

Kerne und Teilchen

Physik VI

Vorlesung # 26 15.7.2010

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Kaonen und Neutrinos

- solare Neutrinoexperimente
- atmosphär. Resultate
- Neutrinomassen
- β -Zerfall & $0\nu\beta\beta$ -Suche

Querverbindungen & Ausblick

- Astroteilchenphysik



Neutrinostrahlen



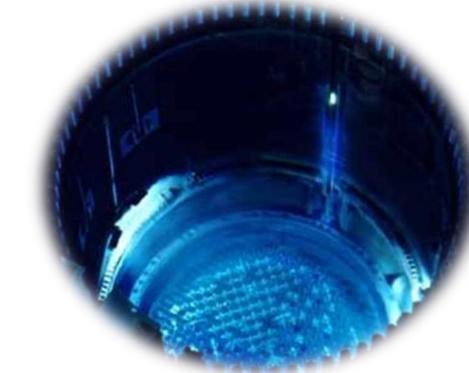
■ Beschleuniger- ν -Experimente:

- **Target:** Erzeugung von Pionen & Kaonen
- **magnetisches Horn:** Fokussierung & Ladungsselektion
- **Zerfallstunnel:** Pionzerfall $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ in Tunnel
- **Abschirmung:** Absorption von Myonen und Hadronen
- **kurze Abstände:** ν 's als Sonden für Proton, Kerne
- **große Abstände:** Untersuchung von ν -Oszillationen



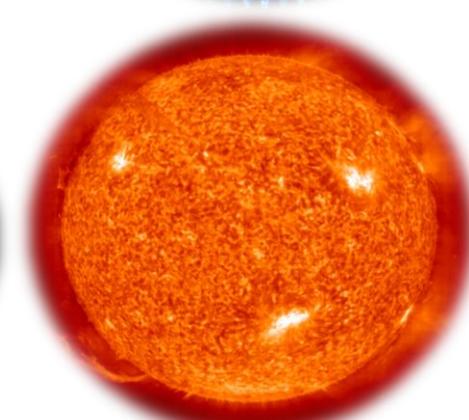
■ Reaktor- ν -Experimente:

- **Quelle:** β -Zerfälle von neutronenreichen Spaltprodukten
- **Fluss:** $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e/s$ bei 8 GW_{therm} Leistung, $\Phi_\nu(r) \sim 1/r^2$



■ astrophysikalische ν -Quellen:

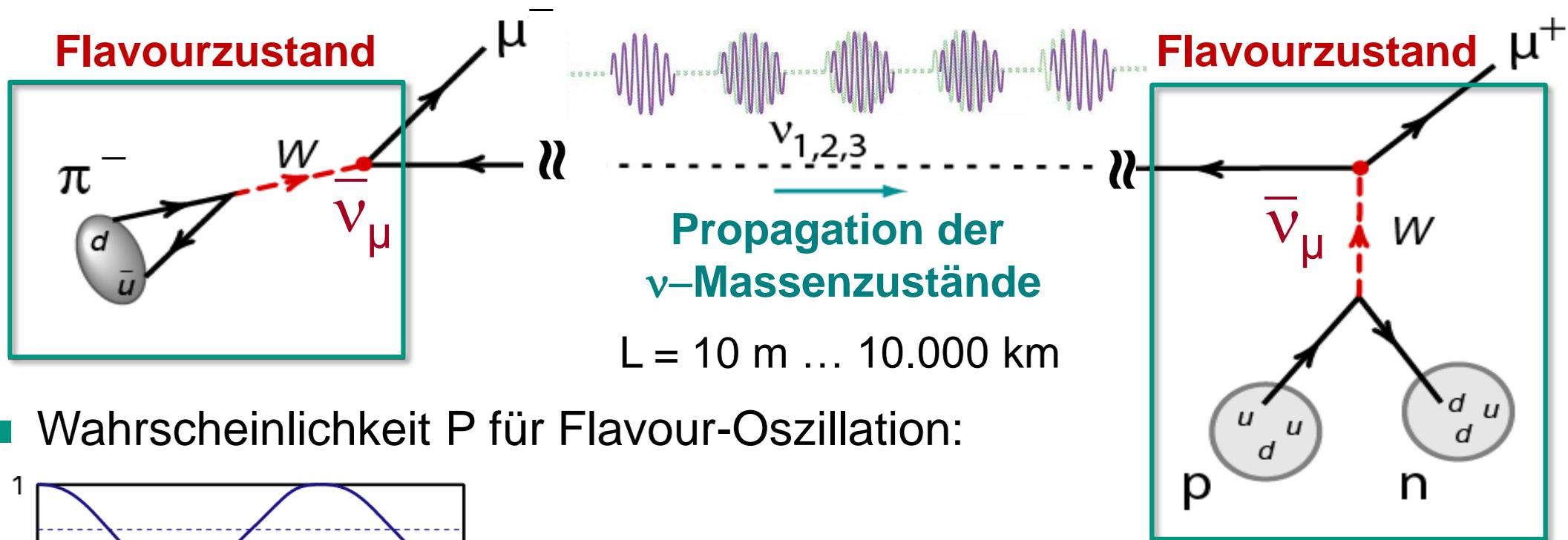
- **Sonne:** MeV ν_e aus der pp-Fusion
 $4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \nu_e$
- **Atmosphäre:** GeV ν_μ, ν_e aus $\pi^+ - \mu^+$ Zerfall
im Verhältnis 2:1



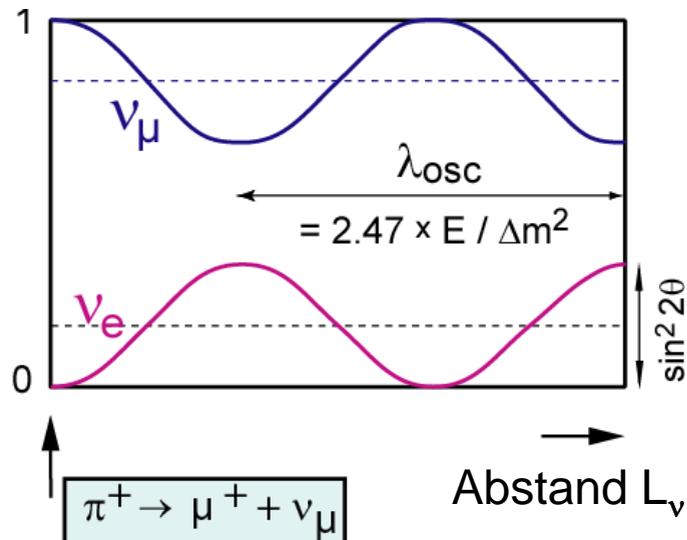
Neutrino-Oszillationen: Grundlagen



- ν -Oszillationen basieren auf **Propagation der Massenzustände**



- Wahrscheinlichkeit P für Flavour-Oszillation:



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

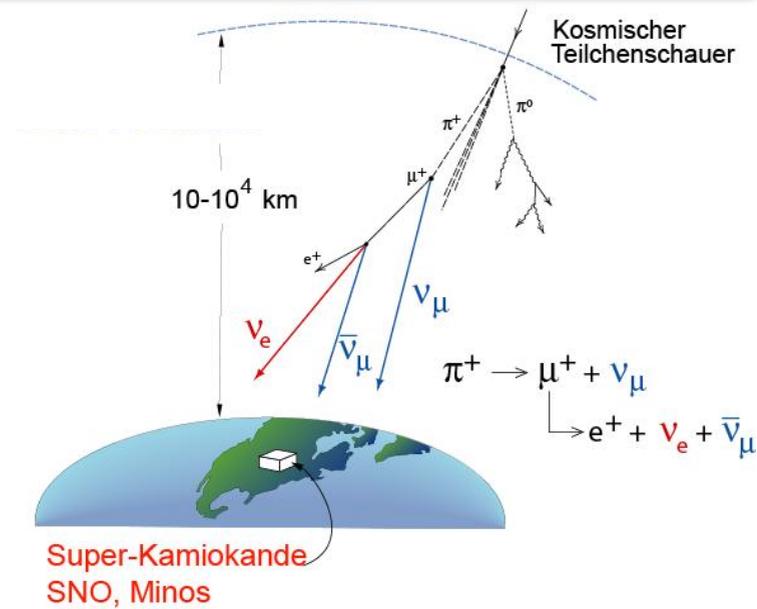
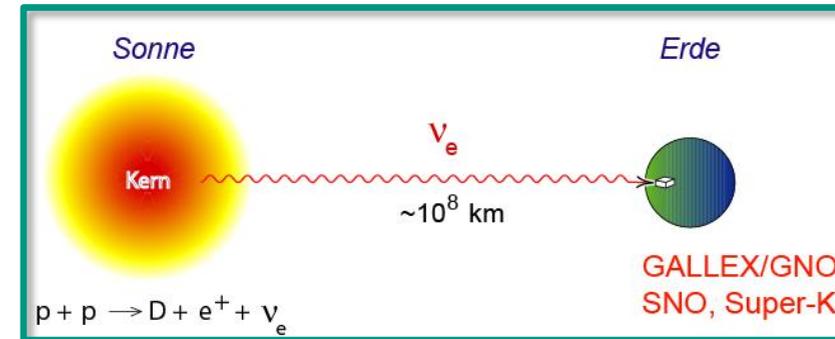
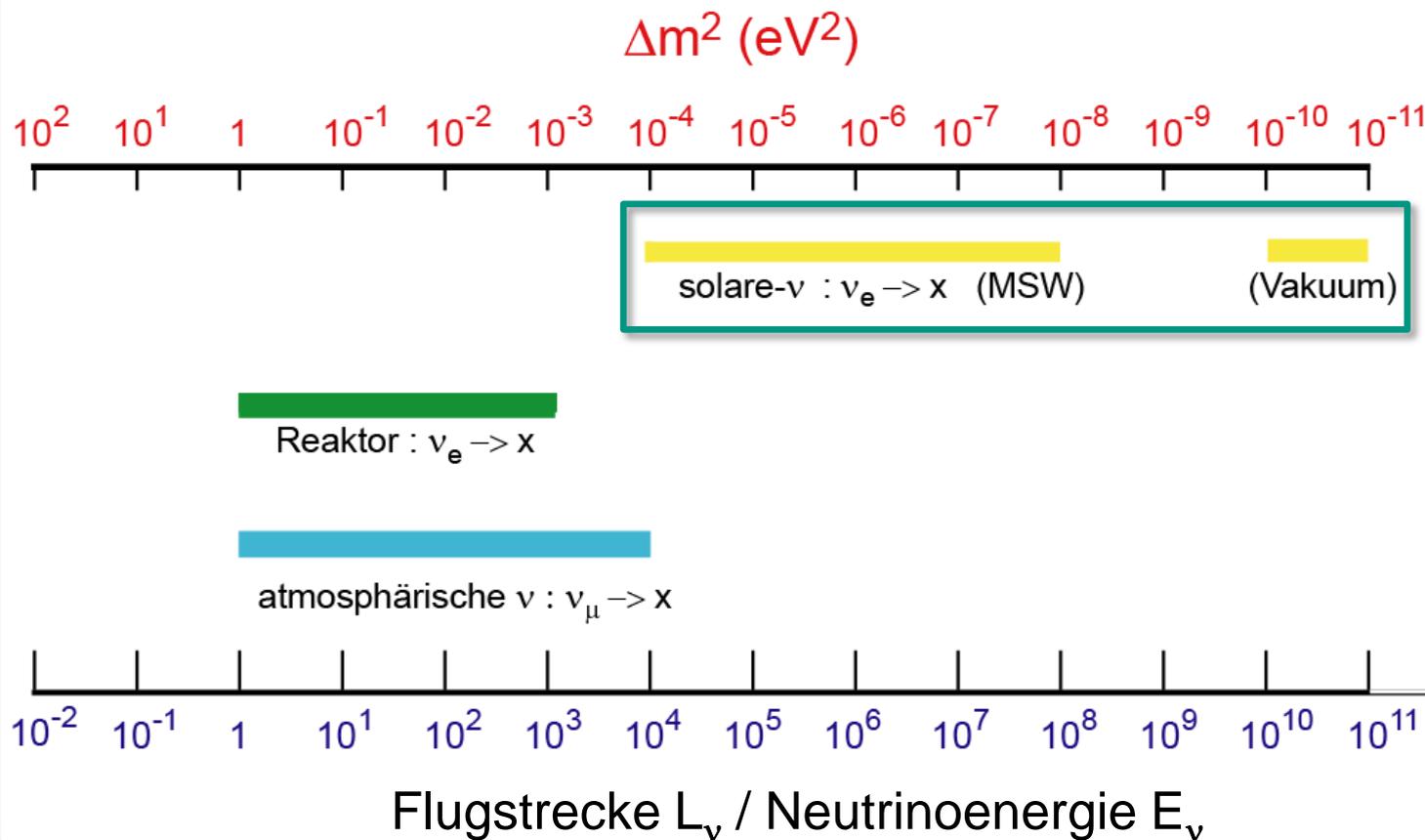
L_ν in km
 E_ν in GeV

periodisches Auftauchen eines **neuen** Neutrino flavourzustands

Neutrino-Oszillationen: L/E und Δm^2

- Überdeckung des Δm^2 -Parameterbereichs mit unterschiedlichen Experimenten

- Ziele:**
- Bestimmung der **Parameter Δm_{ij}^2 , $\sin^2 2\theta_{ij}$**
 - Nachweis des **L_ν/E_ν Oszillations-Patterns**
 - Identifikation der Flavourkanäle



