

13. Standardmodell der Elementarteilchen (SMTP)

- 3 Familien von Fermionen

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

$$\bar{e}_R, \bar{\mu}_R, \bar{\tau}_R$$

$$u_R, c_R, t_R$$
$$d_R, s_R, b_R$$

- elektroschwache WW & starke WW

$$\left. \begin{matrix} W^\pm \\ Z^0 \\ \gamma \end{matrix} \right\}$$

erhaltene Ladungen

$$T, T_3, Y \rightarrow Q = T_3 + \frac{Y}{2}$$

$$\text{Symmetrien: } SU(2)_L \otimes U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$

G (Gluon)

erh. Ladungen:

$$\underbrace{r, g, b}_{SU(3)_C}$$

$$\Rightarrow \text{Symmetriegruppe von SMTP: } SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

Nachtrag: SMTP durch Exp. hervorragend bestätigt

Messung \downarrow $\leftarrow |O_{\text{meas}} - O| / \sigma_{\text{meas}}$

Z^0 -Masse

	Measurement	Fit	$ O_{\text{meas}} - O^{\text{fit}} / \sigma_{\text{meas}}$
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02750 ± 0.00033	0.02759	0.02
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1874	0.01
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4959	0.03
σ_{had}^0 [nb]	41.540 ± 0.037	41.478	0.17
R_l	20.767 ± 0.025	20.742	0.10
$A_{\text{fb}}^{0,l}$	0.01714 ± 0.00095	0.01645	0.08
$A_l(P_\nu)$	0.1465 ± 0.0032	0.1481	0.05
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21579	0.01
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.1723	0.01
$A_{\text{fb}}^{0,b}$	0.0992 ± 0.0016	0.1038	0.28
$A_{\text{fb}}^{0,c}$	0.0707 ± 0.0035	0.0742	0.10
A_b	0.923 ± 0.020	0.935	0.06
A_c	0.670 ± 0.027	0.668	0.01
$A_l(\text{SLD})$	0.1513 ± 0.0021	0.1481	0.15
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}(Q_{\text{fb}})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314	0.08
m_W [GeV]	80.385 ± 0.015	80.377	0.05
Γ_W [GeV]	2.085 ± 0.042	2.092	0.02
m_t [GeV]	173.20 ± 0.90	173.26	0.01

Übereinstimmung
zwischen Theorie
und Experiment
auf 0.1% genau

$\sin^2\theta_W$

W^\pm -Masse

Top-Masse

Ergebnis LEP-Experiment

globaler Fit

March 2012

13.1 Offene Fragen des SMSP

- theoretische Aspekte
 - große Anzahl von freien Parametern
 - laufende Kopplungen: kein gemeinsamer Schnittpunkt bei großen Energien
 - Gravitation fehlt (nur makroskopische Theorie)
 - Hierarchieproblem der Higgs-Masse (Higgs: elementares, skalares Teilchen)
- experimentelle Aspekte:
 - Materie-Antimaterie-Asymmetrie
 - große Massenhierarchie, warum 3 Familien?
 - Kosmologie: dunkle Materie, dunkle Energie, Inflation
 - Neutrinomassen

13.2. Neutrinooszillationen und -massen

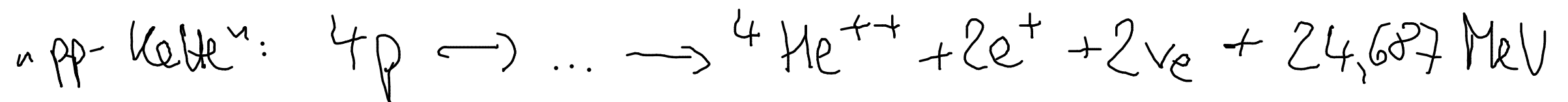
- Annahme im SM: $m_\nu = 0 \text{ eV}$
- gute Näherung, in vielen Fällen gerechtfertigt
- jedoch ∇ zu exp. Realität: Effekte von m_ν beobachtet

Neutrinoquellen:

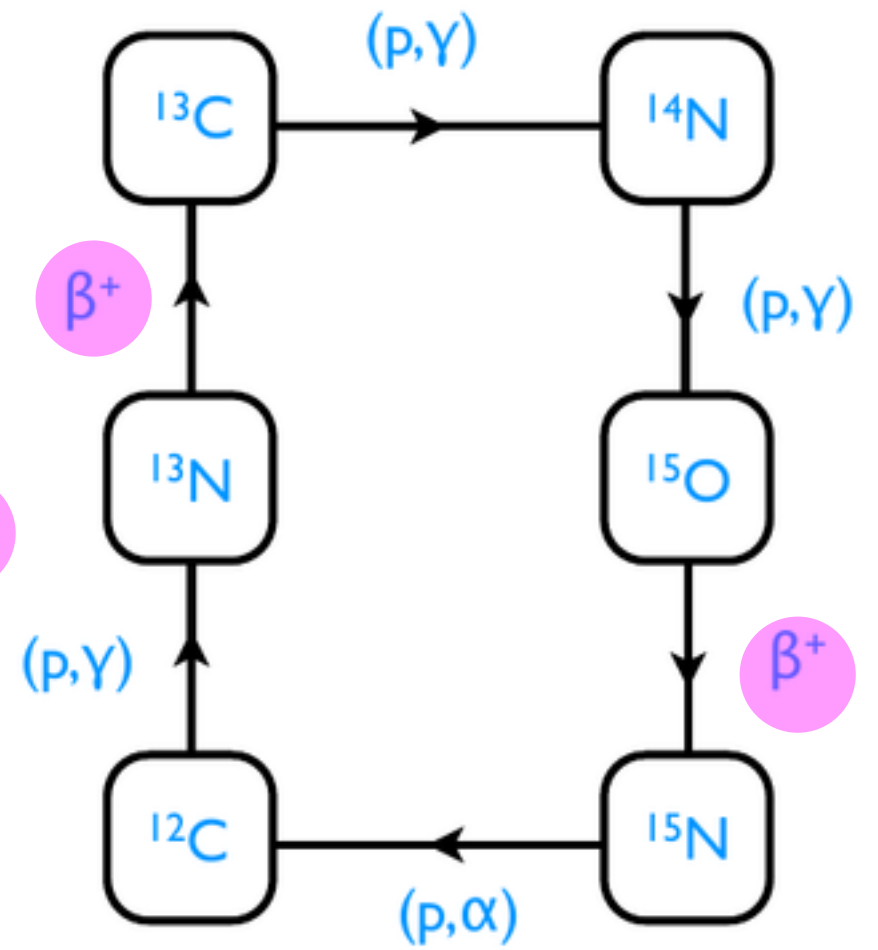
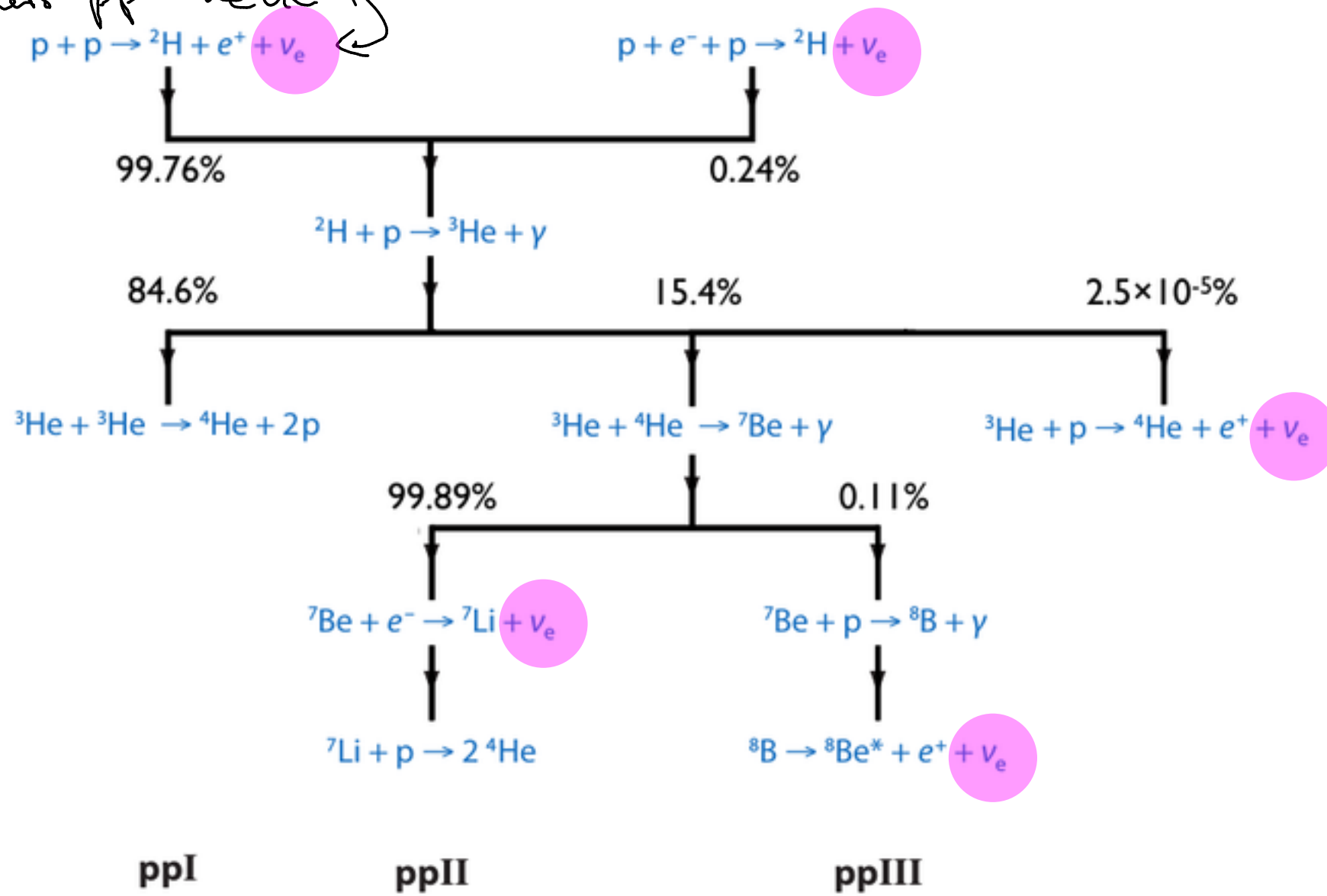
- irdisch (radioaktive Stoffe, Kernreaktoren, Beschleuniger)
- atmosphärisch (kosmische Strahlung)
- außerirdisch (Sonne!, Supernovae)

Solares Neutrinoproblem

dominanter Fusionsprozess in der Sonne:



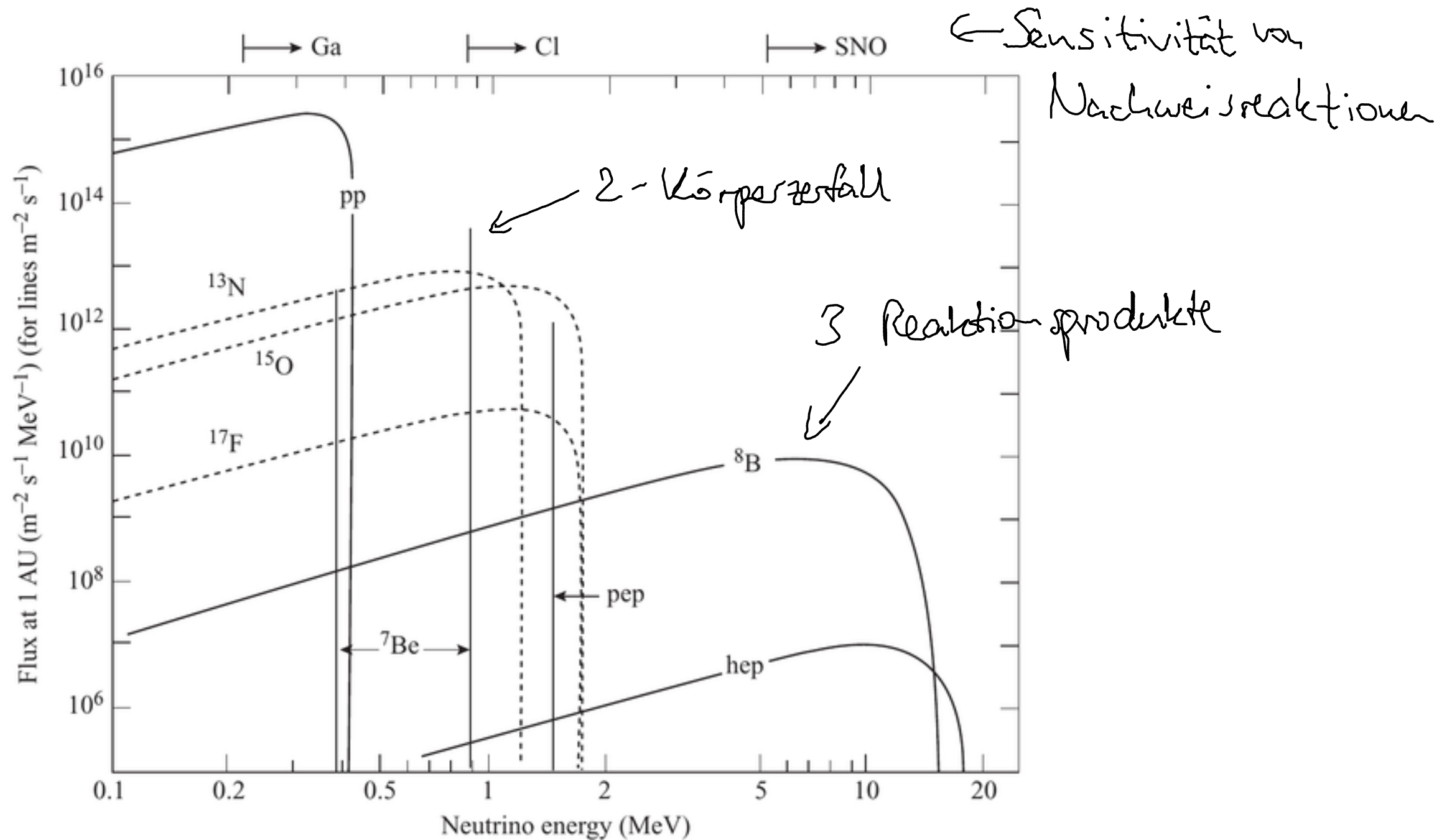
Start pp-Kette ↷



CN cycle

CNO-Zyklus
 ↑
 nur als Katalysator

Solar
Neutrino-
spektrum



- Erste Messung: Davis-Experiment (Homestake-Mine, 1968)
- Nachweisreaktion: $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
- 615 t C_2Cl_4
- $\Phi_{\nu_e}(\text{Davis}) \approx \frac{1}{3} \Phi_{\nu_e}^{\text{SM}}$ (solares SM = SM)

Lösungsvorschlag: Neutrinooszillationen (Pontecorvo, 1968)
Umwandlung $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ während Propagation

→ Klärung:

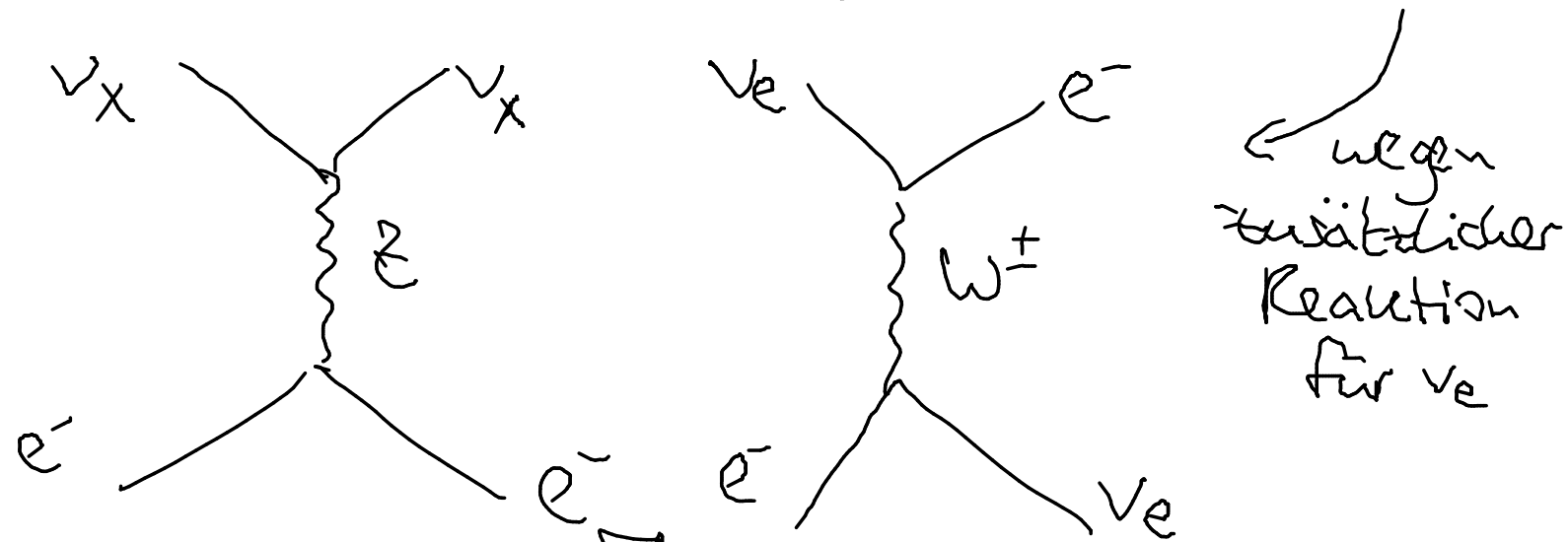
• Superkamiokande

(Untergrundlabor Kamioka, Japan, 2011)

