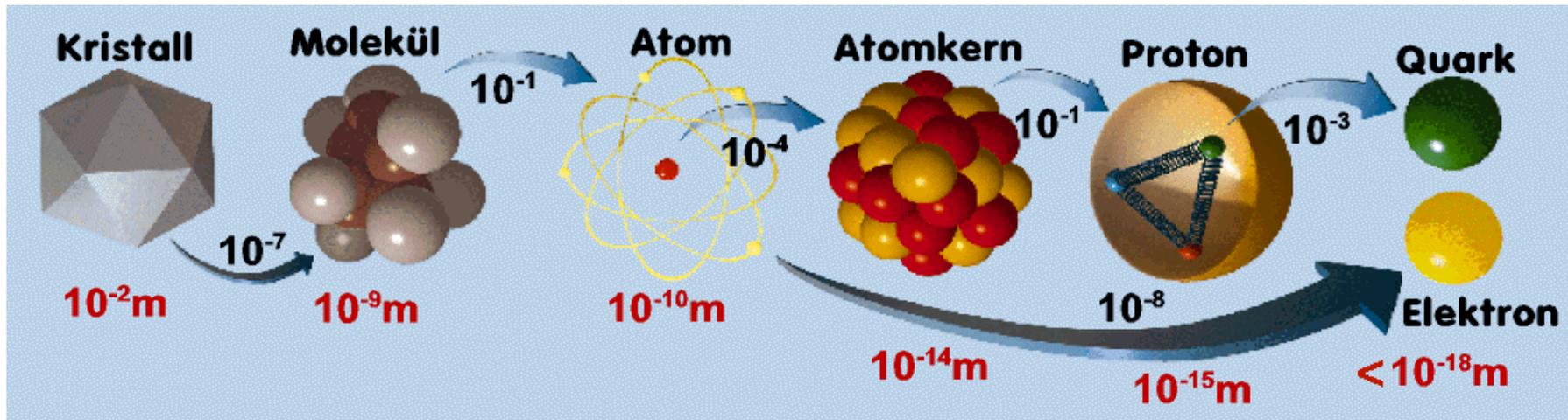


# Neutrinos und andere Geisterteilchen

M. Lindner



# Elementare Bausteine der Materie



## Bausteine der (normalen) Materie:

- Elektron  $e^-$
  - Up-Quark  $u$  und Down-Quark  $d$
- Soweit bekannt punktförmig:  $< 0.001 \text{ fm}$

## Wechselwirkungen → Kräfte, Bindungszustände

- **Elektromagnetismus** (elektrische und magnetische Felder, EM Wellen, Licht)
- **Starke Kraft** (Kernkräfte)
- **Schwache Kraft** (Radioaktivität)
- **Gravitation**

# Die theoretische Geburt der Neutrinos

## Das Bild vor 1930:

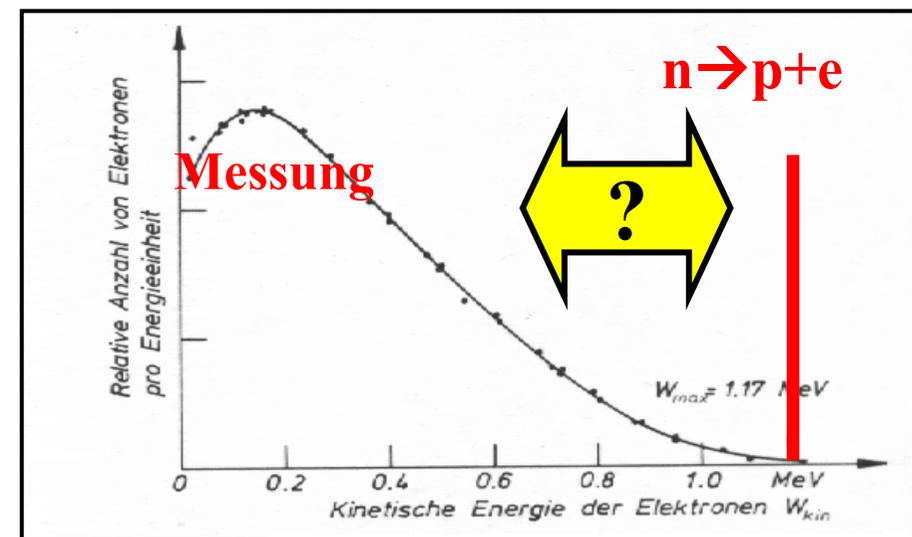
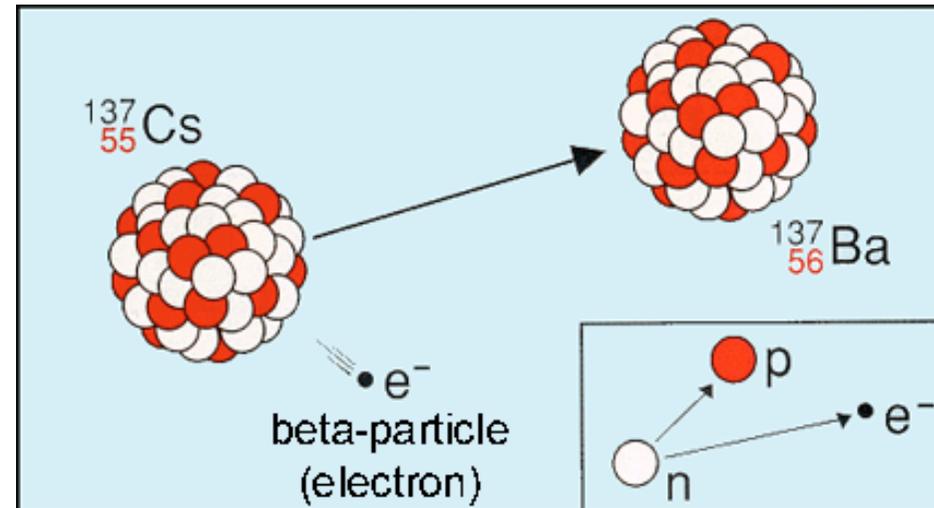
$\beta$  Zerfall von Kernen  
Neutron  $\rightarrow$  Proton +  $e^-$   
Ladungserhaltung

## Das Problem:

$n \rightarrow p + e^-$  ist ein 2 Körperzerfall  
 $\rightarrow$  Monoenergetische Linie  
Konflikt mit dem Experiment  $\rightarrow$

## Mögliche Lösungen:

- Verletzung der Energie Impuls Erhaltung???
- ....



# Der Vater der Neutrinos



## Energie-Impuls-Erhaltung!

- postulierte ein neues Teilchen, sehr leicht, Spin  $\frac{1}{2}$ , ...
- elektrisch neutral !

## Brief nach Tübingen im Dezember 1930:

Verzweflungstat: Neutrino-postulat...

- unsichtbare Geisterteilchen
- ... wird man nie nachweisen können

W. Pauli

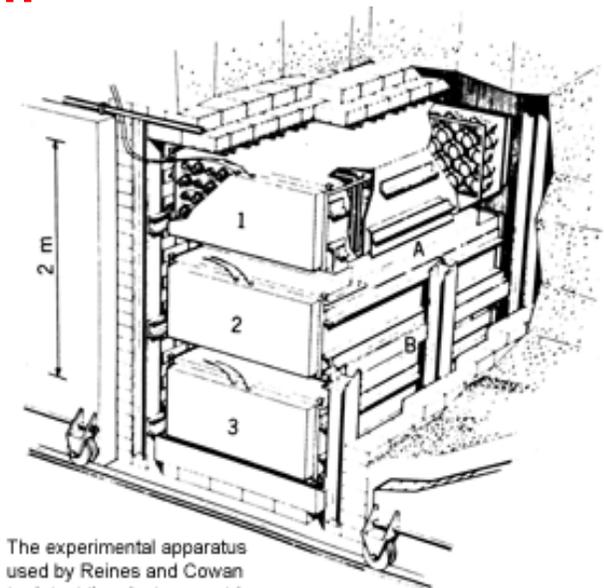
Cowen & Reines: 1954-56 Projekt "Poltergeist"

Nachweis von Reaktor-Antineutrinos

Fluss:  $10^{12}$  Neutrinos/Sekunde/mm<sup>2</sup>

→ 3 Reaktionen /h/10m<sup>3</sup> Wasser

→ Nobel Preis für Physik für F. Reines 1995



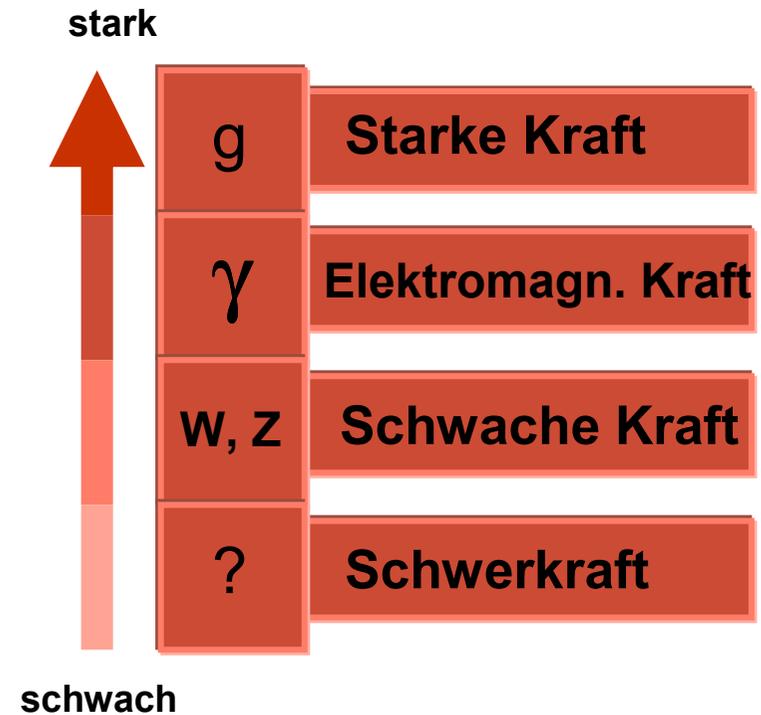
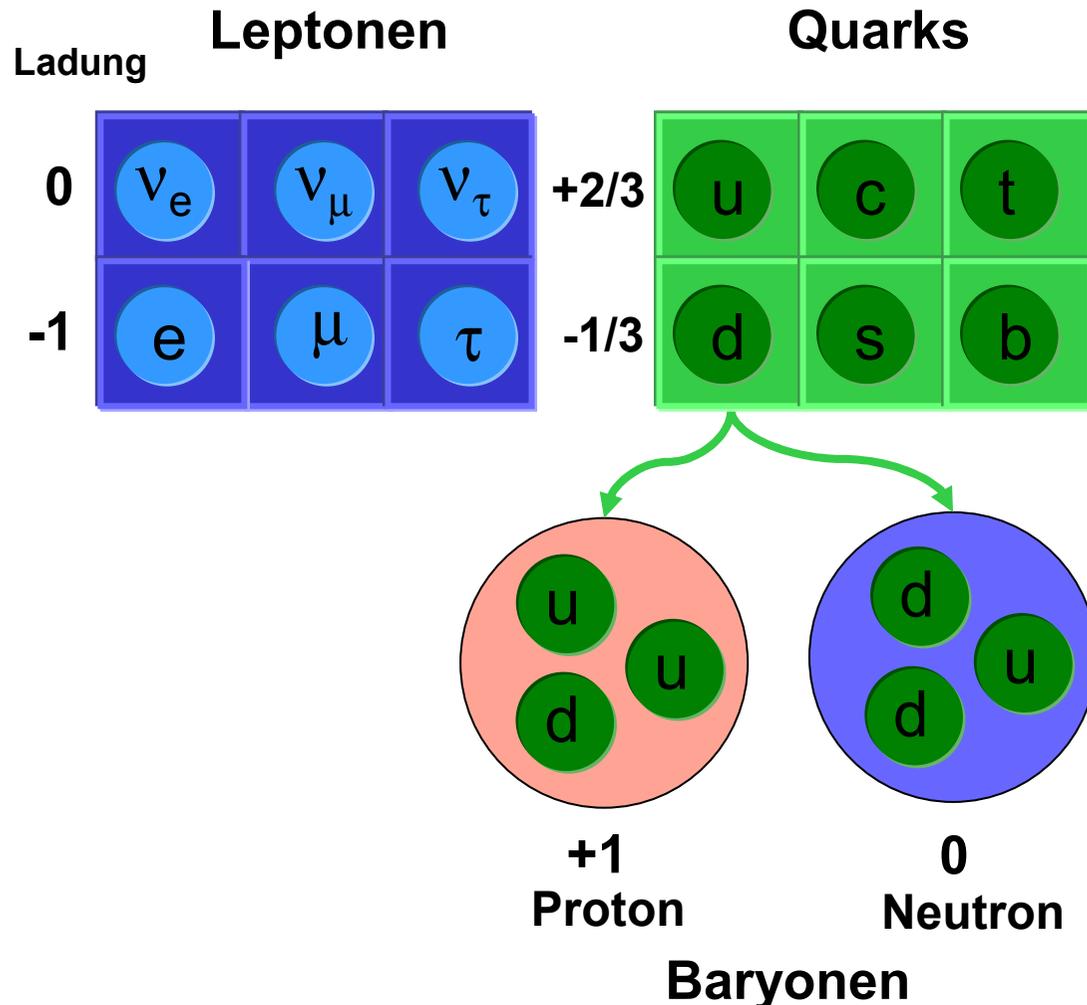
The experimental apparatus used by Reines and Cowan to detect the electron neutrino.