Solare Neutrinos – Energiespektren

- detaillierte theoret. Modellrechnungen zum solaren ν -Spektrum

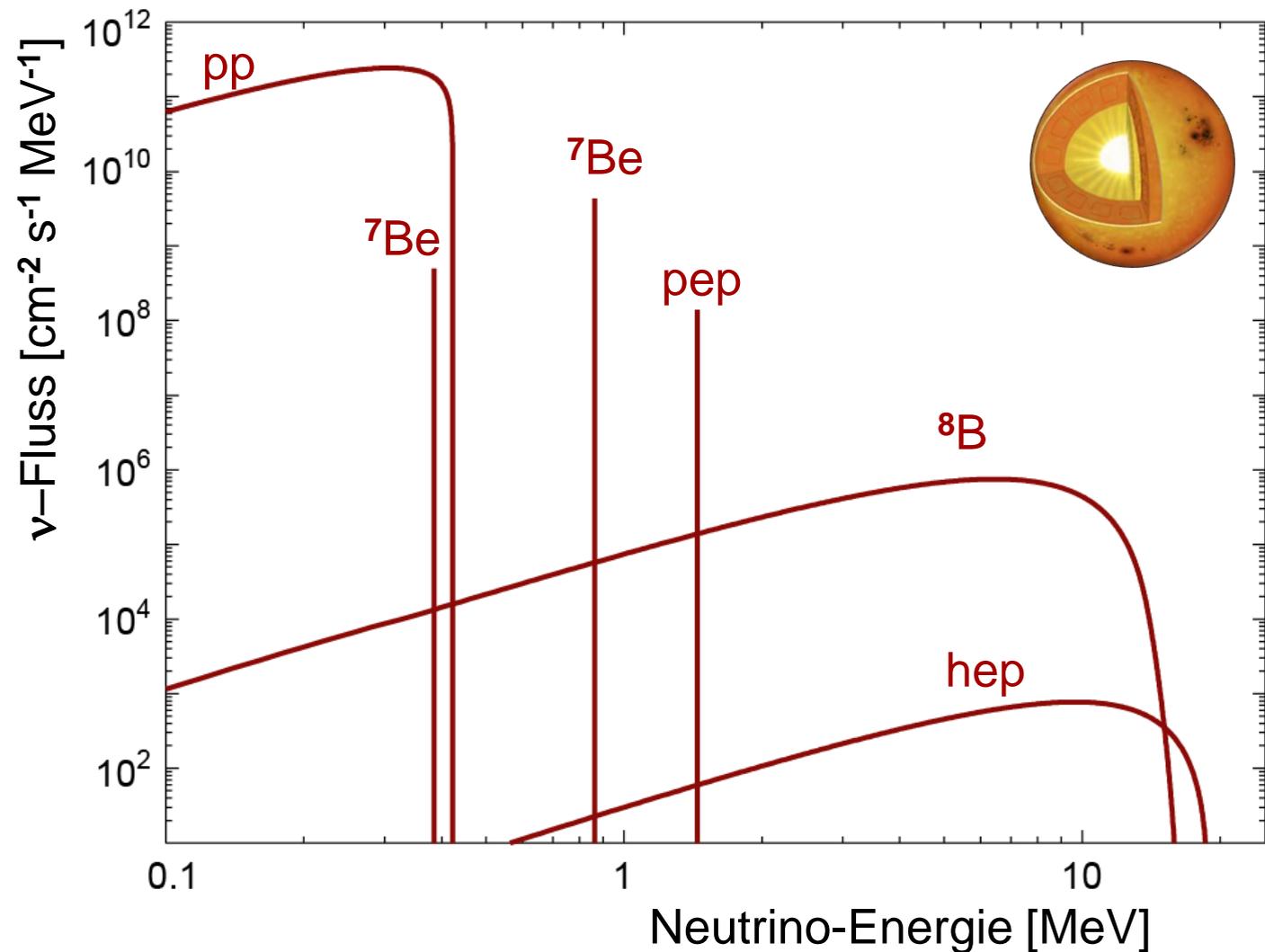
Grundgleichungen

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



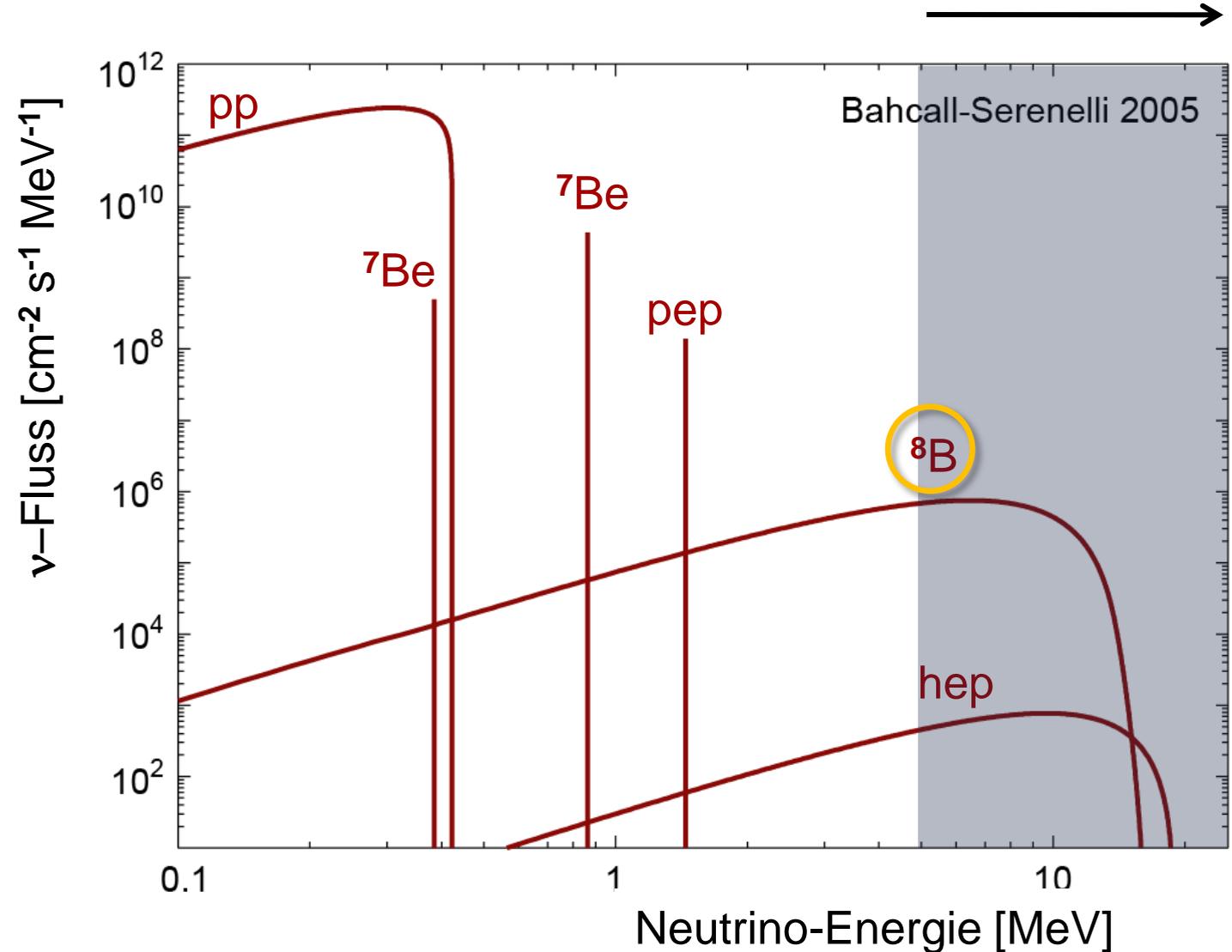
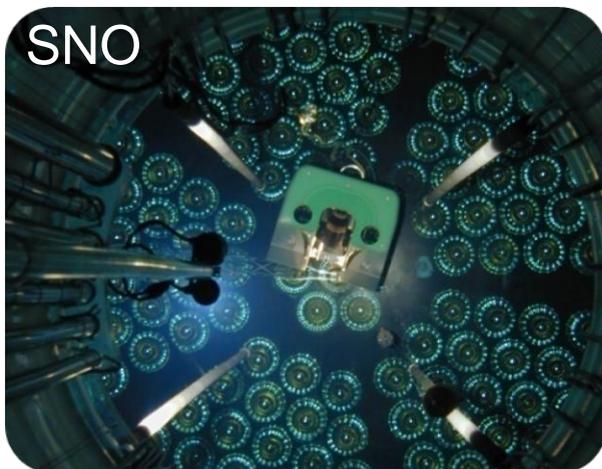
Pionier des heutigen Standard-Sonnenmodells:
John Bahcall
(1934-2005)

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,...



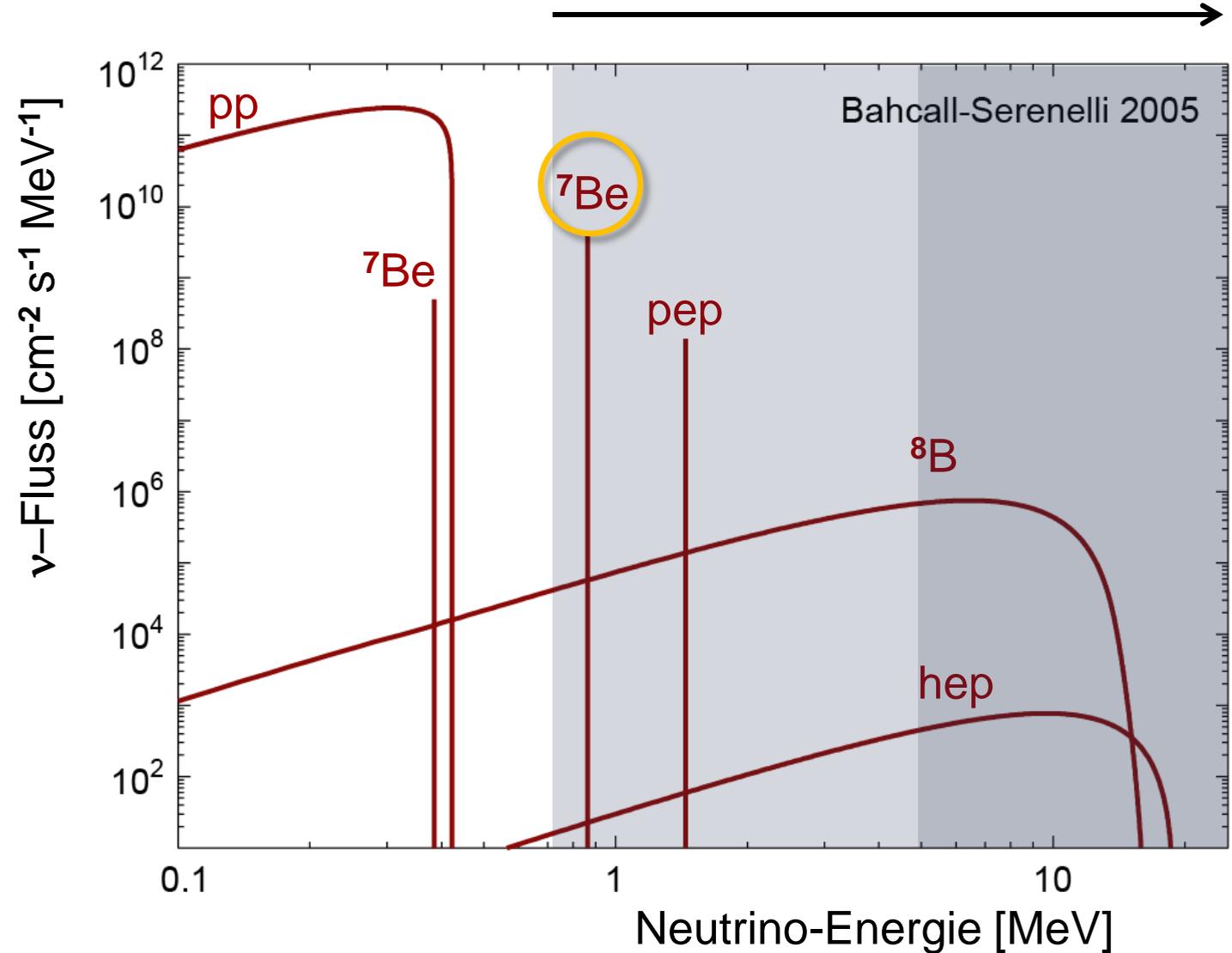
Solare Neutrinos – ${}^7\text{Be}$

- **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**

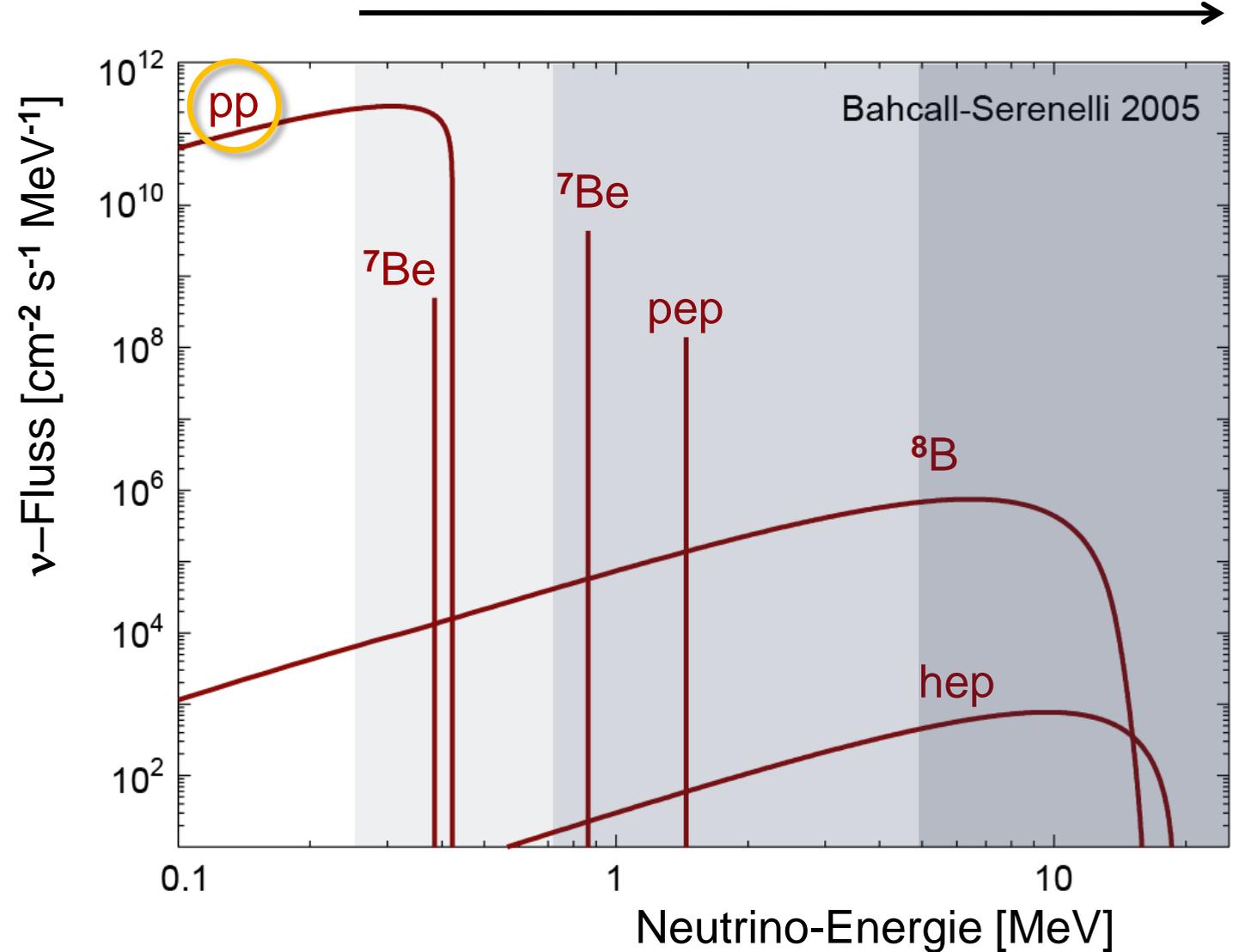
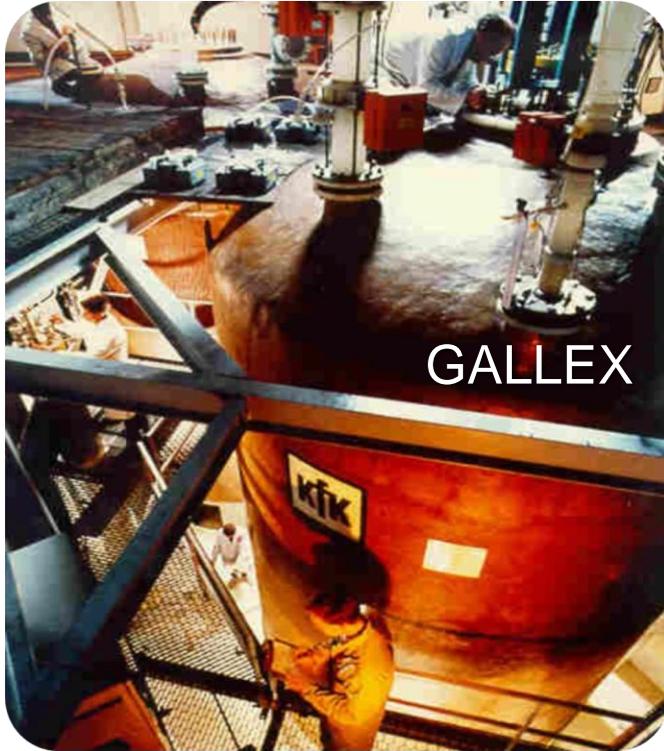


