Unterscheidung bei den Čerenkov-Detektoren:

1. Im inneren Nachweisvolumen vollständig enthaltene Neutrinoreaktionen, bei denen keine Teilchenspur den inneren Detektorteil verläßt ('fully contained', FC).

   In diesem Fall ist die im Detektor über die Pulshöhen der PMTs nachgewiesene Reaktionsenergie $E_{\rm gem} \approx E_\nu$.

   Auf dieser Basis lassen sich diese Ereignisse weiter unterteilen in

   (a) multi-GeV-Ereignisse mit $E_{\rm gem} > 1.33$ GeV, bei denen die Neutrinorichtung durch die Richtung des im inversen β-Zerfall produzierten geladenen Leptons und damit durch die Richtung des des Čerenkov-Lichtkegels gegeben ist und andernfalls
   (b) sub-GeV-Ereignisse mit $E_{\rm gem} < 1.33$ GeV.

2. Neutrinoreaktionen, bei denen eine oder mehrere Tochterspuren das innere Volumen verlassen ('partially contained', PC).

   Diese Signatur tritt vor allem bei höheren ν-Energien auf.

Meßgröße:

Doppelverhältnis:

$$\boxed{R = \frac{r_{\rm exp}}{r_{\rm sim}} = \frac{(N_\mu/N_e)_{\rm exp}}{(N_\mu/N_e)_{\rm sim}} \equiv \frac{N_\mu^{\rm exp}/N_\mu^{\rm sim}}{N_e^{\rm exp}/N_e^{\rm sim}}}$$

d.h. $R = 1$, falls die Meßergebnisse mit der Erwartung übereinstimmen.

Alle Experimente messen jedoch $R < 1$.

$\Longrightarrow$ "Atmosphärische ν-Anomalie"

Zuerst bei Kamiokande entdeckt mit signifikantester Messung, die durch Super-Kamiokande 1998 noch deutlich verbessert wurde (siehe Tabelle).

Super-Kamiokande-Ergebnis 2000:

$$\begin{aligned} R &= 0.65 \pm 0.019(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.}) \ \ (\text{sub} - \text{GeV}) \\ R &= 0.67 \pm 0.034(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.}) \ \ (\text{multi} - \text{GeV}) \end{aligned}$$

Kürzlich (2000) auch signifikante Bestätigung durch kalorimetrische Detektoren:

- Das MACRO-Experiment im Gran-Sasso-Tunnel:

$$R = 0.59 \pm 0.07 \pm 0.07.$$

- Das Soudan 2-Experiment im Soudan-Bergwerk:

$$R = 0.68 \pm 0.11 \pm 0.06.$$

Erklärung der Anomalie:

1. ν_e-Überschuss oder
2. ν_μ-Defizit vor allem bei niedrigen ν-Energien
3. oder beides.

Nach den Messungen der ν-Flußspektren ist die Erklärung 2 am wahrscheinlichsten.

Falls keine Fehler in den Messungen oder der Simulation, kann die Anomalie durch ν-Oszillationen erklärt werden. Möglichkeiten:

1. $\nu_\mu \longrightarrow \nu_e$

   (Trotz $\mathcal{P}(\nu_\mu \to \nu_e) = \mathcal{P}(\nu_e \to \nu_\mu)$ möglich, da bei der Produktion durch kosmische Strahlung $N_{\nu_\mu} \approx 2 \cdot N_{\nu_e}$.)

2. $\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$

3. $\nu_\mu \longrightarrow \nu_s$ (hypothetisches zusätzliches inaktives, 'steriles' Neutrino)

Die verschiedenen Modelle führen zu verschiedenen Vorhersagen, die experimentell geprüft werden können.

Überprüfung der Hypothese der atmosphärischen ν-Oszillationen:

Erster Test durch Kamiokande mit multi-GeV- und PC-Ereignissen, die aufgrund der relativ hohen ν-Energien ($E_\nu > 1.33$ GeV, $< E_\nu > \approx 7$ GeV) die Bestimmung der ν-Flugrichtung erlauben (s.o., Winkelmeßgenauigkeit ca. $20°$).

$\Longrightarrow$ Verhältnis R als Funktion des Zenitwinkels θ_Z der Neutrinos:

- $\cos\theta_Z > 0$: Neutrinos von oben (Zenit), $L \approx 20$ km (Höhe der Atmosphäre).
- $\cos\theta_Z < 0$: Neutrinos von unten, $L \approx 13 \cdot 10^3$ km (Erzeugung auf der gegenüberliegenden Seite des Erdballs, Durchmesser der Erde als Oszillationsstrecke).

$\Longrightarrow$ R ist abhängig von θ_Z und tritt auch bei höheren E_ν auf.

Die Anomalie (Abweichung $R < 1$) ist am größten ($R \approx 0.5$) bei $\theta_Z = 180°$ (ν von unten).

$\Longrightarrow$ Hinweis auf ν-Oszillationen in der Erde (mit oder ohne Materieeffekte).

Die Meßergebnisse können dadurch sehr gut beschrieben werden. Die Oszillationsparameter ergeben sich durch χ^2-Anpassung des Oszillationsmodells an die Daten inklusive Zenitwinkelabhängigkeit.

Ergebnisse zu atmospärischen ν-Oszillationen

(Annahme: $n = 2$-flavour-Oszillationen, Disappearance):

Kamiokande, 1997:

$$\begin{array}{lcl} \underline{\nu_\mu \longrightarrow \nu_e}: \ \delta m^2 & = & 1.8 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{eV}^2 \\ \underline{\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau}: \ \delta m^2 & = & 1.6 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{eV}^2 \end{array}$$

bei $\sin^2 2\theta = 1.0$ (≥ 0.6 mit 90% Konfidenzniveau (maximale Mischung; ohne Berücksichtigung von Materieeffekten).

