

Indirekte Messung der Neutrinomassendifferenz Δm_{23}^2 bei OPERA

(inclusive ν_{μ} -disappearance)

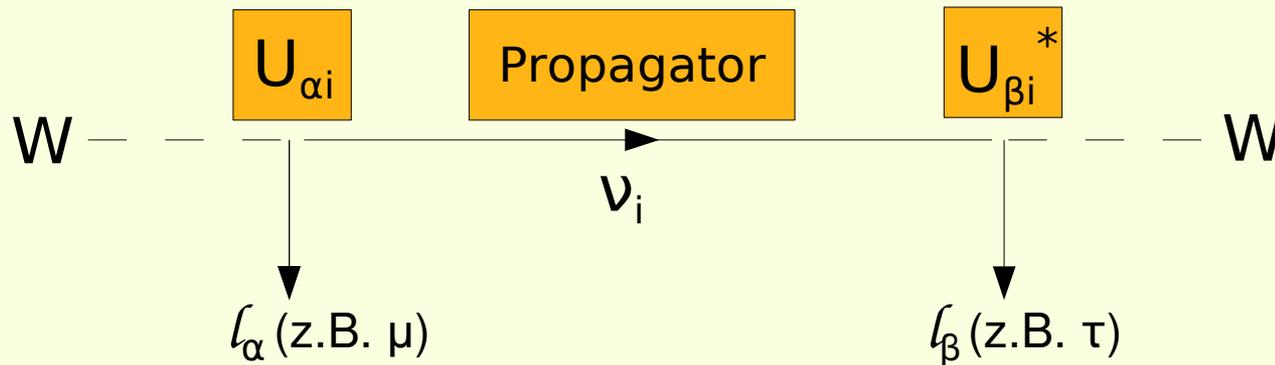


bmb+f - Förderschwerpunkt
OPERA
Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung

- Neutrinooszillation
- Was ist “inclusive ν_{μ} -disappearance“?
- Ereignisklassifikation mit OPERA
 - „eye-scan“
 - Separationsmöglichkeiten
- Zusammenfassung

- Flavoreigenzustand $\nu_\alpha \neq$ Masseneigenzustand ν_i

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$



- Löse Schrödinger-Gl. für Propagatorterm

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_i(T_i)\rangle = m_i |\nu_i(T_i)\rangle \quad \longrightarrow \quad |\nu_i(T_i)\rangle = e^{-im_i T_i} |\nu_i(0)\rangle$$

- Oszillationswahrscheinlichkeit:

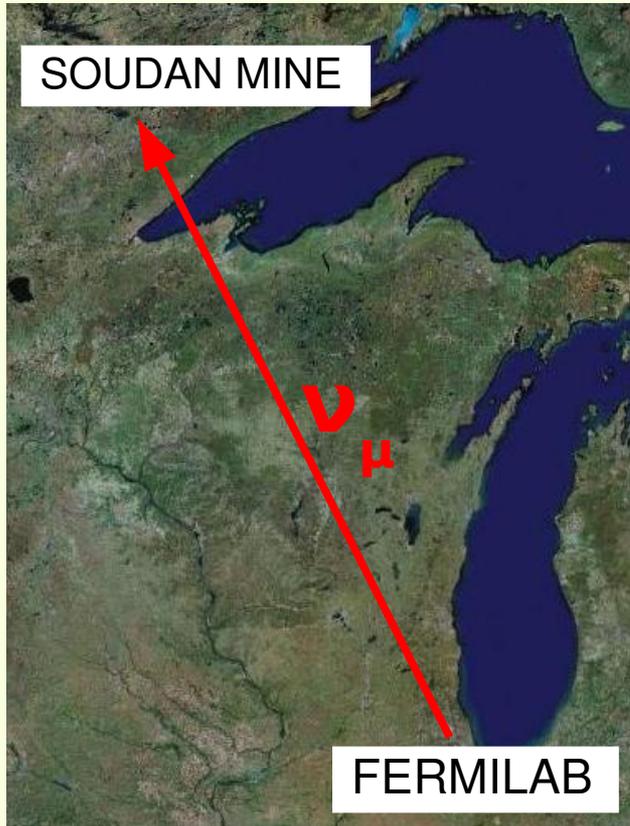
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |Amp|^2 = \left(\sum_i U_{\alpha i} e^{-im_i^2 \frac{L}{2E_i}} U_{\beta i}^* \right)^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}\right) + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i}^* U_{\beta j}) \sin\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E}\right)$$

- PMNS-Parametrisierung (3 reelle Winkel, 1 komplexe Phase), wenn $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$, θ_{13} klein:

2-Flavour Näherung

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \approx \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{1.27(\Delta m_{23}^2)L}{E_\nu}\right)$$

L in km, E in GeV

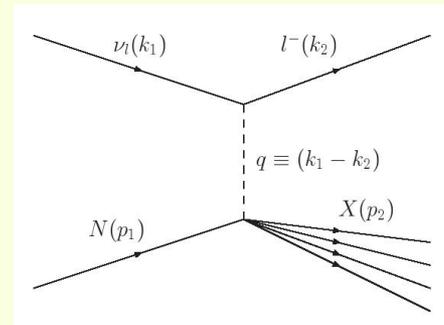


- **MINOS-Experiment (NuMI)**

- Nahdetektor (1-2 km entfernt)
- Ferndetektor (735km entfernt)

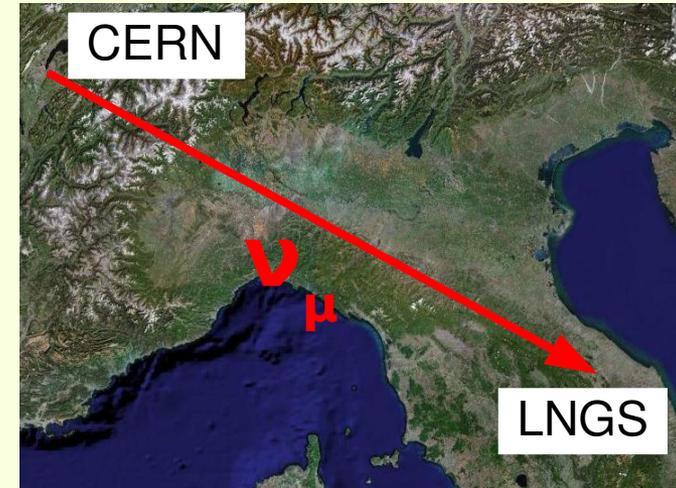
- Vergleiche ν_μ -CC-Rate im Nahdetektor (keine Oszillation) und Ferndetektor (Oszillation, „fehlende ν_μ “)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \approx \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{1.27(\Delta m_{23}^2)L}{E_\nu}\right)$$



