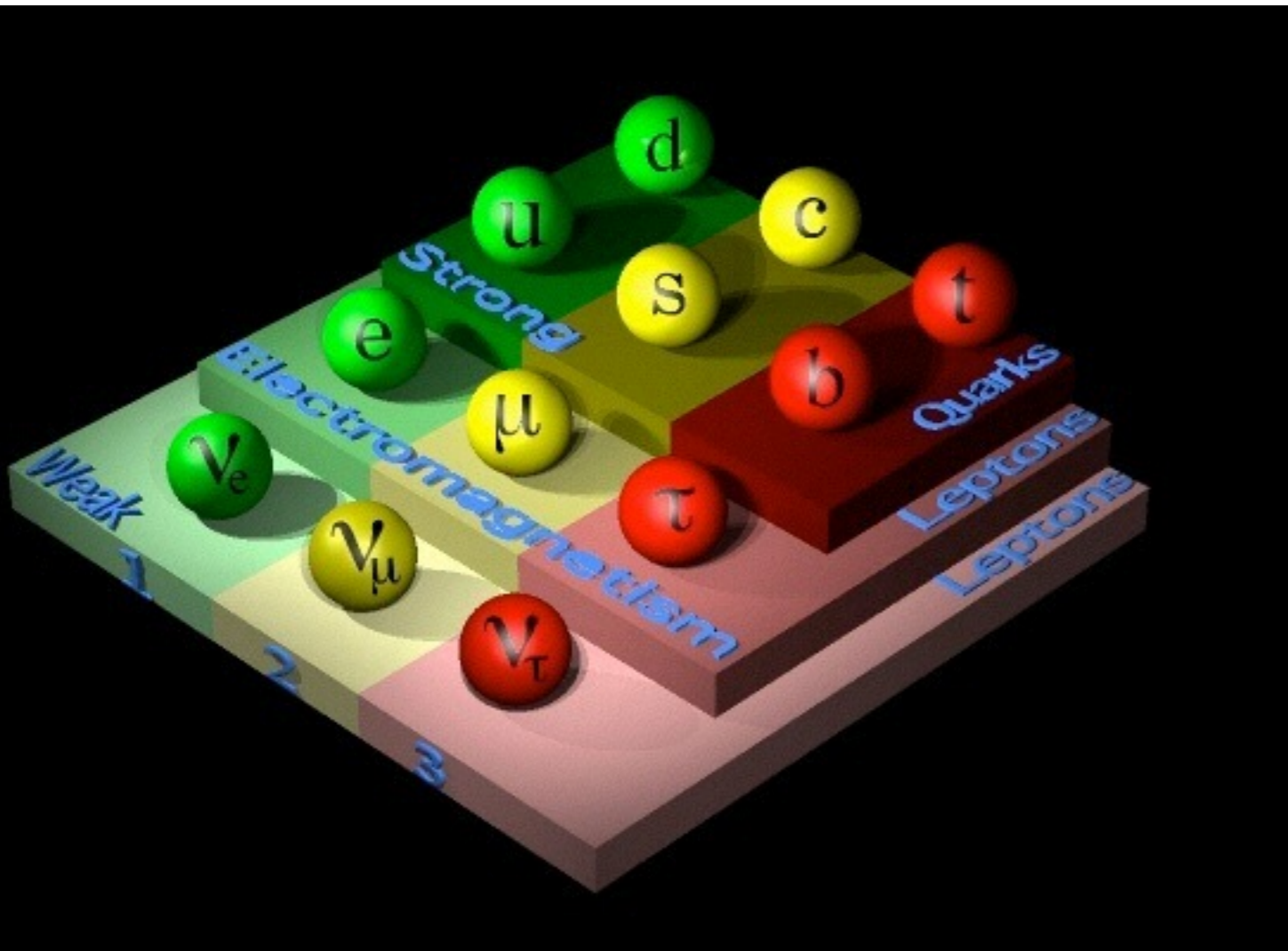
30.06.2014



Neutrinos: Zeitleiste

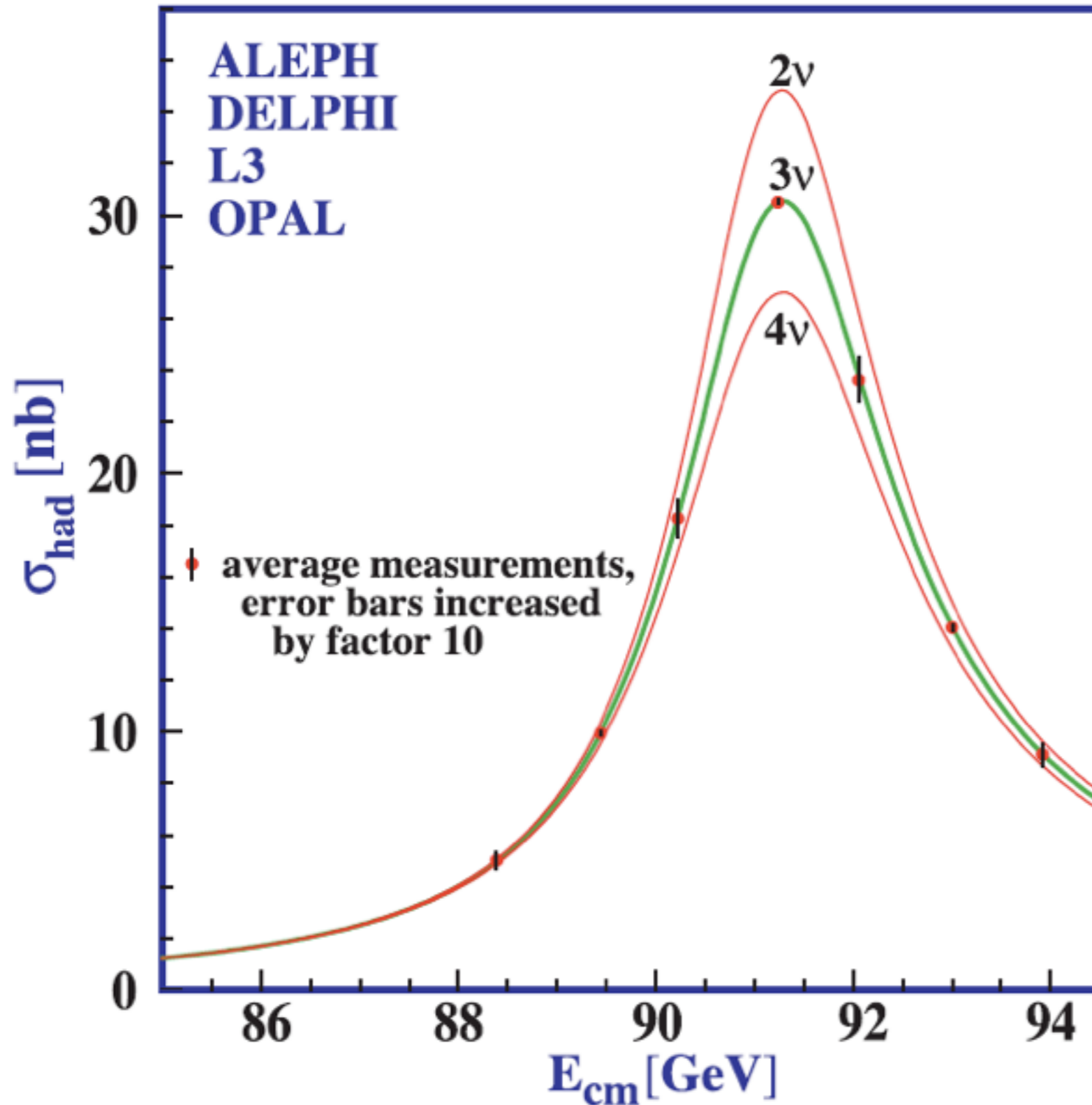
- 1931 W. Pauli postuliert Existenz des Neutrinos in β -Zerfall
- 1934 E. Fermi stellt Theorie des π -Zerfalls vor (inkl. Neutrino)
- 1959 Entdeckung des ν_e (Reines und Cowan; Nobelpreis 1995)
- 1962 Entdeckung des ν_μ
- 1968 Erste Messung der Sonnenneutrinos (ν_e): weniger als 50% der erwarteten Intensität („solares Neutrino-Problem“)
- 1987 Kamiokande und IMB (Protonzerfallexperimente) sehen Neutrinos von SN 1987a
- 1988 Kamiokande sieht nur 60% der erwarteten atmosphärischen ν_μ
- 1990 LEP-Experimente beweisen Existenz von genau 3 Generationen leichter Neutrinos
- 1998 Super-Kamiokande zeigt Evidenz für Neutrino-Oszillationen (ν_μ), -> Neutrinos haben endliche Masse (Nobelpreis an Koshiba 2002)
- 2000 explizite Bestätigung und Beobachtung des ν_τ
- 2001 Bestätigung des solaren ν_e Defizits und der Neutrino-Oszillationen durch SNO
- 2011 Erste Hinweise auf von Null verschiedenes Θ_{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 ~ 45 GeV), die der schwachen Wechselwirkung unterliegen

Neutrino-Quellen

- **Solare Neutrinos**

(Entstehen bei den Fusionsreaktionen in der Sonne), ca 2×10^{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

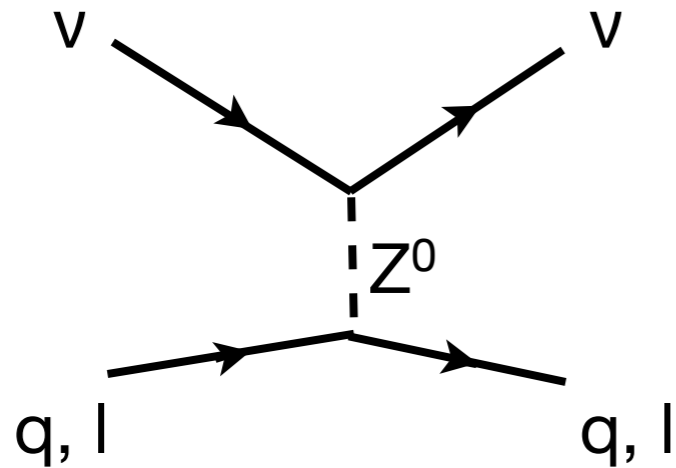
- Neutrinos sind speziell: Sie wechselwirken nur durch die schwache Wechselwirkung
 - Maximale Paritätsverletzung der schwachen WW bedeutet:
Neutrinos sind immer linkshändig (Helizität -1)
Anti-Neutrinos sind immer rechtshändig (Helizität $+1$)

Neutrinos: Allgemein

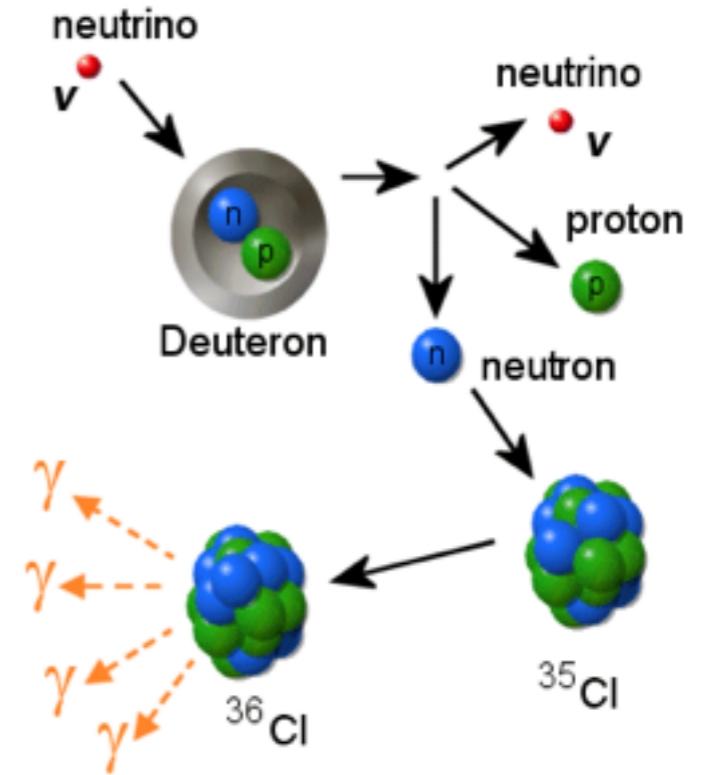
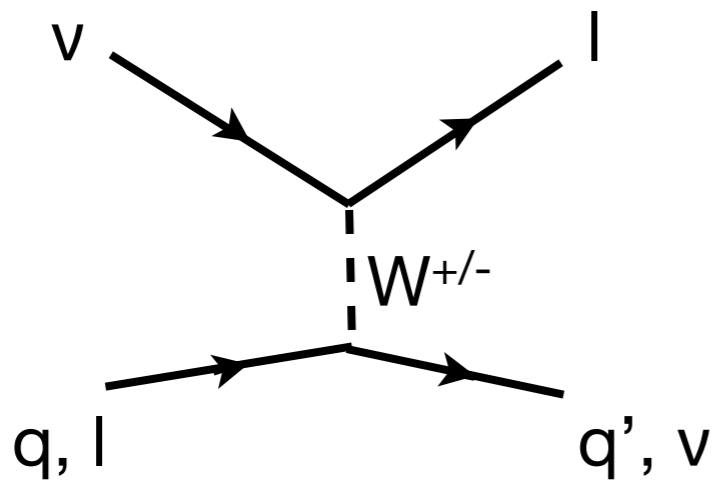
- Neutrinos sind speziell: Sie wechselwirken nur durch die schwache Wechselwirkung
 - Maximale Paritätsverletzung der schwachen WW bedeutet:
Neutrinos sind immer linkshändig (Helizität -1)
Anti-Neutrinos sind immer rechtshändig (Helizität $+1$)
- Mögliche Konsequenz:
 - Neutrinos könnten ihre eigenen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

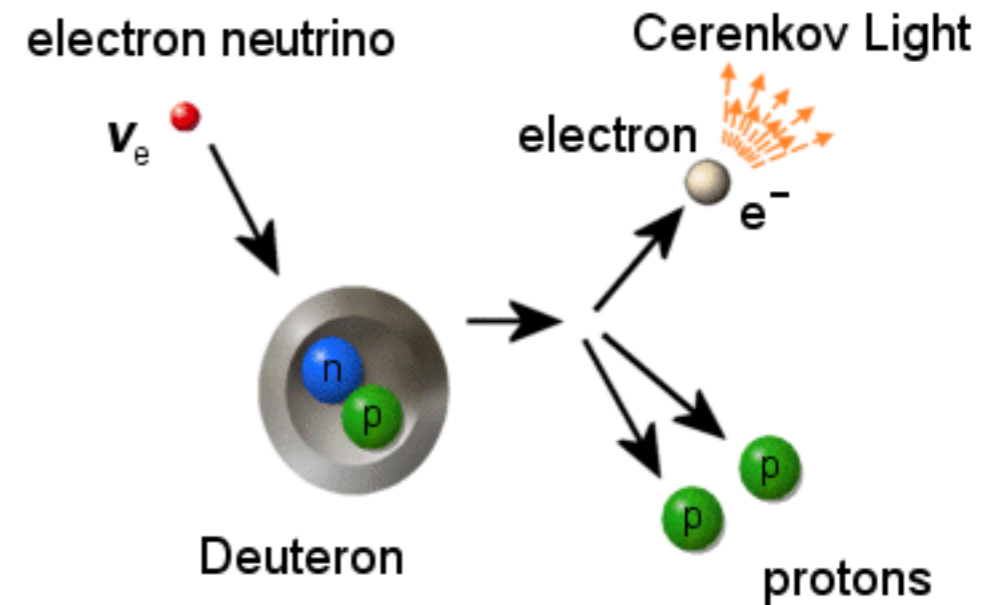
- Neutraler Strom



- Geladener Strom



SNO



SNO

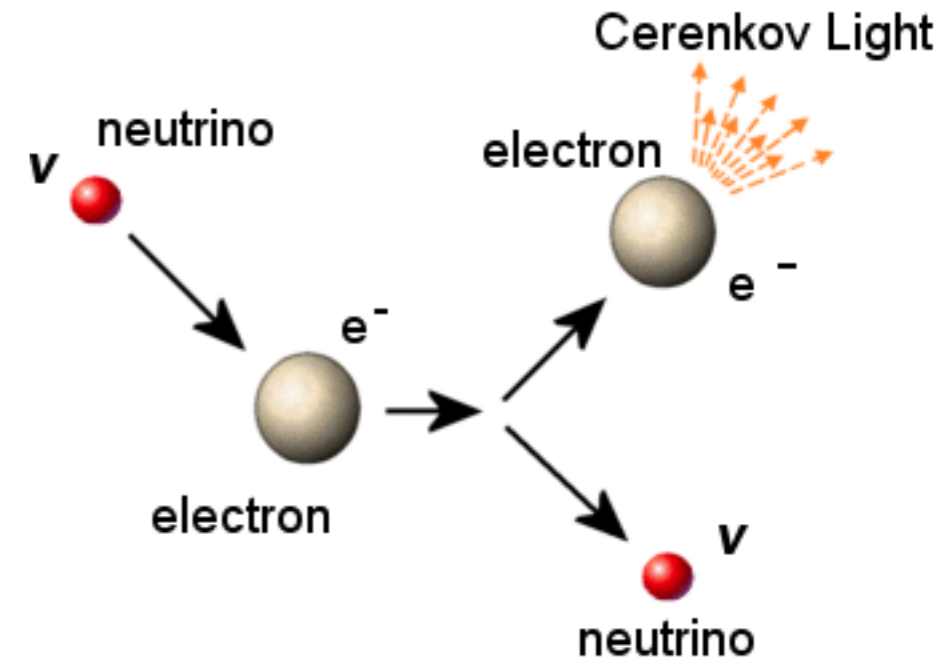
Neutrino-Elektron-Streuung

- Spezieller Fall:
 - Für ν_μ und ν_τ läuft dieser Prozess nur über den neutralen Strom
 - Für ν_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

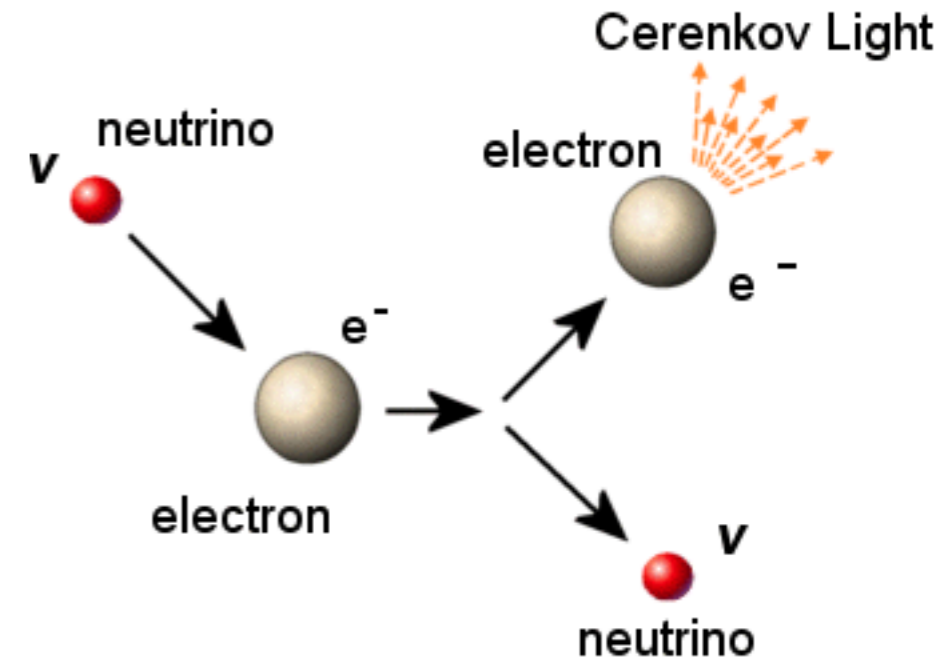
- Spezieller Fall:
 - Für ν_μ und ν_τ läuft dieser Prozess nur über den neutralen Strom
 - Für ν_e trägt sowohl der neutrale als auch der geladene Strom bei

- 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

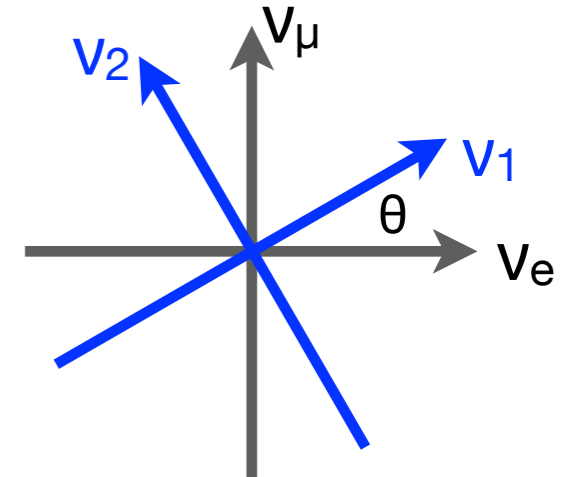
Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

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

Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

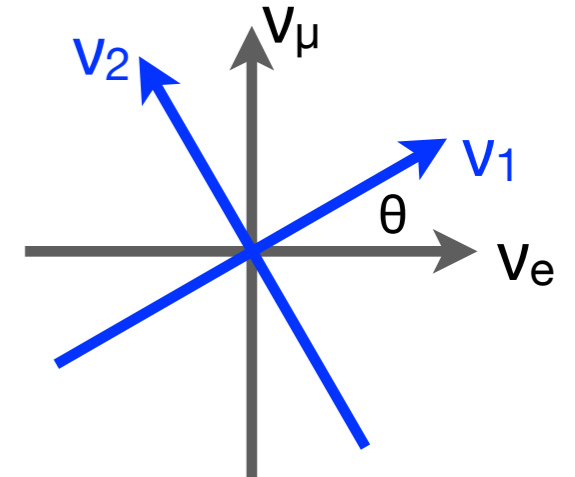
- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
 - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände
- Beispiel: Welt mit 2 Neutrinos:
 - Die Eigenzustände der schwachen WW ν_μ und ν_e sind nicht gleich den Masseneigenzuständen ν_1 und ν_2

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



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 ν_μ und ν_e sind nicht gleich den Masseneigenzuständen ν_1 und ν_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 ν_μ und ν_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 ν_μ kann sich in ein ν_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 ν_μ kann sich in ein ν_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:

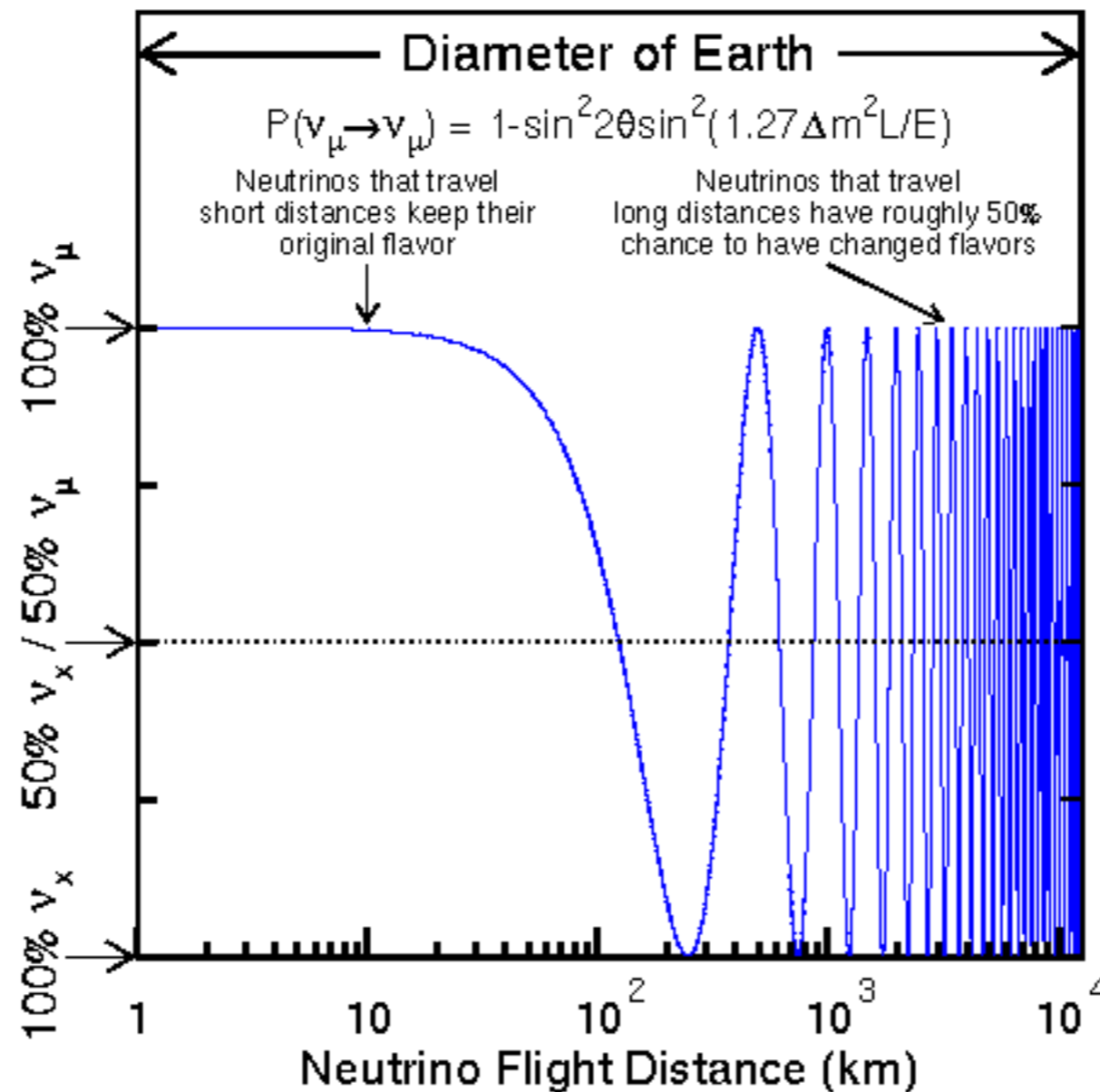
$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2}{\text{eV}^2} \frac{L/\text{m}}{E/\text{MeV}} \right)$$

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

Neutrino-Oszillationen

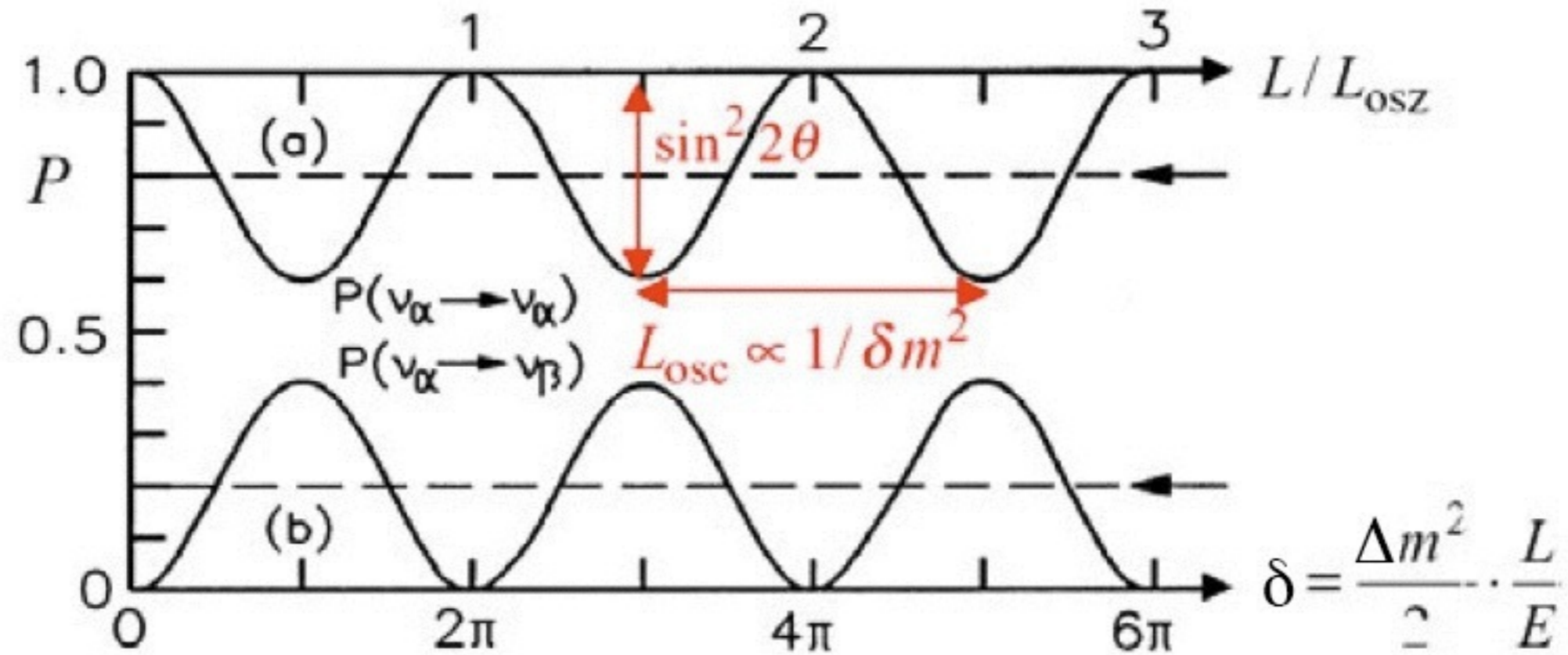
- Neutrino Oszillationen als Funktion des Abstands

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



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 Θ_{13}

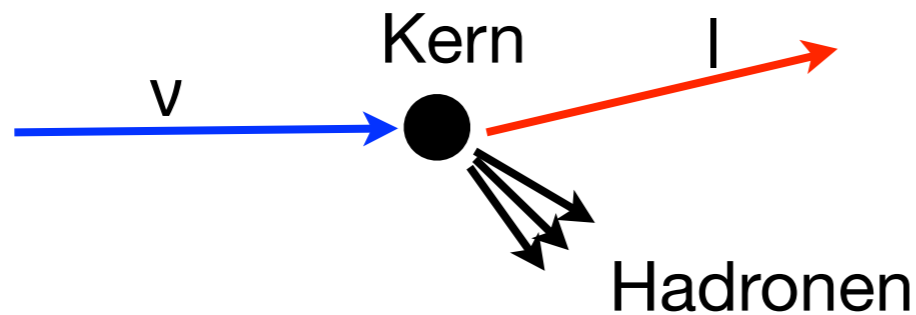
$$= \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & \\ & 1 & \\ -s_{13}e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{13}e^{-i\delta} & & \\ & c_{12} & s_{12} \\ & -s_{12} & c_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} & & \\ & & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

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)

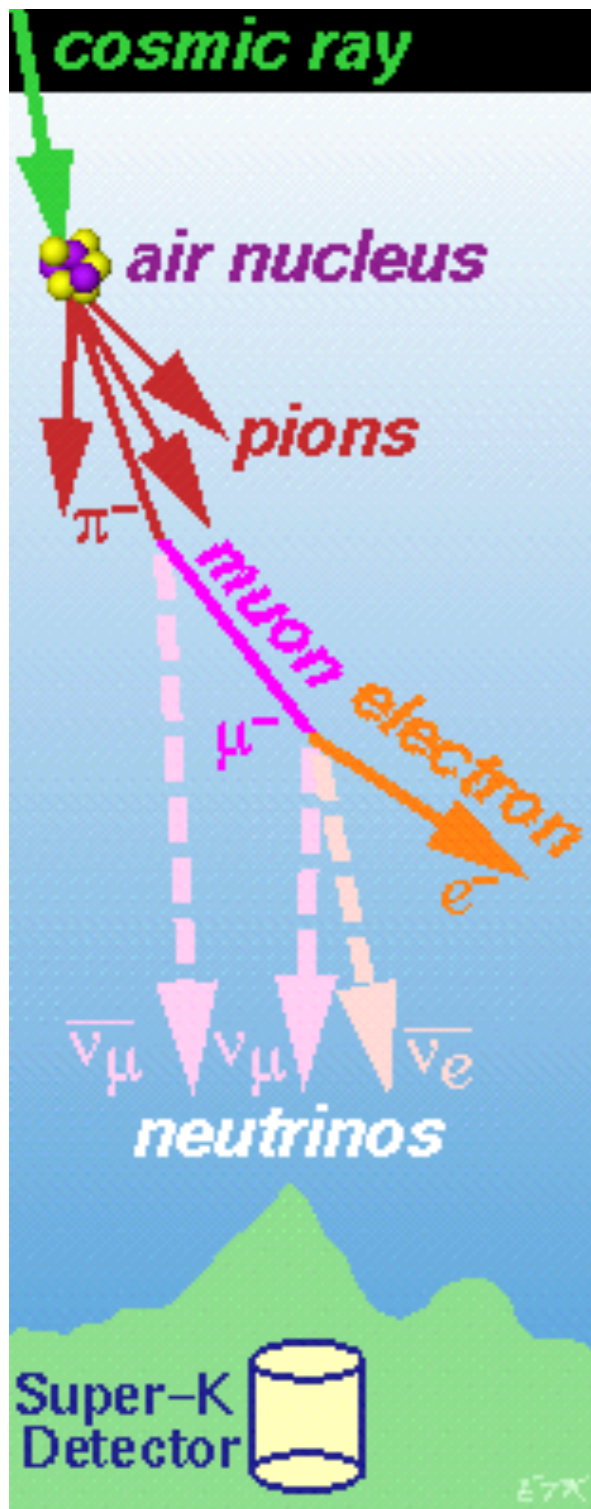
Super-Kamiokande Messprinzip

- Neutrinos erzeugen über geladene Ströme die entsprechenden Leptonen

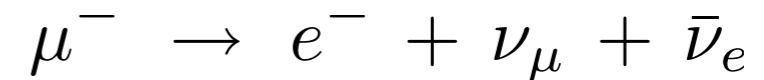
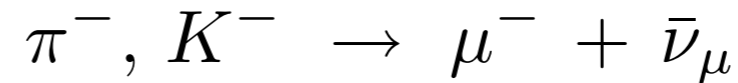


- Hohe Energieschwelle für τ - Erzeugung durch hohe Masse (1.777 GeV), daher nur Nachweis von Elektronen und Myonen
- Erzeugung von Cherenkov-Licht durch geladene Leptonen in Wasser (Brechungsindex 1.33)
 - Nachweis des Cherenkovlichtes:
 - Lichtverteilung ermöglicht Teilchenidentifikation (μ oder e)
 - 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):

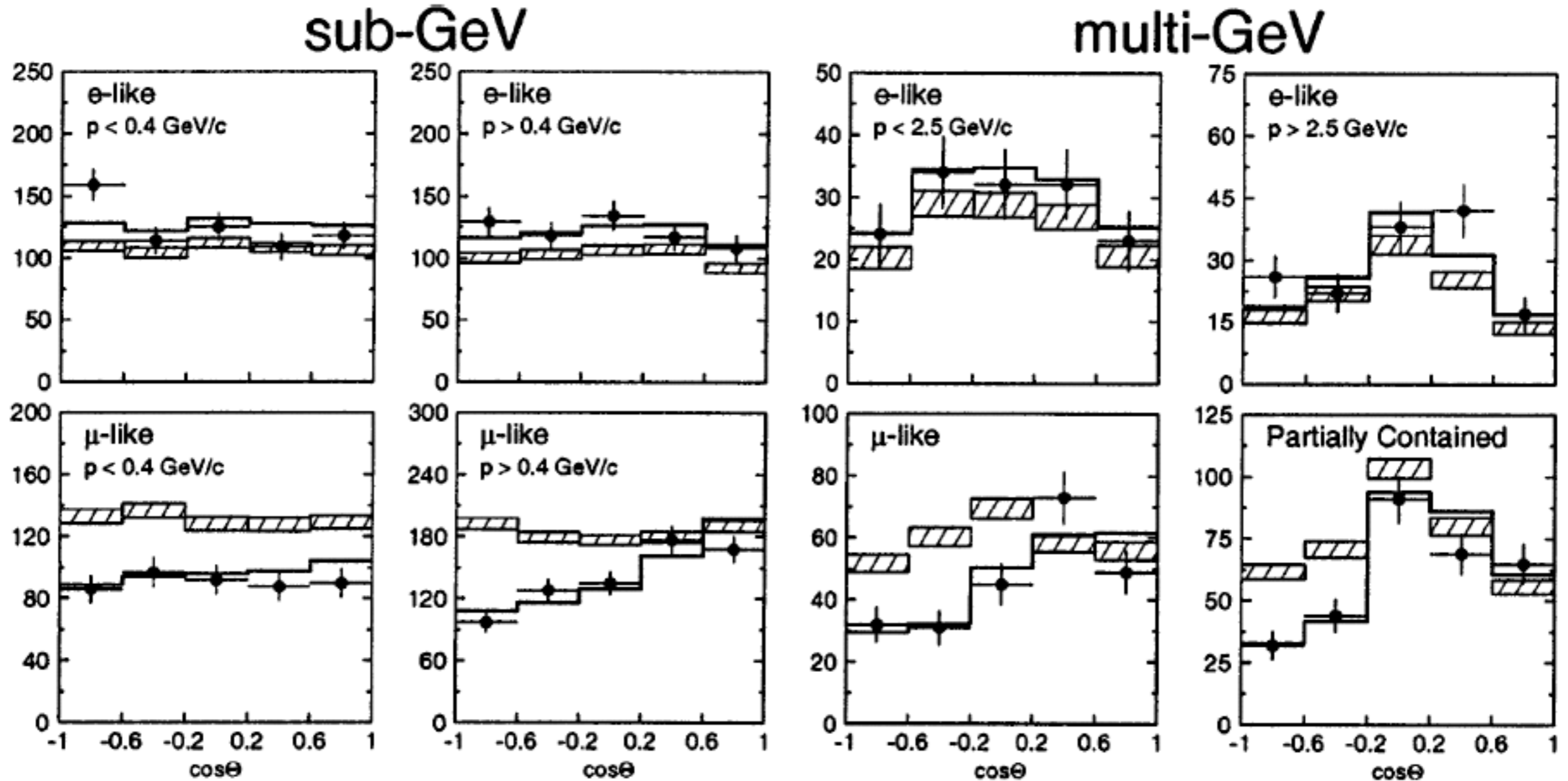
$$\frac{\mu}{e} \equiv \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$

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

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

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

Oszillation Atmosphärischer Neutrinos

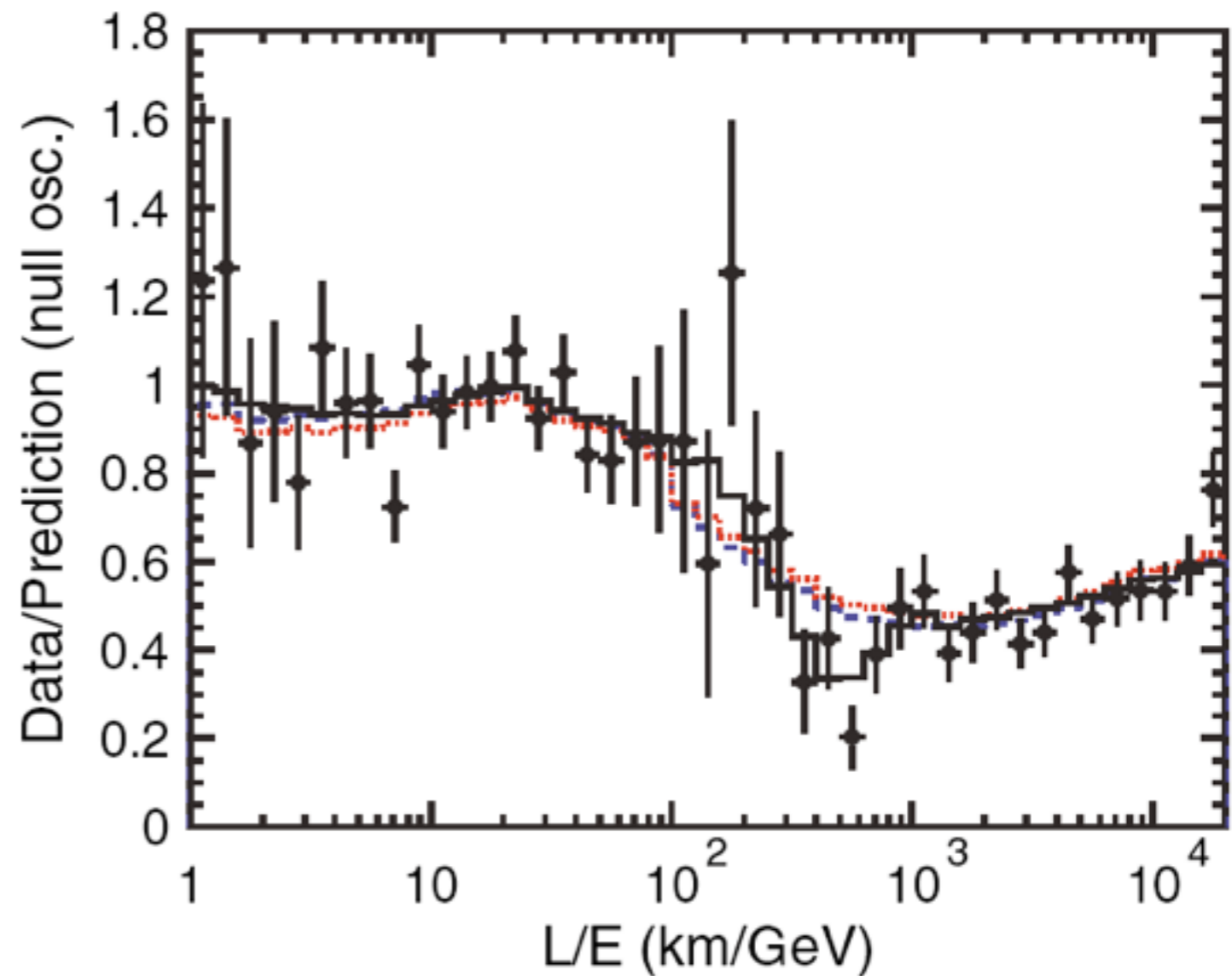
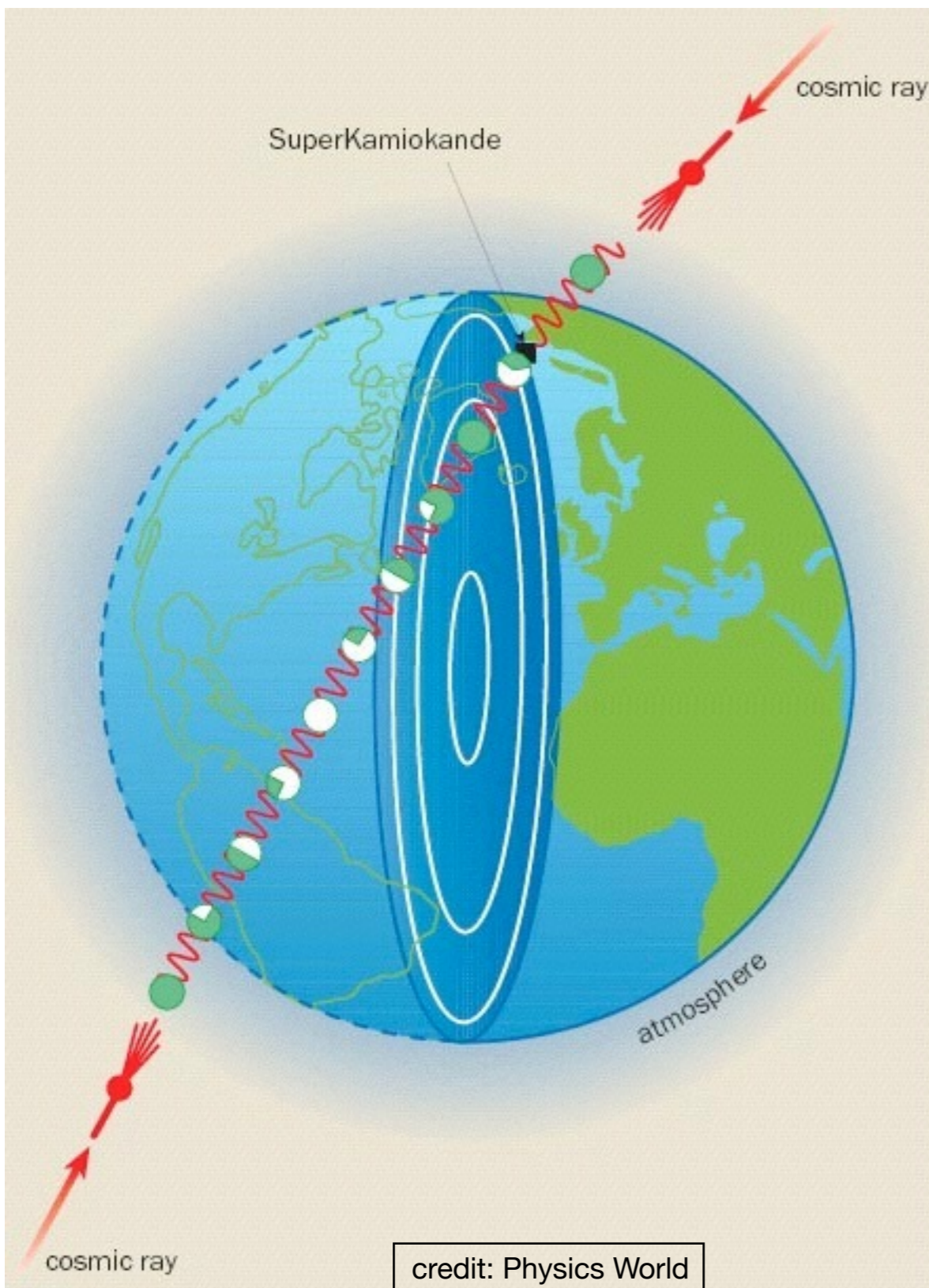