Bemerkungen:

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ist ausgeschlossen durch Reaktorexperimente, insbesondere durch Chooz und Palo Verde.

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ entspricht einer mittleren Oszillationslänge von

  $$< L_0 >= 2.48 \cdot \frac{<E_\nu>[\mathrm{MeV}]}{\delta m^2[\mathrm{eV}^2]}\ m = \frac{2.48 \cdot 7 \cdot 10^3}{1.6 \cdot 10^{-2}}\ m \approx 1000 \text{ km}$$

  im Vergleich zum Erddurchmesser von ca. 13000 km.

- Damit ist die Oszillationswahrscheinlichkeit $\mathcal{P}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau; L, E_\nu)$ für $< E_\nu > \approx 20$ GeV (Beschleuniger!) maximal für $L \approx 3700$ km.

  $\Longrightarrow$ "Long-Baseline"-Experimente an Beschleunigern zur Überprüfung (K2K, MINOS, ICANOE, OPERA).

Super-Kamiokande, 1998:

Lange erwartete Ergebnisse zur Unterstützung der atm. ν-Oszillationshypothese mit hoher Datenrate (FC+PC):

$\cos\theta_Z$-Abhängigkeit auch separat für ν_e- und ν_μ-Flüsse:

sehr signifikantes Defizit gegenüber der Erwartung ohne Oszillation bei ν_μ bei großen θ_Z im Gegensatz zu ν_e.

Eine andere Erklärung als ν-Oszillationen konnte nicht gefunden werden, wobei die $\nu_\mu \to \nu_\tau$-Hypothese die präzisen Daten nun deutlich besser beschreibt als $\nu_\mu \to \nu_e$:

$$\underline{\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau : \quad \delta m^2 = 2.2 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{eV}^2; \ \ \sin^2 2\theta = 1.0}$$

"Entdeckung atmosphärischer ν-Oszillationen"

Kamiokande und Super-Kamiokande zusammengefaßt ergibt (schmaler Überlapp der erlaubten Bereiche):

$$\underline{\delta m^2_{\mu\tau} \approx 5 \cdot 10^{-3}; \ \ \sin^2 2\theta = 1.0}$$

Super-Kamiokande, 2000:

- Unterscheidung zwischen verschiedenen Oszillations-hypothesen.

- Zusätzliche Evidenz für Oszillationen:

$$\mathcal{P}(\nu_\mu \to \nu_\tau) = sin^2 2\theta sin^2(1.27 \cdot \delta m^2_{\mu\tau} L/E_\nu)$$

1. Vergleich der Defizite bei verschiedenen E_ν: zusätzliche hochenergetischere ν_μ:
   (a) mit aufwärts zeigenden gestoppten Myonen: $< E_\nu >\approx 10$ GeV.
   (b) mit aufwärts zeigenden durchgehenden Myonen: $< E_\nu >\approx 100$ GeV.
2. Periodizität der Oszillationen: L/E_ν-Abhängigkeit des Defizits.

$\Longrightarrow$ Ergebnis 2000 mit FC+PC+Aufwärts-Myonen:

- $\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$-Oszillationen dominieren:

$$\underline{\delta m^2_{\mu\tau} \approx 3.2 \cdot 10^{-3}; \;\; \sin^2 2\theta = 1.0}$$

als wahrscheinlichste Parameter bzw. mit 90% Konfidenzniveau erlaubter Bereich:

$$1.5 \cdot 10^{-3} < \delta m^2_{\mu\tau} < 5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2; \;\; \sin^2 2\theta > 0.88$$

- $\nu_\mu \longrightarrow \nu_e$-Oszillationen sind stark unterdrückt; kleiner Beitrag ist nicht ausgeschlossen.

- $\nu_\mu \longrightarrow \nu_s$-Oszillationen sind bei atmosphärischen Neutrinos mit 99% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen:
  - Vergleich von NC und CC ν-Reaktionen: keine Reaktionen durch sterile Neutrinos (Definition), CC-Reaktionen für ν_τ unterdrückt wegen der hohen τ-Leptonmasse.
  - Materieeffekte in der Erde verschieden zwischen ν_s und andere Neutrinos.

Weitere Unterstützung durch kalorimetrische und Spurdetektoren:

MACRO, 2000:

- $\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$ ist bevorzugte Erklärung für das beobachtet Defizit:

$$\delta m^2_{\mu\tau} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{eV}^2;\ \ \sin^2 2\theta = 1.0$$

- $\nu_\mu \longrightarrow \nu_s$ mit 90% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen.

Soudan 2, 2000:

$$\delta m^2_{\mu\tau} \approx 7.9 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{eV}^2;\ \ \sin^2 2\theta = 0.9$$

Long Baseline-Experimente:

Ziel: Test der atmosphärischen Neutrinomessungen.

K2K beobachtet als erstes kurz nach dem Start ein Defizit (ν_μ-Disappearance in Super-Kamiokande). Die Sensitivität reicht über den von Super-Kamiokande für atm. Neutrinos erlaubten Bereich hinaus.

Letzteres gilt noch mehr für die geplanten Experimente ICANOE und OPERA im Gran Sasso mit ν_μ-Strahl vom CERN, die erst in einigen Jahren in Betrieb gehen werden.