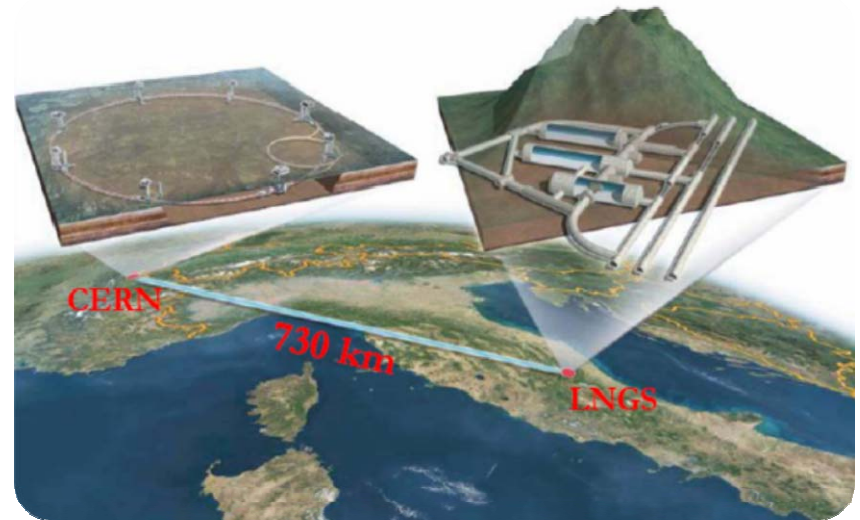


Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 22



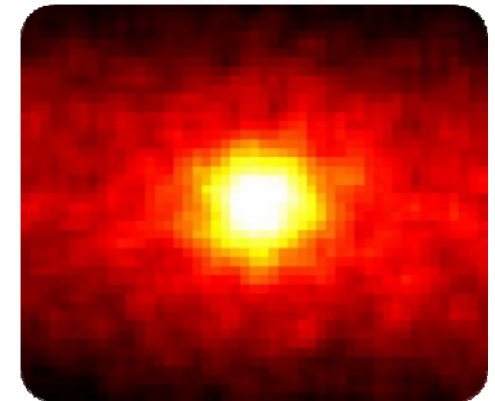
8. Moderne Elementarteilchen-Physik

8.1 Phänomene der Schwachen Wechselwirkung

- a) Klassifikation schwacher Prozesse
- b) Elektroschwache Vereinigung
- c) Schwache Wechselwirkung von Quarks
- d) CP-Verletzung

8.2 Neutrino-physik

8.3 Fundamentale Entdeckungen: W/Z-Bosonen, Top-Quarks, Higgs-Bosonen



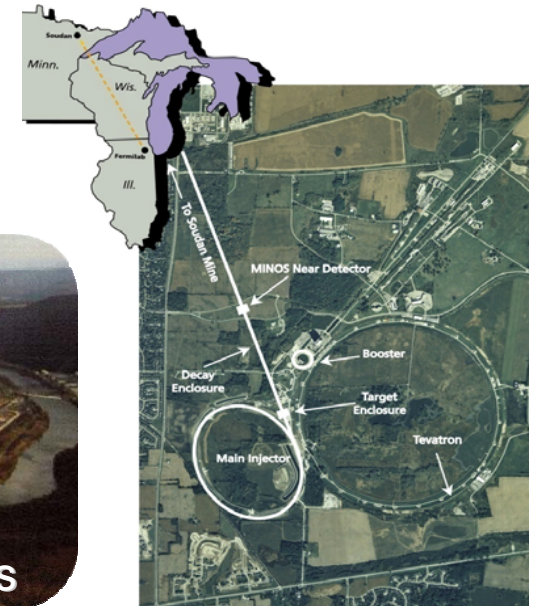
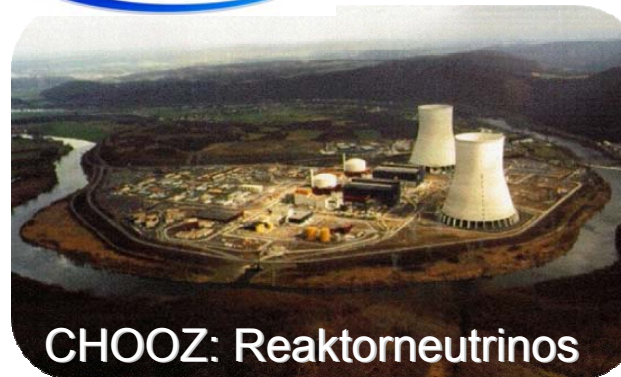
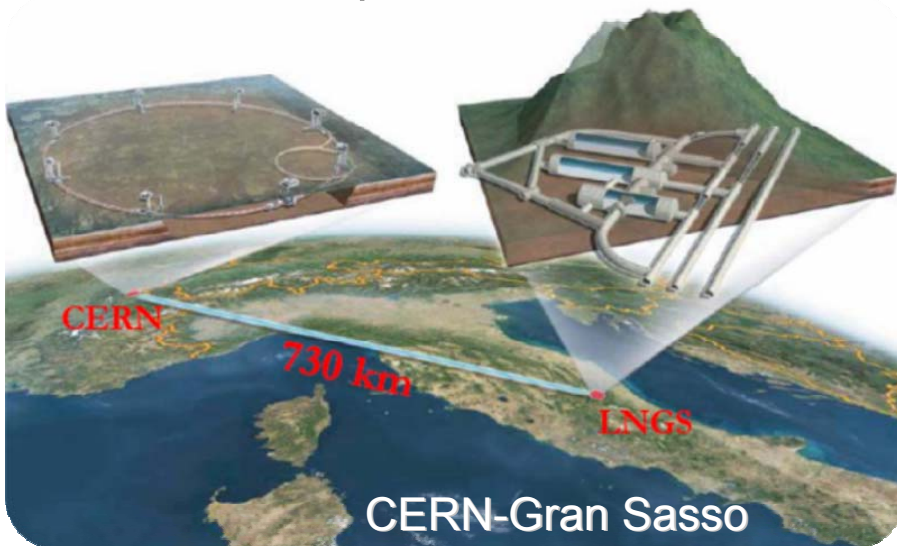
8.2 Neutrinoophysik

Untersuchung der **ν -Eigenschaften** (Masse, Mischung, $\bar{\nu}$)

a) Neutrinoquellen

Terrestrische ν -Quellen	ν -Energien
Kernreaktoren (β -Zerfall von Spaltprodukten)	1 – 5 MeV
Spallationsquellen (π^+ - μ^+ Zerfallskette in Ruhe)	bis 50 MeV
Beschleuniger (π^+ -Zerfall im Fluge)	bis 200 GeV

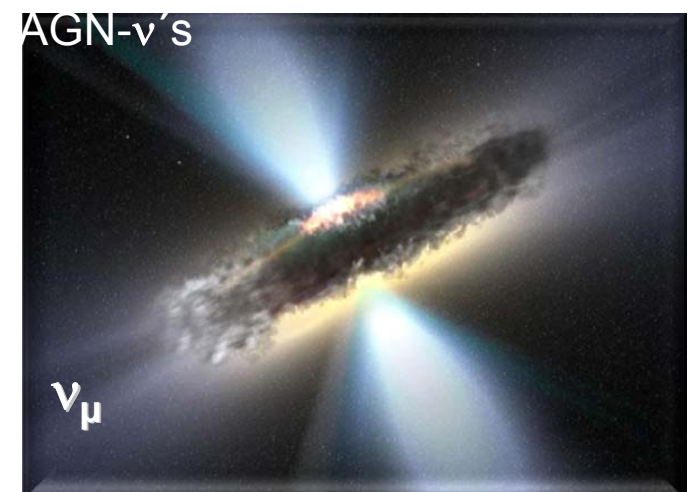
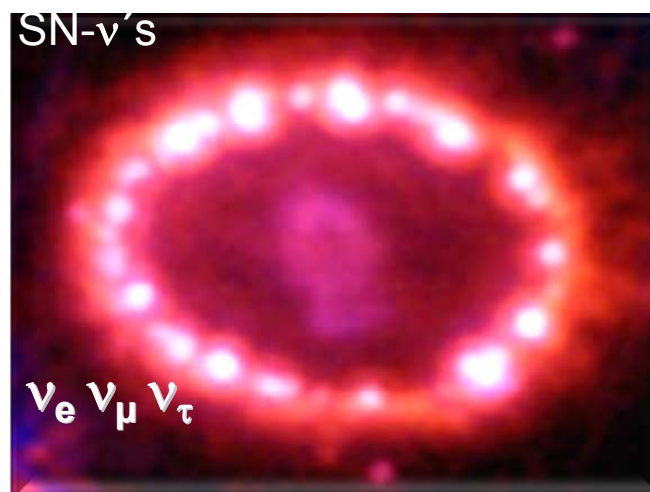
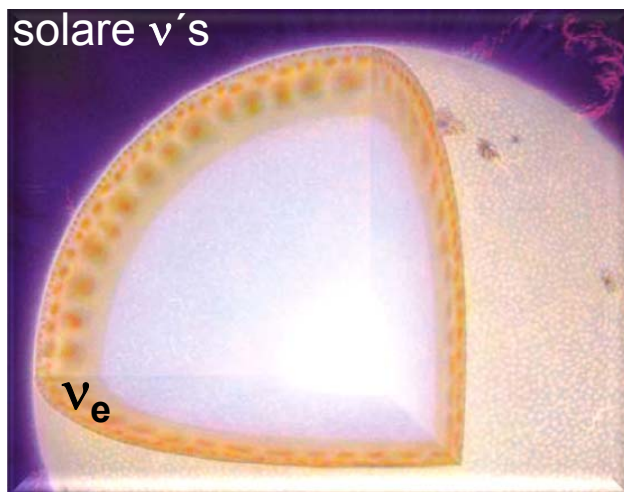
+ neue Konzepte für ν -Strahlen: „ β -beams“



Neutrinoquellen – astrophysikalisch

- Erzeugung von astrophysikal. Neutrinos mit Energien von 10^{-6} eV bis 10^{20} eV

astrophysikalische ν -Quellen	Energien	Erzeugungs-Reaktionen
Urknall (thermisch, $T_\nu = 1.9$ K)	einige μeV	$e^+ + e^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$
Sonne (Kernfusion, pp, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$)	< 15 MeV	$4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e$
Supernova (thermisch, Protoneutronstern)	< 50 MeV	$e^+ + e^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$
Atmosphäre (kosmische Strahlung)	$< 10^4$ GeV	$\pi^\pm \rightarrow \nu_\mu + \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_\mu + \nu_e$
Kosmische Beschleuniger	$< 10^{10}$ GeV	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$



