

# *Neutrinos in Kosmologie und Teilchenphysik*

Thomas Schwetz-Mangold



Bremer Olbers-Gesellschaft, 12. Nov. 2013

# *Ein Streifzug durch die Welt der Neutrinos*

- Was ist ein Neutrino?
- Wie hat man Neutrinos entdeckt?
- Neutrinos in Astrophysik und Kosmologie
- Neutrinos in der Elementarteilchenphysik
- 4 Gründe warum Neutrinos für unsere Existenz entscheidend sind

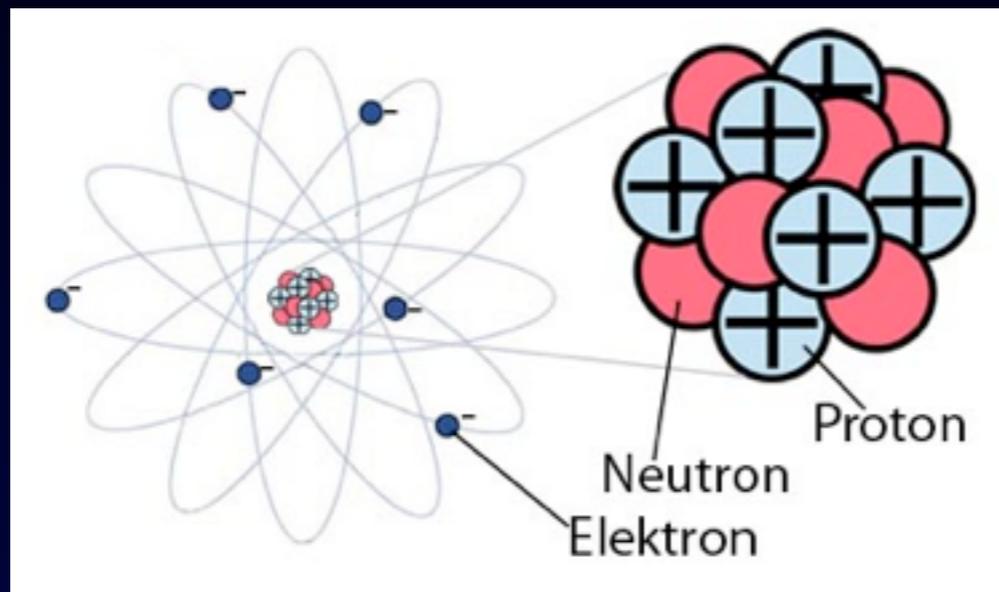
# *Was ist ein Neutrino?*

Ein Teilchen mit extrem kleiner Masse:

$$m_\nu < \frac{1}{2} \text{ eV} / c^2$$

# Was ist ein Neutrino?

Ein Teilchen mit extrem kleiner Masse:



Elektron: 2000 mal  
leichter als Proton



Proton:  $2 \times 10^{-24}$  g  
(0.00000000000000000000000002)

# *Was ist ein Neutrino?*

Ein Teilchen mit extrem kleiner Masse:

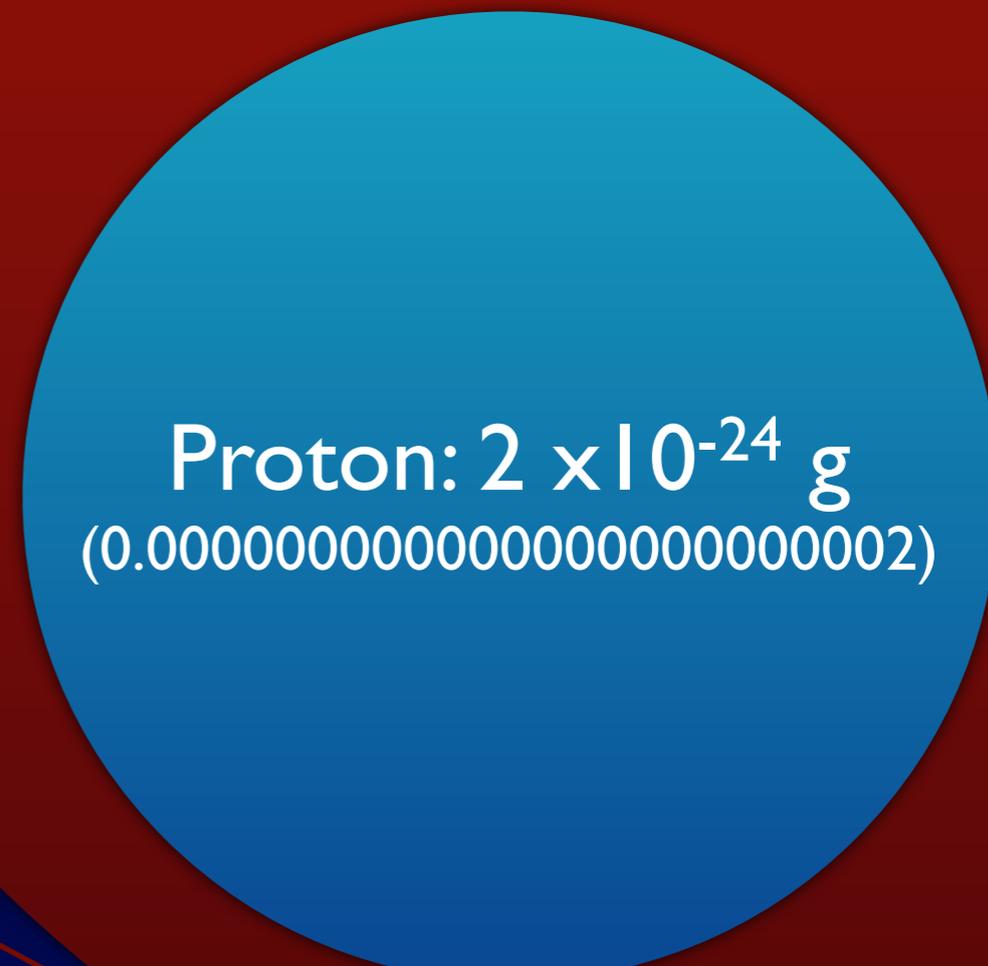
Neutrino: 1 Million mal  
leichter als Elektron



Elektron: 2000 mal  
leichter als Proton



Proton:  $2 \times 10^{-24}$  g  
(0.00000000000000000000000002)



Masse proportional zu Radius<sup>3</sup>

# *Was ist ein Neutrino?*

Ein Teilchen mit extrem schwacher Wechselwirkung:  
(keine elektrische Ladung)

Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen:

- Starke Kernkraft
- Schwache Kernkraft
- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Gravitation