- **OPERA-Experiment (CNGS)**

- kein Nahdetektor!
- Ferndetektor (732km entfernt)
- primäres Ziel von OPERA:
 ν_{τ} -appearance

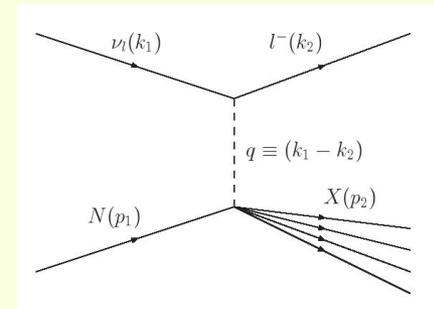
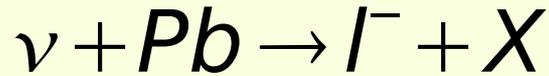


- klassische ν_{μ} -disappearance Suche bei OPERA unmöglich!
- inclusive ν_{μ} -disappearance: CC/NC-Verhältnis im Ferndetektor

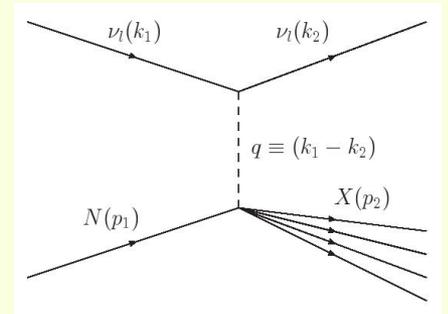


- Annahme: reiner ν_{μ} -Strahl ohne Kontamination
- nur Informationen aus Elektronikdetektoren
 - Target Tracker (Plastik-Szintillatoren)
 - Resistive Plate Chambers
 - Precision Tracker (Driftröhren) und XPC (crossed-RPC)
- nur zwei Eventklassen: „NC-like“ und „CC-like“
 - „CC-like“: Muon im Endzustand
 - „NC-like“: kein Muon im Endzustand

- charged current (CC): W^\pm -Austausch



- neutral current (NC): Z^0 -Austausch



$$N = A \cdot \int \Phi \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot P dE$$

$$A = N_A \cdot 10^9 \cdot M_D \cdot N_P \cdot N_Y \cdot K_{iso}$$

$M_D = 1.35$ kT Blei (1.36 kT Eisen)

$N_P = 4.5 \cdot 10^{19}$ pot

$N_Y = 5$

$K_{iso} = 1.066$ (Blei), 1.031 (Eisen)

- Welche Ereignisse werden als NC registriert?

- echte ν -NC Events

$$\begin{aligned}
 T_1^{NC} &= \int_E \sigma_{\nu_\mu, N}^{NC}(E_\nu) \cdot \epsilon_{\nu_\mu}^{NC}(E_\nu) \cdot \Phi(E_{\nu_\mu})(1 - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})) dE_{\nu_\mu} \\
 &+ \int_E \sigma_{\nu_\tau, N}^{NC}(E_\nu) \cdot \epsilon_{\nu_\tau}^{NC}(E_\nu) \cdot \Phi(E_{\nu_\mu})(P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})) dE_{\nu_\mu} \\
 &= \int_E \sigma_{\nu, N}^{NC}(E_\nu) \cdot \epsilon_\nu^{NC}(E_\nu) \cdot \Phi(E_{\nu_\mu}) dE_{\nu_\mu}.
 \end{aligned}$$

**unabhängig von
Oszillations-
wahrscheinlichkeit**

- falsch identifizierte ν_μ -CC Events

$$T_2^{NC} = \int_E \sigma_{\nu_\mu, N}^{CC}(E_{\nu_\mu})(1 - \epsilon_{\nu_\mu}^{CC}(E_{\nu_\mu})) \Phi(E_{\nu_\mu})(1 - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})) dE_{\nu_\mu}$$

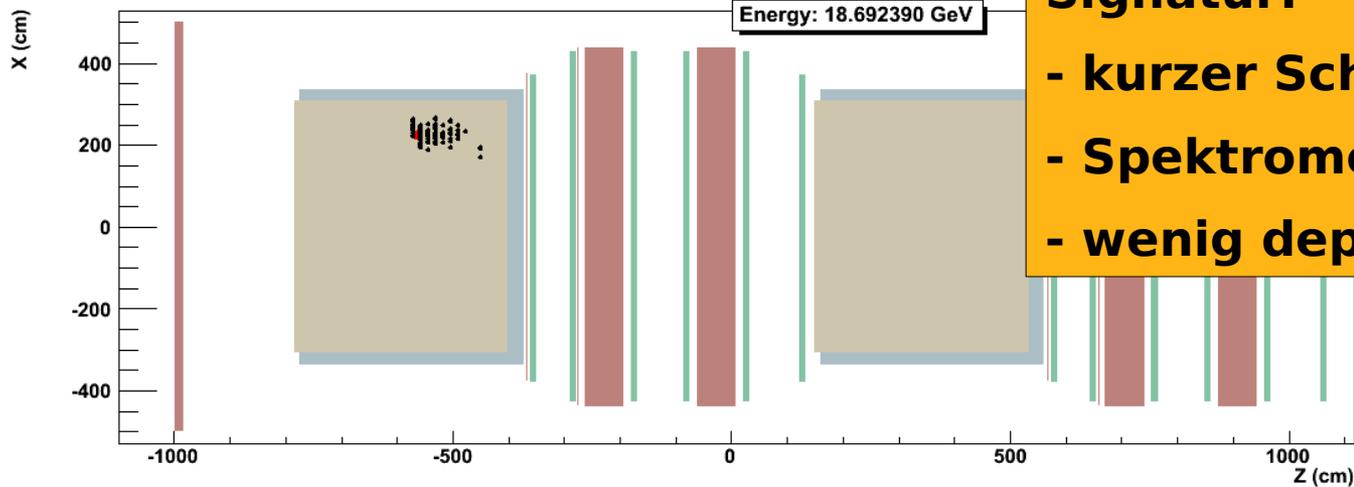
- falsch identifizierte ν_τ -CC Events, $\tau \rightarrow \mu$ (18% aller τ -Zerfälle)

$$T_3^{NC} = \int_E \sigma_{\nu_\tau}^{CC}(E_{\nu_\mu})(1 - \epsilon_{\nu_\tau \rightarrow \mu}^{CC}(E_{\nu_\mu})) \Phi(E_{\nu_\mu})(P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})) BR_{\tau \rightarrow \mu} dE_{\nu_\mu}$$

