

Moderne Experimentalphysik II

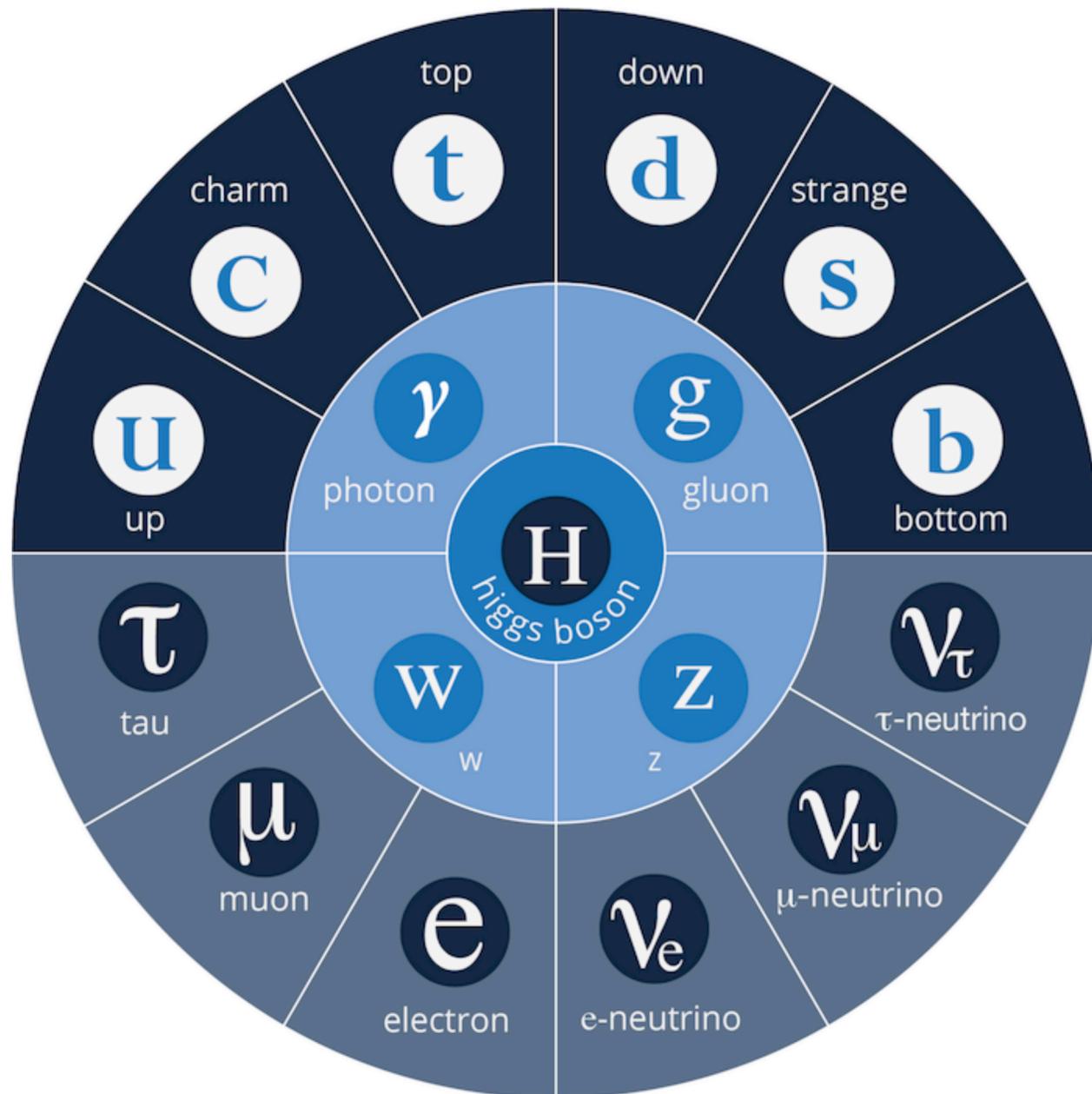
Teilchenphysik - Vorlesung 14

Prof. Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu), Dr. Roger Wolf (roger.wolf@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



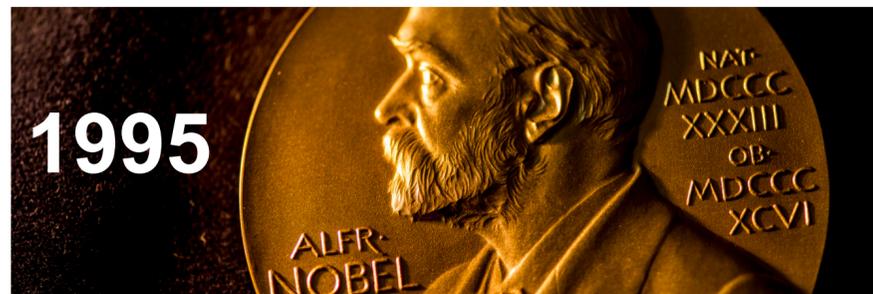
■ 6. Neutrino-physik

- 6.1 Nachweis von Neutrinos
- 6.2 Neutrino Oszillation
- 6.3 Neutrino Massenmessung



Projekt Poltergeist: erster Nachweis des Neutrinos

- **Fred Reines gelingt der lange ersehnte experimenteller Durchbruch**
 - Projekt Poltergeist: der erste definitive Nachweis durch Koinzidenztechnik

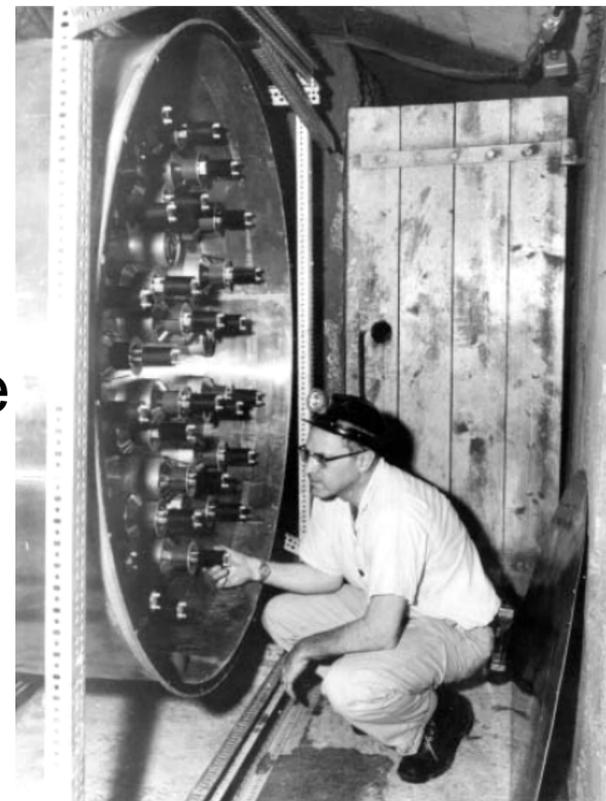


"for the detection of the **neutrino**"



Fred Reines
1918-1998

Herr Auge

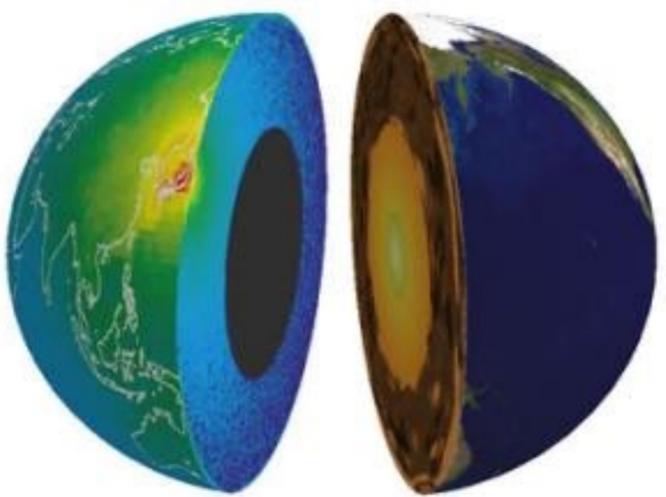
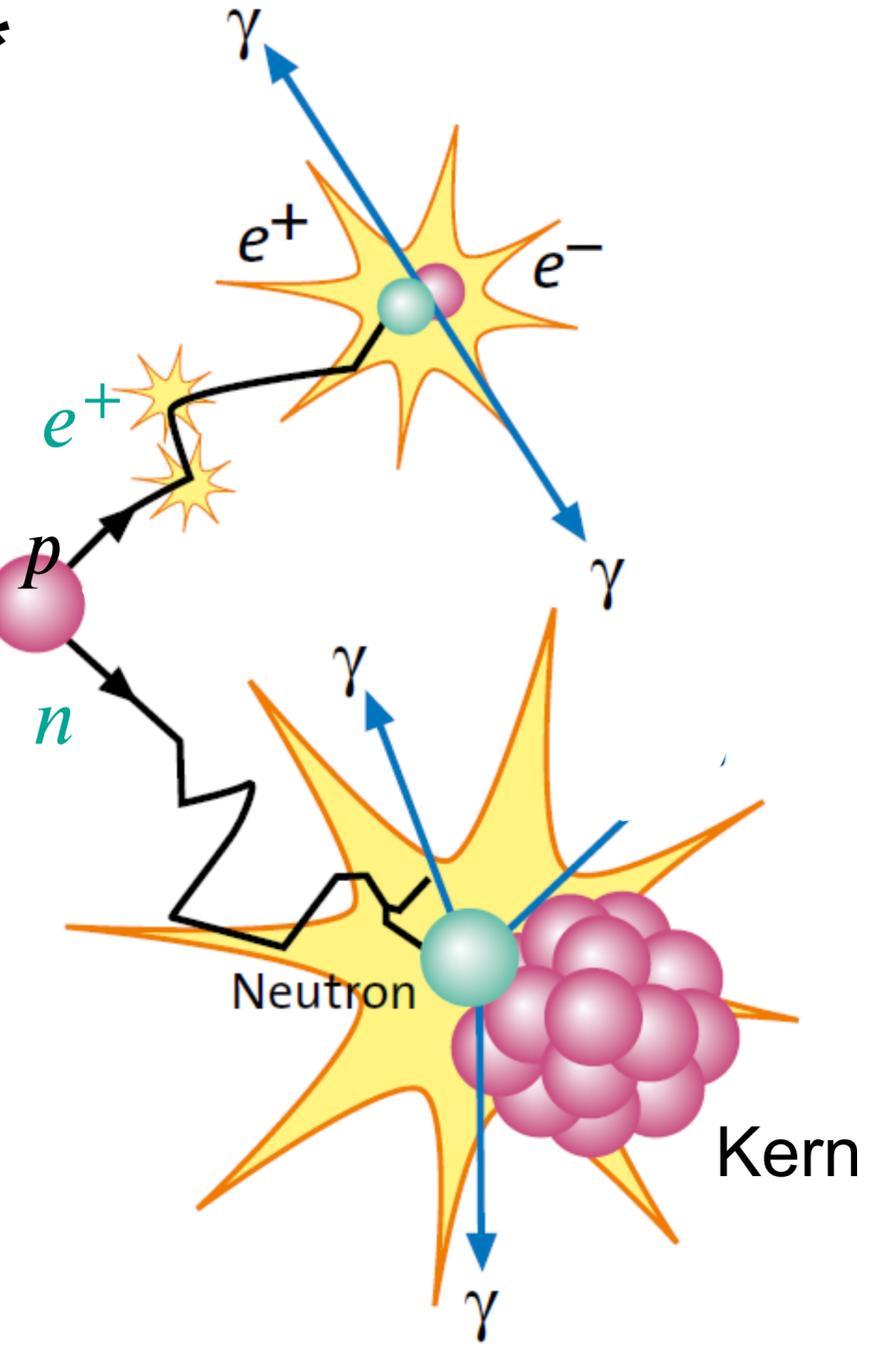


Hanford 1954: erster Neutrinodetektor 'Herr Auge'
300 t Flüssigszintillator mit 90 PMTs!



■ die 'klassische' inverse β -Zerfallsreaktion*

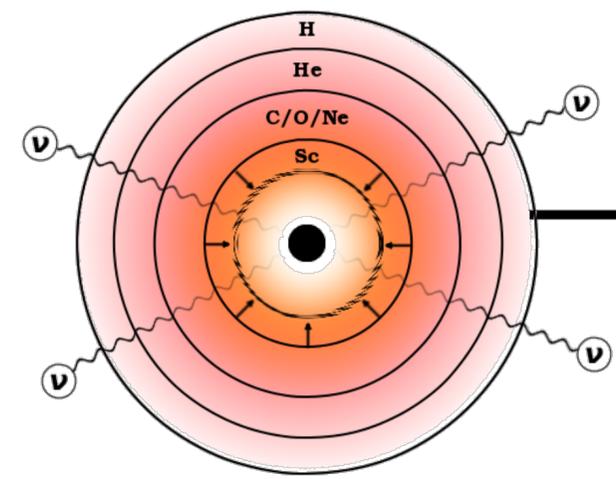
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad \sigma \sim 10^{-41} \text{ cm}^2 \text{ im MeV-Bereich}$$