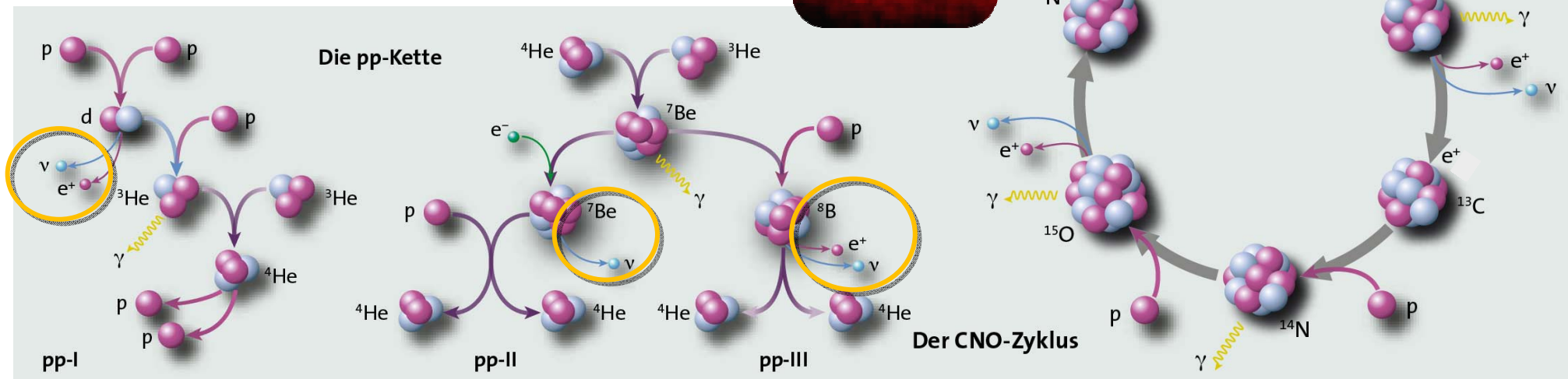
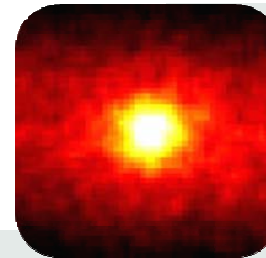
Sonnenneutrinos

- **Solare Neutrinos:** $E_\nu < 10 \text{ MeV}$ (pp, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, hep), $L_\nu \sim 150 \text{ Mio km}$
aus den pp-Fusionsreaktionsketten: $4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \nu_e$
- Standardsonnenmodell SSM (basierend auf solaren Parameter)

Integraler Sonnen- ν -Fluss: $\Phi_\nu = 6.6 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \text{ s}$

pp – Kette ist dominant

CNO – Kette ist sub-dominant



Solare Neutrinos – Energiespektren

- Detaillierte theoret. Modellrechnungen zum solaren ν -Spektrum

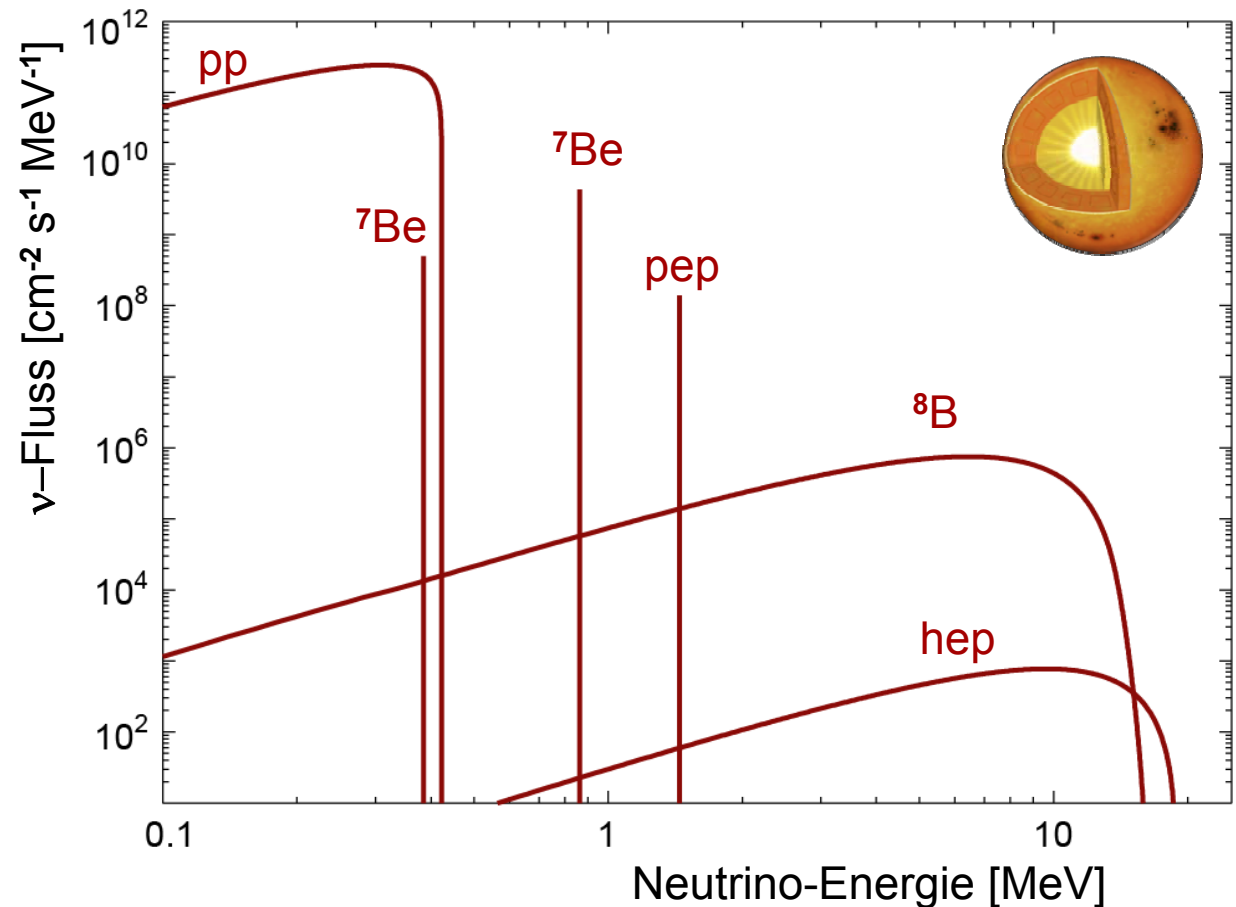
Grundgleichungen

- hydrodynamisches Gleichgewicht
- Energietransport: Strahlung & Konvektion
- Energieerzeugung: pp-Kernfusion (+CNO)
- **SSM: Standard-Sonnen-Modell**



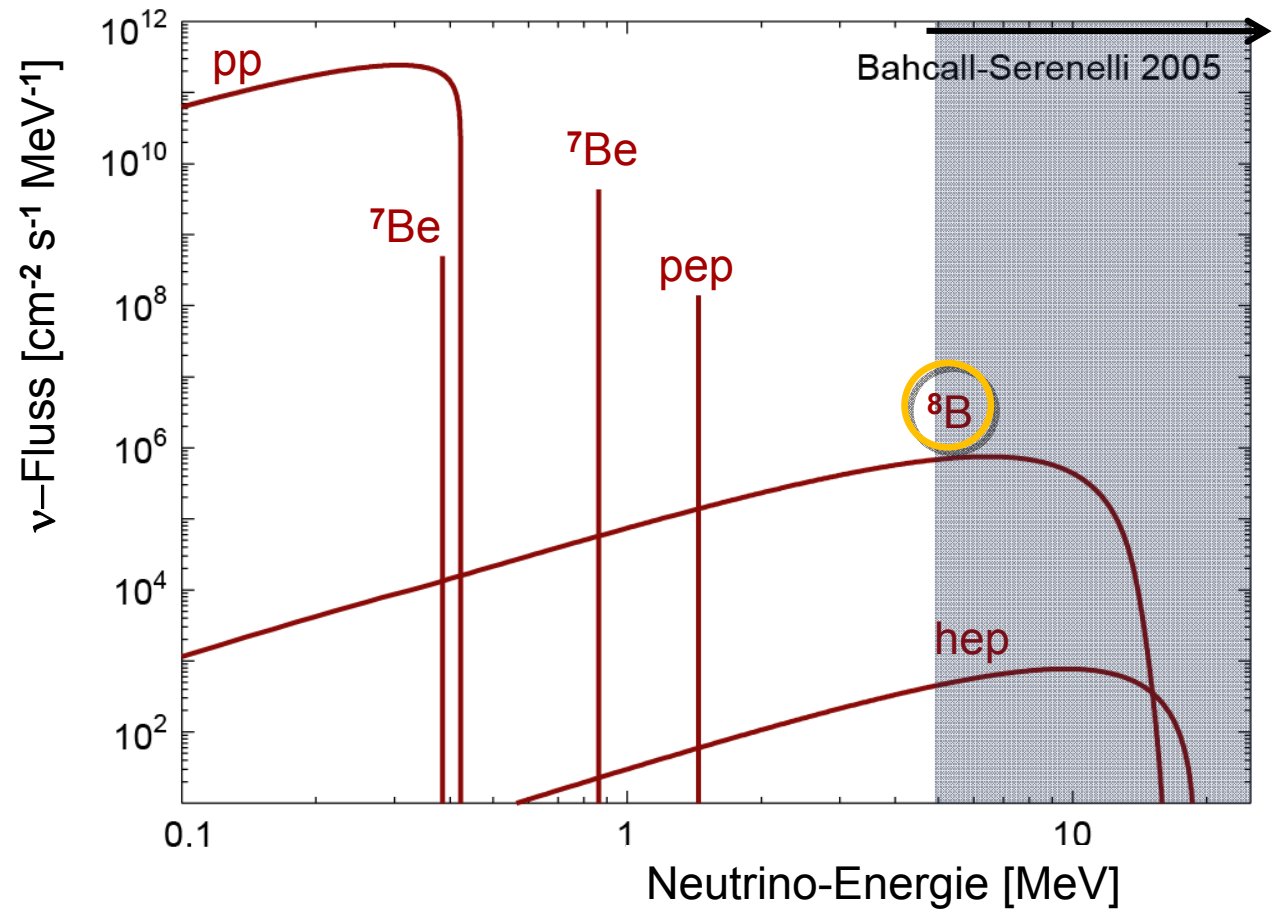
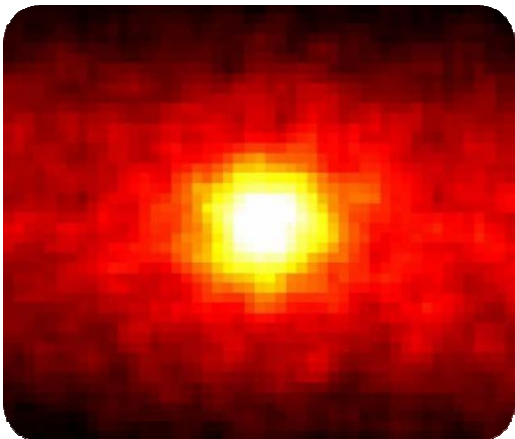
Pionier des heutigen Standard-Sonnenmodells:
John Bahcall
(1934-2005)

Integraler Sonnen- ν -Fluss: $\Phi_\nu = 6.6 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \text{ s}$



Solare Neutrinos – ^8B

- **Wasser-Cherenkov-Detektoren:** 'real-time' Nachweis von ^8B - ν 's
Messung der spektralen Form, CC-Rate, **NC-Rate**, Tag-Nacht-Effekte,...