Nobelpreis
2002



Solare Neutrinos – pp

- **radiochemische Detektoren:** Gallex & SAGE messen erstmals die pp- ν 's
 $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \leftrightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ ($Q = 233$ keV)



Resultate der Sonnen-Neutrinoexperimente

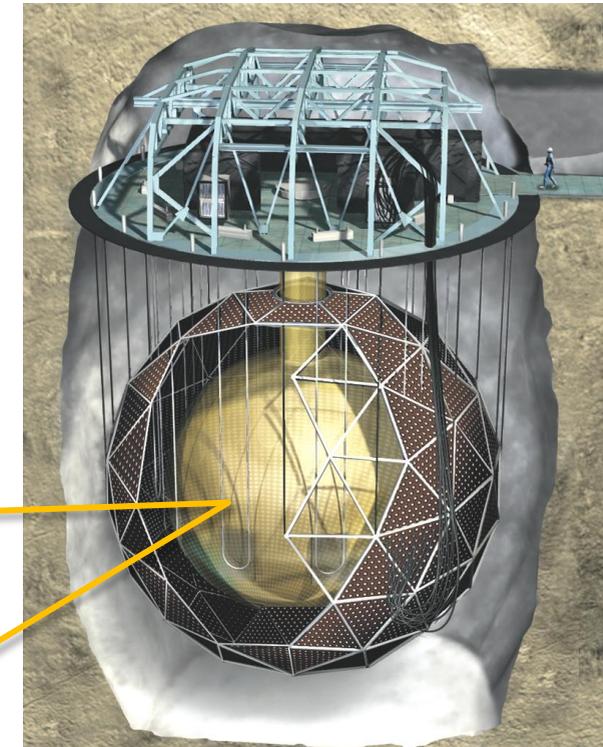
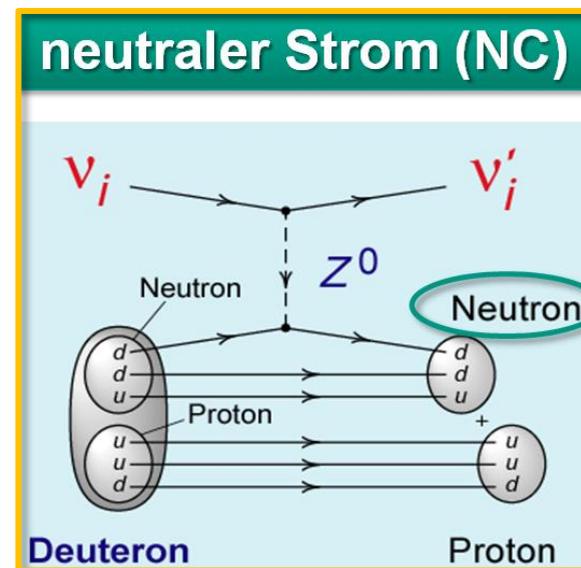
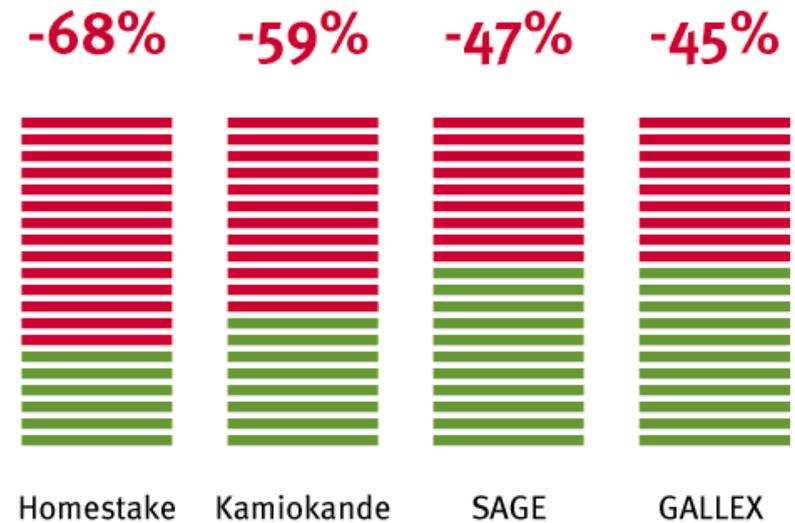
■ Solares Neutrino Defizit:

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



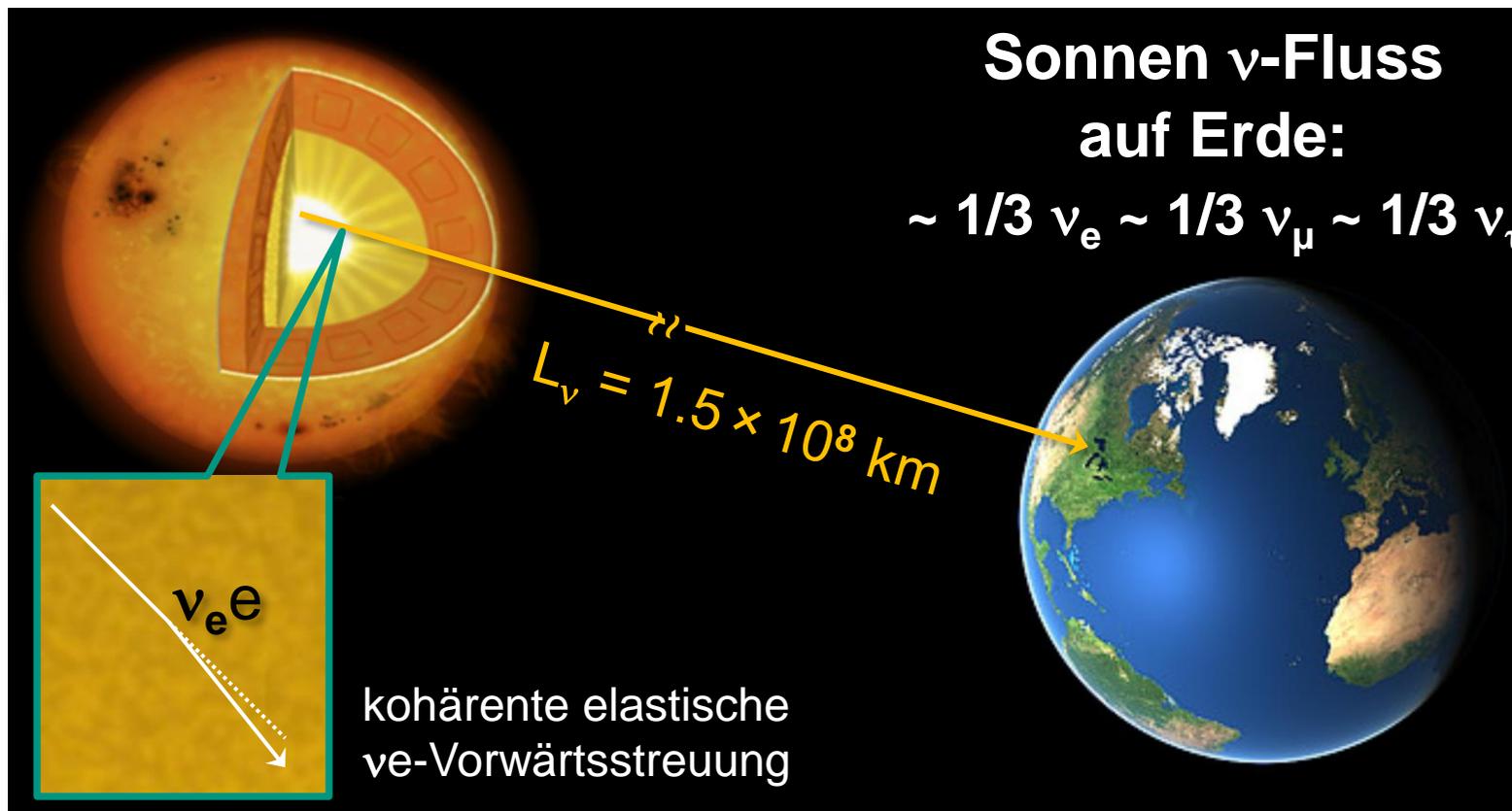
Solare Neutrinos – MSW Effekt

- **solare ν -Oszillationen:** durch die Analyse von allen Experimenten lässt sich der erlaubte Parameterbereich für θ_{12} und Δm^2_{12} eingrenzen
- **MSW Effekt:** für den speziellen Parameterbereich der Oszillation von solaren Neutrinos kommt es durch **kohärente Streuung im Sonneninnern** zu einer Verstärkung

$$\sin^2 2\theta_{12} = 0.87$$
$$\Delta m^2_{12} = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

MSW-Effekt

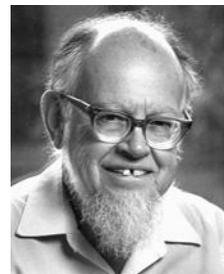
Mikheyev, Smirnov, Wolfenstein:
Materie beeinflusst Propagation/Oszillation



S.P.
Mikheyev



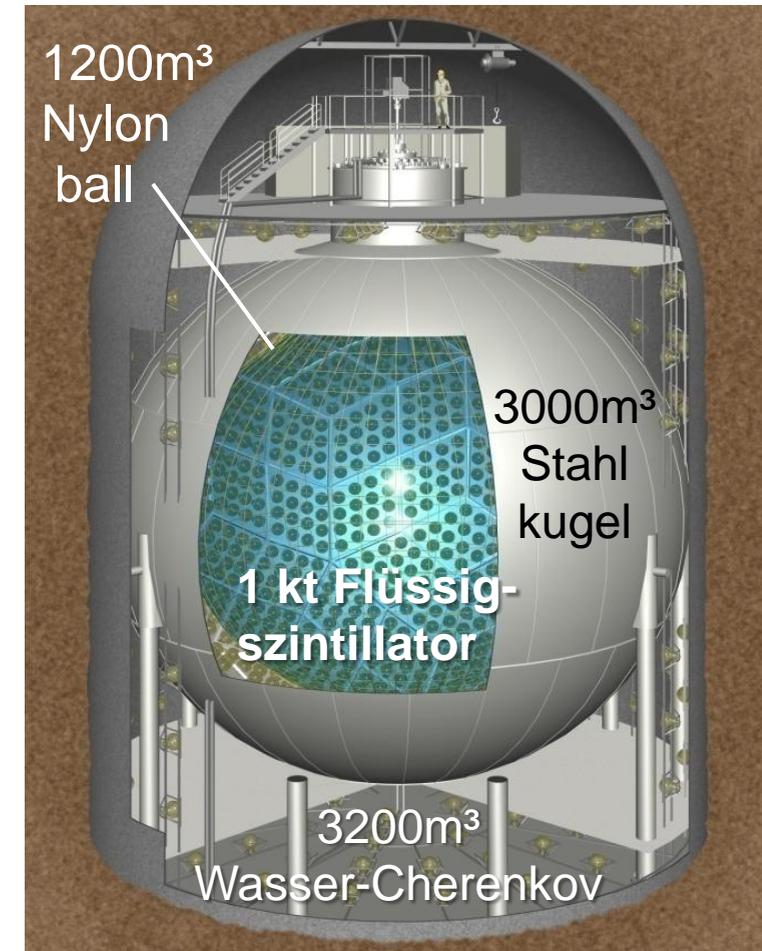
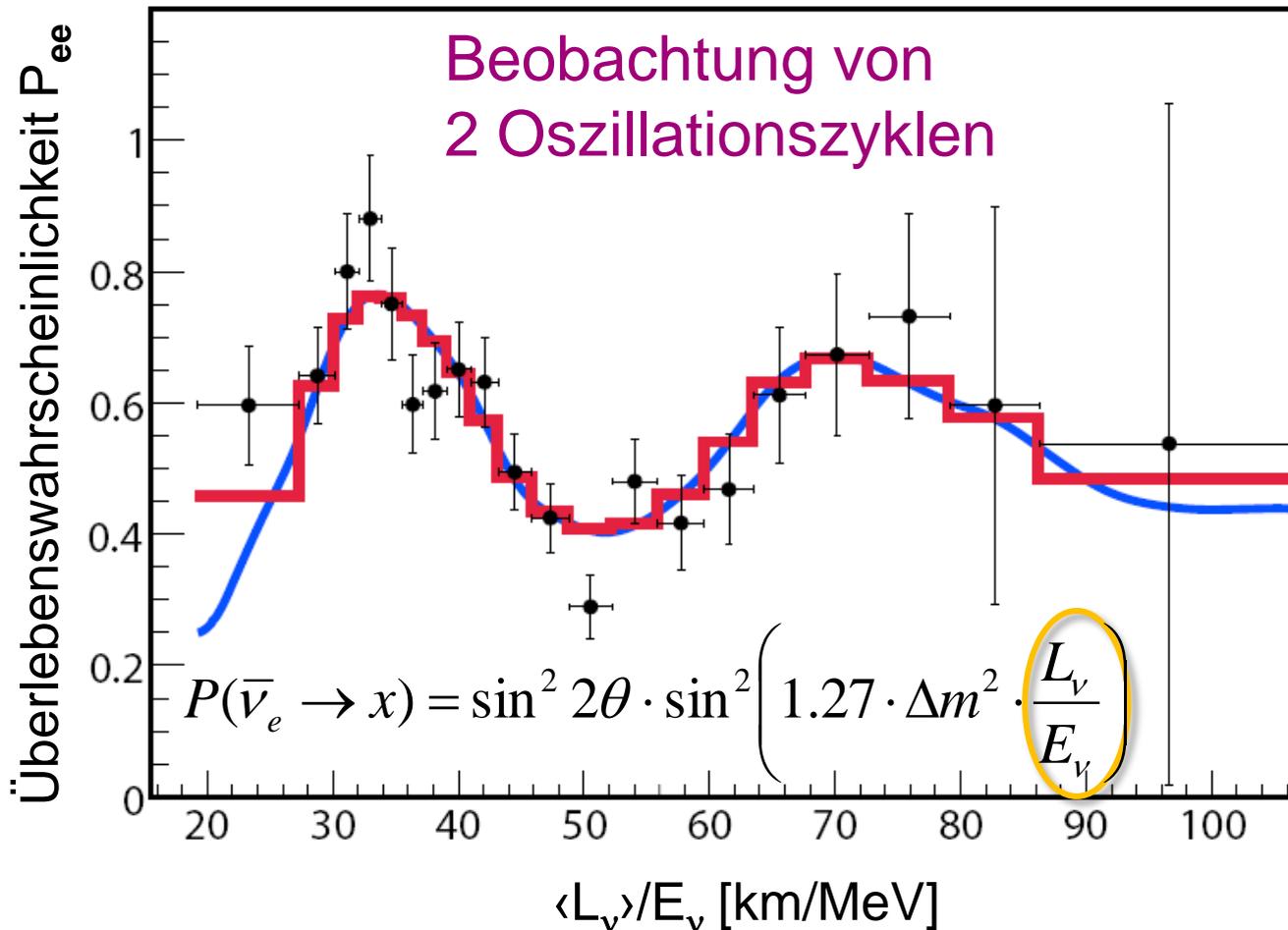
Alexej Y.
Smirnov



