

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

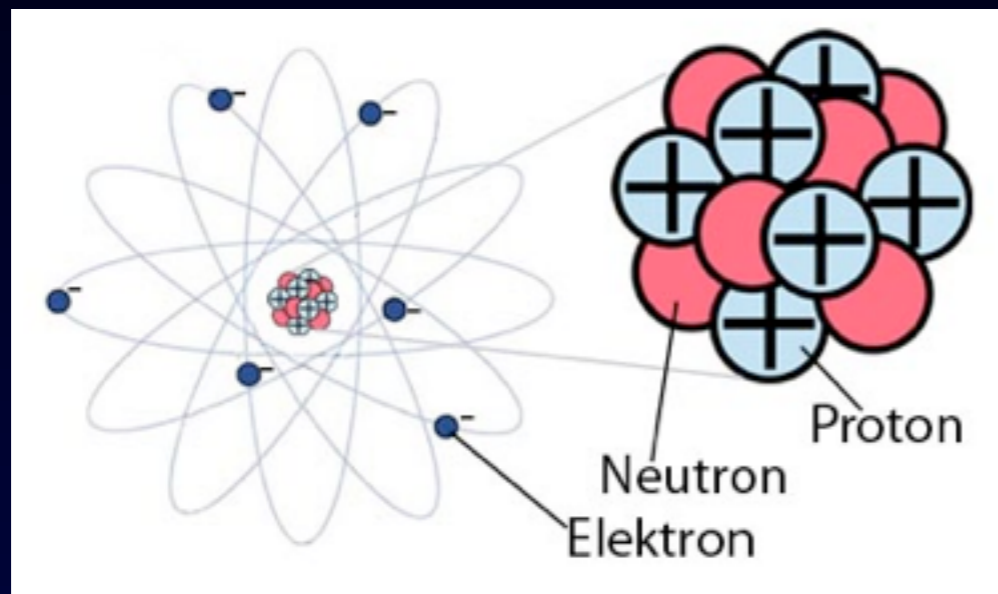
Was ist ein Neutrino?

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:



Proton: 2×10^{-24} g
(0.00000000000000000000000002)

Elektron: 2000 mal
leichter als Proton



Was ist ein Neutrino?

Ein Teilchen mit extrem kleiner Masse:

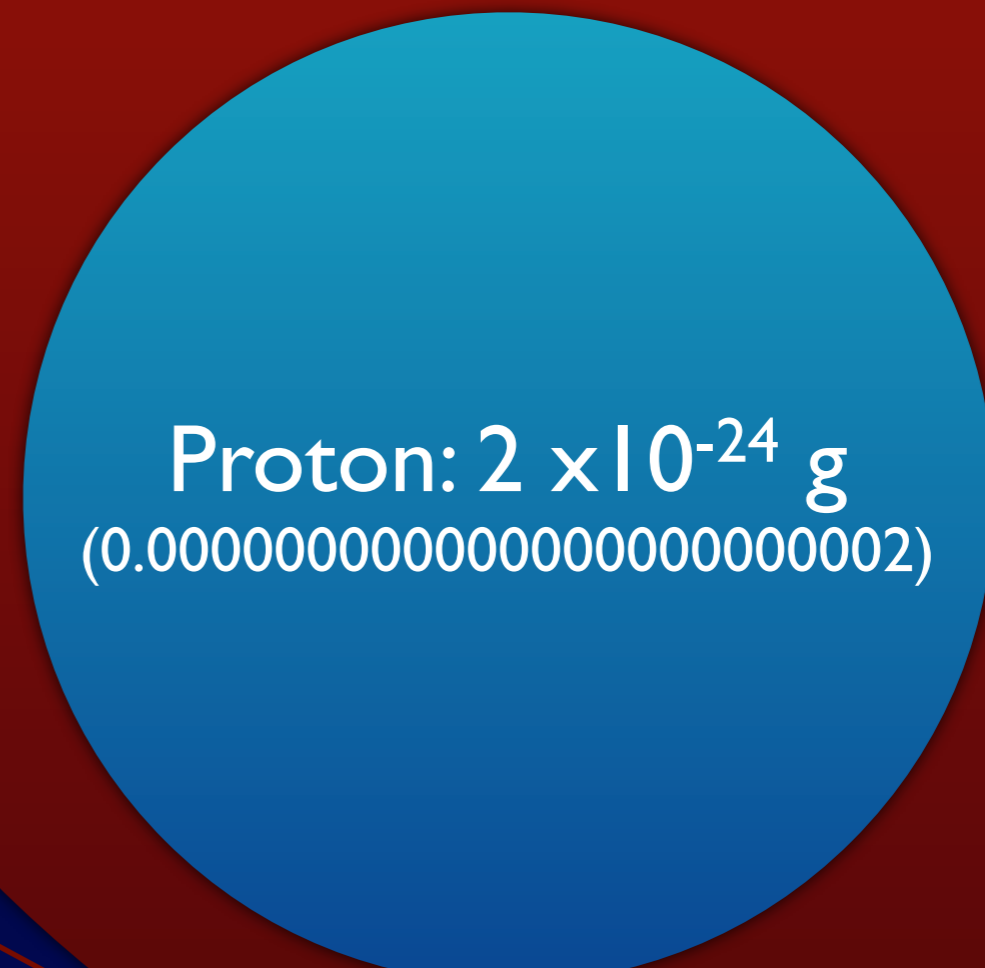
Neutrino: 1 Million mal
leichter als Elektron



Elektron: 2000 mal
leichter als Proton



Proton: 2×10^{-24} g
(0.00000000000000000000000002)



Masse proportional zu Radius³

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?