# *Was ist ein Neutrino?*

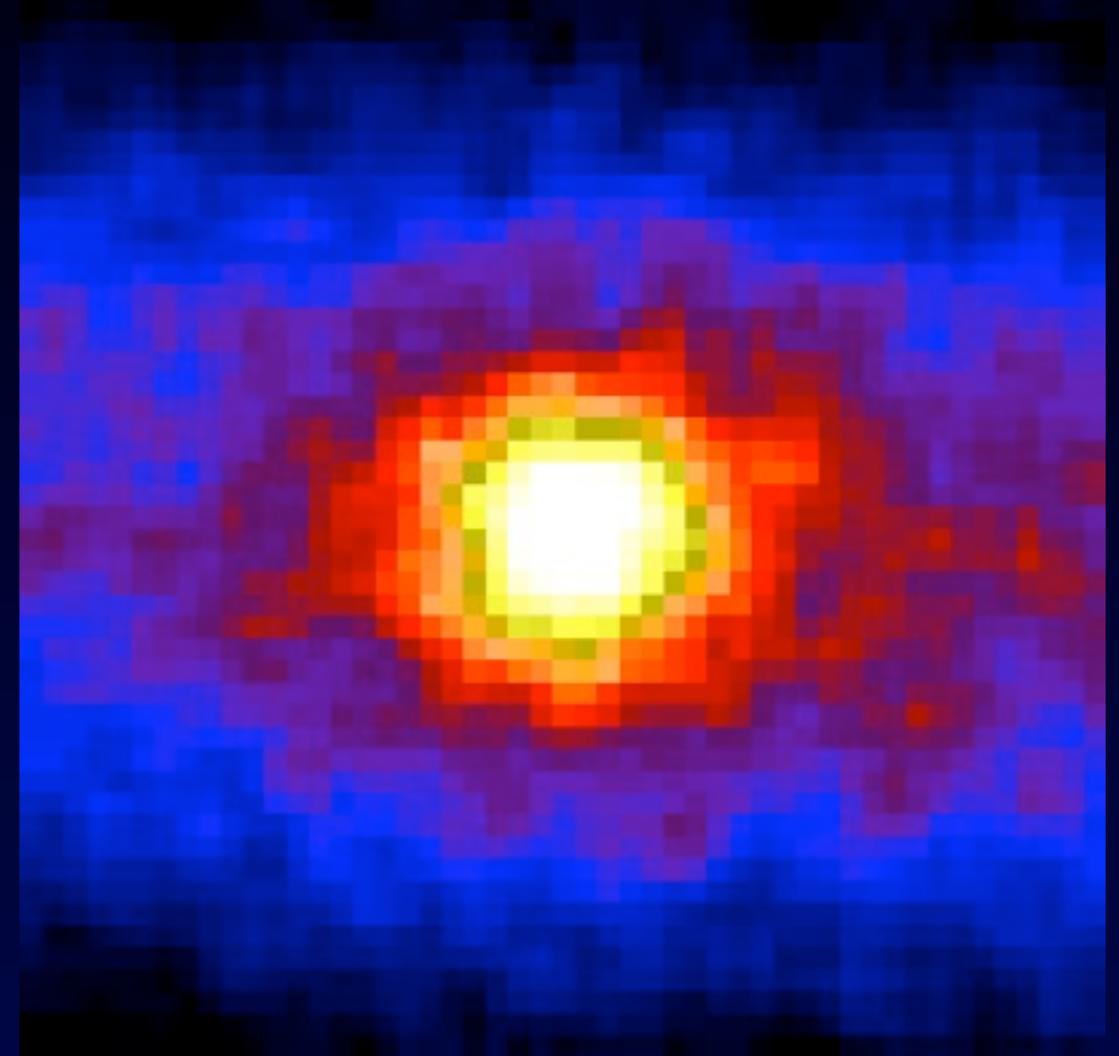
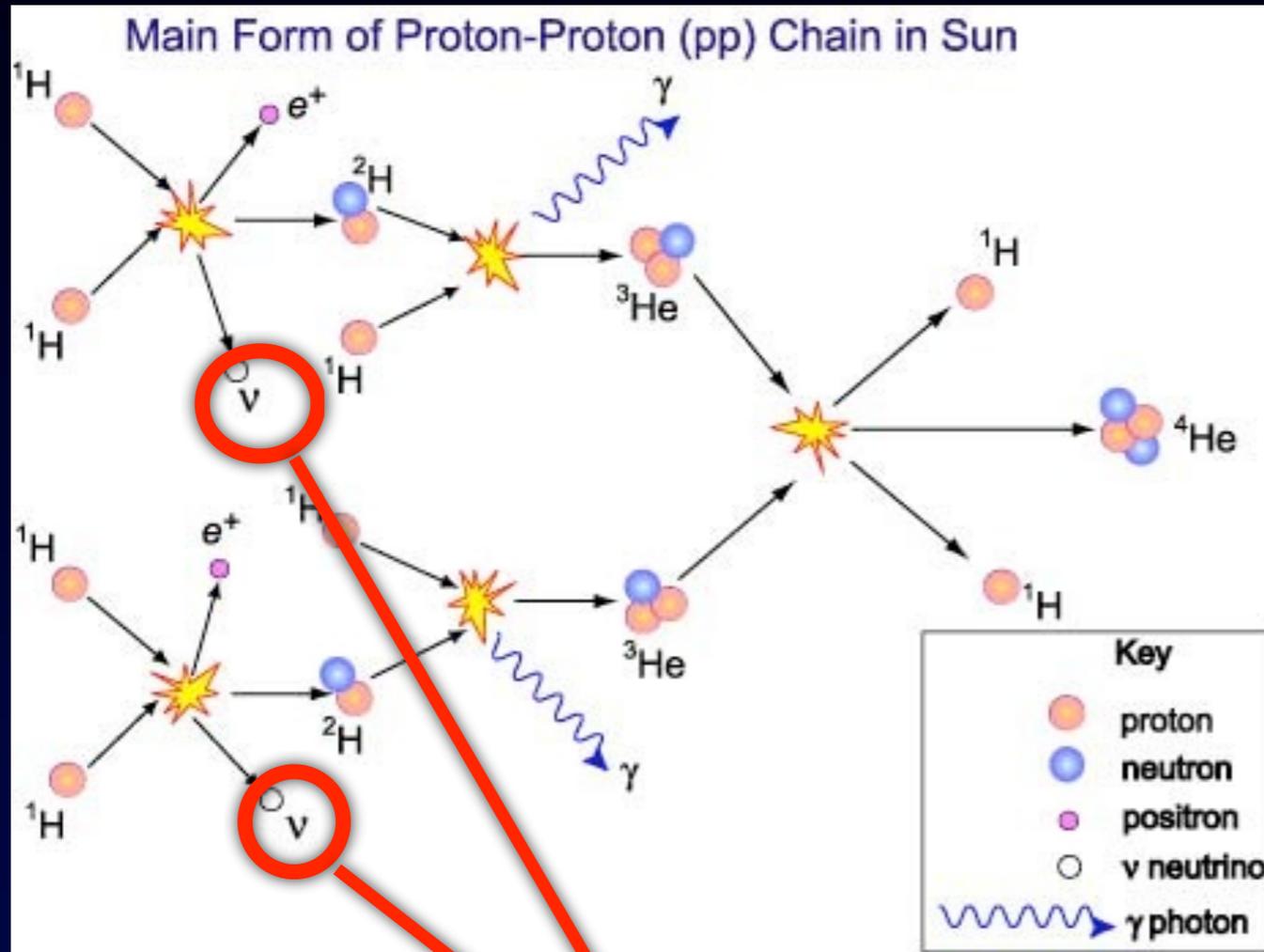
Ein Teilchen mit extrem schwacher Wechselwirkung:  
(keine elektrische Ladung)

Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen:

- Starke Kernkraft
- Schwache Kernkraft
- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Gravitation

**Neutrinos spüren nur die schwache WW und Gravitation**

# Neutrinos von der Sonne



“Neutrinofoto” vom Inneren der Sonne, aufgenommen vom SuperKamiokande Neutrino-detektor

