2.5 Atmosphärische Neutrinos

Erzeugung durch die Wechselwirkung kosmischer Strahlung (99% Protonen und einige Kerne bis Fe, 1% Elektronen, 0.01% γ, bisher keine Antimaterie) in den oberen Schichten der Erdatmosphäre (in 15–20 km Höhe) mit N-, O-Kernen.

Energiespektrum $N(E_p) \sim E_p^{-\gamma}$, mit $\gamma = 2.7(E_p < 10^{15}$ eV), $\gamma = 3.0(E_p > 10^{15}$ eV).

Protonenergien bis 10^{20} eV wurden in der kosmischen Strahlung beobachtet (kosmische Beschleuniger).

Produktionsmechanismus in hadronischen Luftschauern (Kaskadenprozeß):

$$p + N_{\mathrm{Atm.}} \longrightarrow \pi^{\pm}, K^{\pm} + X$$

$$\begin{aligned}
\pi^{+}, K^{+} \longrightarrow \quad & \mu^{+} \; \nu_{\mu} \\
& \mu^{+} \quad \longrightarrow e^{+}\nu_e\overline{\nu_\mu} \\
\pi^{-}, K^{-} \longrightarrow \quad & \mu^{-} \; \overline{\nu_{\mu}} \\
& \mu^{-} \quad \longrightarrow e^{-}\overline{\nu_e}\nu_\mu
\end{aligned}$$

π^+ überwiegen leicht in atmosphärischen Protonschauern.

Auf der Erdoberfläche lassen sich $e^\pm$, $\mu^\pm$, γ und $\nu_{e,\mu}$ aus den Luftschauern nachweisen; unterirdisch $\mu^\pm$ und $\nu_{e,\mu}$.

Wegen der relativistischen Zeitdilatation erreichen viele Myonen die Erdoberfläche vor ihrem Zerfall.

$\Longrightarrow$ Bei niedrigen Energien E_p, im Grenzfall in dem alle atmosphärischen Myonen in der Luft zerfallen, gilt auf der Erde:

$$r := \frac{N_{\nu_\mu} + N_{\bar{\nu_\mu}}}{N_{\nu_e} + N_{\bar{\nu_e}}} \approx 2$$

$$r_\mu := \frac{N_{\bar{\nu_\mu}}}{N_{\nu_\mu}} \approx 1; \qquad r_e := \frac{N_{\bar{\nu_e}}}{N_{\nu_e}} \approx \frac{N_{\mu^-}}{N_{\mu^+}} < 1$$

Präziser erhält man die Verhältnisse einschhließlich der E_ν-Abhängigkeit aus Simulationsrechnungen (sog. Monte-Carlo-Simulationen der stochastischen Prozesse) unter Einbeziehung aller Erzeugungs- und Zerfallsraten, der Ablenkung geladener Teilchen im Erdmagnetfeld und der Sonnenaktivität.

Vorhersagegenauigkeit:

- Absolute ν-Flüsse zu $\approx 30\%$.
- Verhältnisse r, r_μ, r_e zu $\approx 5 - 10\%$.

  (gemeinsame syst. Fehler in den ν-Flüssen kürzen sich).

Nachweis atmosphärischer Neutrinos:

Zur Abschirmung anderer kosmischer Strahlung, vor allem atmosphärischer Myonen, in Untergrundexperimenten in Bergwerken und Tunnels, die oft ursprünglich zur Suche nach Protonzerfällen gebaut wurden.

Eindringtiefe von Myonen in die Erde bei $E_\mu \approx 1$ TeV: etwa 1 km.

Myonflußdichte auf der Erdoberfläche: $5 \cdot 10^9$ m^{-2}J^{-1} = 0.8/m^2/GeV.

Untergrundexperimente:

IMB (Irvine-Michigan-BNL) Kamiokande I–III Super-Kamiokande	Wasser- Čerenkov-Detektor (ν-Energie u. -Richtung)
Soudan 2 (Minnesota) Frejus-Tunnel (Frankreich) NUSEX, Mont-Blanc-Tunnel (Nucleon Stability Experiment)	Kalorimeter mit Spurmessung (ν-Energie u. -Richtung)

Nachweisreaktion: inverser β-Zerfall:

Einfachste und häufigste Reaktionen bei den relativ niedrigen ν-Energien $< E_\nu >\approx 0.6$ GeV (quasielastische Streuung, CC):

$$\nu_e + n \to e^- + p \qquad \nu_\mu + n \to \mu^- + p$$
$$\overline{\nu}_e + p \to e^+ + n \qquad \overline{\nu}_\mu + p \to \mu^+ + n$$

Identifikation des ν-flavours über das zugehörige geladene Lepton (Leptonzahlerhaltung):

Elektronen $\Longrightarrow$ elektro-magn. Schauer $\Longrightarrow$ diffuse Č-Ringe

Myonen $\Longrightarrow$ durchlaufende Spuren ohne WW $\Longrightarrow$ scharfe Č-Ringe

Meßgröße:

Doppelverhältnis:

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

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.