2. Suche nach Neutrino-Oszillationen

2.3 Experimente an Teilchenbeschleunigern

2.3.1 Experimente an Hochenergiebeschleunigern

Intensive Neutrinostrahlen von Proton-Synchrotrons + Target:

- Brookhaven (BNL), Long Island, NY: AGS
- CERN, Genf: SPS, 300 GeV Protonen
- Fermilab (FNAL), Chicago: Tevatron, 900 GeV Protonen
- Serpukov, bei Moskau

Produktionsreaktion:

$$p + N_{\mathrm{Target}} \longrightarrow \underbrace{\pi^{\pm},\ K^{\pm}}_{\hookrightarrow \mu^{+}\nu_{\mu},\mu^{-}\overline{\nu}_{\mu}} + X$$

π, K-Zerfälle im Flug vom Target (z.B. H_2, D_2, Beryllium,...) zum Detektor.

$\Longrightarrow$ ν_{μ}- und $\overline{\nu}_{\mu}$-Strahlen

mit Untergrund von ν_e, $\overline{\nu}_e$, ν_{τ}, $\overline{\nu}_{\tau}$.

Neutrinostrahlintensität:

- Strahlbündelung und π, K-Produktionsrate nehmen mit der Protonenergie zu.
- π, K-Zerfälle auf der Zerfallsstrecke nehmen wegen der Zeitdilatation mit der Energie ab.

Neutrinonachweisreaktionen im Detektor: inverser $\beta^{\pm}$-Zerfall

- $\nu_e(\overline{\nu}_e + N \longrightarrow e^-(e^+) + X_{\text{Hadronen}}$

  Elektronnachweis durch elektromagnetische Schauer im Detektormaterial.

  ($\nu_e(\overline{\nu}_e)$-Nachweis durch Cowan und Reines 1956, Nobelpreis.)

- $\nu_\mu(\overline{\nu}_\mu + N \longrightarrow \mu^-(\mu^+) + X_{\text{Hadronen}}$

  für $\underline{E_\nu > 110 \text{ MeV}}$.

  (Nachweis, daß $\nu_\mu \neq \nu_e$, durch Lederman, Schwartz und Steinberger 1962, Nobelpreis.)

  Myonnachweis hinter Absorber für andere Teilchen.

- $\nu_\tau(\overline{\nu}_\tau + N \longrightarrow \tau^-(\tau^+) + X_{\text{Hadronen}}$

  für $\underline{E_\nu > 3460 \text{ MeV}}$.

  (Methode zur Suche nach den noch nicht direkt nachgewiesenen ν_τ.)

  τ-Leptonnachweis durch Zerfallsleptonen und fehlende ν-Energie:

$$
\begin{array}{lcl}
\tau^+ & \rightarrow & e^+\nu_e\overline{\nu}_\tau \\
\tau^+ & \rightarrow & \mu^+\nu_\mu\overline{\nu}_\tau \\
\tau^+ & \rightarrow & \overline{\nu}_\tau X
\end{array}
$$

Neutrinoenergiemessung:

$$E_\nu = E_{\text{Lepton}} + E_{\text{HadronenX}} - m_N.$$

1) Konventionelle Neutrinostrahlen:

Eigenschaften:

- Targetoptimierung für maximale π- und K-Ausbeute (nicht zu dick, sonst Absorption im Target).

- Magnetische Ladungs- (ν oder $\overline{\nu}$) und evtl. Impulsfilter für π, K und magnetische Fokussierung.

- π-, K-Zerfallsstrecke in einem Vakuumtunnel:

  Länge $\sim E_{\pi,K} \approx 300 - 500$ m.

- Absorber für Hadronen und Myonen:

  z.B.:

  - 1 km Erdreich (FNAL).
  - 180 m Eisen + 270 m Erdreich (CERN), Eisen instrumentiert mit Myondetektoren zur ν_μ-Flußbestimmung.

z.B. CERN:

- $E_{\nu\max} \approx 200 - 300$ GeV.

