

## $\tau$ -Neutrino

Wir beschreiben noch die Entdeckung des Tau-Neutrinos  $\nu_\tau$  aus dem Zerfall des  $\tau$ -Leptons. Das dritte Lepton, das  $\tau^\pm$  (oder Tauon), wurde 1975 am SPEAR  $e^+e^-$ -Speicherring entdeckt [1]. Oberhalb einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 4$  GeV wurden Ereignisse gefunden, bei denen  $e\mu$ -Paare emittiert wurden. Die zugrunde liegende Reaktion war die paarweise Erzeugung eines neuen schweren geladenen Leptons, das  $\tau^\pm$ , mit einer Masse von ca. 1.8 GeV [2]. Die zwei Tauonen zerfielen anschliessend in  $e^\pm\nu\bar{\nu}$  bzw.  $\mu^\pm\nu\bar{\nu}$ .

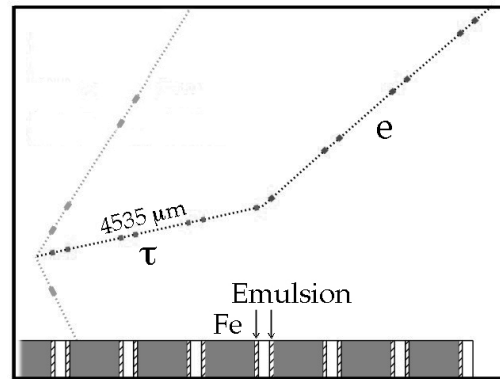


Abbildung 1:  $\nu_\tau N \rightarrow \tau X$ -Ereignis im DONUT-Experiment. Das unsichtbare  $\nu_\tau$  kommt von links und das  $\tau$  zerfällt in ein geladenes Teilchen (hier ein Elektron,  $\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ ). Die punktierten Linien zeigen die Teilchenspuren zwischen den gemessenen Koordinaten (nach ref. [3]).

Tabelle 1: Die wichtigsten Verzweigungsverhältnisse im  $\tau^+$ -Zerfall.

$\tau^+ \rightarrow$	$f$ (%)
$e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau$	17.9
$\mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$	17.4
$\pi^+ \bar{\nu}_\tau$	10.9
$\pi^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	25.9
$\pi^+ \geq 2\pi^0 \bar{\nu}_\tau$	10.7
$2\pi^+ \pi^- \bar{\nu}_\tau$	9.3
$2\pi^+ \pi^- \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	4.6

Wegen der Erhaltung der Leptonenzahl müsste im Zerfall ein weiteres Neutrino neben dem  $\nu_\mu$  emittiert werden, das Tau-Neutrino  $\nu_\tau$ . Dieses Teilchen wurde erstmals mit dem DONUT-Experiment am Fermilab nachgewiesen [3]. Es werden 800 GeV Protonen auf ein Target geschossen, wobei eine Vielzahl von Sekundärteilchen erzeugt wird, u.a.  $D_s^+(D_s^-)$ -Mesonen, die dann in  $\tau^+\nu_\tau(\tau^-\bar{\nu}_\tau)$  zerfallen. Die geladenen Teilchen werden in einem 36 m langen Absorber abgebremst und gestoppt. Die durchfliegenden  $\nu_\tau$ 's (oder

$\bar{\nu}_\tau$ 's) werden mit der Reaktion  $\nu_\tau N \rightarrow \tau^- X$  (oder  $\bar{\nu}_\tau N \rightarrow \tau^+ X$ ) in Eisenfolien konvertiert. Die Tauonen zerfallen mit einer mittleren Lebensdauer von 0.29 ps leptonisch oder semileptonisch (Tabelle 1) nach wenigen Millimetern. Mit einem Satz von Filmemulsionen werden die Spur des Tauons, seinen Zerfallspunkt und die Zerfallsprodukte beobachtet. Abb. 1 zeigt eines der vier Ereignisse, die mit DONUT beobachtet wurden [3]. Der Impuls des Tochterteilchens wurde in einem Dipolmagnet gemessen ( $> 2.9$  GeV/c) und das Teilchen als Elektron in einem Schauerdetektor identifiziert.