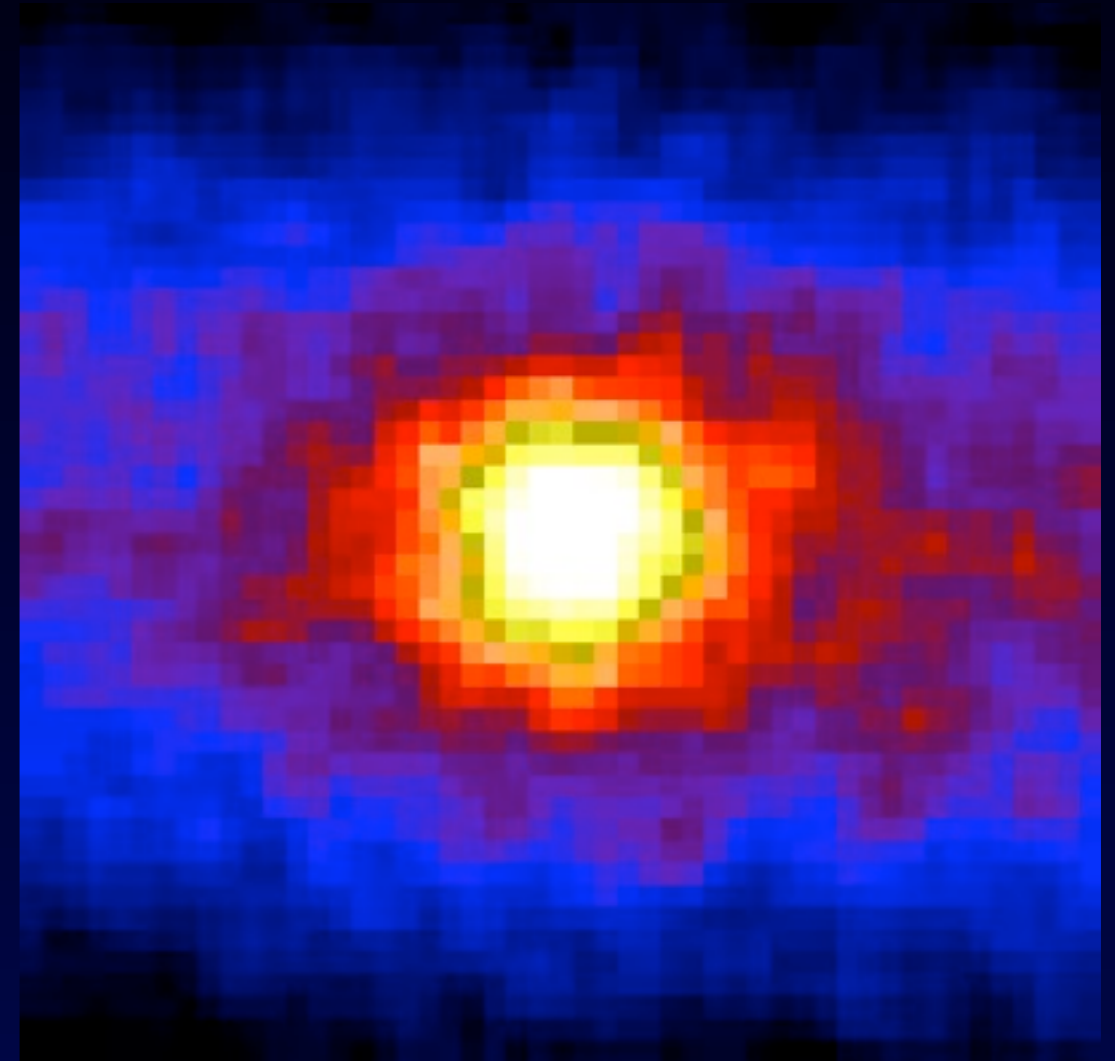
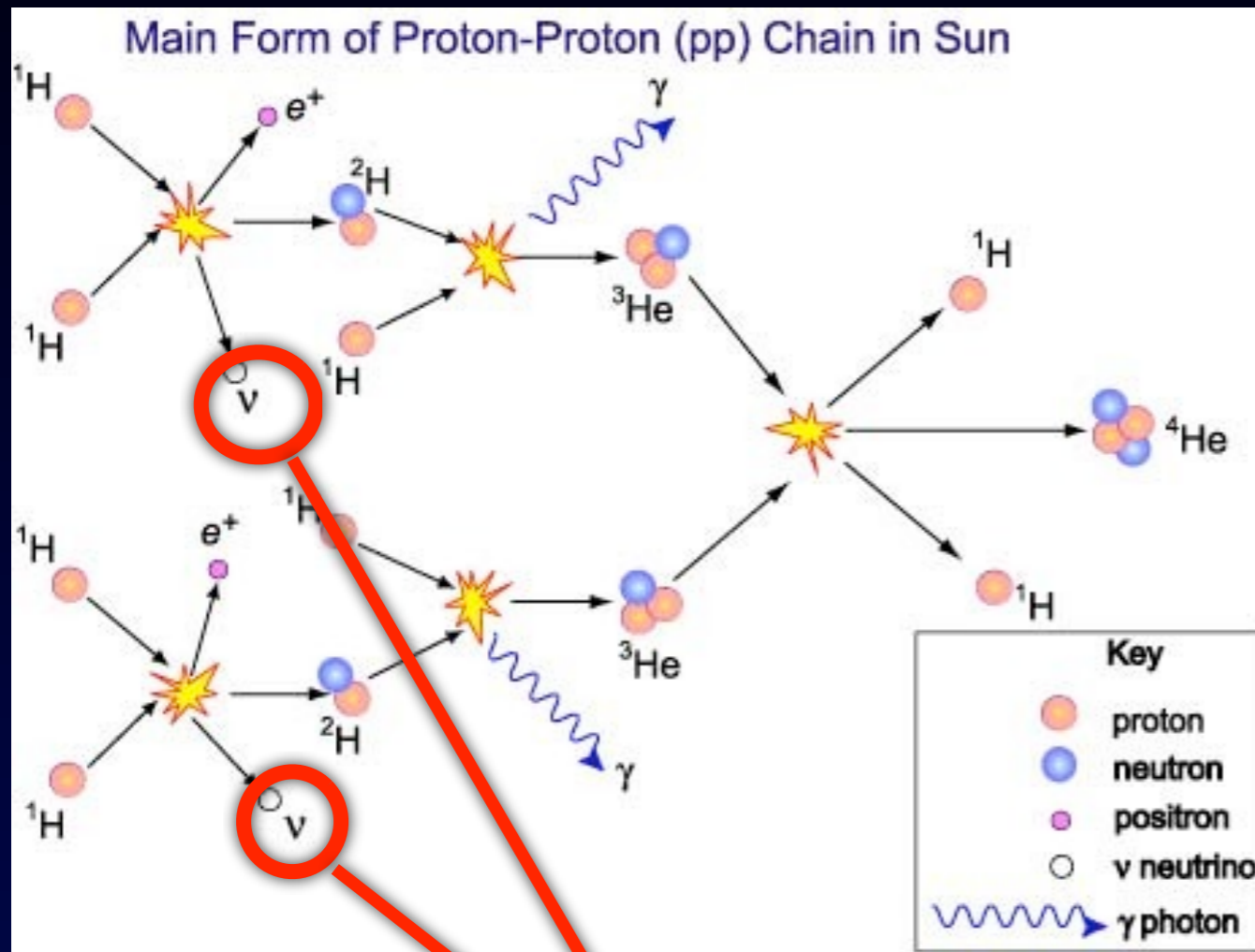
Ein Teilchen mit extrem schwacher Wechselwirkung:
(keine elektrische Ladung)

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?

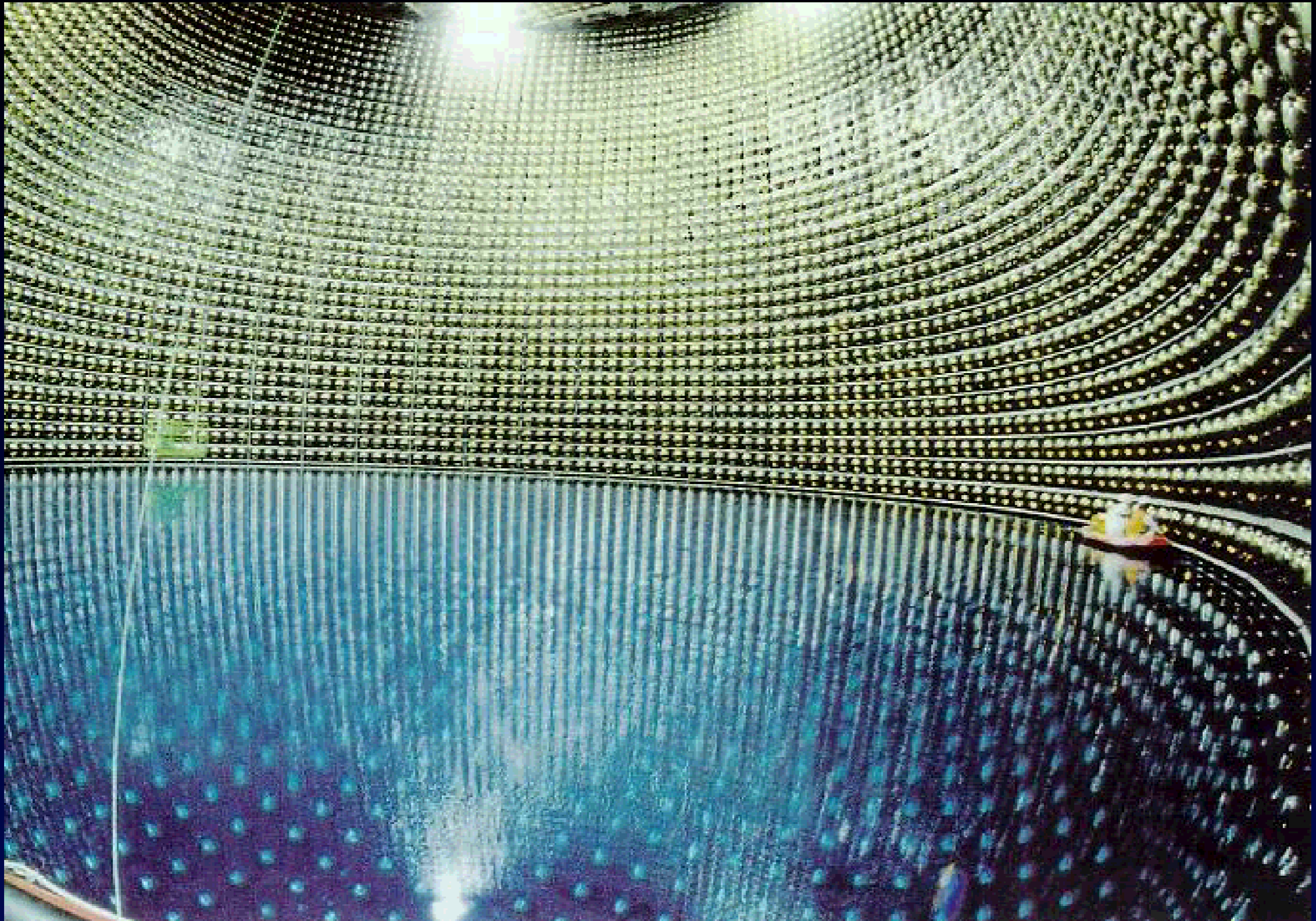
Jede Sekunde gehen

10^{14} Neutrinos (von der Sonne)