• 50.000 t hochreines Wasser

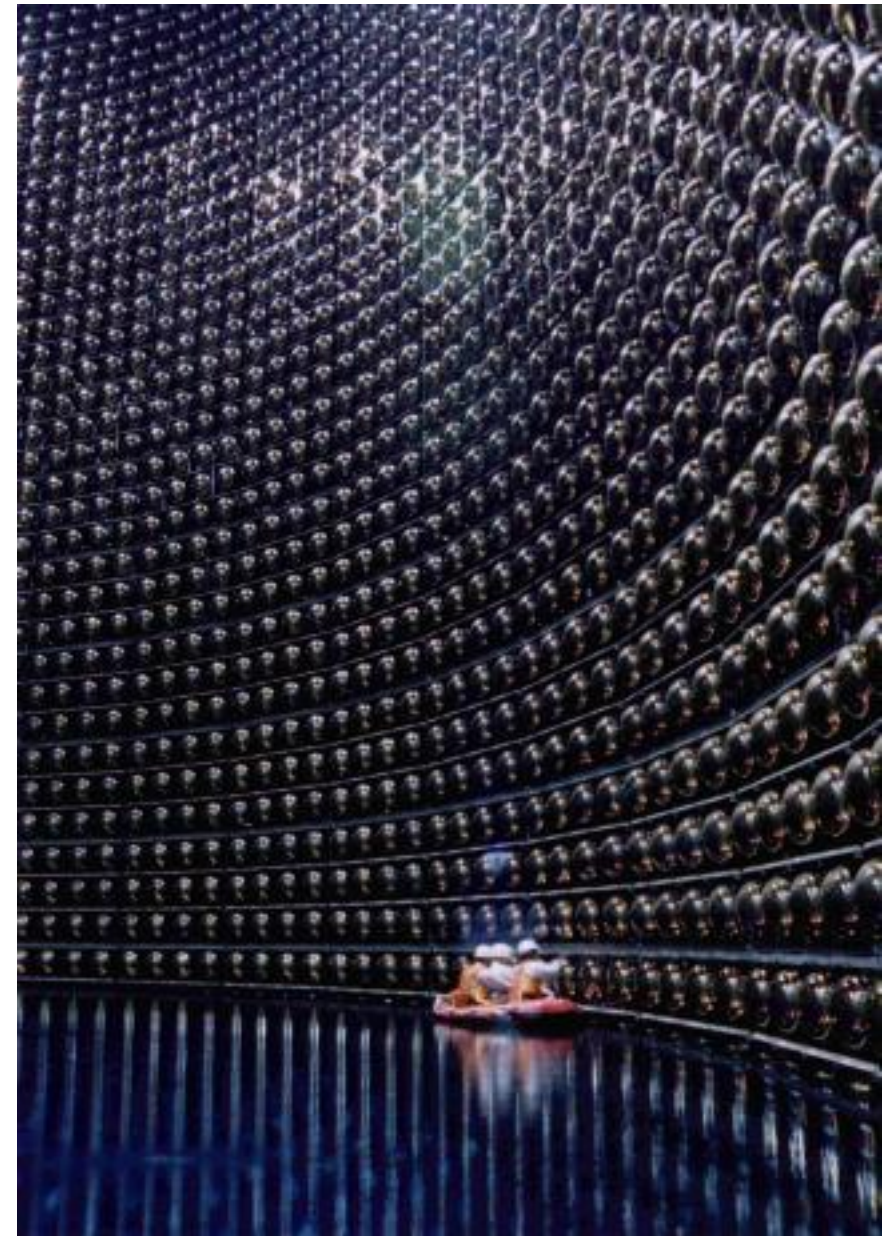
• Nachweis: $\nu_x e^- \rightarrow \nu_x e^-$
 e^- gibt Tscherenkow-Licht