Phys.Rev.Lett. 81, 1562 (1998)

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

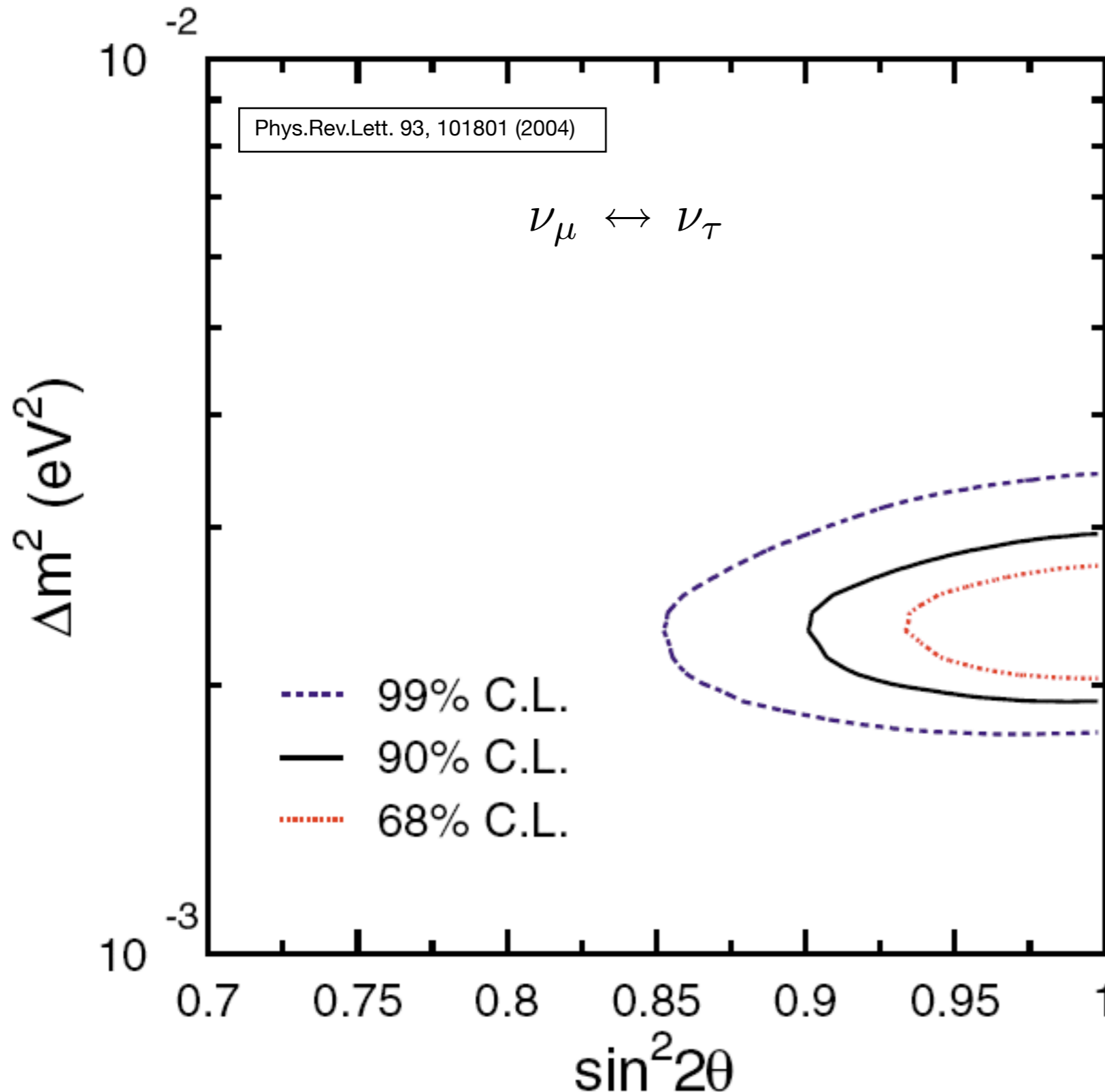
Oszillation Atmosphärischer Neutrinos

- 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_ν/GeV

Neutrino Oscillations - Status

- Two distinct types of oscillations (with quite different mass splittings) have been observed:
 - Atmospheric - disappearance of ν_μ , $\Delta m^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 - Solar (next week in detail) - disappearance of ν_e , $\Delta m^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- ▶ Choice of convention: small splitting between ν_1 and ν_2 , big between ν_1/ν_2 and ν_3
- ▶ The data tell us: mixing between ν_1 and ν_3 is small
 - ▶ In solar oscillations, we observe $\nu_1 \rightarrow \nu_2$ oscillations, ν_1 has to have a big ν_e component
 - ▶ In atmospheric oscillations, we observe $\nu_2 \rightarrow \nu_3$, with maximal mixing: ν_3 is (almost) a 50-50 mixture of ν_τ and ν_μ

Neutrino Oscillations - Status

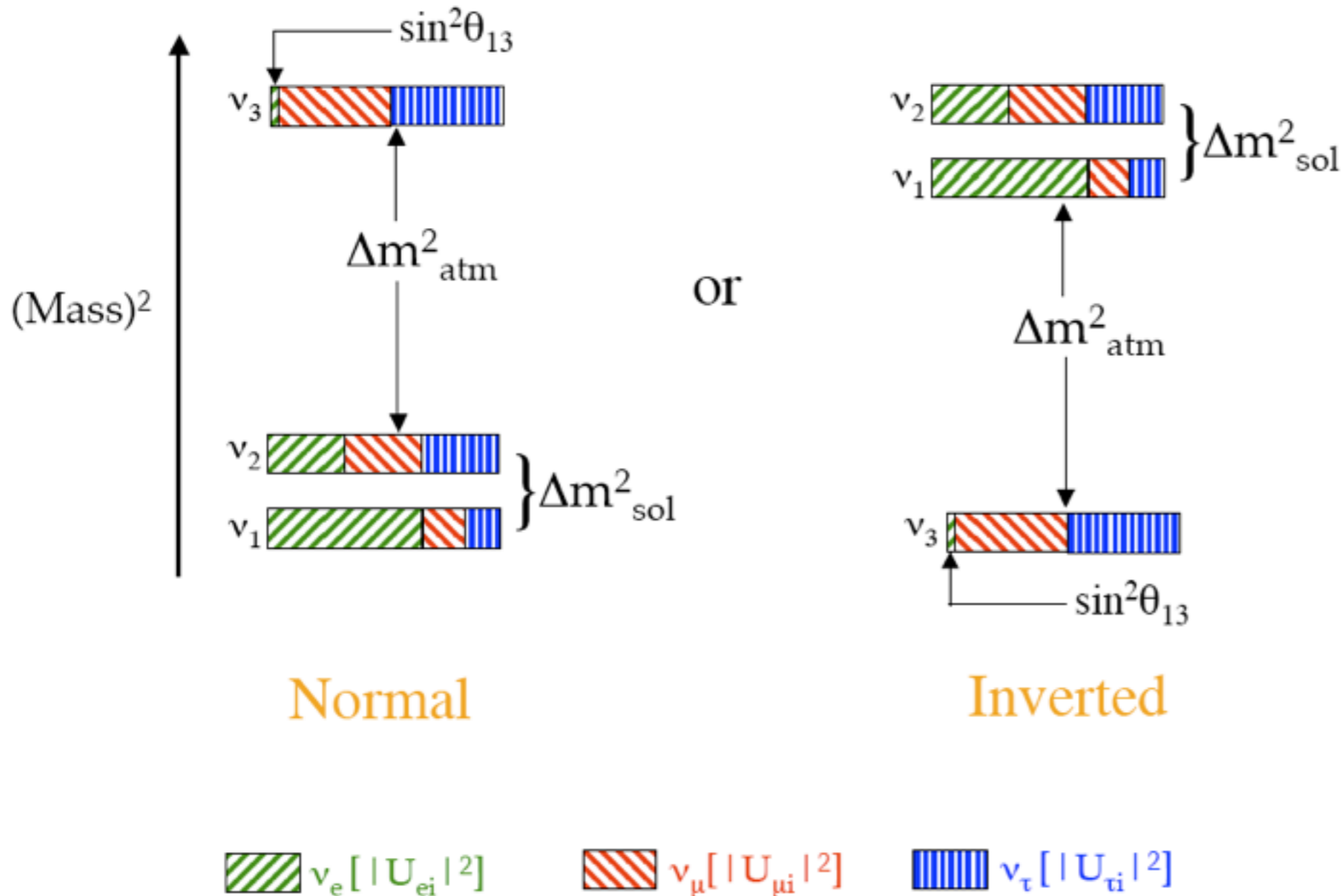
- Two distinct types of oscillations (with quite different mass splittings) have been observed:
 - Atmospheric - disappearance of ν_μ , $\Delta m^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 - Solar (next week in detail) - disappearance of ν_e , $\Delta m^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- ▶ Choice of convention: small splitting between ν_1 and ν_2 , big between ν_1/ν_2 and ν_3
- ▶ The data tell us: mixing between ν_1 and ν_3 is small
 - ▶ In solar oscillations, we observe $\nu_1 \rightarrow \nu_2$ oscillations, ν_1 has to have a big ν_e component
 - ▶ In atmospheric oscillations, we observe $\nu_2 \rightarrow \nu_3$, with maximal mixing: ν_3 is (almost) a 50-50 mixture of ν_τ and ν_μ

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

atmospheric/
accelerator

solar/
reactor

Neutrino-Oscillations: The Resulting Picture



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

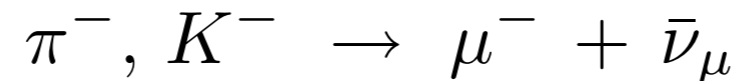
$$\Delta m^2_{\text{atm}} \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

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:

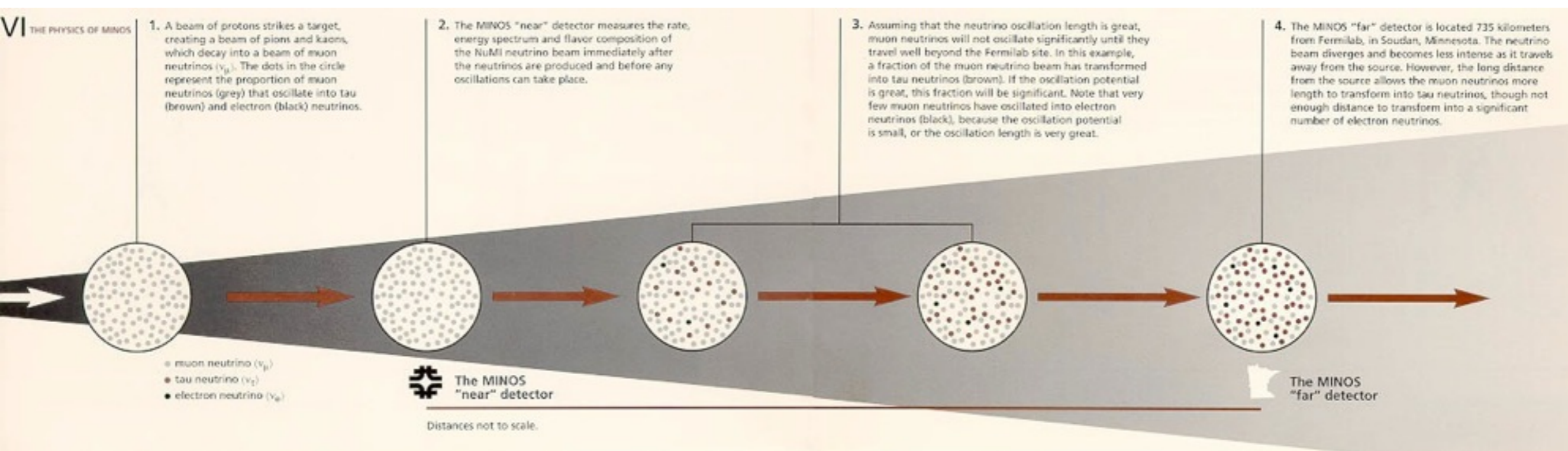


- Tunnel nicht lang genug für Zerfall der Muonen, daher praktisch reiner ν_{μ} Strahl
- Es wurde eine Vielzahl an Experimenten mit Beschleuniger-Neutrinos durchgeführt, u.a. zur
 - Untersuchung der schwachen Wechselwirkung
 - Untersuchung der Quark-Zusammensetzung von Atomkernen
 - Entdeckung des ν_{τ}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

Long-Baseline Experimente

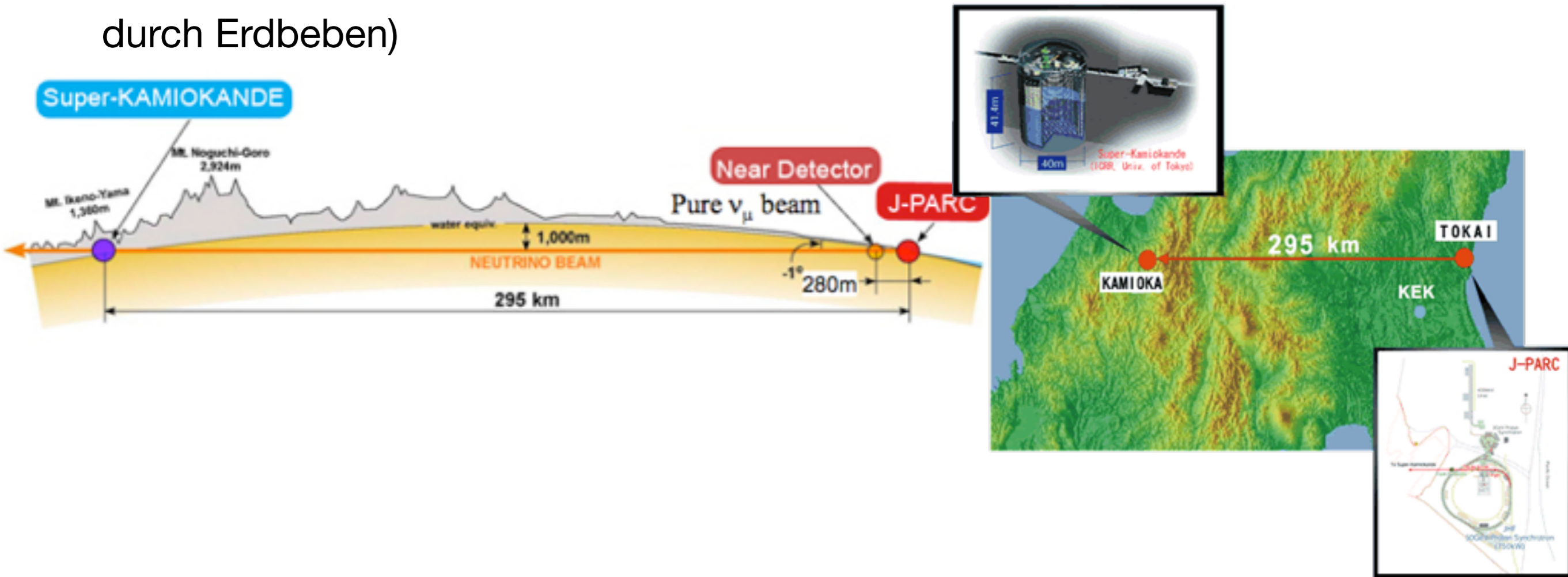
- Neutrinostrahl wird an Beschleuniger erzeugt
- Referenz-Messung mit einem "Near Detector"
- Nachweis der Neutrinos mit einem "Far Detector"
- ▶ Wahl der Entfernung und der Energie bestimmt den untersuchten Bereich der Mischungsmatrix

Die Zusammensetzung des Strahls ändert sich von der Quelle zum Detektor
Von einem reinem ν_μ Strahl zu einer Mischung aus ν_μ , ν_τ und etwas ν_e ($\theta_{13} \neq 0$)