durch Ihren Körper

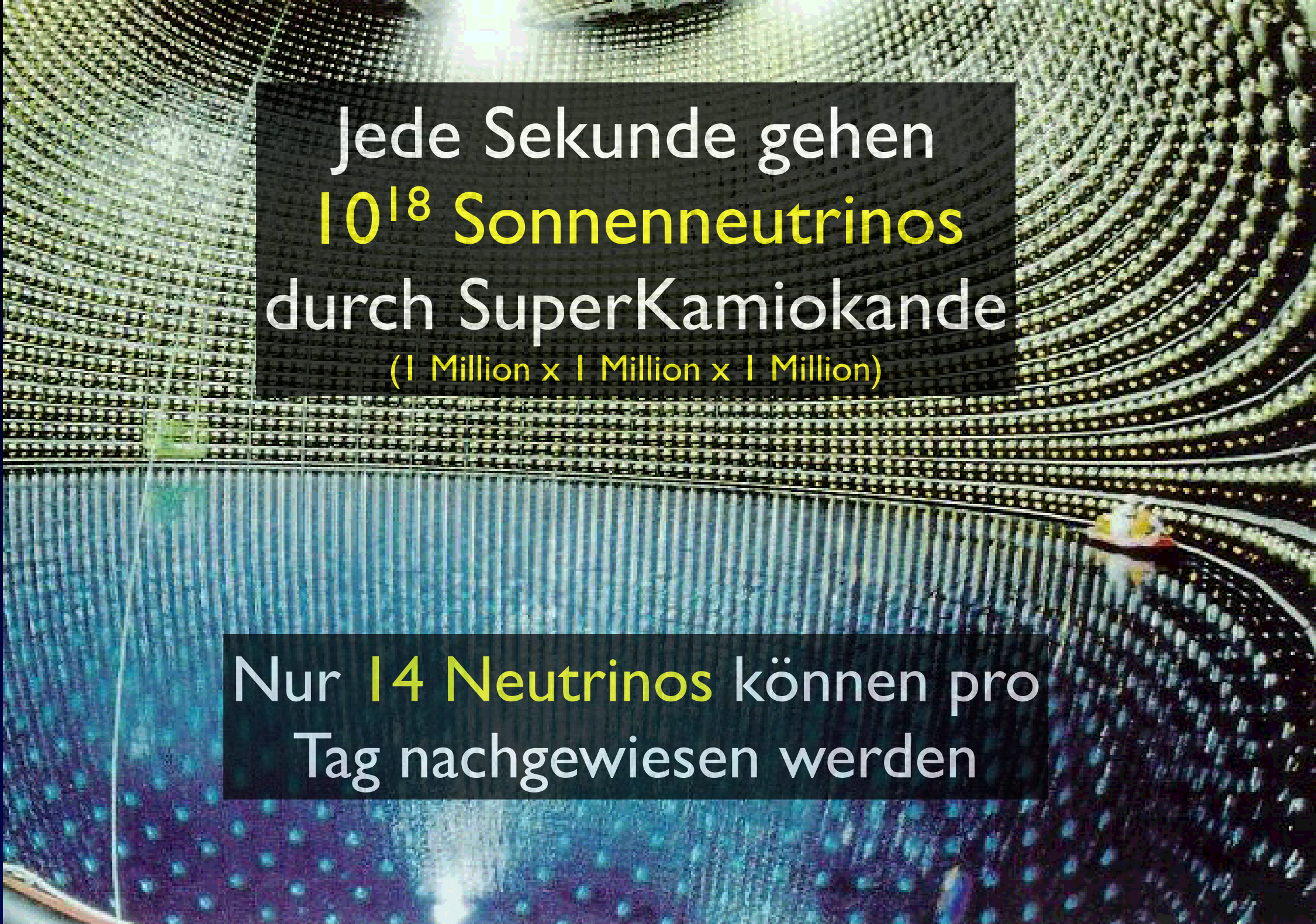
$$\begin{aligned} 10^{14} &= 100\,000\,000\,000\,000 \\ &= 100 \times 1\,\text{Million} \times 1\,\text{Million} \end{aligned}$$

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

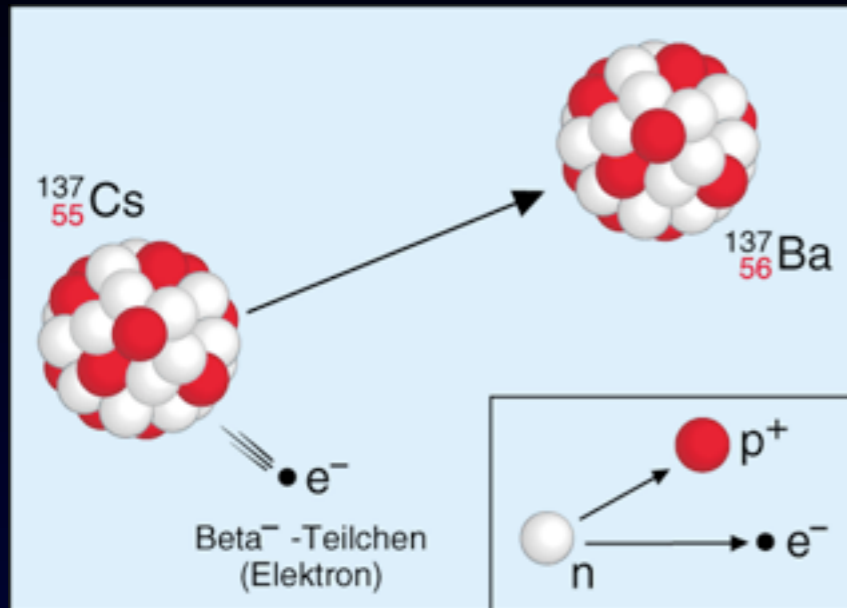
Boten aus dem Inneren der Sonne

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:

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

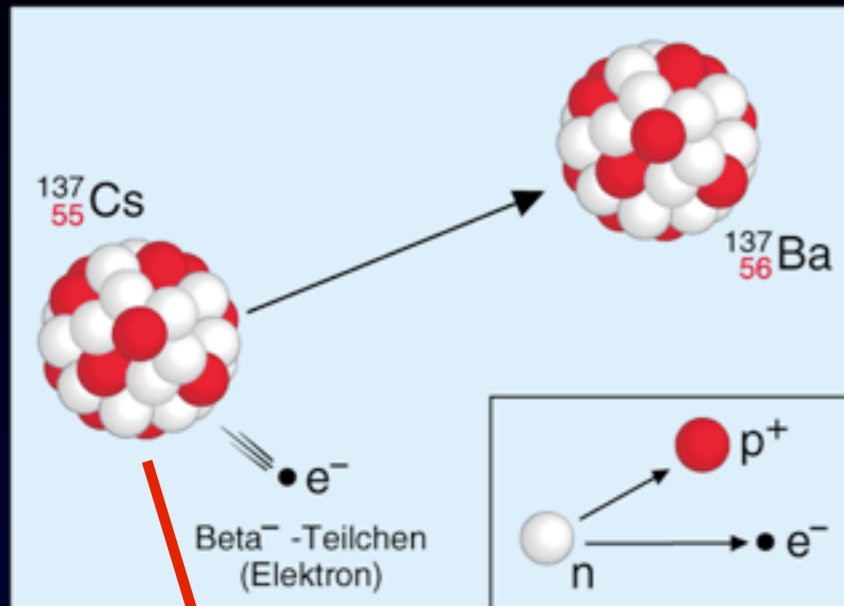
Wie entdeckte man Neutrinos?