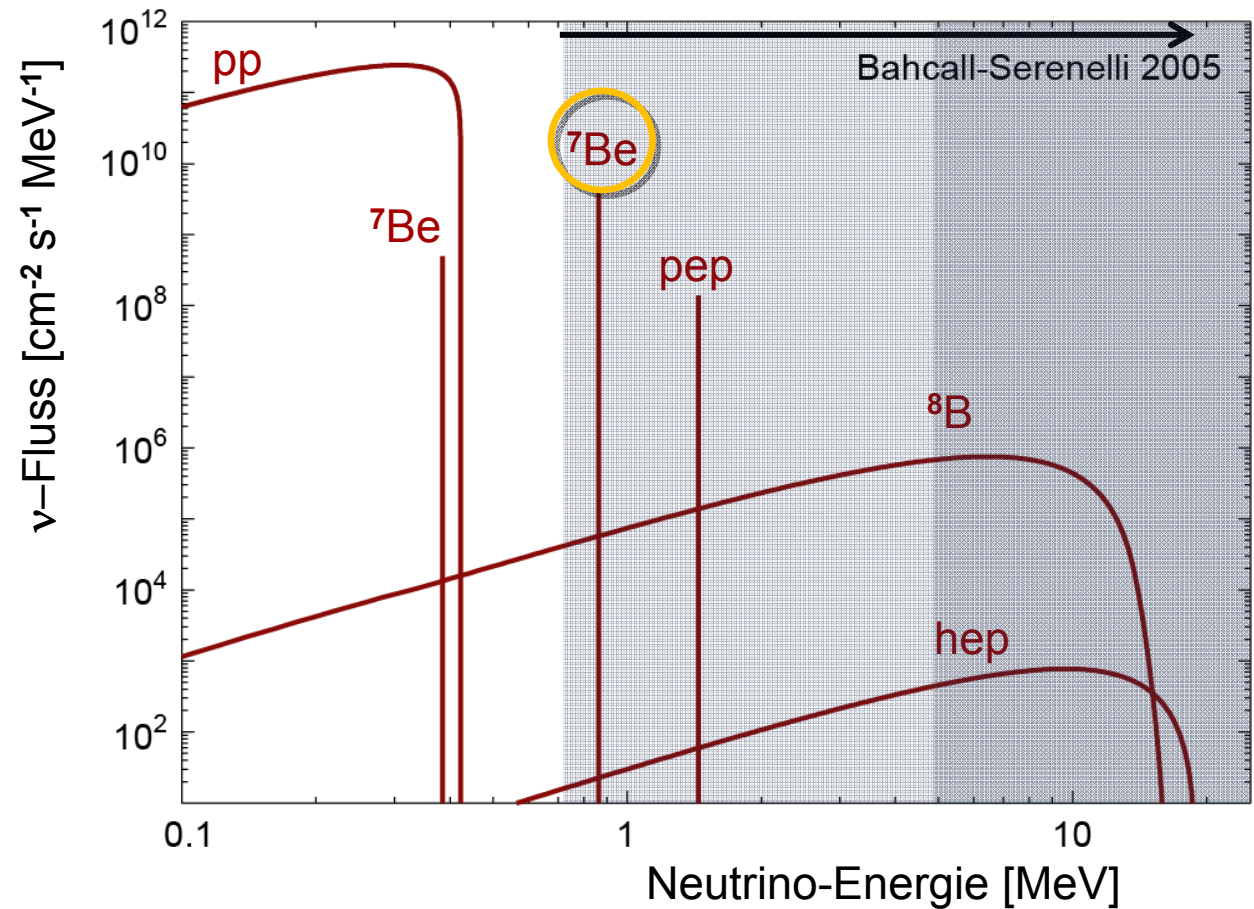
Solare Neutrinos – ${}^7\text{Be}$

■ **Radiochemische Detektoren:** Cl-37 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \leftrightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ ($Q = 814 \text{ keV}$)

Messungen über 3 Jahrzehnte: **solares ν -Problem**

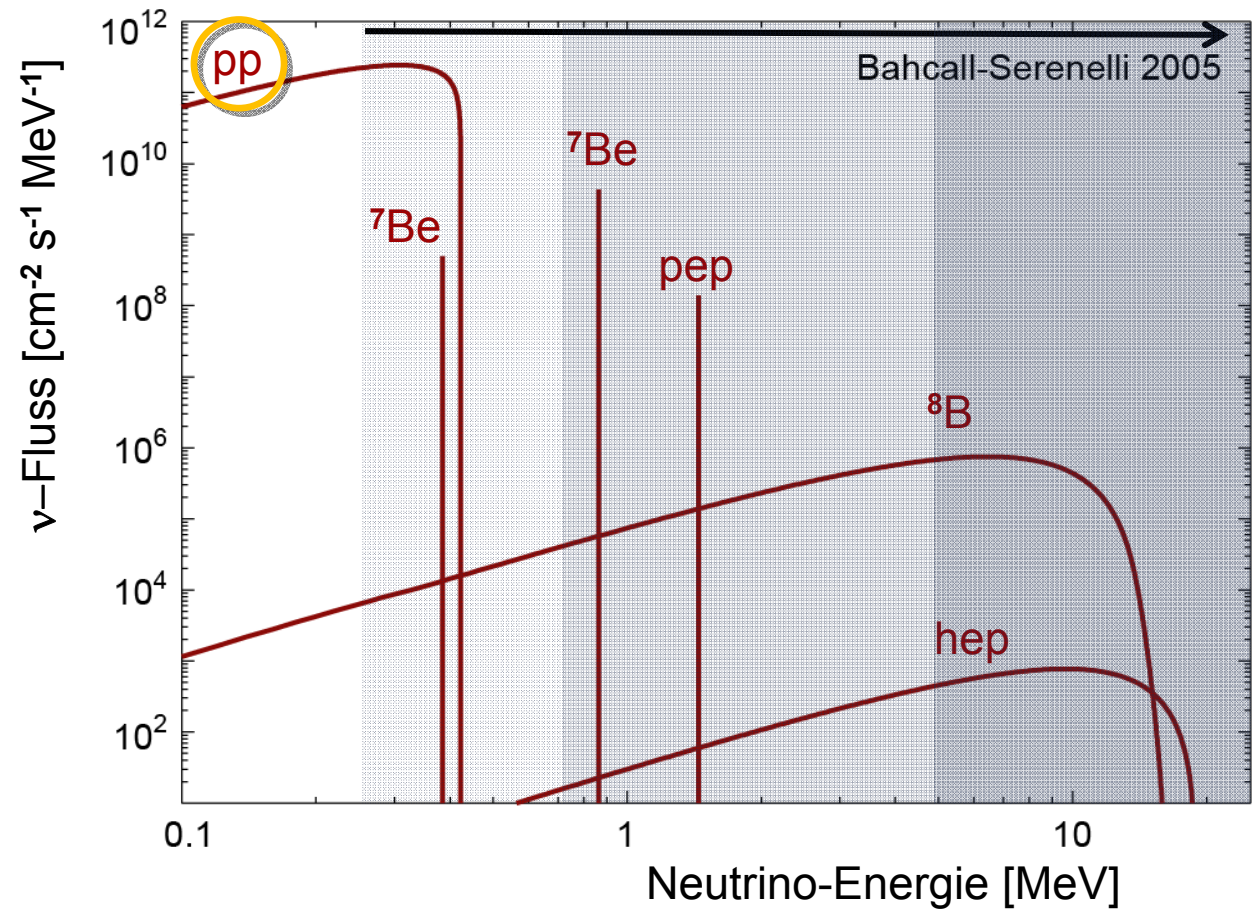
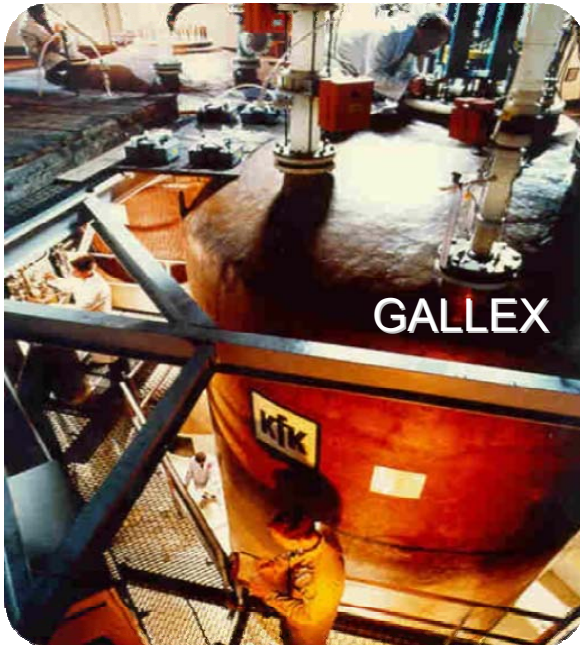
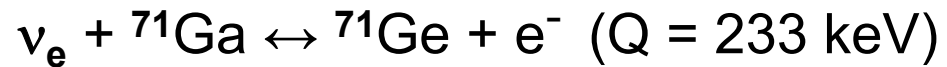


Nobelpreis
2002



Solare Neutrinos – pp

■ Radiochemische Detektoren: Gallex & SAGE:



Resultate der Sonnen-Neutrinoexperimente

■ Solares Neutrino Defizit:

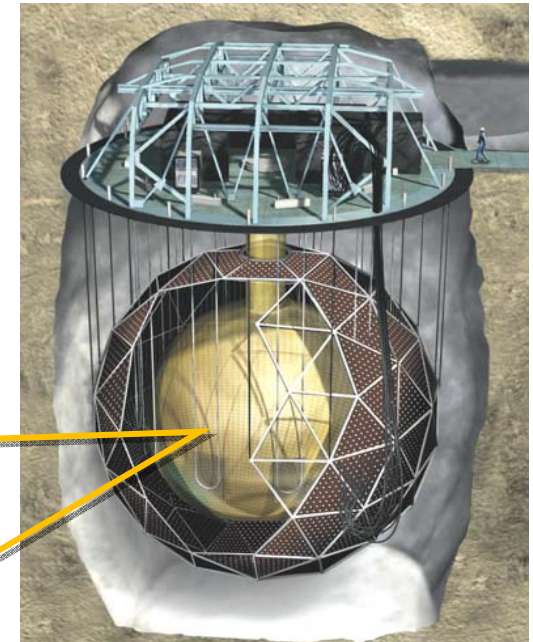
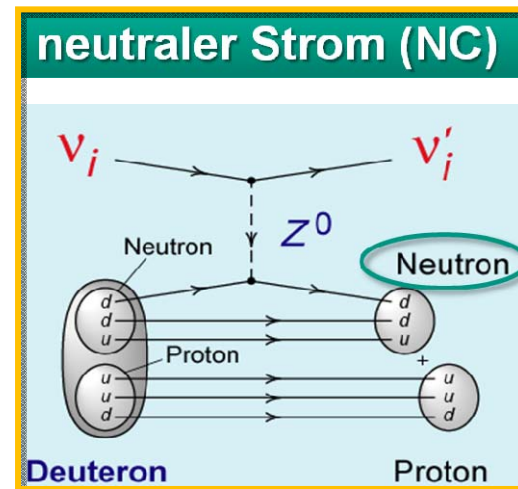
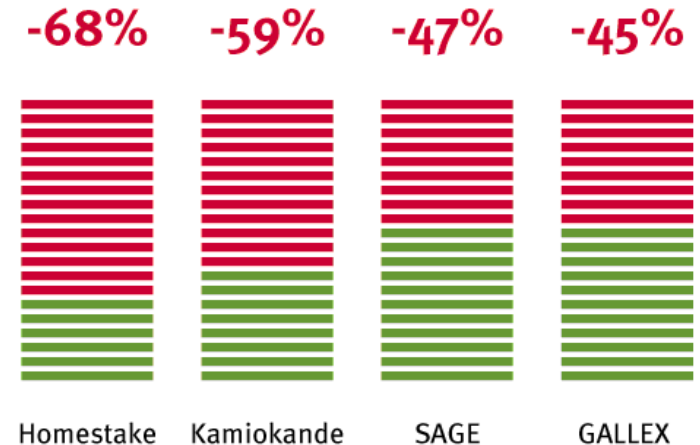
alle Experimente (radiochemisch, realtime)
auf der Basis von **CC-Reaktionen** zeigen ein
signifikantes, schwellenabhängiges Defizit