Lincoln
Wolfenstein

KamLAND – Resultate

- Überprüfung der Resultate der solaren ν 's mit Reaktorneutrinos im $\nu_e \rightarrow x$ 'disappearance' Modus
 Gesamtleistung: 70 GW (~ 7 % der Weltenergie)
 im **Abstand $d = 130 - 220$ km**, $\langle E_\nu \rangle \sim 2 - 3$ MeV

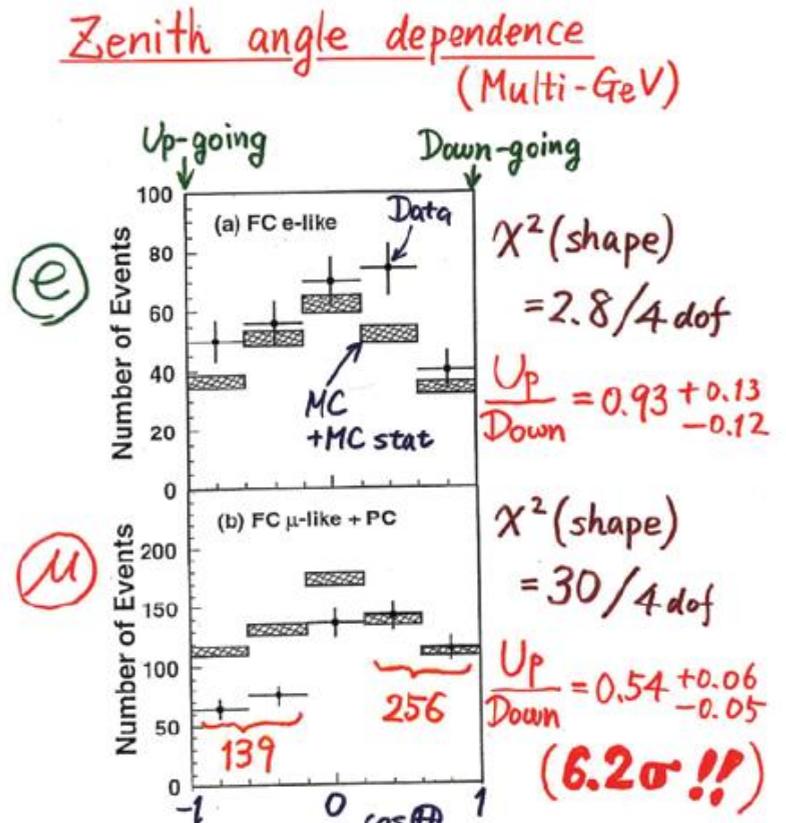


Super-Kamiokande: Evidenz für Oszillation

- Super-Kamiokande findet den ersten Hinweis auf **Physik jenseits des SM**

6.6.1998: Evidenz für Oszillationen von atmosphärischen Neutrinos!

The New York Times
6.6.1998 - Titelseite



* Up/Down syst. error for μ -like

Prediction (flux calculation $\approx 1\%$
 1km rock above SK 1.5%) 1.8%

Data (Energy calib. for $\uparrow\downarrow$ 0.7%
 Non ν Background < 2%) 2.1%



Бруно Понтикорво

‘historische’ Folie von Takaaki Kajita
 Neutrino 1998
 Konferenz in Takayama, Japan

Mass Found in Elusive Particle; Universe May Never Be the Same

Discovery on Neutrino Rattles Basic Theory About All Matter

By MALCOLM W. BROWNE

TAKAYAMA, Japan, June 5 — In what colleagues hailed as a historic landmark, 128 physicists from 23 research institutions in Japan and the United States announced today that they had found the existence of mass in a notoriously elusive subatomic particle called the neutrino.

The neutrino, a particle that carries no electric charge, is so light that it was assumed for many years to have no mass at all. After today's announcement, cosmologists will have to confront the possibility that a significant part of the mass of the universe might be in the form of neutrinos. The discovery will also compel scientists to revise a highly successful theory of the composition of matter known as the Standard Model.

Word of the discovery had drawn some 300 physicists here to discuss neutrino research. Among other things, the finding of neutrino mass might affect theories about the formation and evolution of galaxies and

Detecting Neutrinos

Neutrinos pass through the Earth's surface to a tank filled with 12.5 million gallons of ultra-pure water ...

... and collide with other particles ...

... producing a cone-shaped flash of light.

... The light is recorded by 11,200 20-inch light amplifiers that cover the inside of the tank.

And Detecting Their Mass

By analyzing the cones of light,

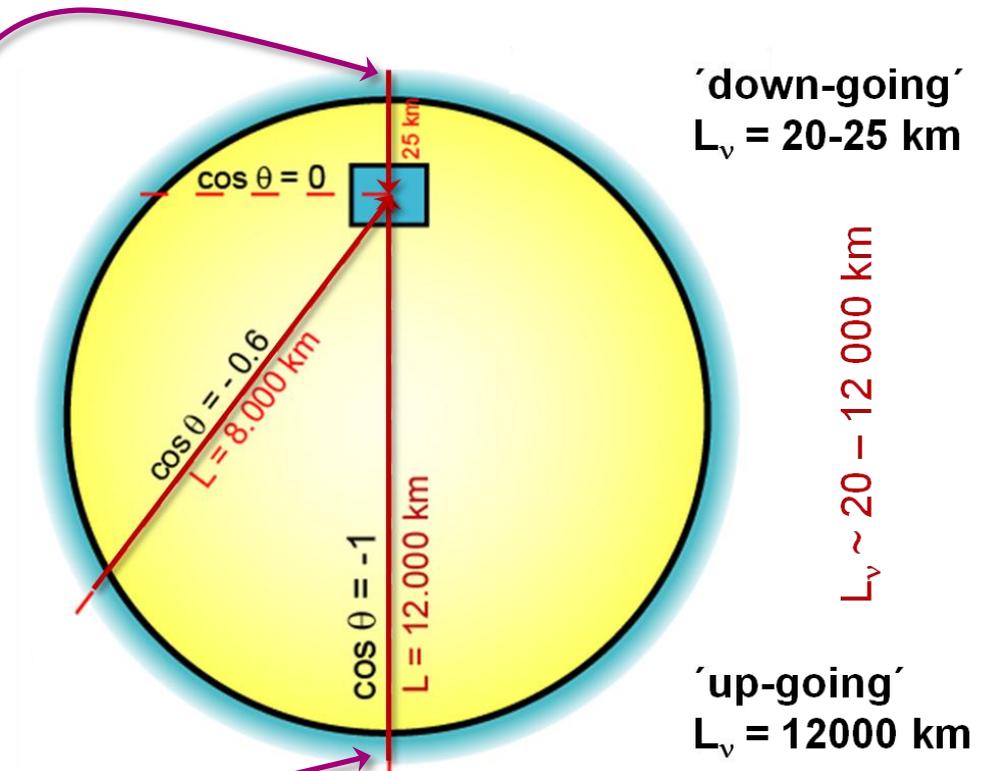
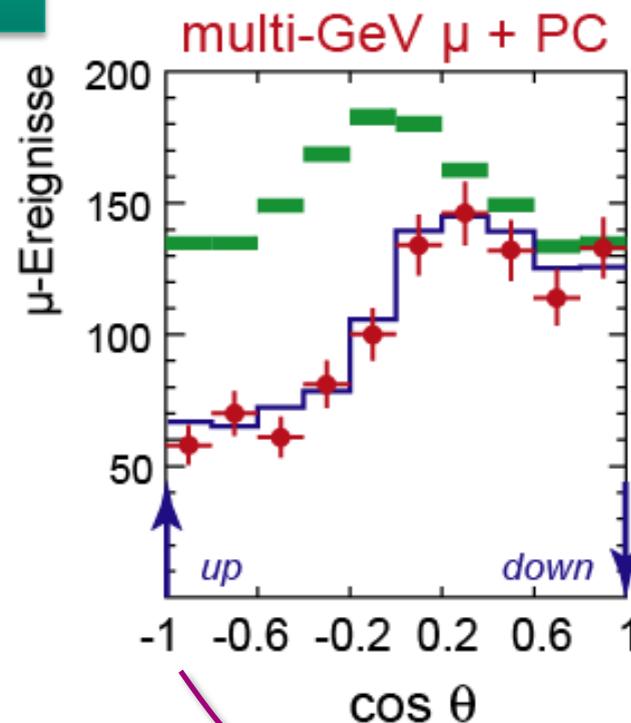
Atmosphärische Neutrino-Oszillationen

- 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

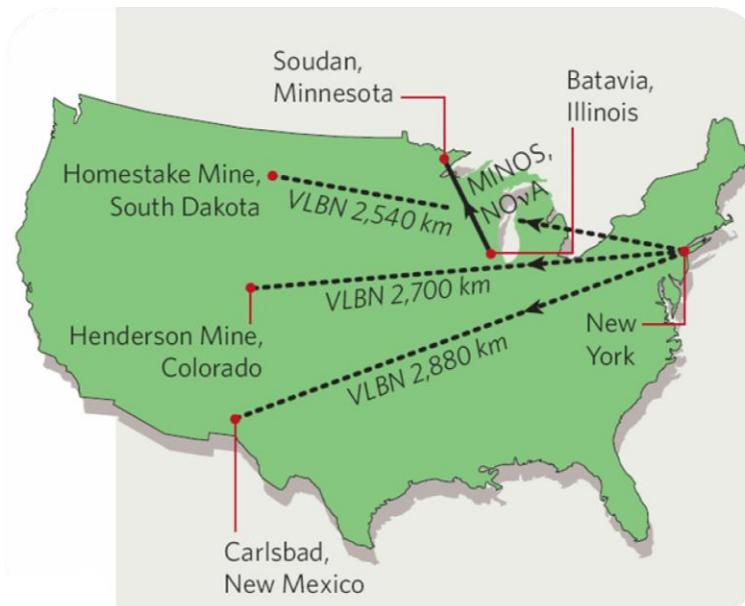
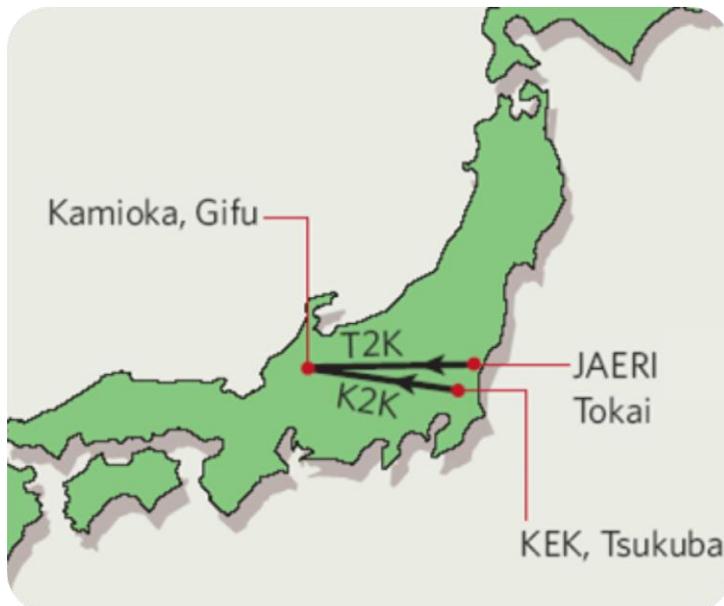


Long-Baseline Oszillationsexperimente

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

Long-Baseline Beschleuniger Experimente: Übersicht

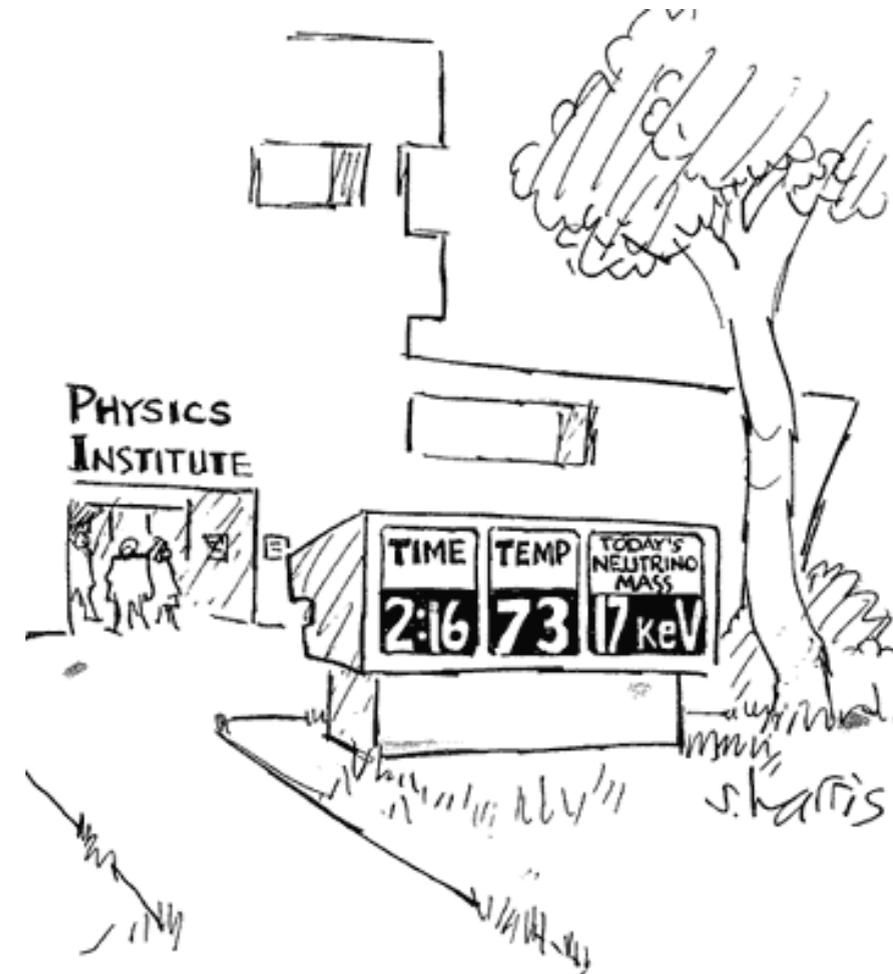
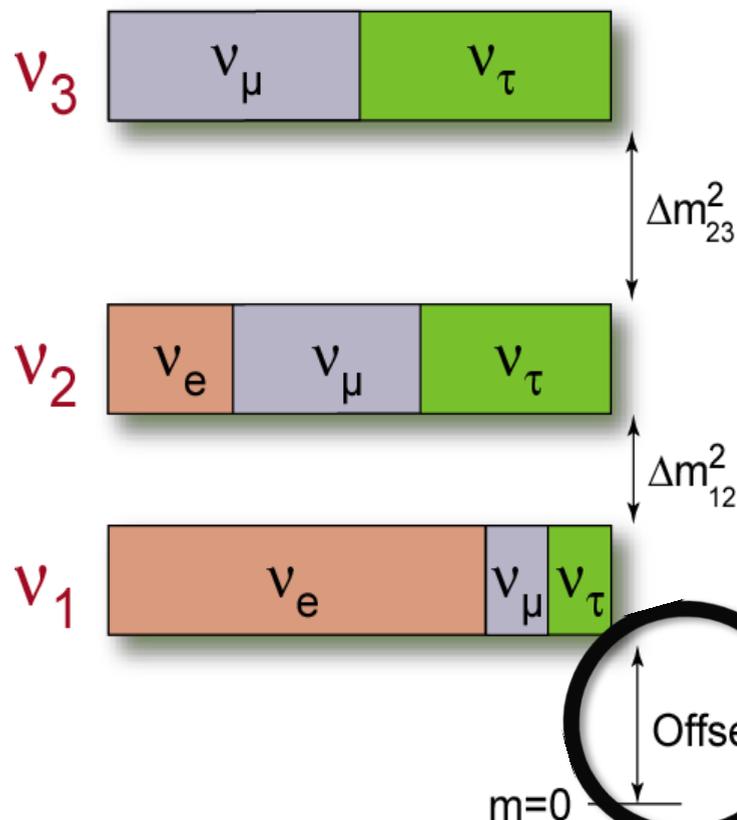
LB- ν -Strahl	Ort	Entfernung	Energie	L/E	Beginn	Detektor	Kanal
K2K	J	235 km	1.4 GeV	~ 150	1999	Super-Kamiokande	$\nu_\mu - \nu_e$
NuMI	US	735 km	1-30 GeV	50-350	2005	MINOS	$\nu_\mu - \nu_\mu$
CNGS	EU	732 km	30 GeV	50-350	2007	OPERA	$\nu_\mu - \nu_\tau$
T2K	J	295 km	GeV		2010	Super-Kamiokande	$\nu_\mu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