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,

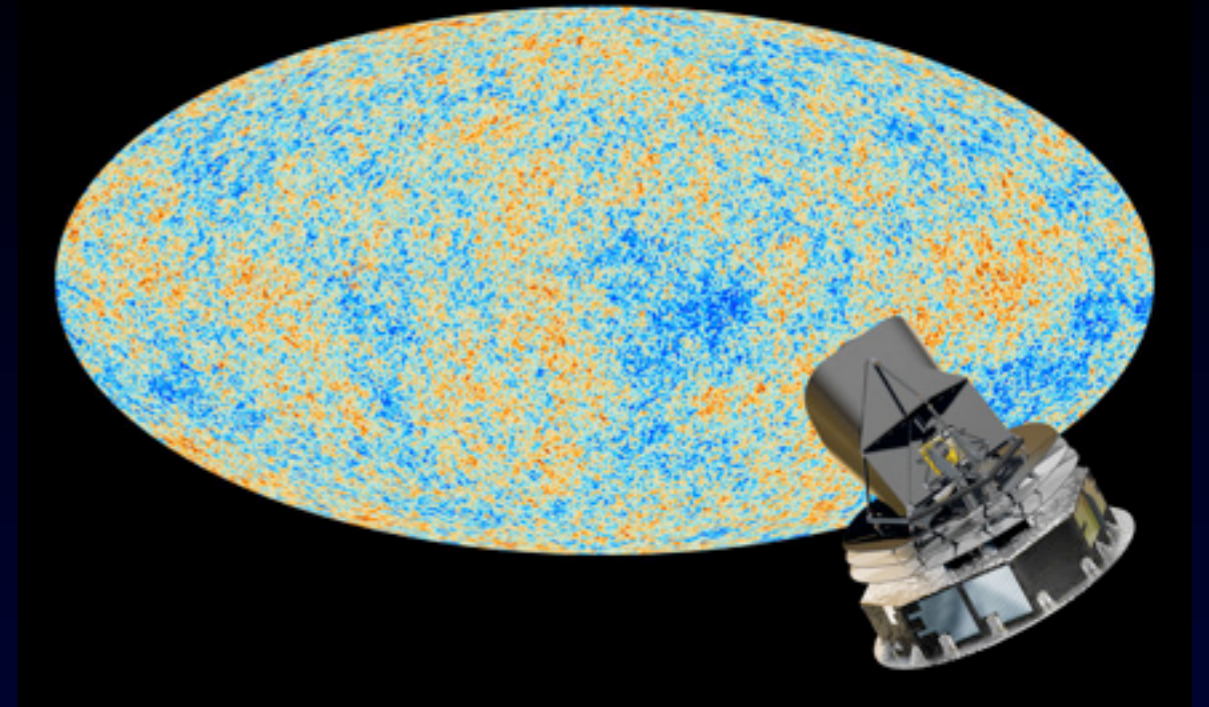
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
anzuhören bitte, Ihnen das näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselwitz" (1) der Statistik 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
dürfte 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 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 ($T = 10 \text{ Mrd K}$)

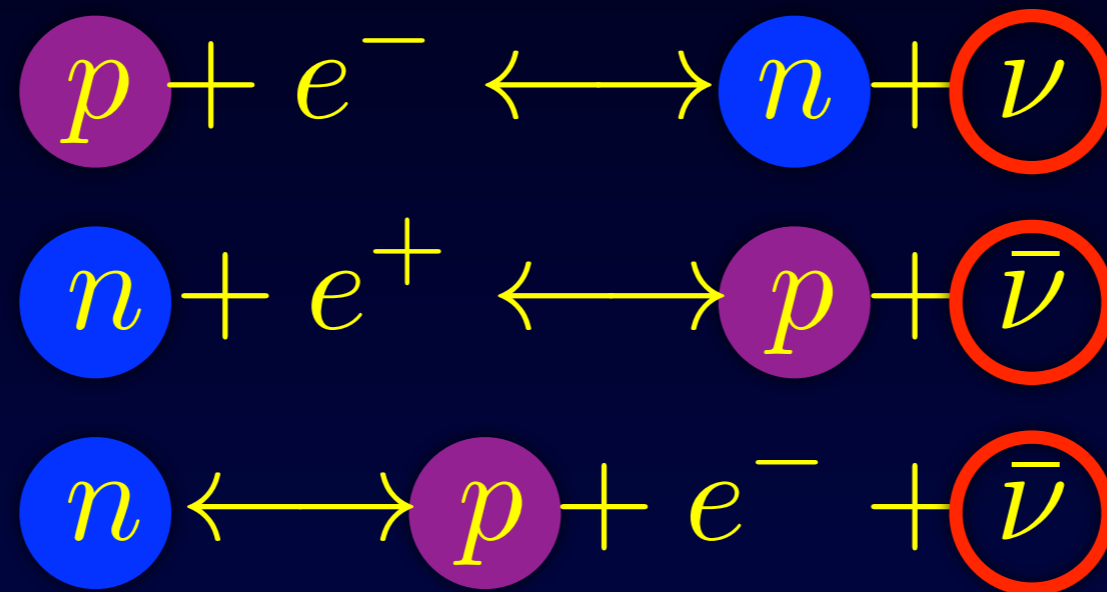
besteht das Universum aus:

- 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

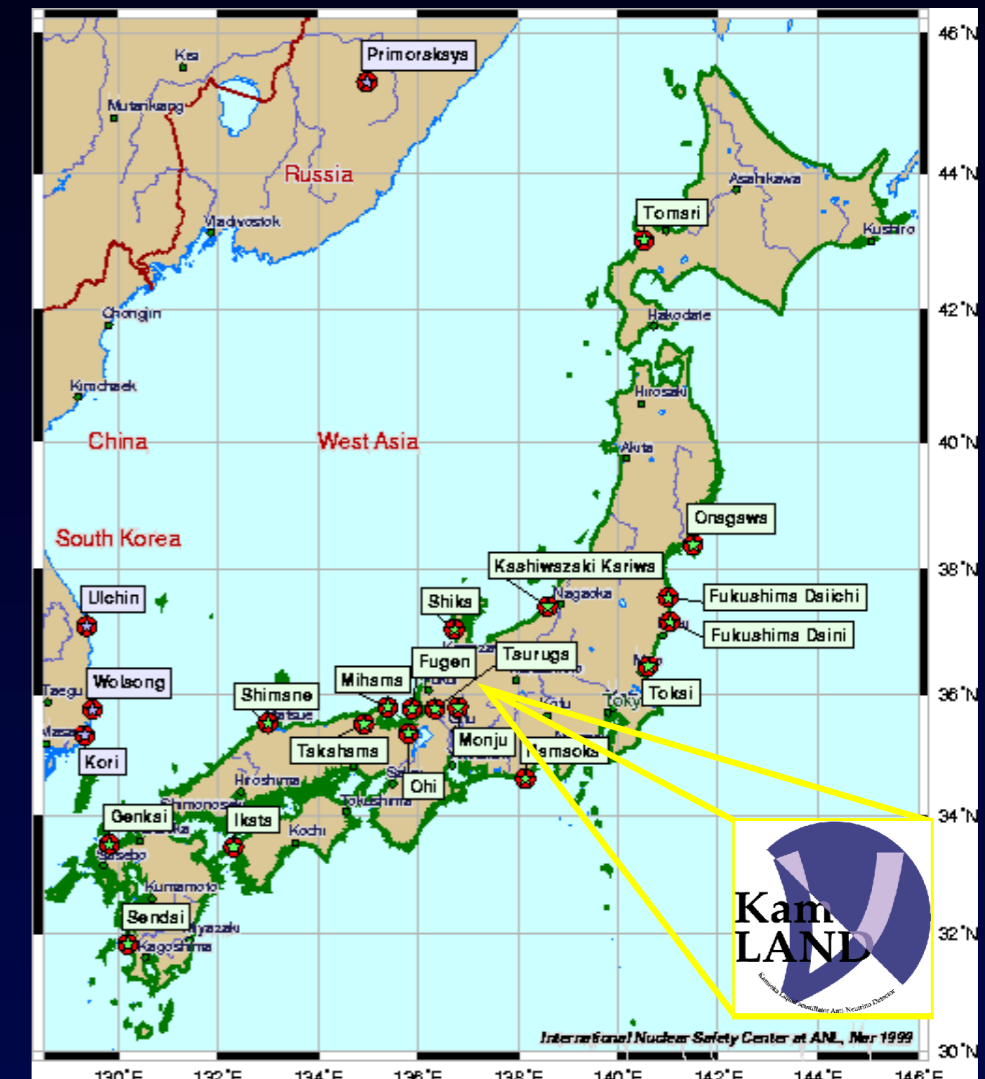
Supernova 1987A in der Großen Magellanischen Wolke



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 SNI 1987A wurden in Kamiokande und IMB nachgewiesen.