- ν_τ -CC Events, $\tau \rightarrow$ nicht μ (82% aller τ -Zerfälle)

$$T_4^{NC} = \int_E \sigma_{\nu_\tau}^{CC}(E_{\nu_\mu})(\epsilon_{\nu_\tau \rightarrow \text{not } \mu}^{CC}(E_{\nu_\mu})) \Phi(E_{\nu_\mu})(P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu}))(1 - BR_{\tau \rightarrow \mu}) dE_{\nu_\mu}$$

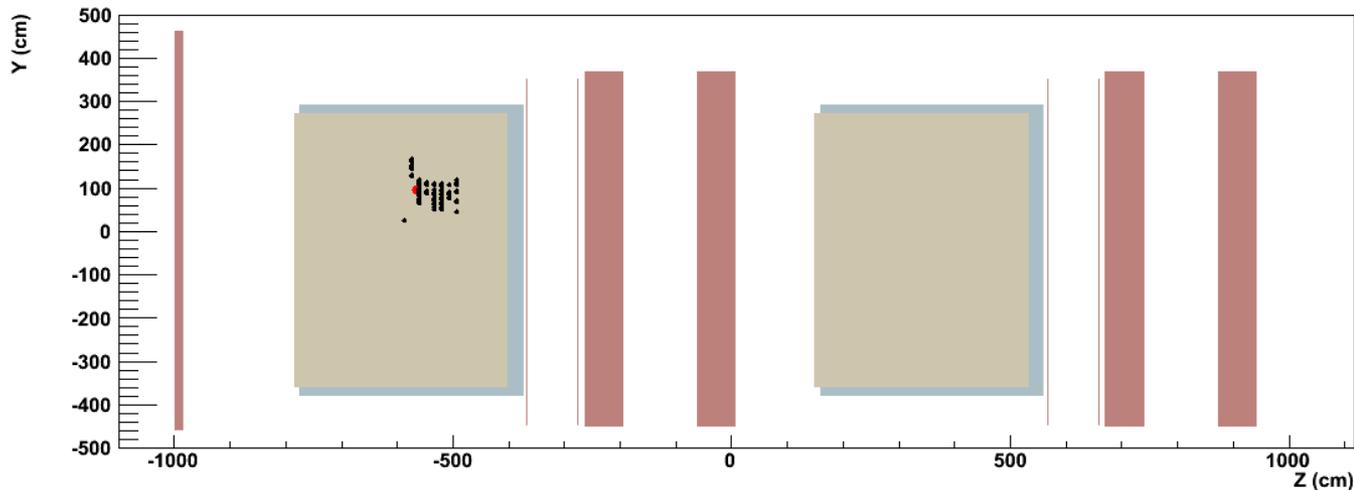
TOP VIEW (horizontal projection)



Signatur:

- kurzer Schauer
- Spektrometereintr. selten
- wenig deponierte Energie

SIDE VIEW (Vertical projection)



ν -Spektrum:

FLUKA2005

ν -Interaktion:

Negn100

Detektor:

OpGeom 10.1

OpSim 7.3 (Geant 3.21)

OpDigit 6.0

- Welche Ereignisse werden als CC registriert?

- echte ν_μ -CC Events

$$T_1^{CC} = \int_E \sigma_{\nu_\mu, N}^{CC}(E_{\nu_\mu}) \cdot \epsilon_{\nu_\mu}^{CC}(E_{\nu_\mu}) \cdot \Phi(E_{\nu_\mu}) [1 - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})] dE_{\nu_\mu}$$

**Oszillations-
abhängig!**

- falsch identifizierte ν -NC Events

$$\begin{aligned} T_2^{CC} &= \int_E \sigma_{\nu_\mu, N}^{NC}(E_{\nu_\mu})(1 - \epsilon_{\nu_\mu}^{NC}(E_{\nu_\mu}))\Phi(E_{\nu_\mu})[1 - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})]dE_{\nu_\mu} \\ &+ \int_E \sigma_{\nu_\tau, N}^{NC}(E_{\nu_\mu})(1 - \epsilon_{\nu_\tau}^{NC}(E_{\nu_\mu}))\Phi(E_{\nu_\mu})[P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})]dE_{\nu_\mu} \\ &= \int_E \sigma_{\nu, N}^{NC}(E_\nu) \cdot (1 - \epsilon_\nu^{NC}(E_\nu)) \cdot \Phi(E_{\nu_\mu})dE_{\nu_\mu}. \end{aligned}$$

- echte ν_τ -CC Events, $\tau \rightarrow \mu$ (18% aller τ -Zerfälle)

$$T_3^{CC} = \int_E \sigma_{\nu_\tau, N}^{CC}(E_{\nu_\mu})(\epsilon_{\nu_\tau \rightarrow \mu}^{CC}(E_{\nu_\mu}))\Phi(E_{\nu_\mu})[P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})]BR_{\tau \rightarrow \mu}dE_{\nu_\mu}$$

- falsch identifizierte ν_τ -CC Events, $\tau \rightarrow$ nicht μ

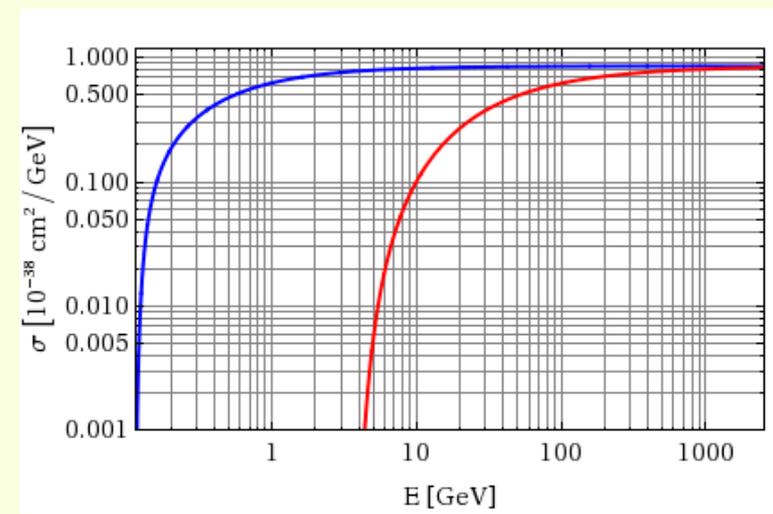
$$T_4^{CC} = \int_E \sigma_{\nu_\tau, N}^{CC}(E_{\nu_\mu})(1 - \epsilon_{\nu_\tau \rightarrow \text{not } \mu}^{CC}(E_{\nu_\mu}))\Phi(E_{\nu_\mu})[P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E_{\nu_\mu})](1 - BR_{\tau \rightarrow \mu})dE_{\nu_\mu}$$