Geo- ν 's



Reaktor- ν 's

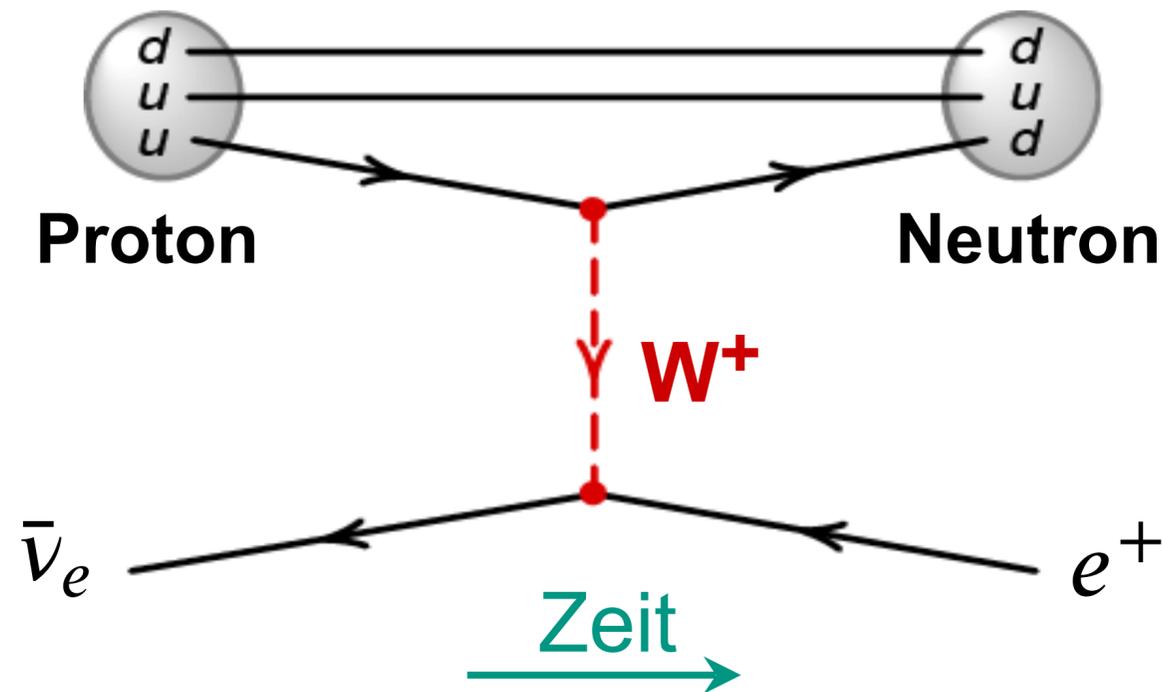
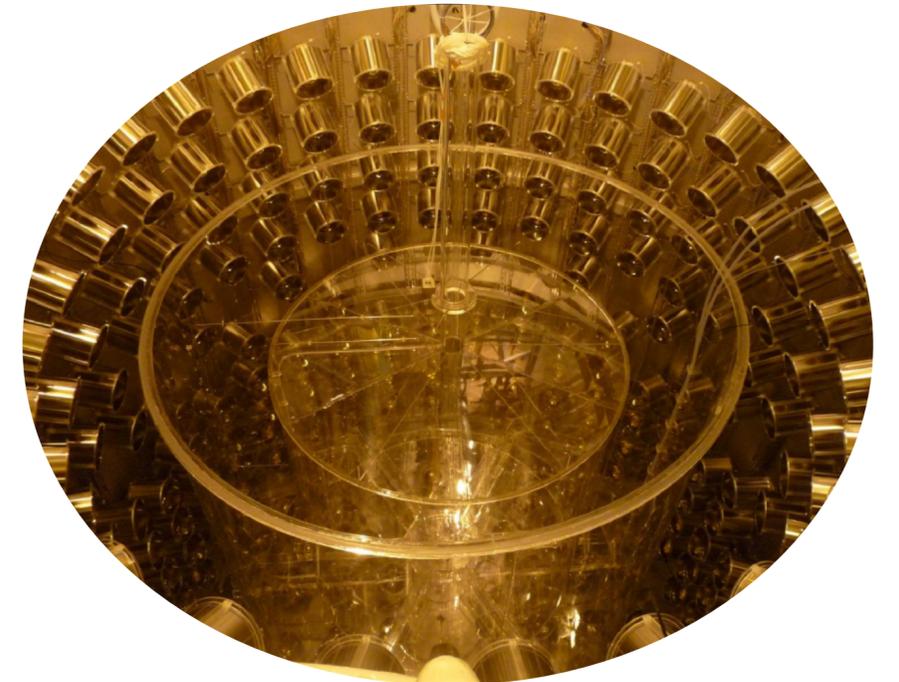


Supernova- ν 's

■ die 'klassische' inverse β -Zerfallsreaktion

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad \sigma \sim 10^{-41} \text{ cm}^2 \text{ im MeV-Bereich}$$

CH₂



Targets mit *freien* Protonen:

H₂O



Super-Kamiokande

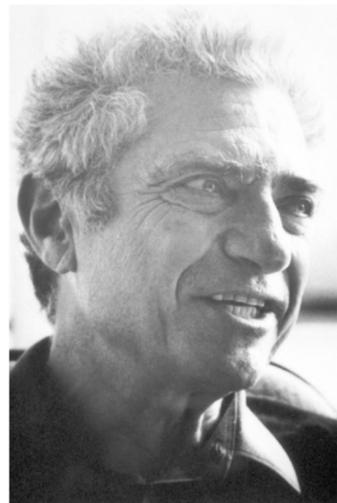
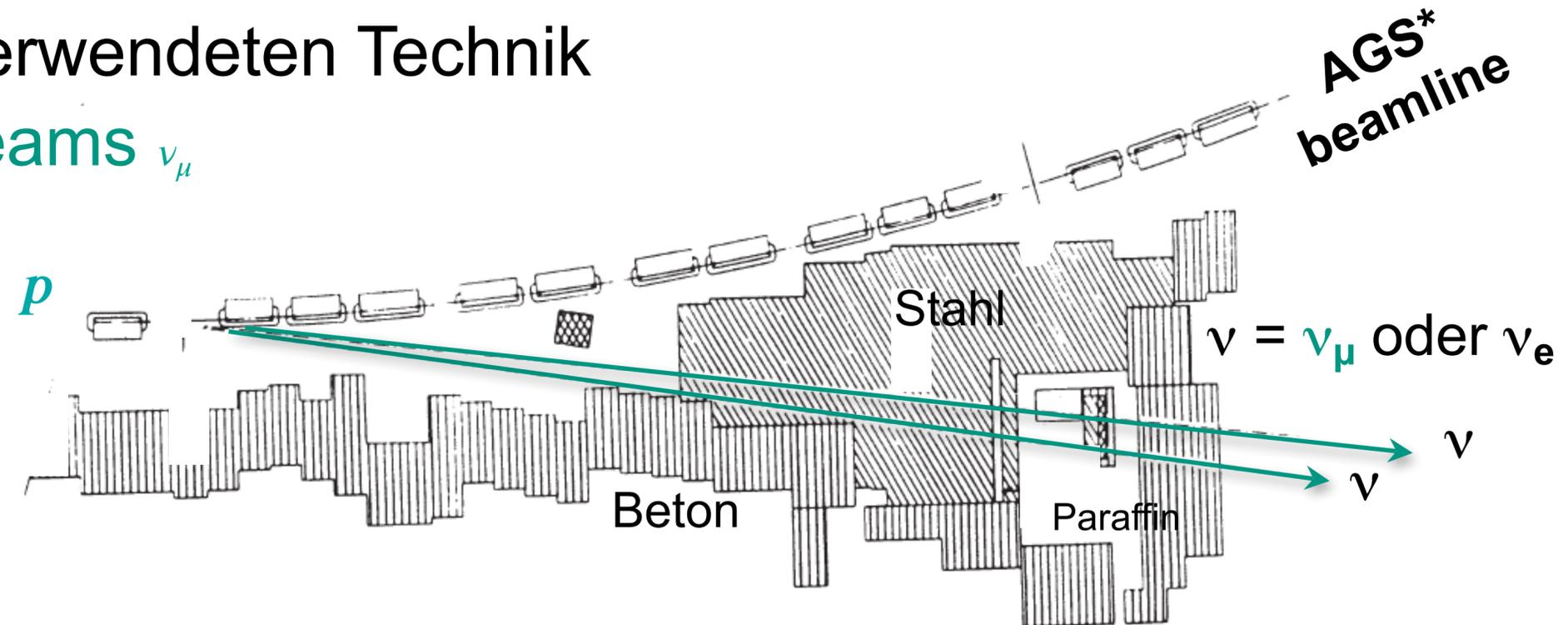
Nachweis der 2. Neutrino-Generation ν_μ am AGS

■ Lederman, Schwartz & Steinberger auf der Spur des Flavourzustands ν_μ

- Entwicklung der noch heute verwendeten Technik zur Erzeugung von **Neutrino beams** ν_μ

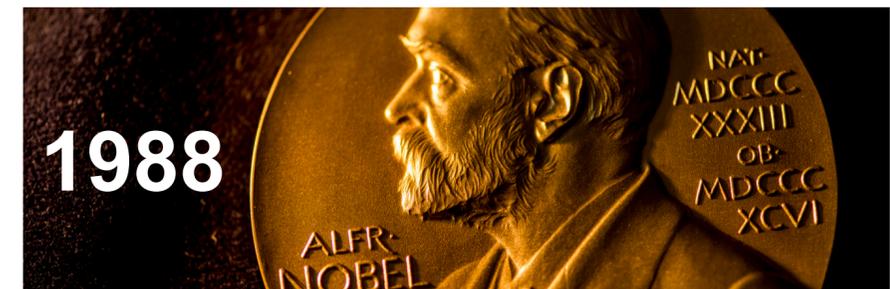
- p - Strahl trifft auf Target:
Zerfall $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

- Beobachtung: im ν -Strahl werden nur μ^- erzeugt!



Leon Lederman,
Mel Schwartz, Jack Steinberger

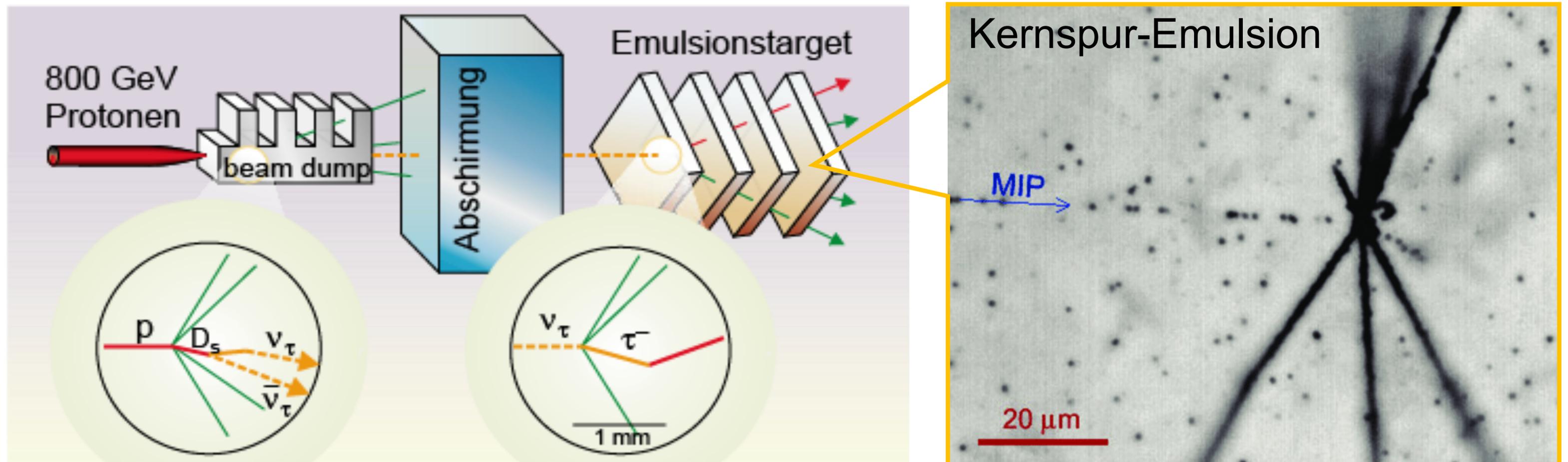
*"for the **neutrino beam** and the demonstration of the doublet structure of the leptons through the **discovery of the muon neutrino**"*



Nachweis der 3. Neutrino-Generation am Fermilab

- **Direkter Nachweis des ν_τ durch das DONUT* Experiment**

- **Fermilab:** hochenergetischer (50 GeV) Strahl von ν_τ aus Zerfällen von Mesonen mit Charm c - Quarks (D_S)



- **Direkter Nachweis des ν_τ durch das DONUT* Experiment**

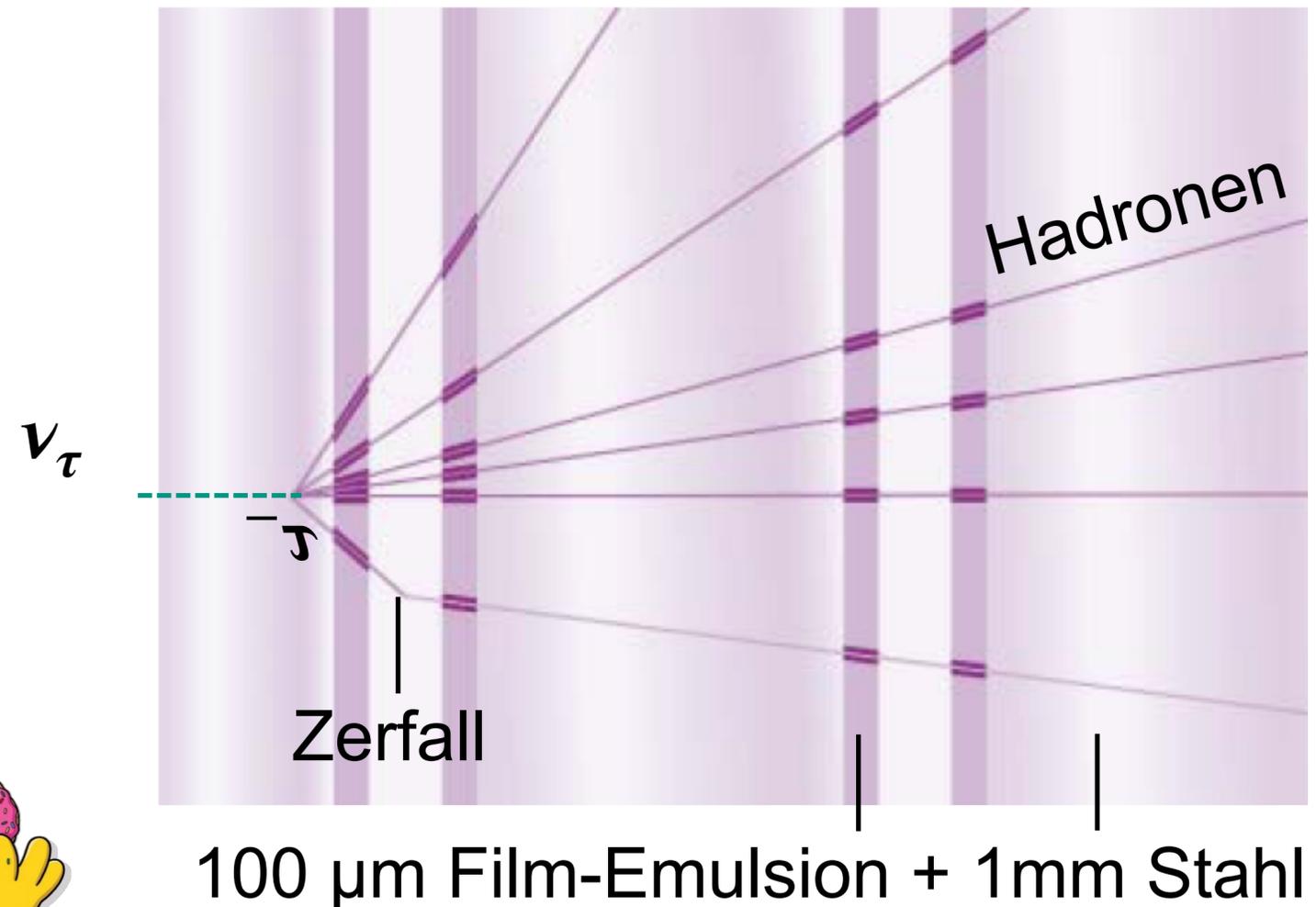
- Nachweis der ν_τ in 'Sandwich'-Struktur aus Kernemulsion / Edelstahl