Künstliche Neutrinoquellen

Kernkraftwerke:



DoubleChooz (Frankreich)

KamLAND (Japan)

Künstliche Neutrinoquellen

Teilchenbeschleuniger:



Neutrinooszillationen

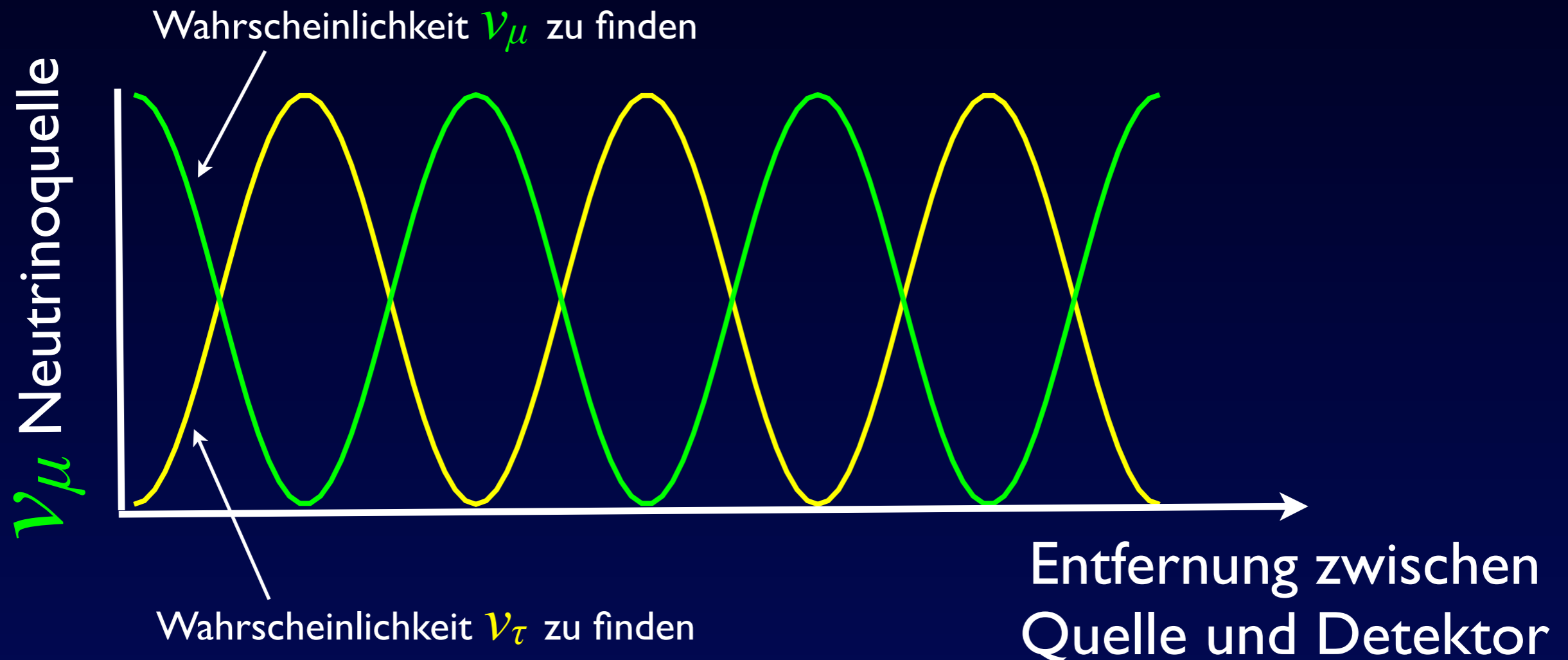
Man kennt heute drei verschiedene Neutrinosorten:

ν_e ν_μ ν_τ

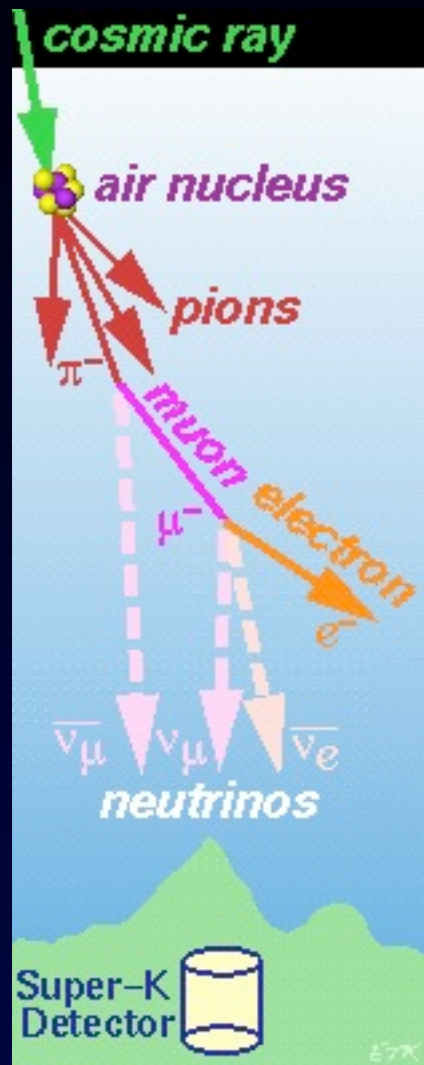
Neutrinooszillationen

Man kennt heute drei verschiedene Neutrinosorten:

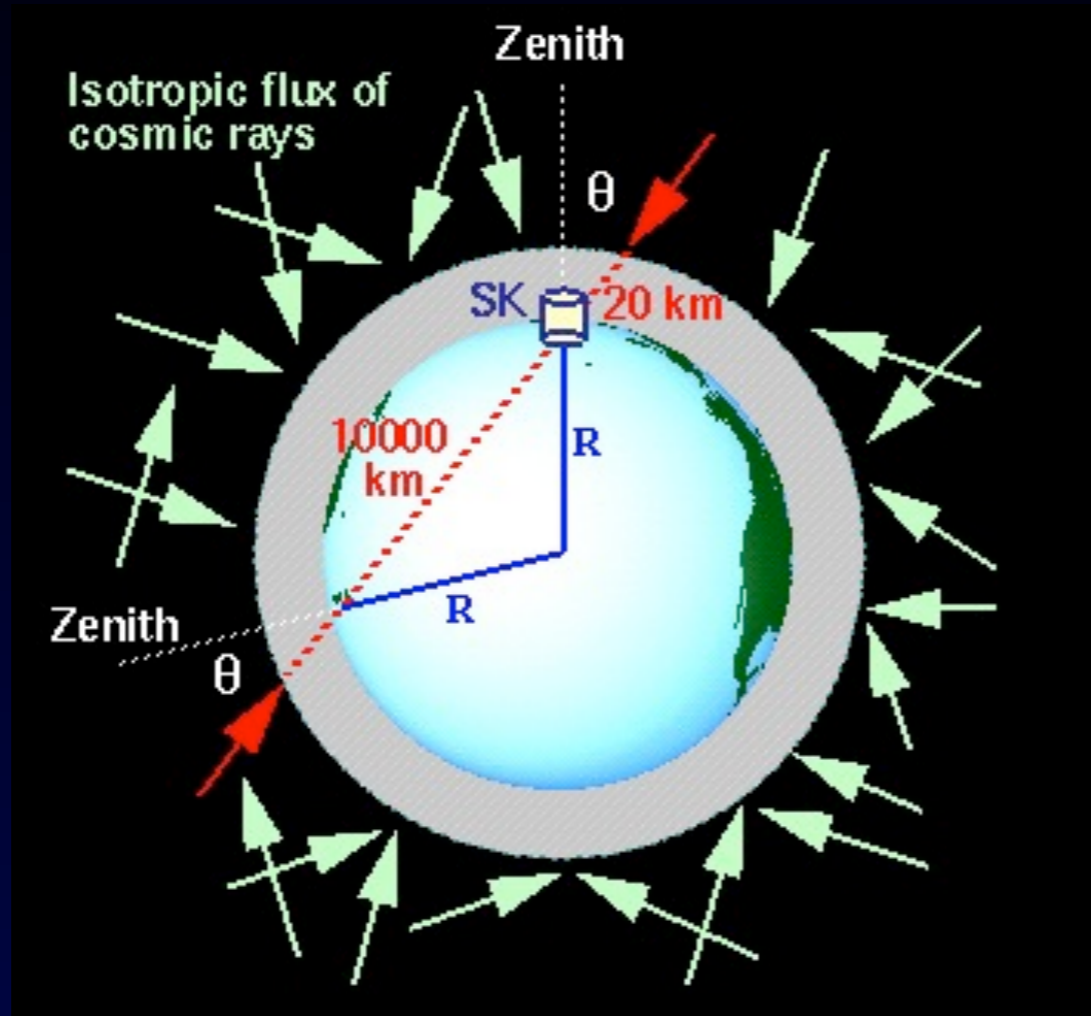
ν_e ν_μ ν_τ



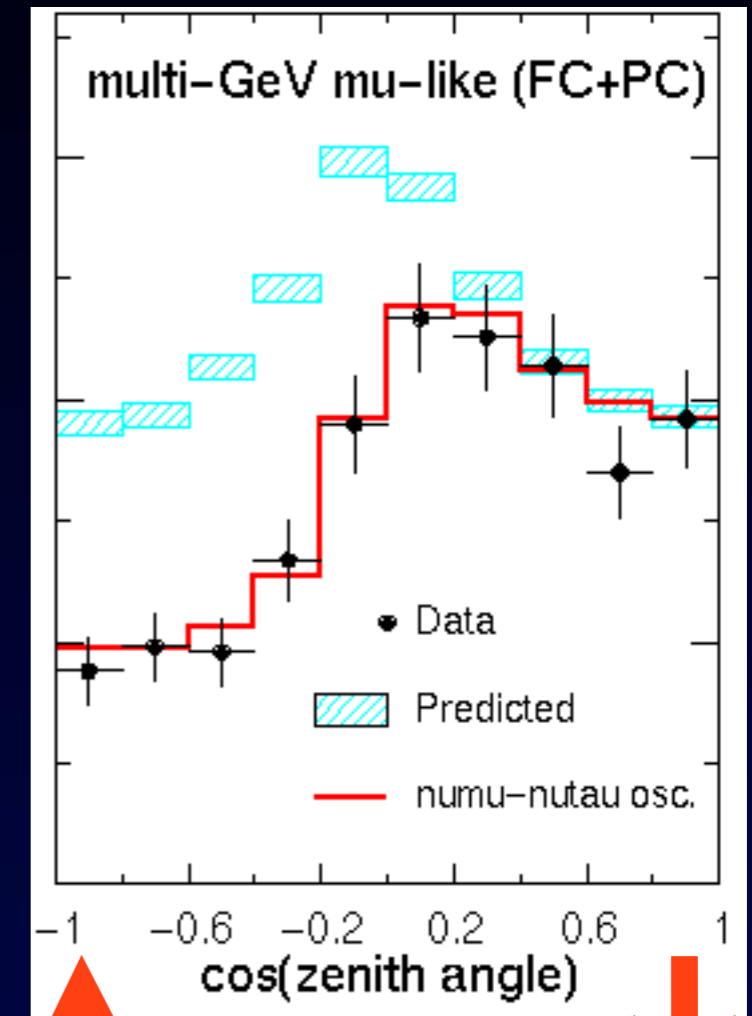
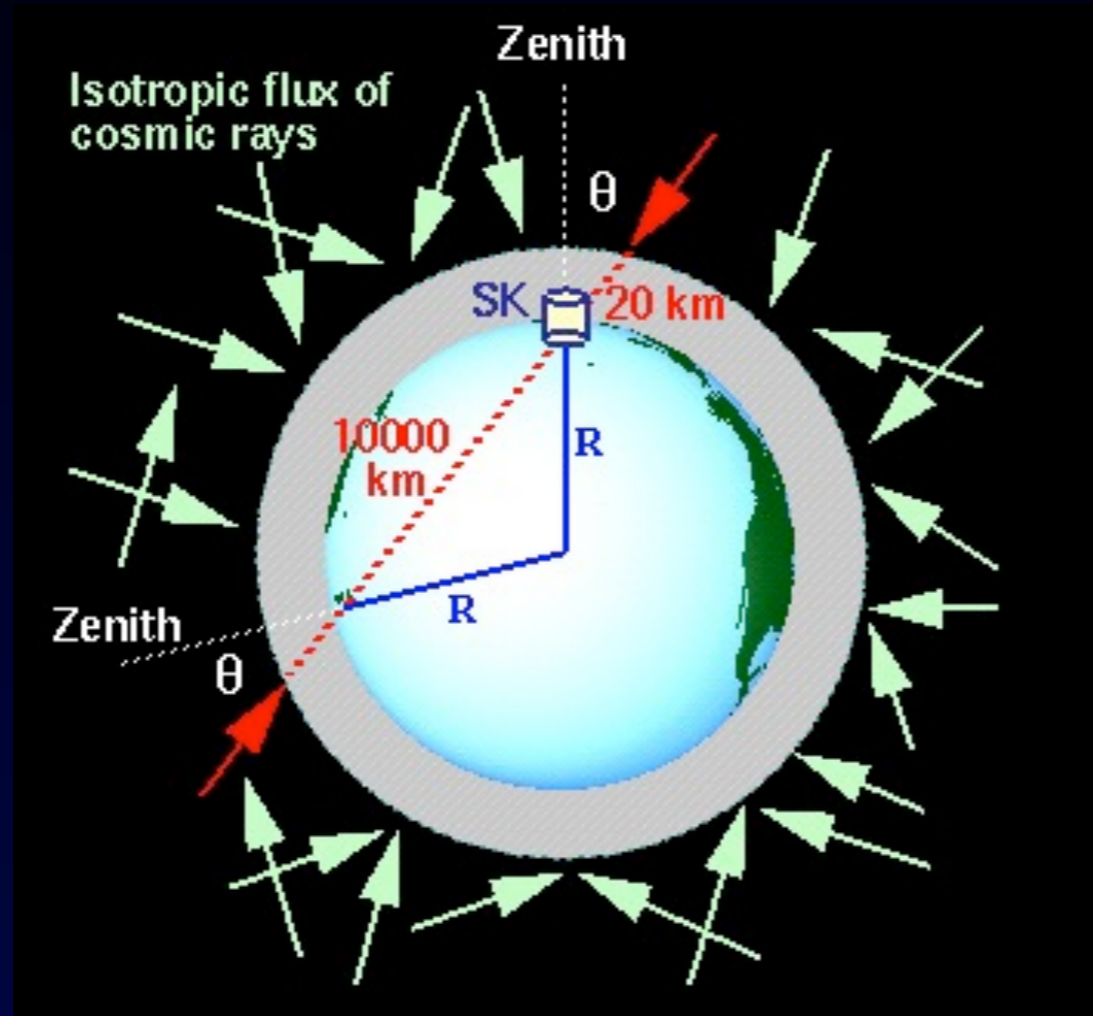
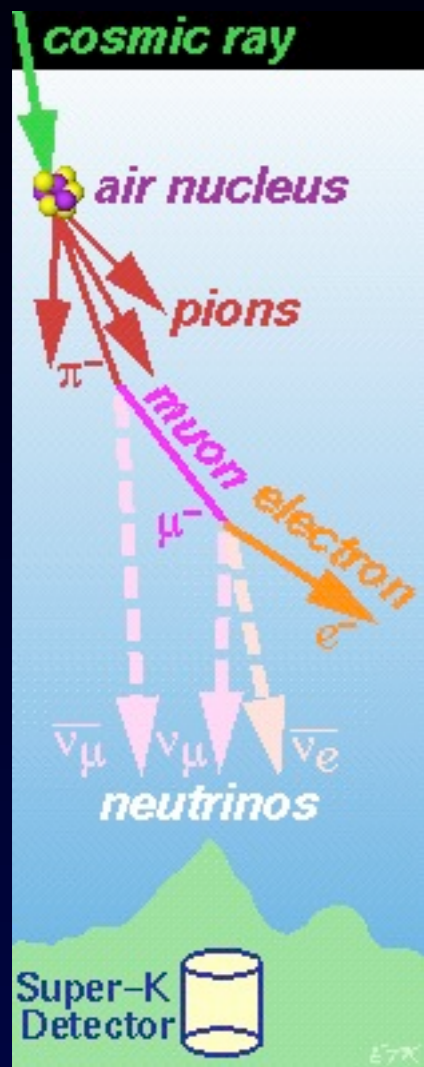
Atmosphärische Neutrinos