Heute: Große Experimente mit hoher Statistik

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

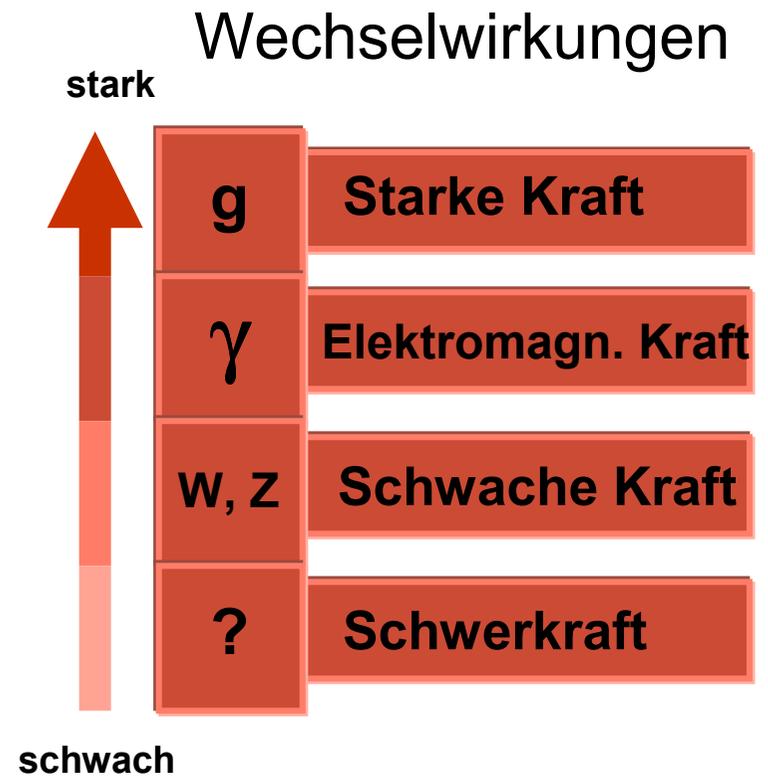
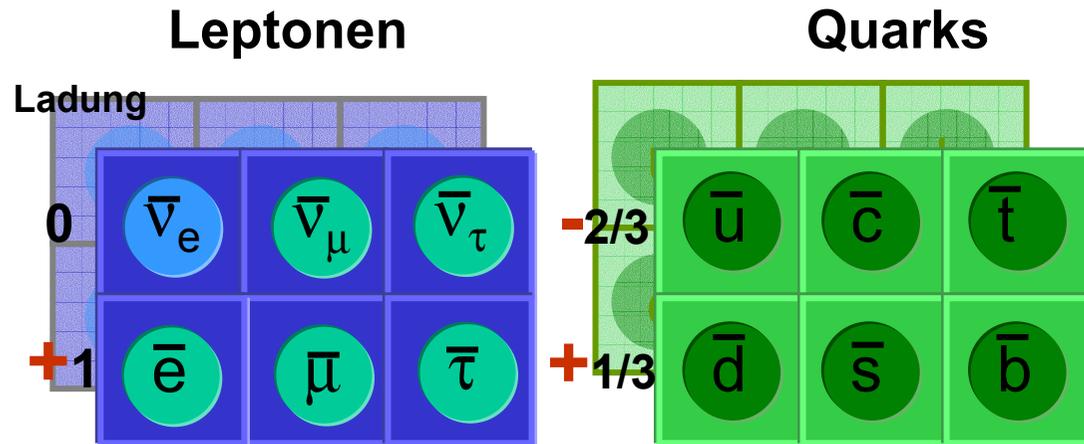
Materieteilchen =  
Fermionen (Spin  $\frac{1}{2}$ )

Wechselwirkungen



Kraftteilchen = Bosonen  
(Spin 1)

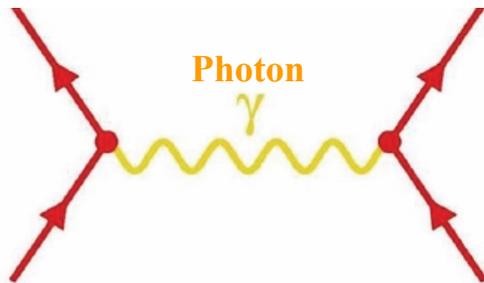
# Anti-Teilchen



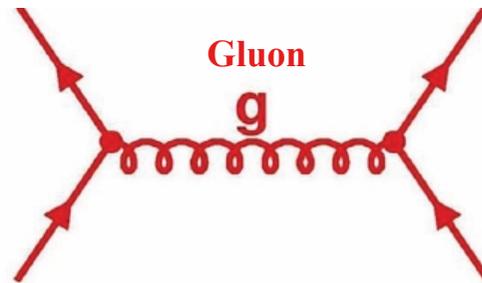
**Kräfteteilchen = Bosonen  
(Spin 1)**

# Kräfte = Wechselwirkungen

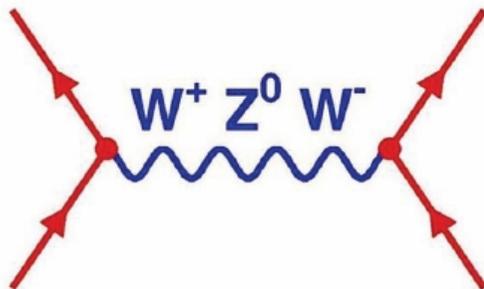
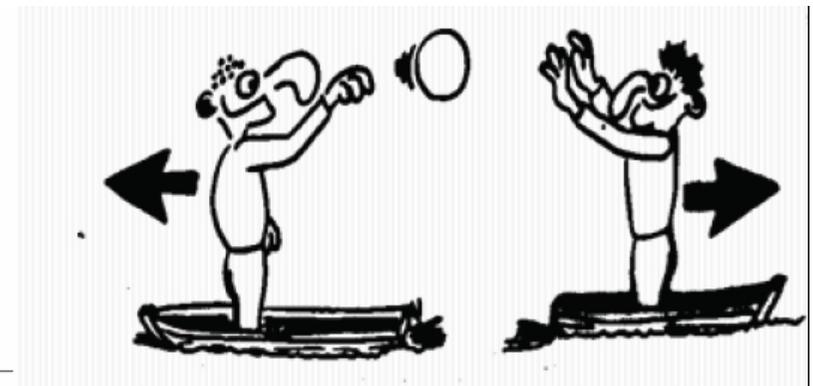
- Zu jeder Wechselwirkung gibt es einen Ladungstyp
- Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren jeweilige Wechselwirkungen
- Wechselwirkung erfolgt über **Austauschteilchen**



