

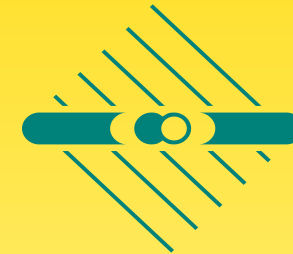
# Massive Neutrinos: Theory und Phänomenologie



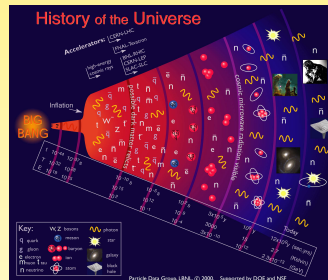
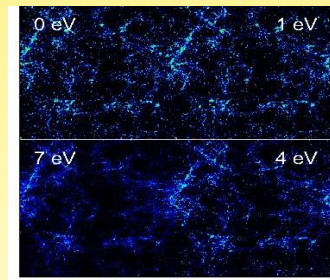
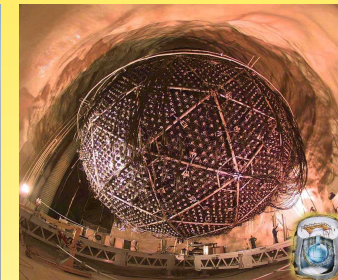
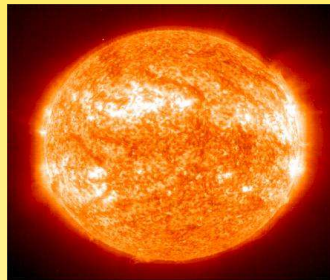
MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

WERNER RODEJOHANN  
PIZZA NIGHT

02/11/09



MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR KERNPHYSIK





- **ERC:** European Research Council, gegründet 2007 von der EU, finanziert durch das 7. Forschungsrahmenprogramm der EU, 7.5 Mrd. Euro für 7 Jahre
- “to support investigator-driven frontier research”
- 2 Arten von Grants: Starting Grants und Advanced Grants
- erste Ausschreibung 2007/08: 9200 Bewerber, 299 erfolgreich (2 in Teilchentheorie), davon etwa 30 in Deutschland, davon 10 bei der MPG

$m_\nu = m_L - m_D^T M_R^{-1} m_D$

**MANITOP**  
Massive Neutrinos: Investigating their  
Theoretical Origin and Phenomenology

- Start: 1.9.2008
- **MANITOP**: Massive Neutrinos: Investigating their Theoretical Origin and Phenomenology

# Max-Planck-Institut für Kernphysik



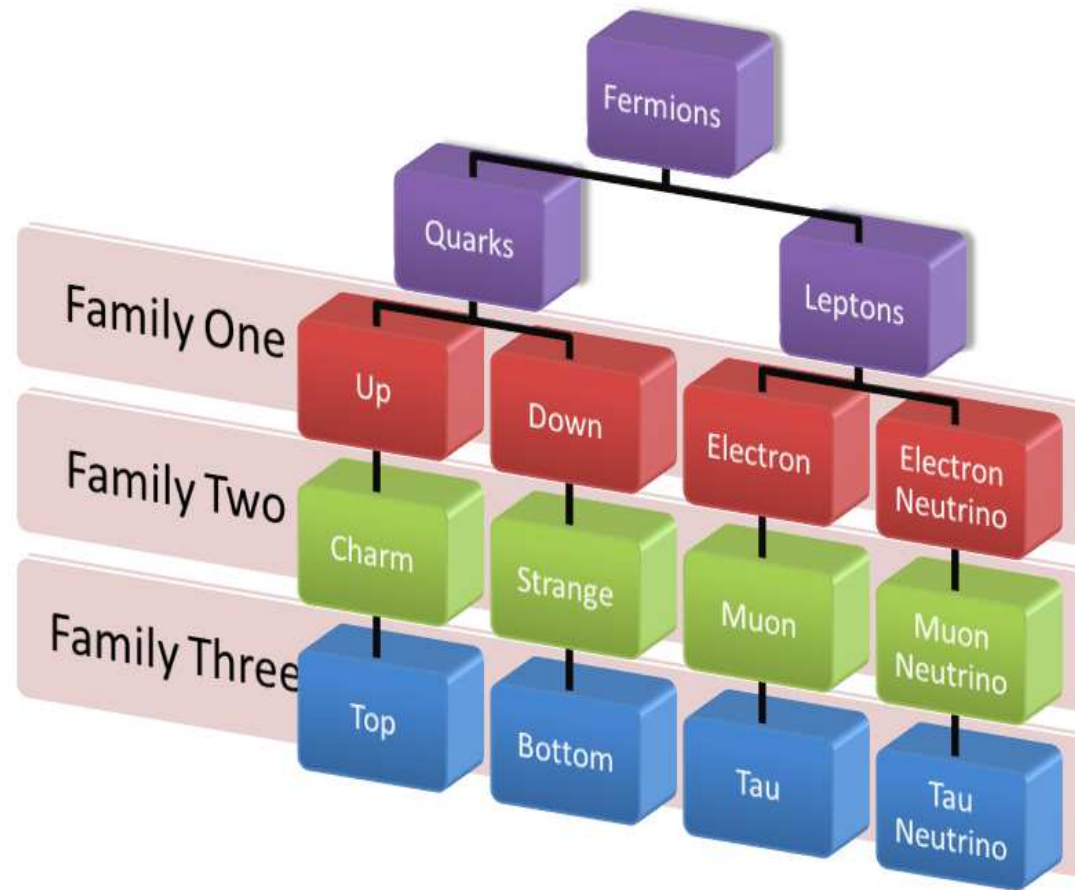
# Max-Planck-Institut für Kernphysik



- gegründet 1958
- Forschungsschwerpunkte:
  - Quantendynamik
  - Astroteilchenphysik bzw. Teilchenastrophysik
- 5 Abteilungen
- 6 Nachwuchsgruppen