Atmosphärische Neutrinos



Atmosphärische Neutrinos



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

Neutrinooszillationen

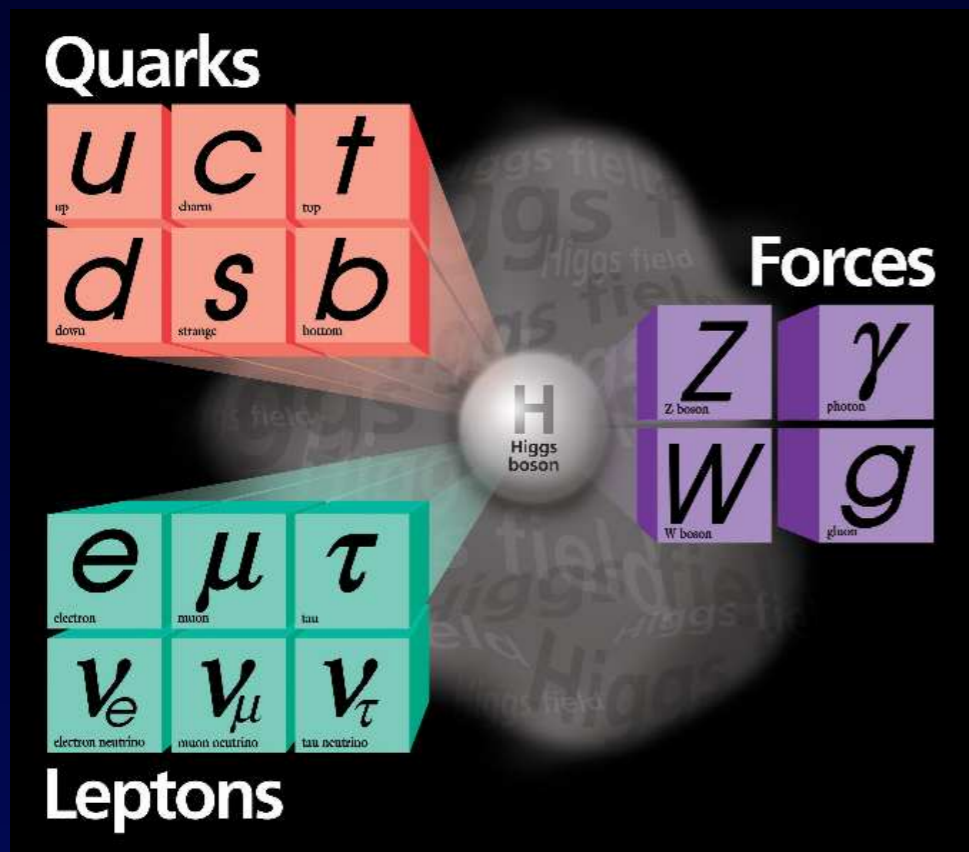
von mehreren Experimenten unabhängig bestätigt:

- **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.



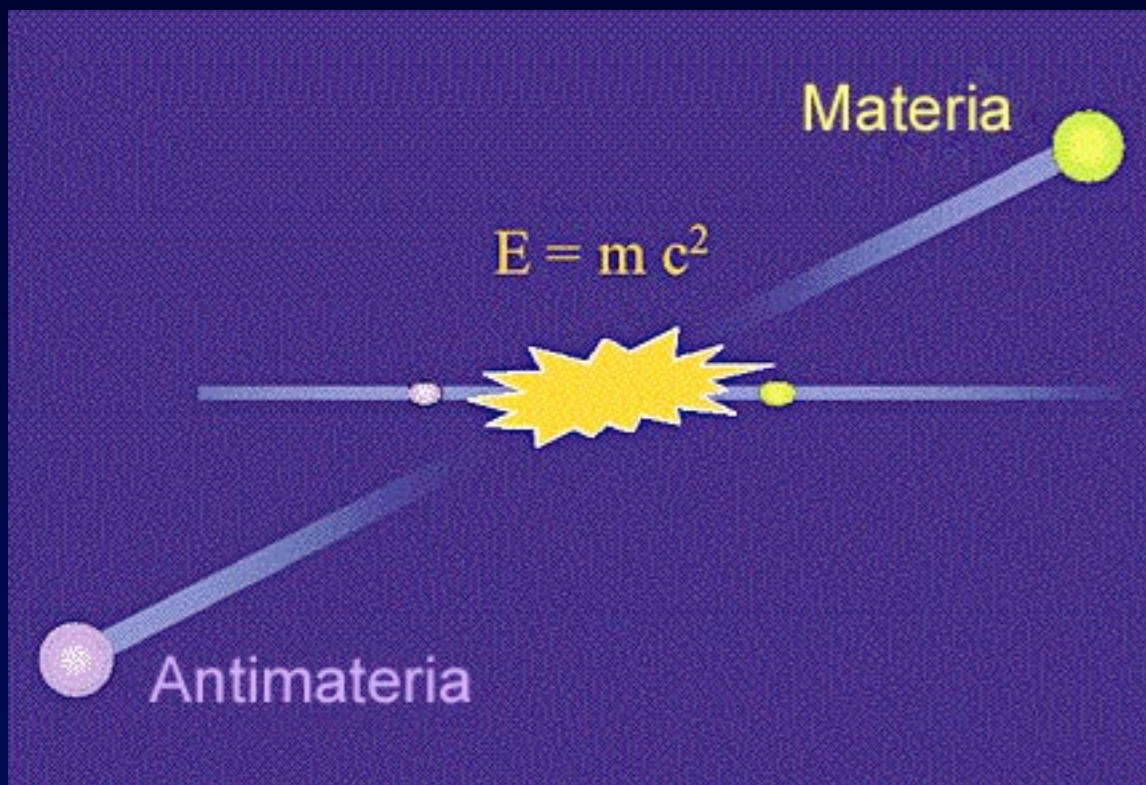
Um Neutrinos Masse zu geben, muss das **Standard Modell der Teilchenphysik** erweitert werden: man muss neue Teilchen postulieren!