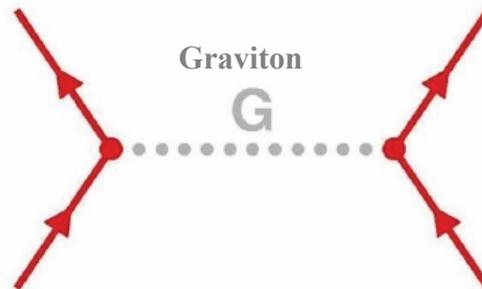
elektromagn. Kraft



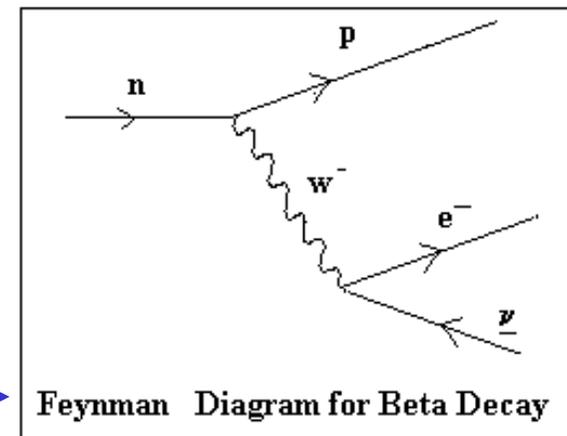
starke Kraft



schwache Kraft

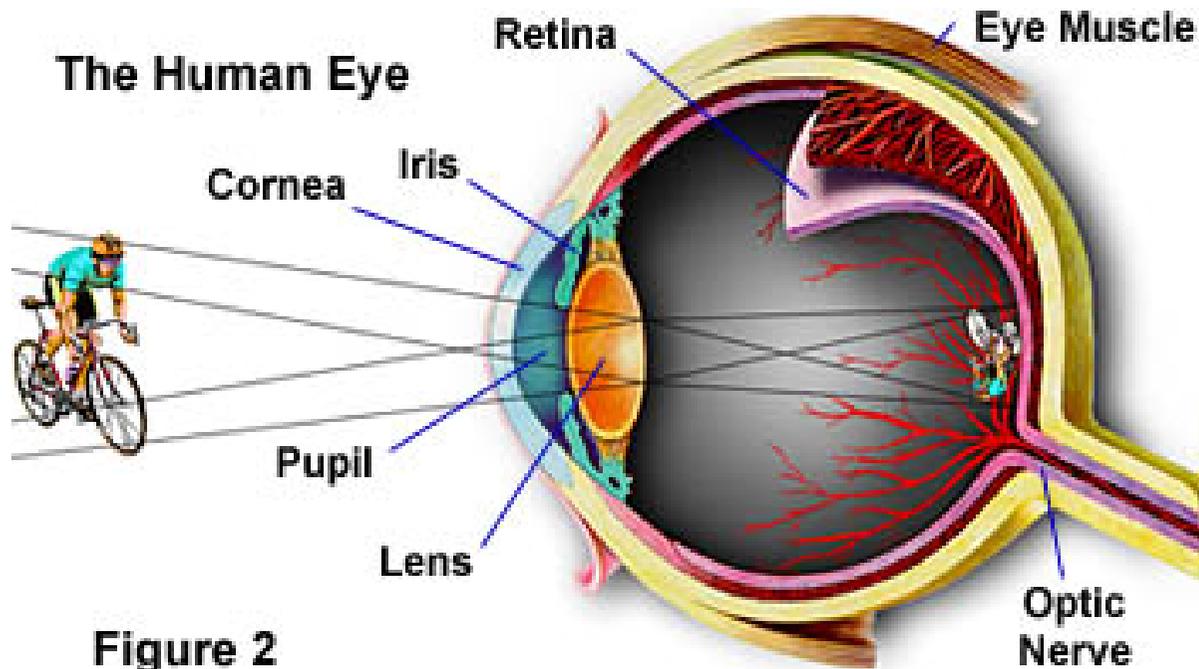


Gravitation



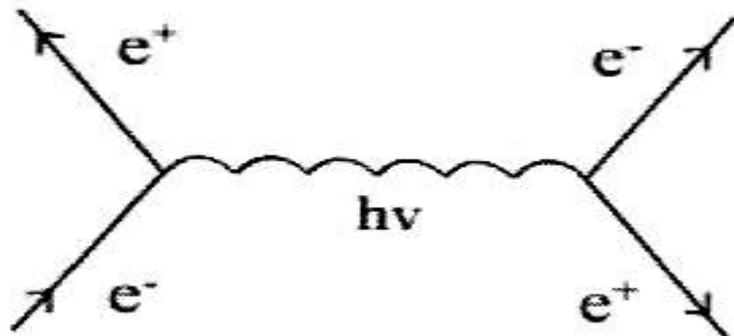
Feynman Diagram for Beta Decay

# Wie man Neutrinos sieht



Abbild im Gehirn  
↔ Realität

Figure 2

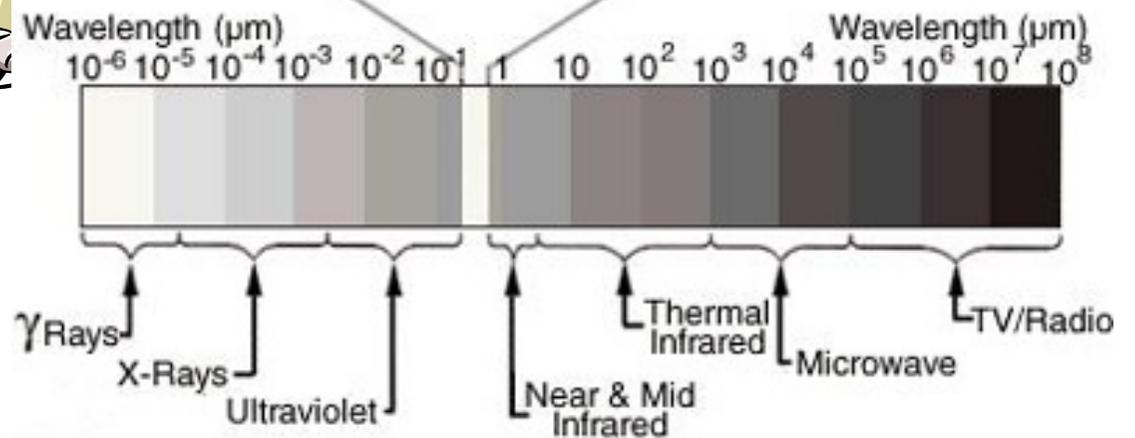
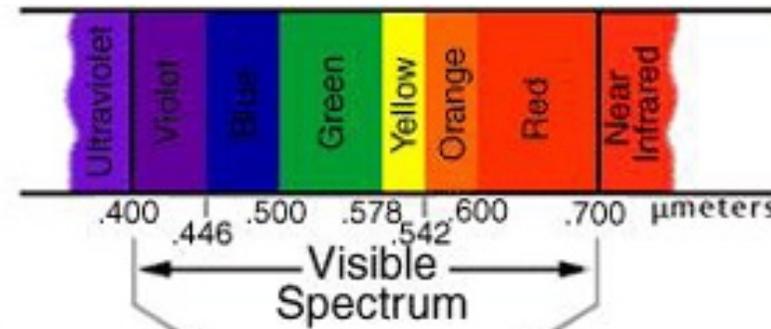
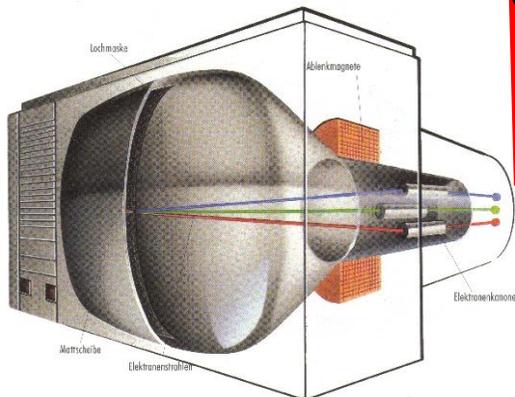
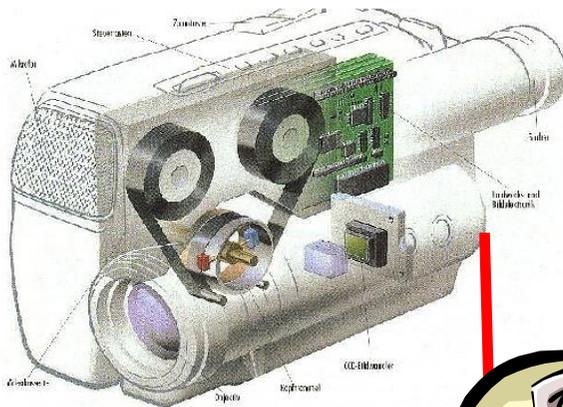


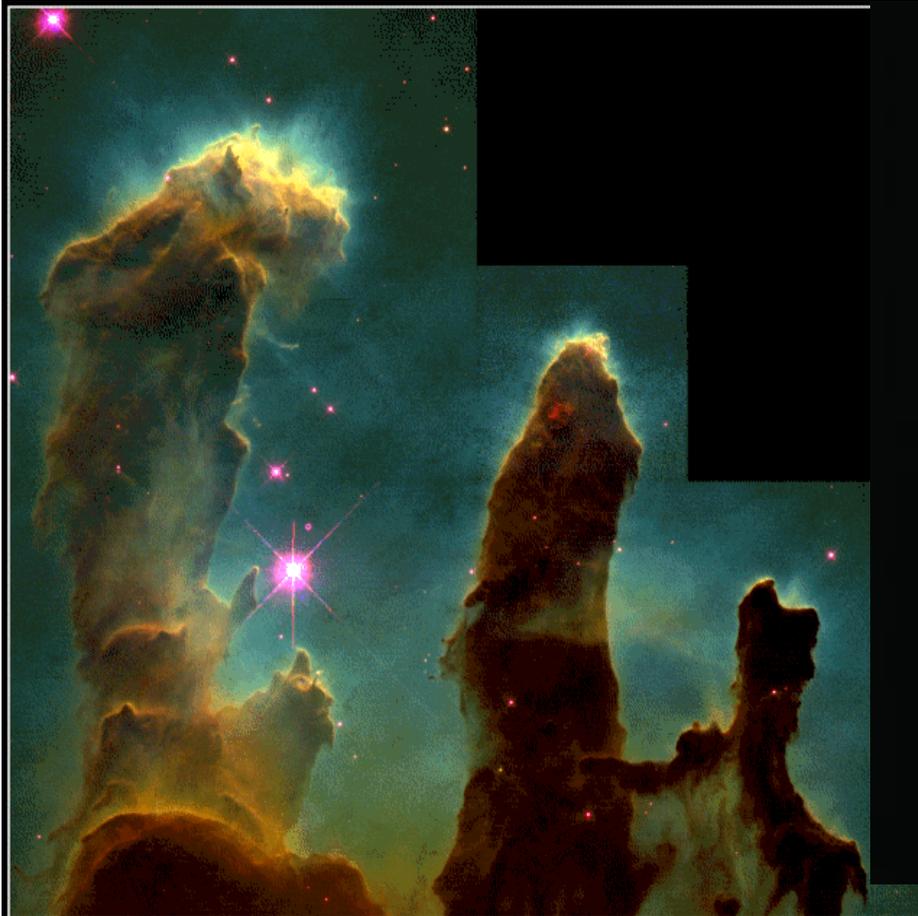
Austausch von Lichtteilchen  
(Photonen) ↔  
elektrisch geladene Teilchen

# Sehhilfen

Optische Instrumente: Brillen, Teleskope, ...

Elektronische Geräte:





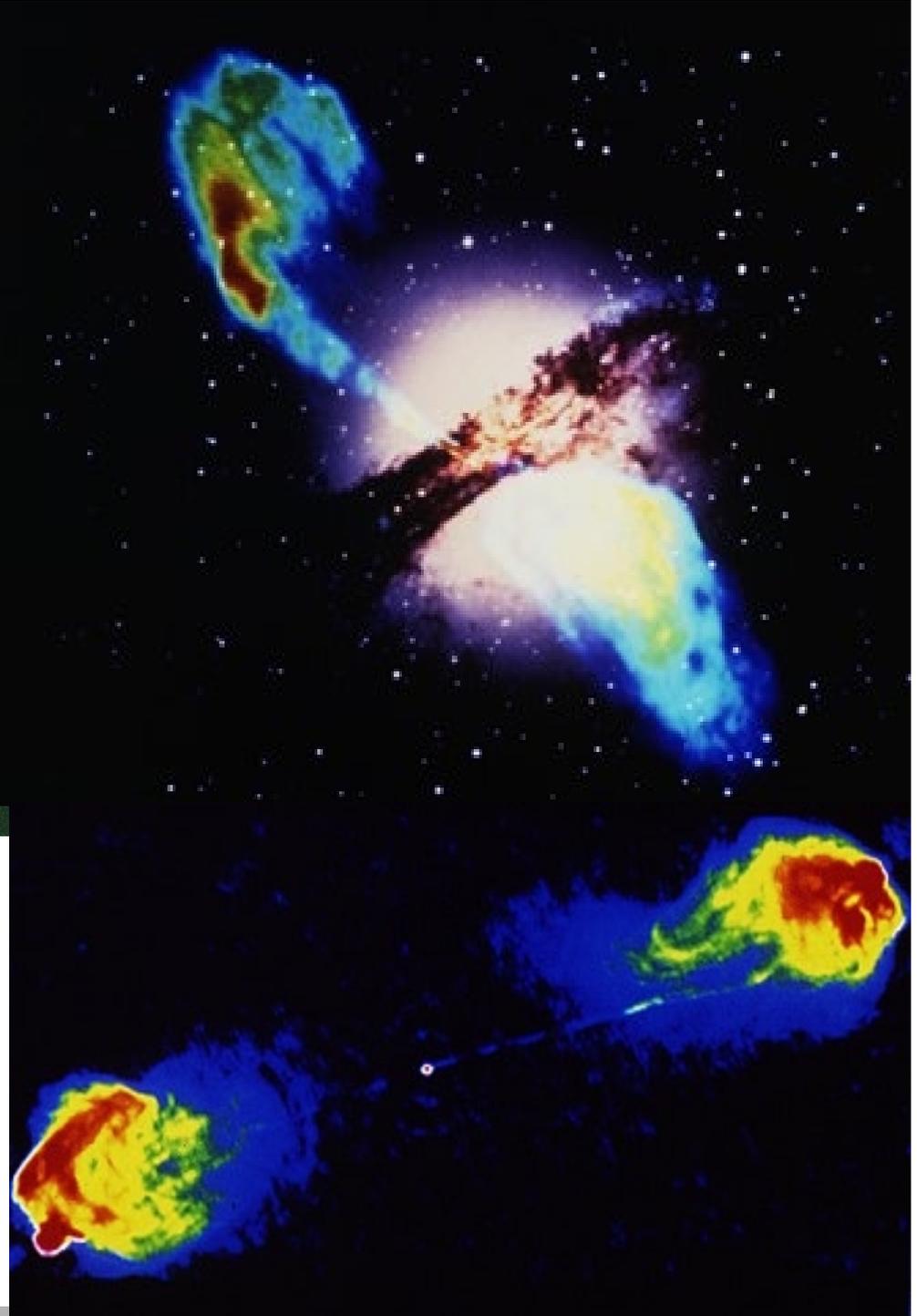
### **Computer-aufbereitete Bilder:**

Verstärkung, Frequenzänderung

→ Austausch von Photonen

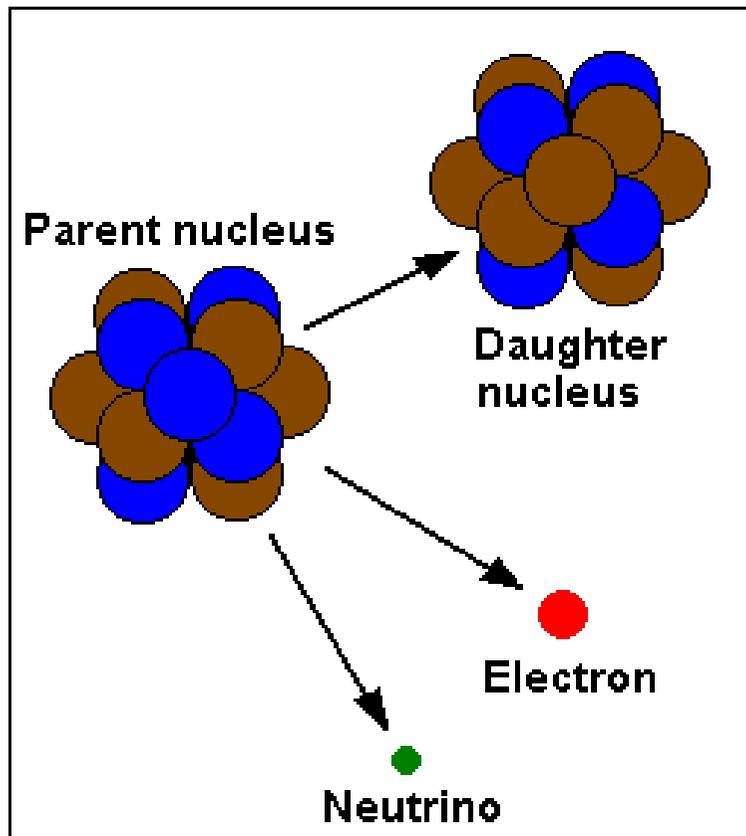
→ man sieht nur elektrisch geladenen  
Teilchen und Bindungszustände davon

→ **Wie sieht man Neutrinos???**

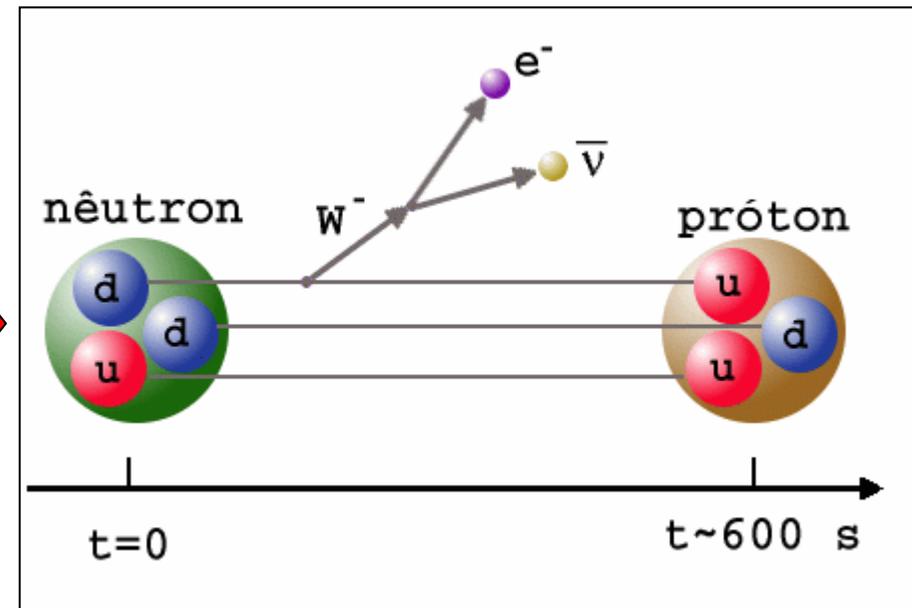


# $\beta$ -Zerfall und inverser $\beta$ -Zerfall

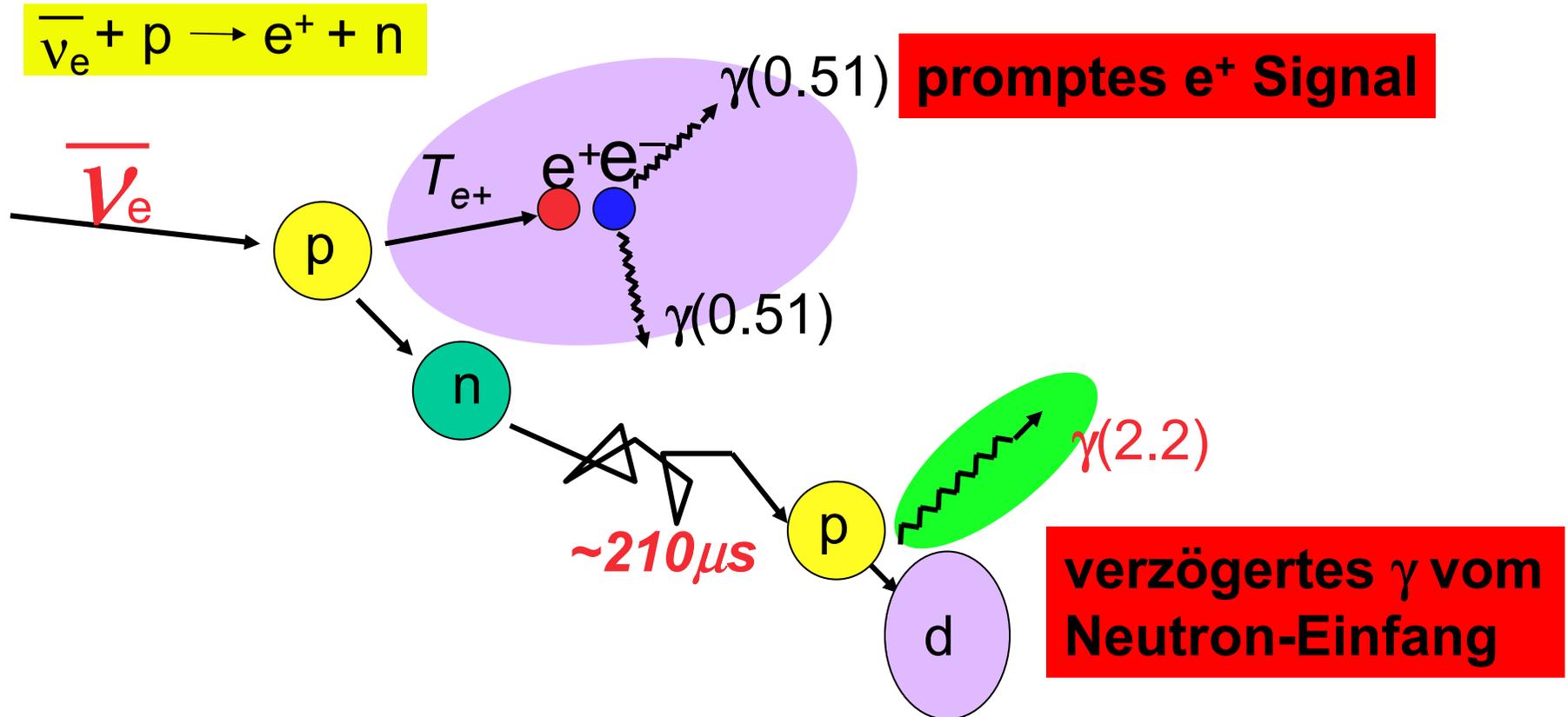
## Radioaktiver $\beta$ -Zerfall



Beta decay

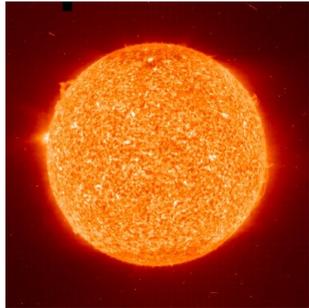


# Eine Neutrino Nachweismethode



- Beobachtung der charakteristischen Signatur mit Photovervielfachern
- andere Nachweismethoden...
- Kampf gegen Untergrund → Prof. W. Hampel

# Neutrinos Heute: Quellen & Neue Physik

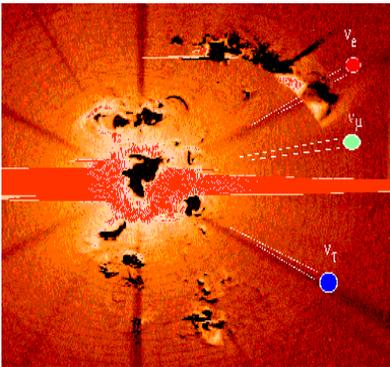


← Sonne

Astronomie: →  
Supernovae  
UHE  $\nu$ 's

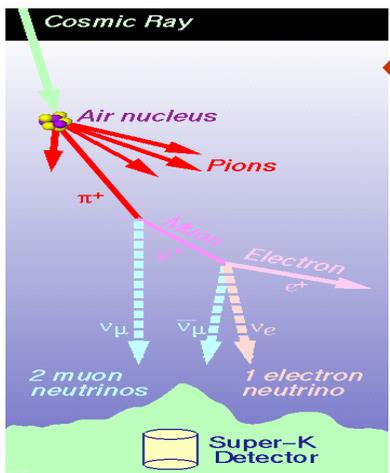


...