• sensitiv auf alle ν_x , aber 6,5x mehr für ν_e



← wegen
zusätzlicher
Reaktion
für ν_e

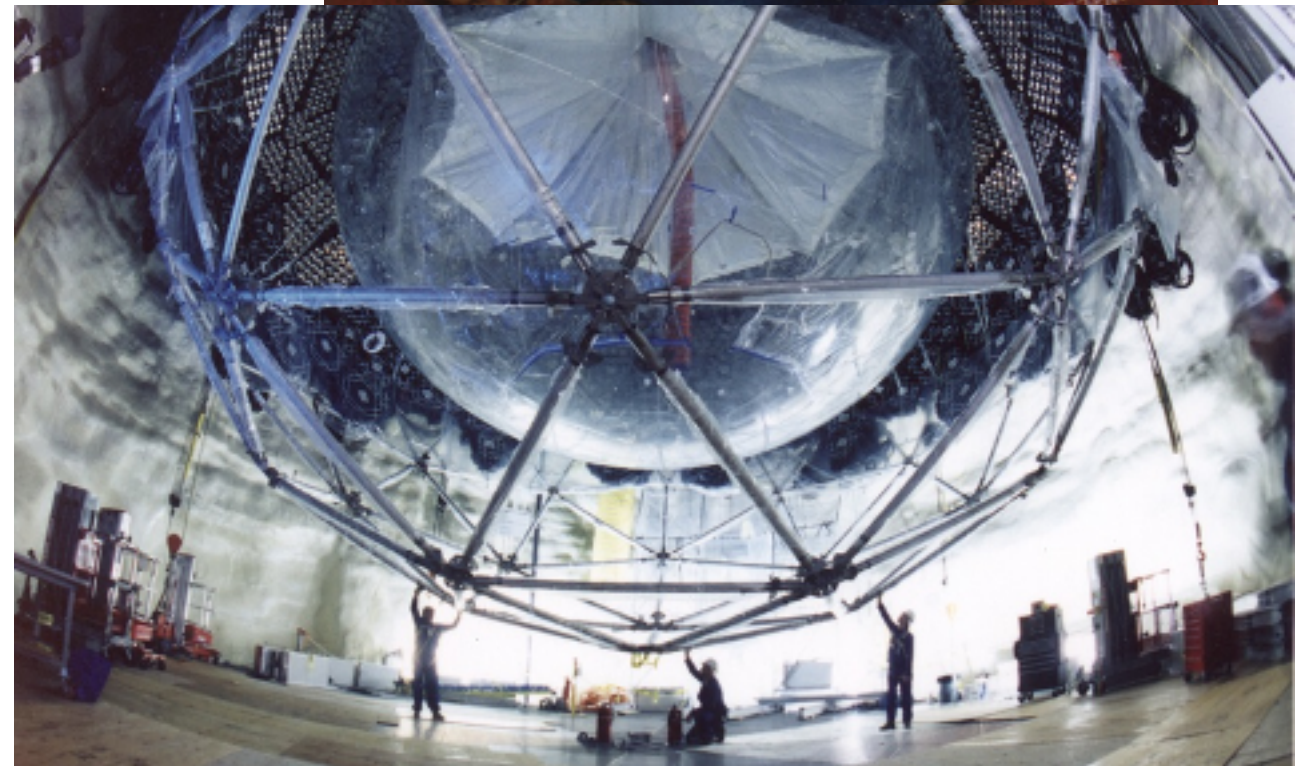
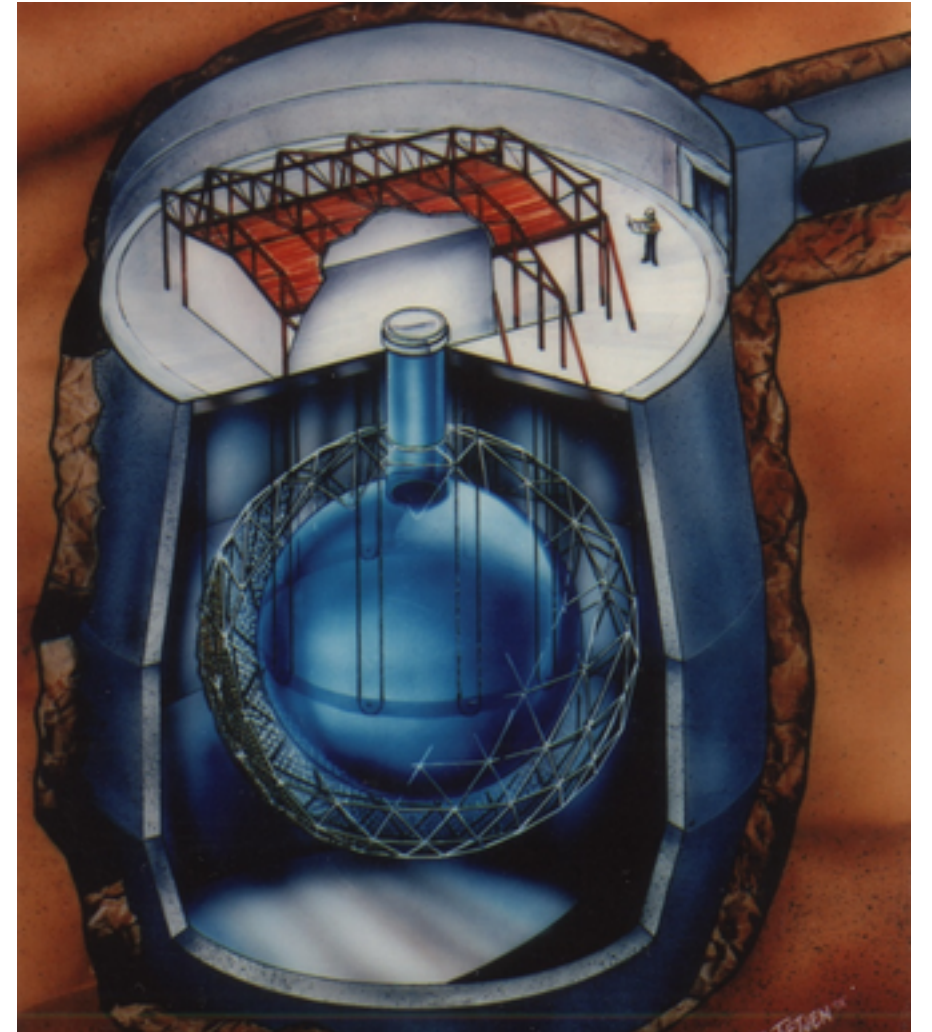
• gemessener Fluss: 45% der Vorhersage
(unter Annahme, dass alle Detektionen ν_e sind)



SNO (2000m unter der Erde, Canada)

- 1000t D_2O
- Neutronen aus D ermöglichen
2 zusätzliche Reaktionen,
vor allem separate Messung für ν_e -Fluss
- gemessener Fluss:
35% der Vorhersage (nur ν_e)

$$\left. \begin{array}{l} SK \\ SNO \end{array} \right\} \Rightarrow 6.5 \left(\begin{array}{c} \uparrow SK \\ 45\% \end{array} - \begin{array}{c} \uparrow SNO \\ 35\% \end{array} \right) + \begin{array}{c} \nearrow SNO \\ (\nu_e) \end{array} = 100\%$$



ν -Nachweisreaktionen

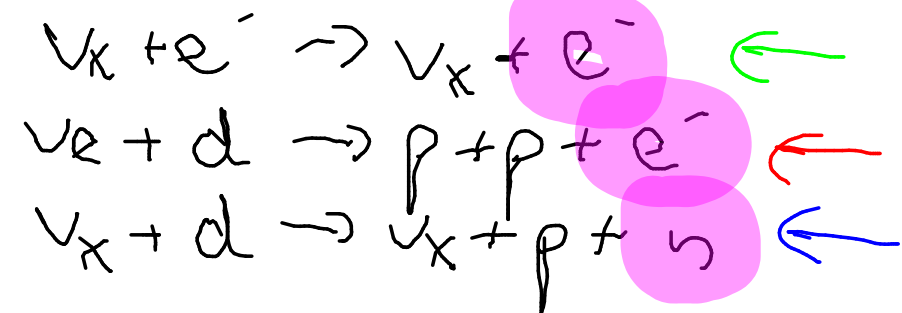
elast. Streuung
geladener Strahl
neutraler