- Schmalbandstrahl (NBB) mit festen, hohen ν_μ-Energien (Impulsfilter), $E_{\nu K} > E_{\nu\pi}$;

  niedrigerer ν-Fluß: $\left(\frac{d\phi_\nu}{dE_\nu}\right)_{\max} \approx 10^7$/GeV/Protonpuls.

- Breitbandstrahl (WBB) mit relativ breitem E_ν-Spektrum, $< E_\nu > \approx 20$ GeV (niedrig), höherer Untergrund (kein Impulsfilter);

  höherer ν-Fluß: $\left(\frac{d\phi_\nu}{dE_\nu}\right)_{\max} \approx 10^9$/GeV/Protonpuls.

Untergrundquellen zu ν_μ (z.B.):

• π-, K-Zerfälle vor dem Magnetfilter:	$\overline{\nu}_\mu$, falsche Energie
• $K^+ \to \pi^0 e^+ \nu_e$, $K^- \to \pi^0 e^- \overline{\nu}_e$:	ν_e, $\overline{\nu}_e$
• $K^+ \to \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$, $K^- \to \pi^0 \mu^- \overline{\nu}_\mu$:	$\overline{\nu}_\mu$, falsche Energie
• $\mu^- \to e^- \overline{\nu}_e \nu_\mu$:	ν_e, $\overline{\nu}_e$, $\overline{\nu}_\mu$, falsche Energie
• Zerfälle nach Reaktion im Absorber	ν_e, $\overline{\nu}_e$, $\overline{\nu}_\mu$, falsche Energie

2) Beam Dump-Experimente:

Eigenschaften:

Proton-Strahlstop:

- Dickes, massives Target (z.B. Cu).
- Absorption der π, K im Target vor ihrem schwachen Zerfall (langlebig),

  kein Zerfallstunnel.

$\Longrightarrow$ 1000-fache Anreicherung sog. prompter Neutrinos

aus schwachen, semileptonischen Zefällen von Mesonen mit charm-Quarks (kurzlebig):

$$\begin{array}{rcl} D^0(c\bar{u}),\ D^+(c\bar{d}),\ D_s^+(c\bar{s}) & \rightarrow & \ell^+\nu_\ell X\ \ (\ell = e, \mu) \\ D_s^+(c\bar{s}) & \rightarrow & \underbrace{\tau^+}_{\hookrightarrow \nu_\tau X} \nu_\tau \end{array}$$

$D_s^\pm$-Zerfäll in τ-Leptonen: direkte Suche nach τ-Neutrinos

(neben 'appearance' in Neutrino-Oszillationen).

ν-Detektoren:

Eigenschaften:

- Große Targetmasse wegen kleinem ν-Reaktionsquerschnitt:

  Reaktionsrate $\sim \sigma_{\nu N}(E_\nu \approx 1\ GeV) = 10^{-38}$ cm^2;

  $\sigma_{\nu N} \sim E_\nu$.

- Leptonflavour-Identifizierung
  $\Longrightarrow$ Neutrinoflavour-Identifizierung:

$e^\pm$: durch elektromagnetische WW, Kaskade (Bremsstrahlung, Paarerzeugung).

$\mu^\pm$: elektromagnetische WW, Schauer in Materie, Bremsstrahlung unterdrückt wegen 200-mal höherer Masse als $e^\pm$.

$\tau^\pm$: kurzlebig durch viele schwache Zerfallskanäle, hohe Masse ($\tau_\tau = 3 \cdot 10^{-13}$ s),
Nachweis über Zerfälle:
36% leptonisch: $\tau^+ \to \ell^+ \nu_\ell \overline{\nu}_\tau$,
64% semileptonisch: $\tau^+ \to \overline{\nu}_\tau X_{Hadron}$.

- Energie- und Winkelmessung des geladenen Leptons + Energiemessung aller Hadronen aus der Neutrinoreaktion $\Longrightarrow E_\nu$.

$\Longrightarrow$ Kalorimeter- und Spurdetektoren von großer Dicke benötigt.