- wichtig: weiteres Detektor-System aus Szintillatoren & Spurdetektoren zum Nachweis der Spuren geladener Teilchen

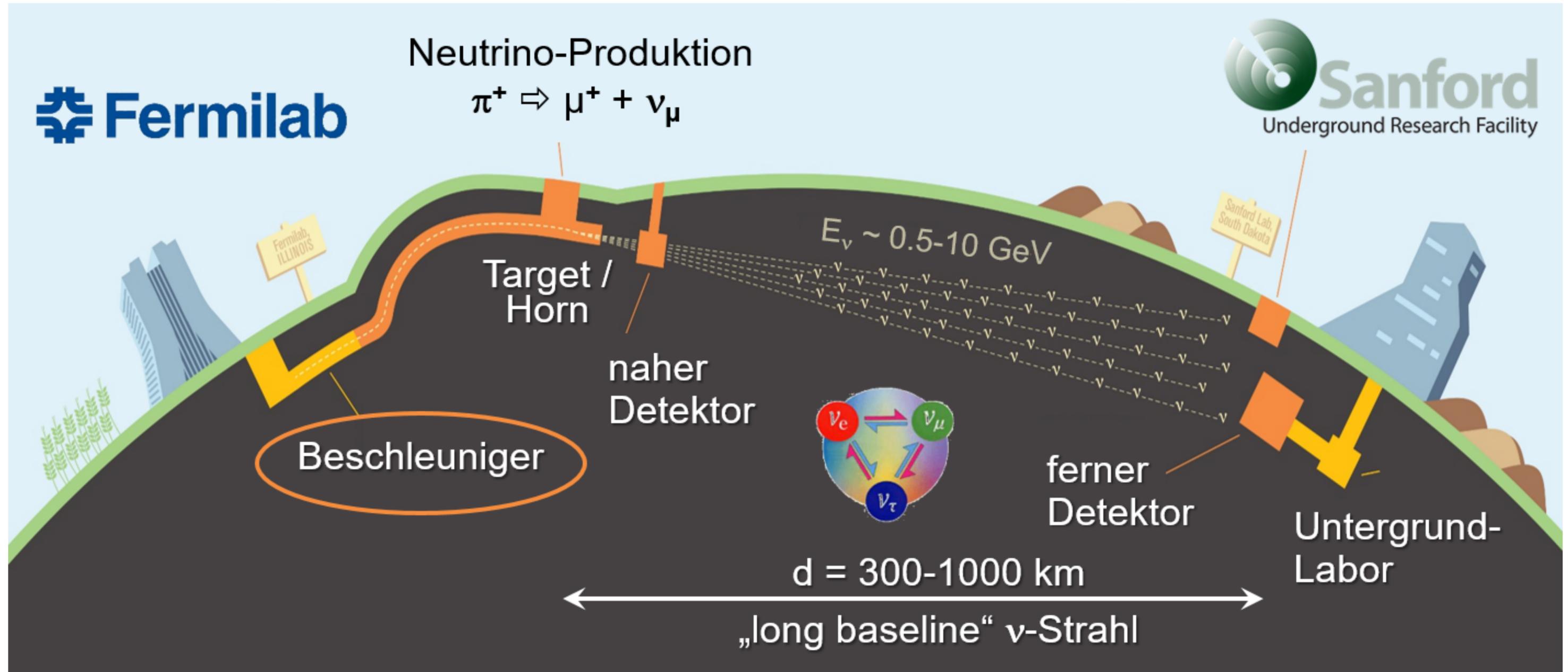
- Spursystem identifiziert 'interessante' Ereignisse \rightarrow Entwicklung der Emulsion

- 1997: **4 Signalereignisse aus ν_τ** mit

$$N_{bg} = (0,35 \pm 0,05), \text{ d.h. } 3,5 \sigma$$

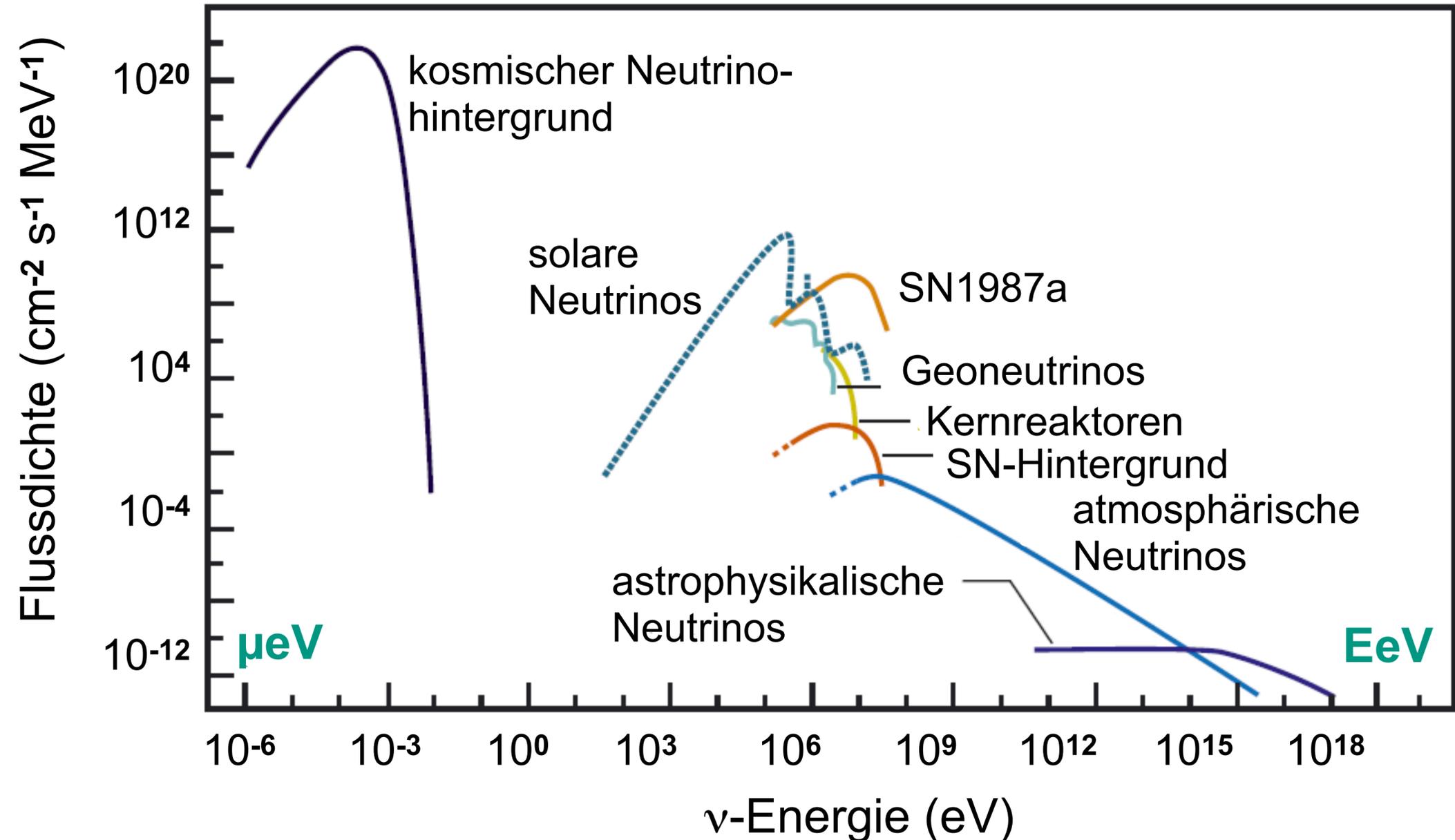


- eine wichtige Neutrino-Quelle zum Studium ihrer Eigenschaften



- ein breites Energiespektrum von μeV bis zu EeV

- ν 's als **Messengers**: Information aus den „verborgenen“ Regionen im Kosmos
- ν 's als **Messengers**: Information über ihre „verborgenen“ inneren Eigenschaften –
⇒ neue Physik jenseits des Standardmodells



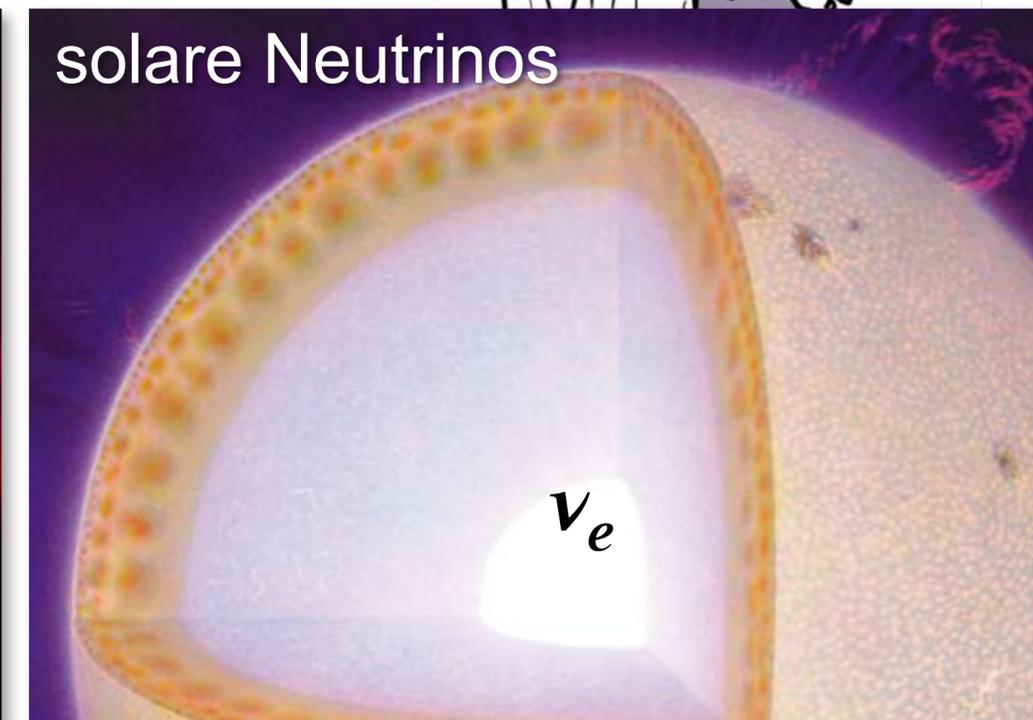
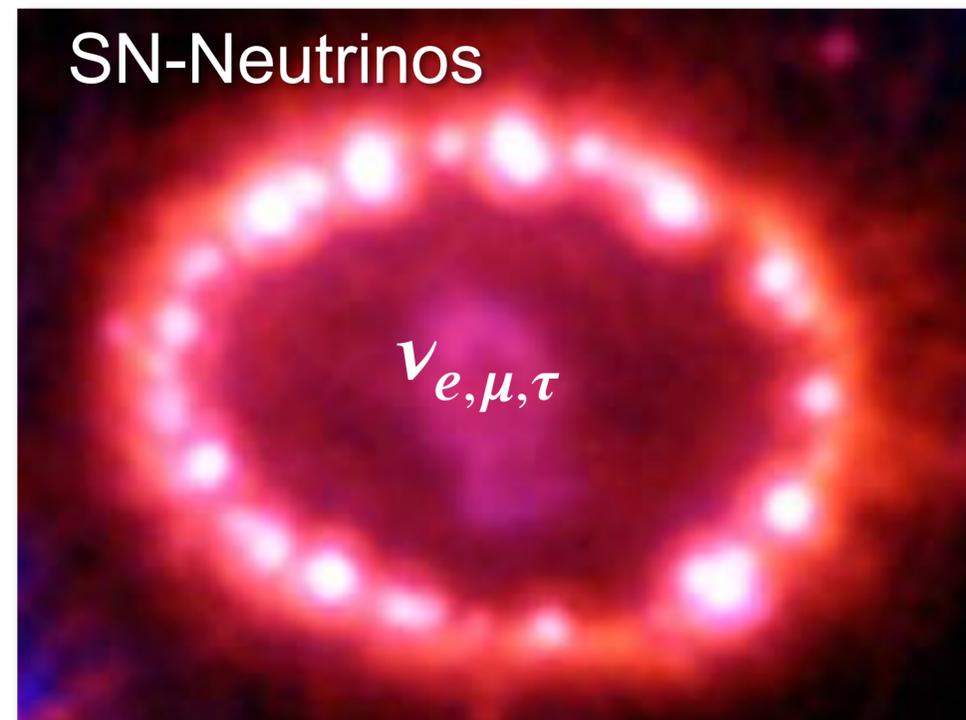
Neutrinos aus dem Kosmos