ES :
CC :
NC :

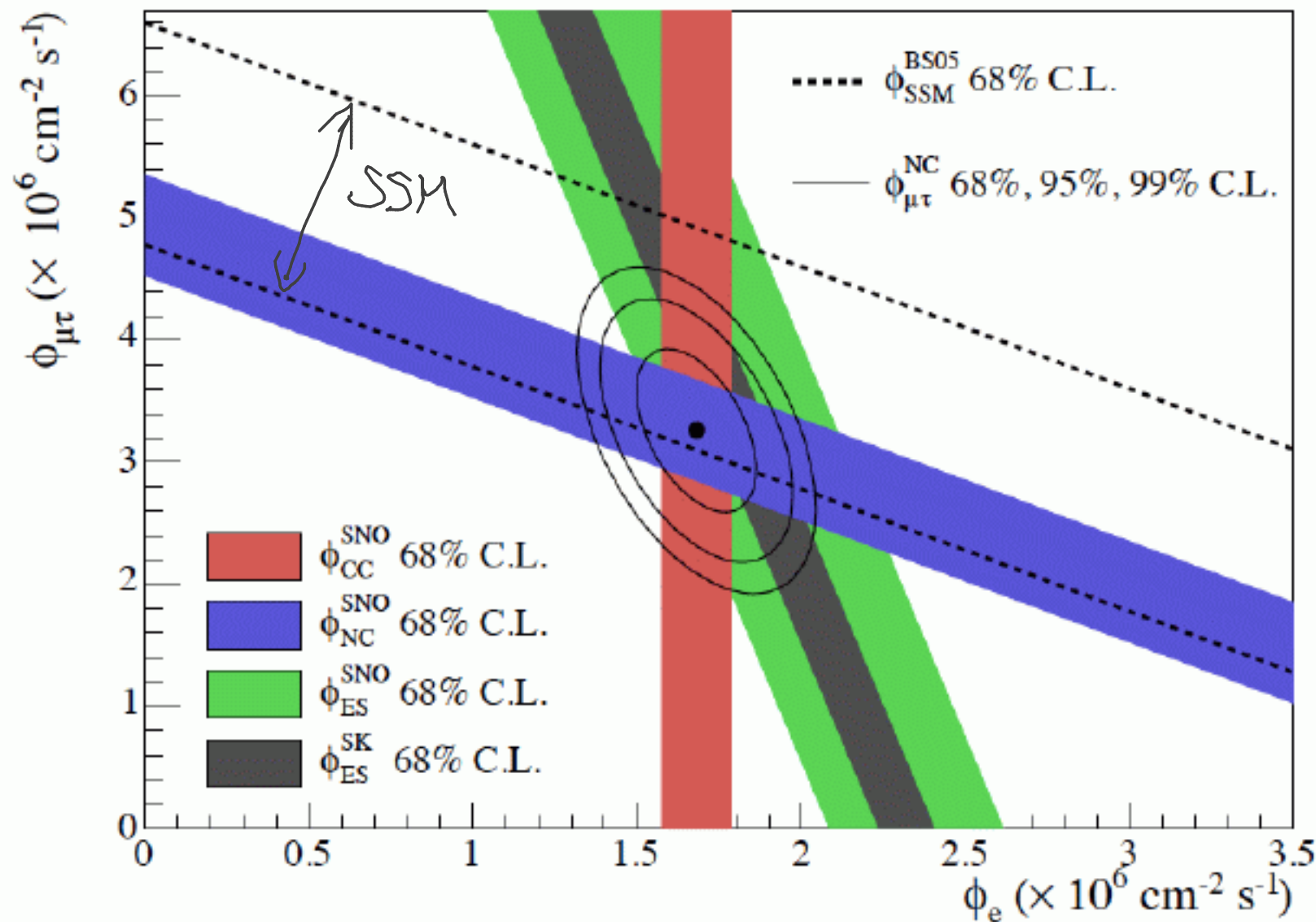


SK

SNO



$\Phi_{\nu\mu} + \Phi_{\nu\tau}$



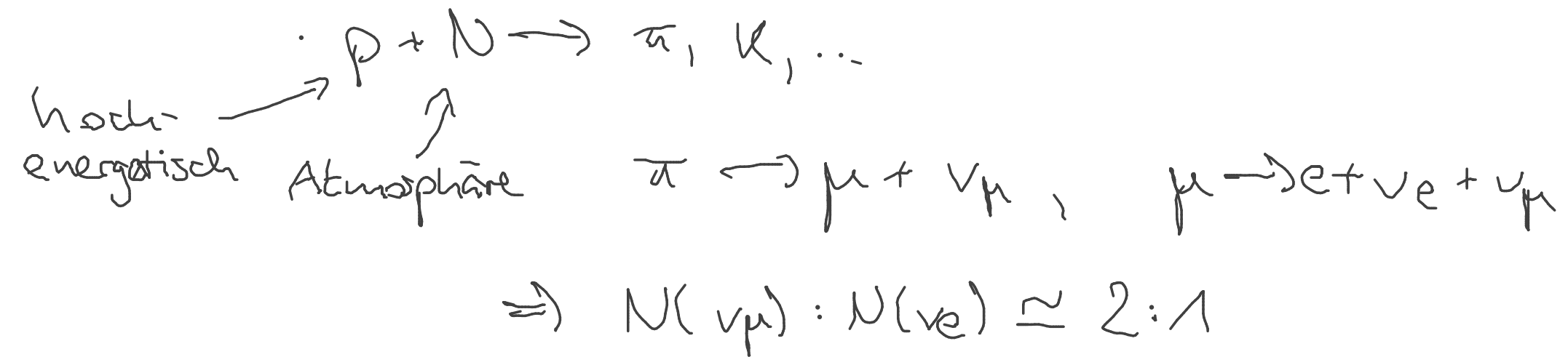
$\Rightarrow \nu e^-$ Fluss
nur 1/3 vom
Gesamtfluss