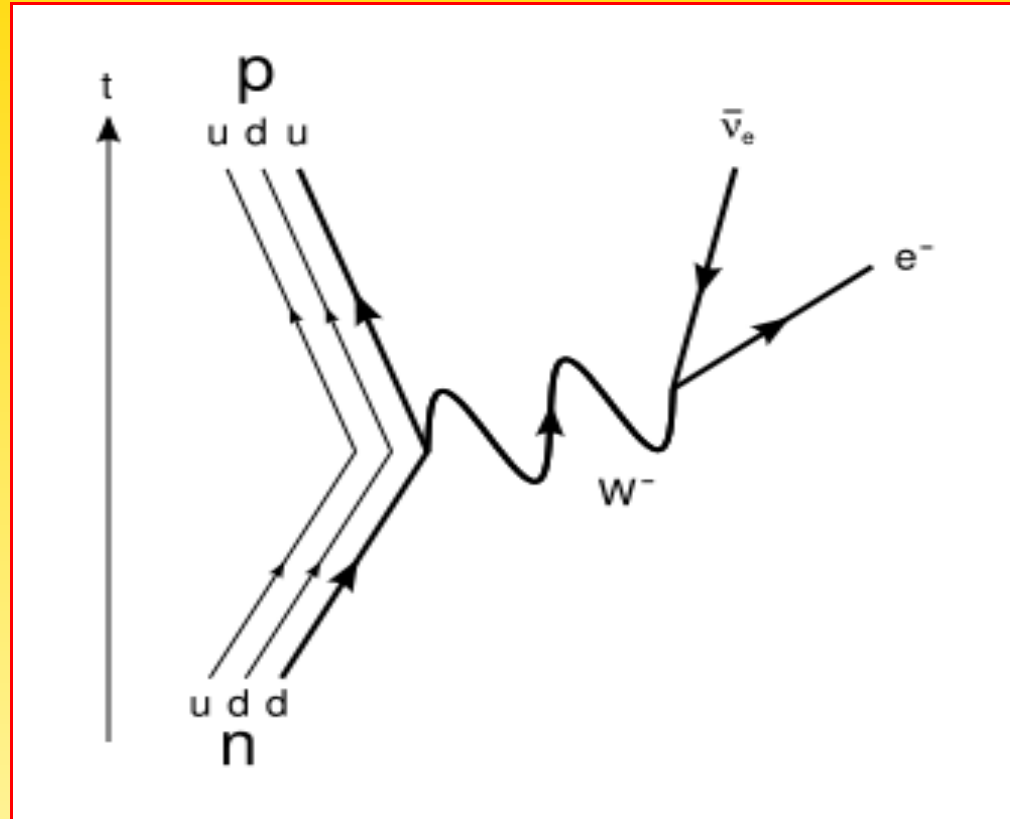
SM: Eichtheorie basierend auf  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$



SM: Eichtheorie basierend auf  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Force	Electromagnetism	Strong Nuclear Force	Gravity	Weak nuclear Force
Number of Bosons	1	<del>8</del>	1	3
Bosons	Photon	Gluon	Graviton	$W^+, W^-, Z^0$
Boson Mass	0	0	0	80
Boson Charge	0	0	0	$\pm 1$ or 0
Acts on	Anything with Charge	Anything with Colour	Anything with Mass	Any left handed particle or right handed antiparticle with Flavour





Neutron zerfällt in Proton, Elektron und **Elektron Antineutrino**

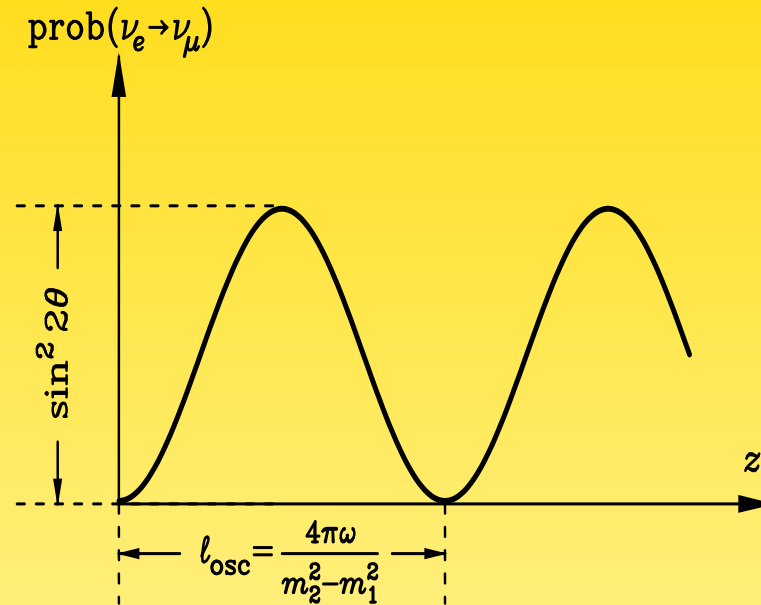
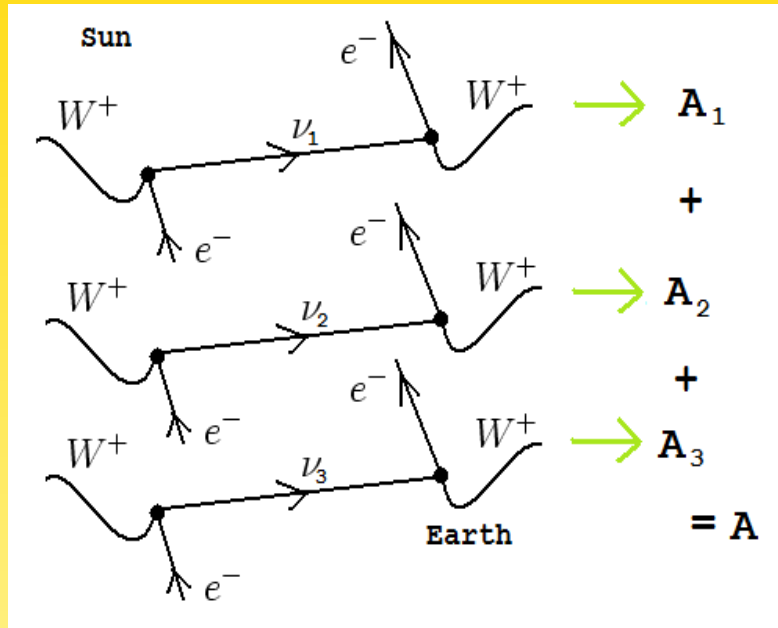
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