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

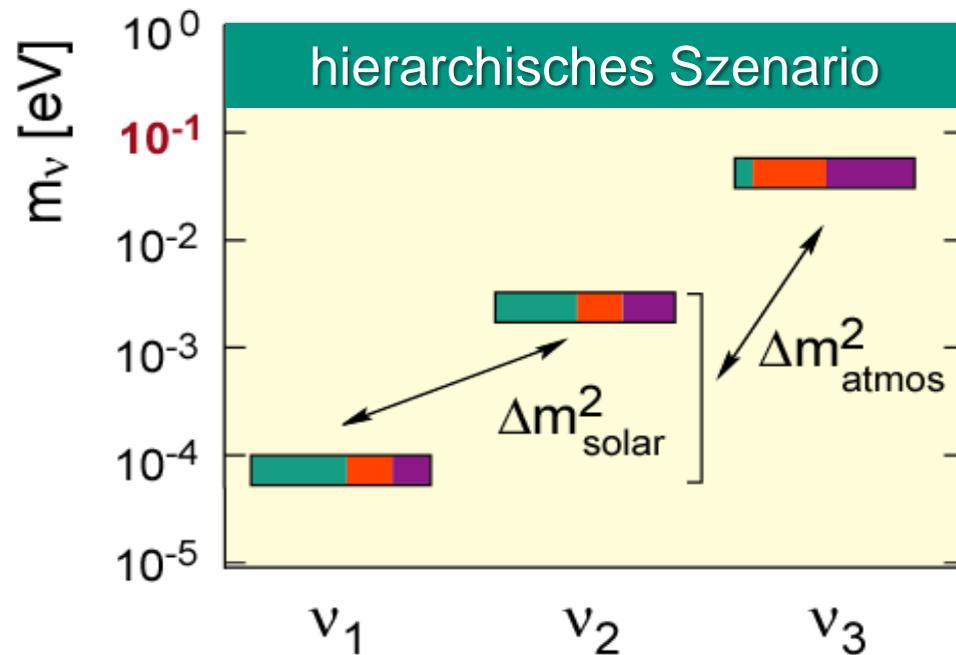
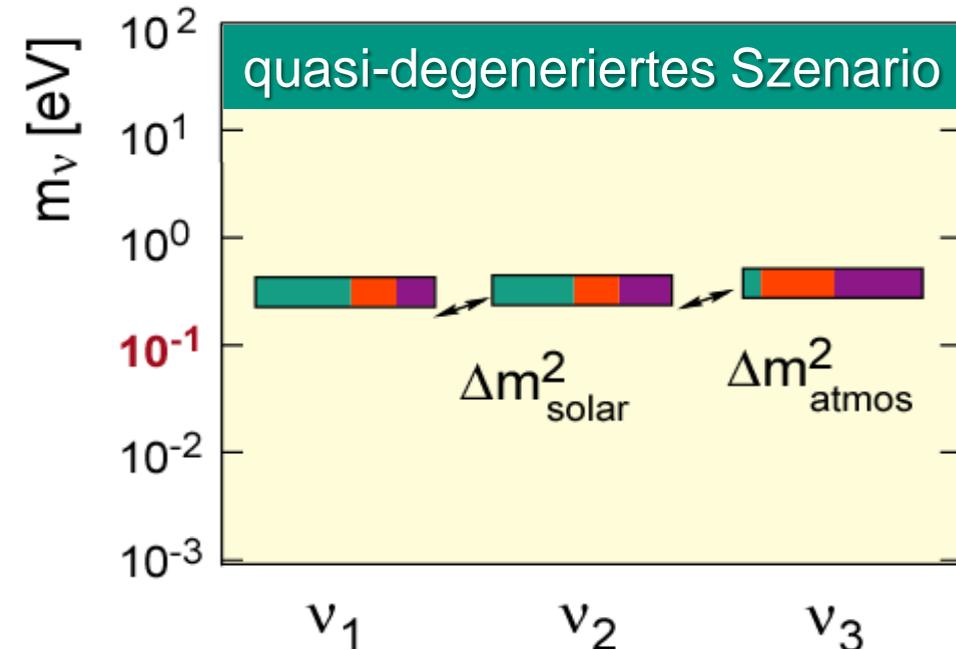
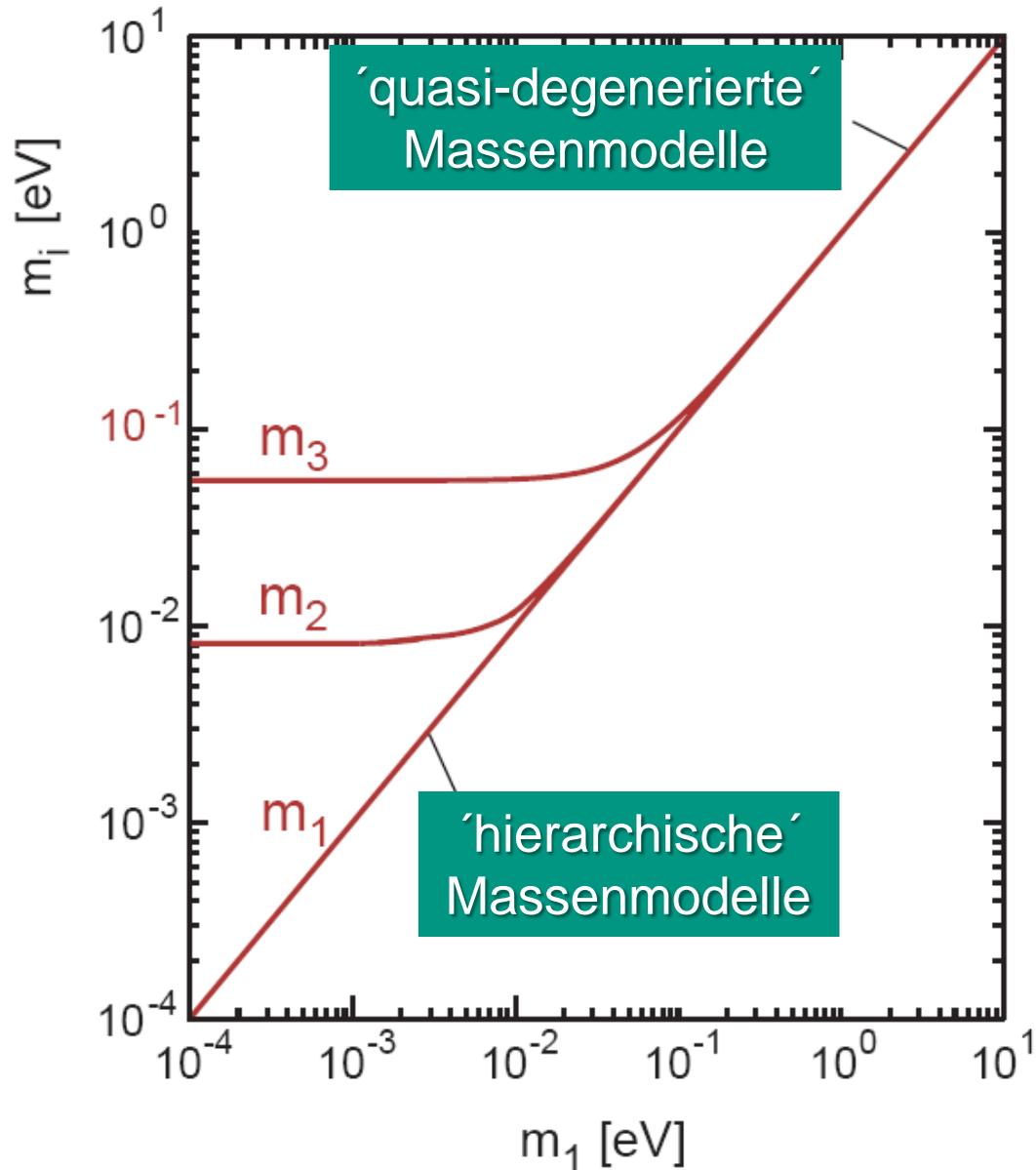
■ ν -Oszillationen (solare, atmosphärische, LBL ν 's):

- 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 ?



β-Zerfall – Energiespektrum

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

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

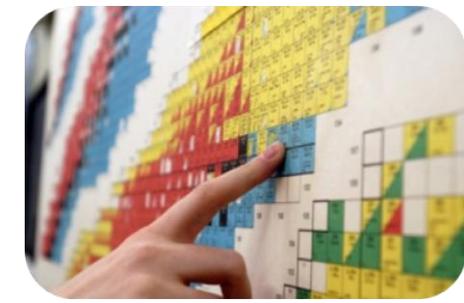


$$G_F^2 \cdot \frac{m_e^5}{2\pi^3} \cdot \cos^2 \theta_C \cdot |M|^2$$

(ν-Masse)²

Fermi-Funktion $F(E, Z)$

**Observable $m^2(\nu_e)$:
 'Elektron-ν-Masse'**



$$m(\nu_e) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 |U_{ei}^2| \cdot m_i^2}$$

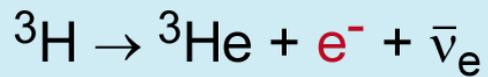
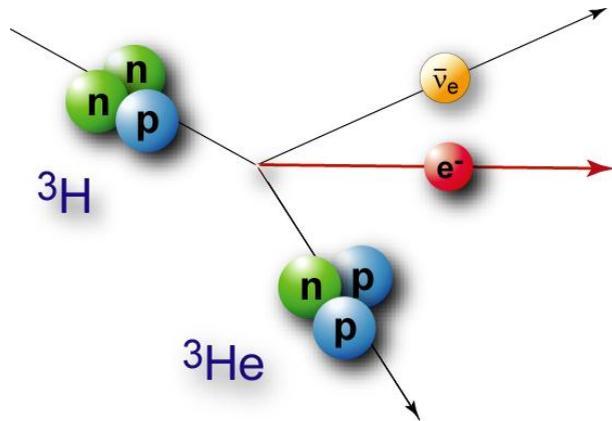
'inkohärente' Summe
 der Massenzustände m_i

- β-Quelle: Anforderungen**
- kurze Halbwertszeit $t_{1/2}$
 - niedrige Endpunktsenergie E_0
 - übererlaubter/erlaubter Übergang
 - einfache atomare/molekulare Struktur

β -Zerfall – Energiespektrum

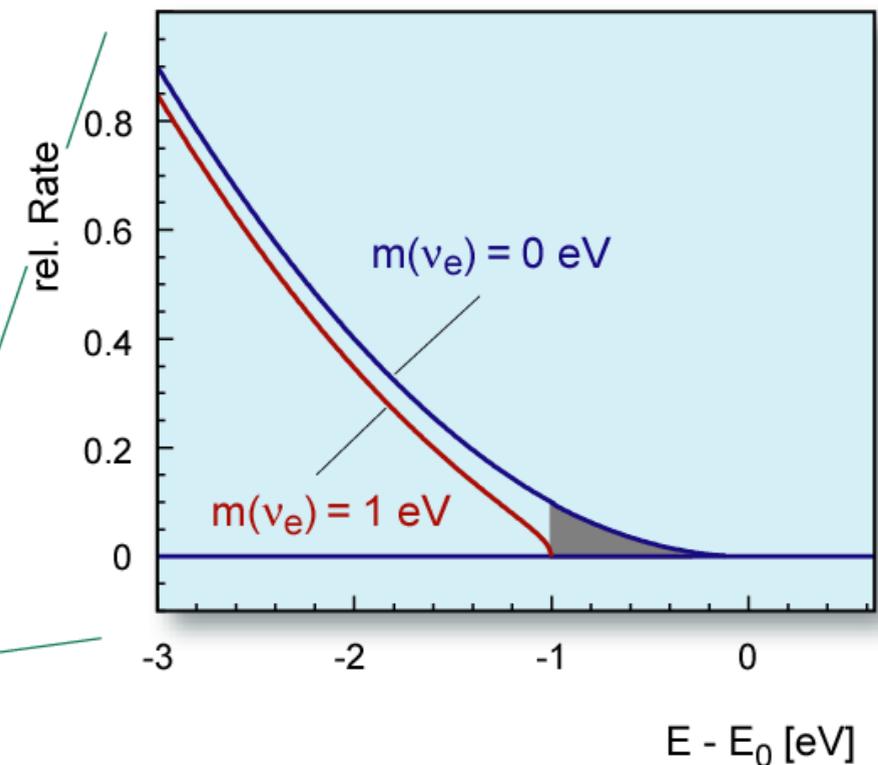
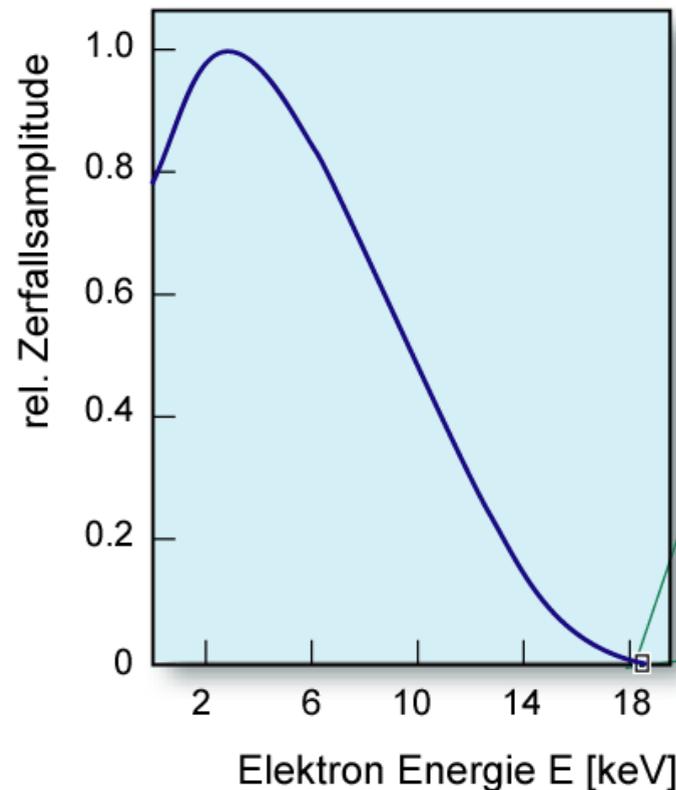
- β -Zerfallskinetik am Endpunkt E_0 : modellunabhängige Messung von $m(\nu_e)$
- basiert nur auf **kinematischen Größen & Energieerhaltung**

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



${}^3\text{H}$: über-erlaubt

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



Neutrinomasse – experimentelle Methoden

Kinematik β -Zerfall
absolute ν -Masse: m_ν

modellunabhängig

Status: $m_\nu < 2.3 \text{ eV}$

Potenzial: $m_\nu = 200 \text{ meV}$

KATRIN, (MARE)

Suche nach $0\nu\beta\beta$
eff. Majoranamasse $m_{\beta\beta}$

modellabhängig (CP)

Status: $m_{\beta\beta} < 0.35 \text{ eV}$, Evidenz?