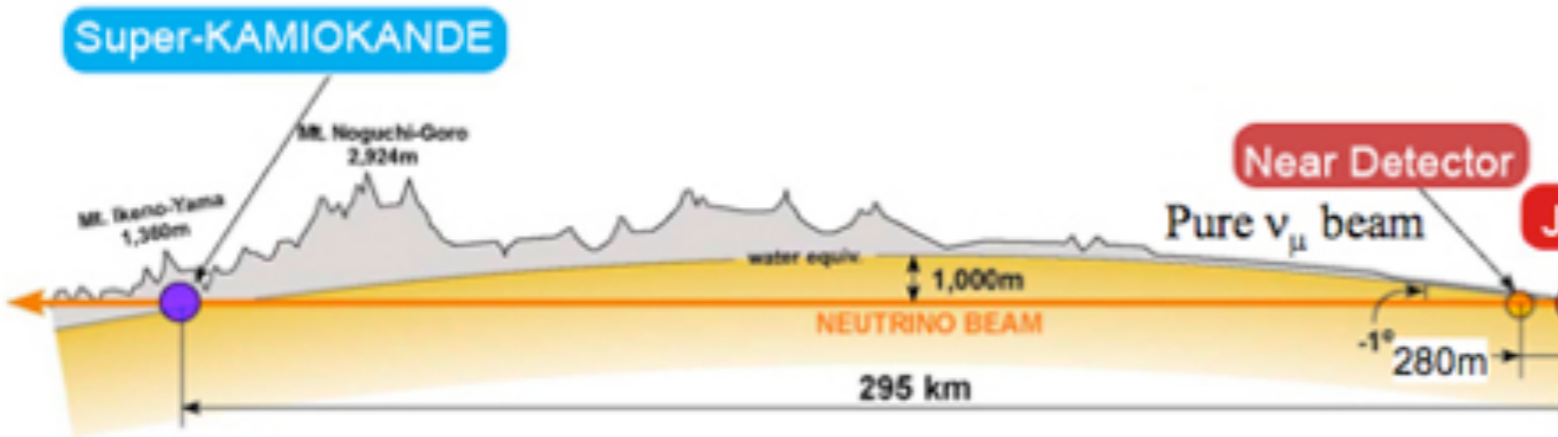
T2K: Neutrino-Strahl nach SuperK

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

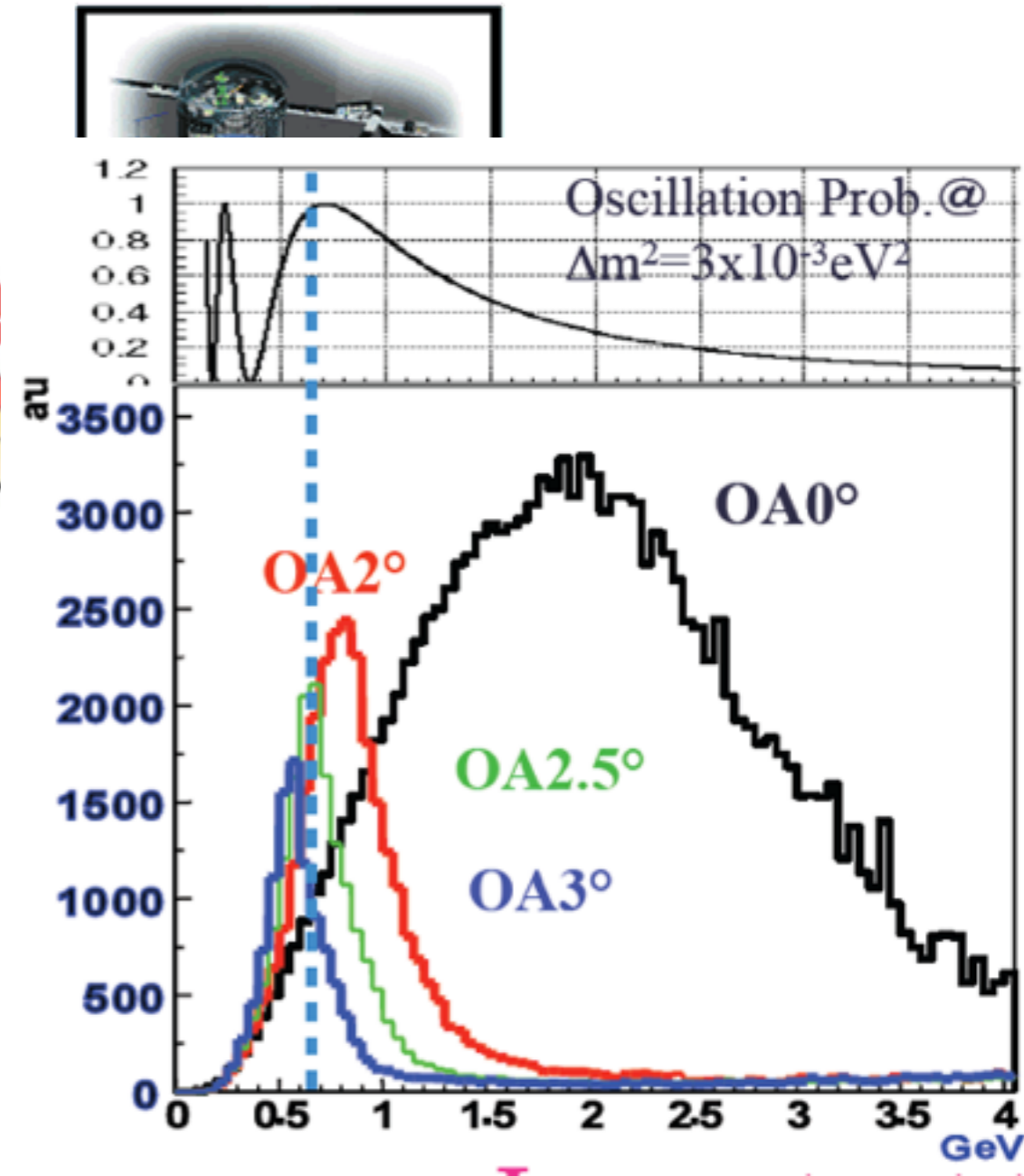
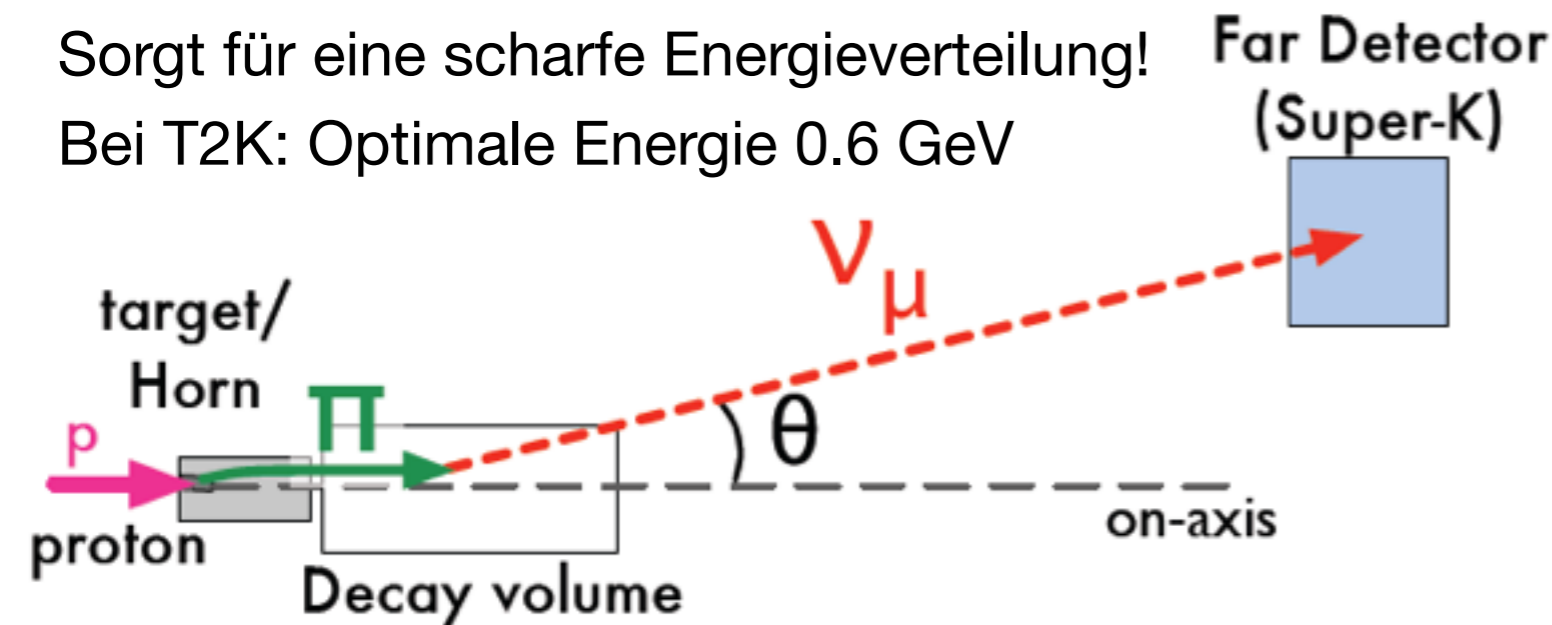


T2K: Neutrino-Strahl nach SuperK

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



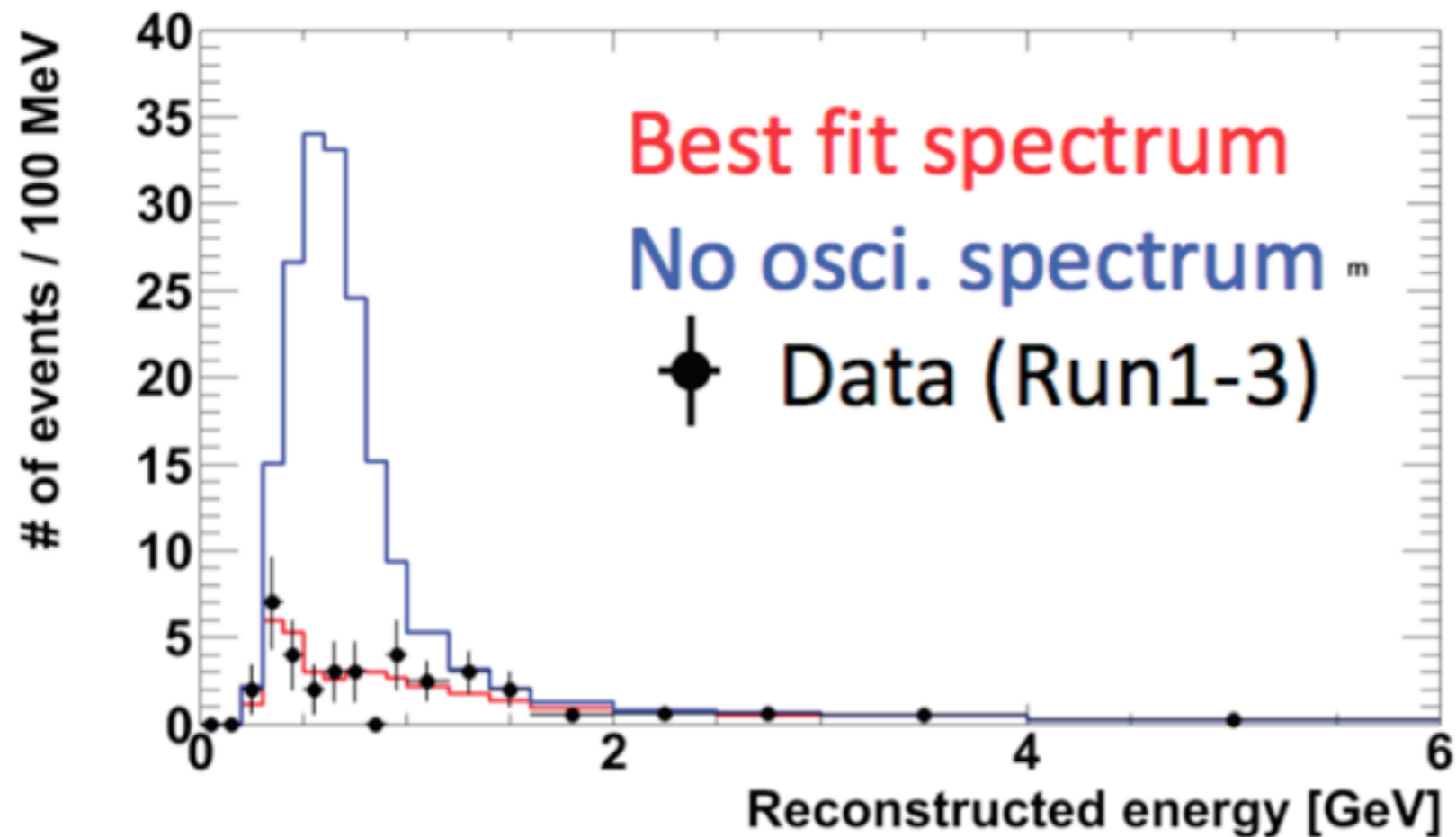
Moderne Experimente sind “off-axis”- Beams: Ziehlen nicht direkt auf den Far Detektor -
Sorgt für eine scharfe Energieverteilung!
Bei T2K: Optimale Energie 0.6 GeV



Ken Sakashita, KEK Seminar

T2K - Die Wahl der richtigen Baseline

- Fast vollständiges verschwinden der ν_μ :

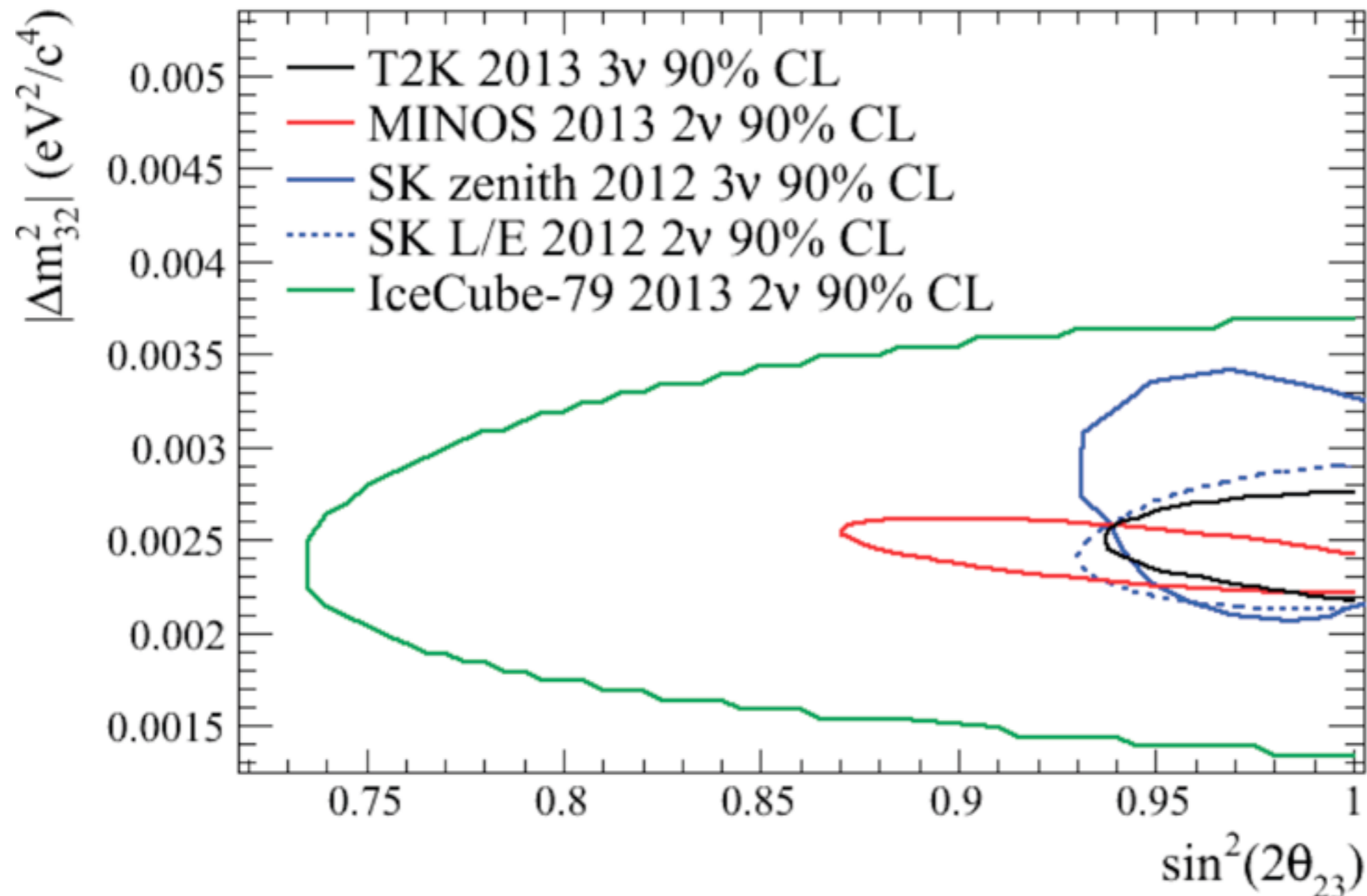


205 Ereignisse ohne Oszillation erwartet, 58 gesehen

Ist auch optimal, um θ_{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

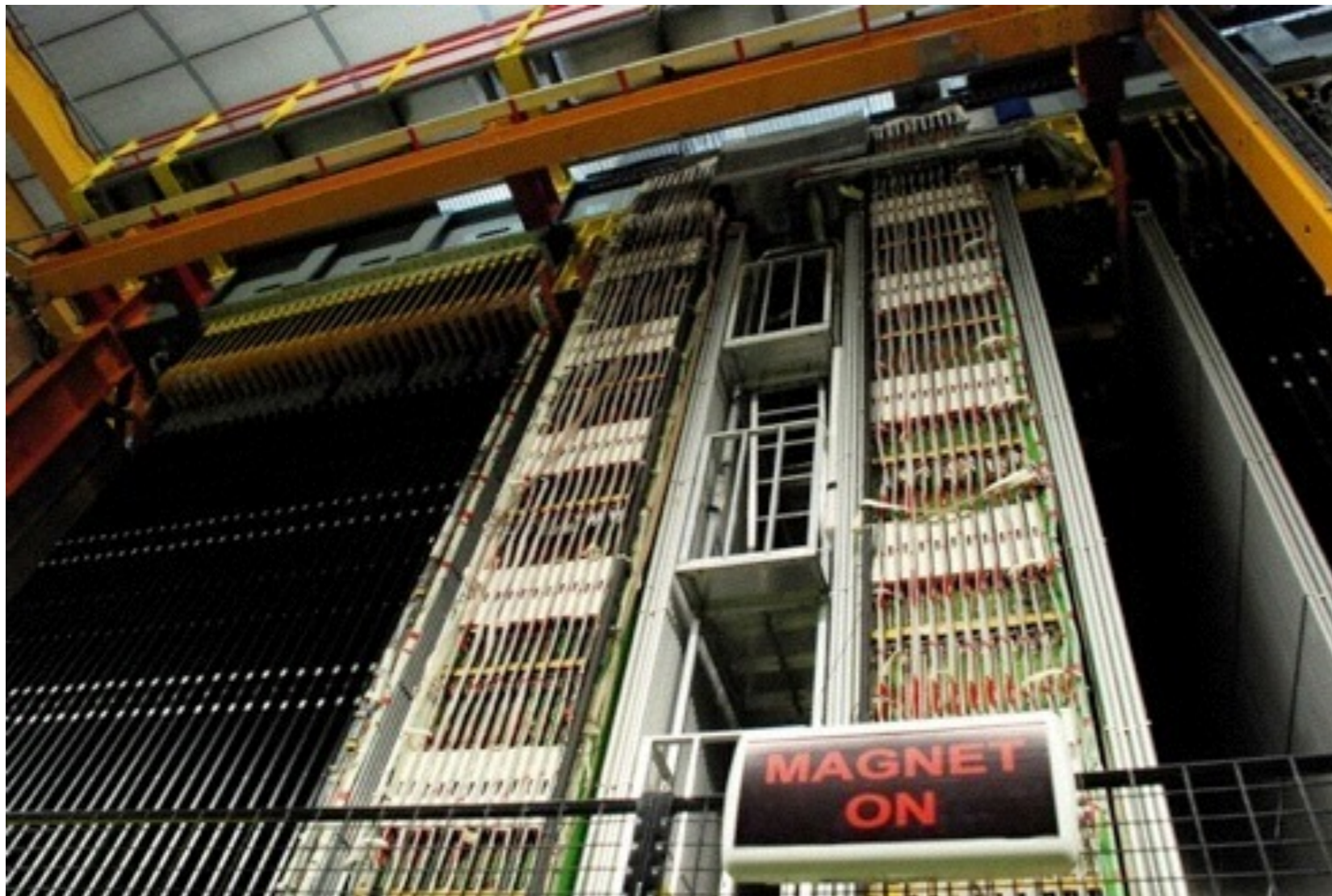
- Eines der Ziele: Direkte Beobachtung der Oszillation von ν_μ nach ν_τ durch Nachweis von ν_τ in einem ν_μ Long Baseline Beam (CERN \rightarrow Gran Sasso)



- 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

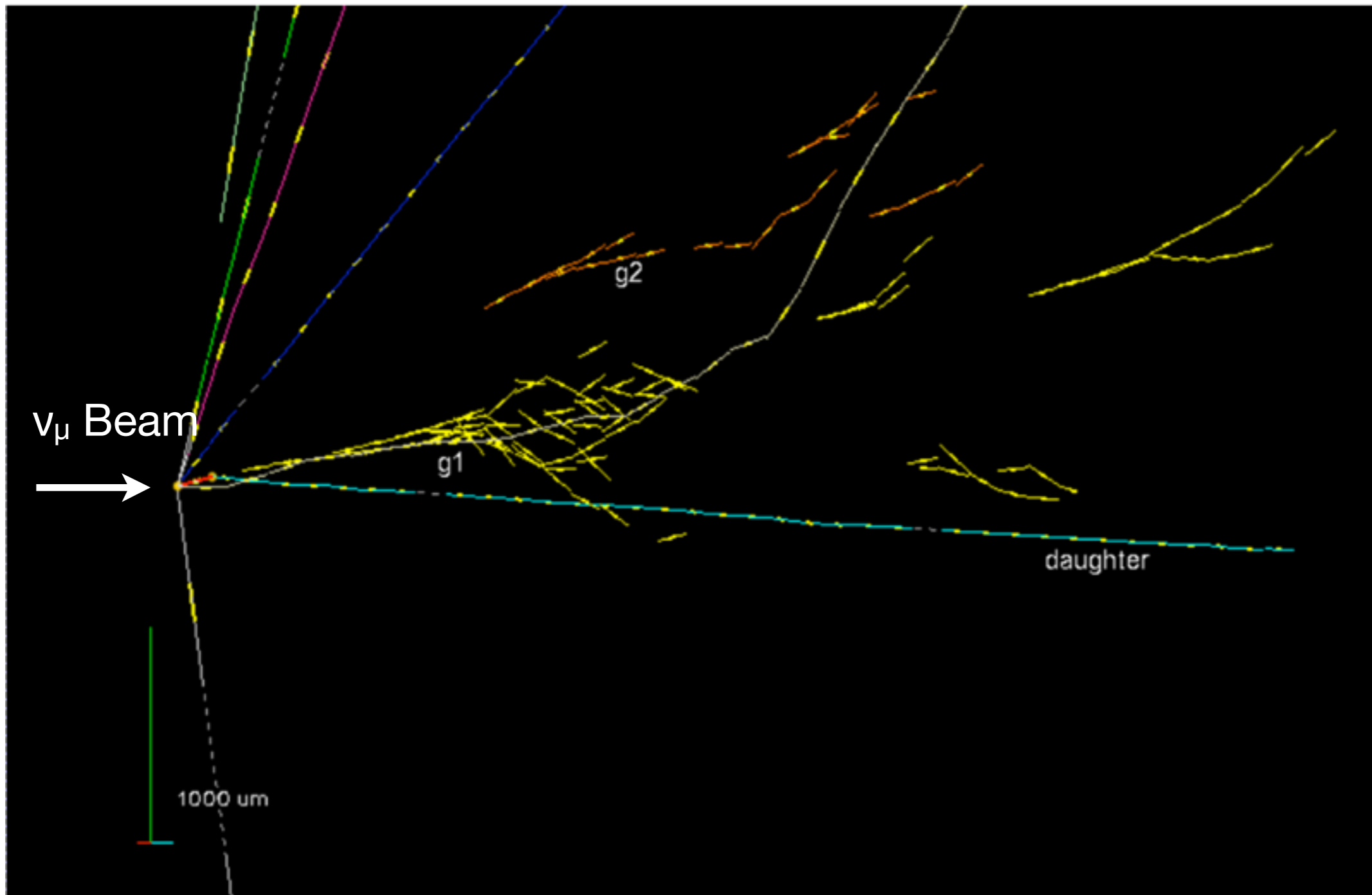
CNGS / OPERA - Bestätigung

- Eines der Ziele: Direkte Beobachtung der Oszillation von ν_μ nach ν_τ durch Nachweis von ν_τ in einem ν_μ 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 ν_τ Kandidat

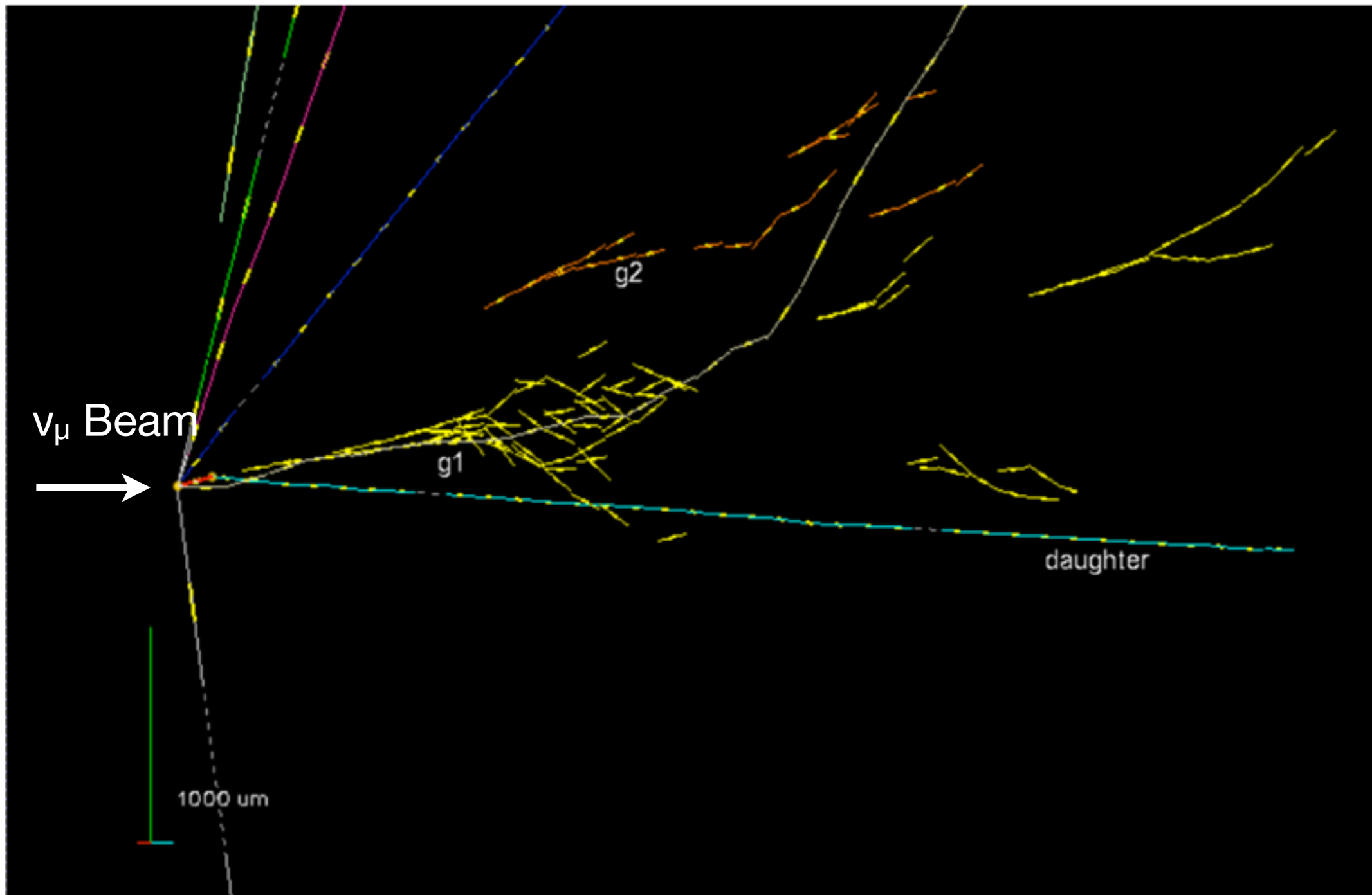


ν_τ erzeugt τ , schneller Zerfall in μ und ν_s

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

OPERA Press Release, 31.05.2010

OPERA: Erster ν_τ Kandidat



Inzwischen wurden zwei weitere ν_τ gesehen: stimmt mit Erwartung überein!