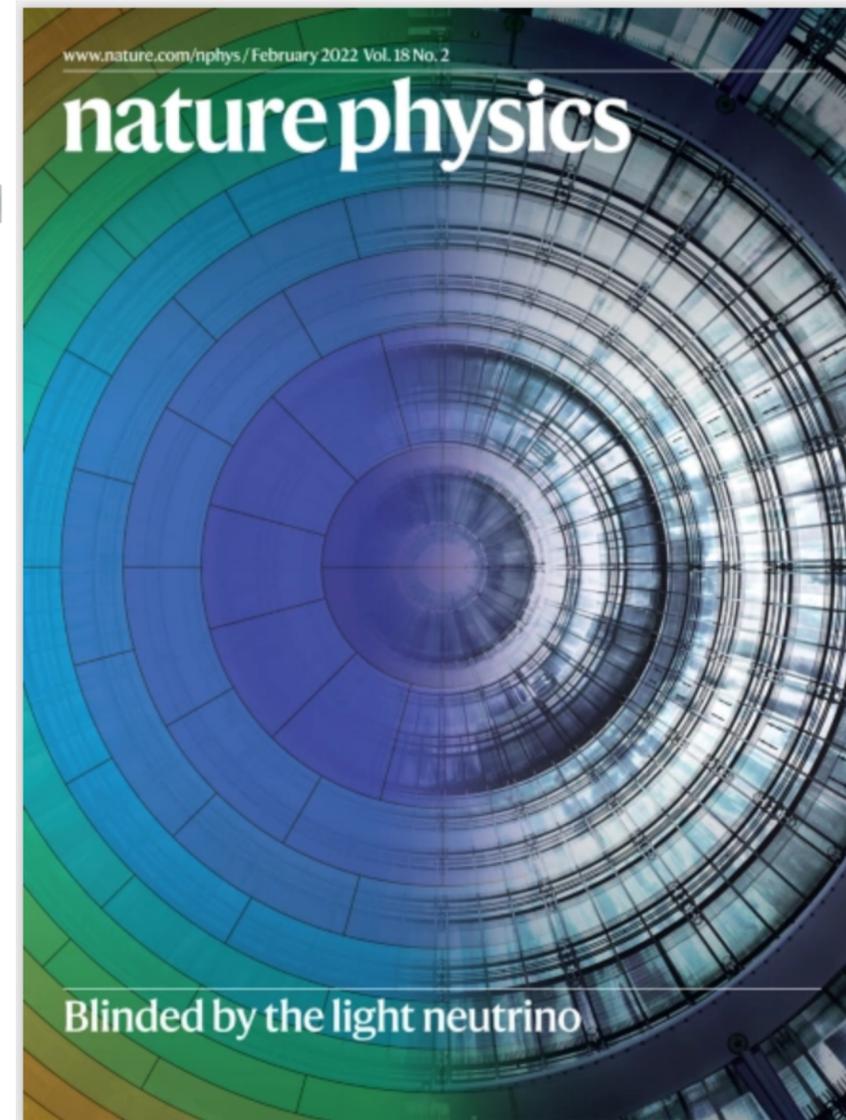
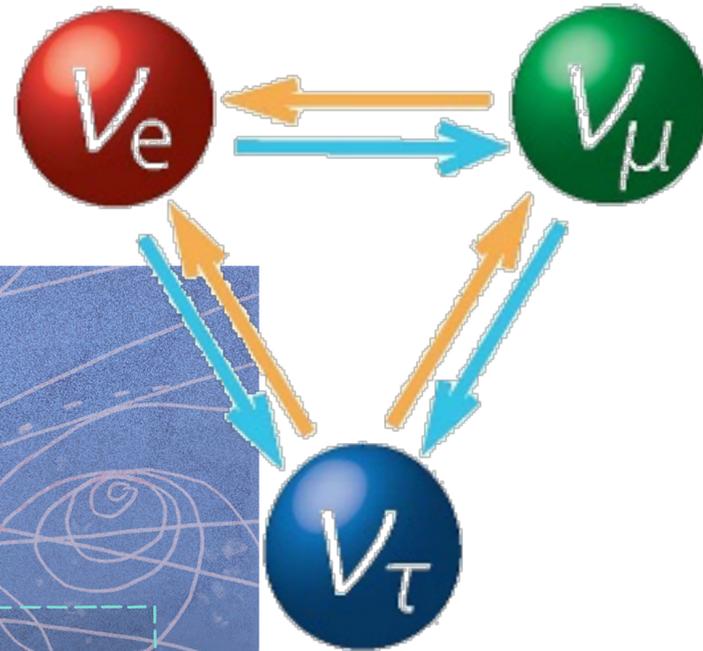
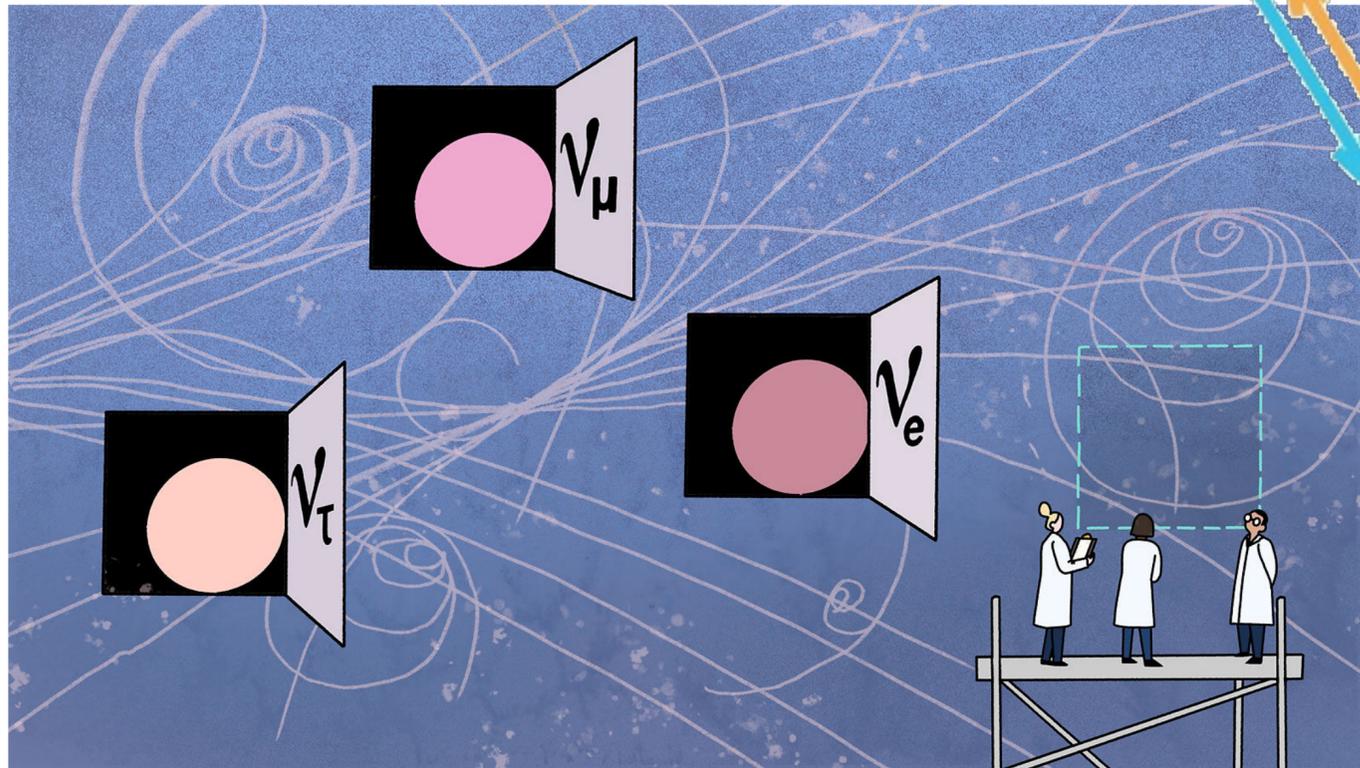


- ein breites Energiespektrum von μeV bis zu EeV

- ν 's als **Messengers**:
Information aus
den „verborgenen“
Regionen im Kosmos

- ν 's als **Messengers**:
Information über
ihre „verborgenen“
inneren Eigenschaften –
⇒ neue Physik jenseits
des Standardmodells





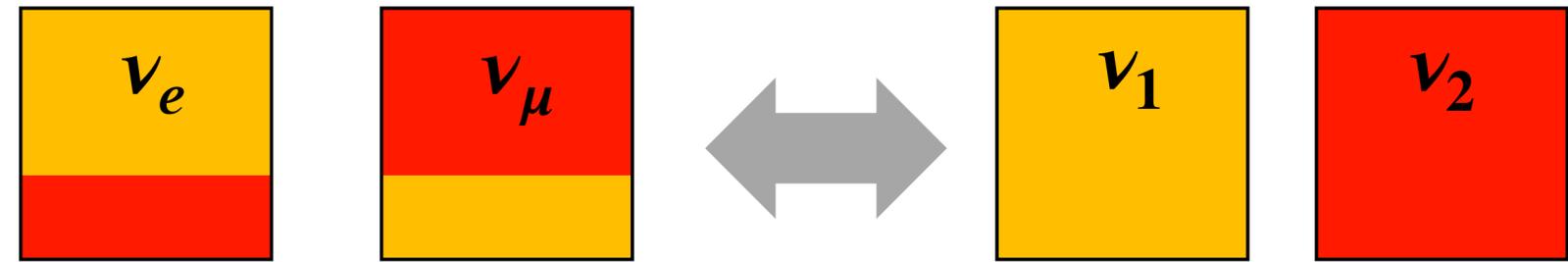
KAPITEL 6.2 : NEUTRINO OSZILLATIONEN

Neutrino-Oszillation: Grundlagen

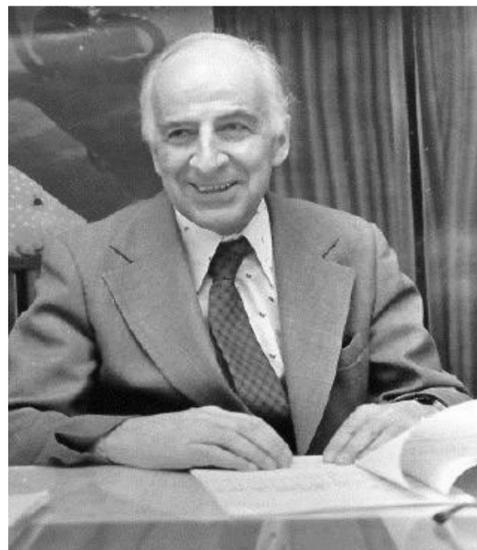
- **Masseneigenzustände** $(\nu_1, \nu_2) \neq$ **Flavour-Eigenzustände** (ν_e, ν_μ)

2-Flavour-Mischung:

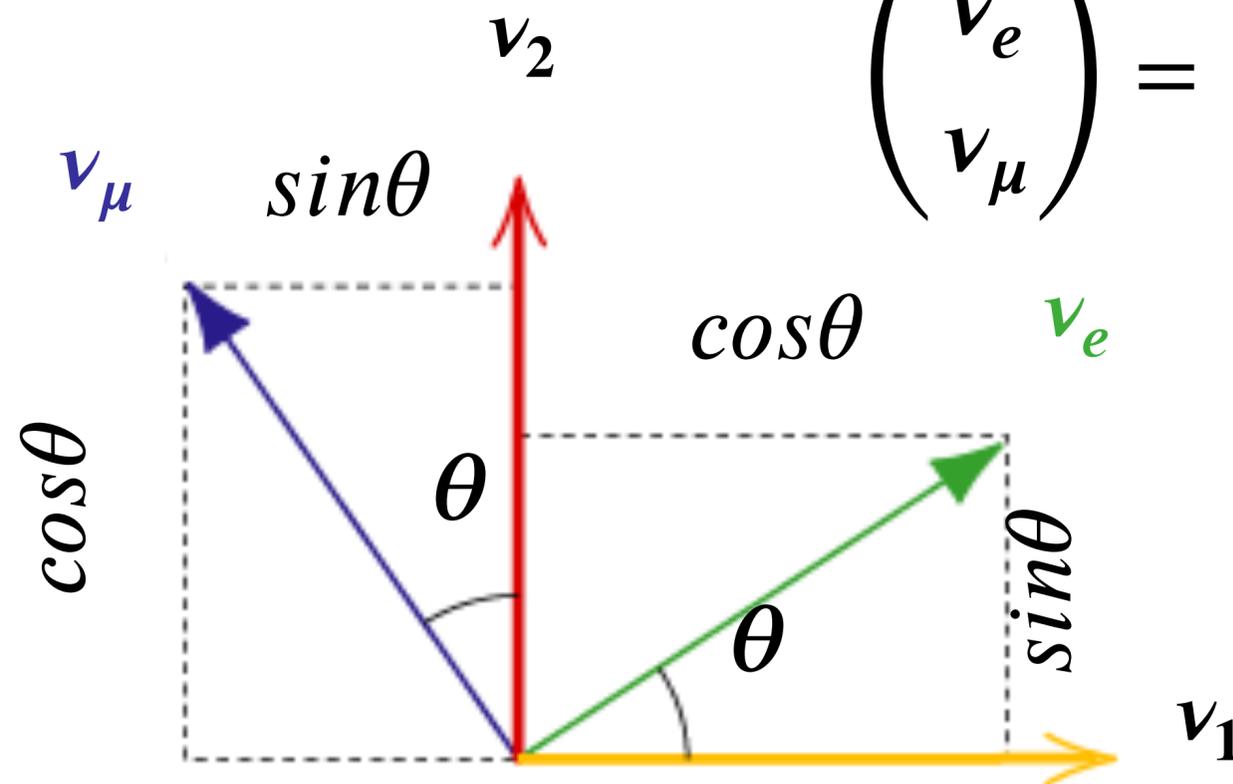
enge Analogie zur CKM **Mischung**
der linkshändigen Quarks