\Rightarrow Bestätigung
für SSM

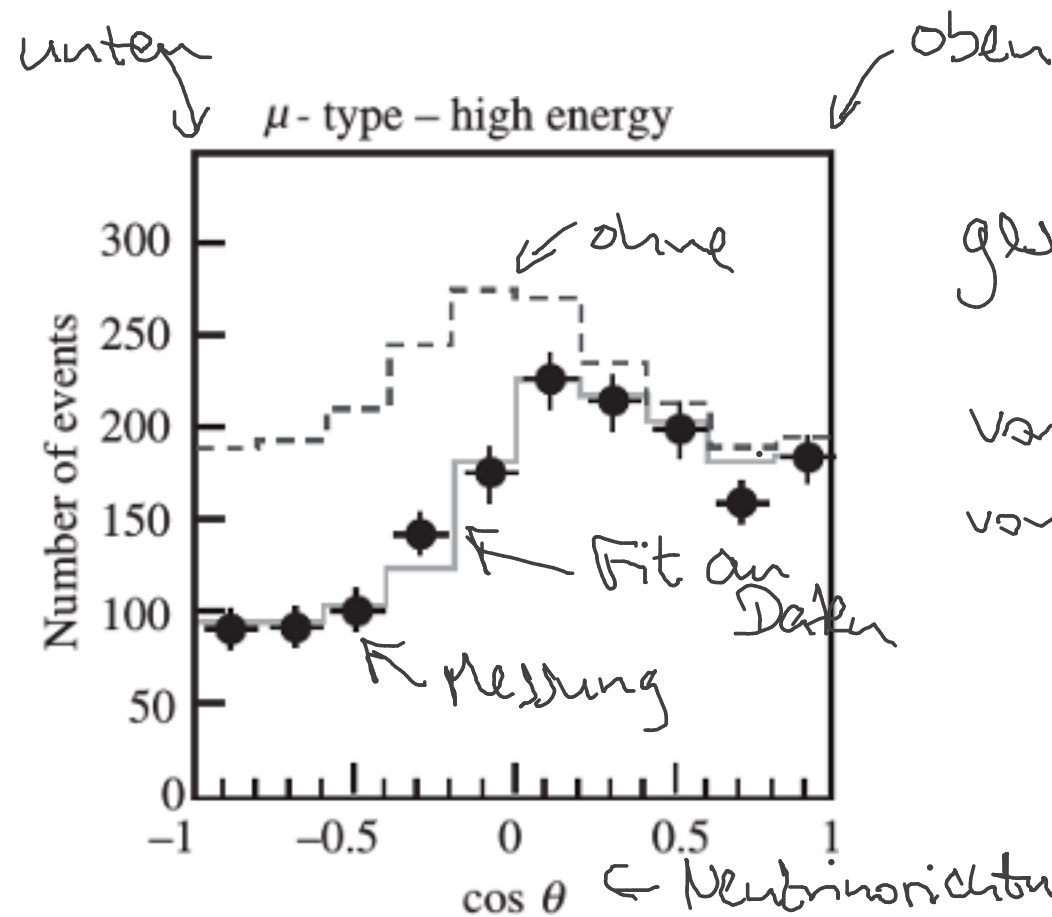
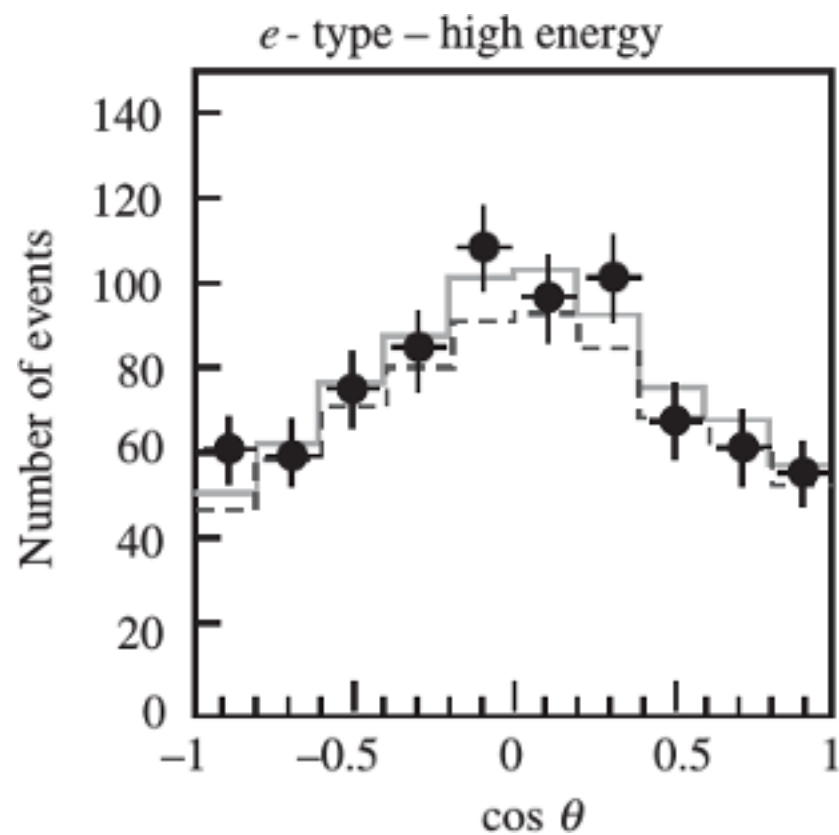
$\Phi_{\nu e}$

Atmosphärische Neutrinos

- komplementäre Messung (Super-K, 1998)
- Unterscheidung ν_e und ν_μ anhand Ringform (Fischer-Licht)
- Verhältnis von atmosph. Neutrinos:



- gemessen: $\sim 1:1 \Rightarrow \nu_\mu$ verschwinden
- zusätzlich: kannten Neutrinorichtung bestimmen



gestrichelt = ohne θ_z .

von oben $\rightarrow z \sim 10 \text{ km}$
 von unten $\rightarrow z \sim 12000 \text{ km}$
 \uparrow
 Flugstrecke Neutrino