# *Wie schwach ist schwach?*

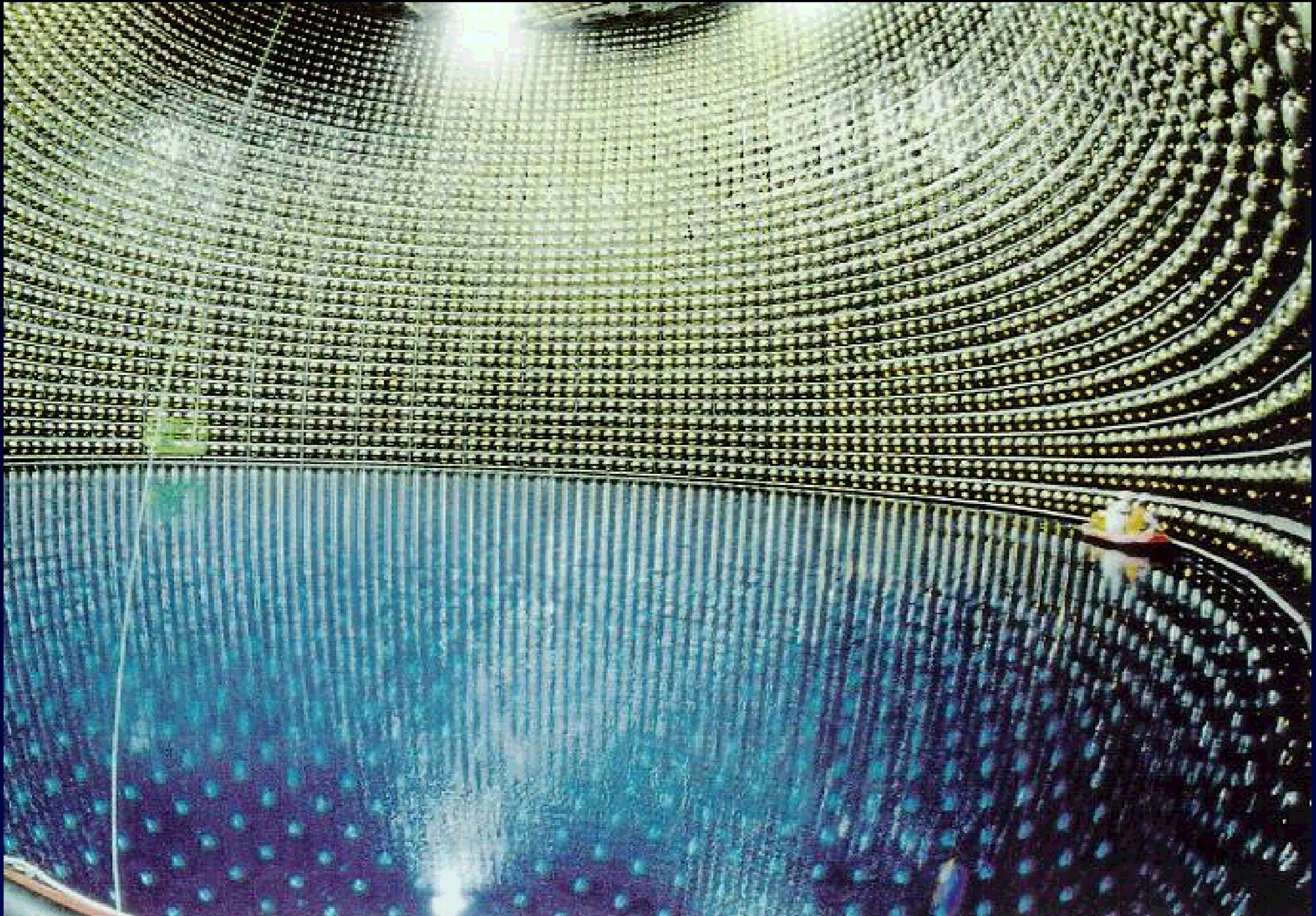
Jede Sekunde gehen

**$10^{14}$  Neutrinos** (von der Sonne)

durch Ihren Körper

$$\begin{aligned} 10^{14} &= 100\,000\,000\,000\,000 \\ &= 100 \times 1\,\text{Million} \times 1\,\text{Million} \end{aligned}$$

# *Wie schwach ist schwach?*



SuperKamiokande (Japan) 50 000 t Wasser

# Wie schwach ist schwach?

Jede Sekunde gehen  
 **$10^{18}$  Sonnenneutrinos**  
durch SuperKamiokande  
(1 Million x 1 Million x 1 Million)

Nur **14 Neutrinos** können pro  
Tag nachgewiesen werden

SuperKamiokande (Japan) 50 000 t Wasser

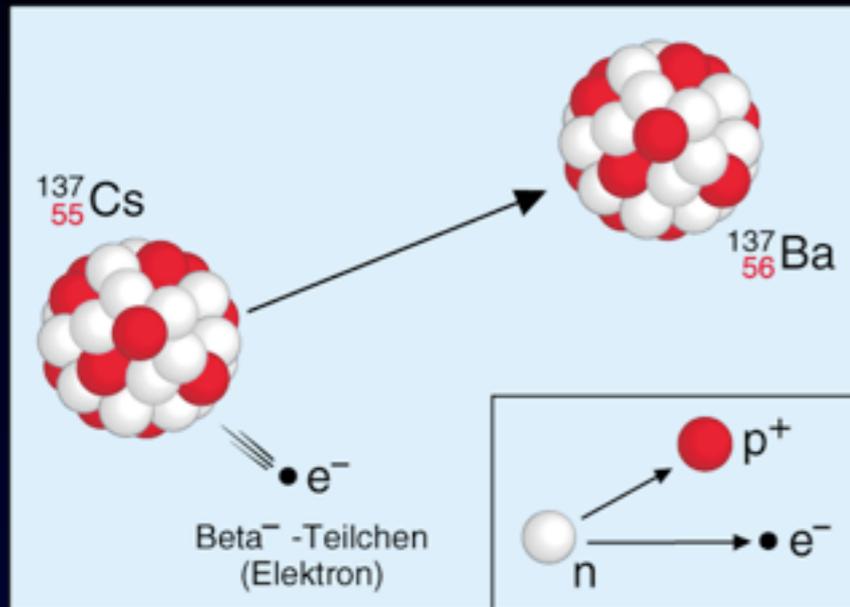
# *Boten aus dem Inneren der Sonne*

Die Anzahl der Sonnenneutrinos/Sekunde  
ist proportional zu  $T^{20}$

Durch Messung der Sonnenneutrinos kann man  
die Temperatur im Inneren der Sonne  
auf 1% genau bestimmen:

$$T = 16\,000\,000\text{ °C } (\pm 1\%)$$

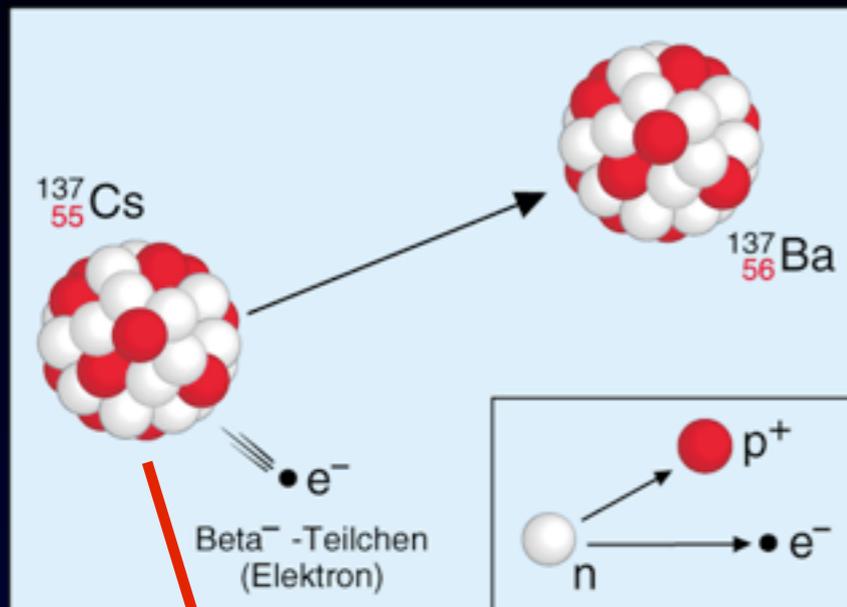
# Wie entdeckte man Neutrinos?



**1930:** Rätsel der fehlenden Energie beim Beta-Zerfall

# Wie entdeckte man Neutrinos?

## 1930: Rätsel der fehlenden Energie beim Beta-Zerfall



*Original - Photocopy of Dec. 1930*  
Abschrift/15.12.56 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Usterstrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

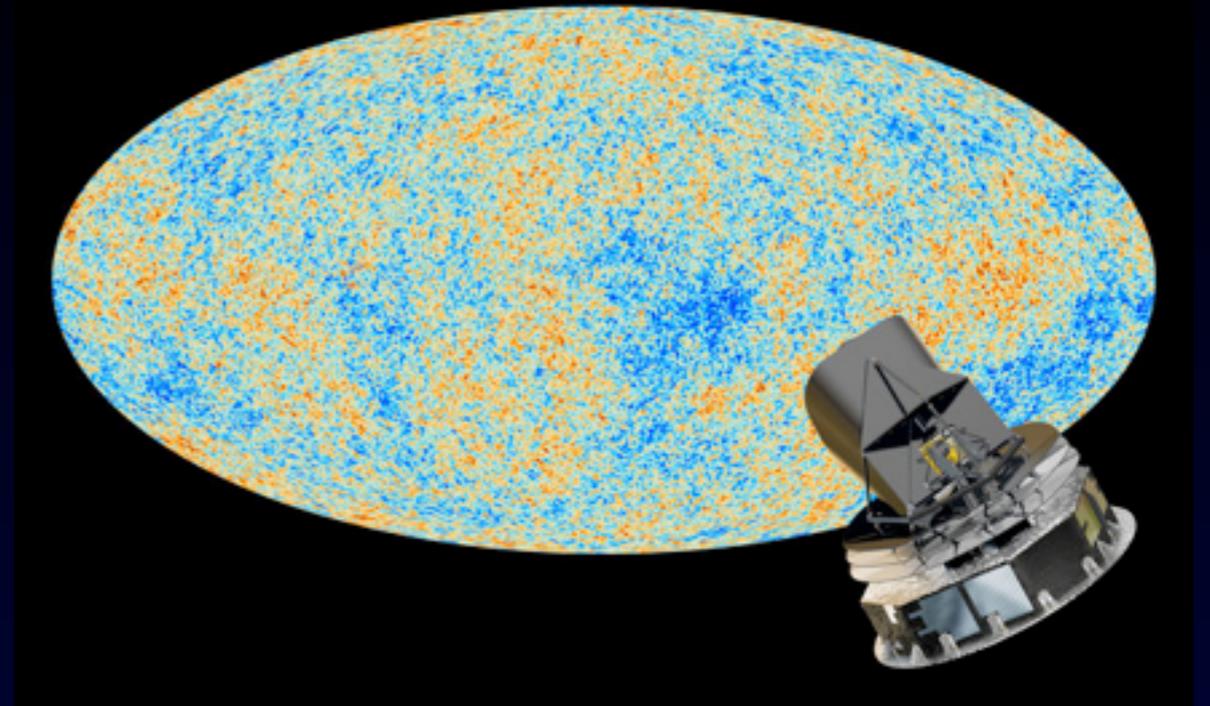
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst  
anzuhören bitte, Ihnen das näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $N$ - und  $Li-6$  Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselwitz" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
sollte von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