## Probleme des Standardmodells

Spezies	#	$\Sigma$
Quarks	10	10
Leptonen	3	13
Ladungen	3	16
Higgs	2	18

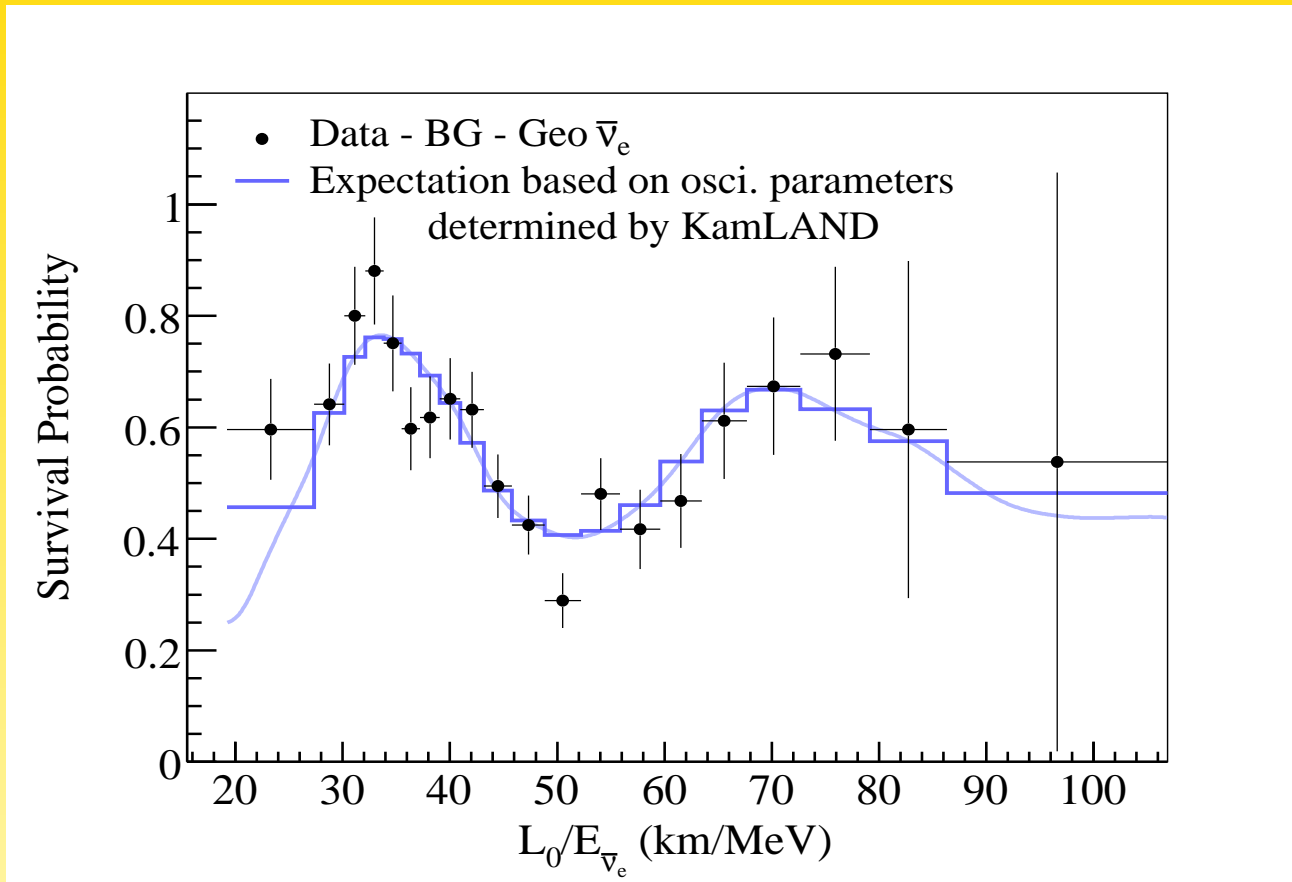
- 18 freie Parameter...
- Dunkle Materie
- Gravitation
- Dunkle Energie
- Baryon Asymmetrie
- Neutrinomasse

## Masse $\neq$ Flavor



Kann die einzelnen  $m_i$  nicht unterscheiden: kohärente Summe der Amplituden und *Interferenz*

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4E} L$$



KamLAND

## Standard Model\*

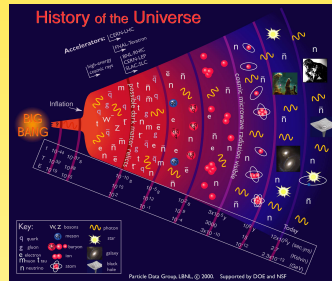
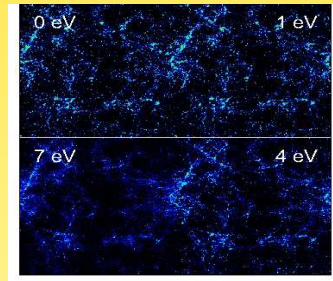
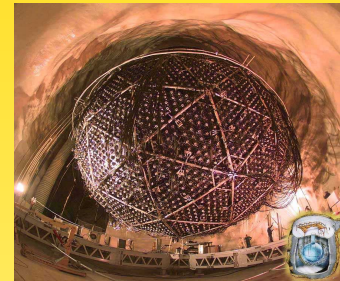
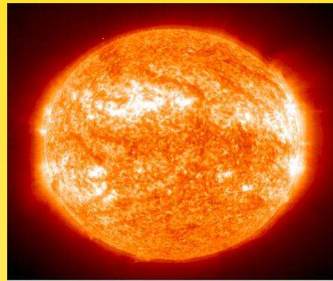
füge Neutrinomasse hinzu (und eine neue Energieskala?)

Spezies	#	$\Sigma$		Spezies	#	$\Sigma$
Quarks	10	10		Quarks	10	10
Leptonen	3	13	→	Leptonen	12	22
Ladungen	3	16		Ladungen	3	25
Higgs	2	18		Higgs	2	27

Zwei Richtungen: Higgs und **Flavor**

## Neutrinoquellen

- Sonne
- Atmosphäre
- Reaktoren
- Kosmos
  - Urknall
  - Supernovae
  - kosmische Strahlung
- Erde
- Beschleuniger



⇒ Sowohl Teilchenphysik als auch Quellenphysik!