- m_τ nicht vernachlässigbar:
 $\sigma_\tau < \sigma_\mu$ für $E < 1\text{TeV}$ (!!!)
- CC-Klassifikations-Efficiency:
 - ν_μ -CC: hochenergetische Muonen
 - ν_τ -CC: weiche Muonen aus $\tau \rightarrow \mu$

$$\begin{aligned} \frac{d^2\sigma_{\nu N}}{dx dy} = & \kappa^2 \frac{G_F^2 M_N E_\nu}{\pi} \left[\left[y^2 x + \frac{m_l^2 y}{2E_\nu M_N} \right] F_1(x, Q^2) \right. \\ & + \left[\left(1 - \frac{m_l^2}{4E_\nu^2} \right) - \left(1 + \frac{M_N x}{2E_\nu} \right) y \right] F_2(x, Q^2) \\ & \pm \left[xy \left(1 - \frac{y}{2} \right) - \frac{m_l^2 y}{4E_\nu M_N} \right] F_3(x, Q^2) \\ & + \left[\frac{m_l^4}{4E_\nu^2 M_N^2 x} \right] F_4(x, Q^2) \\ & \left. - \left[\frac{m_l^2}{2E_\nu M_N} \right] F_5(x, Q^2) \right] \end{aligned}$$

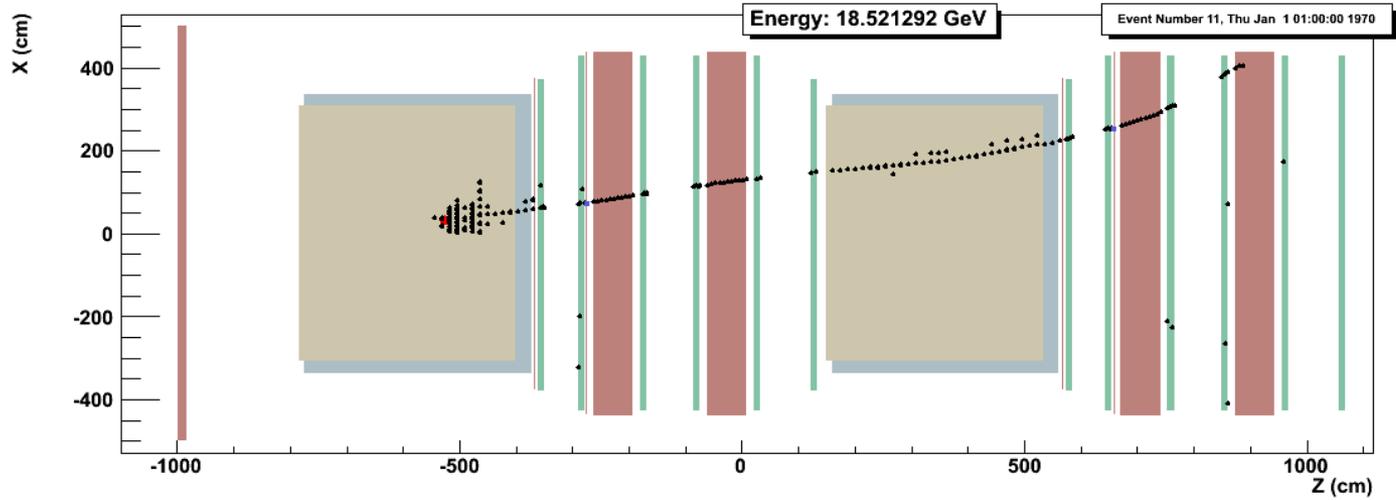
Signatur:

- Schauer + isolierte Spur
- häufige Spektrometereinträge
- viel deponierte Energie in TT

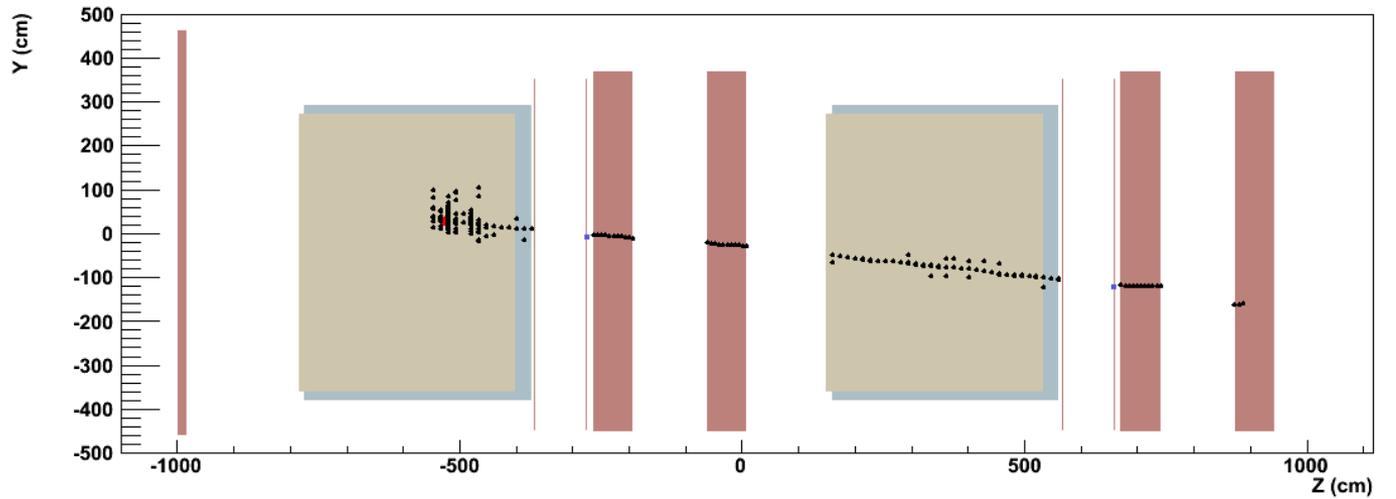


ν -n CC DIS: ν_τ rot, ν_μ blau
 theoretische Werte, mit CTEQ6M PDFs

TOP VIEW (horizontal projection)