ν_τ erzeugt τ , schneller Zerfall in μ und ν_s

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

OPERA Press Release, 31.05.2010

Measuring θ_{13} at Accelerators

- θ_{13} describes $\nu_1 \rightarrow \nu_3$ oscillations: Squared mass differences (almost) as in the atmospheric case, but transitions involving ν_e (large ν_e component in ν_1 !)
 - With a ν_μ beam, θ_{13} is accessible through the subdominant oscillation from ν_μ to ν_e (the dominant oscillation is ν_μ to ν_τ)

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

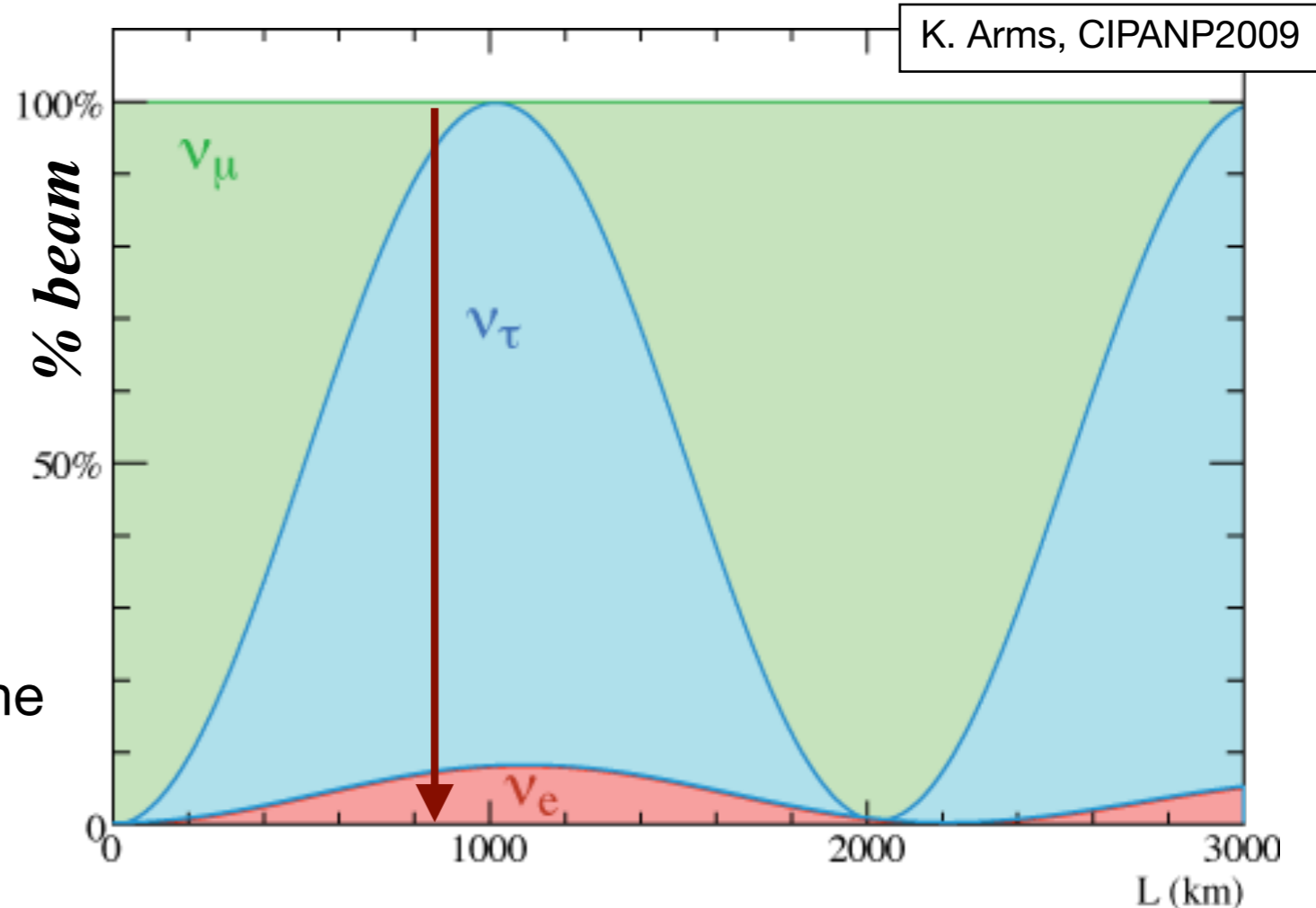
Strongly suppressed

compared to

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

length scale depends on ν energy
here: shown for the planned NOvA experiment at FNAL

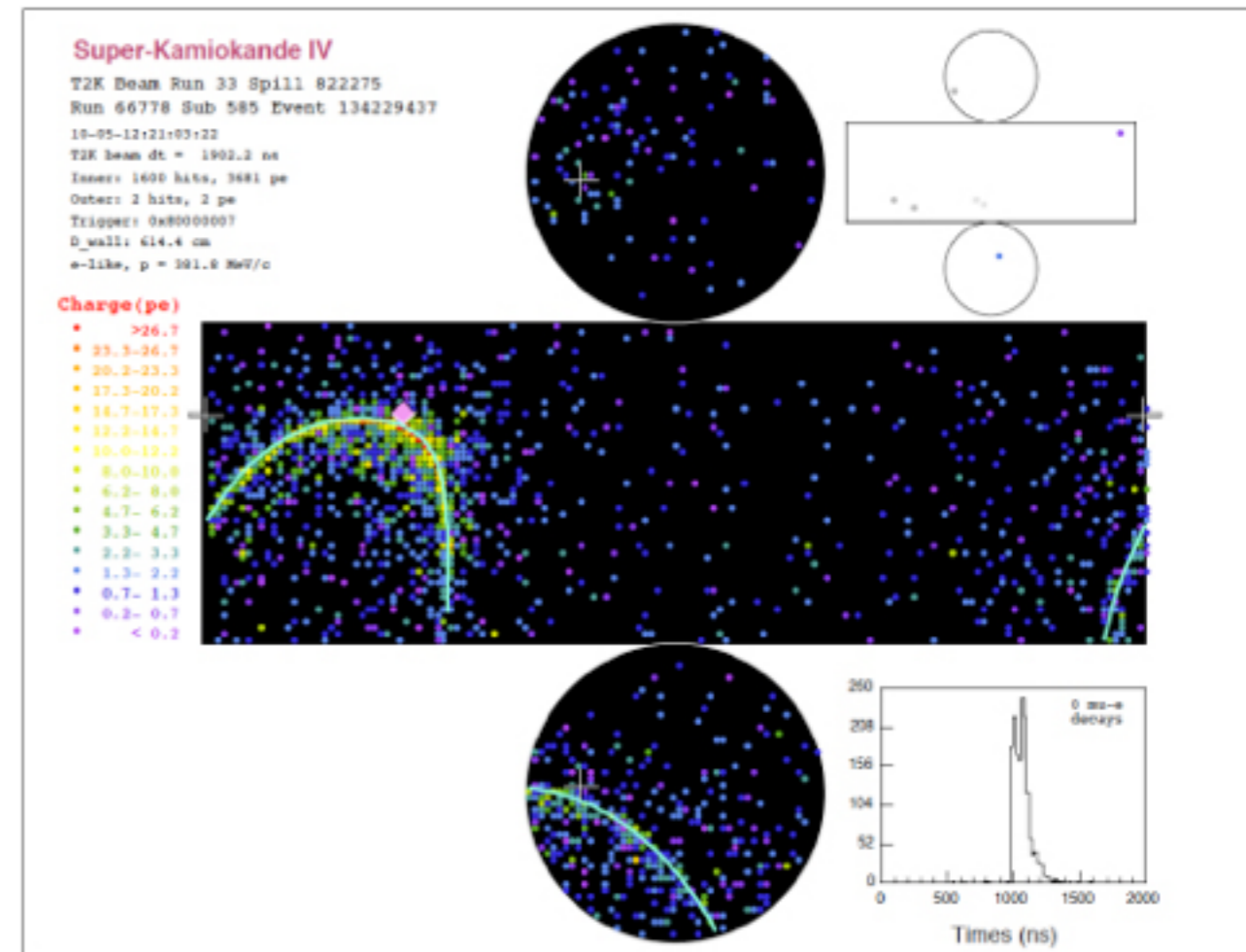
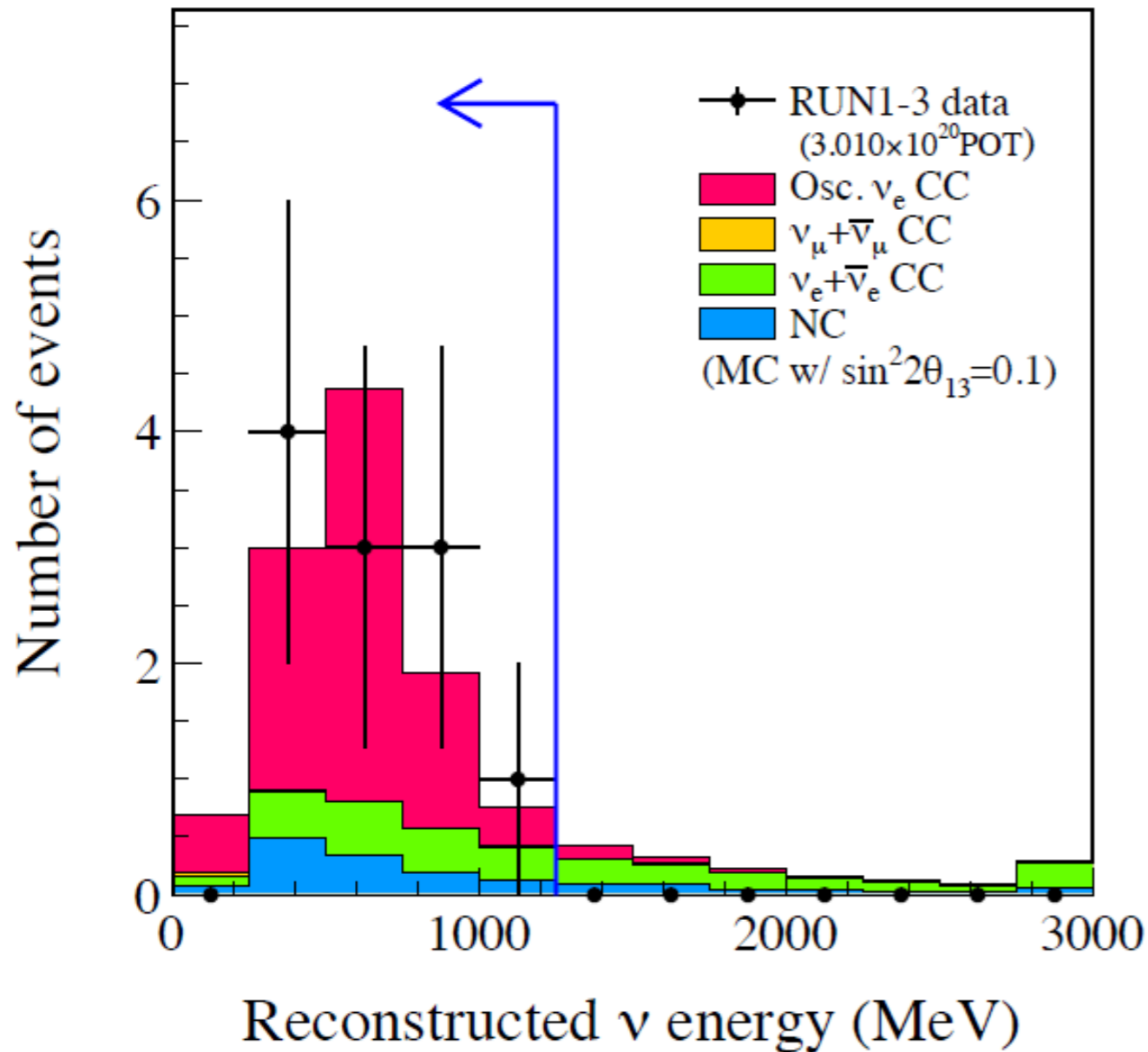
Important: Energy matched to baseline
Narrow energy distribution



T2K - Oszillationsergebnisse

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

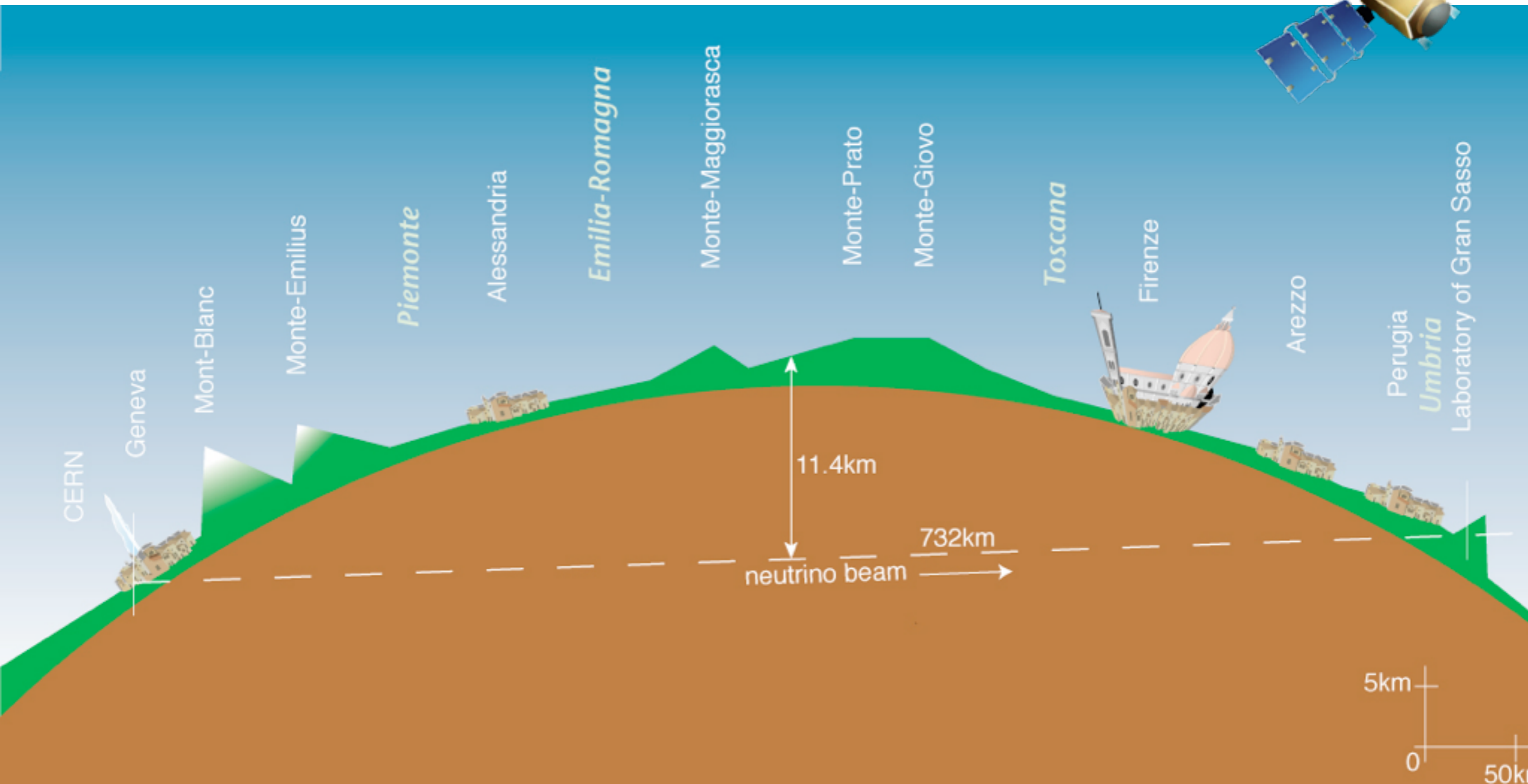
11 Ereignisse (3.2σ dass θ_{13} nicht 0 ist)



Aktuell beste Ergebnisse von Reaktoren (nächste Woche)

Neutrino-Geschwindigkeit

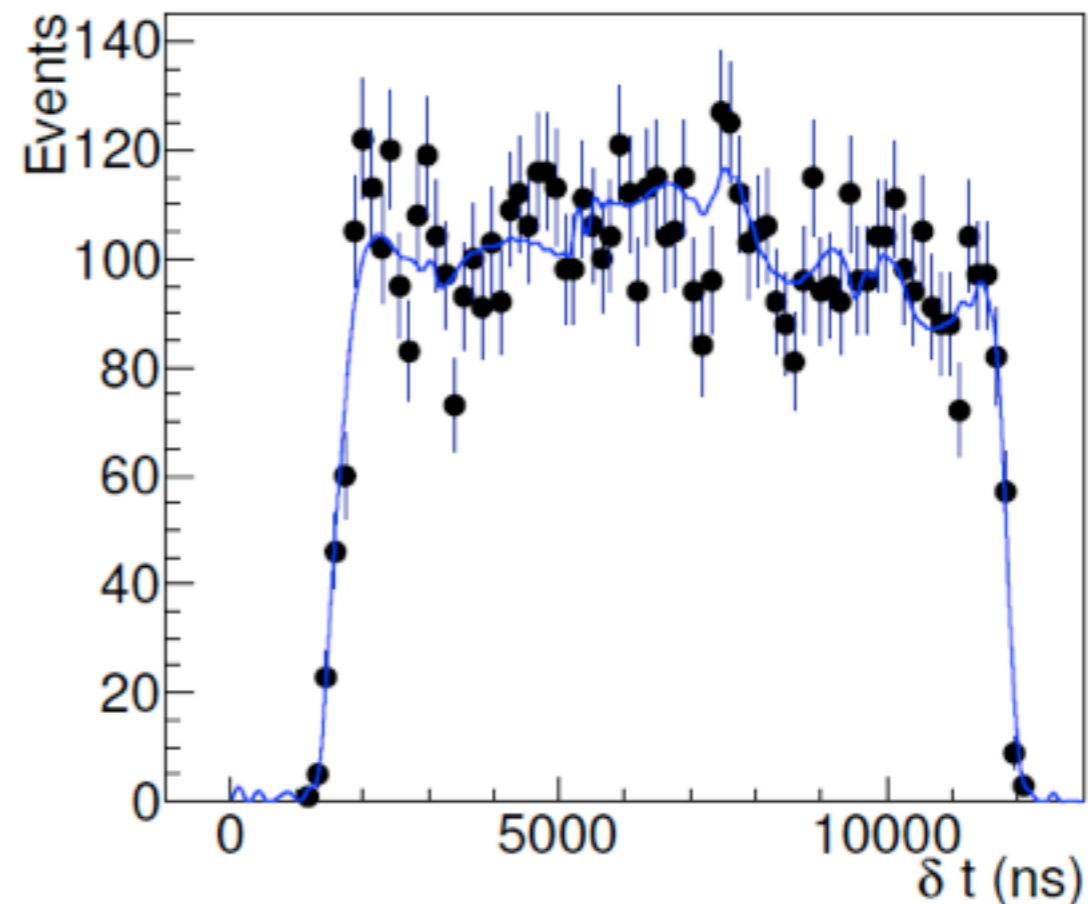
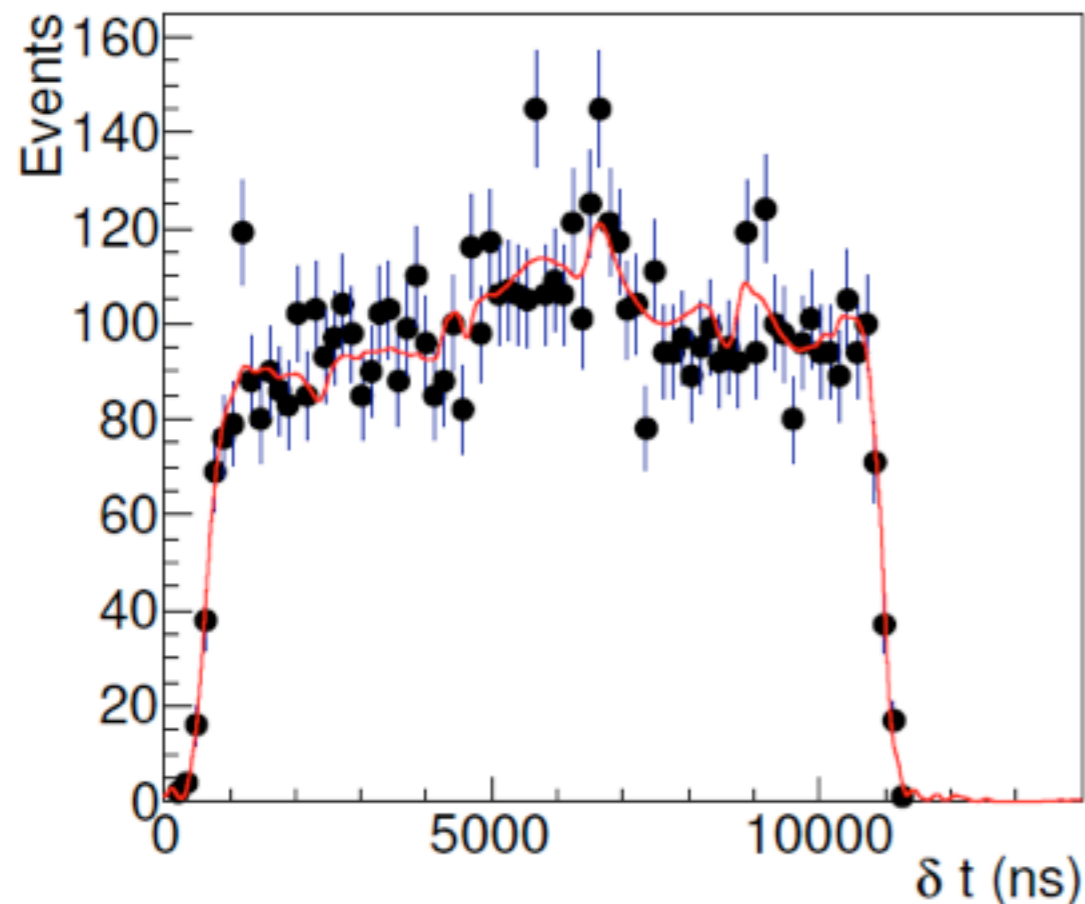
- Messung der Neutrino-Laufzeit - Synchronisation von CERN und Opera mit GPS