## Ergebnisse bisher

- Neutrinos sind leicht ( $10^6 m_\nu \simeq m_e$ )
- Neutrinos mischen mit großen Winkeln:

$$|U_{\text{PMNS}}| \simeq \begin{pmatrix} 0.82 & 0.58 & 0 \\ 0.64 & 0.58 & 0.71 \\ 0.64 & 0.58 & 0.71 \end{pmatrix}$$

Quarks mischen mit kleinen Winkeln:

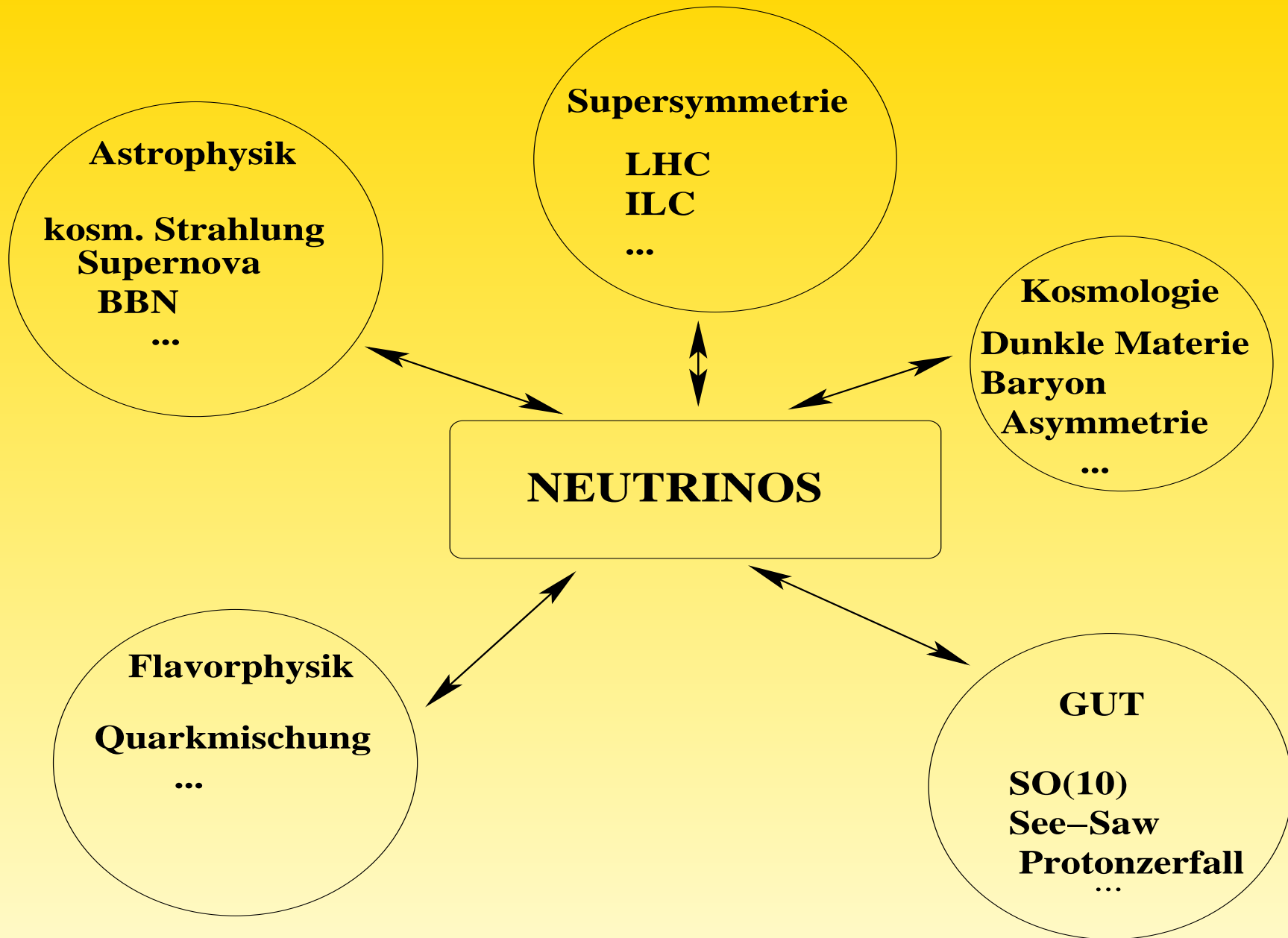
$$|V_{\text{CKM}}| \simeq \begin{pmatrix} 0.97419 & 0.2257 & 0.00359 \\ 0.2256 & 0.97334 & 0.0415 \\ 0.00874 & 0.0407 & 0.999133 \end{pmatrix}$$