SIDE VIEW (Vertical projection)



ν -Spektrum:
FLUKA2005
 ν -Interaktion:
Negn100
Detektor:
OpGeom 10.1
OpSim 7.3 (Geant 3.21)
OpDigit 6.0

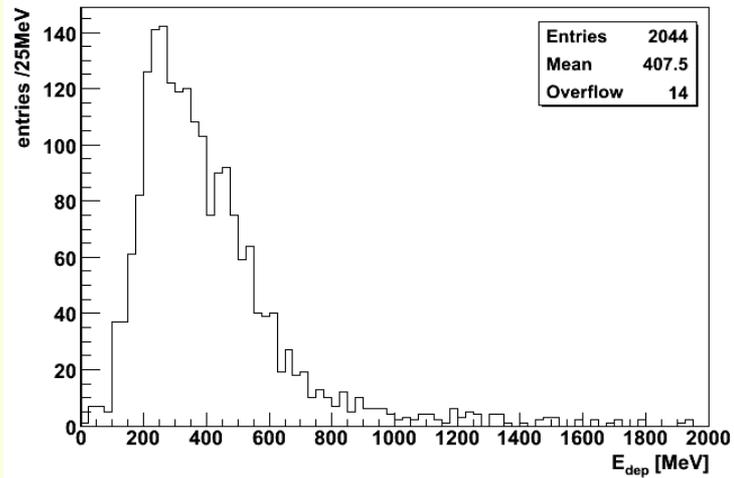
- Blinde Analyse, 5 Ereignisklassen, je 3 Energiebereiche:
15 Energie-Ereignisse-Klassen mit jeweils 200 Events
- Unterteilung in „CC“ (muon-like) und „NC“ (non muon-like)

non muon-like

E	ν_{μ}-CC	ν_{μ}-NC	ν_{τ}-CC, $\tau \rightarrow e$	ν_{τ}-CC, $\tau \rightarrow \mu$	ν_{τ}-CC, $\tau \rightarrow \pi$
0 – 17.5 GeV	90 %	100 %	99 %	75 %	93 %
17.5 – 25 GeV	93 %	98 %	97 %	80 %	97 %
25 – 200 GeV	92 %	95 %	95 %	93 %	95 %

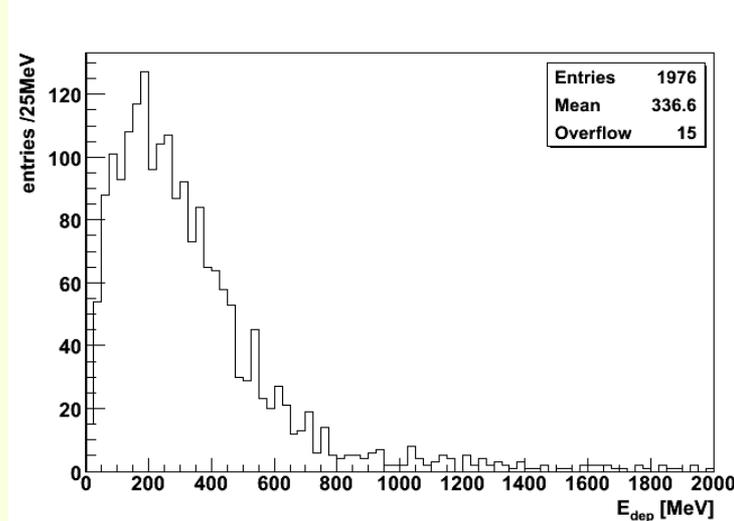
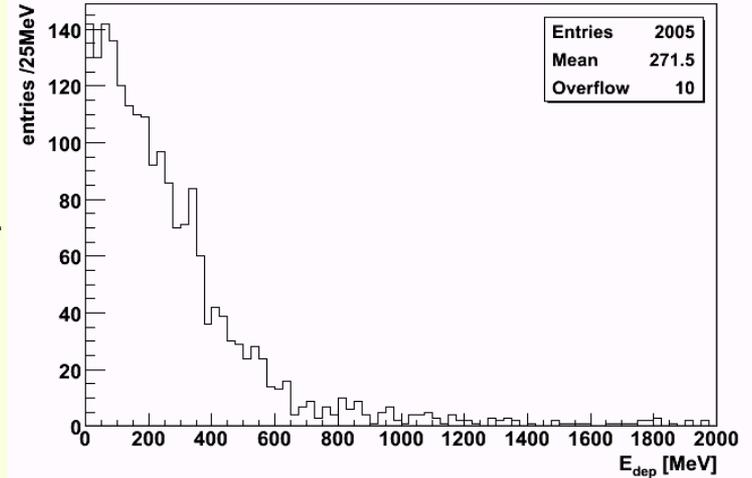
muon-like