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

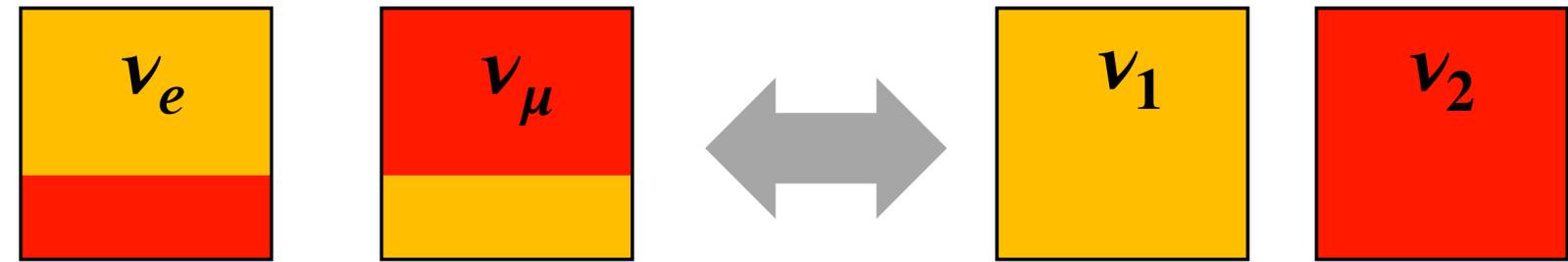


Bruno Pontecorvo

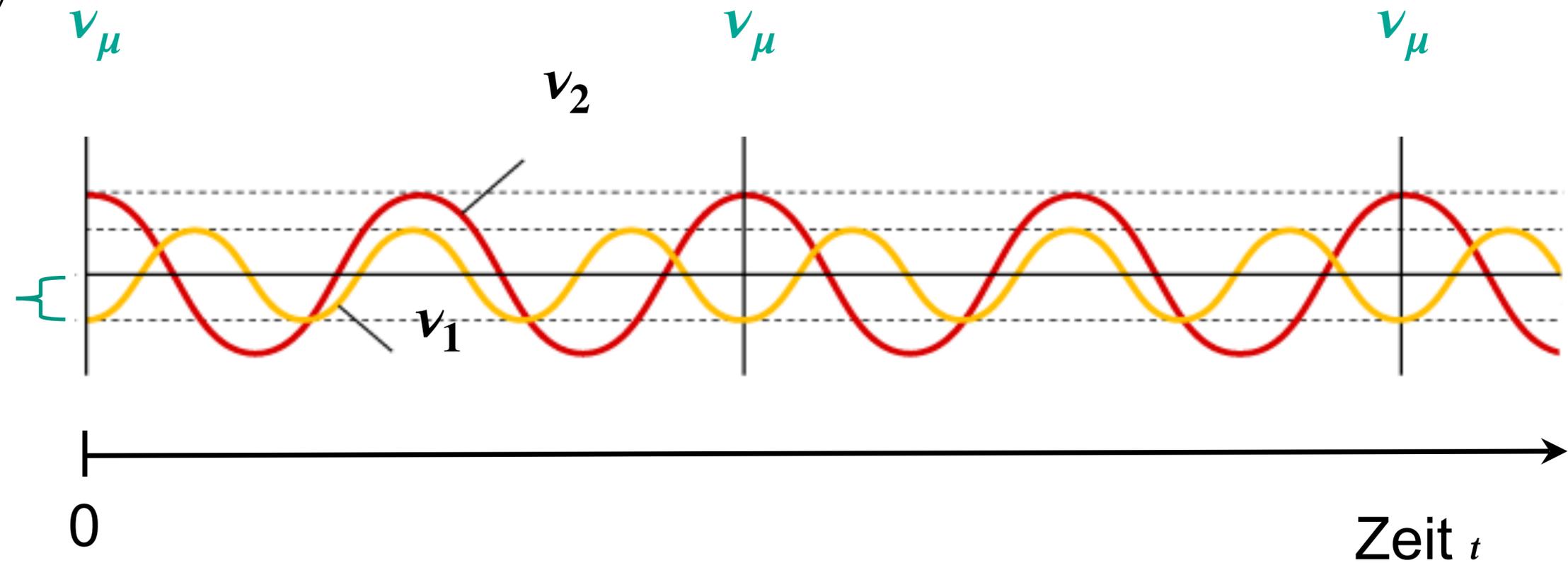


- **Masseneigenzustände** $(\nu_1, \nu_2) \neq$ **Flavour-Eigenzustände** (ν_e, ν_μ)

2-Flavour-Mischung bei Propagation:



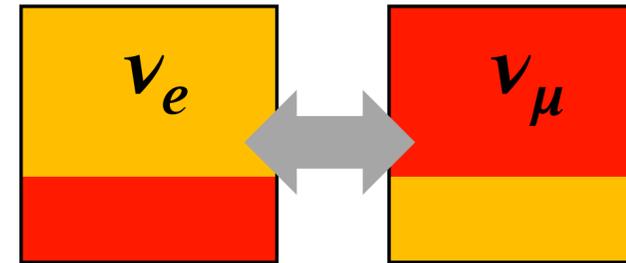
Überlagerung von (ν_1, ν_2) :
Oszillation zwischen (ν_e, ν_μ)



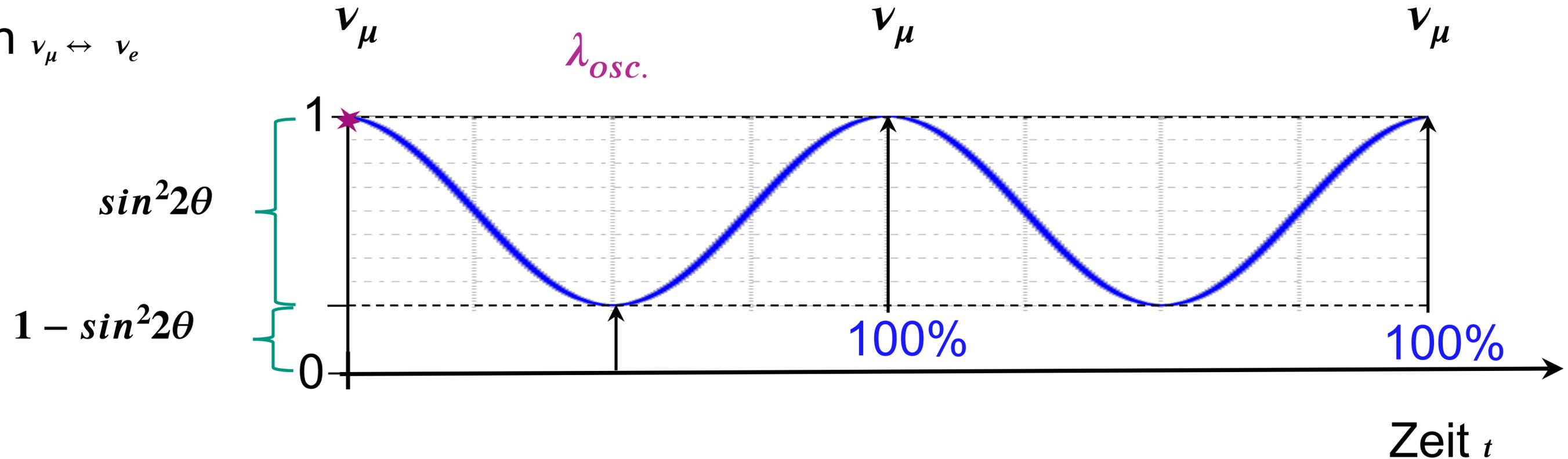
$$\nu_\mu = \nu_2 \cdot \cos\theta - \nu_1 \cdot \sin\theta$$

- **Masseneigenzustände** $(\nu_1, \nu_2) \neq$ **Flavour-Eigenzustände** (ν_e, ν_μ)

2-Flavour-Mischung bei Propagation:



Periodische Variation der ν_μ Intensität, da Flavour-Oszillationen $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$



- **Masseneigenzustände** $(\nu_1, \nu_2) \neq$ **Flavour-Eigenzustände** (ν_e, ν_μ)

Oszillationswahrscheinlichkeit P :

- Mischungswinkel θ

- Massenparameter $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$
mit den beiden Massen

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

ν_e

ν_e

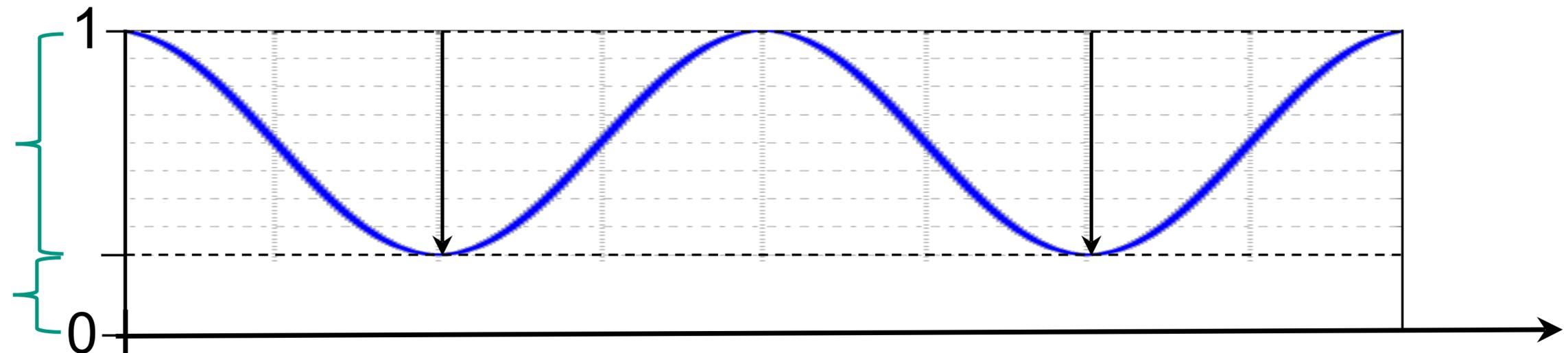
ν -Energie

m_1 von ν_1

m_2 von ν_2

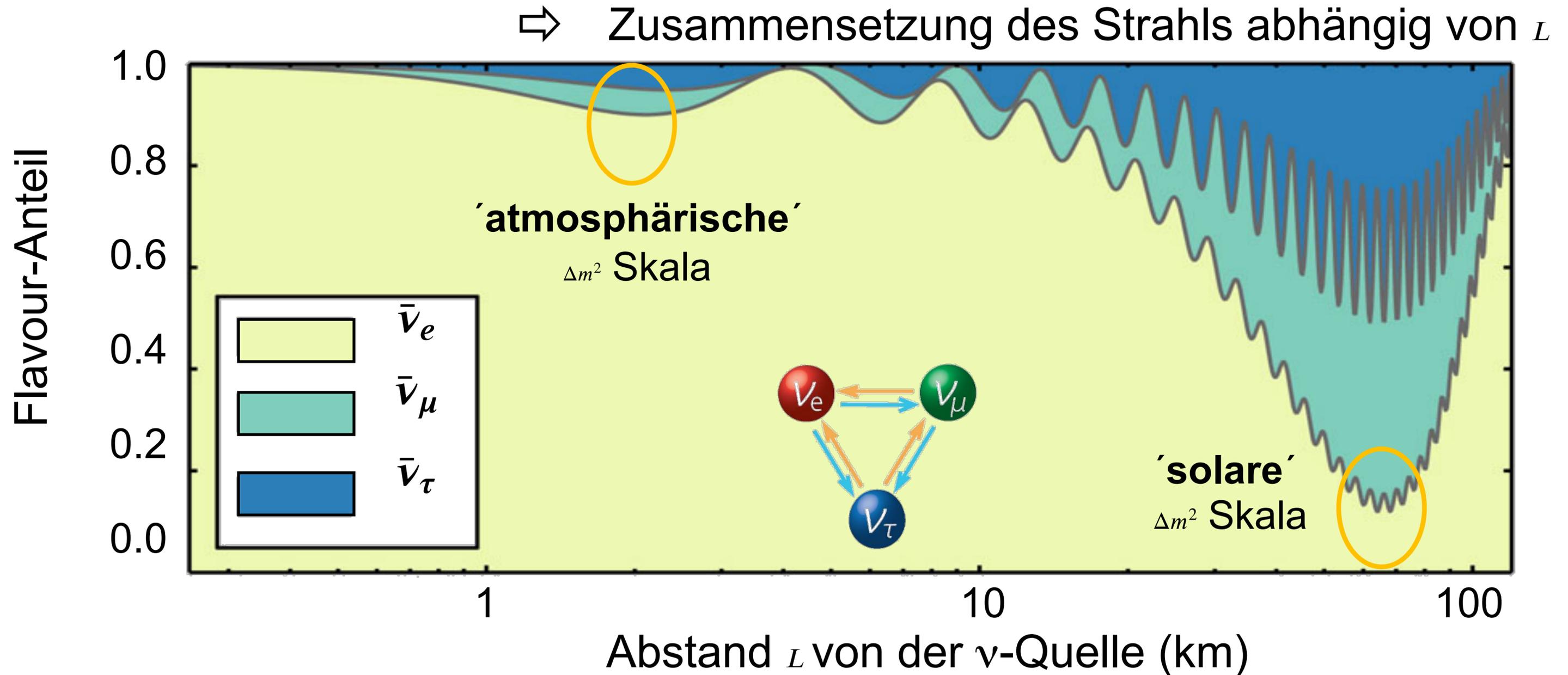
$\sin^2 2\theta$

$1 - \sin^2 2\theta$



Flugweg L_ν

- Entwicklung eines Strahls von $\bar{\nu}_e$ im MeV-Energiebereich



- Matrix 'entkoppelt' wie bei den Quarks in **3 separate Mischungsterme**

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix}}_{\text{Mischung 2. \& 3. } \nu\text{-Generation } \nu_\mu \text{ und } \nu_\tau} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix}}_{\text{Mischung 1. \& 3. } \nu\text{-Generation } \nu_e \text{ und } \nu_\tau} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Mischung 1. \& 2. } \nu\text{-Generation } \nu_e \text{ und } \nu_\mu}$$