Erster Versuch - Spektakuläres Resultat

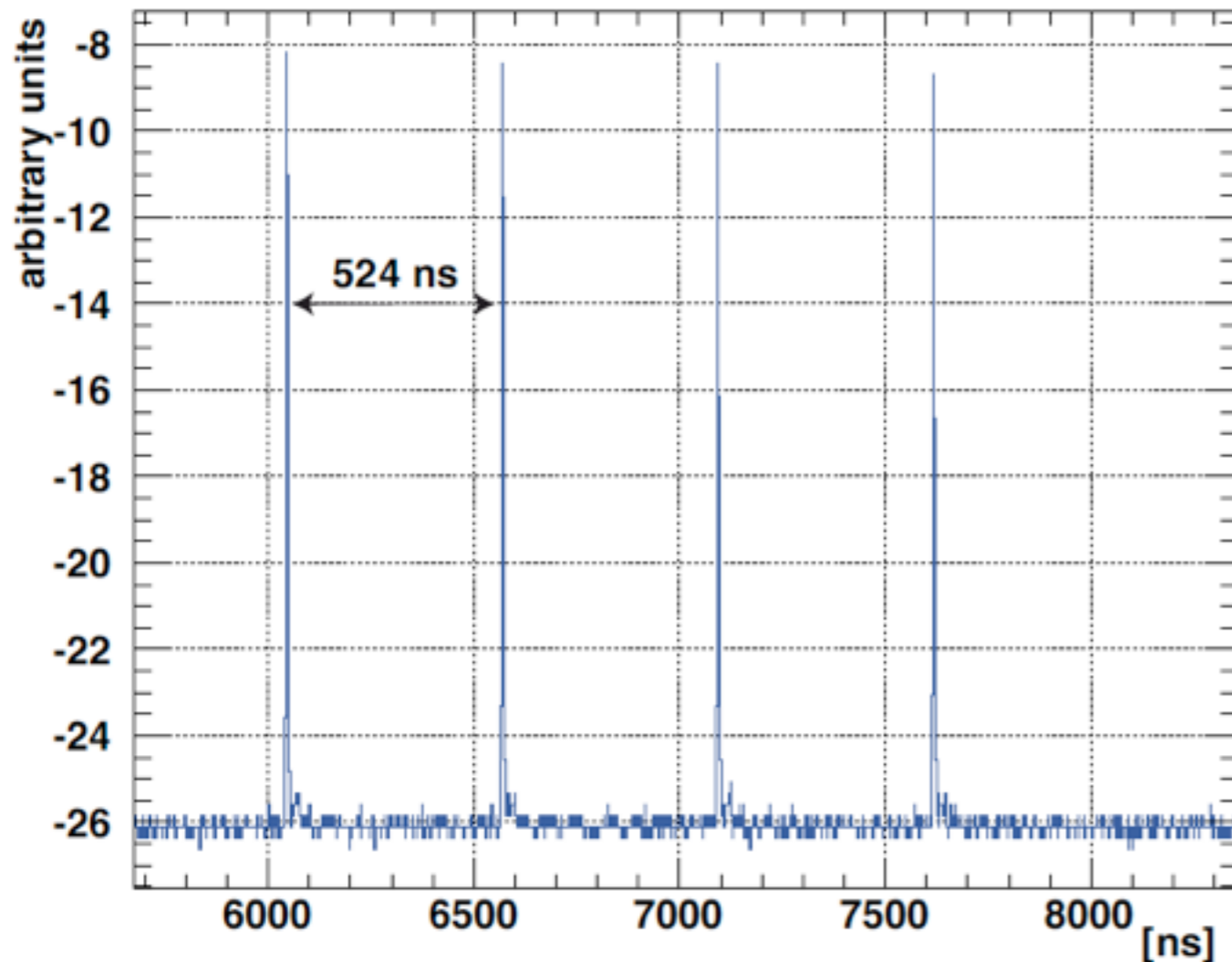
- September 2011: Opera beobachtet, dass die Neutrinos 60 ns zu schnell sind (bei einem Fehler von gut 10 ns).

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!



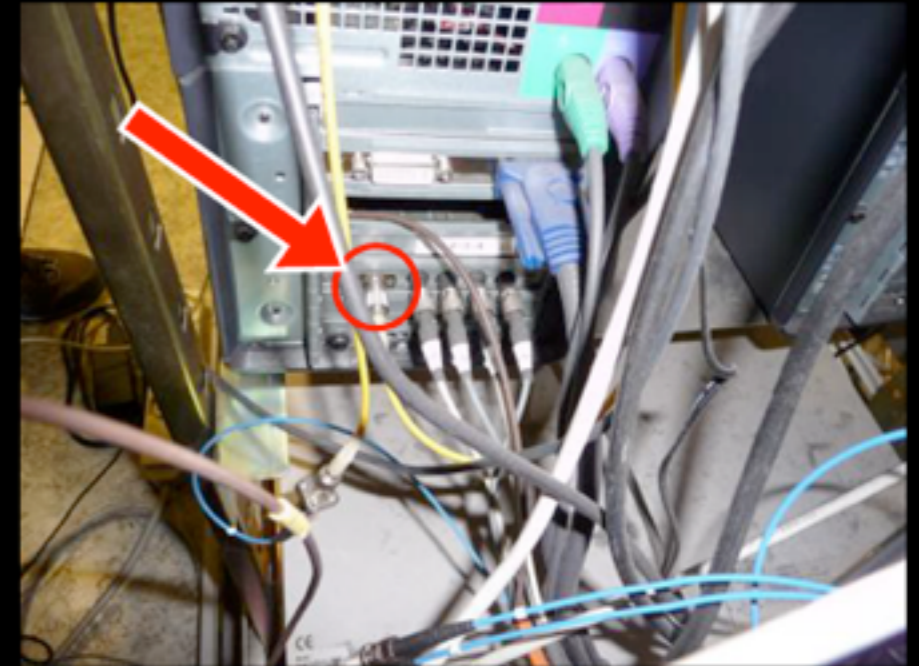
Bestätigt ursprüngliches Ergebnis:
Strahlstruktur als Ursache
ausgeschlossen

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

... aber Achtung: Für Signal-Laufzeiten in der Elektronik gibt es Korrekturen von 40 μ 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

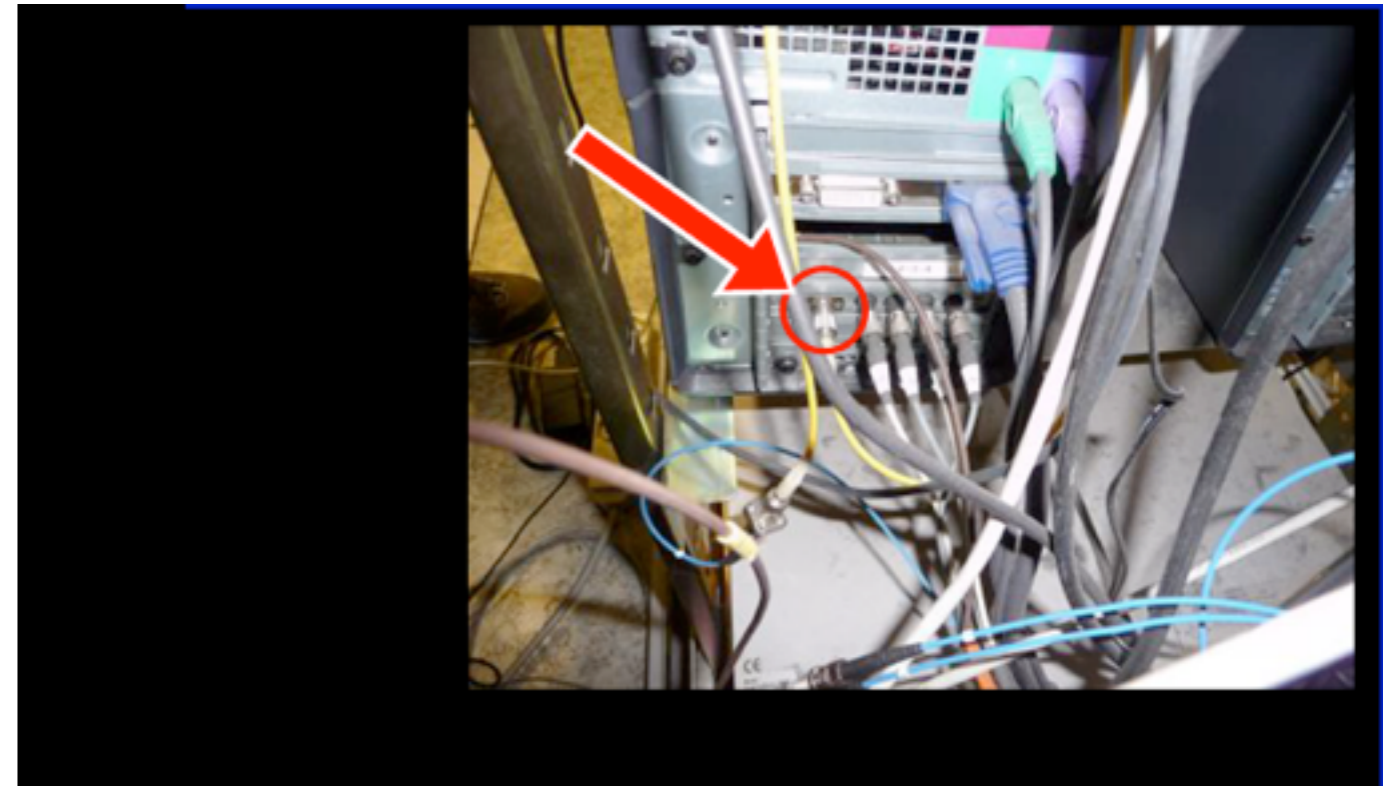


14 December 2011

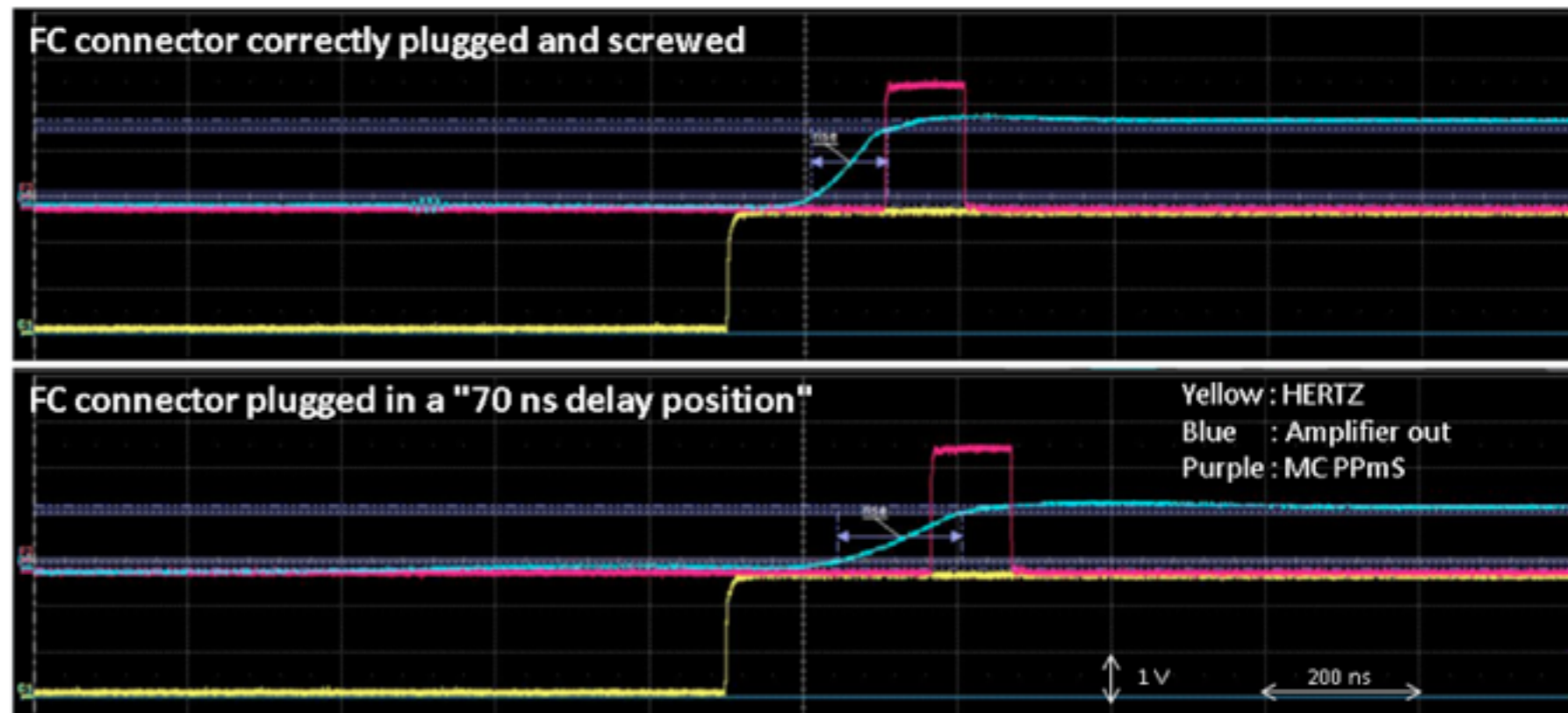
8

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...

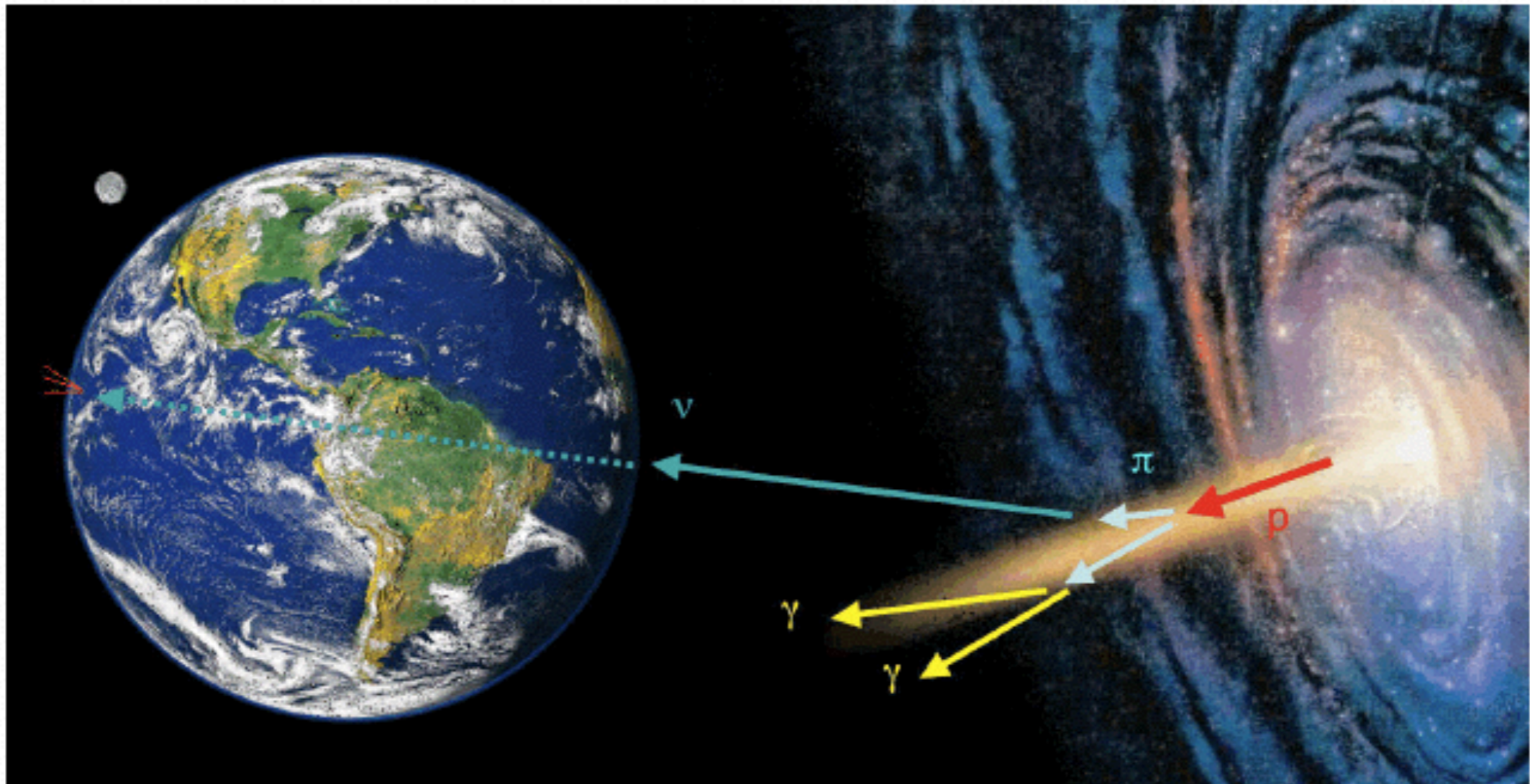


Jetzt: Die Flugzeit ist genau richtig, innerhalb von wenigen ns!