CC-Ereignisse

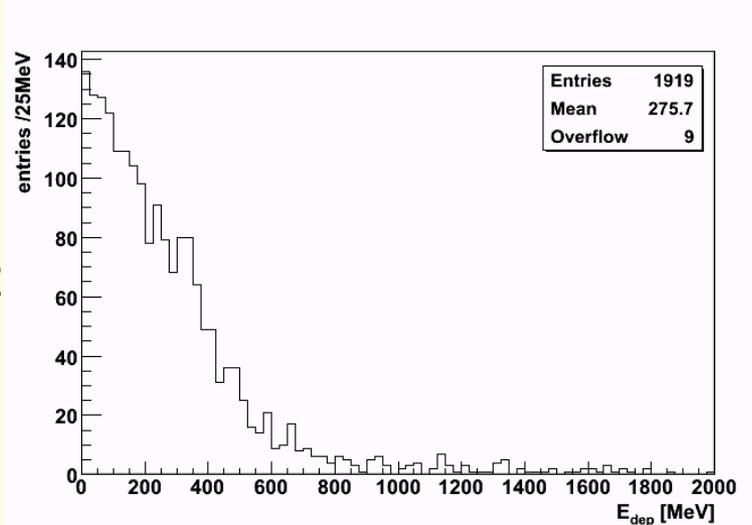


Fiducial
Volume 1

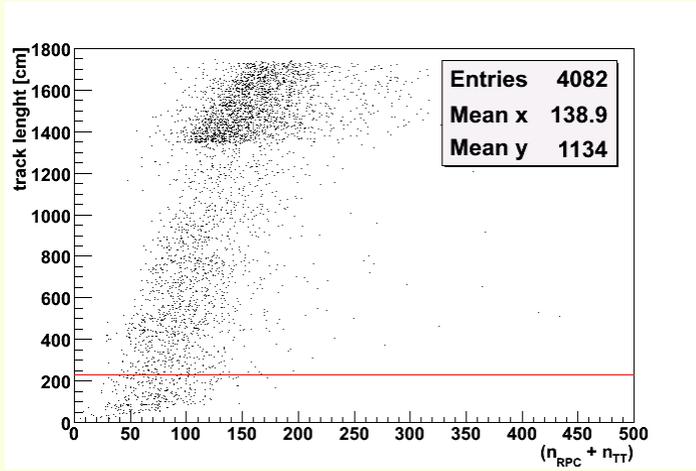
NC-Ereignisse



Fiducial
Volume 2

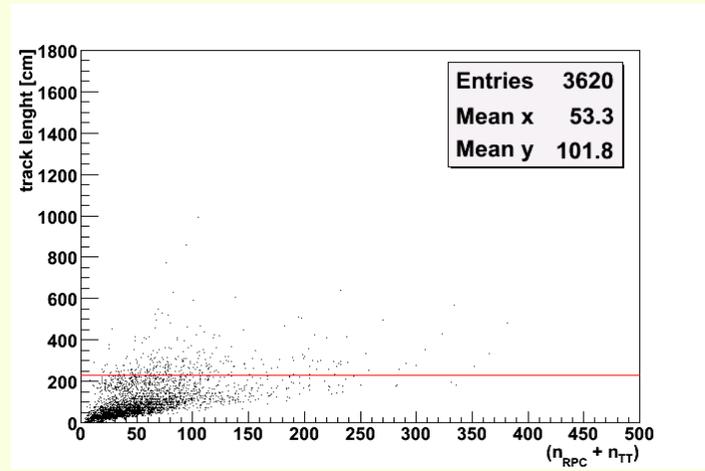


CC-Ereignisse

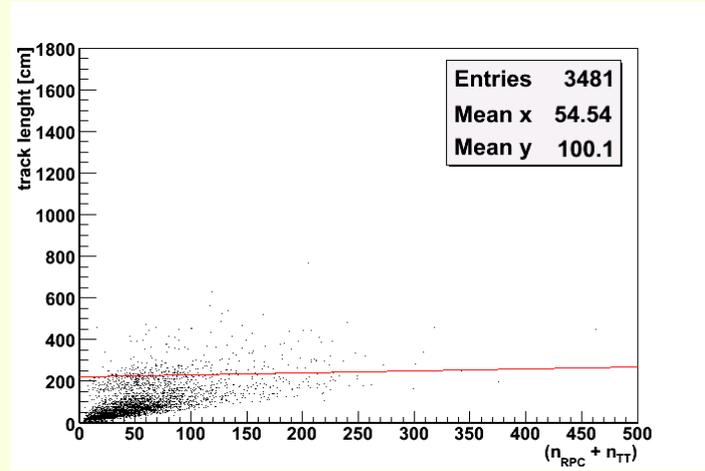
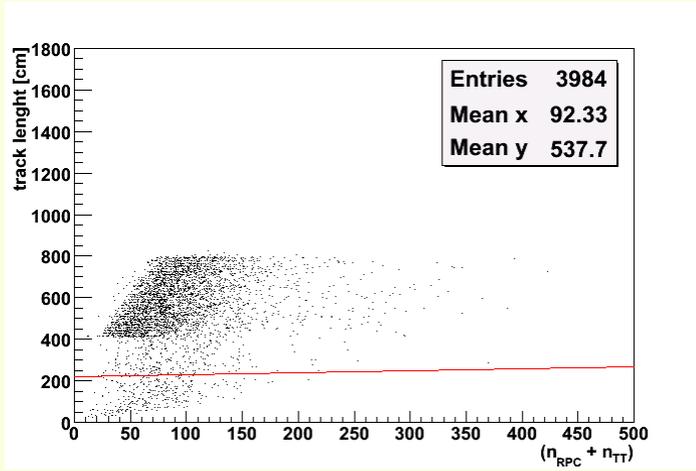


Fiducial
Volume 1

NC-Ereignisse



Fiducial
Volume 2



~90 % richtig klassifiziert

- Erwartung $R_{th.} = (CC/NC)_{th.}$ ohne Oszillation:

$$R_{th.} = \left(\frac{CC}{NC} \right)_{th.} = \frac{T_1^{CC} + T_2^{CC}}{T_1^{NC} + T_2^{NC}}$$

$$= \frac{\epsilon_{\nu\mu}^{CC} + R_\nu \cdot (1 - \epsilon_{\nu\mu}^{NC})}{R_\nu \cdot \epsilon_{\nu\mu}^{NC} + (1 - \epsilon_{\nu\mu}^{CC})}$$