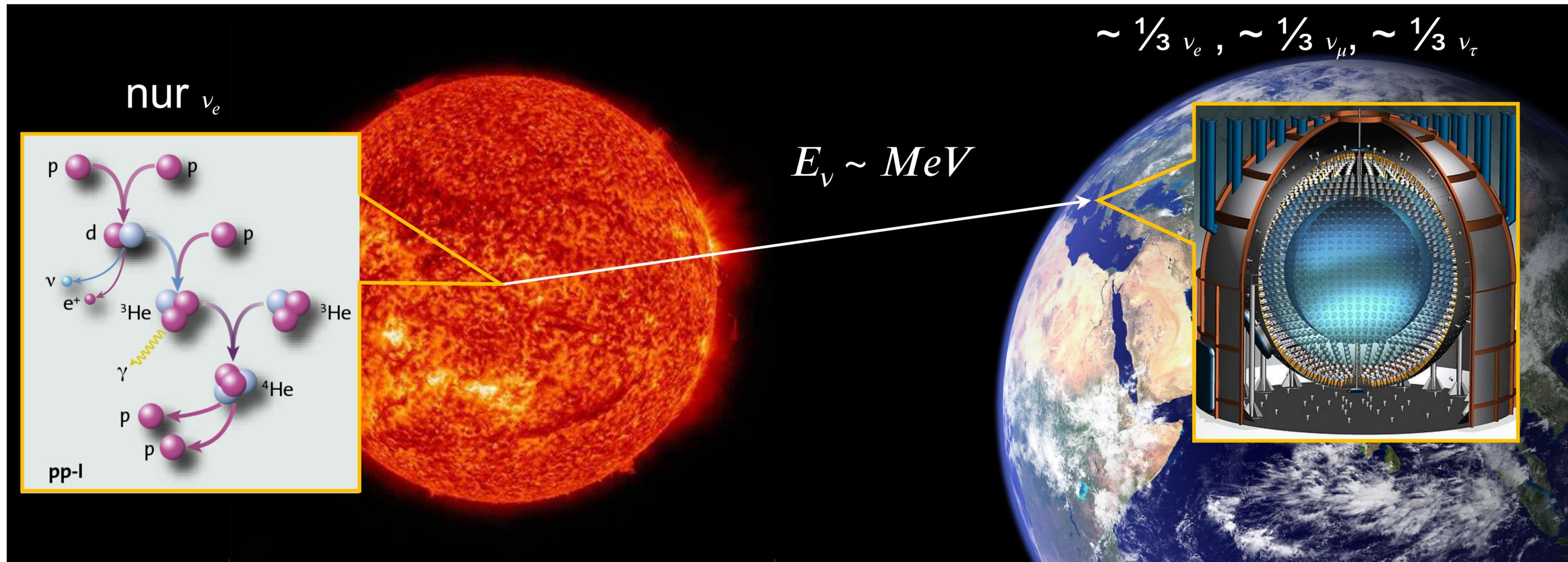
Mischung **2. & 3.**
 ν -Generation
 ν_μ und ν_τ

Mischung **1. & 3.**
 ν -Generation
 ν_e und ν_τ

Mischung **1. & 2.**
 ν -Generation
 ν_e und ν_μ

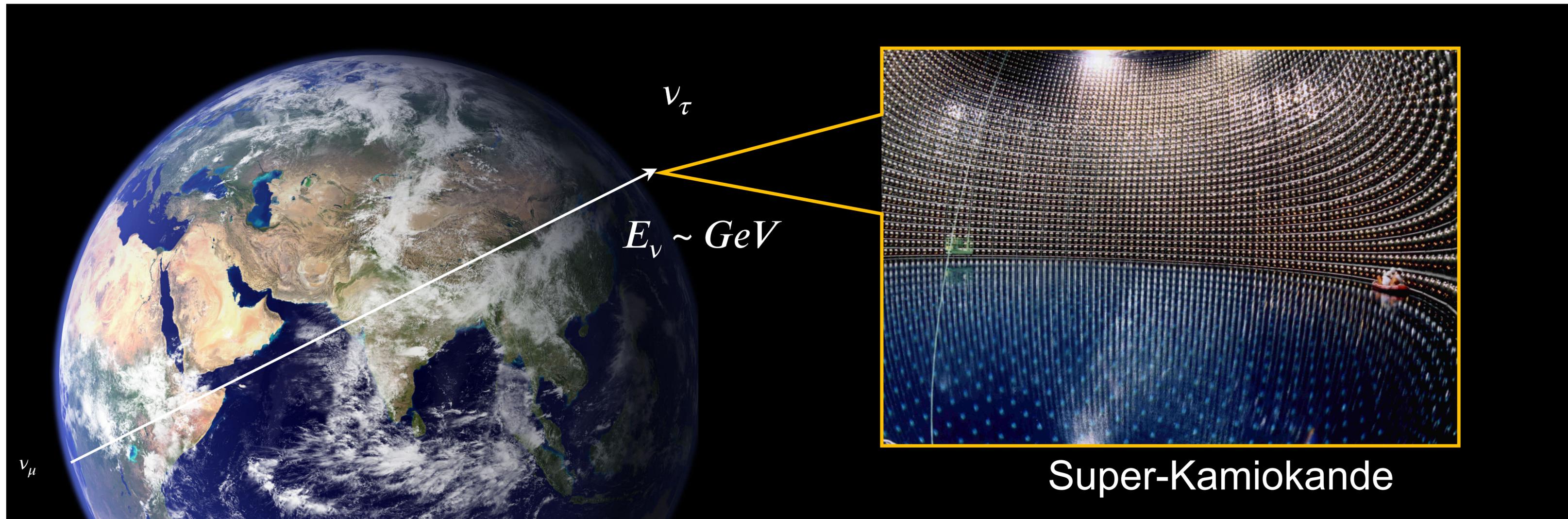
Neutrino-Oszillation: solare & atmosphärische ν 's

- **große Mischungseffekte bei den solaren ν 's***
 - viele Jahrzehnte: 'solares Neutrino-Problem', d.h. deutliches Defizit an ν_e



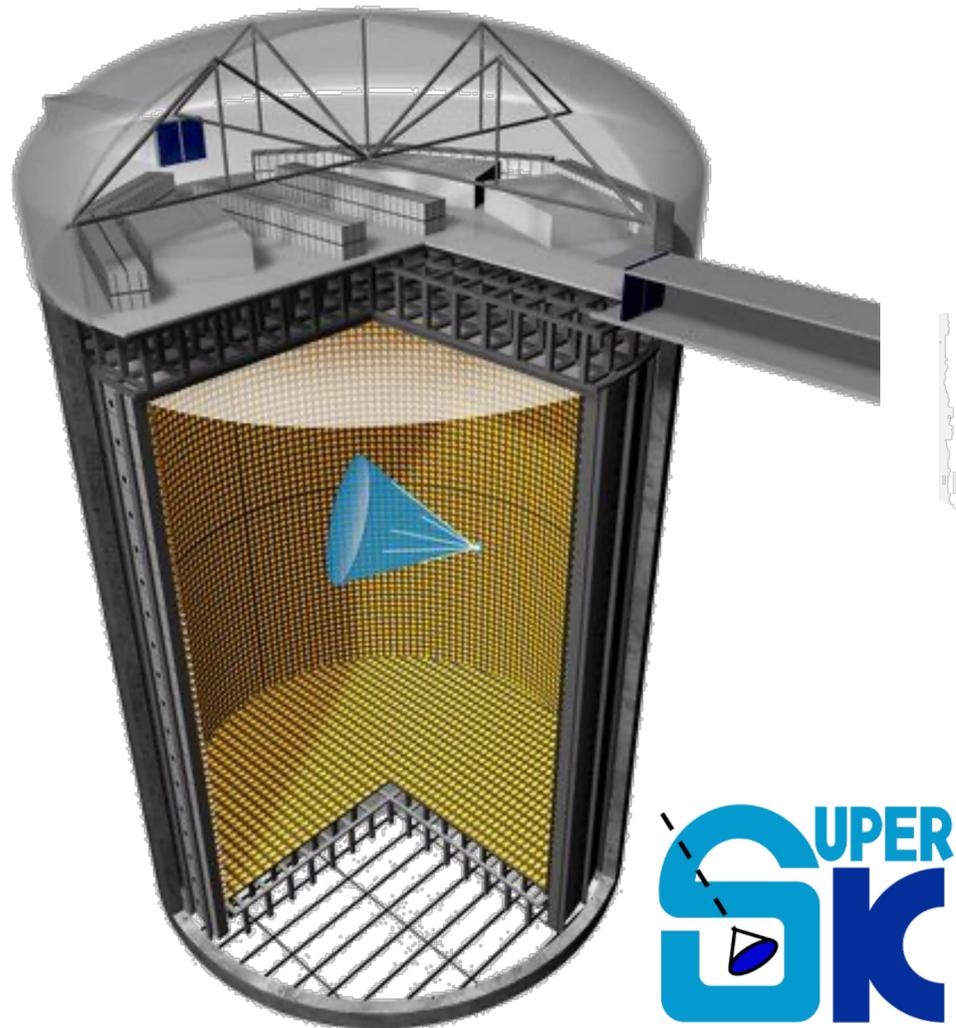
Neutrino-Oszillation: solare & atmosphärische ν 's

- maximale Mischungseffekte bei den atmosphärischen ν 's*
 - viele Jahrzehnte: 'atmosphärisches Neutrino-Problem', d.h. Flavouranomalie

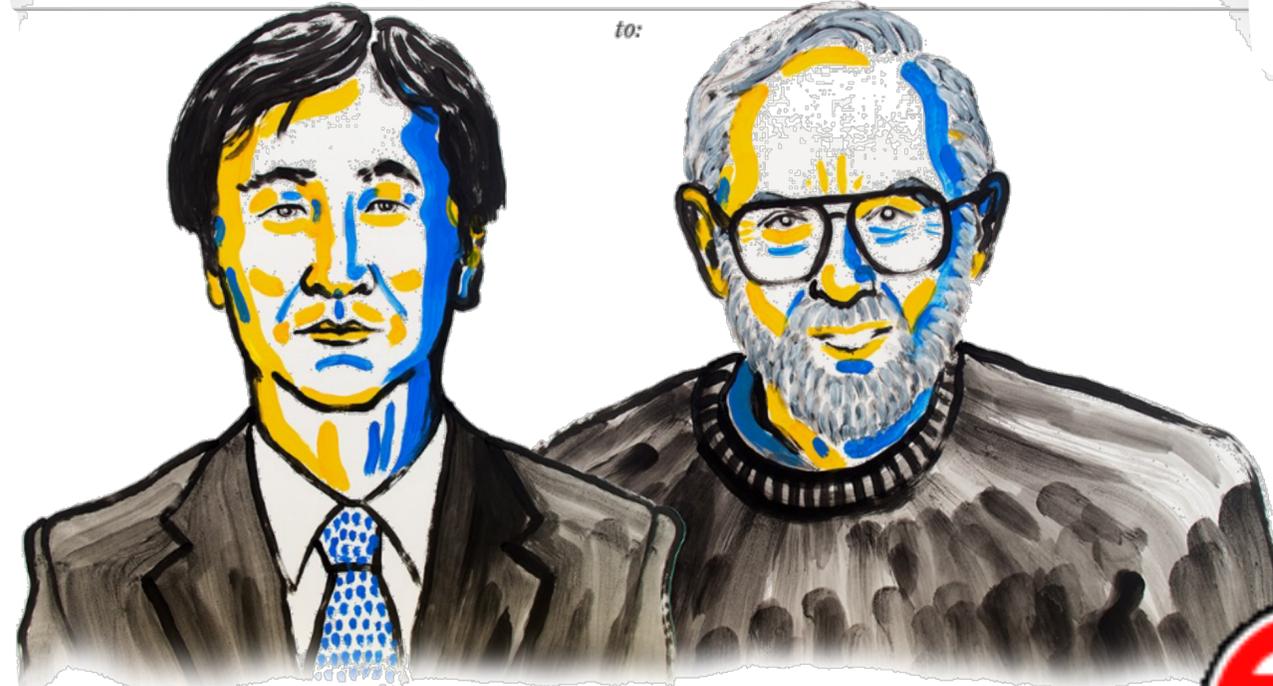


ν -Oszillationen: Nobelpreis 2015

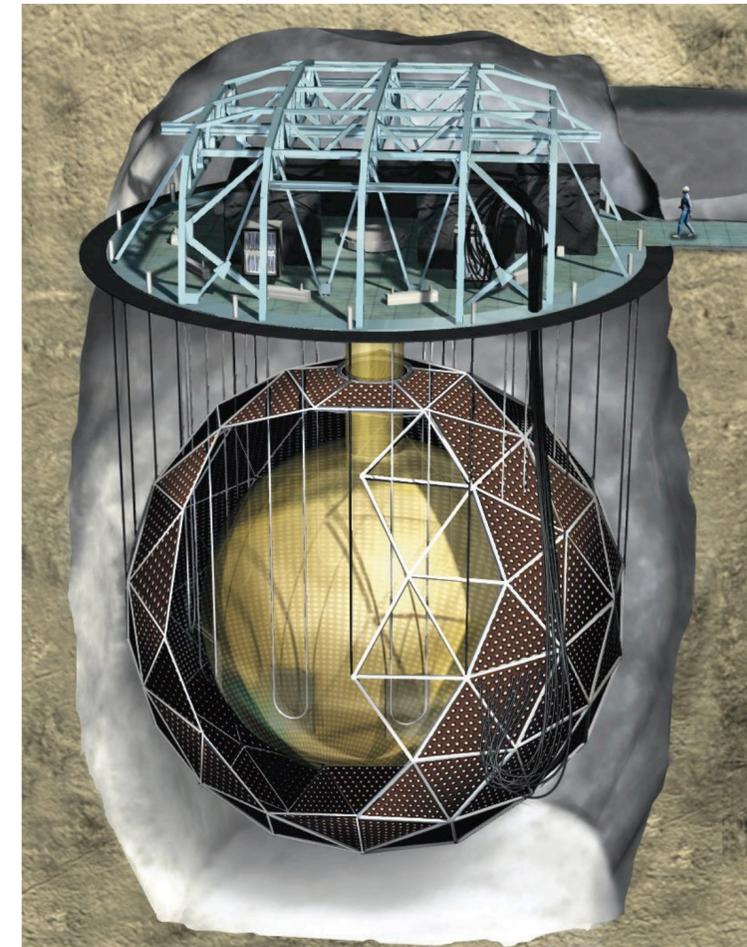
- Implikation – Teil II: **erste Physik jenseits des Standardmodells**