■ Sudbury Neutrino Observatory SNO

das SNO-Experiment löst das solare Neutrino-
Problem durch die erste Beobachtung einer

NC Reaktion an ^2H (Deuteron):

- Die **exp. NC Rate entspricht dem theoretischen SSM-Wert**
- Solare ν 's oszillieren auf dem Flugweg vom Sonneninnern zur Erde in andere, nicht mit CC-Reaktionen nachweisbare Flavourzustände ν_μ, ν_τ

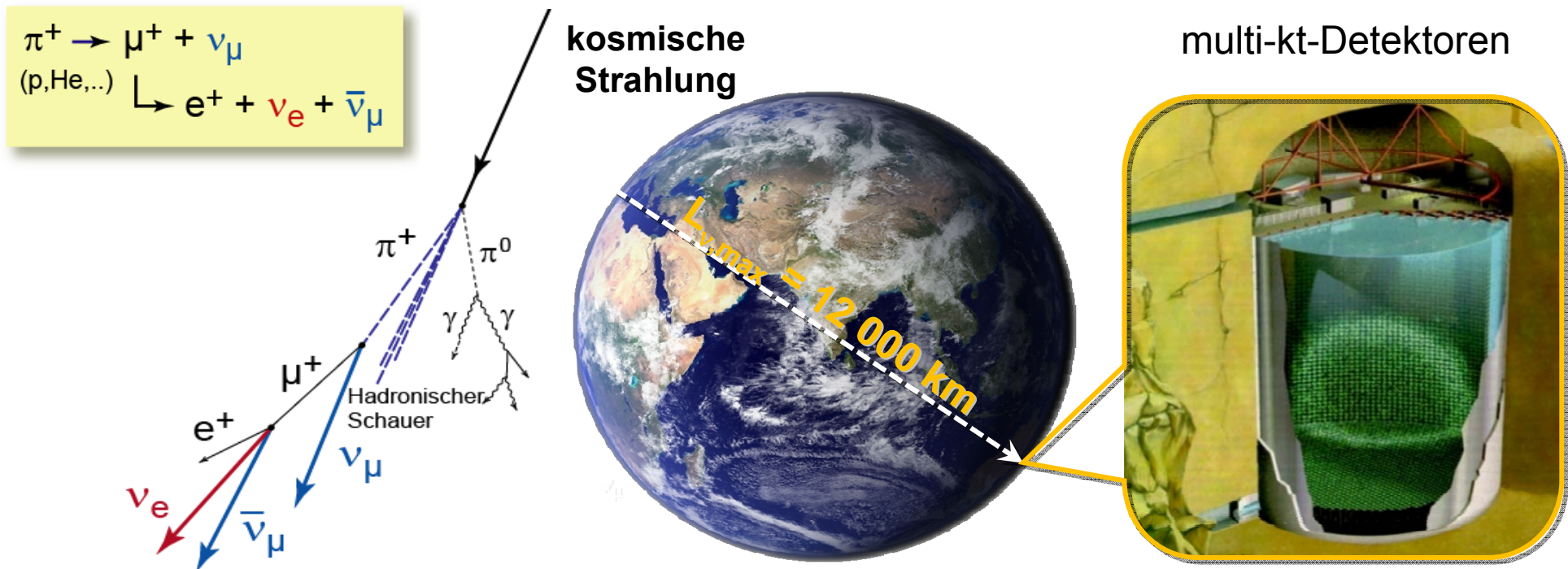


Atmosphärische Neutrinos

- Erzeugung durch kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre ($h \sim 20$ km)
Wechselwirkungen mit ^{16}O , ^{12}N Kernen: $\leadsto$ Pionen (π^+ , π^0 , π^-) Kaonen
Zerfallskette der Pionen/Kaonen $\leadsto$ atmosphärische **ν 's im GeV-Bereich**

Energien: Φ_{max} bei $E_\nu = 0.25$ GeV, dann $\Phi_\nu \sim E^{-2.7}$ bei hohen Energien

Fluss: $\Phi_\nu \sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf Meereshöhe



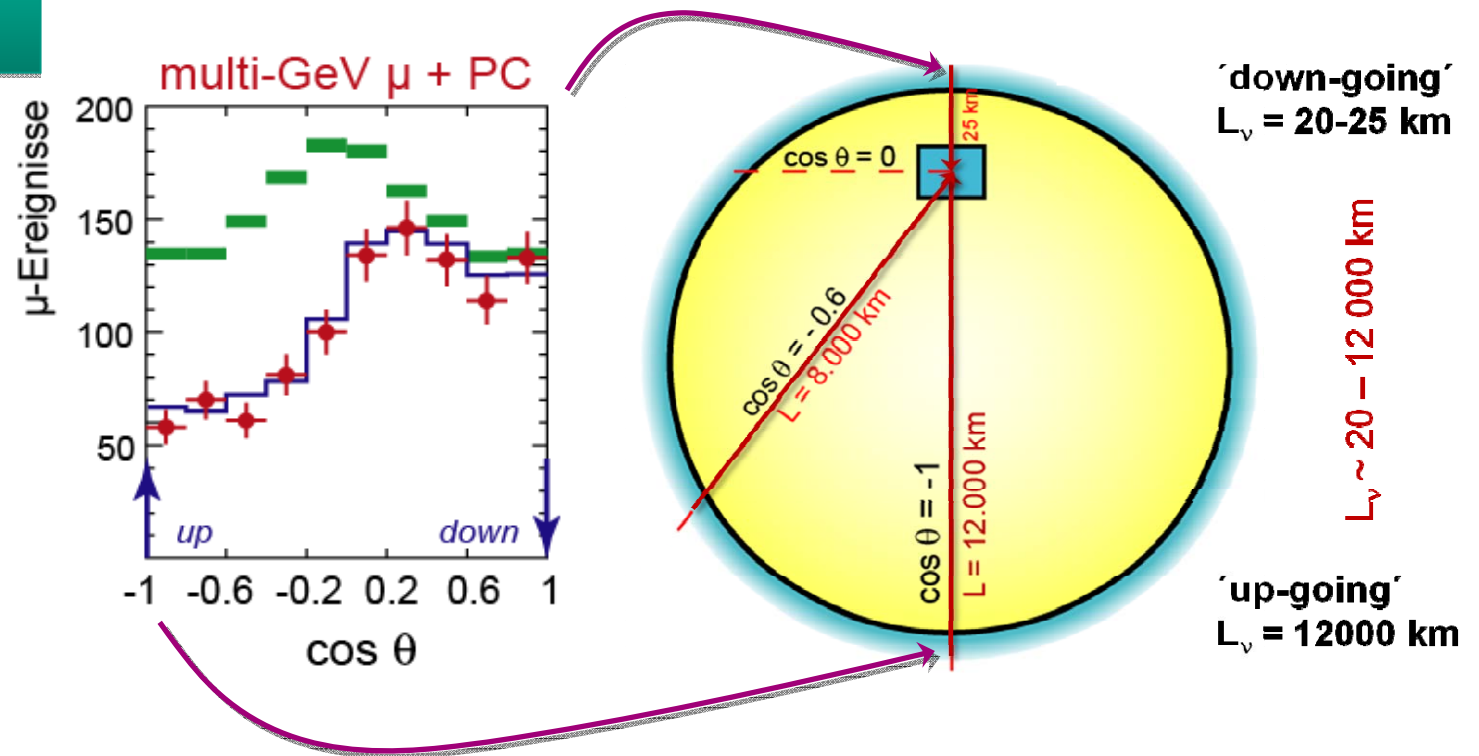
Atmosphärische Neutrino-Oszillationen

- Die Evidenz für die Oszillation von atmosphärischen ν 's basiert auf einer oben-unten Asymmetrie für hochenergetische Myon-Neutrinos: die **nach oben laufenden ν_μ sind in ν_τ oszilliert**
- Aus der Anpassung des beobachteten Winkelspektrums ergibt sich:
- **atmosphärische Neutrinos oszillieren maximal**

$$\Delta m^2 = 2.1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 1.02$$

- Bei der Auftragung von L_ν/E_ν zeigt sich ein Verhalten wie es für die Flavouroszillation erwartet wird

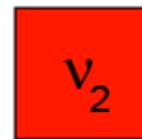
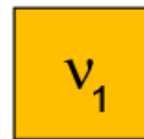


b) Neutrino-Oszillationen

- Neutrino-Oszillationen basieren auf einem **quantenmechanischen Interferenzphänomen**

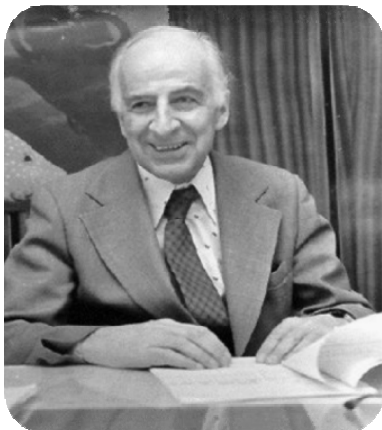
Nichtidentität von **Masseneigenzustände** $\neq$ **schwache Wechselwirkung**

mit m_1, m_2

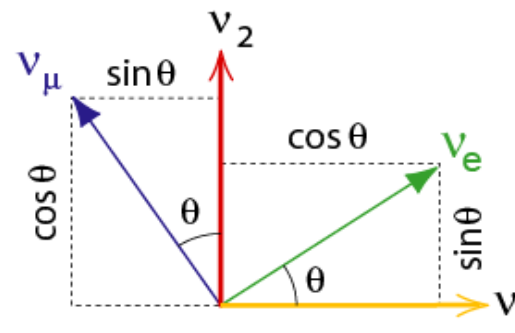


2-Flavour-ν-Mischung:

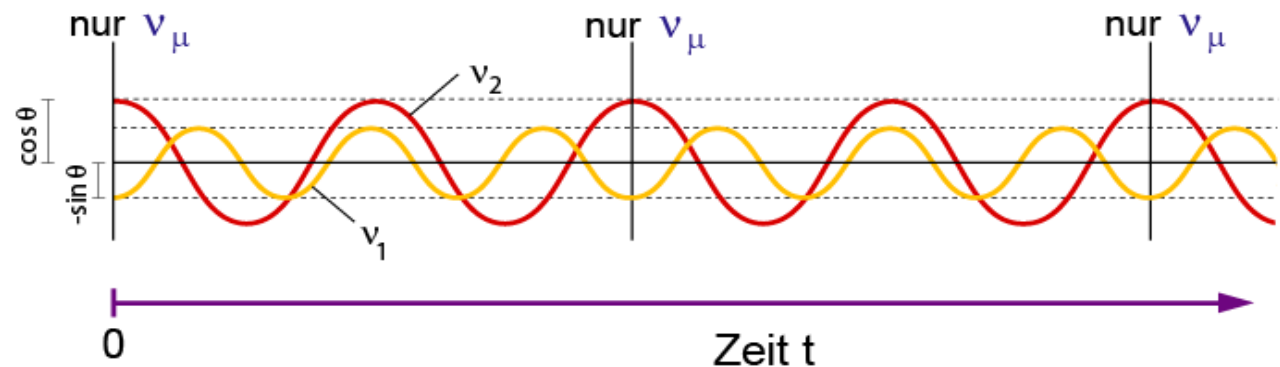
- enge Analogie zur CKM Mischung der linkshändigen Quarks