$$R_\nu = \frac{\sigma^{NC}}{\sigma^{CC}}$$

$$R_{\nu_e} = \frac{\sigma_{\nu_e}^{CC}}{\sigma_{\nu\mu}^{CC}} \approx 1$$

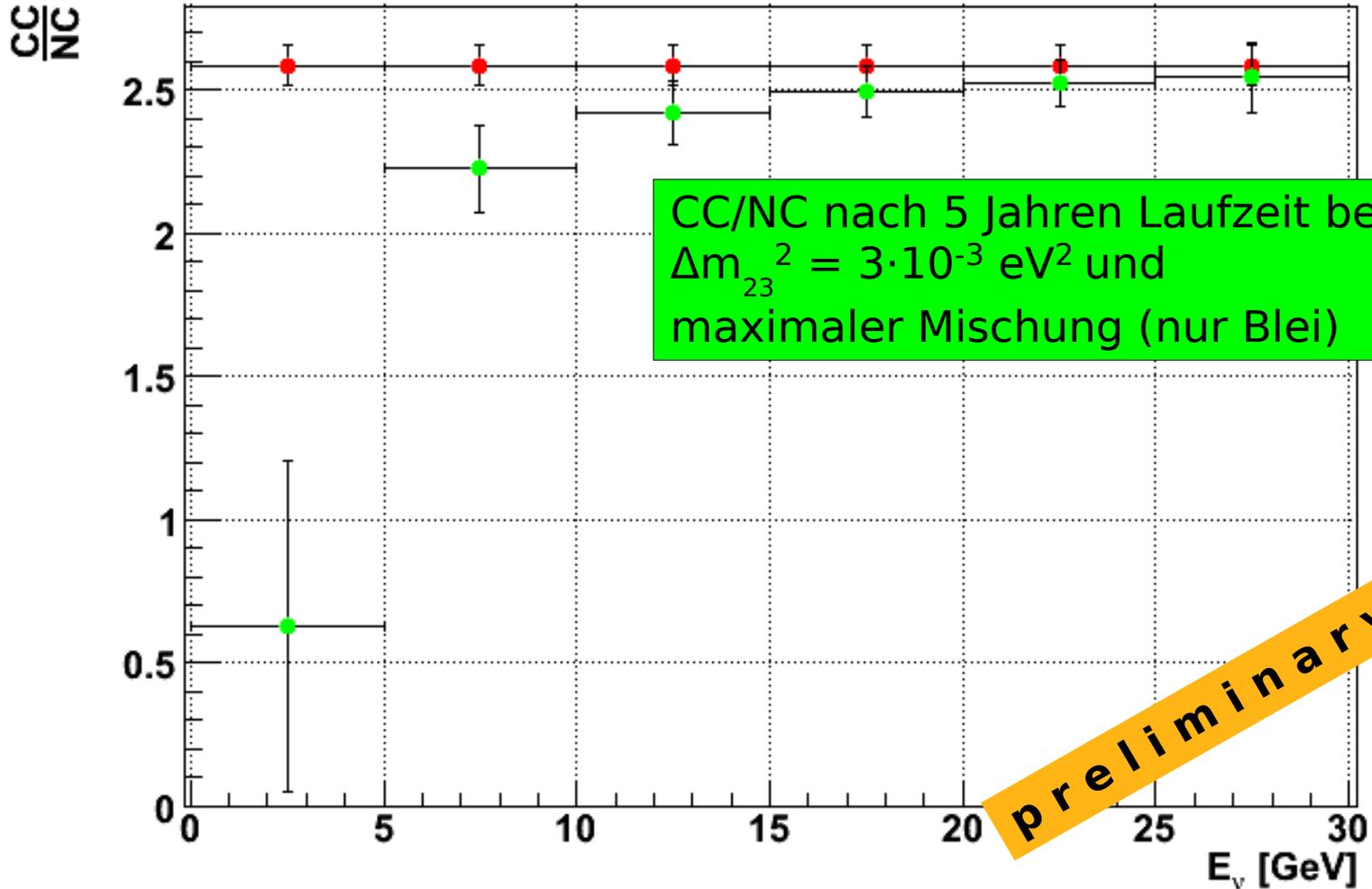
$$R_{\nu_\tau} = \frac{\sigma_{\nu_\tau}^{CC}}{\sigma_{\nu\mu}^{CC}}$$

- Erwartung $R_{exp} = (CC/NC)_{exp}$ mit Oszillation:

$$R_{exp.} = \left(\frac{CC}{NC} \right)_{exp.} = \frac{T_1^{CC} + T_2^{CC} + T_3^{CC} + T_4^{CC}}{T_1^{NC} + T_2^{NC} + T_3^{NC} + T_4^{NC}}$$

$$= \frac{\epsilon_{\nu\mu}^{CC} (1 - P) + R_\nu (1 - \epsilon_{\nu\mu}^{NC}) + R_{\nu_\tau} \epsilon_{\nu_\tau \rightarrow \mu}^{CC} PB + R_{\nu_\tau} (1 - \epsilon_{\nu_\tau \rightarrow no\mu}^{CC}) P (1 - B)}{R_\nu \cdot \epsilon_{\nu\mu}^{NC} + (1 - \epsilon_{\nu\mu}^{CC}) (1 - P) + R_{\nu_\tau} (1 - \epsilon_{\nu_\tau \rightarrow \mu}^{CC}) P + R_{\nu_\tau} \epsilon_{\nu_\tau \rightarrow no\mu}^{CC} P}$$

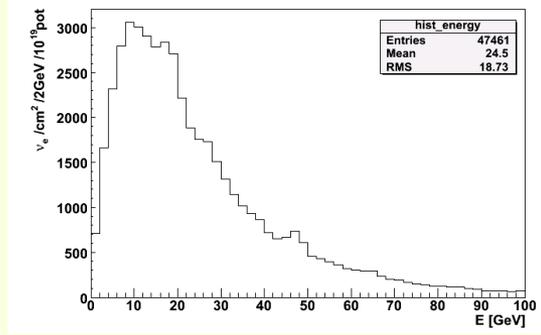
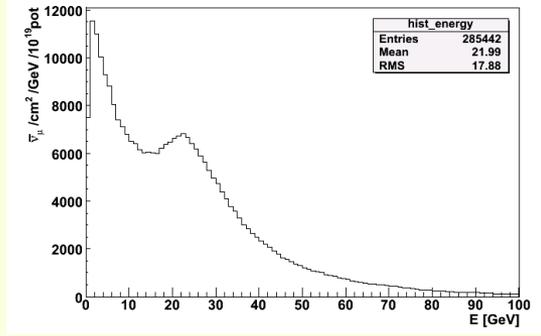
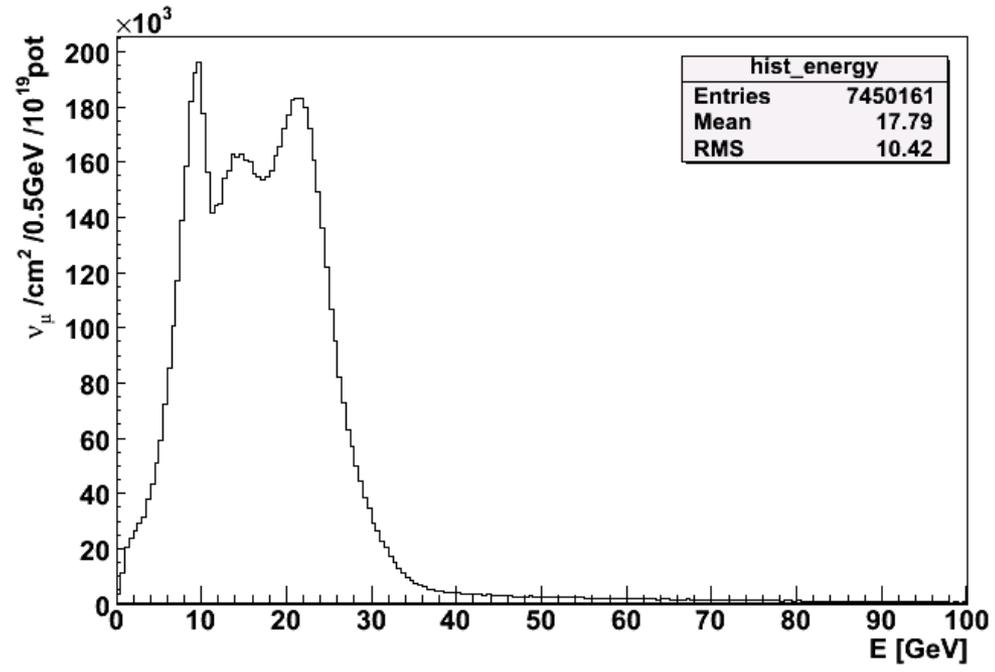
erwarteter Wert CC/NC ohne Oszillation