Potenzial: $m_{\beta\beta} = 20\text{-}50 \text{ meV}$

GERDA, EXO, CUORE

**Neutrinomassen-
experimentelle Techniken**

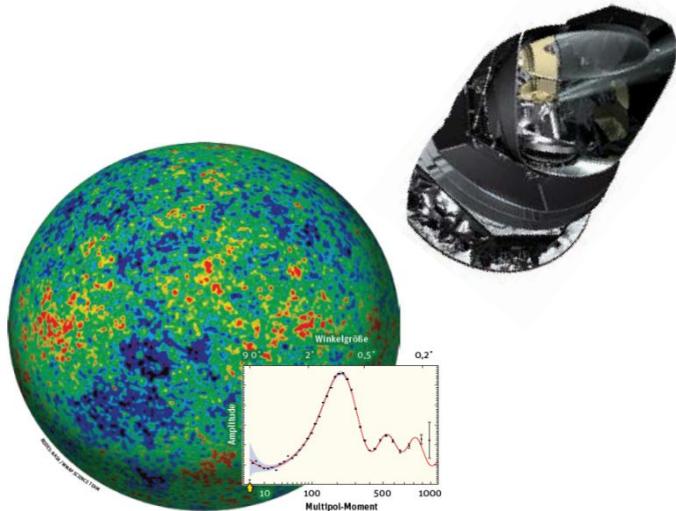
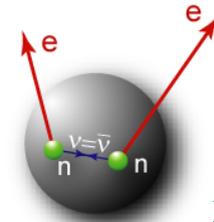
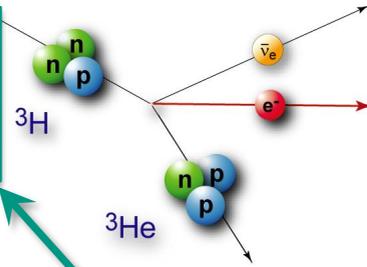
Kosmologie
Summe Σm_i , HDM Ω_ν

modellabhängig (Multiparameter)

Status: $\Sigma m_i < 0.6 - 2 \text{ eV}$

Potenzial: $\Sigma m_i = 20\text{-}50 \text{ meV}$

Planck, Gravitationslinseneffekte

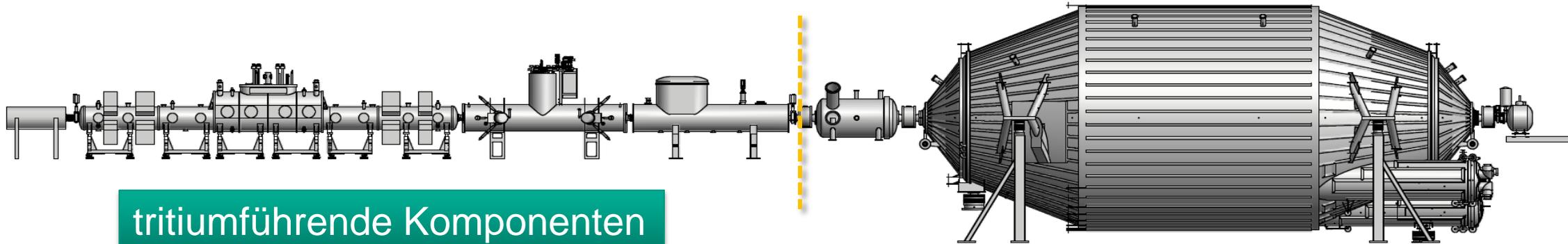


KATRIN Experiment - Überblick

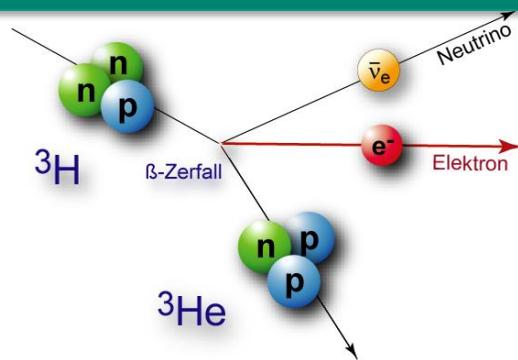


■ ultrapräzise β -Spektroskopie von T_2 :

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

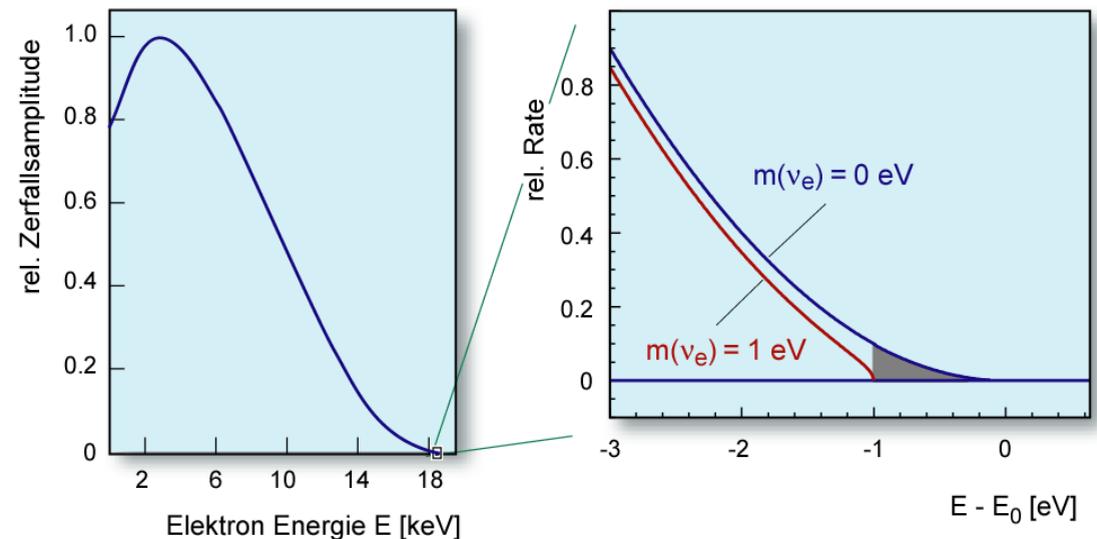


tritiumführende Komponenten

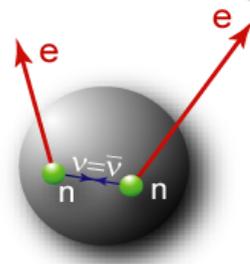


elektrostat. Spektrometer & Detektor

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



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

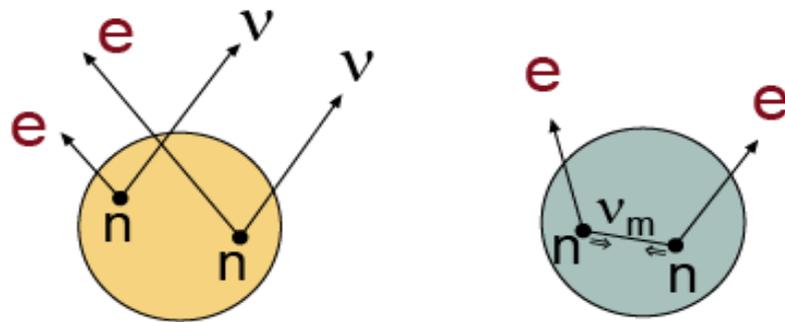


- **neutrino-behafteter Doppelbetazerfall ($2\nu\beta\beta$):** Prozess der schwachen Wechselwirkung in 2. Ordnung \hookrightarrow extrem geringe Reaktionsrate & lange Halbwertszeiten $T_{1/2} \sim 10^{19} - 10^{21}$ Jahre, E_0 teilt sich auf 4 Leptonen auf

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

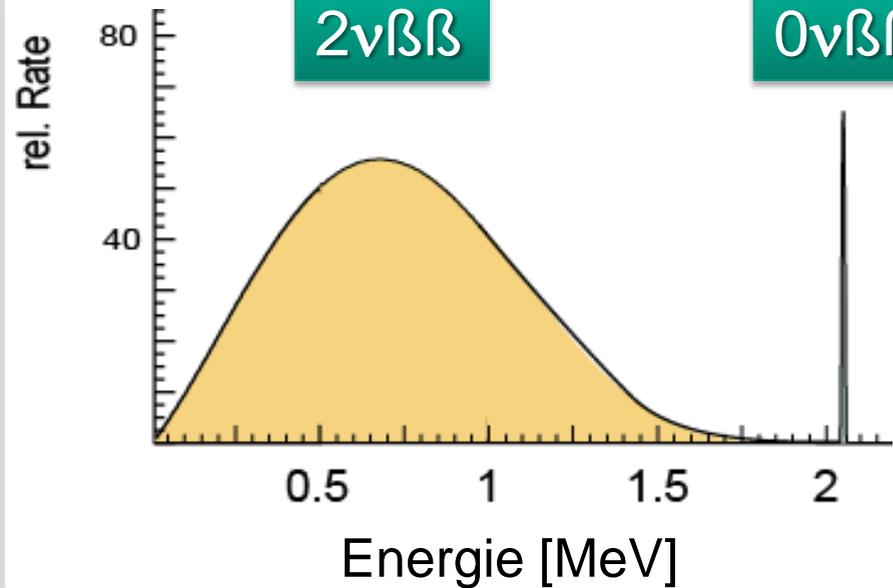
bisher beobachtet in 9 Isotopen !

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



$2\nu\beta\beta$

$0\nu\beta\beta$



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



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



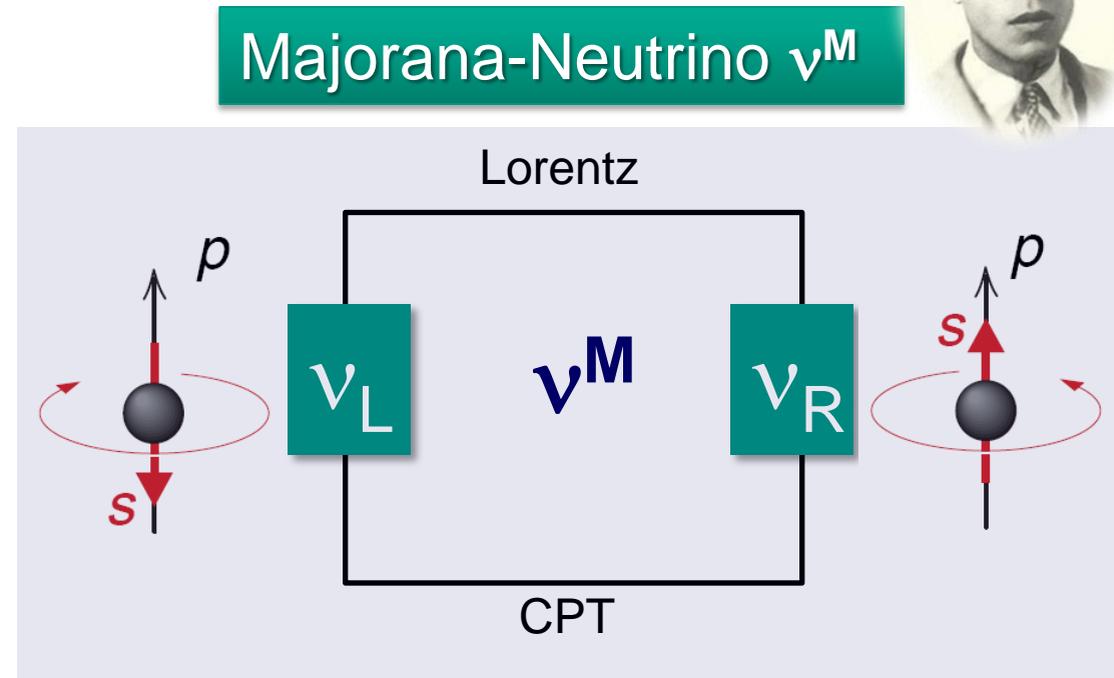
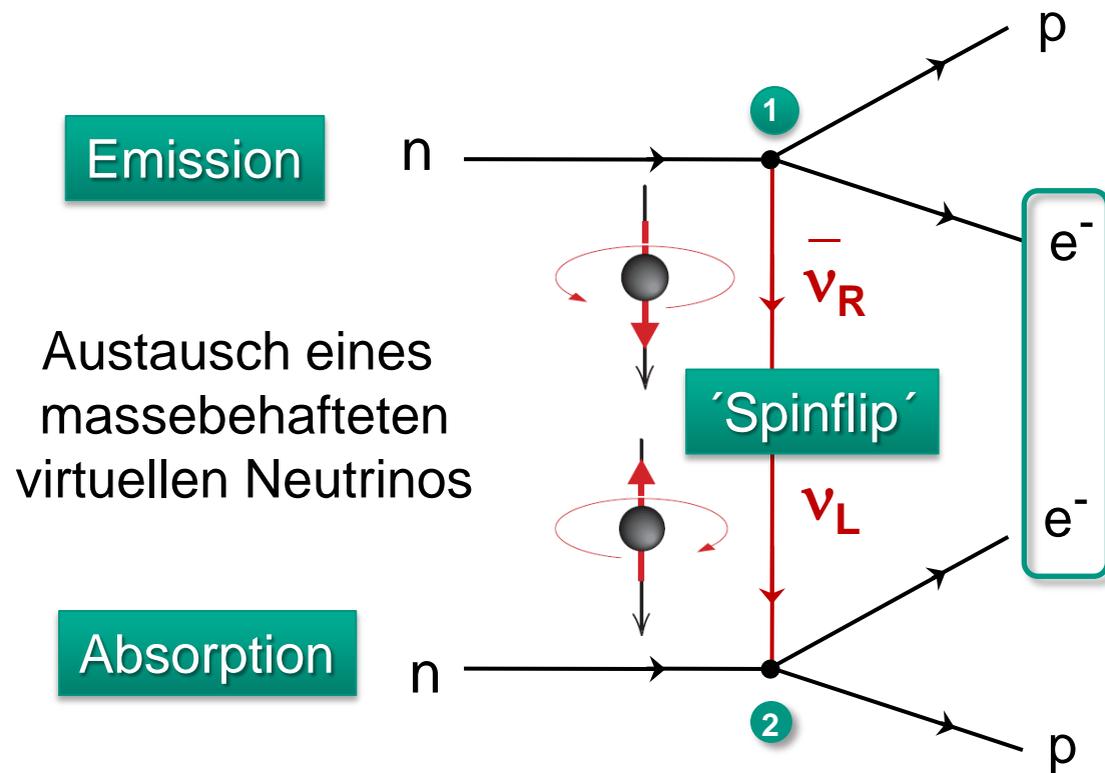
Doppelbetazerfall – $0\nu\beta\beta$ Mechanismus