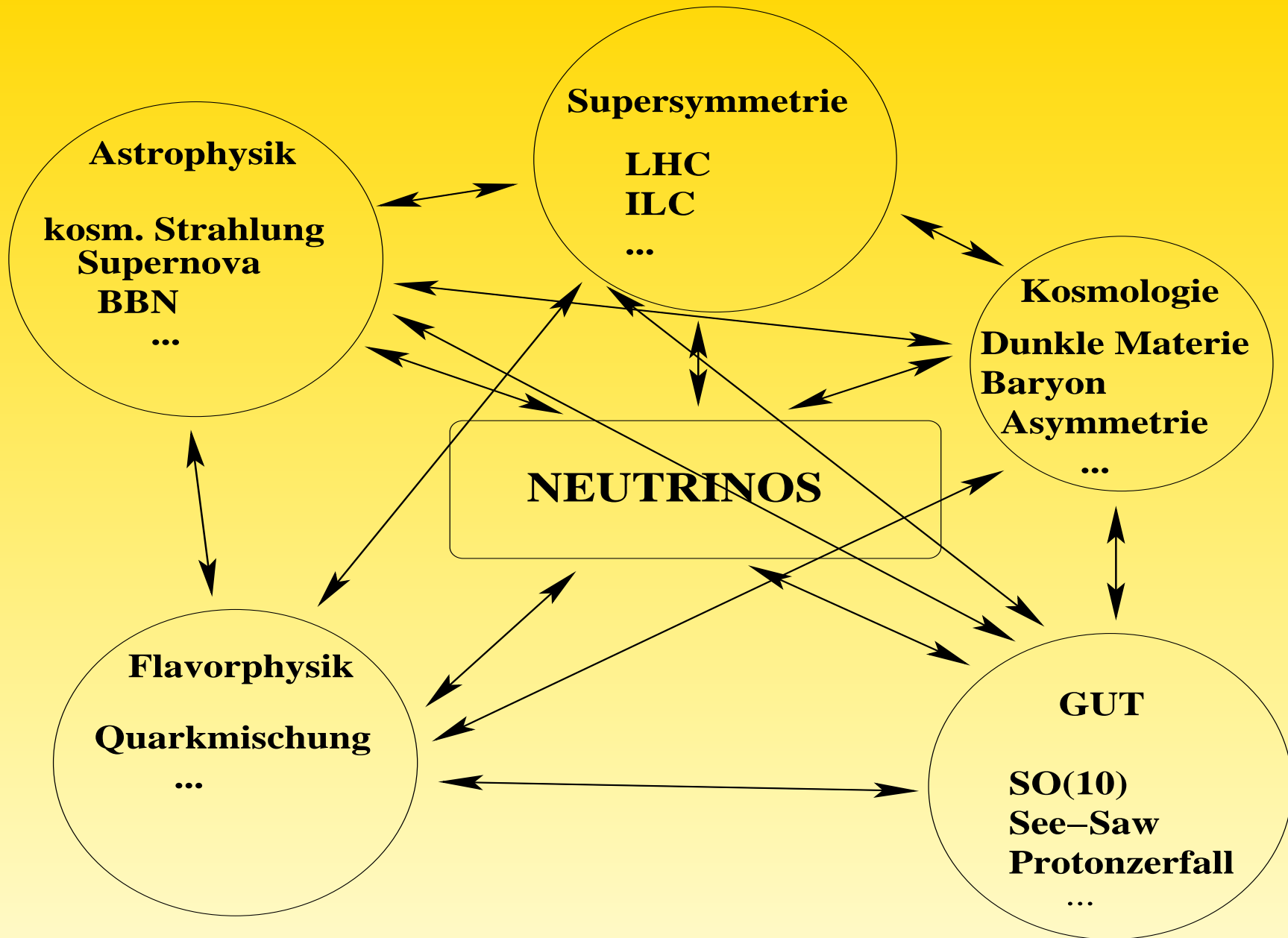




## 3 Aufgaben

- Noch unbekannte Parameter bestimmen!
- Unerwartetes Mischungsverhalten erklären!
- Winzigkeit der Neutrinomassen erklären!



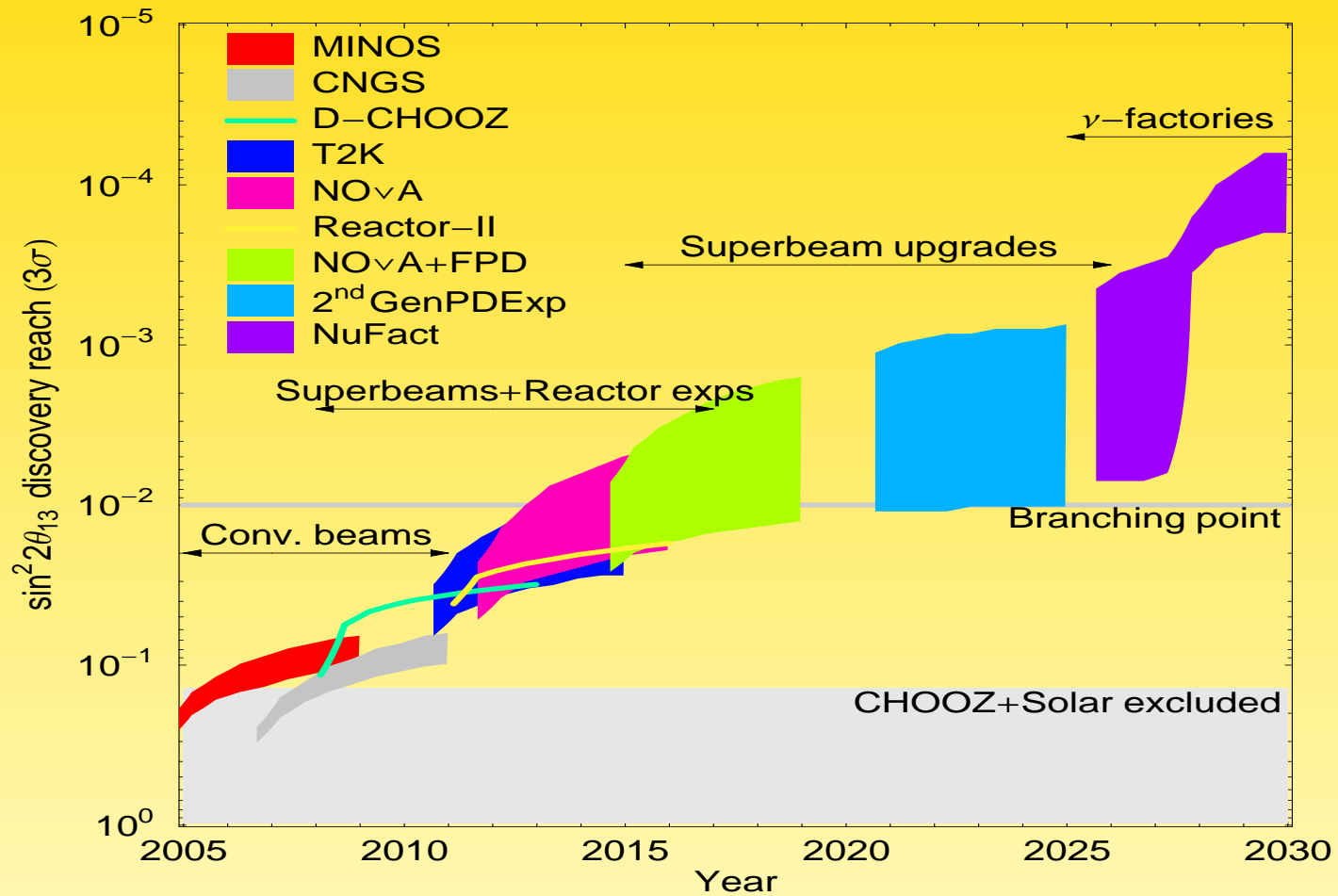


## Mischungsszenario?

$$|U_{\text{PMNS}}| \simeq \begin{pmatrix} 0.82 & 0.58 & 0 \\ 0.64 & 0.58 & 0.71 \\ 0.64 & 0.58 & 0.71 \end{pmatrix} \stackrel{?}{=} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ \sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

- wie klein genau?
- wirklich so einfach?