2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

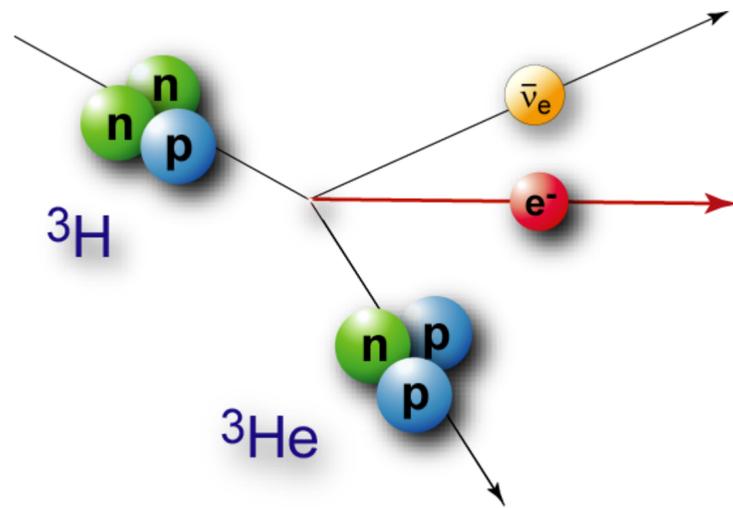


Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald

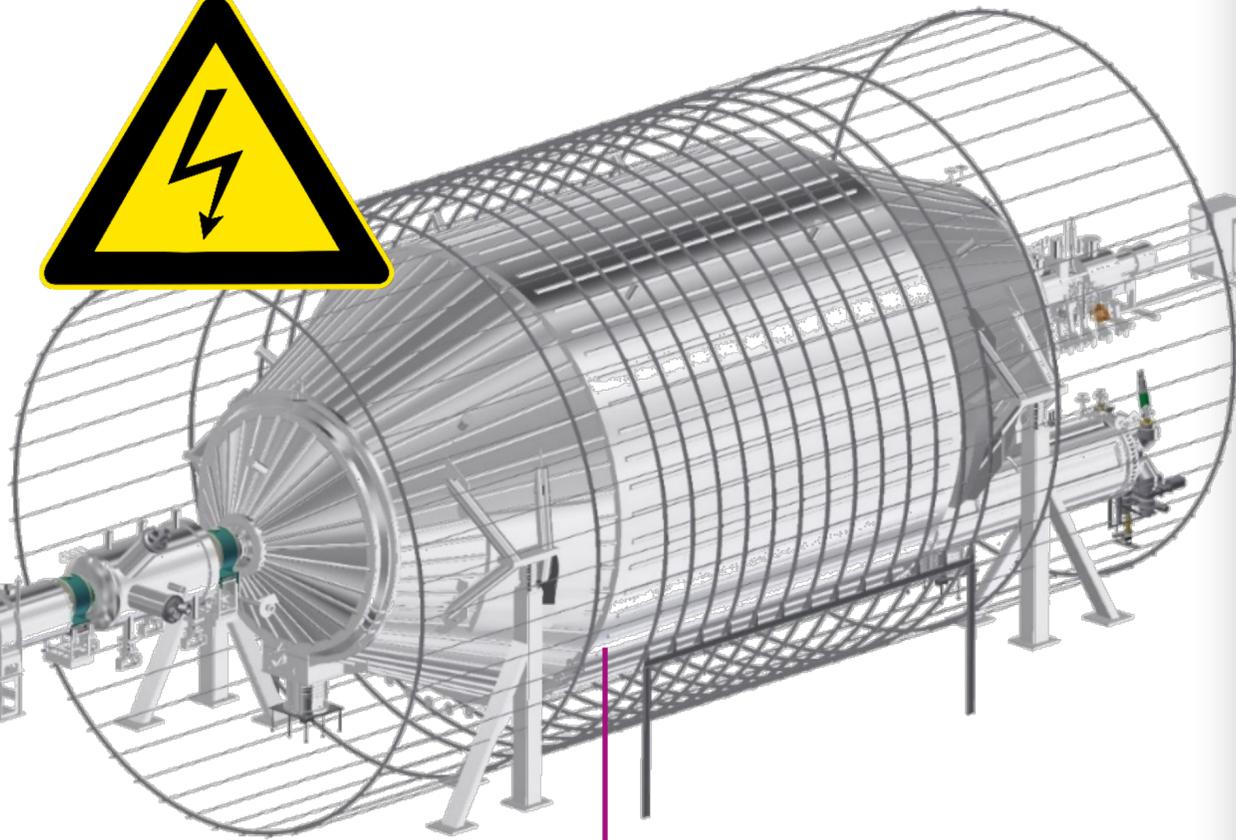


KATRIN Experiment: Messung der ν -Masse

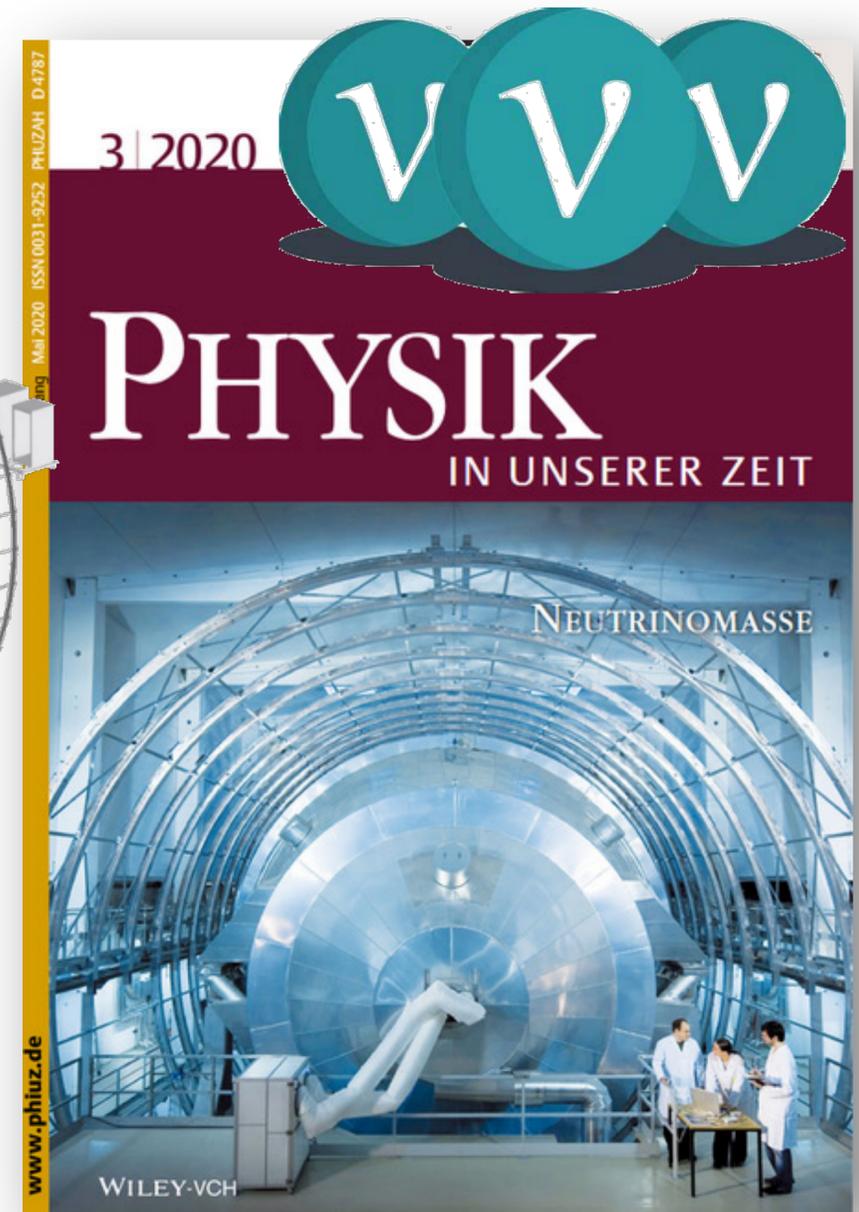
- direkte, modellunabhängige Messung der Masse des Neutrinos
 - ein 70 m langer Experimentieraufbau am Campus Nord



Tritiumquelle

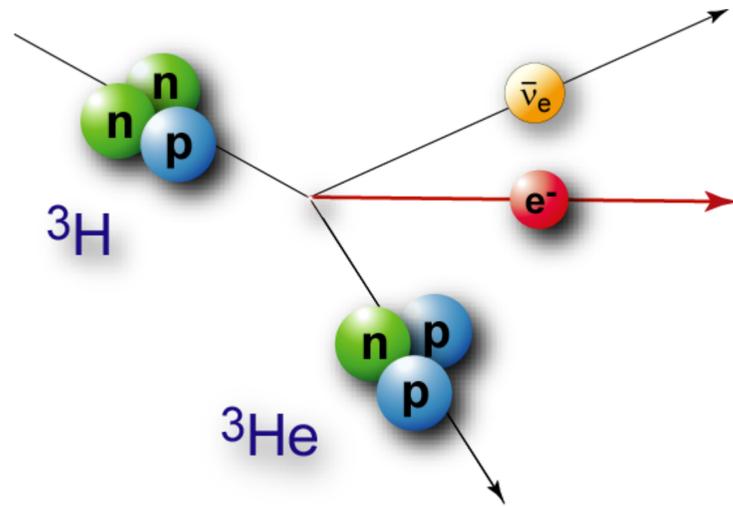


Spektrometer

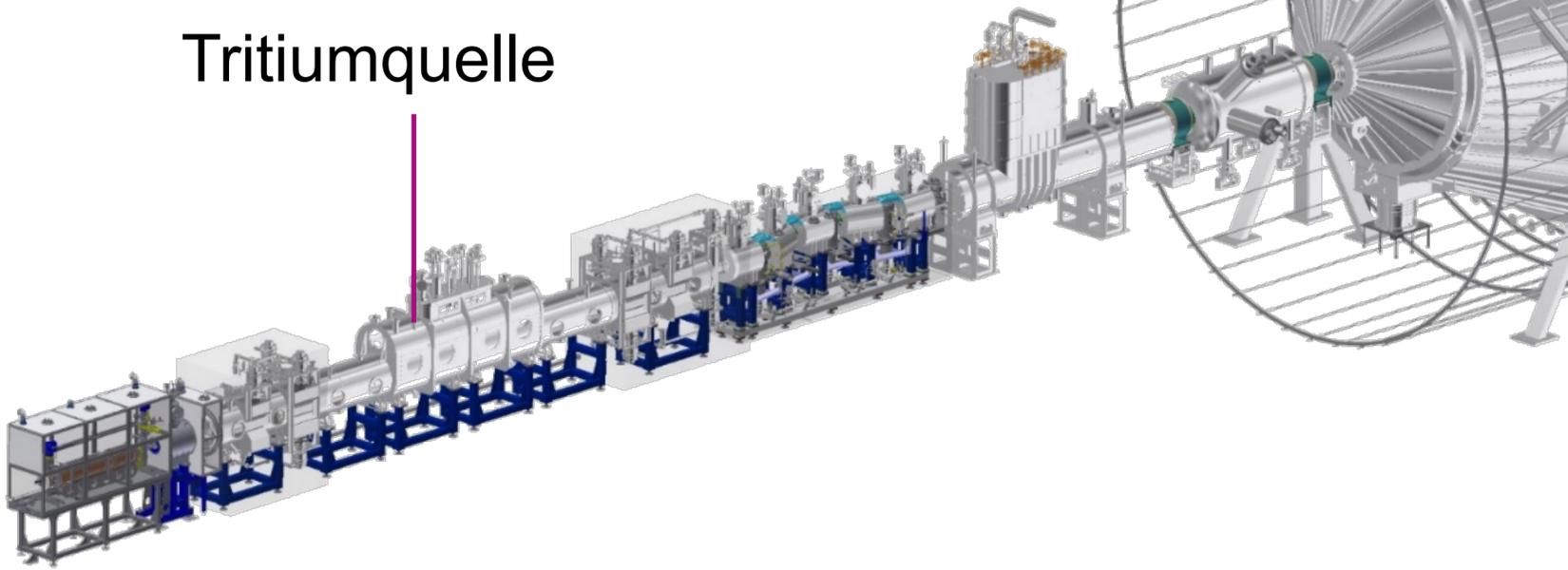


KATRIN Experiment: Messung der ν -Masse

- direkte, modellunabhängige Messung der Masse des Neutrinos
- ein 70 m langer Experimentieraufbau am Campus Nord