- **neutrinoloser $\beta\beta$ -Zerfall ($0\nu\beta\beta$):** im Standardmodell verboten, da $\Delta L = 2$ (Leptonenzahlverletzung), $0\nu\beta\beta$ nur möglich falls **Neutrino = Majoranateilchen ($\nu = \bar{\nu}$)**

Vertex 1: Emission als RH Anti-Neutrino $\bar{\nu}_e$ aus Neutron-Zerfall

Vertex 2: Absorption als LH Neutrino ν_e an einem Neutron

ausgetauschtes massebehaftetes Majorana- $\nu = \text{virtuelles Teilchen!}$

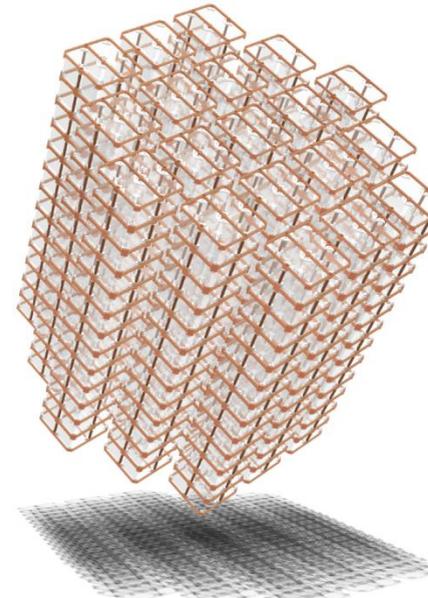
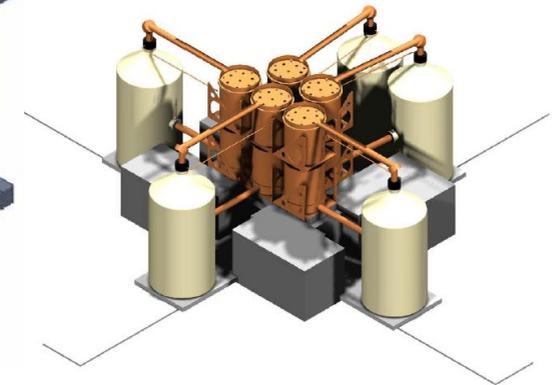
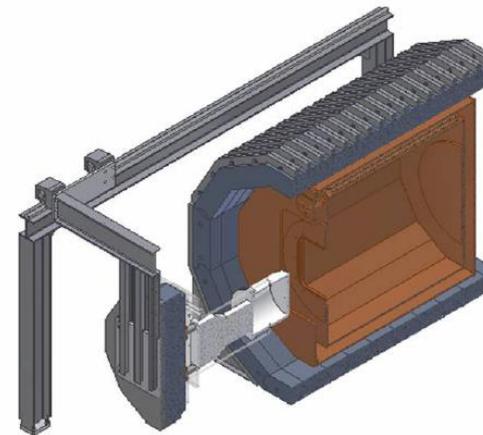


Doppelbetazerfall – Targetkerne

Suche nach $0\nu\beta\beta$ events & $\Delta L=2$

- Liste von $\beta\beta$ -Isotopen zur Suche nach $0\nu\beta\beta$:
Übergangs-Q-Wert & natürlicher Isotopenanteil

$\beta\beta$ -Zerfall	Q-Wert [MeV]	Anteil [%]
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.271	0.187
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2.040	7.8
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.995	9.2
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3.350	2.8
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3.034	9.6
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2.013	11.8
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.802	7.5
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2.228	5.64
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.530	33.8
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.479	8.9
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3.367	5.6





"QUARKS, NEUTRINOS, MESONS. ALL THOSE DAMN PARTICLES
YOU CAN'T SEE. THAT'S WHAT DROVE ME TO DRINK.
BUT NOW I CAN SEE THEM!"

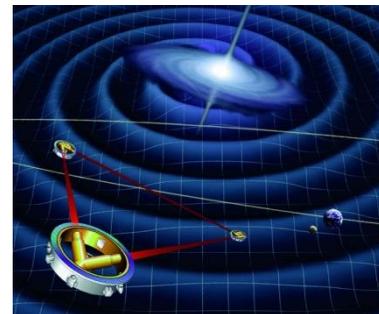
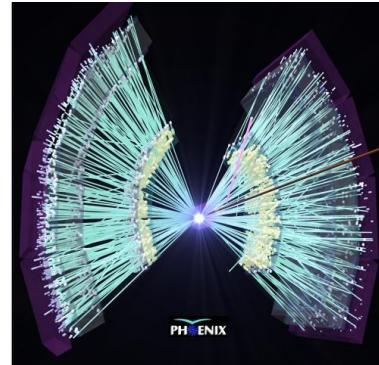
11. Querverbindungen & Ausblick

- seit wenigen Jahren:
neue Arbeitsgebiete an der Schnittstelle
von Kernphysik, Teilchenphysik,
Astrophysik & Kosmologie

- **Nukleare Astrophysik**

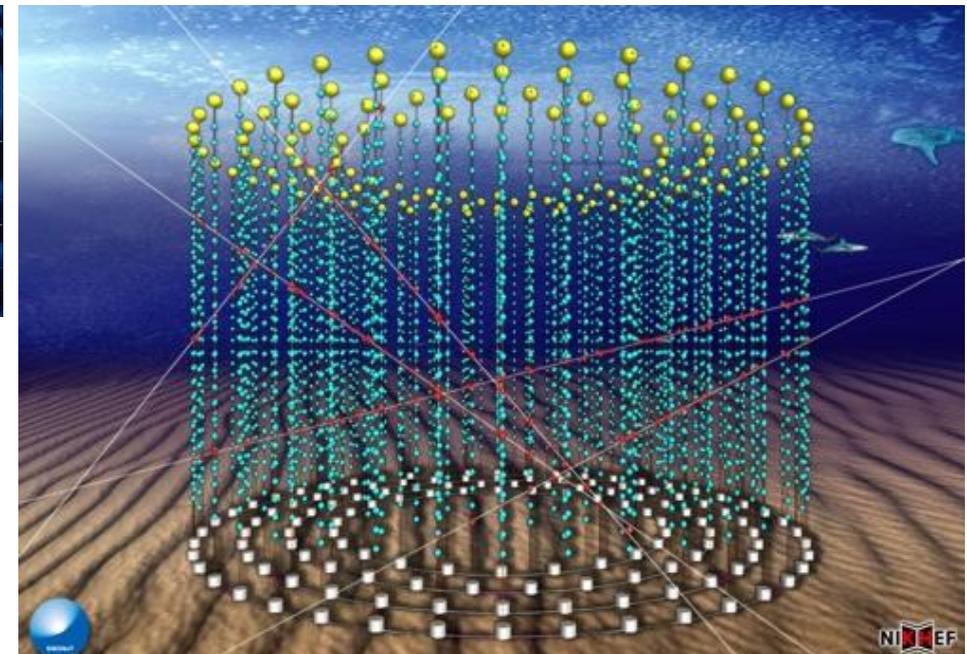
Schnittstelle von Kernphysik,
Astrophysik & Kosmologie:

- Nukleosynthese-Reaktionen
- Quark Gluon Plasma

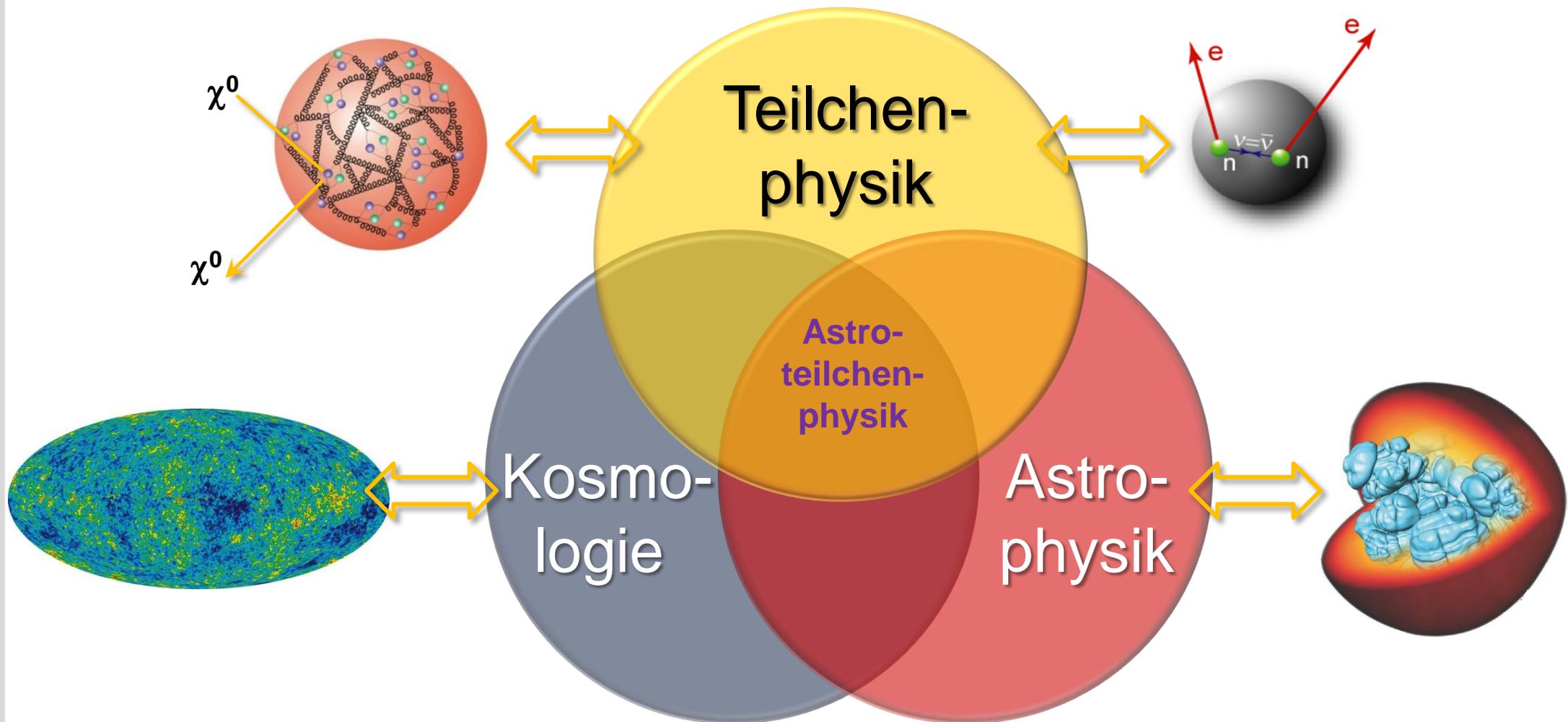


- **Astroteilchenphysik**

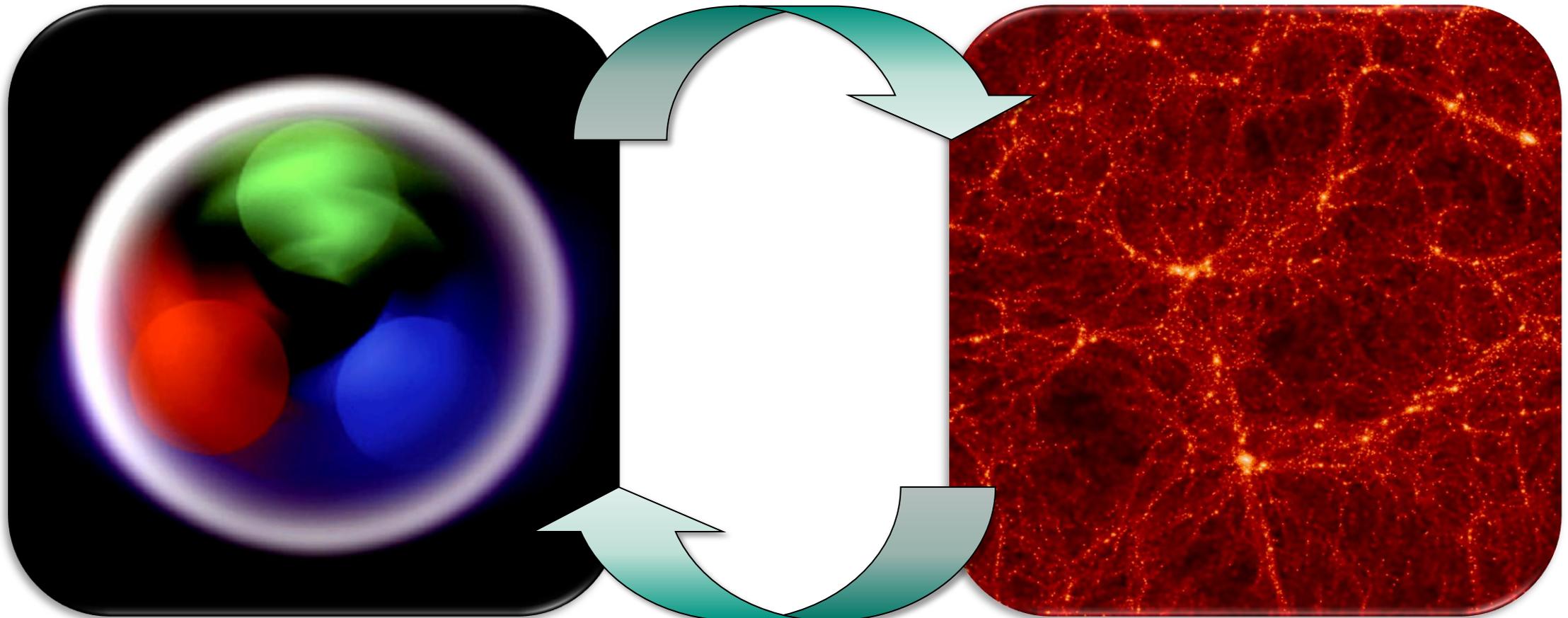
Schnittstelle von Teilchenphysik,
Astrophysik & Kosmologie:
 ν -Massen, kosmische Strahlung,
dunkle Materie, ν -Astronomie,...