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 ~ 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)

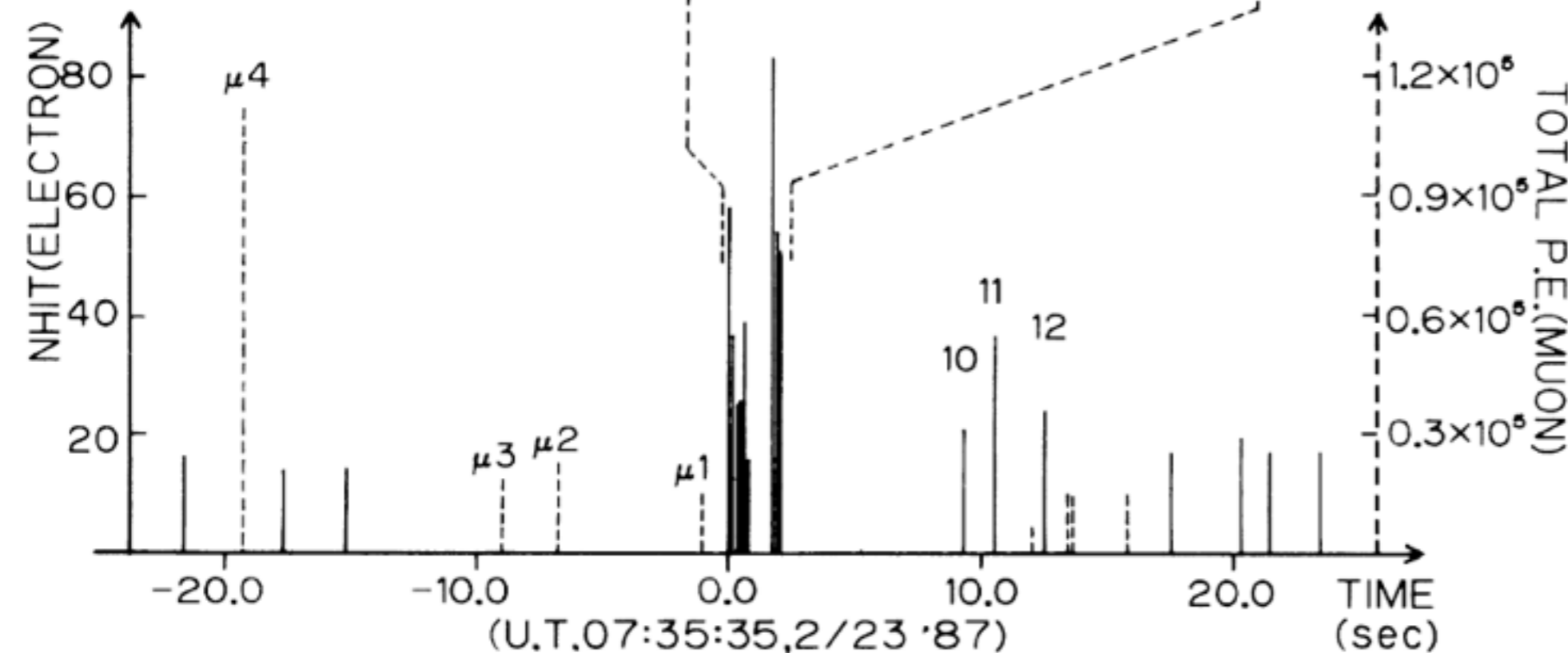
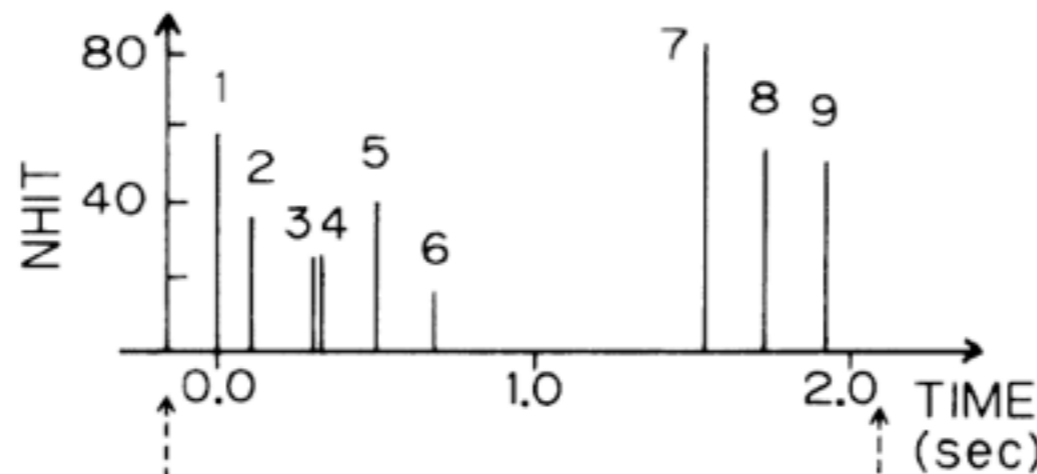


Kamiokande Signal

- 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

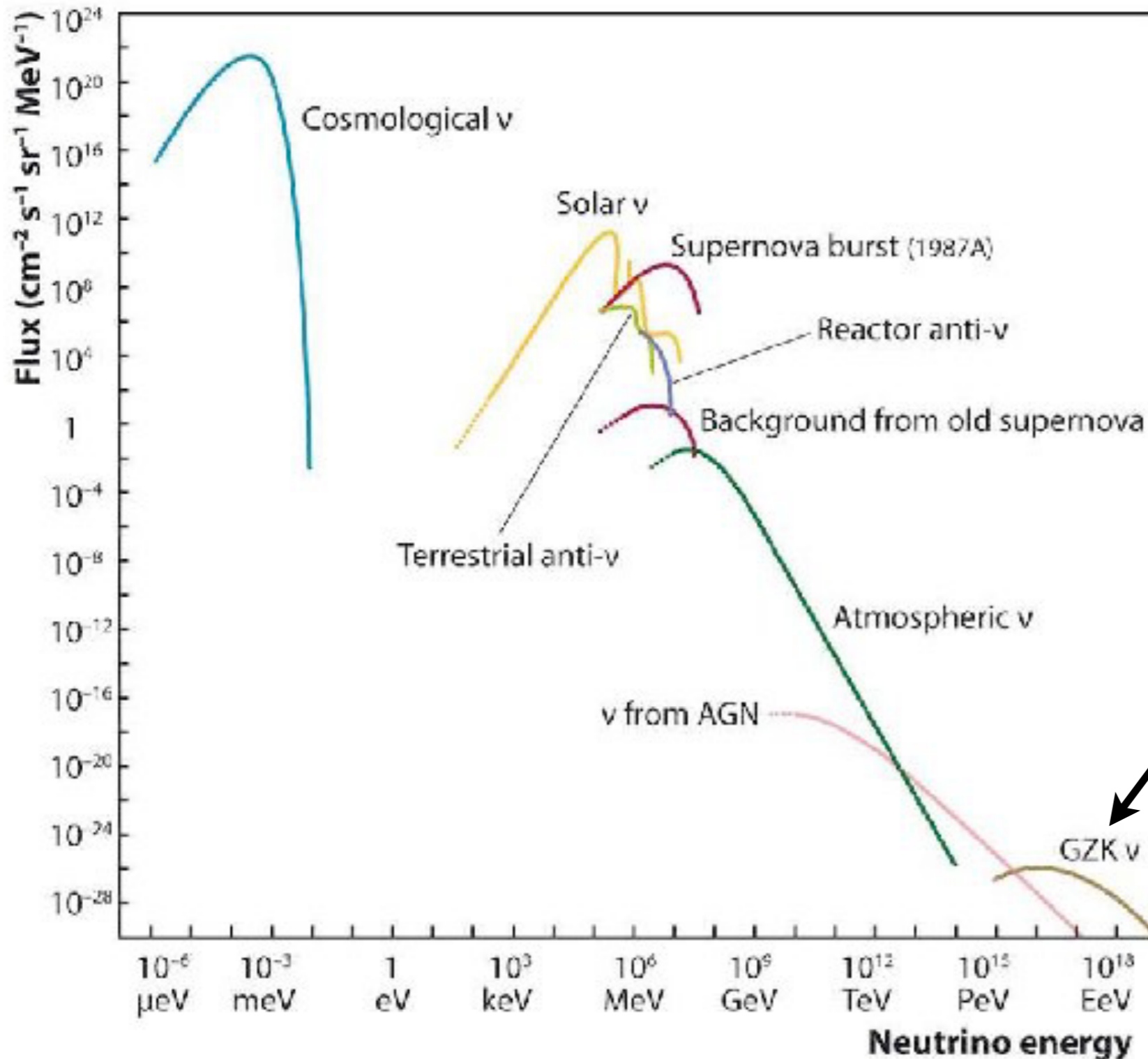


Nur $\bar{\nu}_e$: Höchste Nachweiswahrscheinlichkeit, niedrigste Energieschwelle

PRL 58, 1490 (1987)



Kosmische Neutrinos: Erwartungen



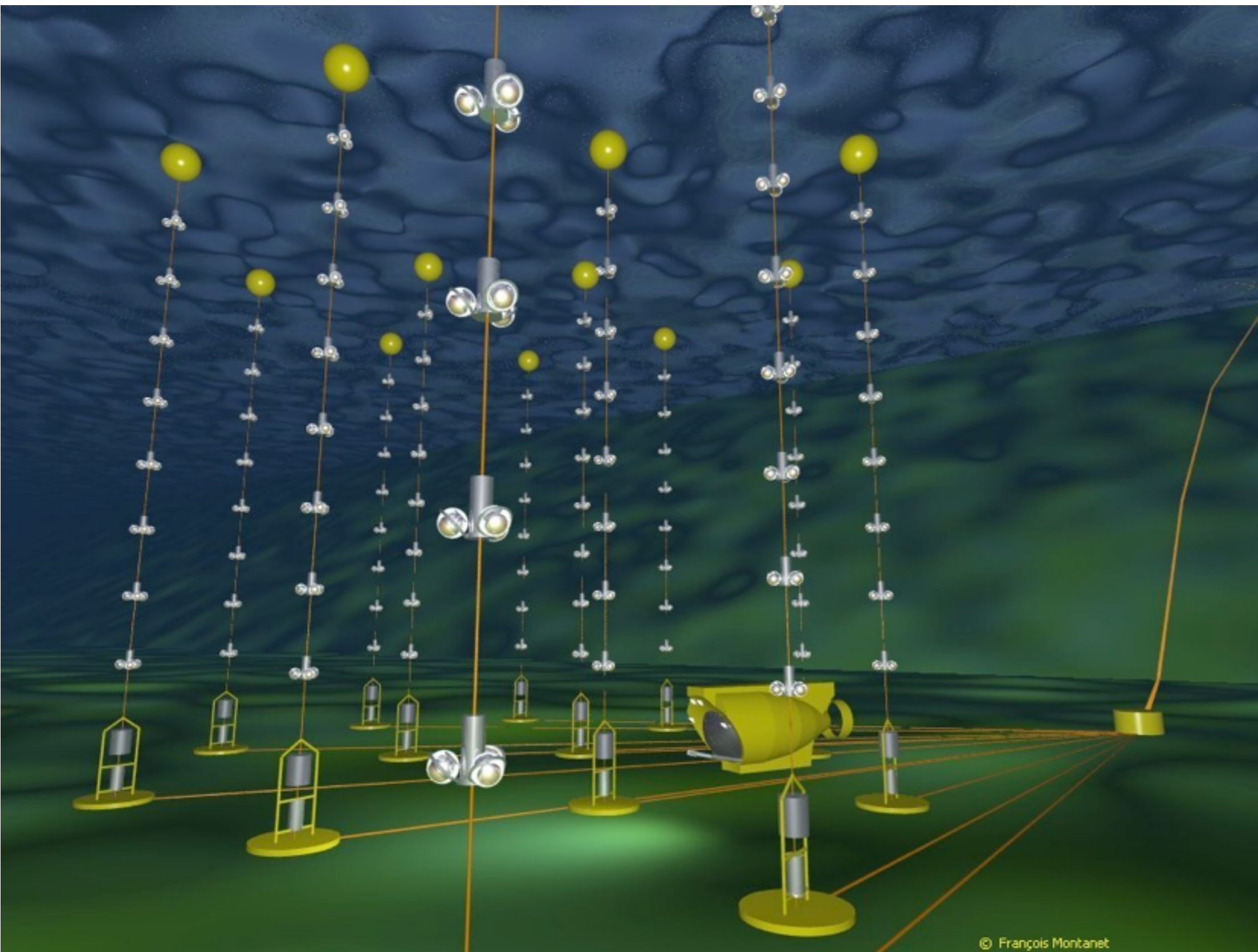
kosmogenische Neutrinos: Erzeugt durch den Zerfall von Pionen aus GZK-Ereignissen: Können Hinweise zu den Quellen der höchstenergetischen Teilchen liefern

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 ν_e
 - hohe Reichweite, bei extremen Energien genug Signal
 - Erste Tests mit RICE im Antarktischen Eis, grössere Sensitivität mit ARIANNA, ARA

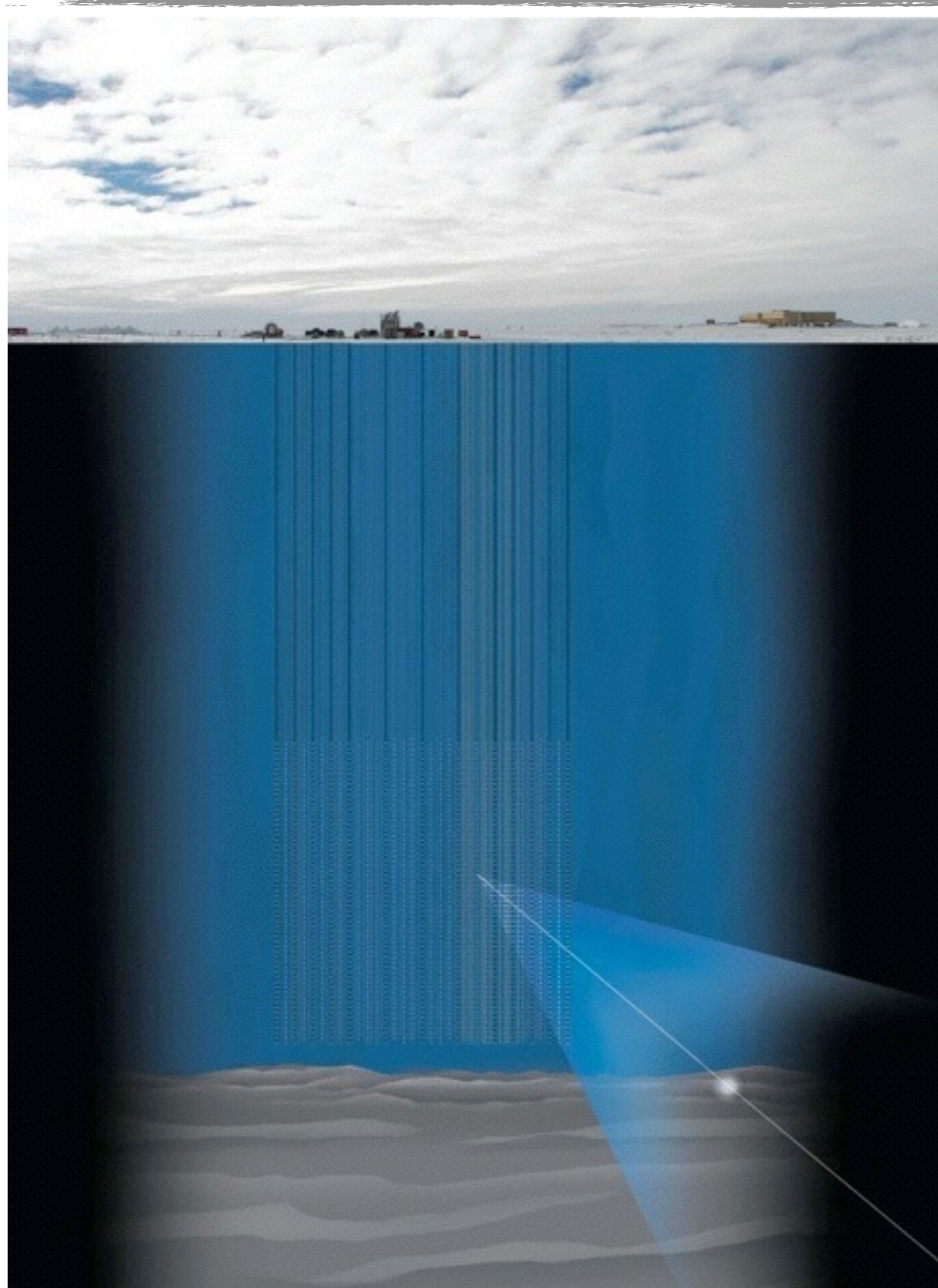
Antares



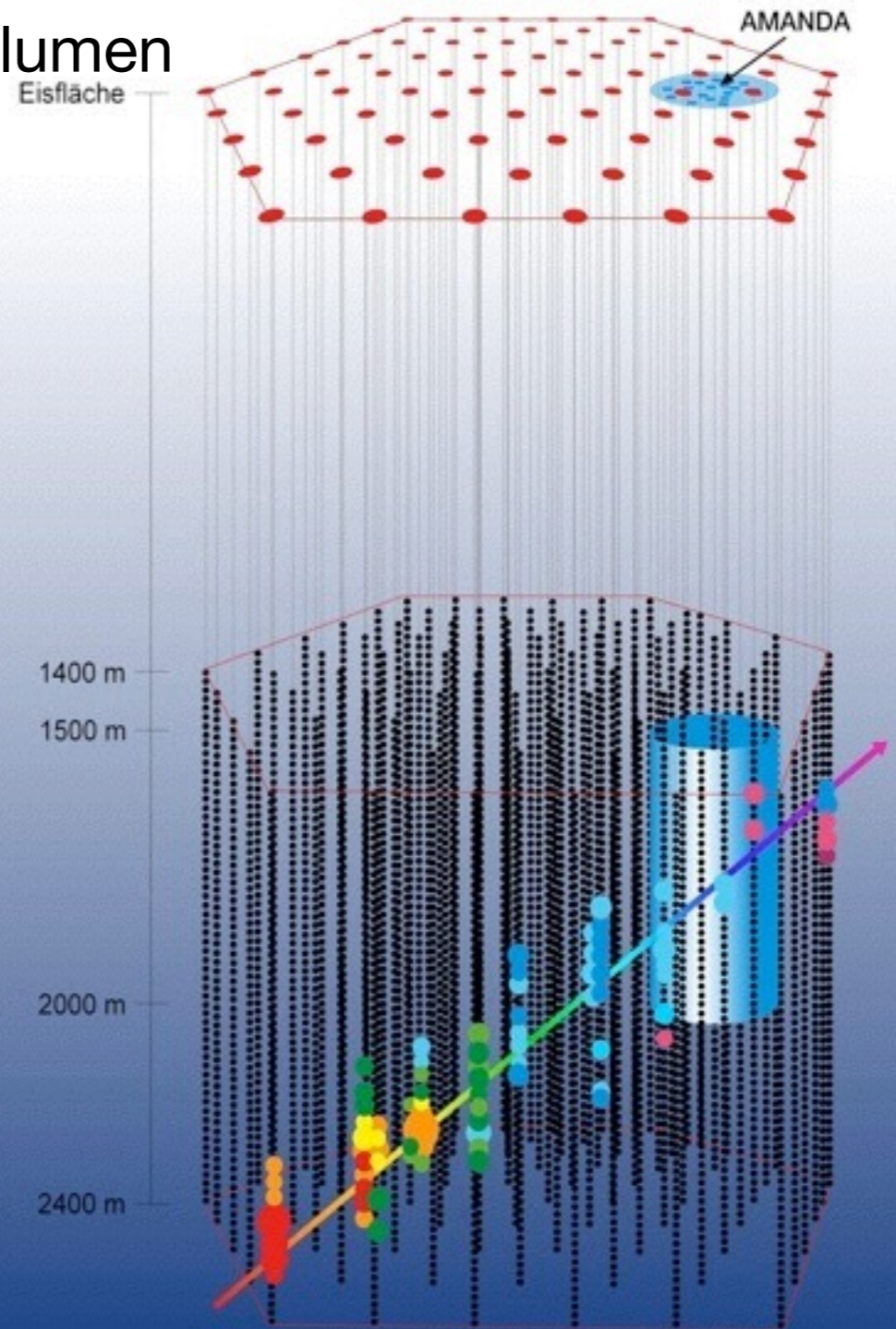
- in 2.5 km Tiefe vor der Küste Südfrankreichs