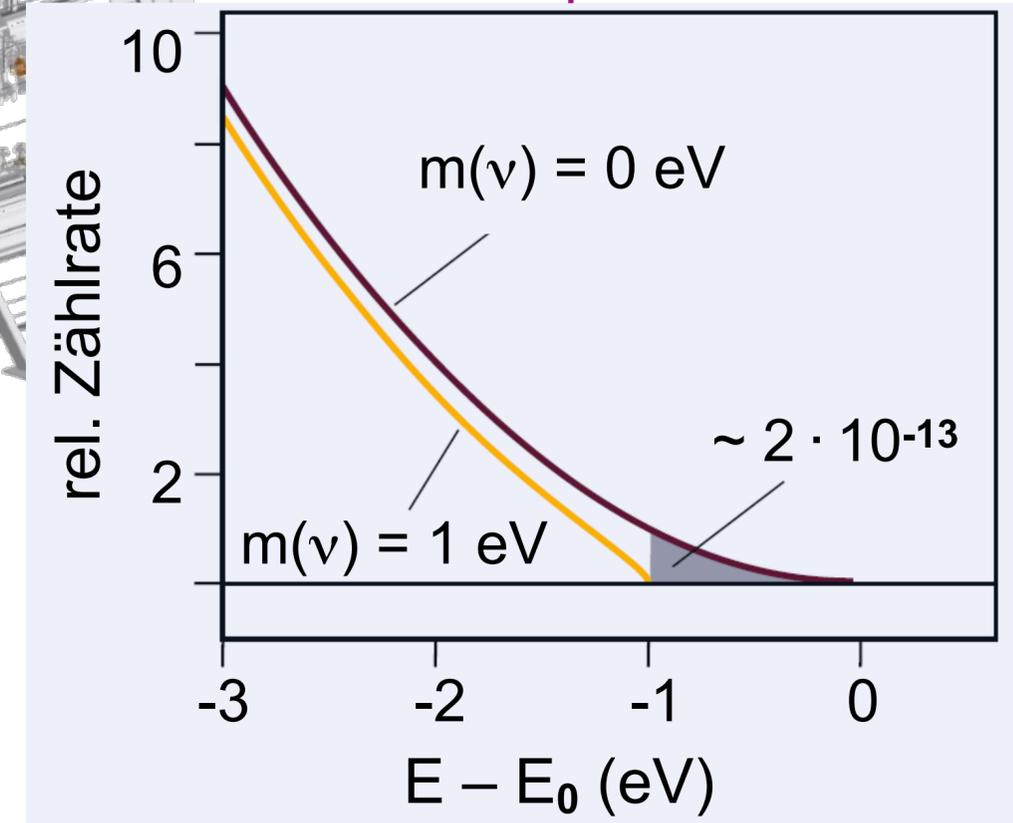
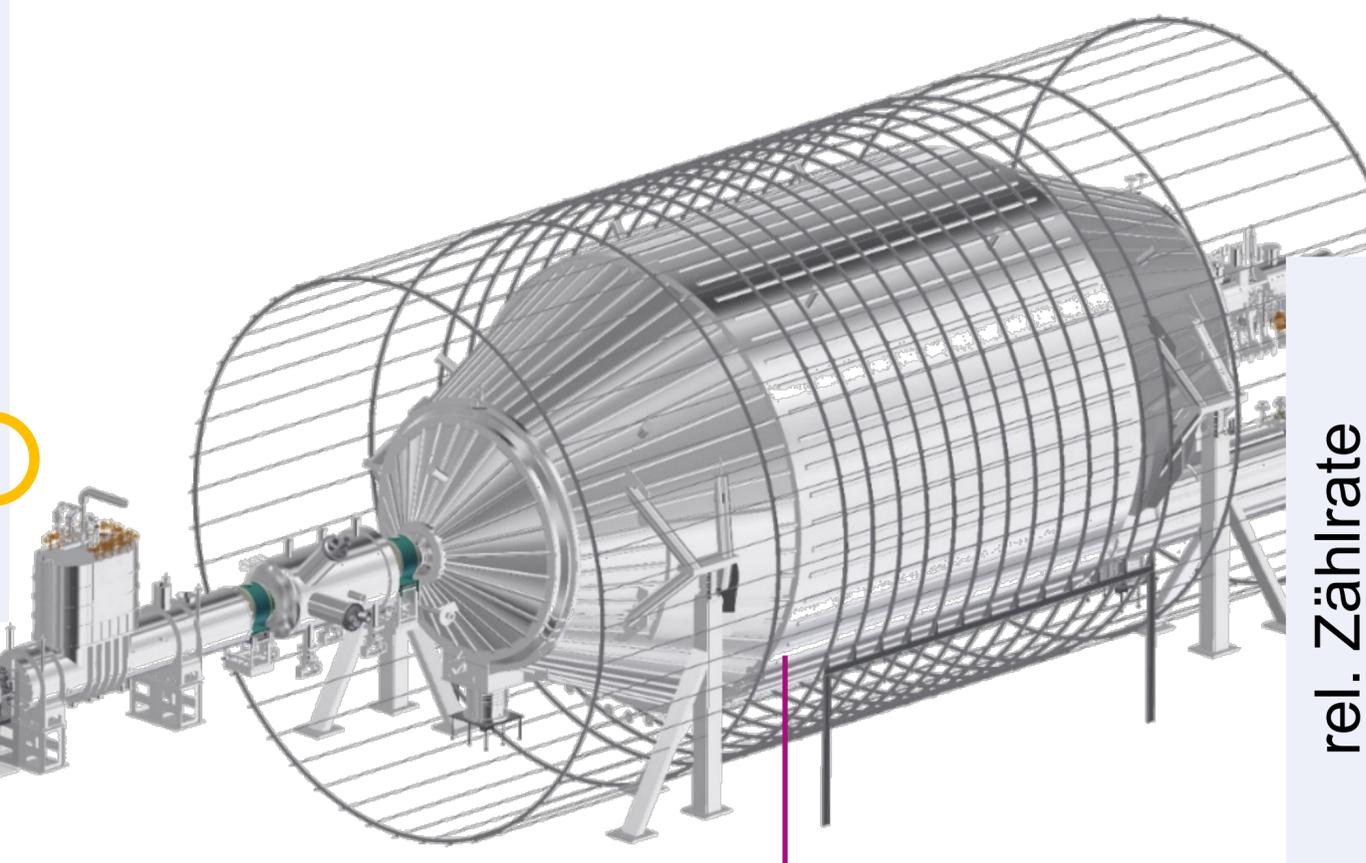
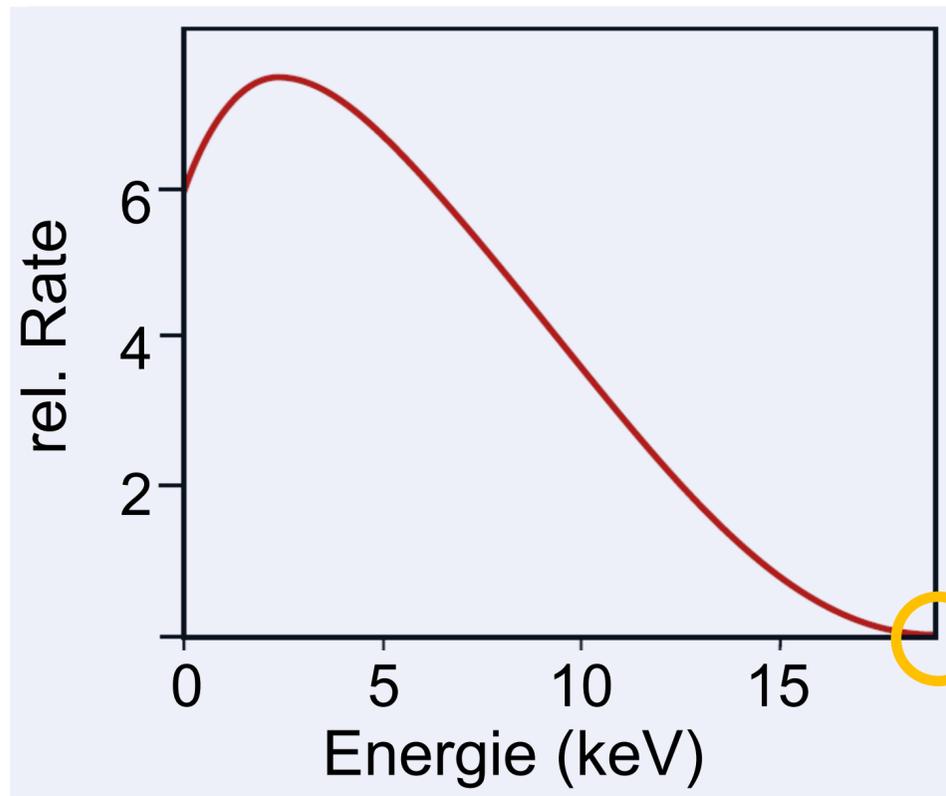
Tritiumquelle



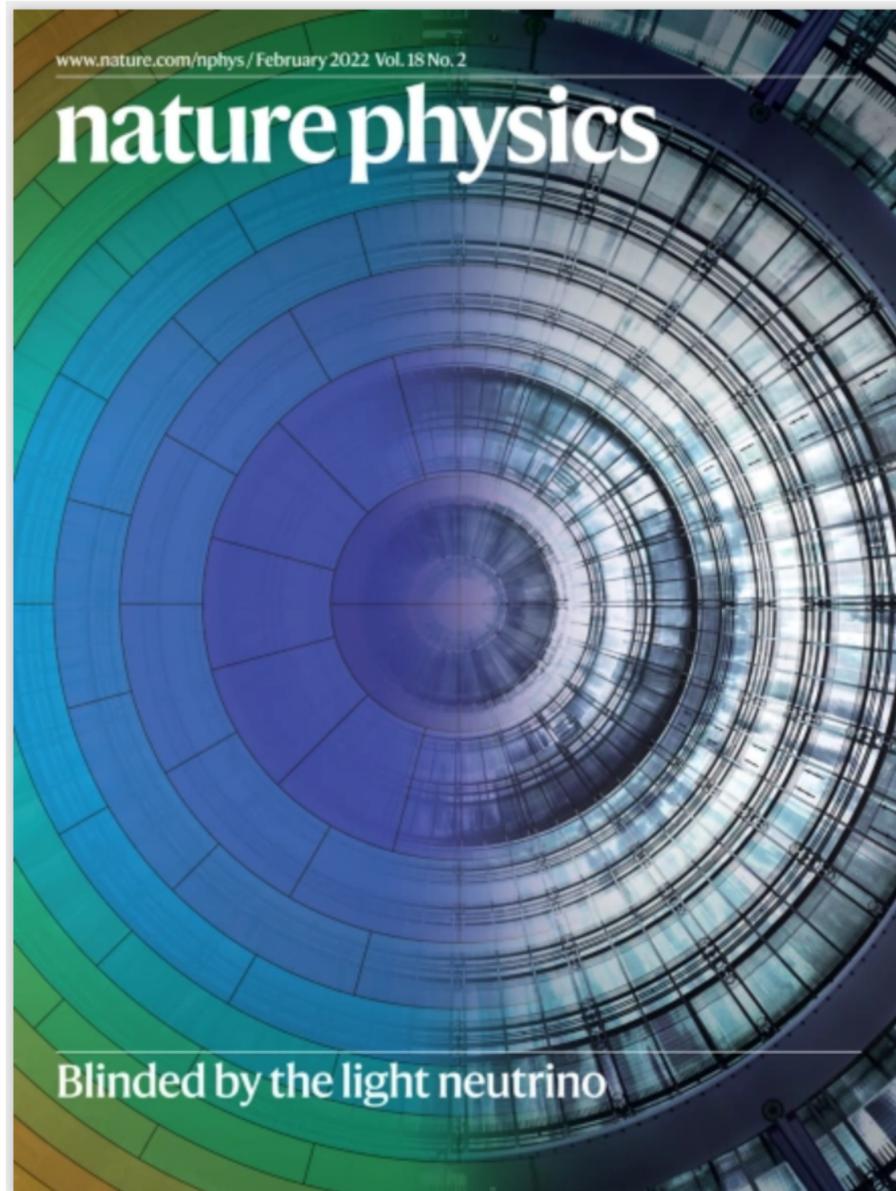
KATRIN Experiment: Messung der ν -Masse

- **Masse des Neutrinos: sehr kleine spektrale Modifikation am Endpunkt E_0**

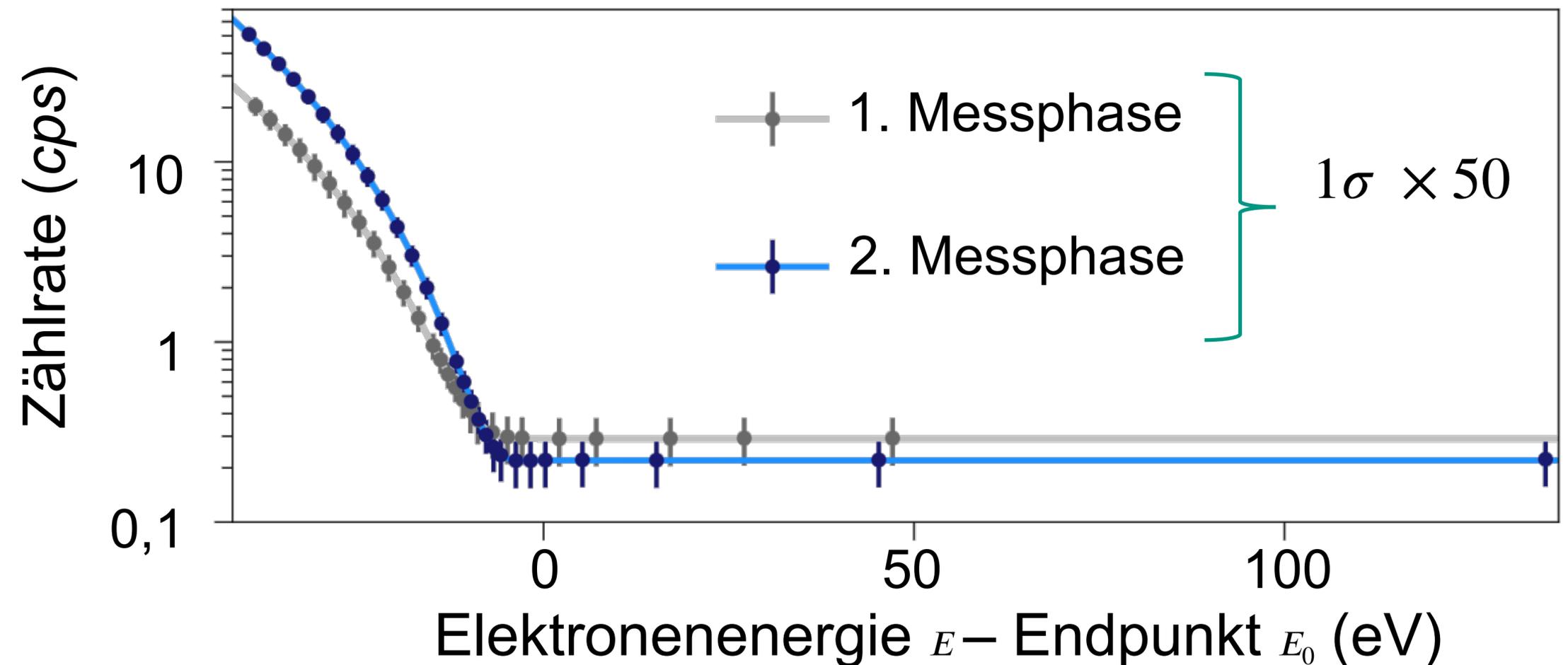
- mehrjährige Messung der Form des Spektrums



- aktuelle Obergrenze, publiziert in Nature Physics: $m(\nu) < 0,8 \text{ eV}$ (90%CL)



- basiert auf 7% der erwarteten gesamten Datenmenge
- kontinuierliche Verbesserung Signal rel. zu Untergrund



KATRIN Experiment: Messung der ν -Masse

- weitere Messungen zu Neutrinos aus dem Big Bang, sterile Neutrinos...

- Visite vor Ort am Campus Nord