ν_e : keine θ_z .
 $\Rightarrow \theta_{13}$ klein

\uparrow Mischungswinkel der Neutrinos

ν_μ : θ_z für ν_μ von unten ($\cos \theta = -1$)
 $\Rightarrow \theta_{23} \sim \pi/4$

\uparrow

Neutrino-Oszillationen

- Grundlage:
 - Massen-Eigenzustand \neq Leptonzahl-Eigenzustand
 - Neutrino Mischung (vgl. CKM-Matrix bei Quarks)

Leptonzahl: L_e, L_μ, L_τ Eigenzustände z.B. $\hat{L}_e | \nu_e \rangle = +1 | \nu_e \rangle$

Masseneigenzustände $\langle \nu_i | \hat{M} | \nu_j \rangle = m_i \delta_{ij}$ $i, j = 1, 2, 3$

analog zu Quarks verbindet unitäre Matrix die Eigenzustände

z.B. für 2 Flavours:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Zeitentwicklung: $|\nu_i(t)\rangle = \exp(-iE_i t) |\nu_i(0)\rangle$

mit $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p}$

↳ ist unterschiedlich für Masseneigenzustände mit $m_i \neq m_j$

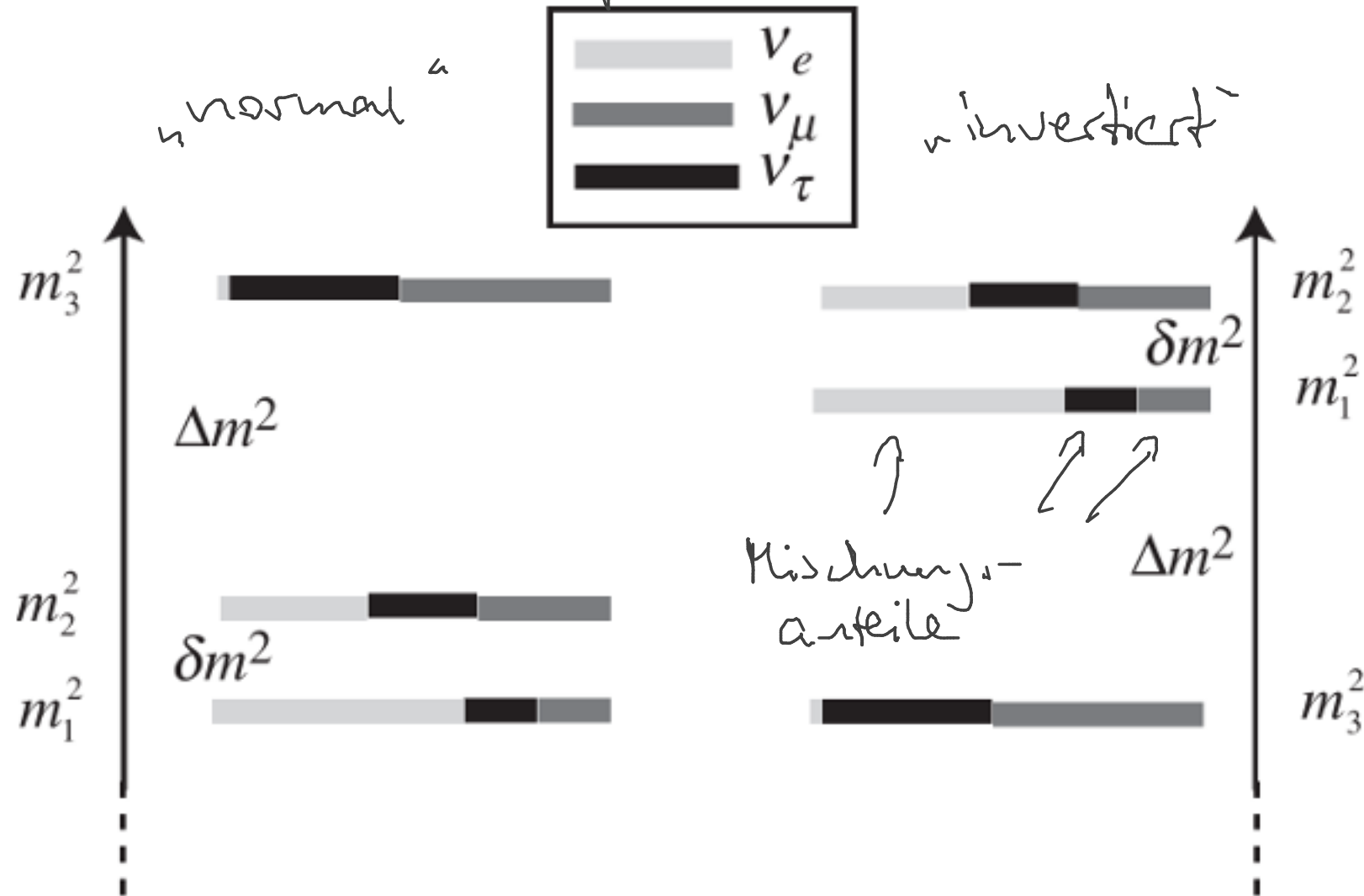
\Rightarrow Übergangswahrscheinlichkeit:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\overbrace{(\Delta m^2)}^{(m_2^2 - m_1^2)} c^3}{4 E} z\right)$$

z : Wegstrecke

- Mischungswinkel θ bestimmt Amplitude
- Δm^2 und Energie E bestimmen Oszillationslänge
- Neutrino-Os. $\Leftrightarrow \Delta m^2 \neq 0$ und $\theta \neq 0$!

Massenspektrum der Neutrinos



$$\Delta m_{\text{normal}}^2 \approx 8 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{eV}}{c^2} \right)^2 \ll \Delta m_{\text{inverted}}^2 \approx 3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{eV}}{c^2} \right)^2$$

\parallel
 Δm^2

- Offene Fragen:
- Neutrinomassen? ($m(\nu_e) < 2 \text{ eV}$) (neue Exp. z.B. KATRIN)
 - große Massenunterschiede? ℓ, q vs. ν (see-saw-Mechanismus?)
 - Dirac- u. Majorana-Neutrinos? (\rightarrow neutrinoloser Doppelbeta-Zerfall?)