# Wie entdeckte man Neutrinos?

- **1930**: Wolfgang Pauli postuliert Neutrino (“Neutron”) um Energieerhaltung im Betazerfall zu garantieren.
- **1933**: Enrico Fermi entwickelt Theorie des Betazerfalls und führt den Namen “Neutrino” ein.
- **1956**: Experimentielle Entdeckung durch Frederick Reines und Clyde Cowan an einem Kernreaktor.
- **1969**: Messung von Sonnenneutrinos durch Ray Davis
- **1998, 2002**: Nachweis von Neutrinooszillationen durch SuperKamiokande, SNO und KamLAND → Neutrinos haben Masse

# *Neutrinos aus dem Kosmos*

Das Universum ist gefüllt  
mit der kosmischen  
Hintergrundstrahlung:  
 $T=2.6\text{ K}$ ,  $411\text{ Photonen/cm}^3$



Genauso gibt es einen kosmischen  
Neutrinohintergrund:  $T=1.9\text{ K}$ ,  $672\text{ Neutrinos/cm}^3$   
(~70 Milliarden Neutrinos in diesem Raum)

Präzisionsmessung des Mikrowellenhintergrundes:  
indirekter Nachweis des kosmischen Neutrinohintergrundes

# *Neutrinos und die Entstehung der Elemente*

wenige Sekunden nach dem Urknall ( $T = 10 \text{ Mrd K}$ )

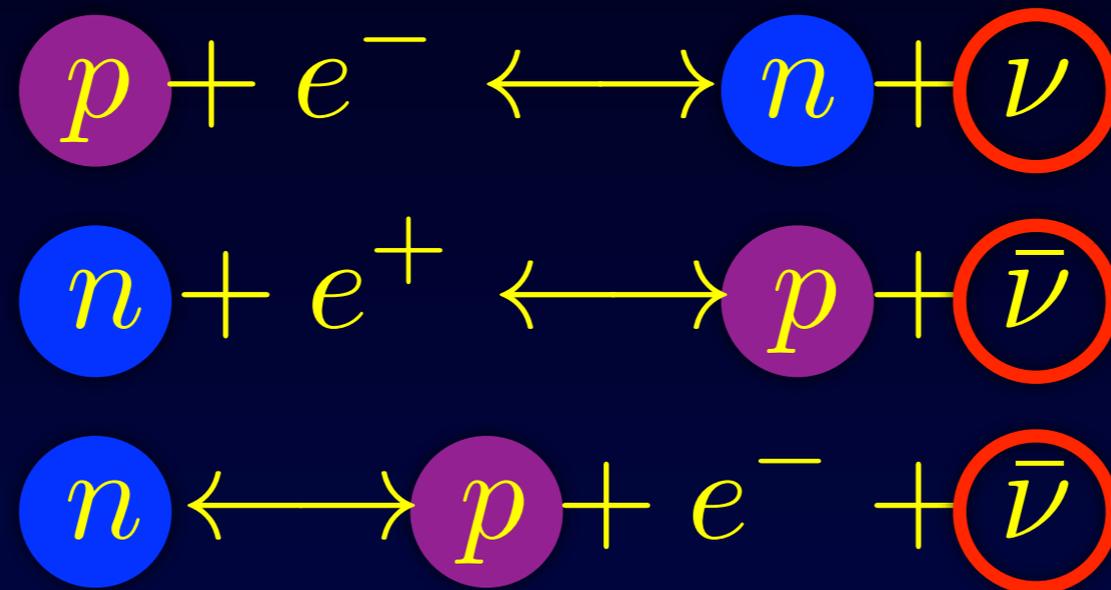
besteht das Universum aus:

- Elektronen + Positronen,
- Neutrinos,
- Strahlung,
- einigen wenigen Neutronen und Protonen

Wenn das Universum abkühlt werden praktisch alle Neutronen in Heliumkerne ( $2p + 2n$ ) gebunden →  
Das Universum besteht rund aus 24% aus He und 76% H

# *Neutrinos und die Entstehung der Elemente*

Das Neutron/Proton-Verhältnis wird durch Neutrinoreaktionen kontrolliert:



Die Anzahl und Wechselwirkungsstärke der Neutrinos bestimmen die Menge an primordialem Helium

# *Neutrinos aus dem Kosmos*

Supernova 1987A in der Großen Magellanischen Wolke



99% der Energie einer SN wird in Form von Neutrinos abgegeben  
Neutrinos spielen eine wichtige Rolle bei der Bildung der schweren  
~30 Elemente  
Neutrinos von SN 1987A wurden in Kamiokande und IMB nachgewiesen.

# Künstliche Neutrinoquellen

Kernkraftwerke:



DoubleChooz (Frankreich)

KamLAND (Japan)

# *Künstliche Neutrinoquellen*

Teilchenbeschleuniger:



# *Neutrinooszillationen*

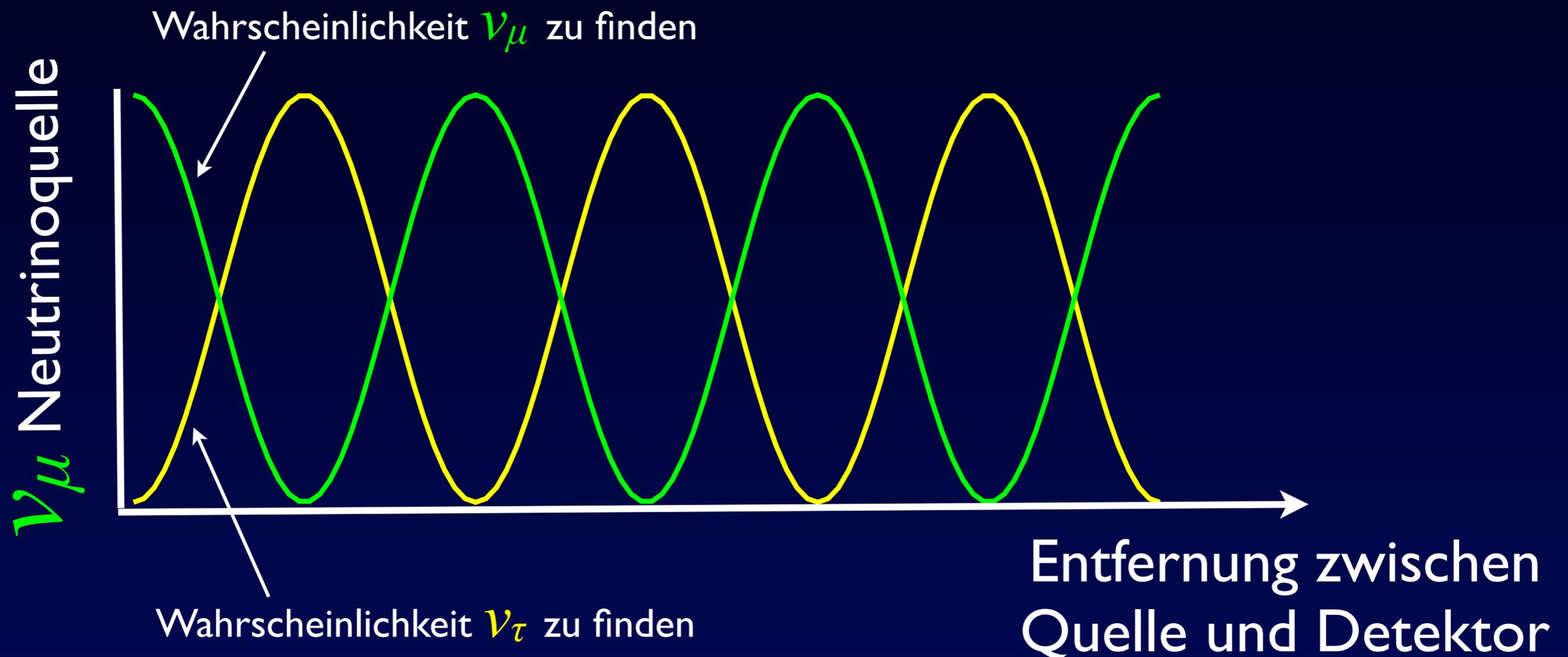
Man kennt heute drei verschiedene Neutrinosorten:

$$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$$

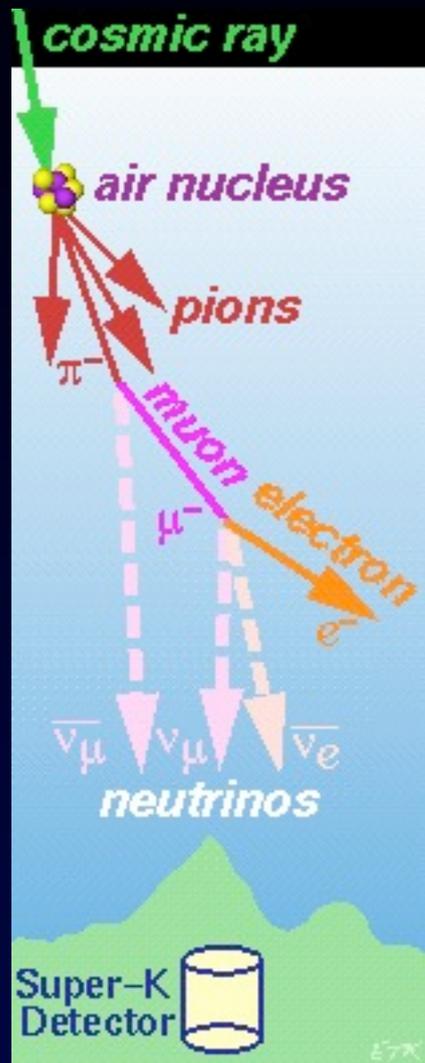
# Neutrinooszillationen

Man kennt heute drei verschiedene Neutrinosorten:

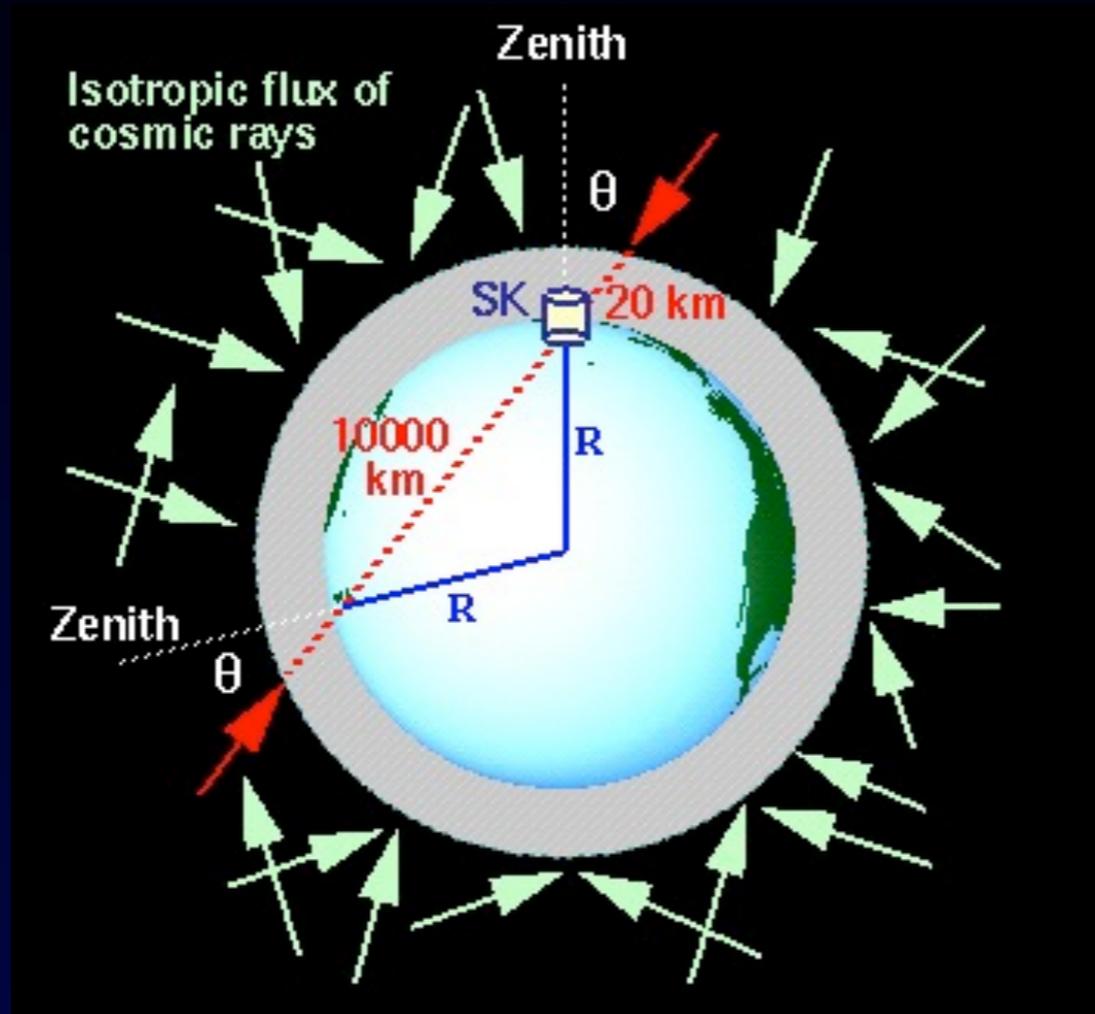
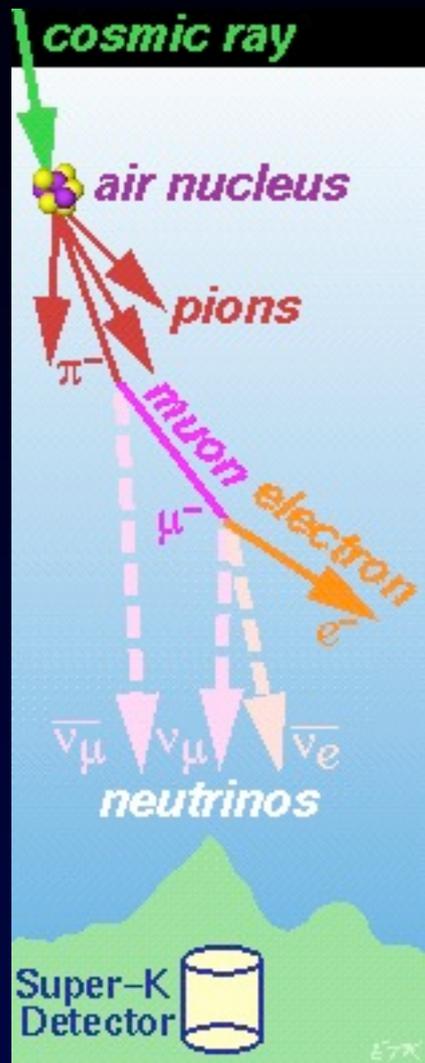
$\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$