Bruno Pontecorvo: erstes Konzept ν - $\bar{\nu}$ Oszillationen



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



Neutrino-Oszillationen – Formalismus

- Wahrscheinlichkeit P für die **Oszillation eines ν_μ in ein ν_e** nach Zeit t :

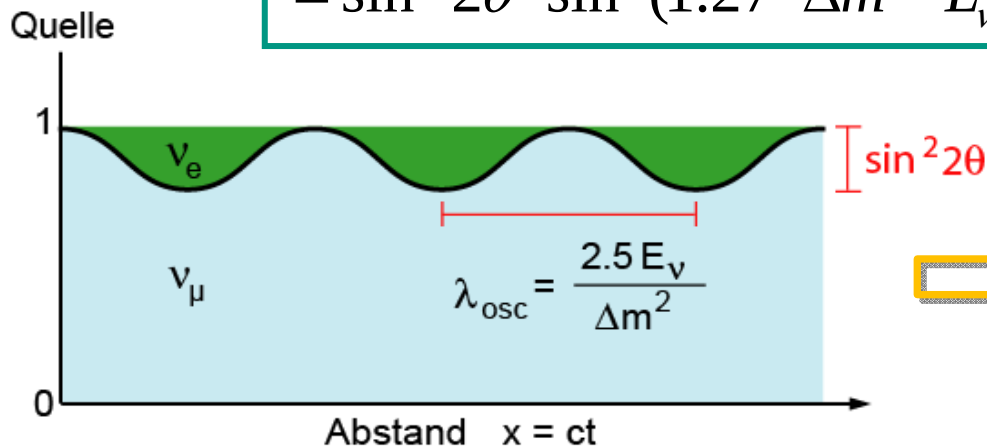
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\cos \theta \cdot \sin \theta \cdot (1 - e^{i\Delta m^2 t / 2E_\nu})|^2 \quad \text{mit } P = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

$$= \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(\Delta m^2 L_\nu / 4E_\nu) \quad \text{mit Massensplitting } \Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$$

$$= \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot L_\nu / E_\nu)$$

L_ν in Einheiten m bzw. km

E_ν in Einheiten MeV bzw. GeV



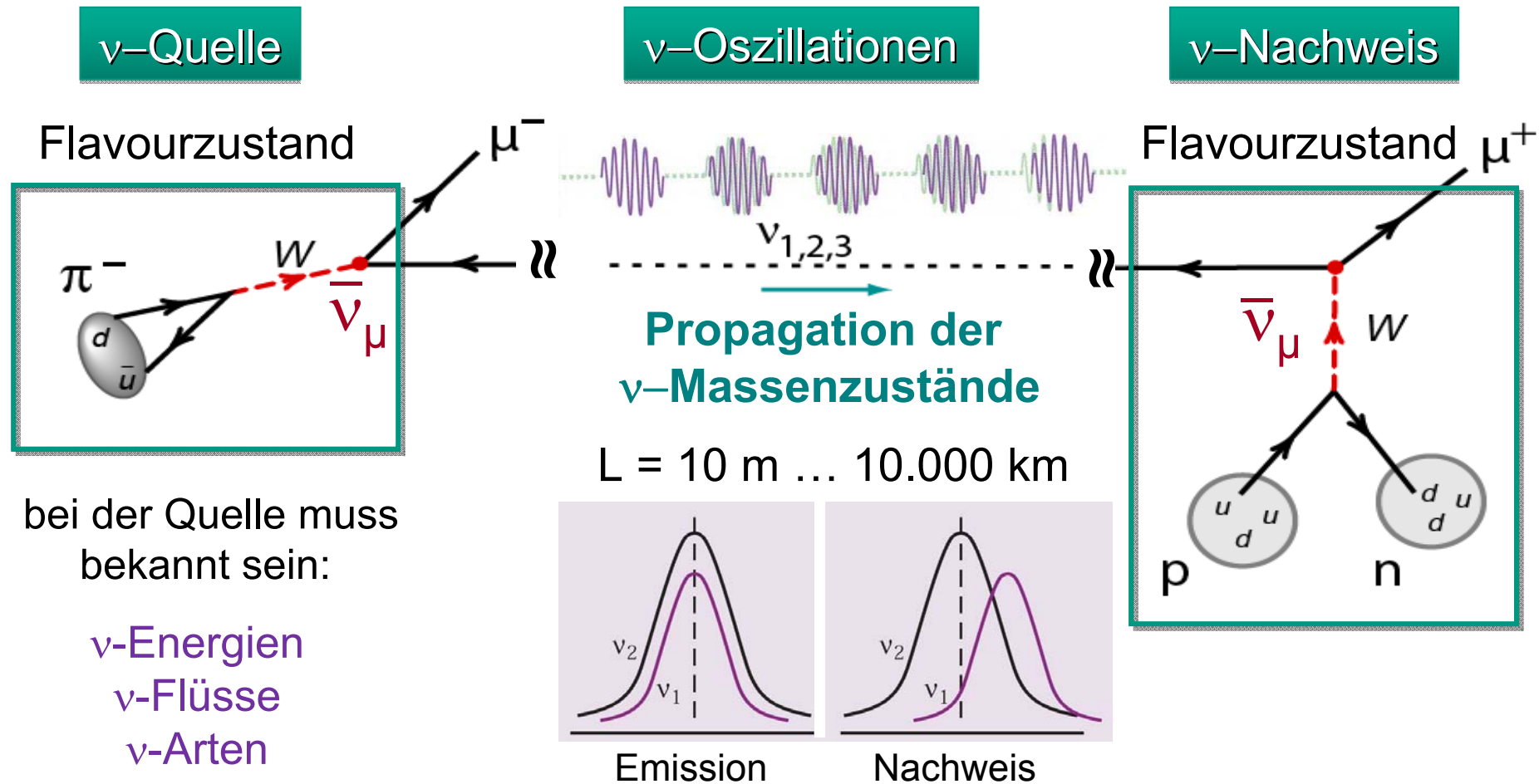
Wahrscheinlichkeit, daß ν_μ in ν_e umgewandelt ist.

Wahrscheinlichkeit, daß ν_μ noch ν_μ ist.

- periodisches Auftauchen eines **neuen** Neutrino-flavourzustands
- periodische Ab- bzw. Zunahme des **ursprünglichen** Neutrino-flavourzustandes
- Oszillationslänge $\lambda \sim \nu$ -Energie!**
 $\lambda_{osc} \sim 2.5 E_\nu / \Delta m^2$

Neutrino-Oszillationen – Konzept

- Neutrino-Oszillationen entstehen bei der **Propagation der Massenzustände**



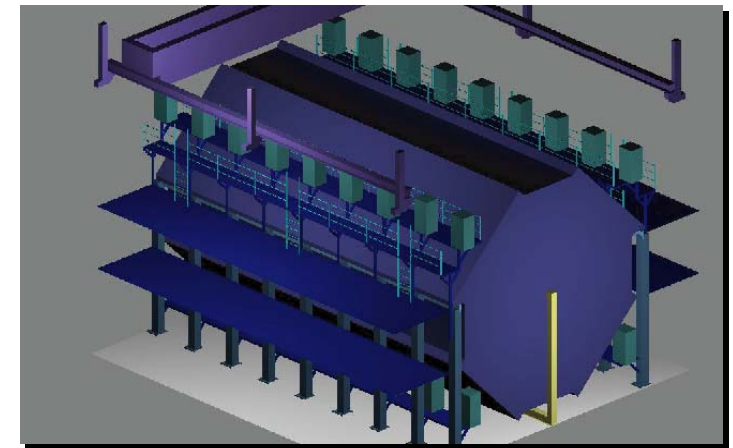
Appearance & disappearance Kanal

Disappearance Kanal $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ disappearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

Statistik: große Ereignisanzahl ($N > 10^4$)

Systematik: ν -Fluss & ν -Energien
ideal, falls **große** Mischungsamplitude



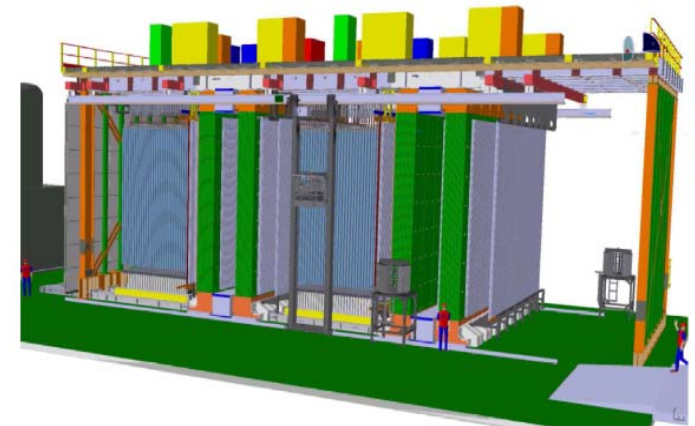
Beispiel: NuMI Strahl - MINOS

Appearance Kanal $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

Statistik: sehr kleine Ereigniszahl ($N < 100$)

Systematik: ν -Flavoursorten
ideal, falls **kleine** Mischungsamplitude



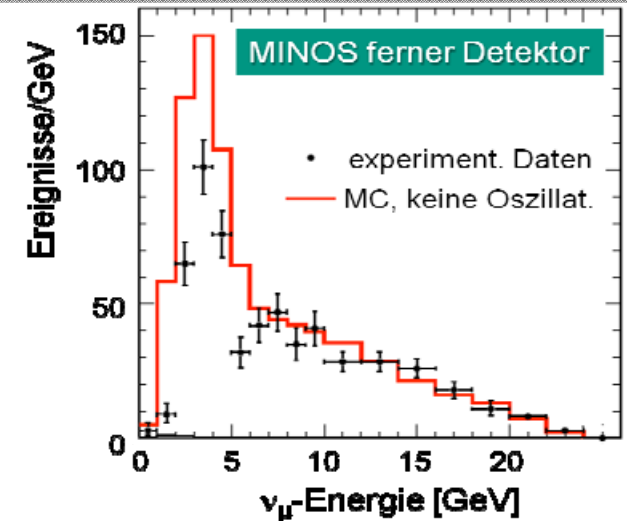
Beispiel: CNGS Strahl - OPERA

disappearance Kanal $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ disappearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

Statistik: große Ereignisanzahl ($N > 10^4$)