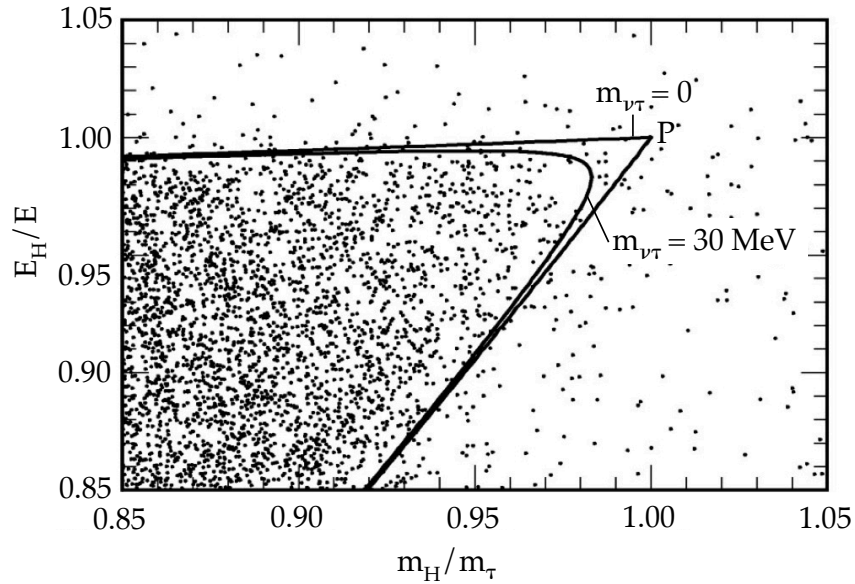


Abbildung 2:  $E_H/E$  vs.  $m_H/m_\tau$  für  $m_{\nu_\tau} = 0$  und 30 MeV. Man beachte die unterdrückten Skalen. Die Kurven begrenzen den kinematisch erlaubten Bereich. Am Punkt P ist das (masselose)  $\nu_\tau$  in Ruhe im Laborsystem (nach [4]).

Für die Messung der  $\nu_\tau$ -Masse benützt man den Zerfall des Tauons in Pionen ( $\tau \rightarrow n\pi + \nu_\tau$ ). Man misst die totale Energie  $E_H$  und den totalen Impuls  $\vec{p}_H$  der Pionen und berechnet aus dem Energiesatz die Energie des unsichtbaren Neutrinos. Im CLEO-II-Experiment am Elektron-Positron Speicherring in Cornell wurden Tauonen-Paare mit der Reaktion  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  erzeugt [4]. Die kollidierenden Leptonen (und folglich die auslaufenden  $\tau$ 's) hatten eine Energie  $E$  von je 5.3 GeV. Eines der  $\tau$ -Leptonen wurde durch den semileptonischen Zerfall oder  $\tau \rightarrow \pi\nu_\tau$  identifiziert. Das zweite  $\tau$  wurde dann mit dem gleichen Impuls  $\vec{p}_\tau$  in die entgegengesetzte Richtung emittiert. Zur Messung der  $\tau$ -Masse wählt man bevorzugt Zerfallskanäle mit hoher Multiplizität, hier  $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^+\pi^-\pi^0\nu_\tau$  ( $f = 4.6\%$ , s. Tabelle 1), da der Beitrag einer endlichen Neutrinomasse zur Neutrinoenergie grösser ist als bei kleinen Multiplizitäten. Die Impulse der geladenen Pionen wurden mit Driftkammern in einem solenoidalen Magnet und die Impulse der zwei Photonen aus dem  $\pi^0$ -Zerfall in einer Matrix von CsI-Szintillationskristallen gemessen. Aus der Energie- und Impulserhaltung bekommt man für die Masse des Neutrinos im

Laborsystem

$$\begin{aligned} m_{\nu_\tau}^2 &= (E - E_H)^2 - (\vec{p}_\tau - \vec{p}_H)^2 \\ &= m_\tau^2 + m_H^2 - 2EE_H + 2\sqrt{E^2 - m_\tau^2}\sqrt{E_H^2 - m_H^2}\cos\theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Die invariante Masse der Hadronen wird mit  $m_H$  bezeichnet und  $\theta$  ist der Winkel zwischen  $\vec{p}_\tau$  und  $\vec{p}_H$ . Abb. 2 zeigt den kinematisch erlaubten Bereich in der Darstellung  $E_H/E$  vs.  $m_H/m_\tau$  für  $m_{\nu_\tau} = 0$  und 30 MeV. Nach Abzug vom Untergrund wurde eine obere Grenze von 28 MeV (95% Vertrauensgrenze) für  $m_{\nu_\tau}$  ermittelt.

## Literatur

- [1] M. Perl et al., Phys. Rev. Lett. 35 (1975) 1489
- [2] M. Perl et al., Phys. Lett. 70B (1977) 487
- [3] K. Kodama et al., Phys. Lett. B 504 (2001) 218
- [4] M. Athanas et al., Phys. Rev. D 61 (2000) 052002