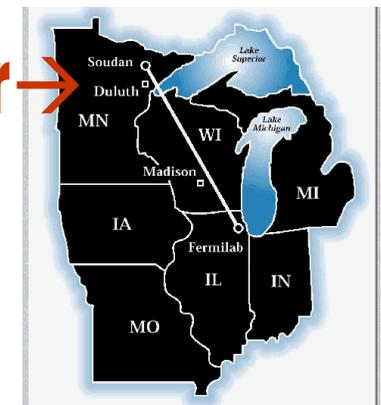
← Kosmologie

Reaktoren →



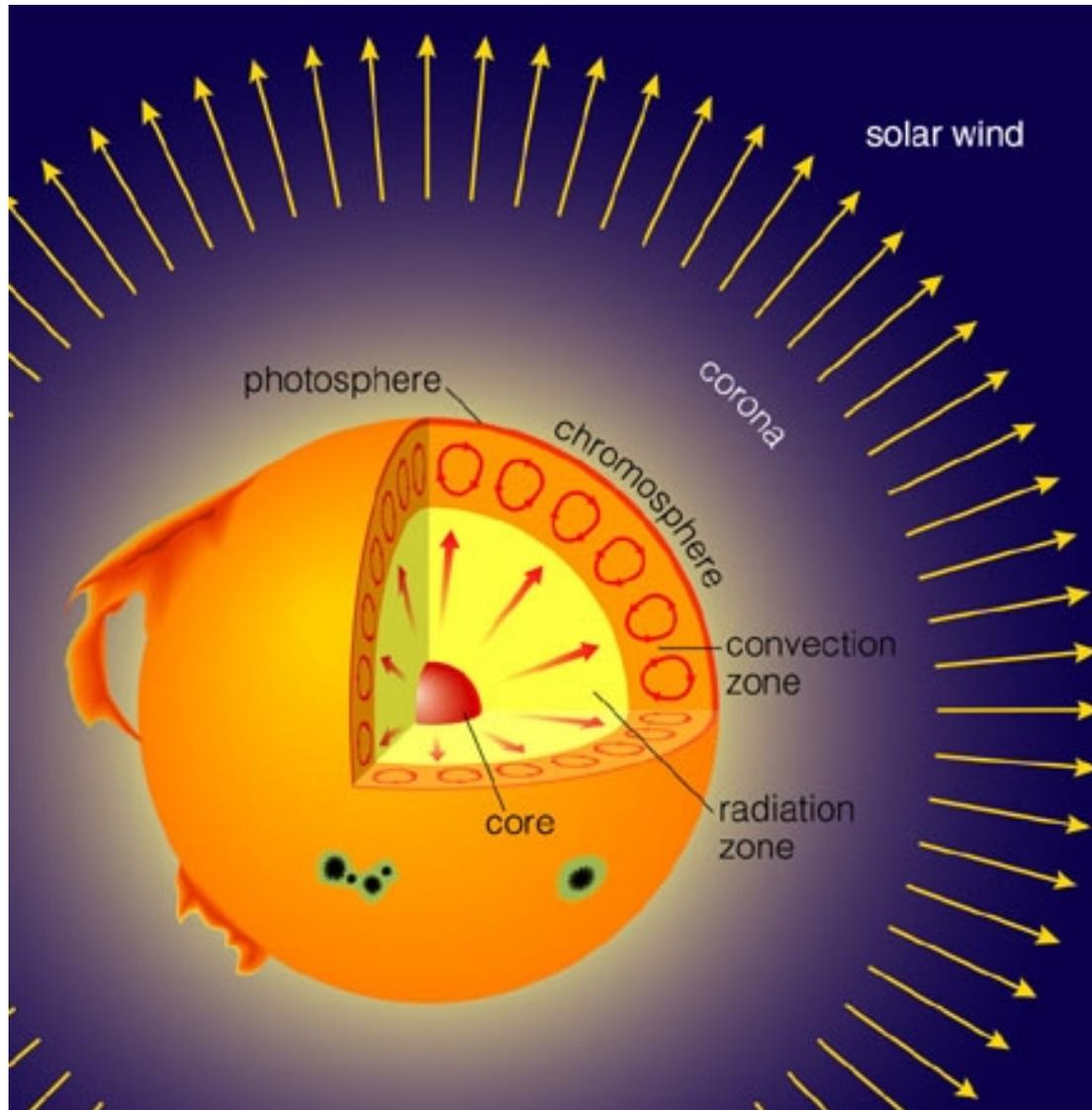
← Atmosphäre

Beschleuniger →  
Laboratorien



← Erde

# Neutrinos und die Sonne



**Energiequelle:** Fusionsprozesse im Sonnenkern

**Gleichgewicht:**

- **thermaler Druck**
- **Gravitation**

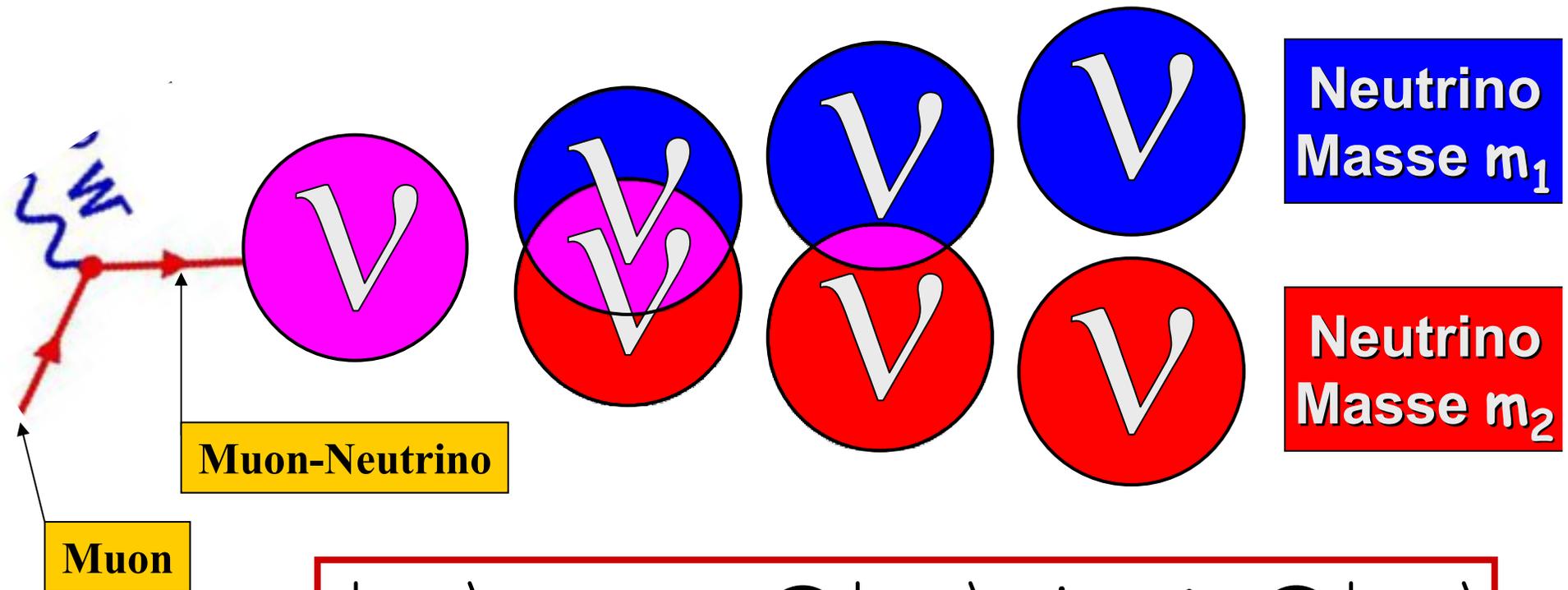
**Optische Beobachtungen:**

- **Energiefluss**
- **Oberflächendynamik**
  - > **Sonnenflecken**
  - > **differentielle Rotation**
  - > **100.000 Jahre verzögert**

**Neutrinos:** Blick ins Herz der Sonne mit **BOREXINO**  
➔ **Dr. Schönert**

# Neutrino-Mischungen

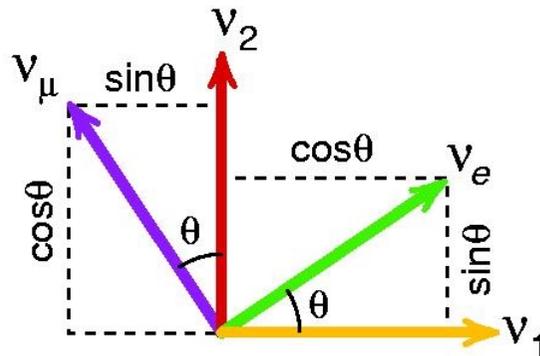
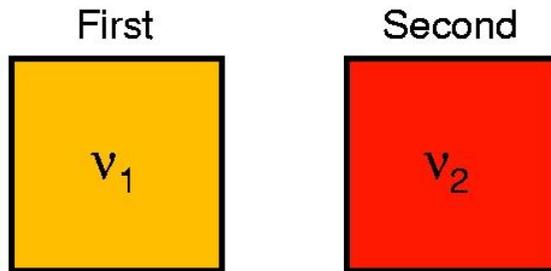
Wechselwirkungszustände und Massenzustände:



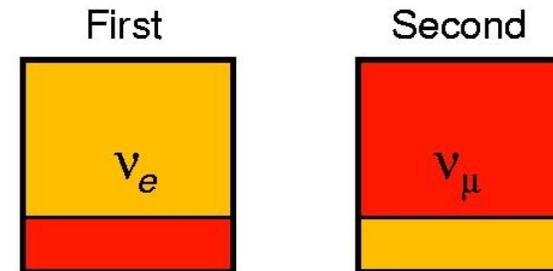
$$|\nu_\mu\rangle = \cos\Theta|\nu_1\rangle + \sin\Theta|\nu_2\rangle$$

Kein klassisches Analogon – Quantenmechanische Überlagerung zweier Teilchen normalerweise Mikrophysik → QM-Effekte auf großen Skalen

## Massenzustände



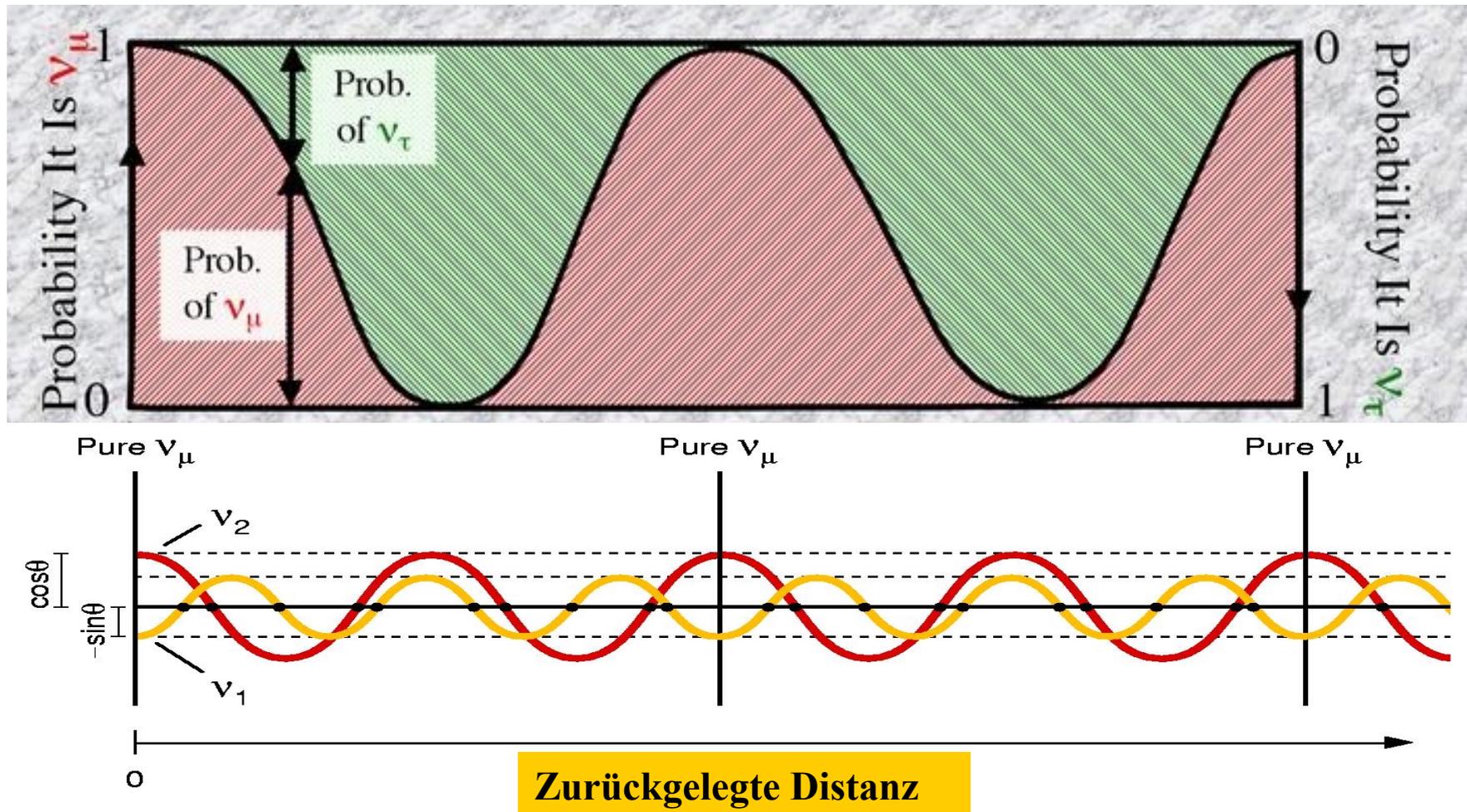
## Wechselwirkungszustände



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

- Produktion mit Leptonpartner → **quantenmechanischer Mischzustand**
- Propagation des Massenzustands als **Teilchenwelle** über makroskopische Distanzen
- Nachweis eines gewissen **Neutrino**typs über den **Leptonpartner**