Systematik: ν -Fluss & ν -Energien
ideal, falls **große** Mischungsamplitude

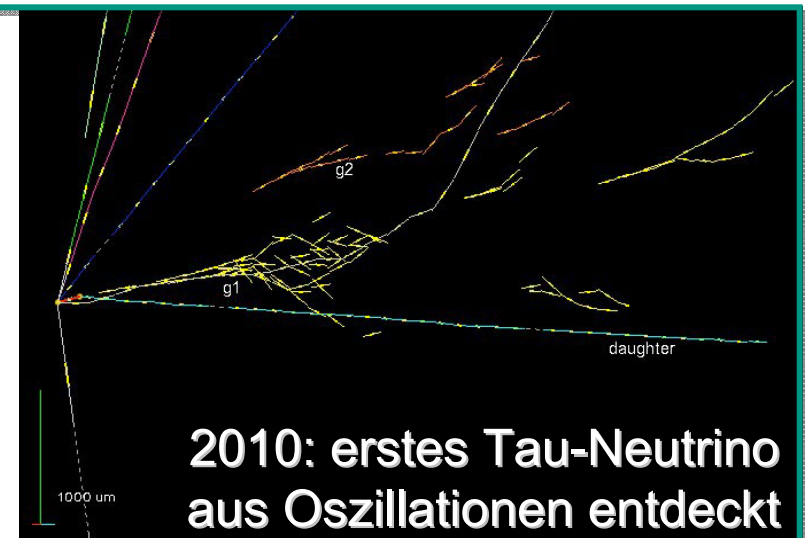


appearance Kanal $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

Statistik: sehr kleine Ereigniszahl ($N < 100$)

Systematik: ν -Flavoursorten
ideal, falls **kleine** Mischungsamplitude



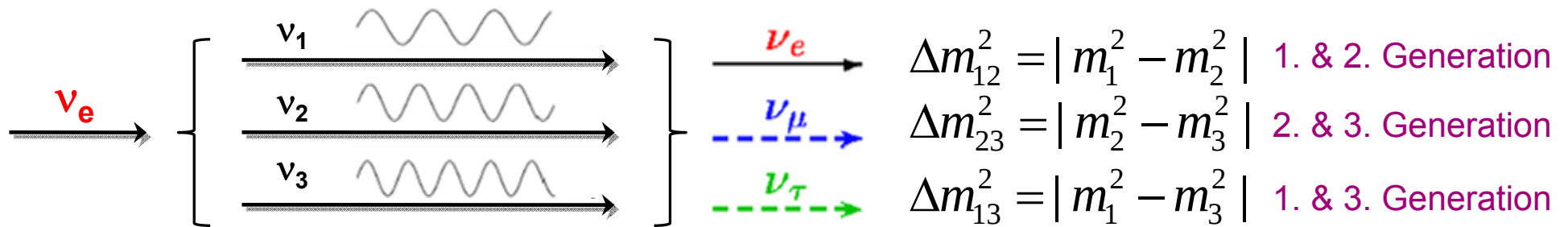
3-Flavour Mischung

■ Erweiterung der 2-Flavour-Oszillationen auf **3 Flavour-Oszillationen**:

- drei Mischungswinkel: θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}

- zwei unabhängige Δm^2 Skalen mit Relation:

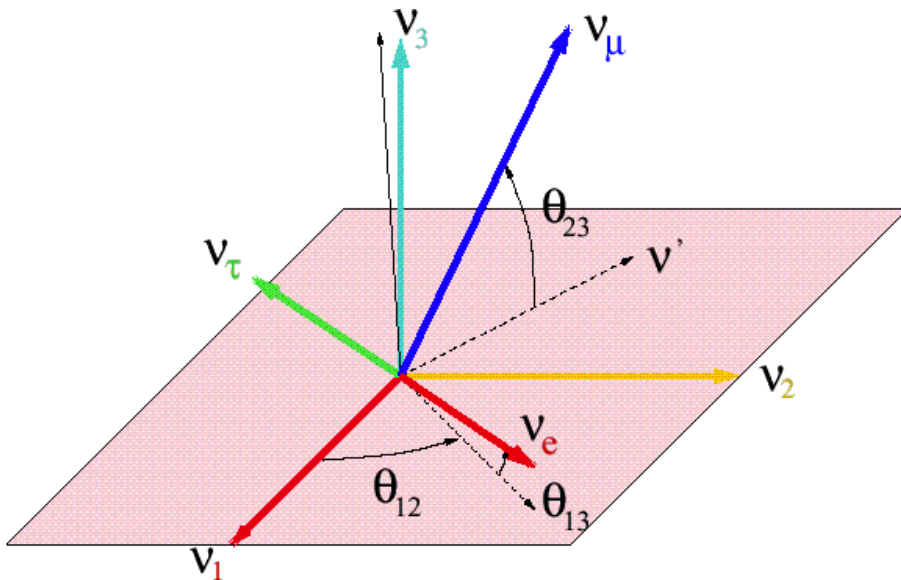
$$\Delta m_{13}^2 = \Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2$$



leptonische Mischungsmatrix:
Pontecorvo-**M**aki-**N**akagawa-**S**akata

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

U = unitäre 3 × 3 Mischungsmatrix



- 3 Flavour-Mischung 'entkoppelt' in drei separate Mischungs-Terme:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

δ : CP-Phase

2. & 3. Generation	1. & 3. Generation	1. & 2. Generation
atmosphärische ν	Reaktorexperimente	solare Neutrinos
Long baseline Beschleuniger	Long baseline Beschleuniger	Reaktorexperimente

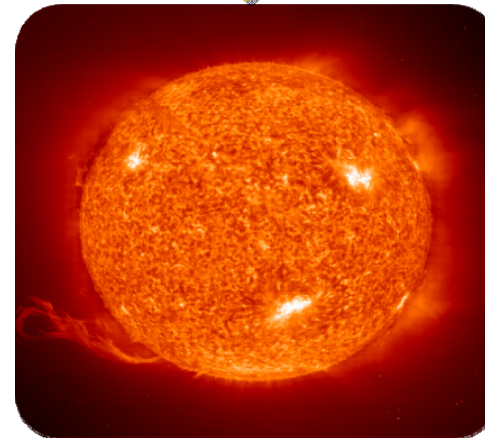
$\nu_\mu - X$ $\nu_\mu - \nu_\tau$



$\bar{\nu}_e - X$ $\nu_\mu - \nu_e$



$\nu_e - X$ $\bar{\nu}_e - X$



- 3 Flavour-Mischung 'entkoppelt' in drei separate Mischungs-Terme:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

δ : CP-Phase

2. & 3. Generation

$$\Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} = (45 \pm 4)^\circ \text{ (maximal)}$$

1. & 3. Generation

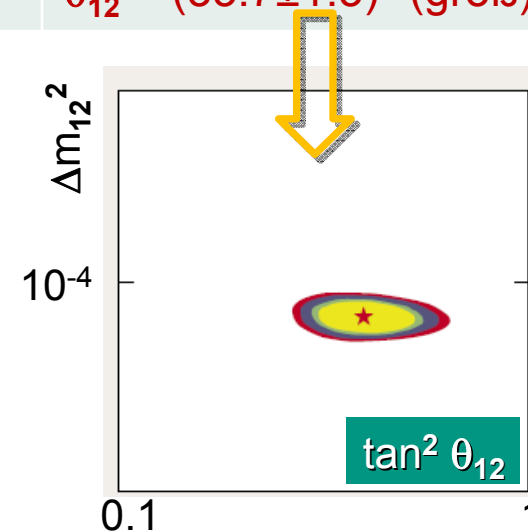
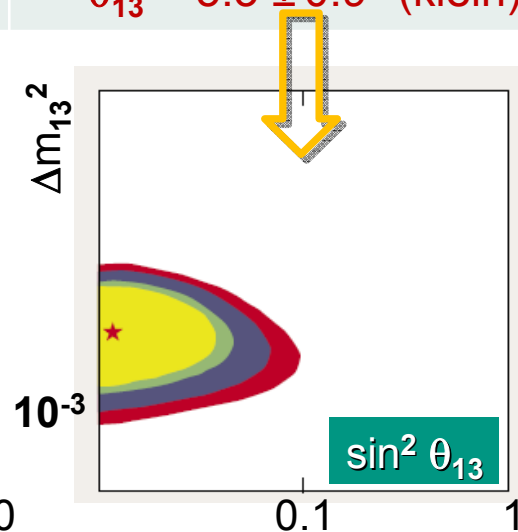
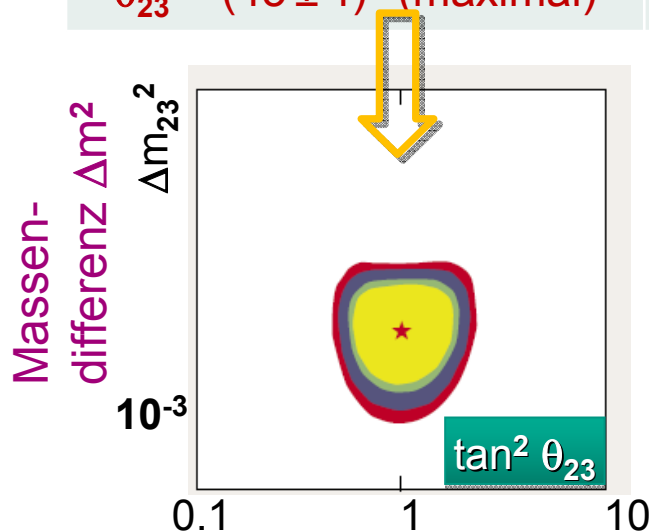
$$\Delta m_{13}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{13} = 5.3 \pm 0.9^\circ \text{ (klein)}$$

1. & 2. Generation

$$\Delta m_{12}^2 = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} = (33.7 \pm 1.3)^\circ \text{ (groß)}$$



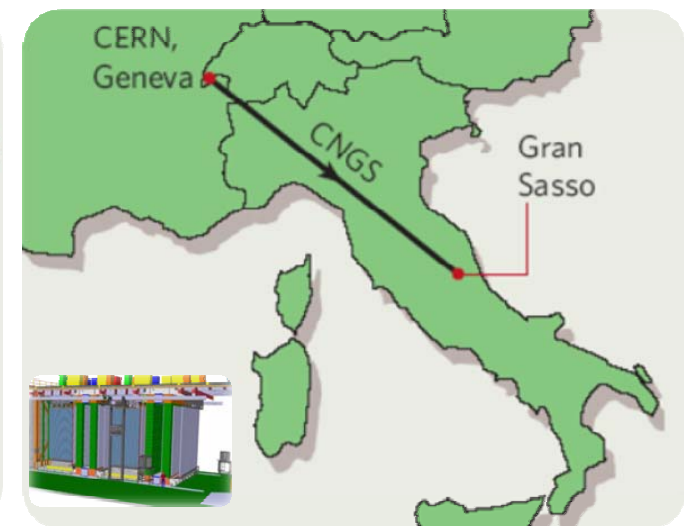
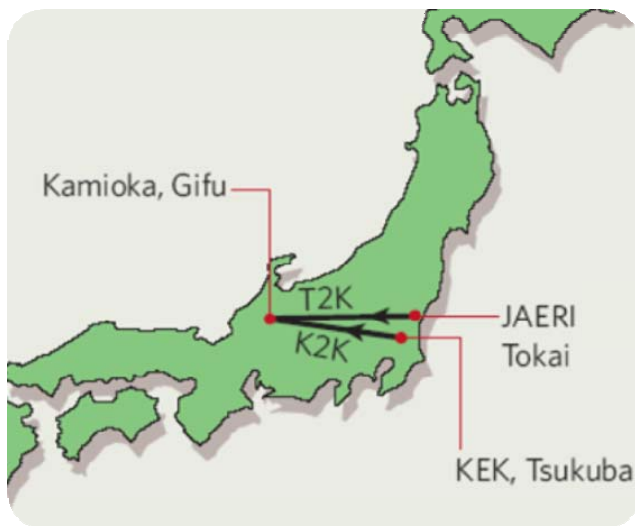
Mischungs-
winkel θ