© François Montanet

Amanda/IceCube



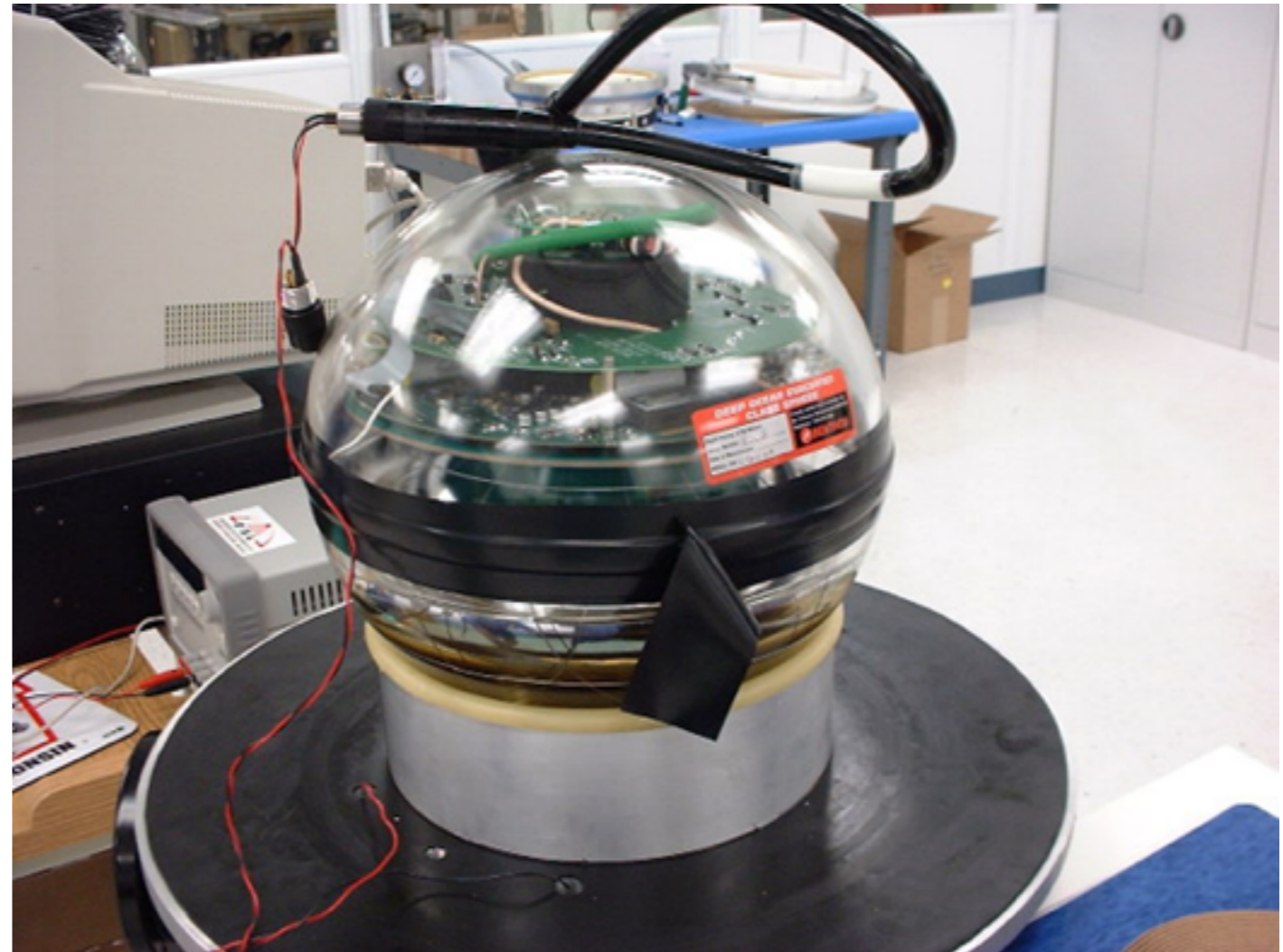
IceCube: 1 km³ Instrumentiertes
Volumen



Amanda/IceCube: Neutrinos am Südpol

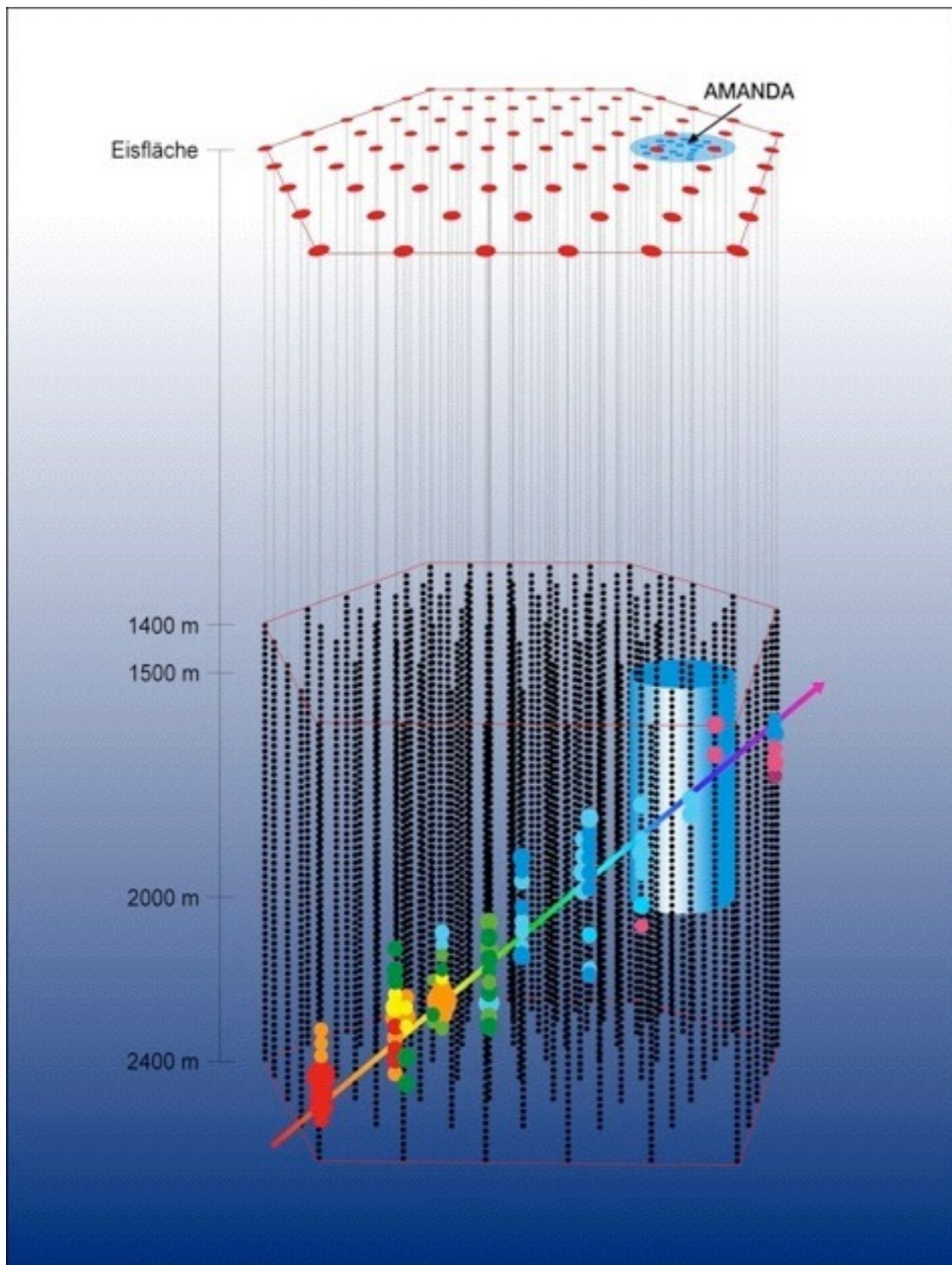


Amanda/IceCube: Neutrinos am Südpol



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

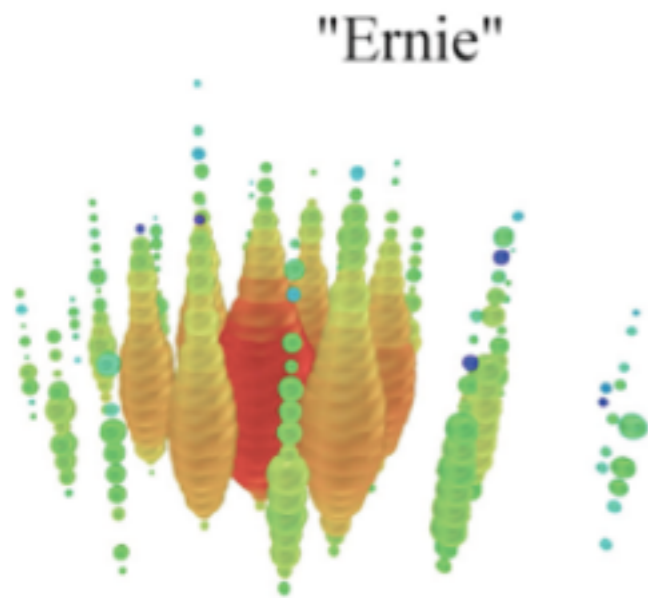
IceCube-Ereignis



- 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

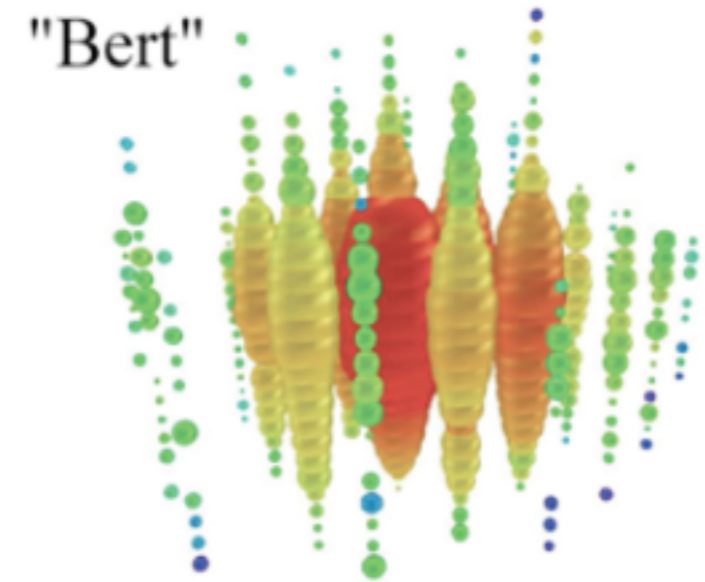
- IceCube hat zwei Ereignisse beobachtet:



1.14 ± 0.17 PeV



©2013 Sesame Workshop



1.04 ± 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:

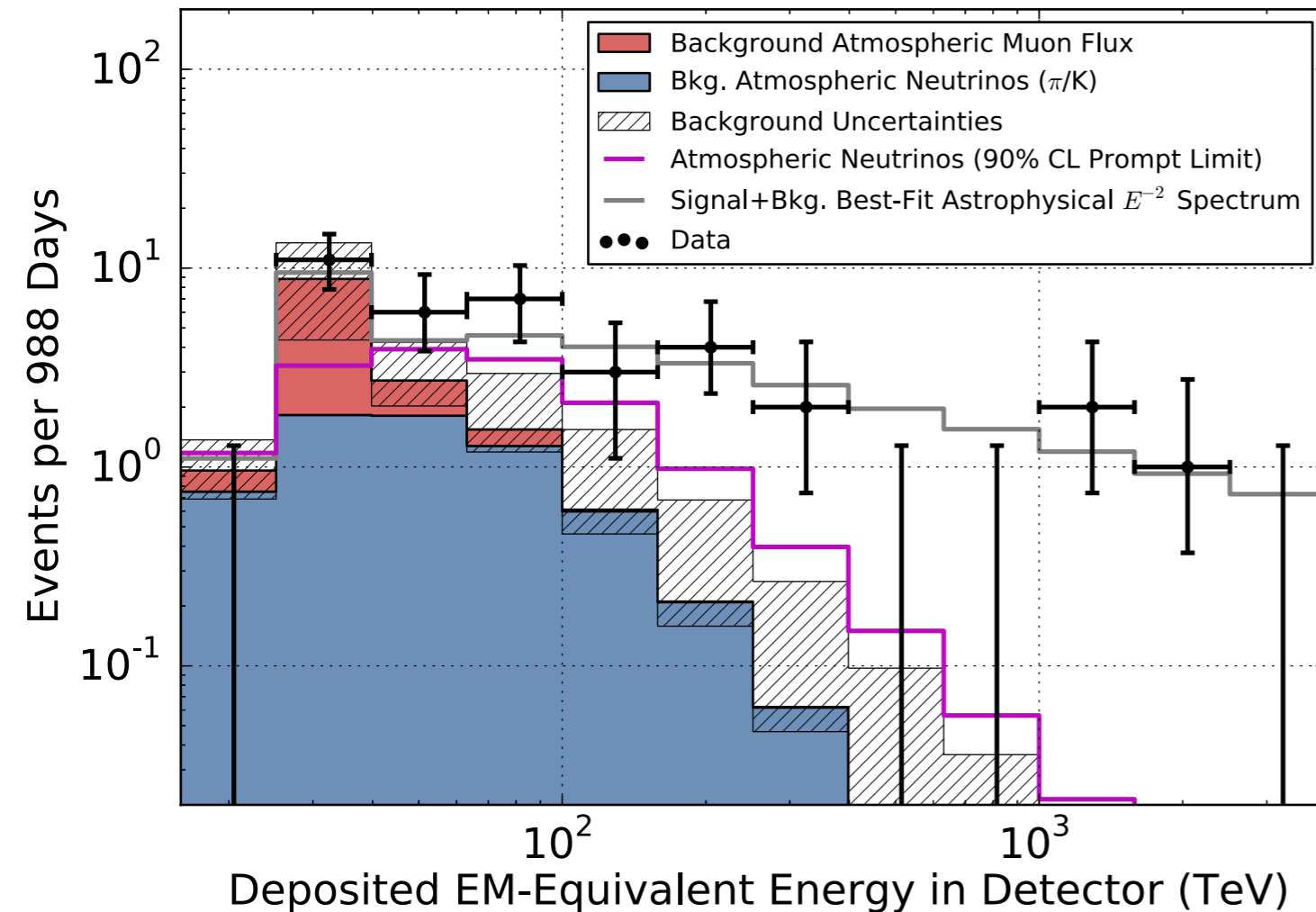


(sichtbare Energie im Detektor, Neutrinoenergie höher)

- 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

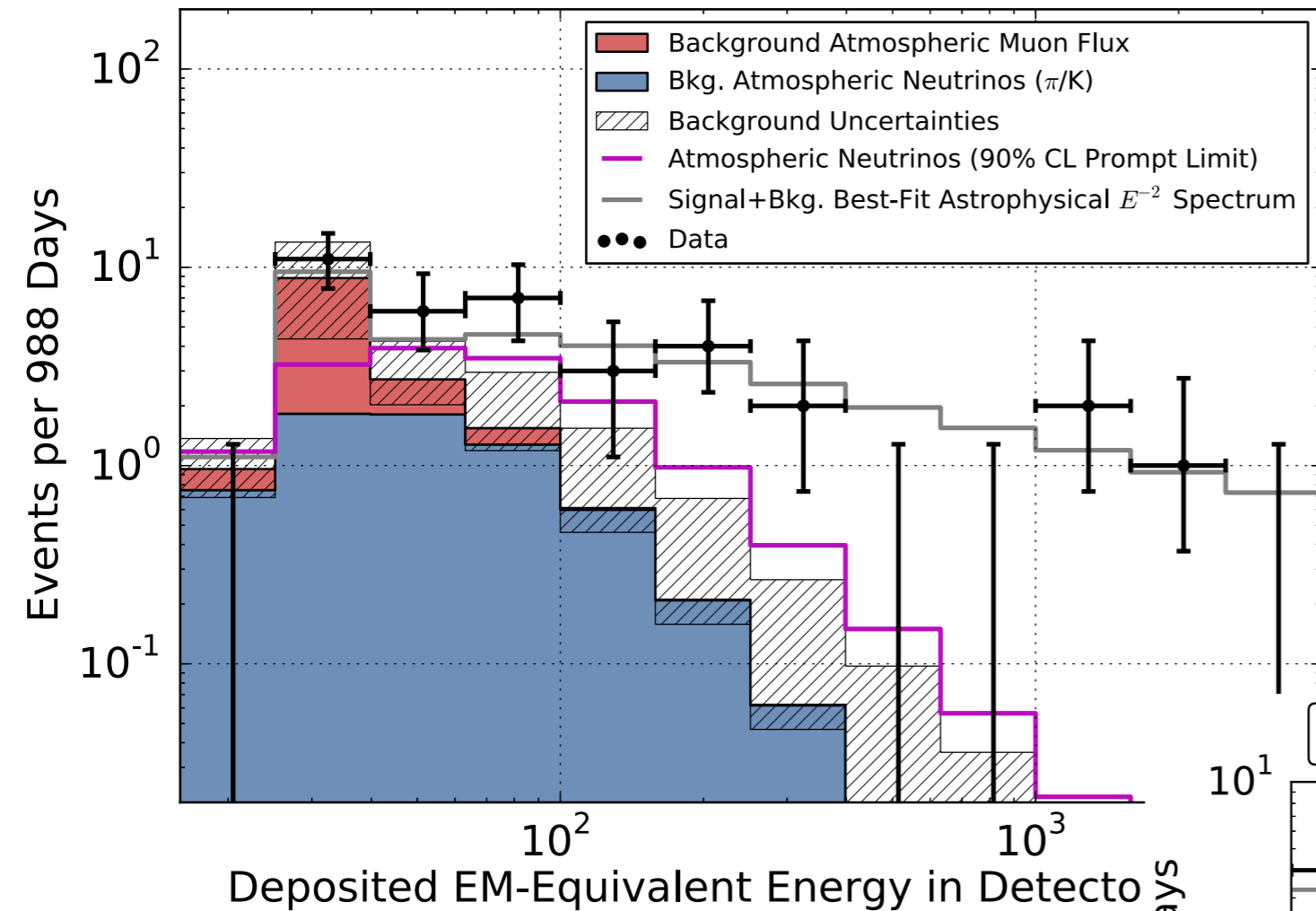
Neutrinos bei höchsten Energien



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

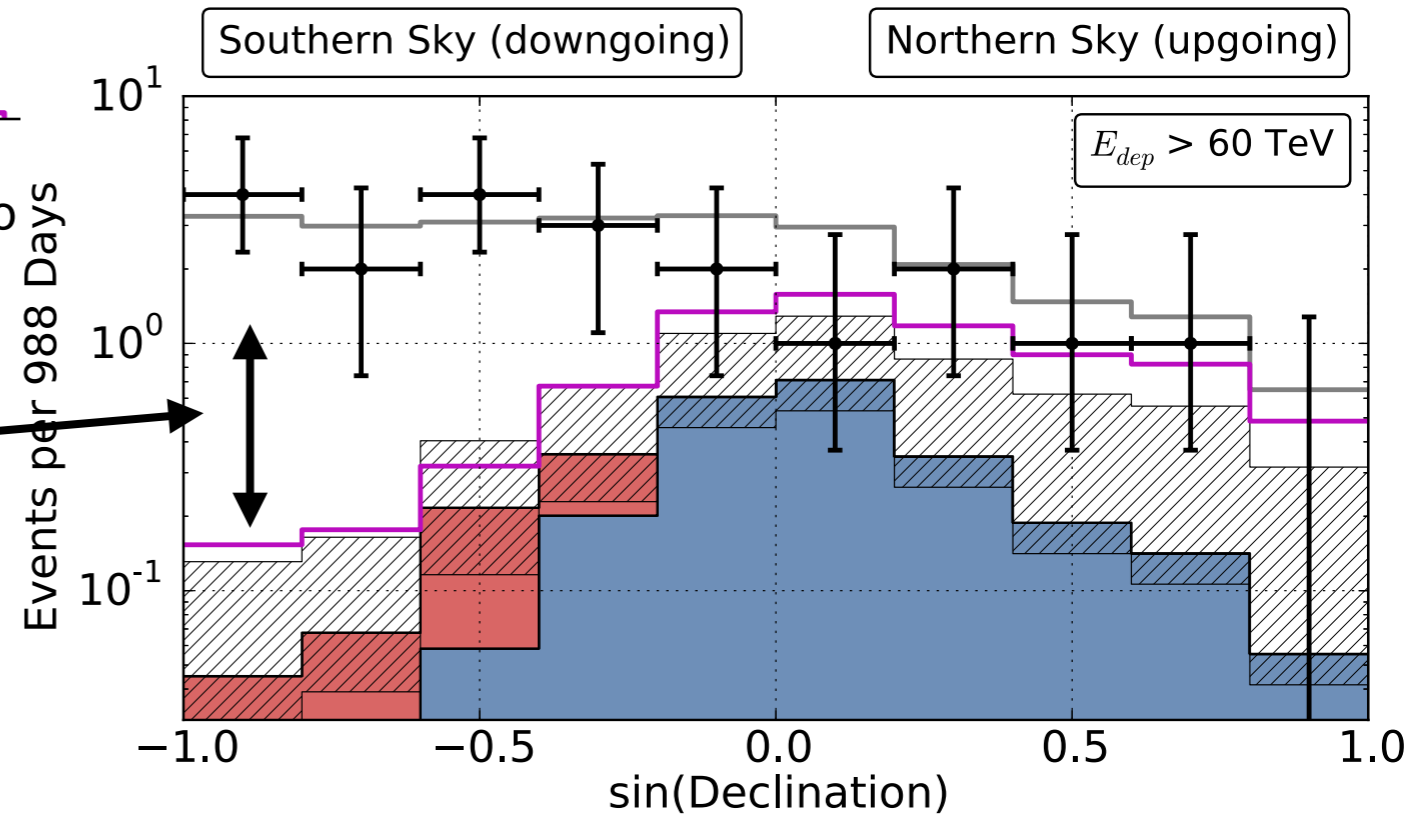
Bis jetzt keine einzelnen Quellen /
Korrelation mit bekannten
Quellen / deutliche Anisotropien
beobachtet

Neutrinos bei höchsten Energien



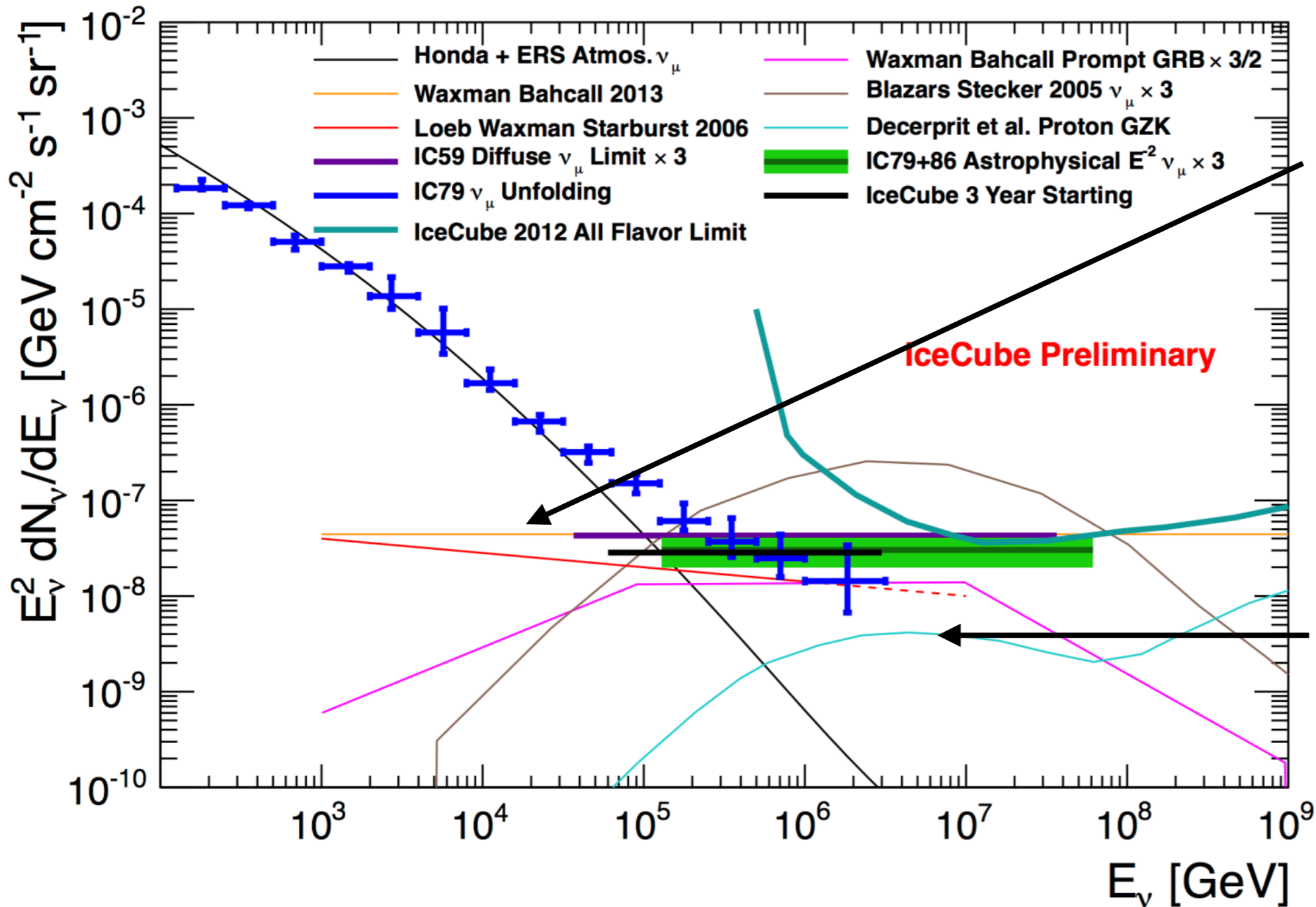
- Atmosphärischer Untergrund mit 5.7σ ausgeschlossen
- Daten konsistent mit einem kosmischen Neutrinofluss mit E^{-2}

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



Wo kommen die Neutrinos her?

- Quelle (noch) ungeklärt



obere Grenze für kosmische Neutrinos aus Meson-Produktion und Zerfall in Quellen für kosmische Strahlung (Waxman, Bahcall) [Verbindung unklar - gilt eigentlich für $\sim 100+$ PeV...]

Erwartung für "GZK-Neutrinos" - Neutrinoherkunft in GZK-Prozessen (Meson-Produktion und Zerfall)

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 θ_{13} stimmen mit Reaktor-Beobachtungen überein, θ_{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 θ_{13} stimmen mit Reaktor-Beobachtungen überein, θ_{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: 07.07., “Neutrinos II”, S. Bethke



Themenübersicht

07.04.	Einführung
14.04.	Beschleuniger
28.04.	Detektoren in der Nicht-Beschleuniger-Physik
05.05.	Kosmische Beschleuniger
12.05.	Das Standardmodell
19.05.	Starke Wechselwirkung
26.05.	Niederenergie - Präzisionsexperimente
02.06.	Dunkle Materie & Dunkle Energie
09.06.	Pfingsten - Keine Vorlesung!
16.06.	Kosmische Strahlung I
23.06.	Kosmische Strahlung II
30.06.	Neutrinos I
07.07.	Neutrinos II