# Zeitskala









## Flavorsymmetrien

⟷ neue (Flavor-, horizontale) Symmetrien!?

- $U(1), SU(2), SU(3), \dots$
- $S_2, S_3, \dots$
- $A_4, D_4, D_5, D_{14}, \mathcal{PSL}_2(7), 'T, \dots$
- $\Delta(27), \Sigma(81), \dots$

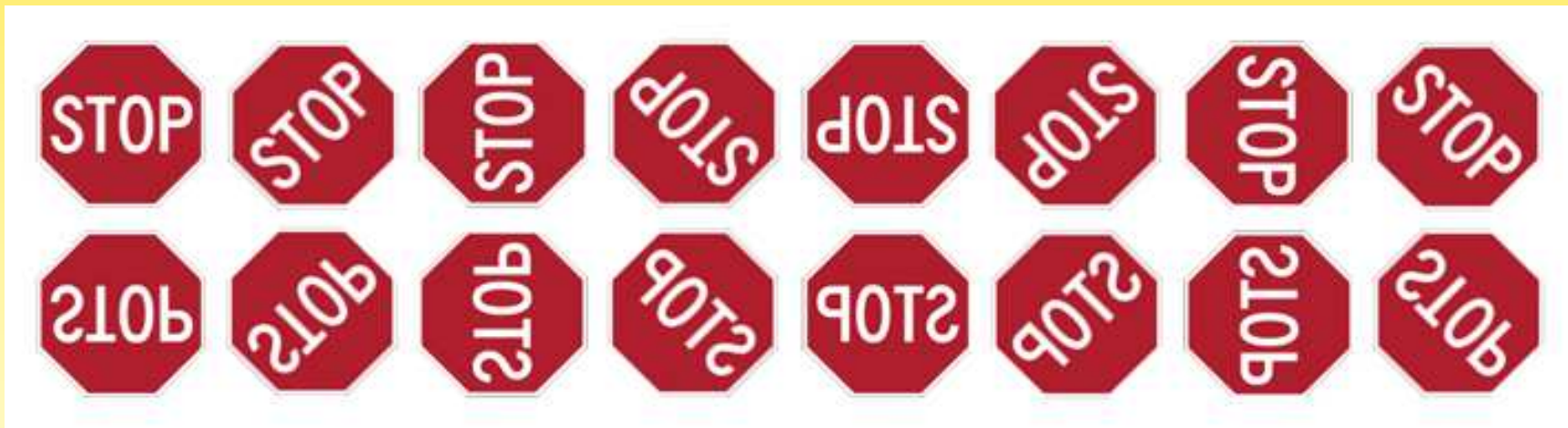
Oft: geometrische Interpretation

## Flavorsymmetrien

↔ neue (Flavor-, horizontale) Symmetrien!?

- $U(1), SU(2), SU(3), \dots$
- $S_2, S_3, \dots$
- $A_4, D_4, D_5, D_{14}, \mathcal{PSL}_2(7), 'T, \dots$
- $\Delta(27), \Sigma(81), \dots$

Oft: geometrische Interpretation:



## 3 Aufgaben

- Noch unbekannte Parameter bestimmen!
- Unerwartetes Mischungsverhalten erklären!
- Winzigkeit der Neutrinomassen erklären!

## Ein Mechanismus für kleine Neutrinomassen

- Große Vereinheitlichte Theorien besitzen “schwere Neutrinos”
- können an leichte Neutrinos koppeln
- einziger Effekt heute: schwaches “Echo” in