Astroteilchenphysik =
Verbindung zwischen Mikro- und Makrokosmos



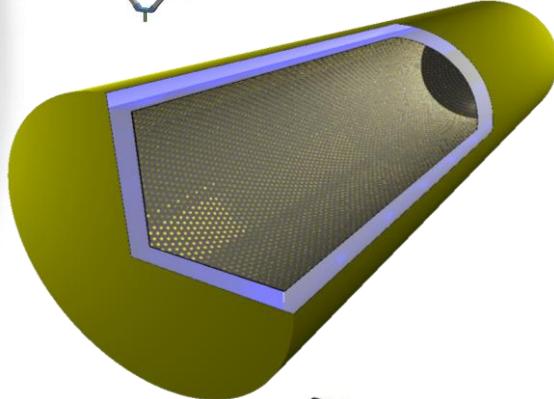
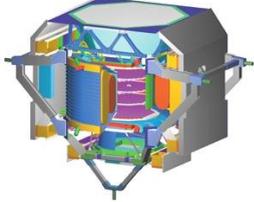
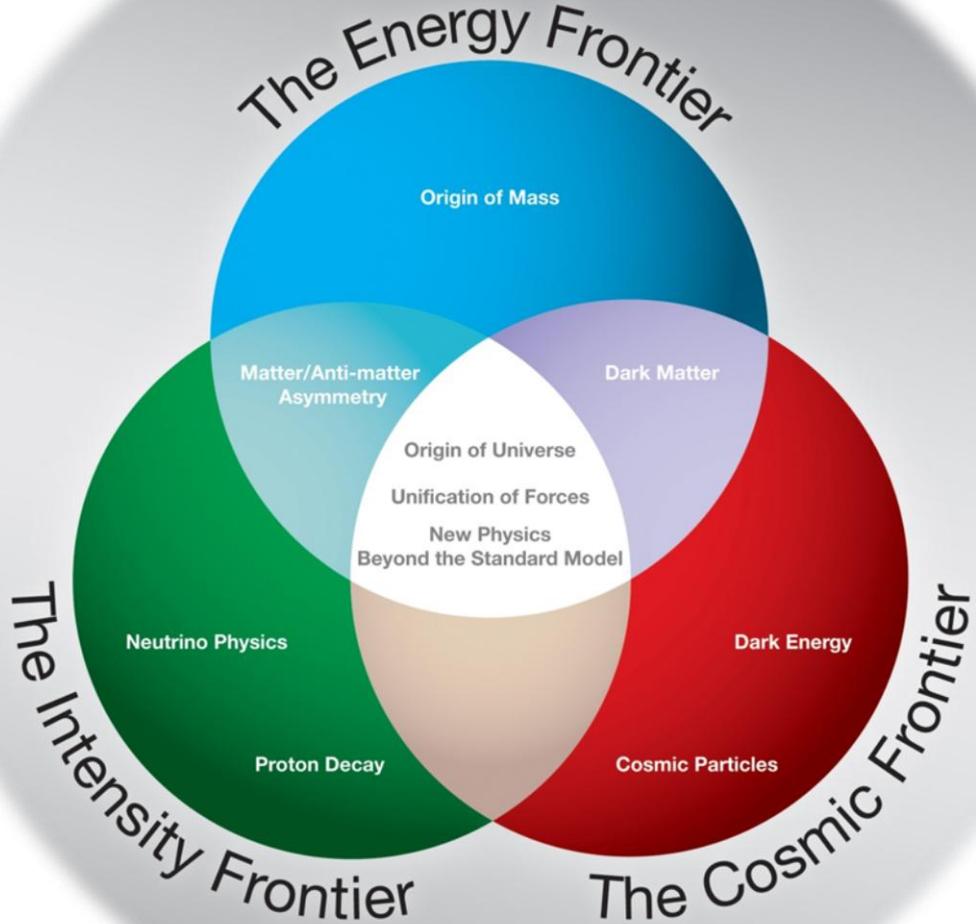
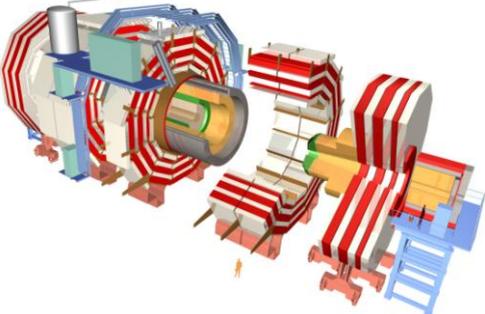
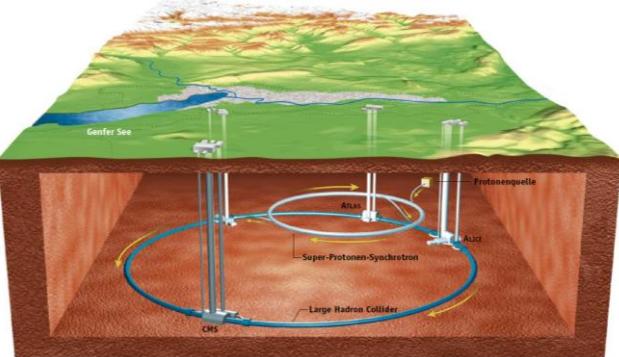
Astroteilchenphysik =
Verbindung zwischen Mikro- und Makrokosmos
...von den Quarks zum Kosmos...



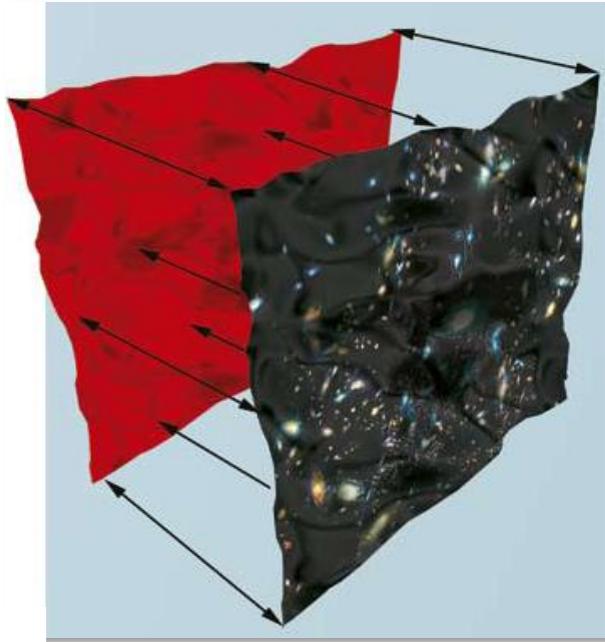
3 Quarks in einem Proton

10^{11} Galaxien im Kosmos

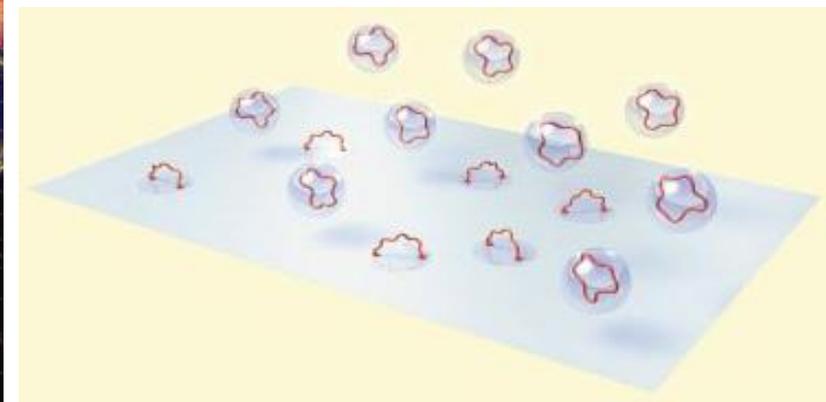
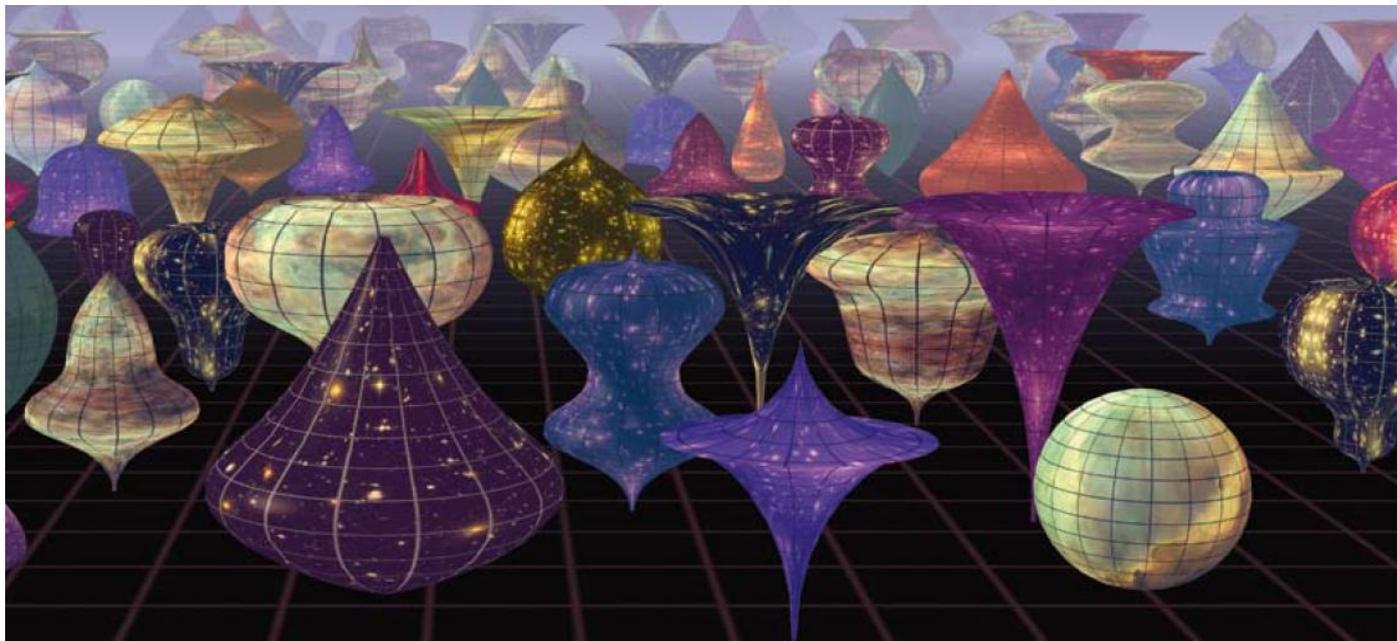
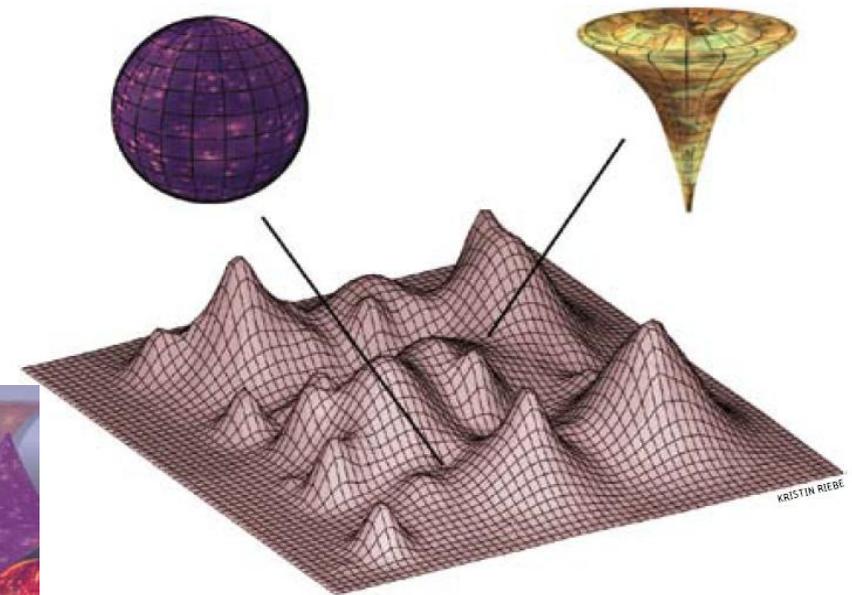
Zukünftige Fragestellungen



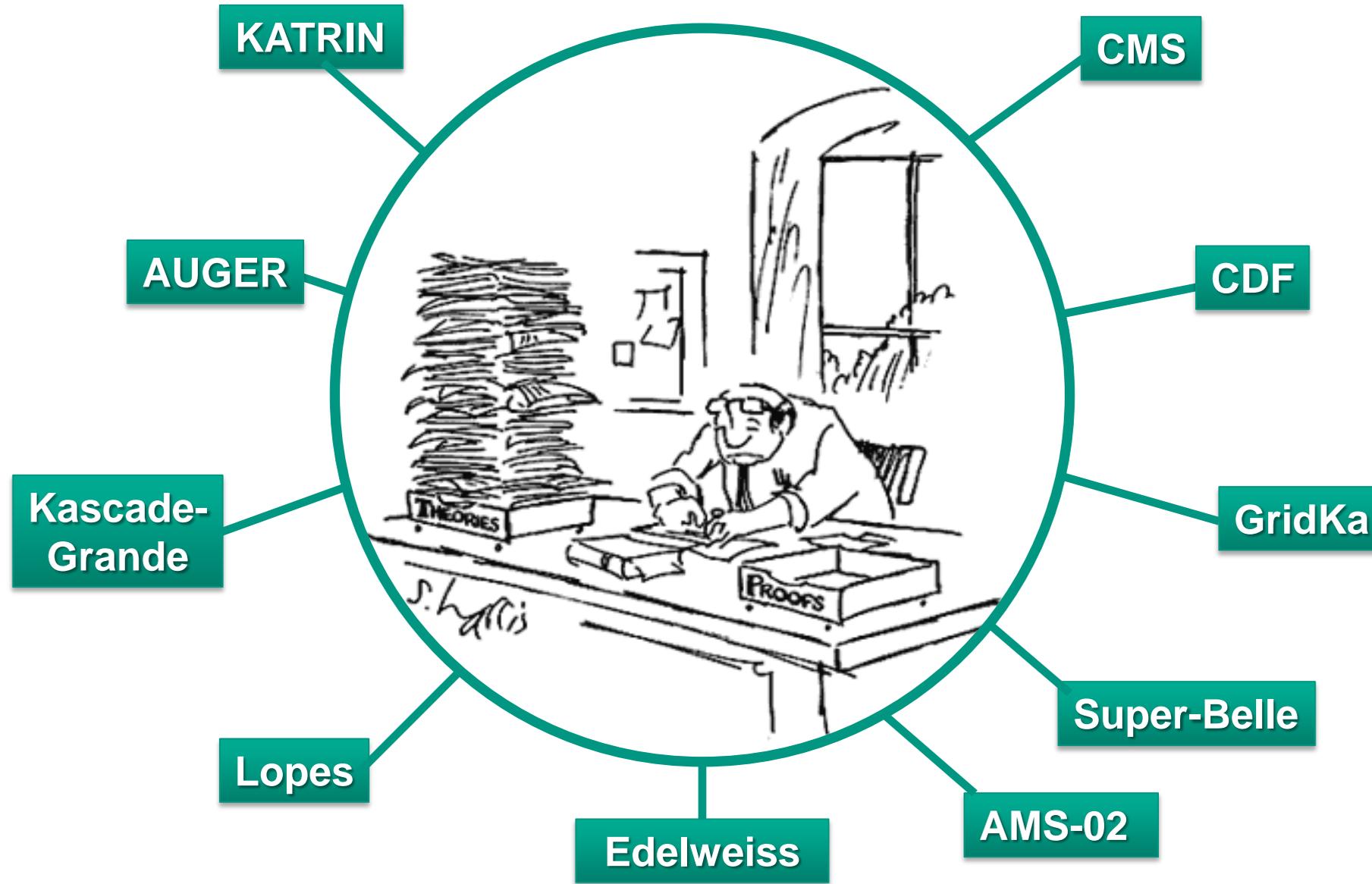
Stringtheorie & die „Landscape“



- **Vakuumzustand der Stringtheorie:** $\sim 10^{500}$ unterschiedliche Vakua-Zustände als mögliche Erklärung des 'fine-tunings' der Kopplungskonstanten?
 - **Universum oder Multiversum?**



Theorie (ITP, TTP) und Experiment (IEKP)



Kerne & Teilchen – es geht weiter...



Super-LHC, ILC, ν -Massen, CP & L-Verletzung, dunkle Materie, dunkle Energie, Leptogenese