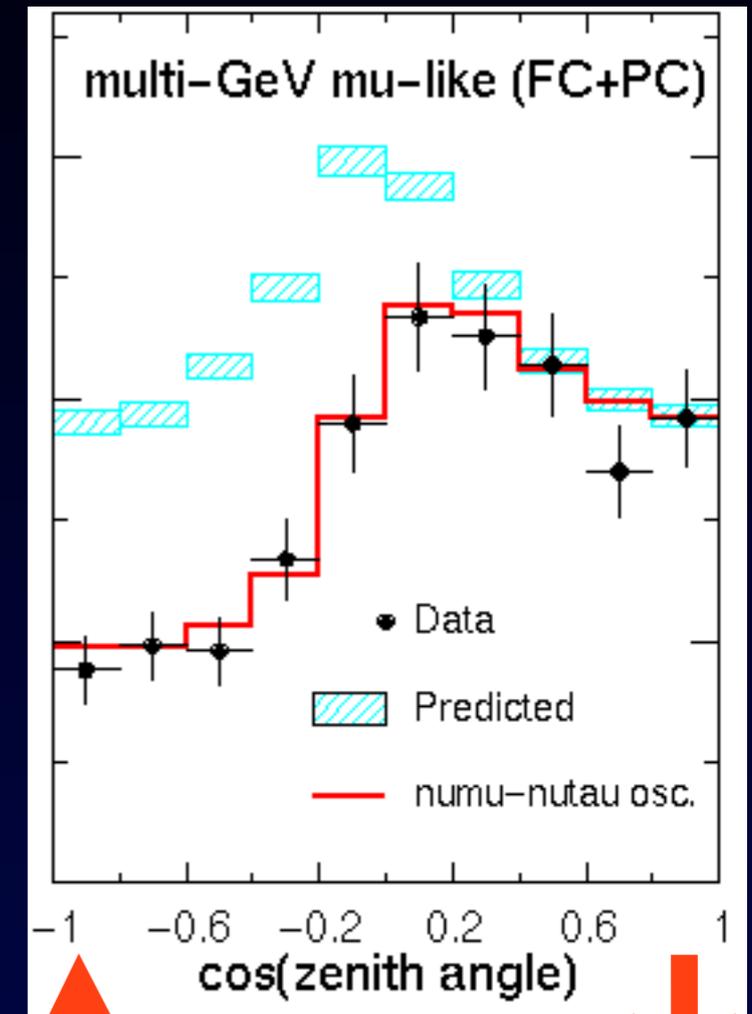
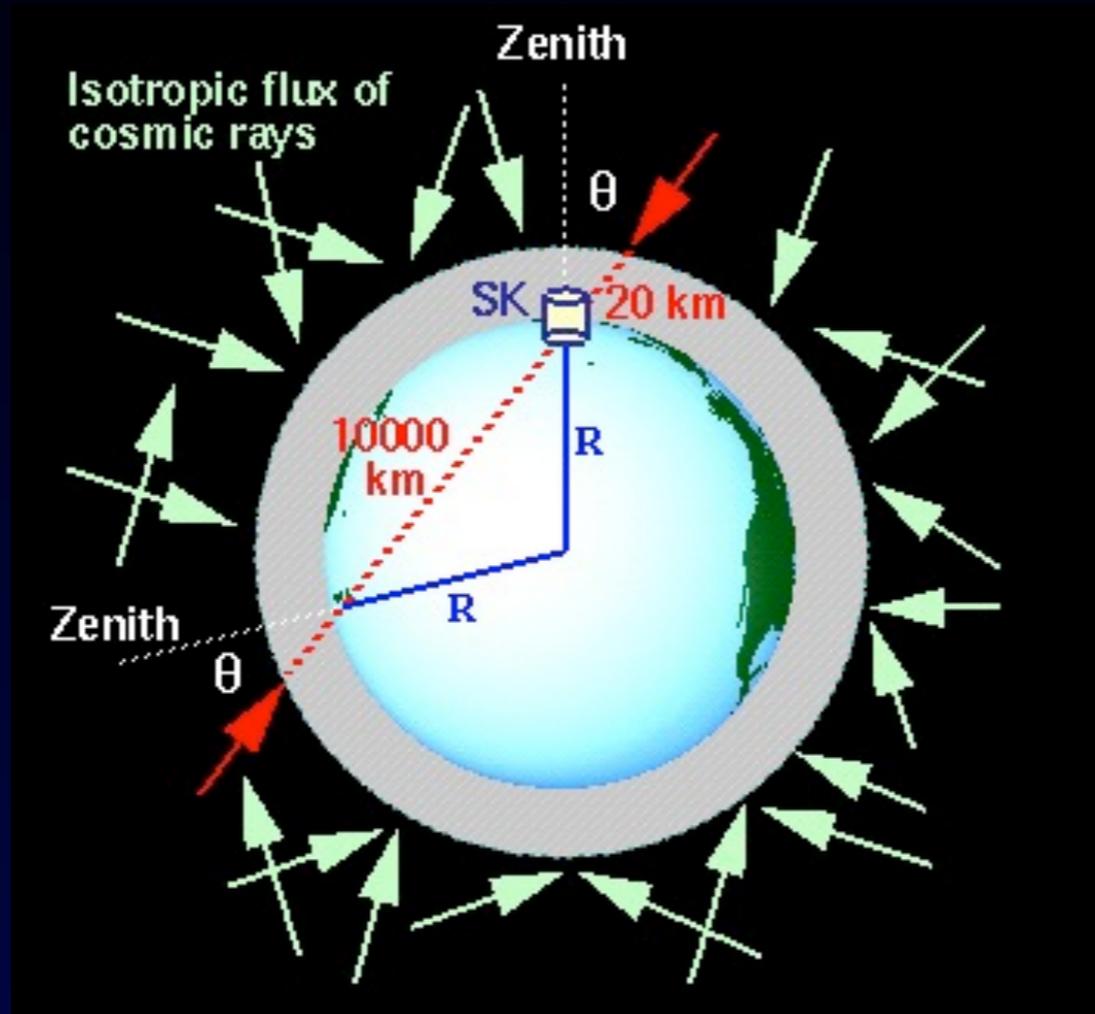
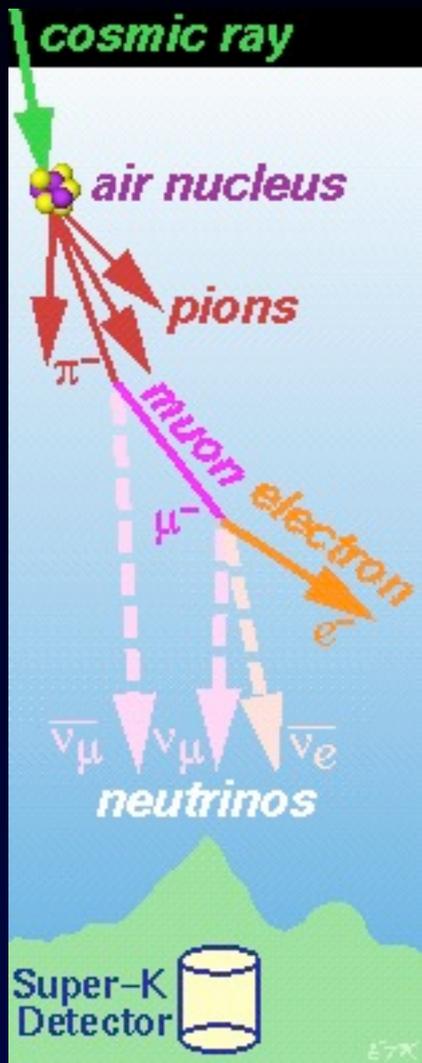
# Atmosphärische Neutrinos



# Atmosphärische Neutrinos



# Atmosphärische Neutrinos



**1998:** SuperKamiokande misst weniger Neutrinos von unten als von oben  $\rightarrow$  wegabhängiger Effekt, kann durch **Oszillationen** erklärt werden

# *Neutrinooszillationen*

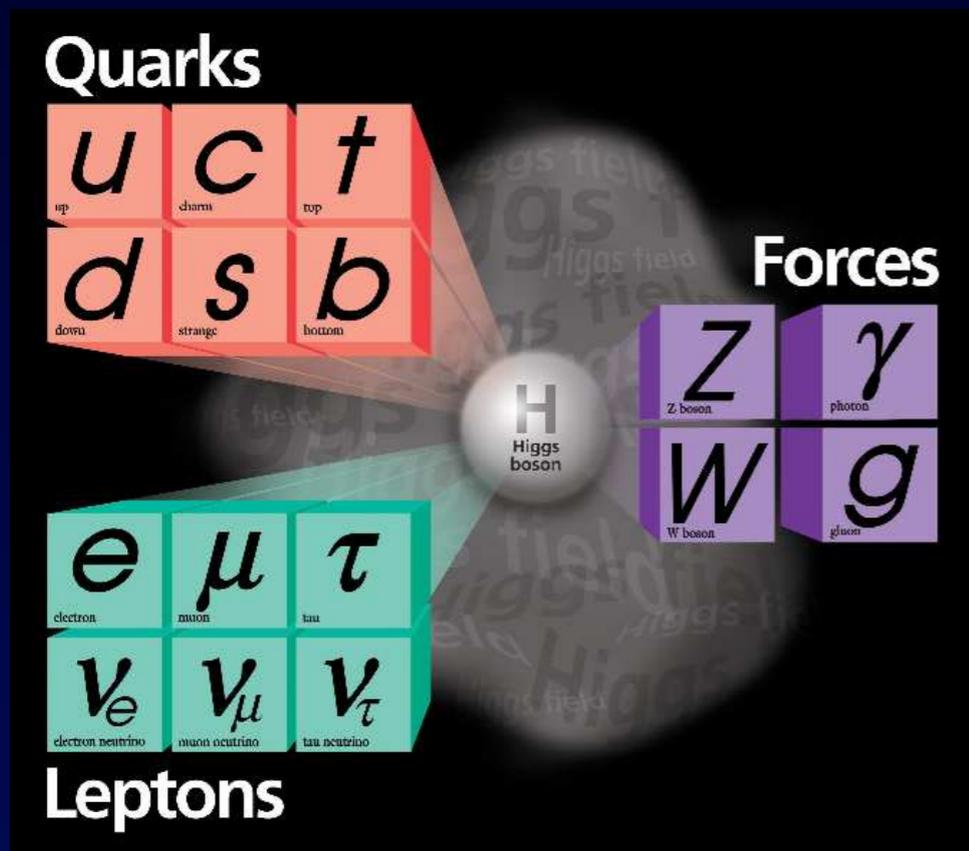
von mehreren Experimenten unabhängig bestätigt:

- **SuperKamiokande**: atmosphärische Neutrinos
- **SNO, Borexino, ...**: Sonnenneutrinos
- **KamLAND, Daya Bay, Double Chooz, ...**:  
Reaktorneutrinos
- **MINOS, T2K** :  
Neutrinos von Teilchenbeschleunigern

# Neutrinooszillationen

...ist ein quantenmechanischer Effekt, der nur auftreten kann, wenn Neutrinos Masse haben.

Beobachtung von Neutrinooszillationen ist der Beweis dass Neutrinos Masse haben.



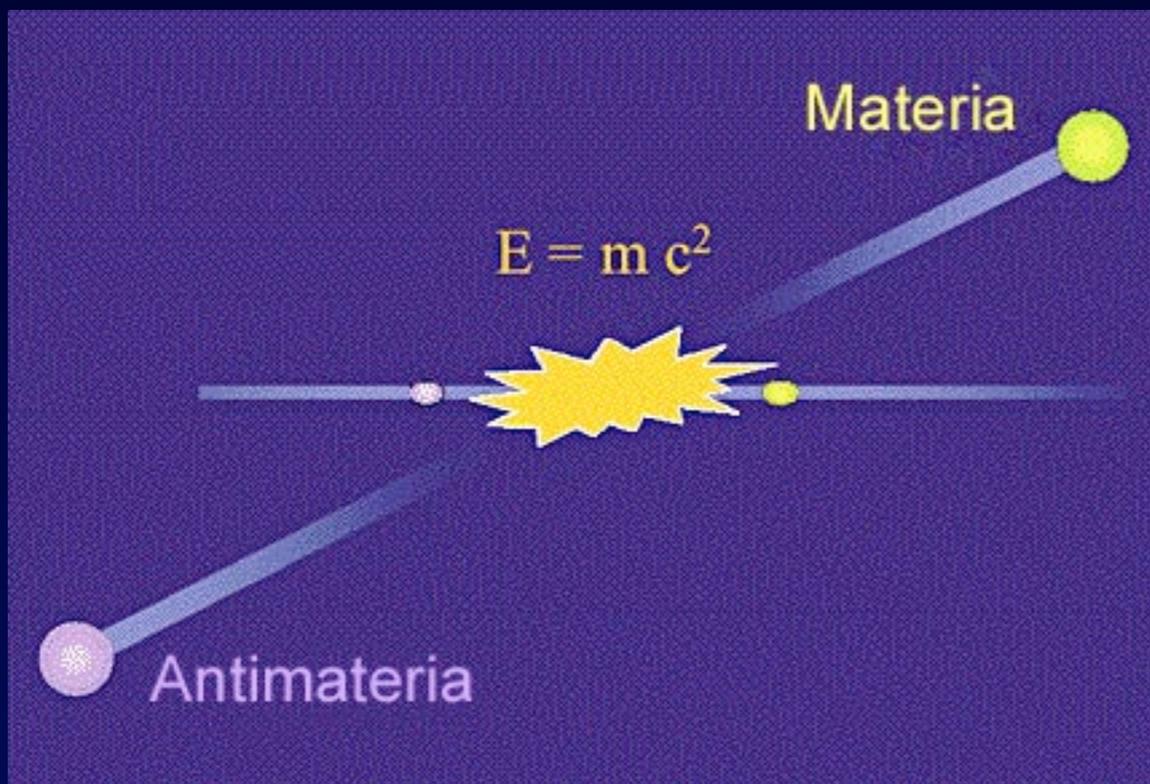
Um Neutrinos Masse zu geben, muss das **Standard Modell der Teilchenphysik** erweitert werden: man muss neue Teilchen postulieren!

# Teilchen und Antiteilchen

Teilchen mit identischen Eigenschaften (z.B. Masse)  
aber umgekehrte elektrische Ladung: z.B.:

Elektron (-)  $\leftrightarrow$  Positron (+)

Proton (+)  $\leftrightarrow$  Antiproton (-)



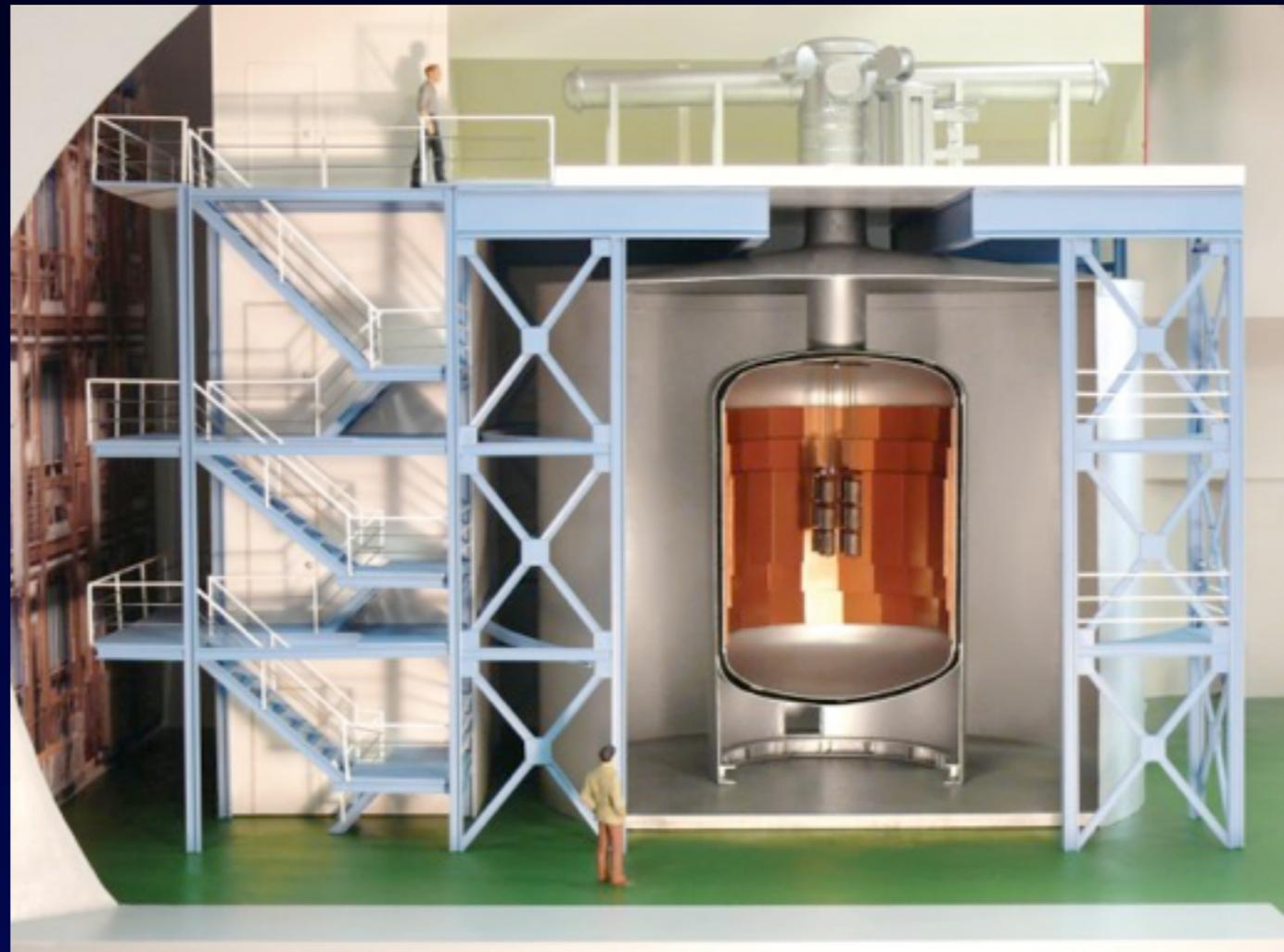
Teilchenanzahl -  
Antiteilchenanzahl =  
konstant  
(Ladungserhaltung)

# *Majorana-Neutrinos*

Vielleicht ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen!  
Neutrinoanzahl (“Leptonzahl”) wäre nicht erhalten.