$$m_\nu = m_{\text{SM}} \frac{m_{\text{SM}}}{M_R} \ll m_{\text{SM}}$$

## See-Saw Mechanismus

**SEE  
SAW**



$\nu$

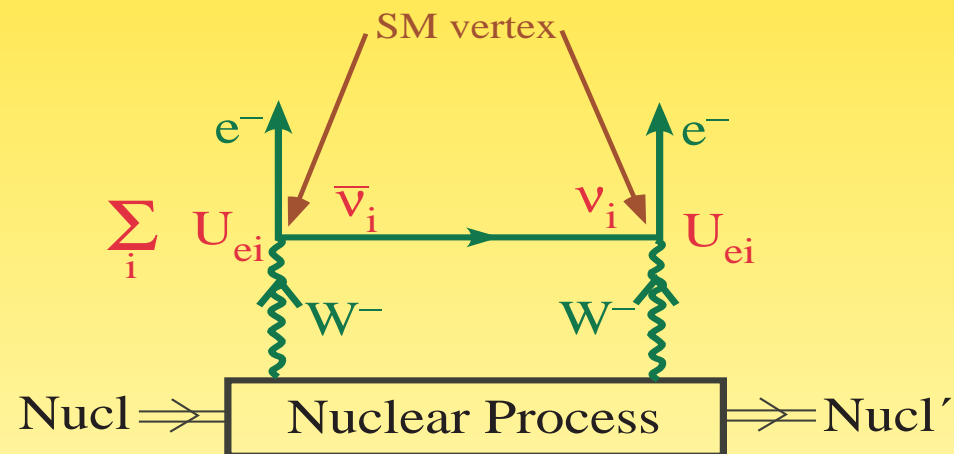
$$m_\nu = m_L - m_D^T M_R^{-1} m_D$$


**MANITOP**  
Massive Neutrinos: Investigating their  
Theoretical Origin and Phenomenology

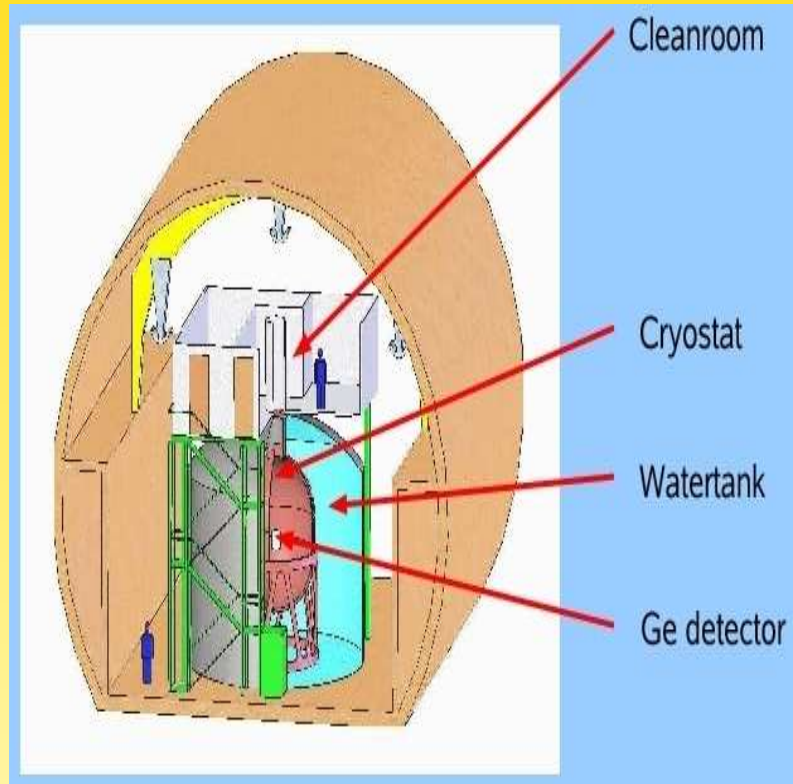
## See-Saw Mechanismus

- große Mischungswinkeln benötigen mehr theoretischen Input
- See-Saw erklärt nicht nur kleine Neutrinomassen:

**LEPTONZAHL IST VERLETZT!!**



Neutrinoloser doppelter Betazerfall





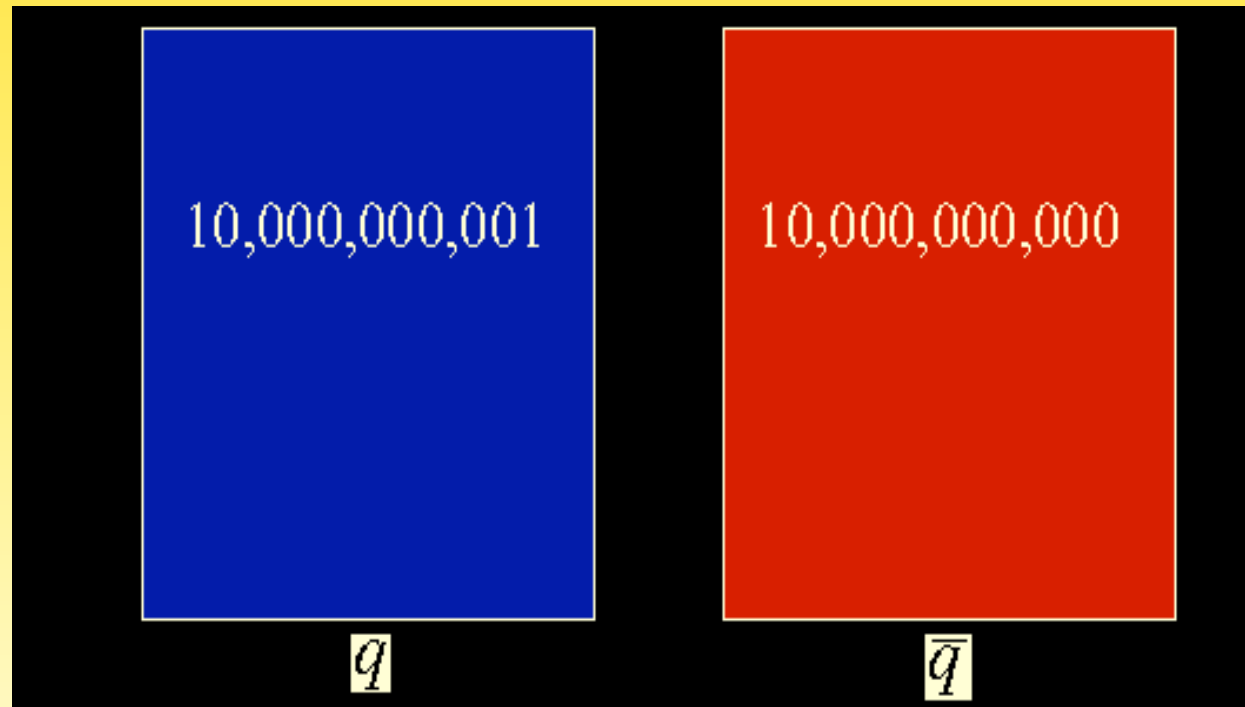


Noch'ne Konsequenz von See-Saw

## Baryon Asymmetrie

Warum gibt es Materie im Universum?