Long-Baseline Oszillationsexperimente

- **long-baseline ν -Oszillations-Experimente** in Japan, USA & Europa:
Überprüfung der Oszillation von atmosphärischen ν 's im Labor ☒

Long-Baseline Beschleuniger Experimente: Übersicht

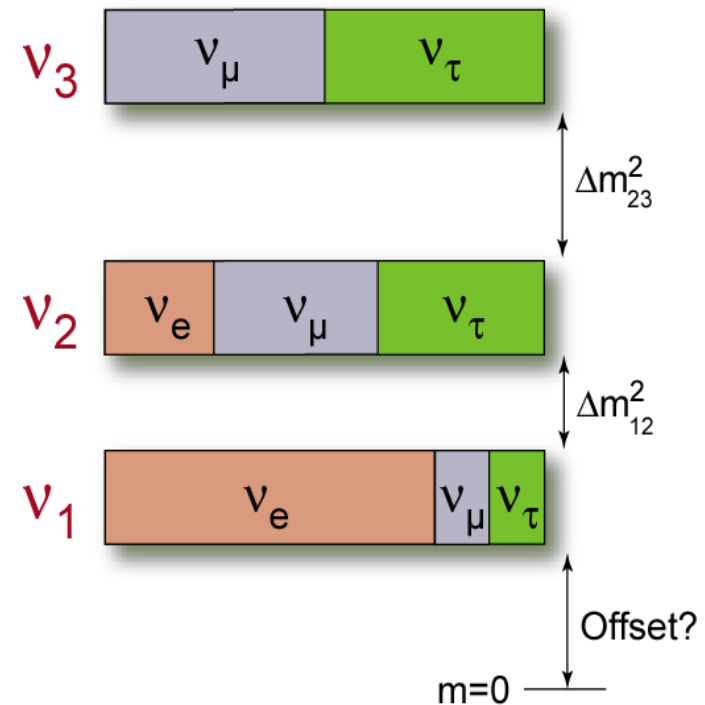
LB- ν -Strahl	Ort	Entfernung	Energie	L/E	Beginn	Detektor	Kanal
K2K	J	235 km	1.4 GeV	~ 150	1999	Super-Kamiokande	$\nu_\mu - \nu_e$
NuMI	US	735 km	1-30 GeV	50-350	2005	MINOS	$\nu_\mu - \nu_\mu$
CNGS	EU	732 km	30 GeV	50-350	2007	OPERA	$\nu_\mu - \nu_\tau$
T2K	J	295 km	GeV		2010	Super-Kamiokande	$\nu_\mu - \nu_e$



Neutrino-Ruhemasse & $\beta\beta$ -Zerfall

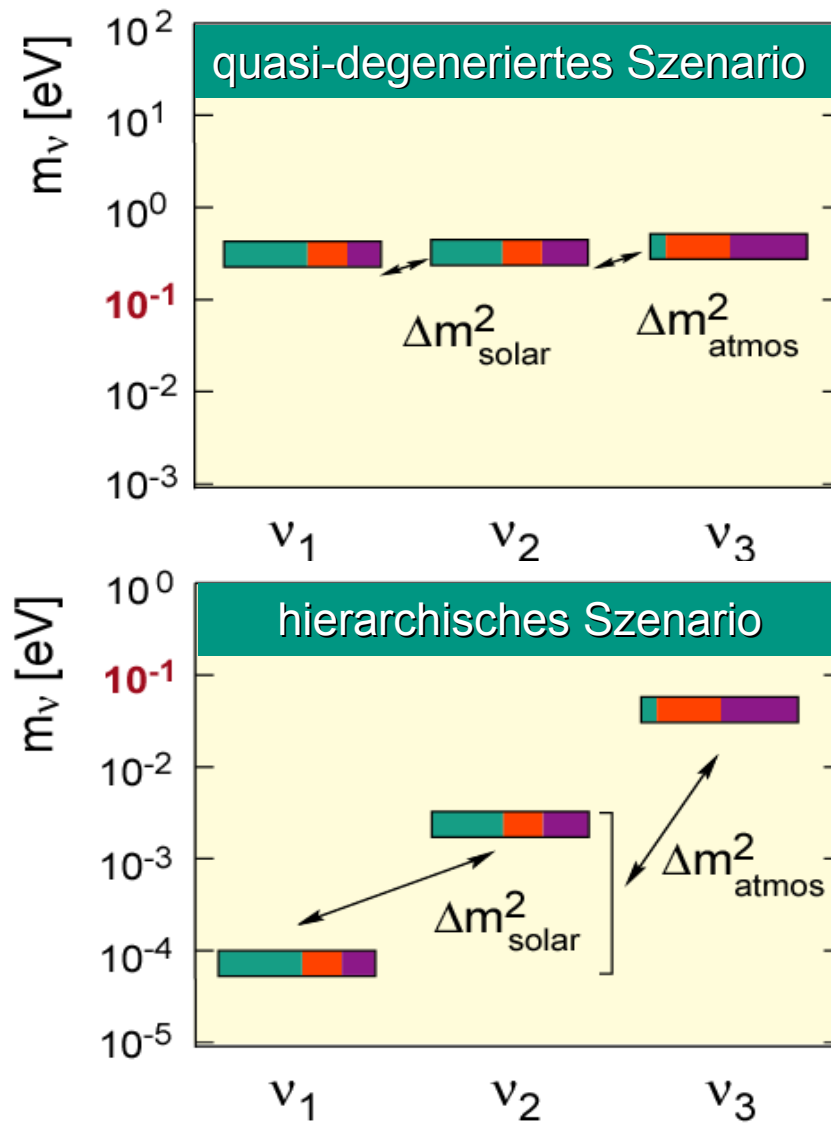
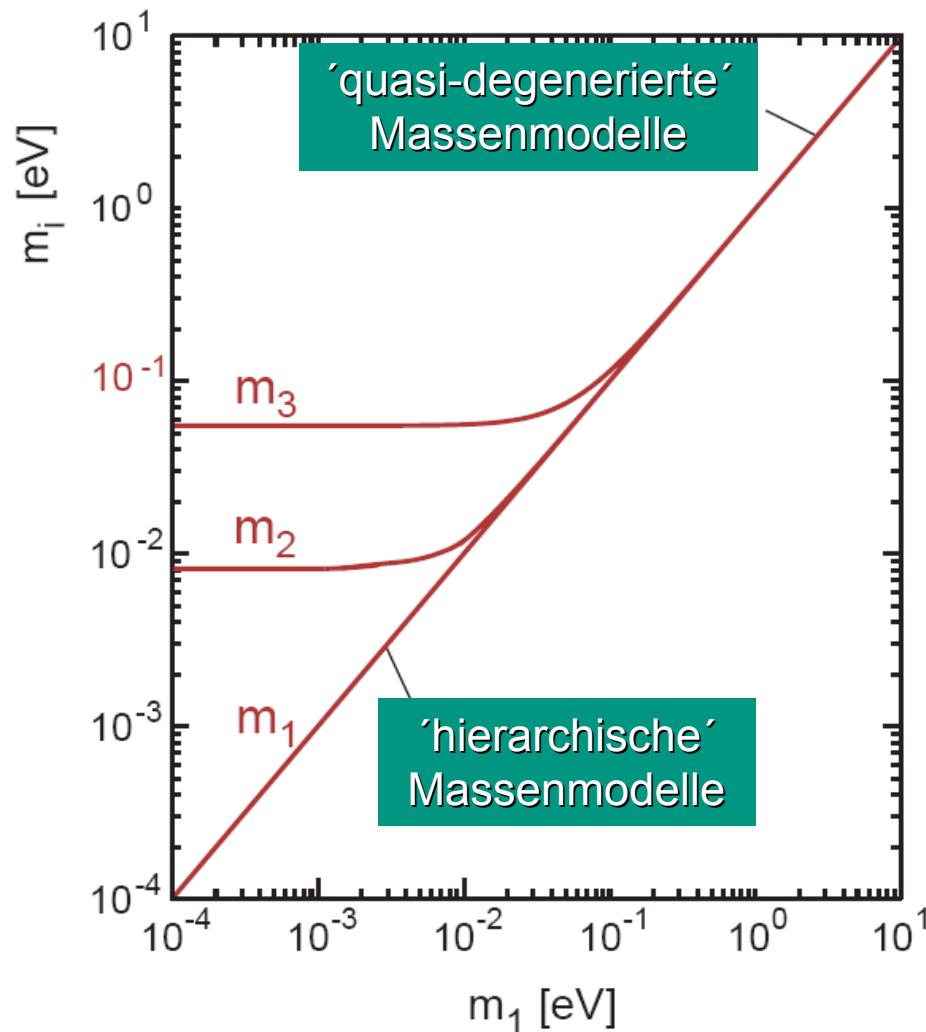
■ ν -Oszillationen (solare, atmosphärische, LBL ν 's):

- Neutrinos sind massebehaftet!
- Mischungswinkel θ_{ij}
- Differenz der Massenquadrate Δm^2_{ij}
- **Keine Absolutskala der ν -Massen!**