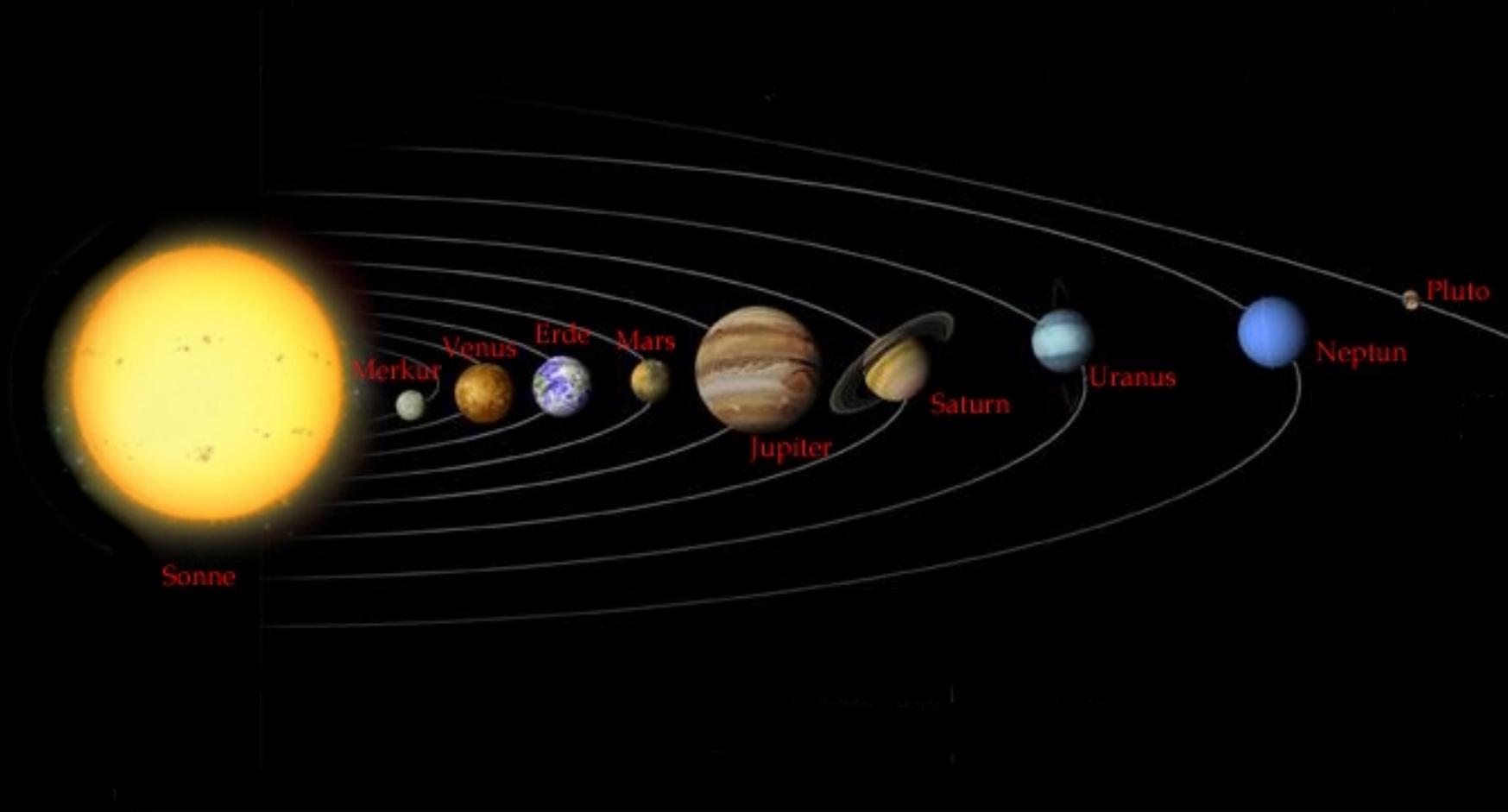
# Neutrino Oszillationen



**Gibt es andere Geisterteilchen?**



# Unser Sonnensystem



# Unsere Galaxie



Unser Sonnensystem

# Andromeda eine Nachbargalaxie



Tief im Kosmos

Sehen wir eigentlich alles?

Versteckte Materie?

Prinzipiell unsichtbare Materie?

Hubble Deep Field

HST · WFPC2

PRC96-01a · ST ScI OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST ScI), NASA

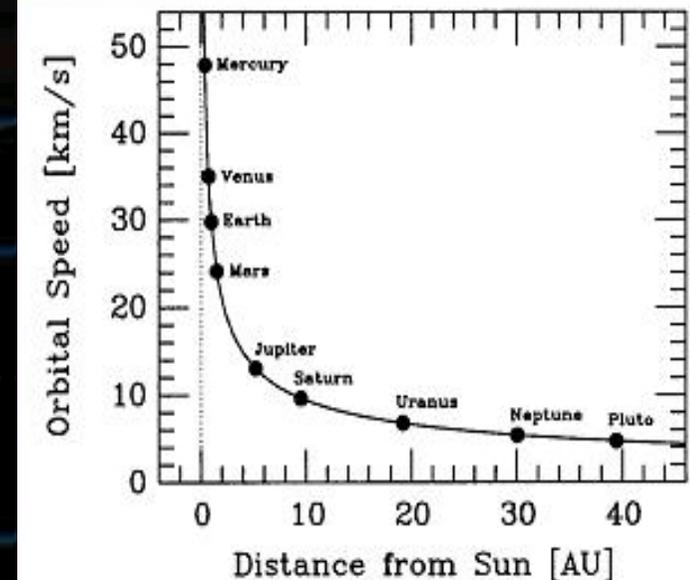
# Neutrinobeitrag zur kosmischen Massenbilanz



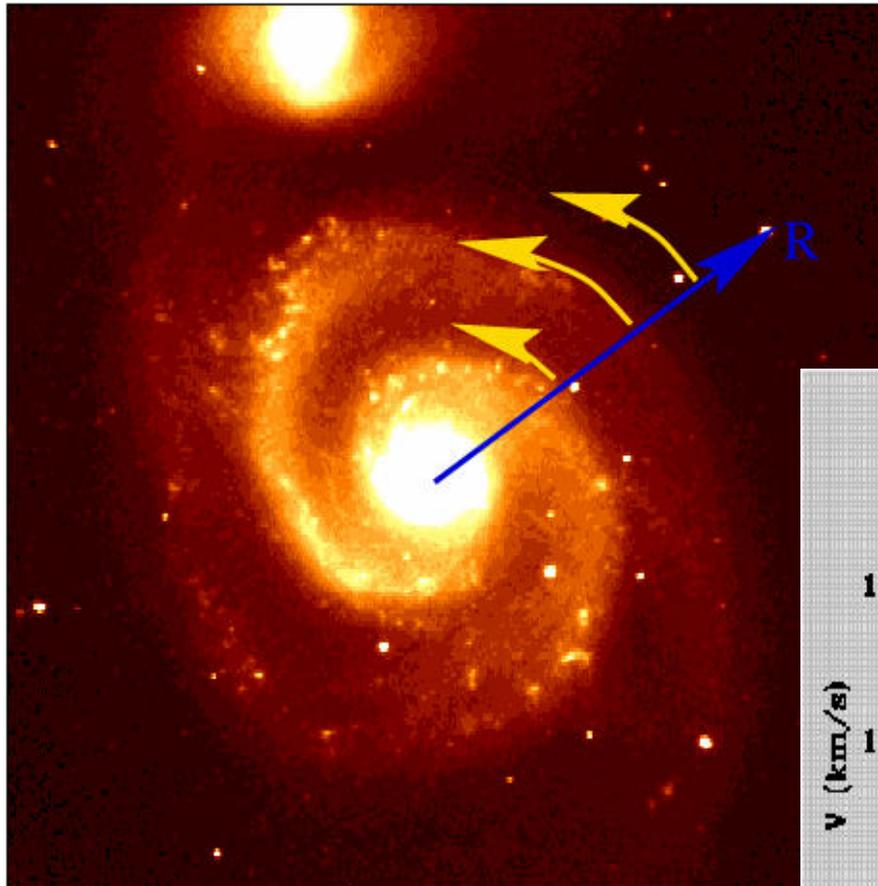
**Ist das Bild nun komplett?**

# Mit mit Hilfe der Gravitation sehen

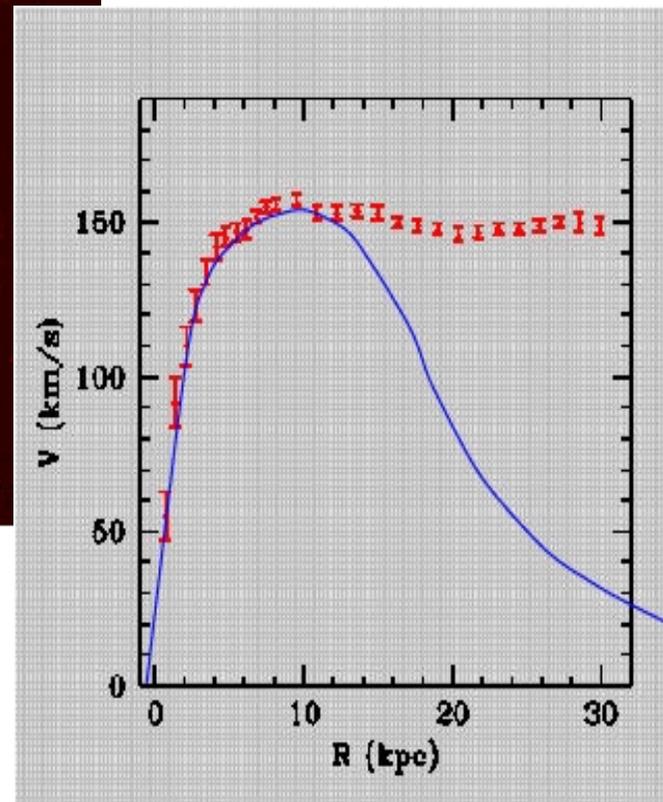
**Historische Methode zur Suche neuer Planeten:**  
**Vergleich von berechneter und beobachteter Bahn**  
**bekannter Planeten → Position neuer Planeten**



# Galaktische Rotationskurven



Vergleich der von der sichtbaren Materie erwarteten Rotationskurven mit gravitativer Rotationsdynamik