$$\eta_B = \frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 10^{-10}$$



Noch'ne Konsequenz von See-Saw

## Baryon Asymmetrie

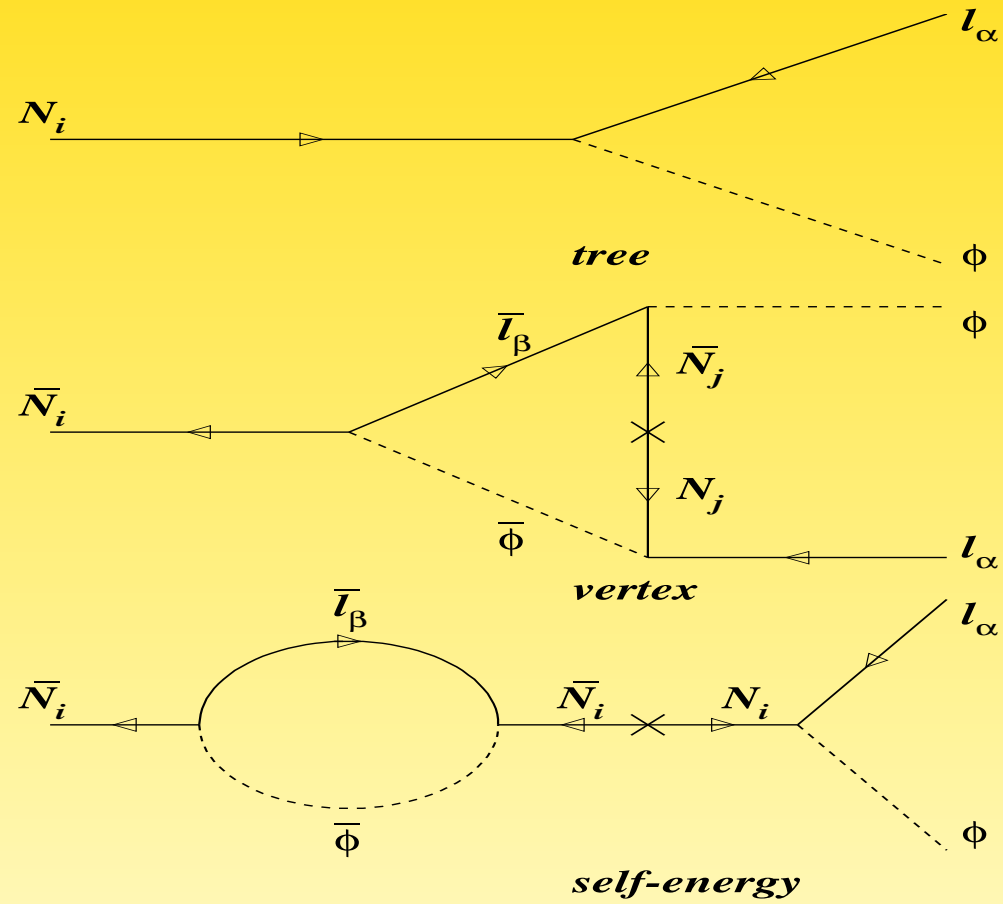
Warum gibt es Materie im Universum?

$$\eta_B = \frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 10^{-10}$$

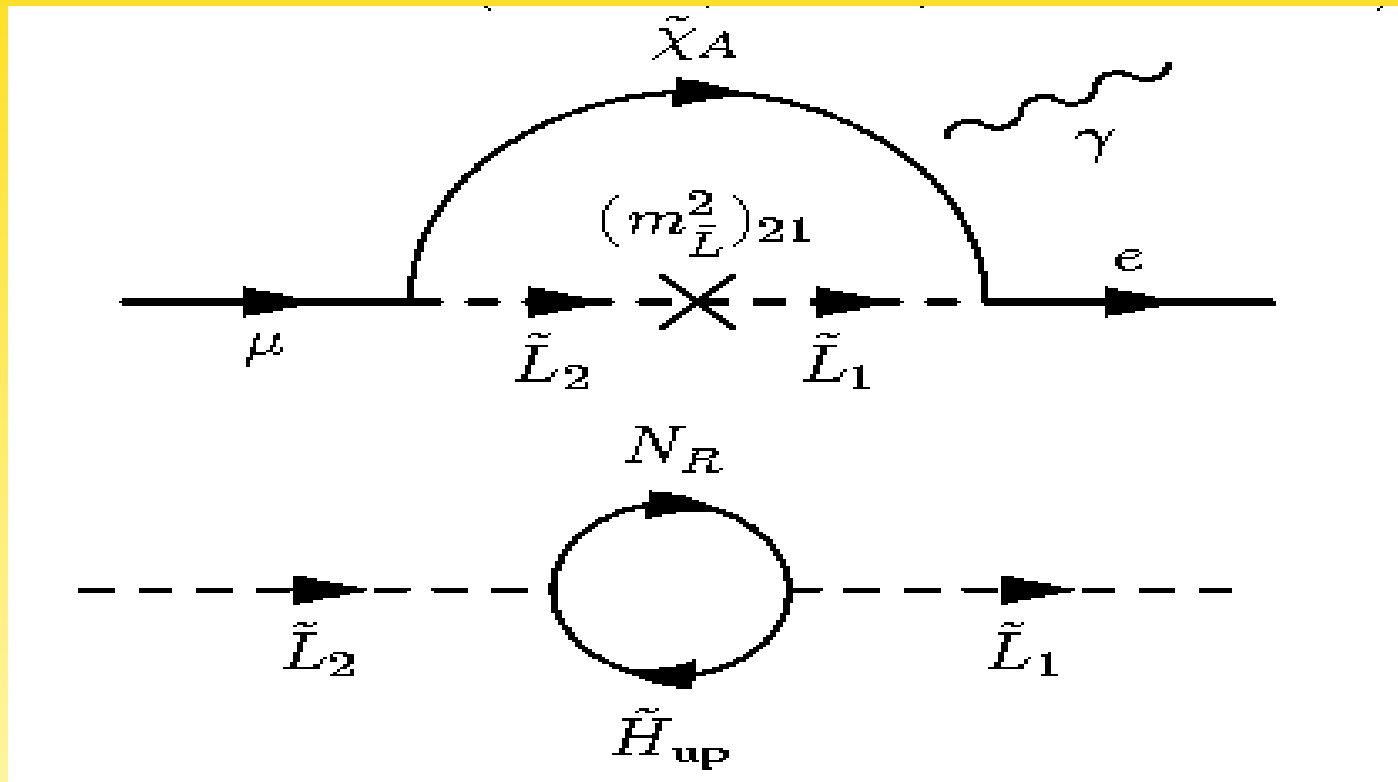
10<sup>10</sup>

1

# Leptogenesis



## Noch'ne Konsequenz von See-Saw



Lepton Flavor Verletzung, z.B.  $BR(\mu \rightarrow e \gamma) = f(\text{SUSY}, \nu)$

## Zusammenfassung