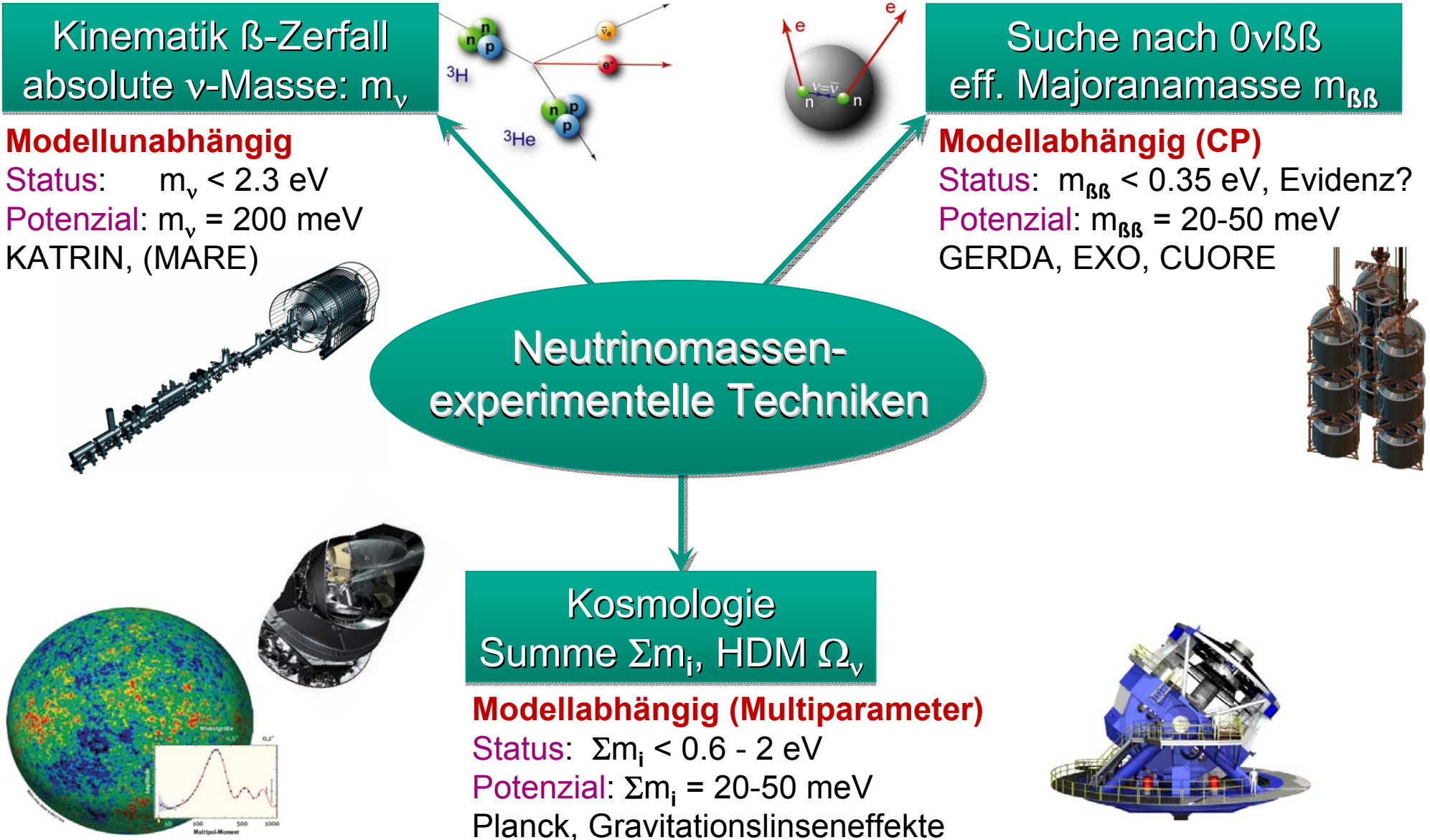


Neutrinomassen in der Teilchenphysik

- **ν -Massen**: wie groß ist m_1 ?



c) Neutrinomasse – experimentelle Methoden

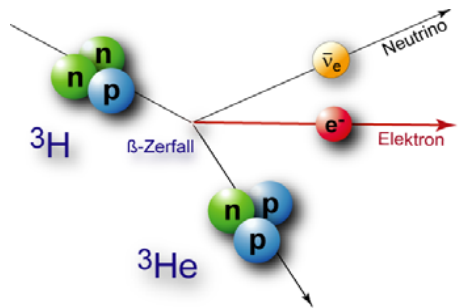
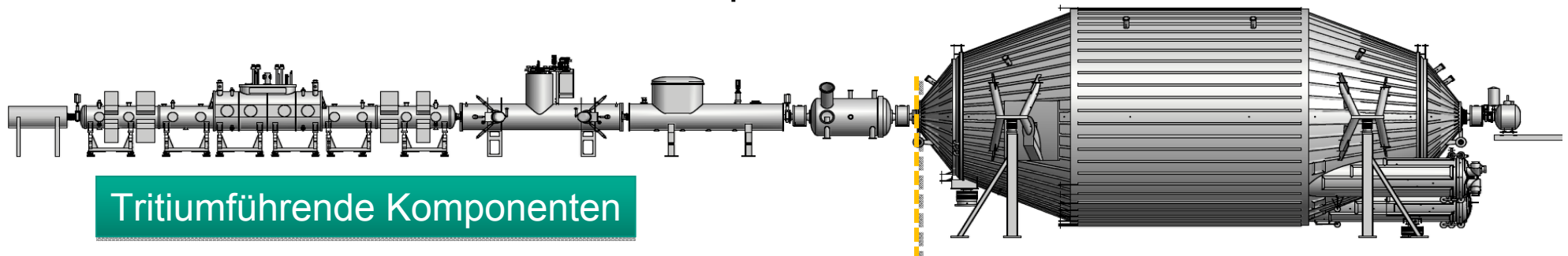


KATRIN Experiment - Überblick

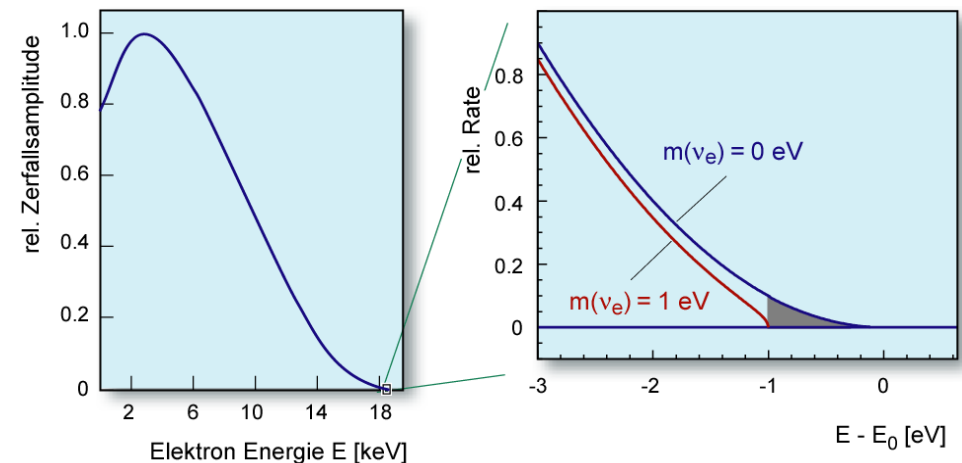


■ Ultrapräzise β -Spektroskopie von T_2 :

- hochintensive molekulare Tritiumquelle mit $\sim 10^{11}$ Bq
- hochauflösende elektrostatische Spektrometer mit $\Delta E = 0.93$ eV



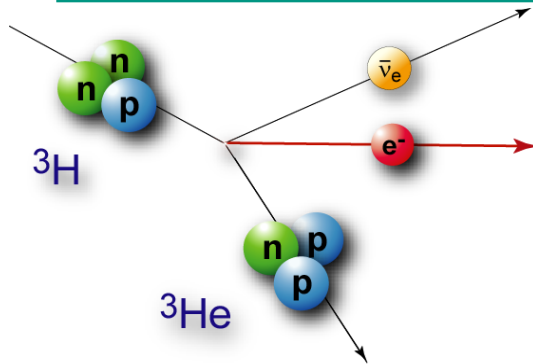
Sensitivität (90% CL)
 $m(\nu) < 200$ meV



β -Zerfall – Energiespektrum

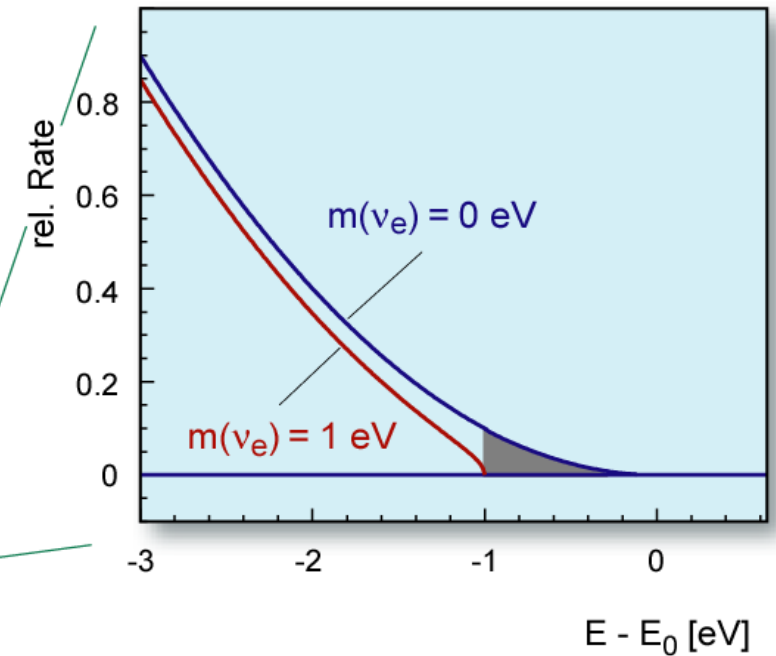
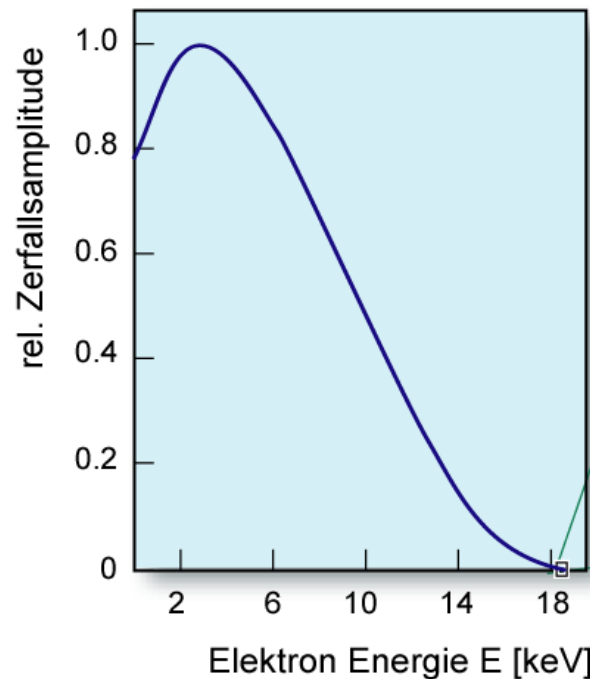
- β -Zerfallskinetik am Endpunkt E_0 : modellunabhängige Messung von $m(\nu_e)$
- basiert nur auf **kinematischen Größen & Energieerhaltung**

$$\frac{d\Gamma_i}{dE} = C \cdot p \cdot (E + m_e) \cdot (E_0 - E) \cdot \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_i^2} \cdot F(E, Z) \cdot \theta(E_0 - E - m_i)$$



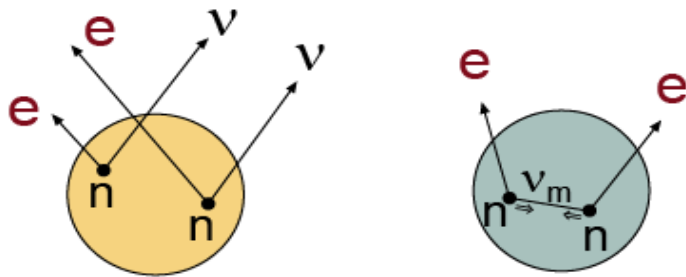
^3H : über-erlaubt

E_0	18.6 keV
$t_{1/2}$	12.3 y



Suche nach dem $0\nu\beta\beta$

- **Neutrino-behafteter Doppelbetazerfall ($2\nu\beta\beta$):** Prozess der schwachen Wechselwirkung in 2. Ordnung $\rightarrow$ extrem geringe Reaktionsrate & lange Halbwertszeiten $T_{1/2} \sim 10^{19} - 10^{21}$ Jahre, E_0 teilt sich auf 4 Leptonen auf



$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + e_1^- + e_2^- + \bar{\nu}_{e,1} + \bar{\nu}_{e,2}$$

bisher beobachtet in 9 Isotopen !

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + e_1^- + e_2^-$$

Erste Beschreibung
 $2\nu\beta\beta$:
M. Goeppert-Mayer (1935)



Erste Beschreibung
 $0\nu\beta\beta$: E. Majorana,
G. Racah (1937)