- CC/NC Verhältnis ist sensitiv auf Neutrinooszillationen
- Statistik nach 5 Jahren Laufzeit limitierender Faktor
- benötigt KEINE aufwendige kinematische Rekonstruktion
- noch zu berücksichtigen:
 - volle Fehlerkorrelation
 - Strahlkontamination (3.8 % anti- ν_{μ} , 0.6 % ν_e)
- Verbesserungen:
 - ν -Eisen Interaktionen (+100% Ereignisse)
 - Vertexrekonstruktion
 - Bessere Ereignisklassifikation (Neuronales Netz)

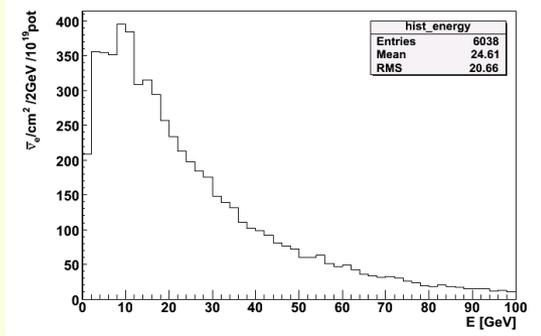
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

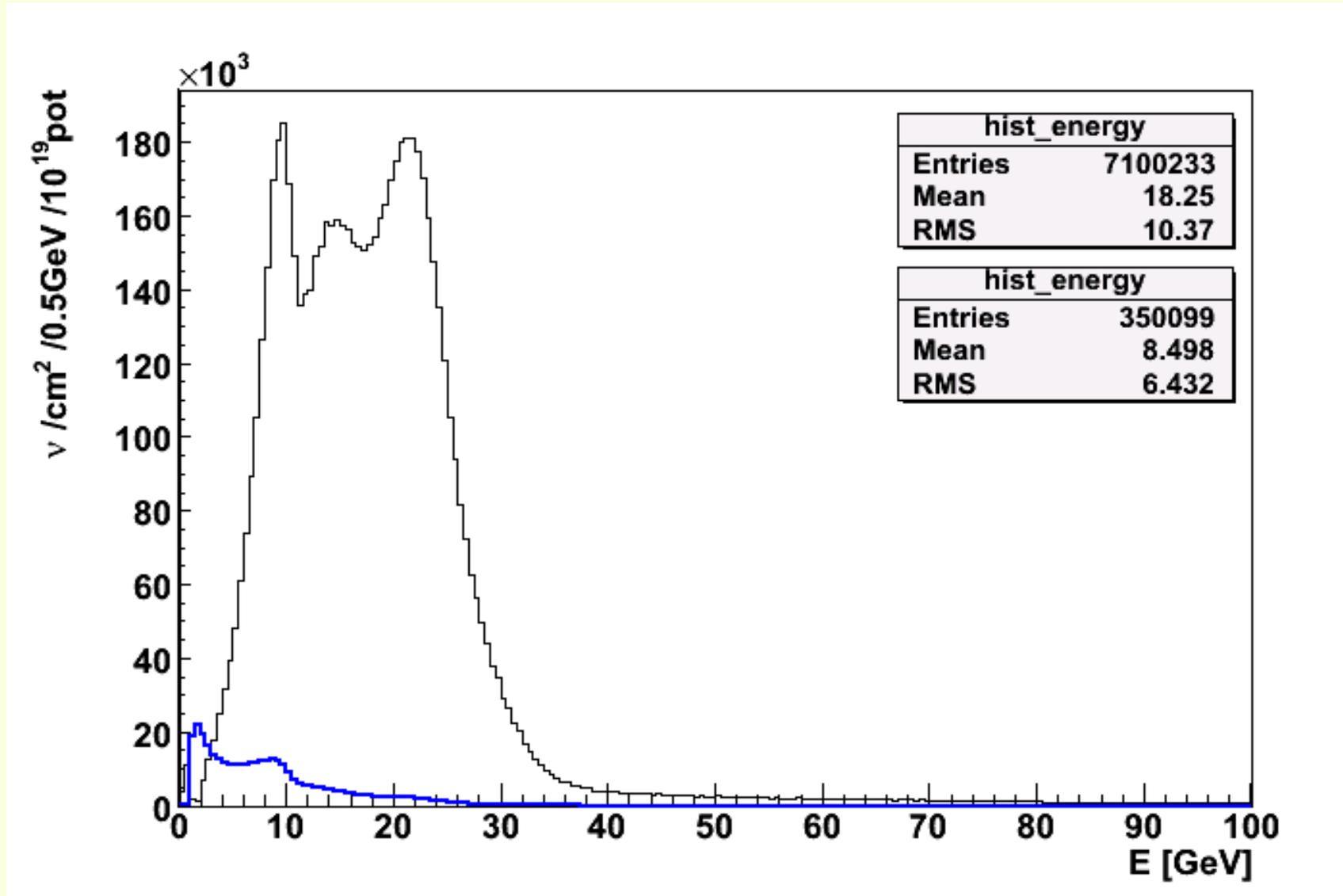




	flux [1/cm ² /10 ¹⁹ pot]	<E> [GeV]	ν_i/ν_μ
ν_μ	$7.450 \cdot 10^6$	17.8	-
anti- ν_μ	$2.85 \cdot 10^5$	22.0	3.83%
ν_e	$4.7 \cdot 10^4$	24.5	0.63%
anti- ν_e	$6 \cdot 10^3$	24.6	0.08%

$E_\nu < 100$ GeV





	world best fit	1 σ -error
Δm_{12}^2	7.9 ± 0.3 (10^{-5} eV^2)	4%
Δm_{23}^2	$2.5_{-0.25}^{+0.2}$ (10^{-3} eV^2)	10%
$\sin^2 \Theta_{12}$	$0.3_{-0.03}^{+0.02}$	9%
$\sin^2 \Theta_{23}$	$0.5_{-0.03}^{+0.08}$	16%
$\sin^2 \Theta_{13}$	≤ 0.025 (2σ)	-