Ettore Majorana 1937



GERDA Experiment

# *Die Entstehung der Materie*

Kurz nach dem Urknall gab es (fast) gleichviel  
Materie und Antimaterie

10 000 000 002

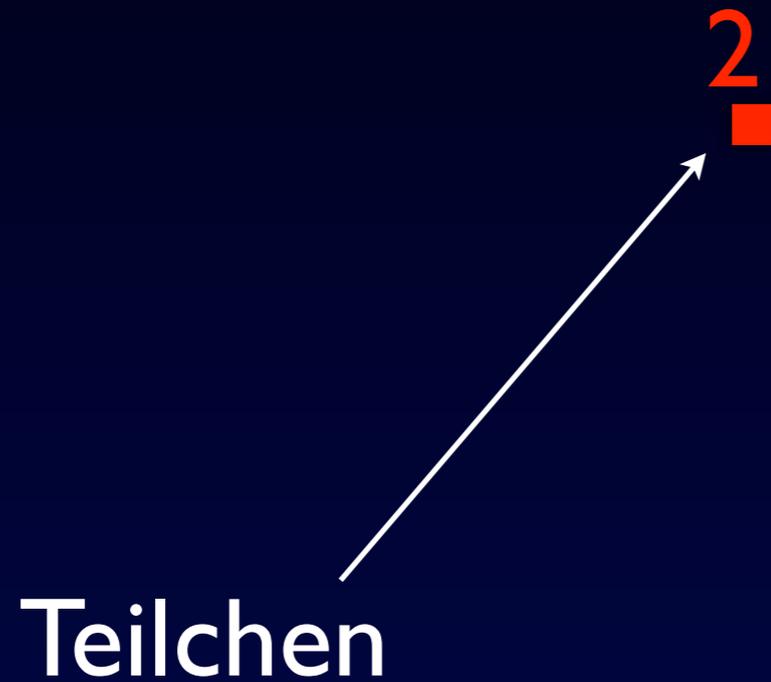
10 000 000 000

Teilchen

Antiteilchen

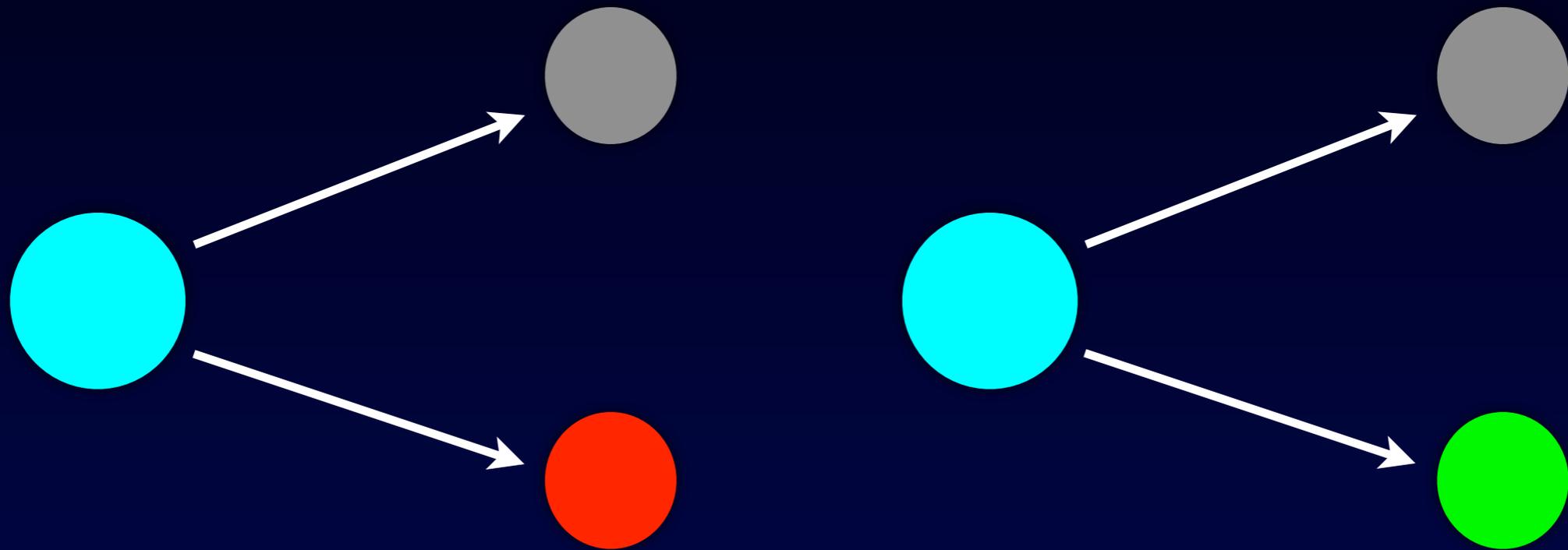
# *Die Entstehung der Materie*

Kurz nach dem Urknall gab es (fast) gleichviel  
Materie und Antimaterie



# *Die Entstehung der Materie*

Wenn Neutrinos Majoranateilchen sind, könnten sie dafür verantwortlich sein, dass es im frühen Universum zu einem kleinen Ungleichgewicht zwischen Teilchen und Antiteilchen kam.

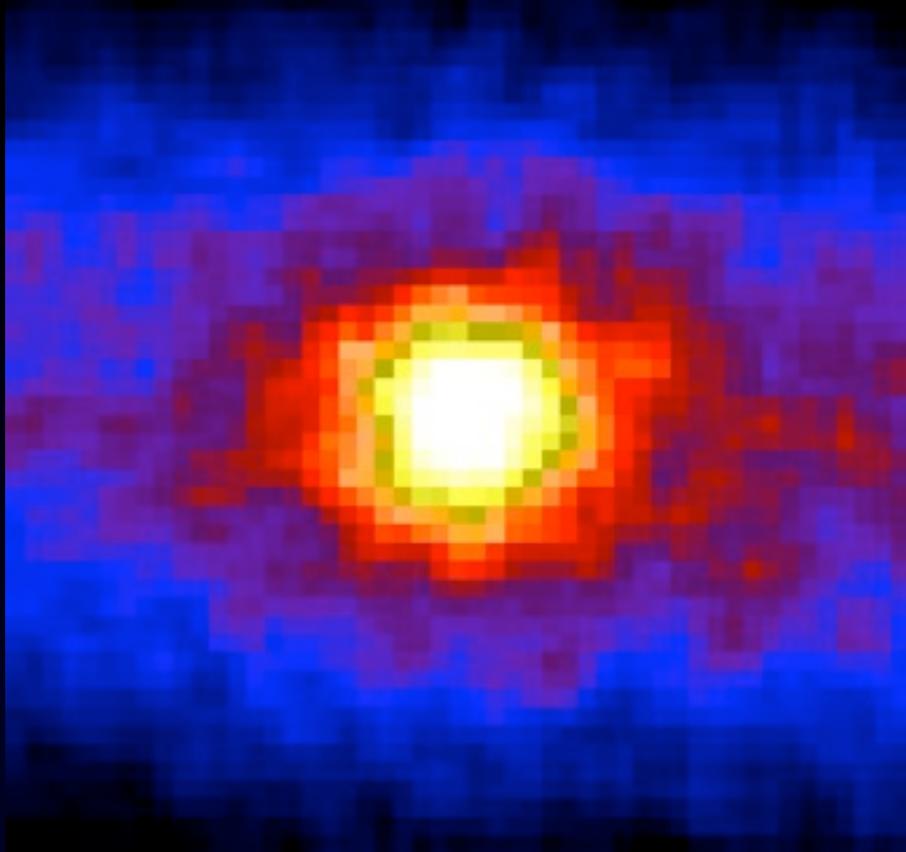


## Superschwere Neutrinos:

- geben den “normalen” Neutrinos Masse,
- zerfallen etwas öfter in Teilchen als in Antiteilchen.

# *4 Gründe warum Neutrinos für unsere Existenz entscheidend sind:*

- Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie wenige Augenblicke nach dem Urknall
- Entstehung der ersten Elemente wenige Minuten nach dem Urknall
- Entstehung der schweren Elemente in Supernovae
- Energieproduktion in der Sonne



*Vielen Dank für Ihr Interesse!*