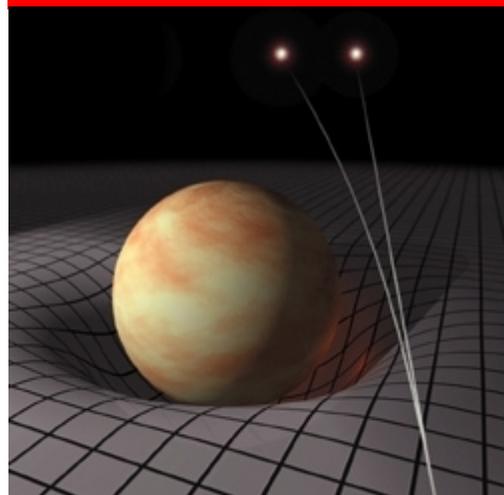
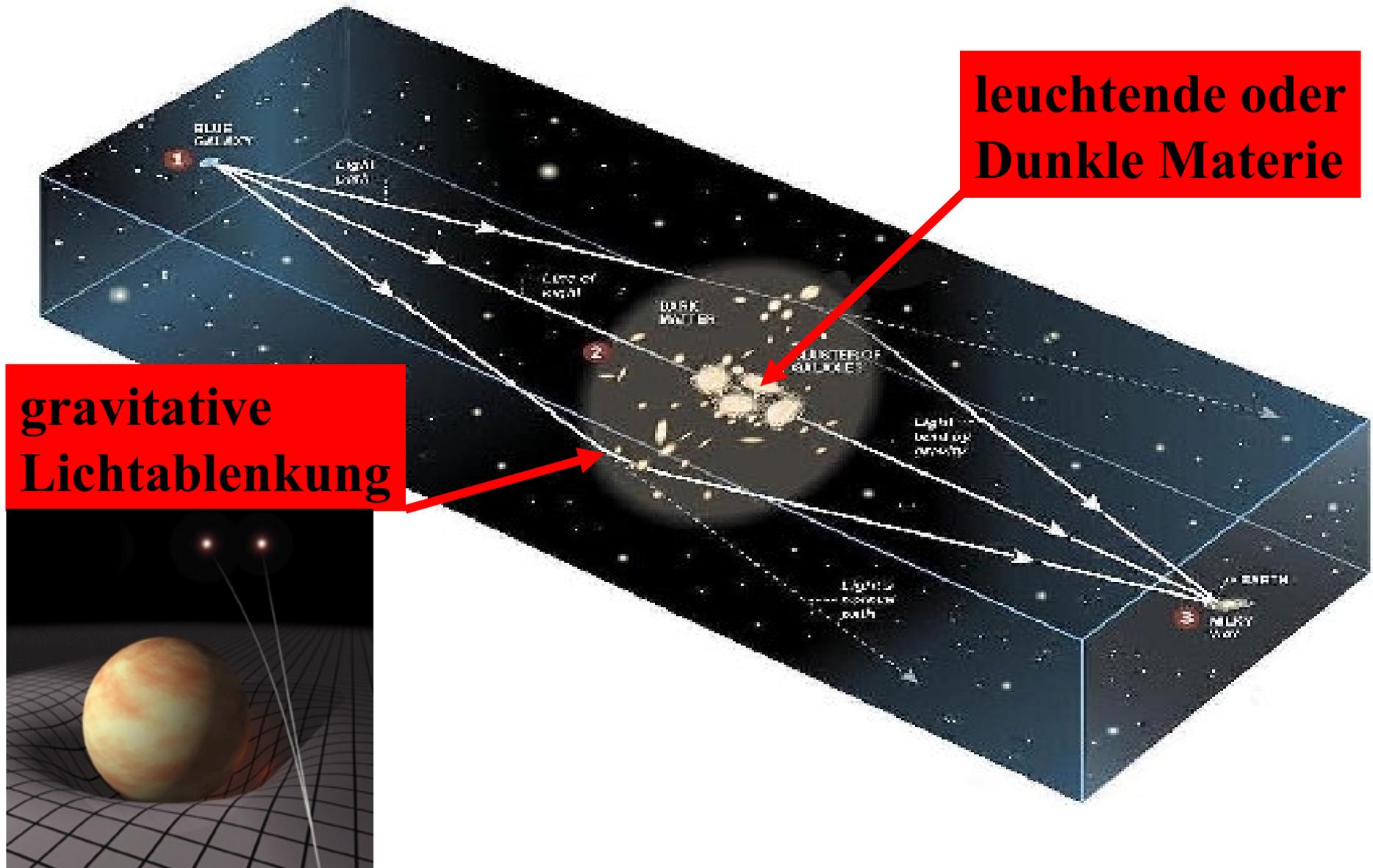
Beobachtete Rotationskurven

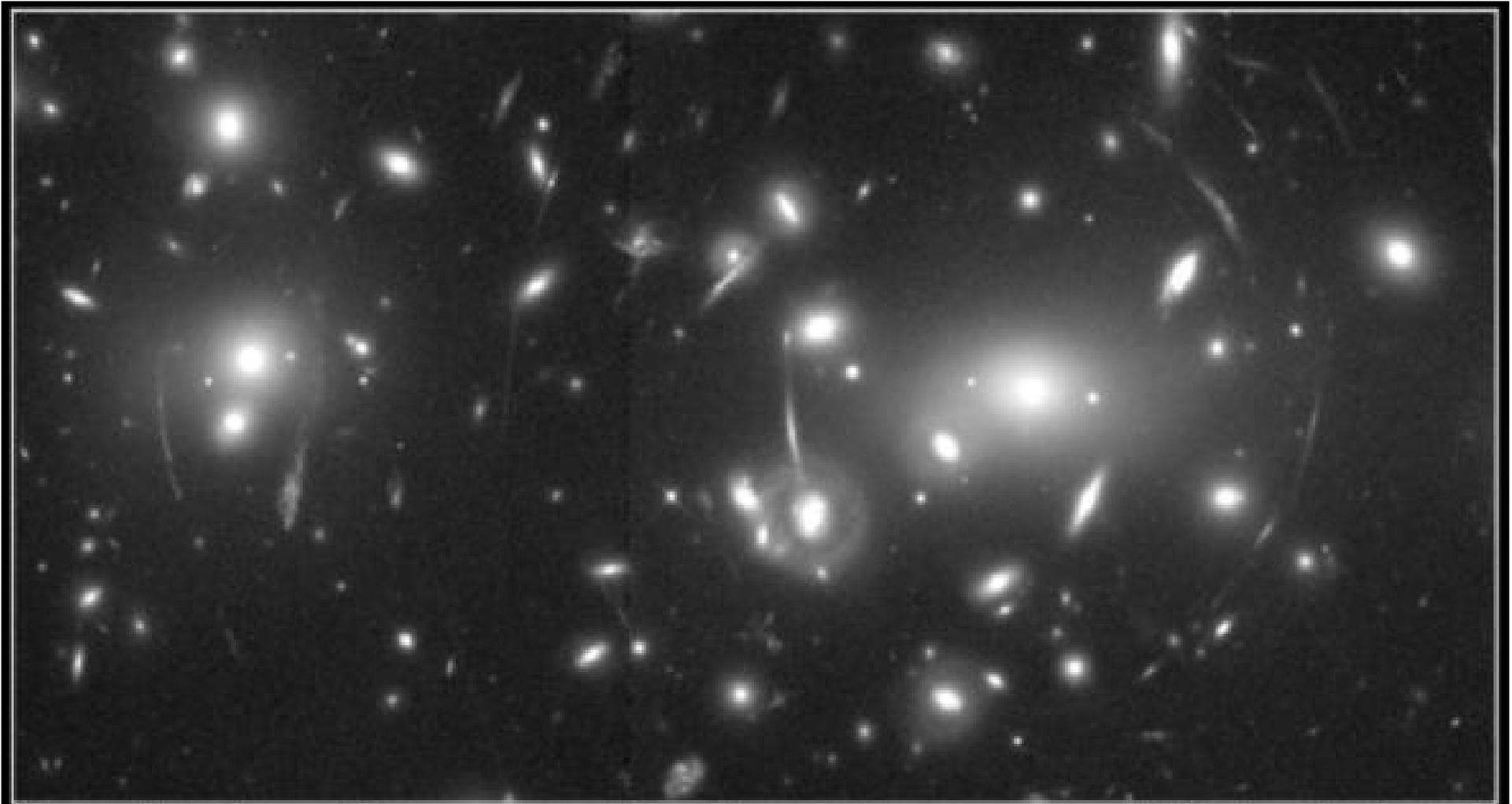
Erwartung aus der sichtbare Massenverteilung

# **Erklärung: Ein Halo aus „Dunkler Materie“**



# Eine weitere Methode: Gravitationslinsen



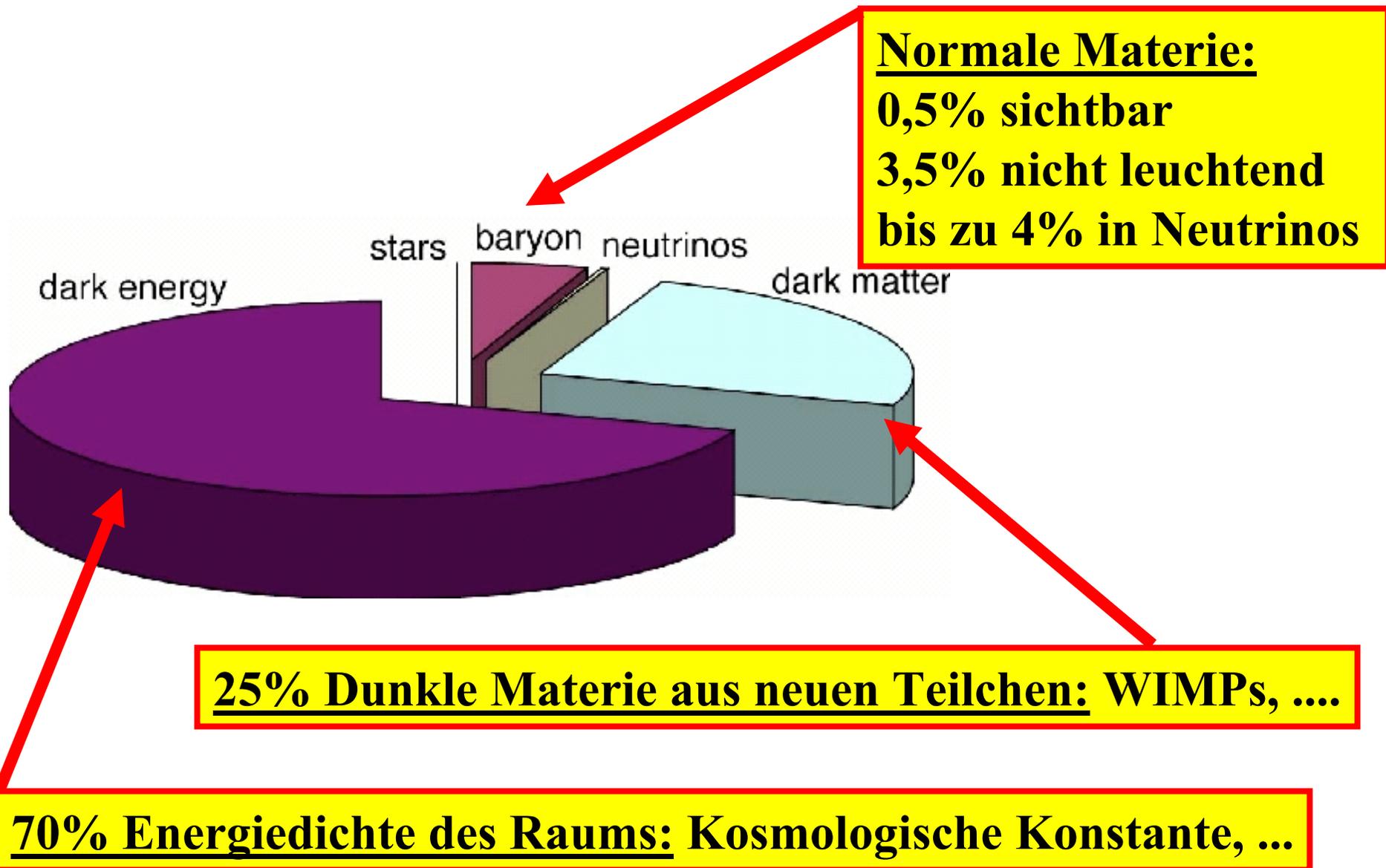


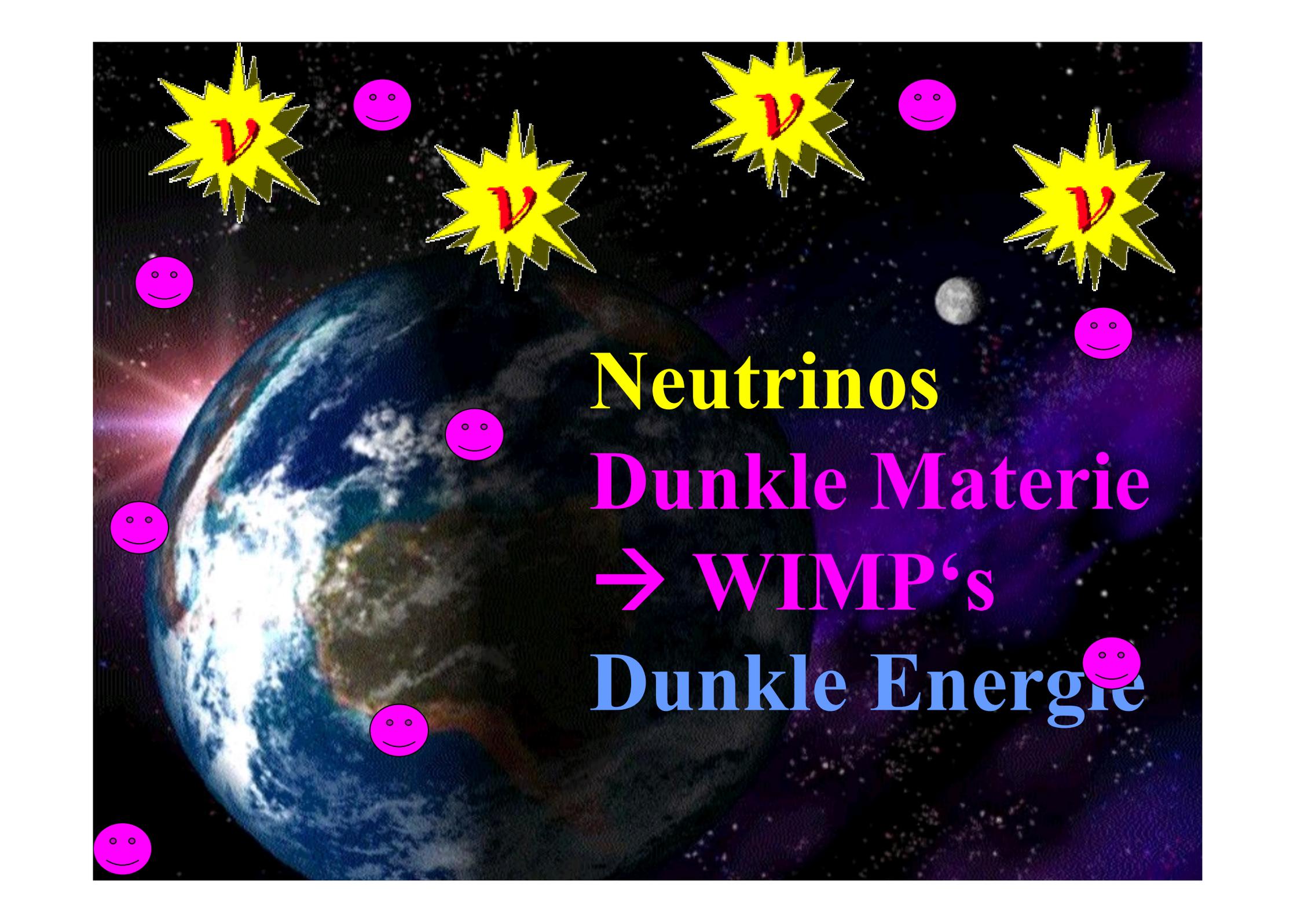
Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

**→ indirekte Information über die Materieverteilung**

# Kosmische Massenbilanz





**Neutrinos**

**Dunkle Materie**

**→ WIMP's**

**Dunkle Energie**



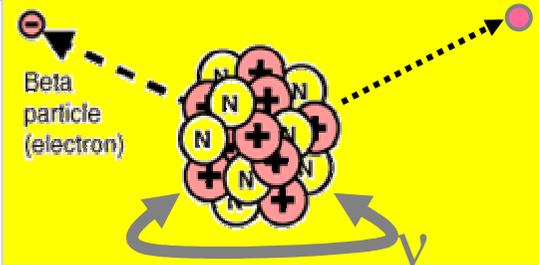
## Forschungsschwerpunkte der Abteilung:

- Neutrinos
- Dunkle Materie
- Physik jenseits des Standard Modells

➔ Theorie und Experiment

# Theoretische Astroteilchenphysik

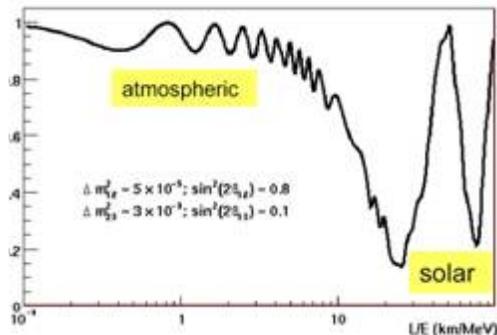
## Leptonzahlverletzung & Doppelbetazerfall



## Flavoursymmetrien vereinheitlichte Theorien

$$M = \begin{pmatrix} 0 & Y_\nu \langle \phi \rangle & 0 \\ Y_\nu^T \langle \phi \rangle & 0 & Y_N^T \langle \sigma \rangle \\ 0 & Y_N \langle \sigma \rangle & M_S \end{pmatrix}$$

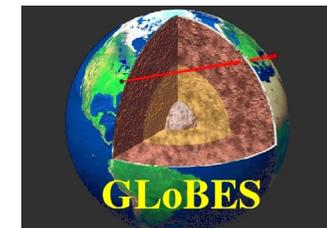
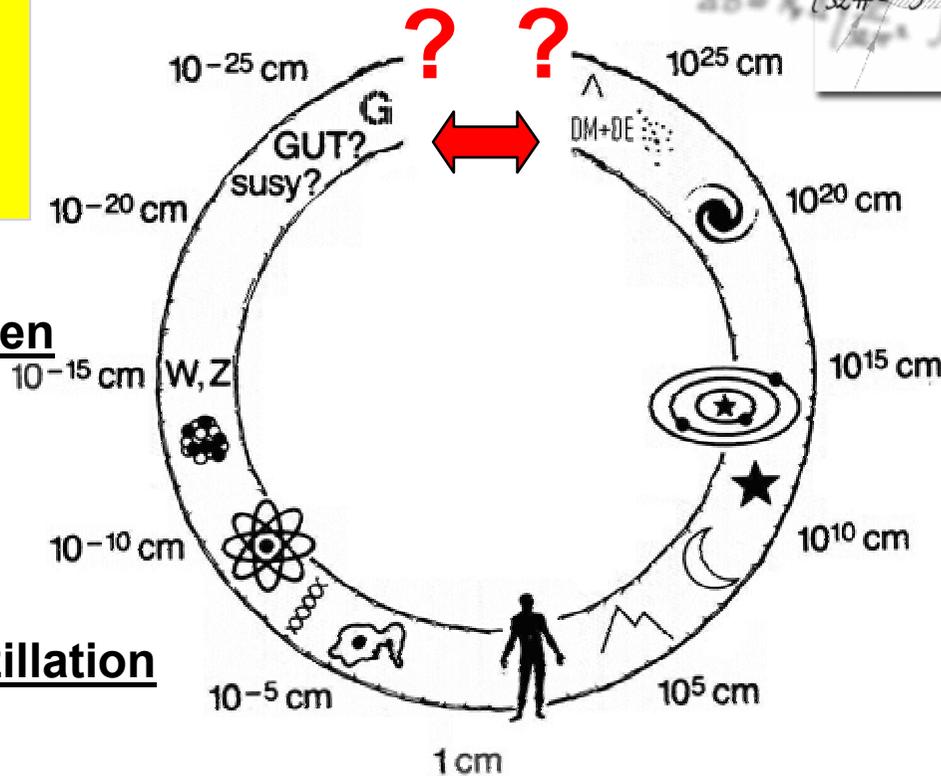
## Neutrinomassen & Oszillation



Reaktorneutrinos  
Super-beams  
β-Beams  
Neutrinfabriken, ...

## Baryonasymmetrie des Universums

$$\Delta B = N_F \Delta \left\{ \frac{g^2}{32\pi^2} \int d^3x \epsilon^{ijk} \text{Tr} (W_i \cdot W_j \cdot W_k + \frac{2}{3} ig_s W_i W_j W_k) \right\}$$



## Neutrinos als Sonden

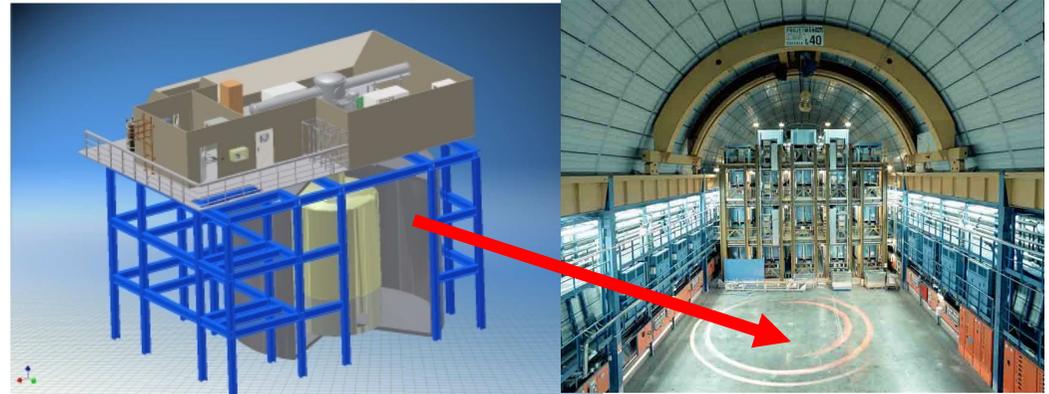


# Experimentelle Projekte

## GERDA

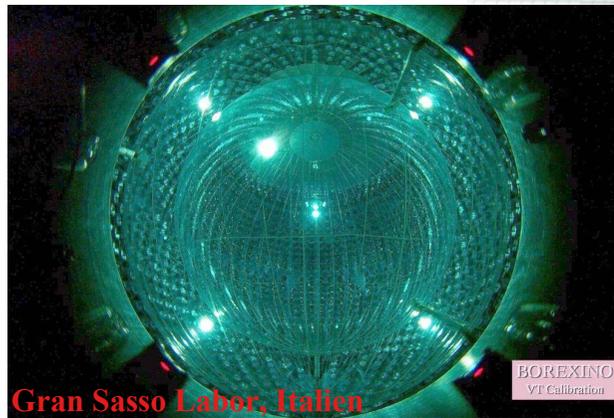
(gemeinsam mit Abteilung Hofmann)

... Suche nach neutrinolosem  
 $0\nu\beta\beta$  Zerfall in  $^{76}\text{Ge}$



Gran Sasso Labor, Italien

## Borexino



Gran Sasso Labor, Italien

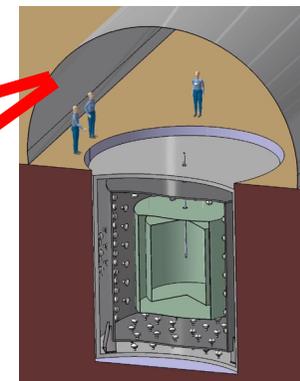
... Spektroskopie solarer Neutrios

## Double Chooz

Neutrino-Oszillationen



Chooz, Frankreich



## Weiteres Programm:

- Vortrag Prof. Hampel

**Der Kampf im Untergrund gegen den Untergrund  
(mit Demonstrationen)**

- **Pause mit Imbiß und Besichtigung der Demonstration**

- Vortrag Dr. Schönert

**Live-Aufnahmen aus dem Herzen der Sonne**

- **Film über das Untergrundlabor im Gran Sasso**