Teilchen und Antiteilchen

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

Elektron (-) \leftrightarrow Positron (+)

Proton (+) \leftrightarrow Antiproton (-)



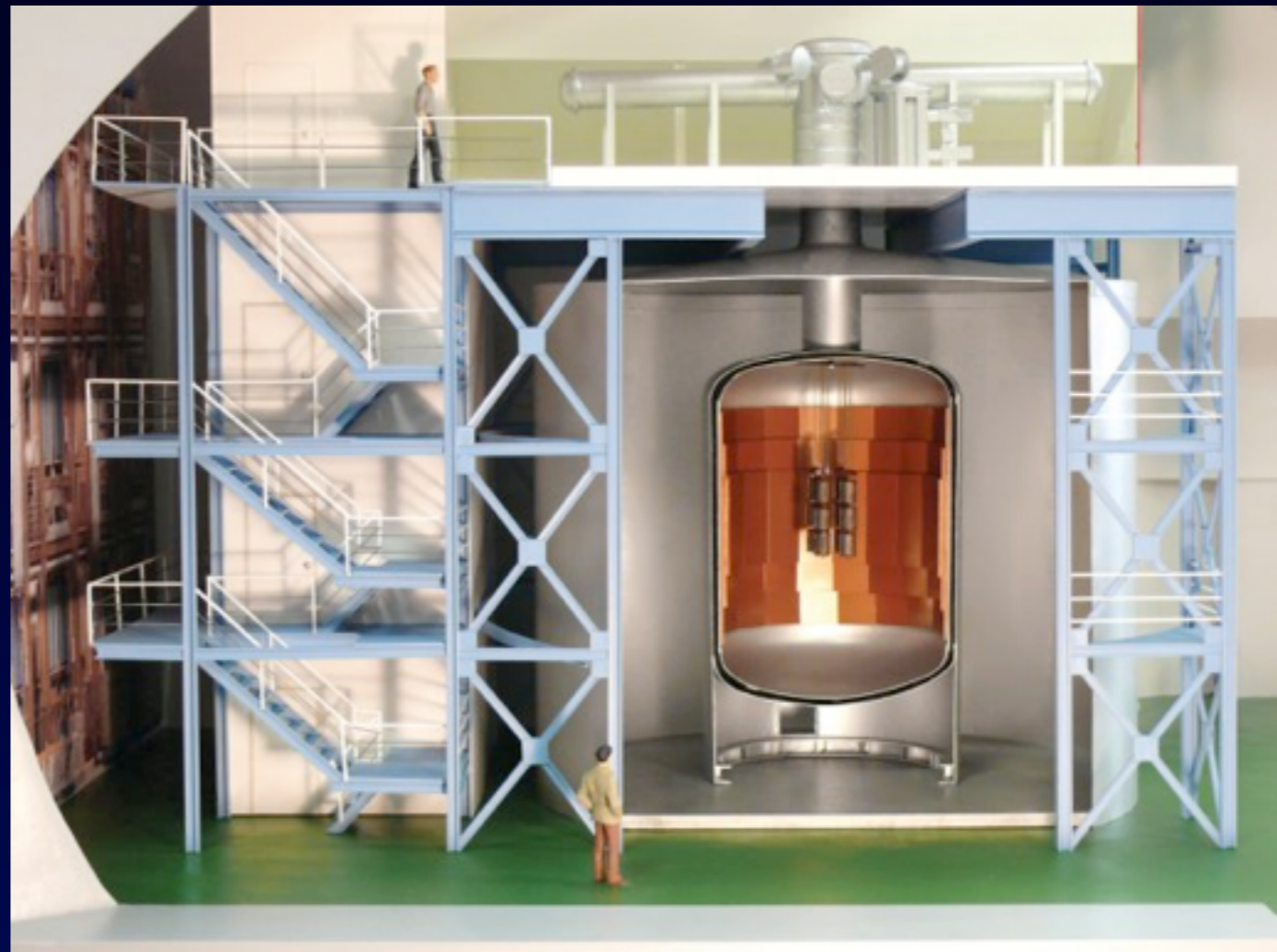
Teilchenanzahl -
Antiteilchenanzahl =
konstant
(Ladungserhaltung)

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

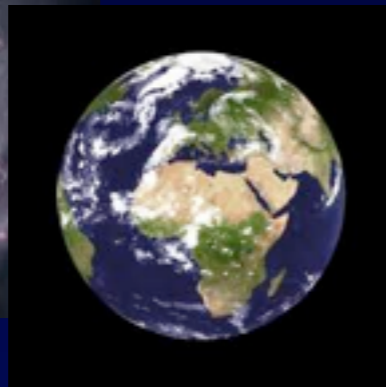
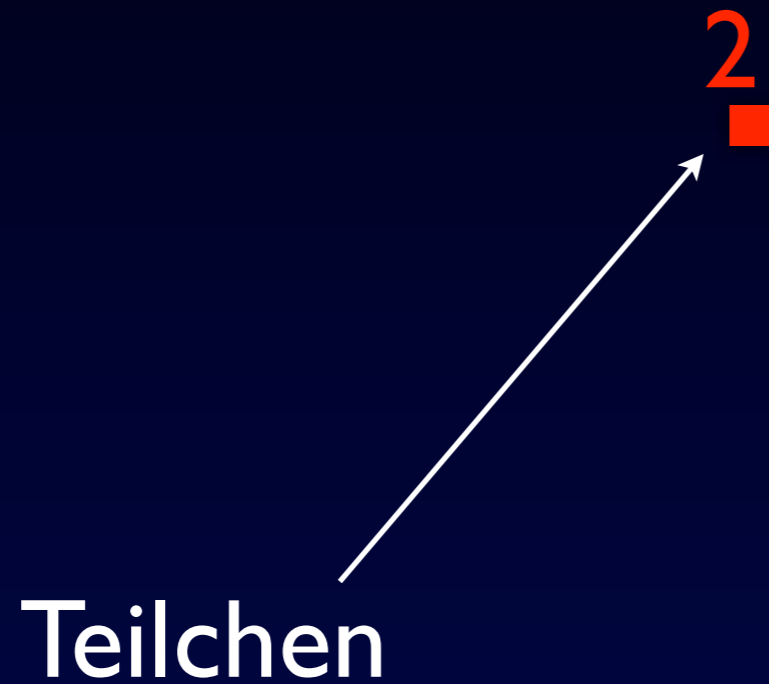
10 000 000 000

Teilchen

Antiteilchen

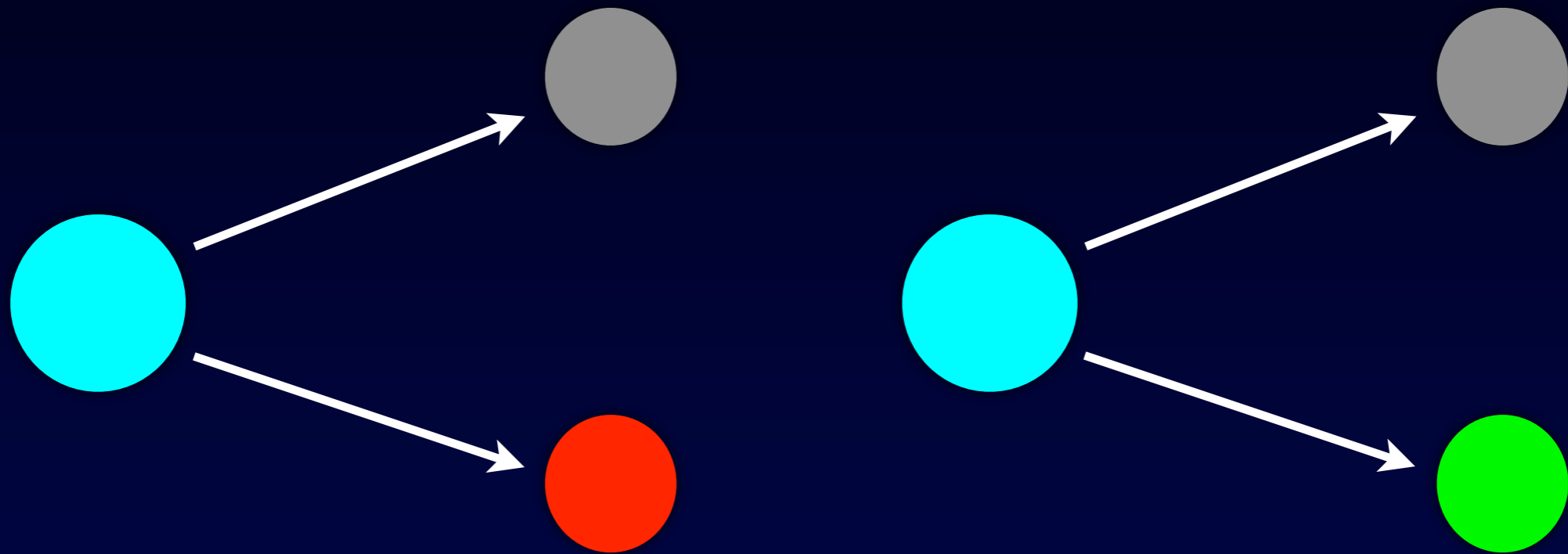
Die Entstehung der Materie

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.

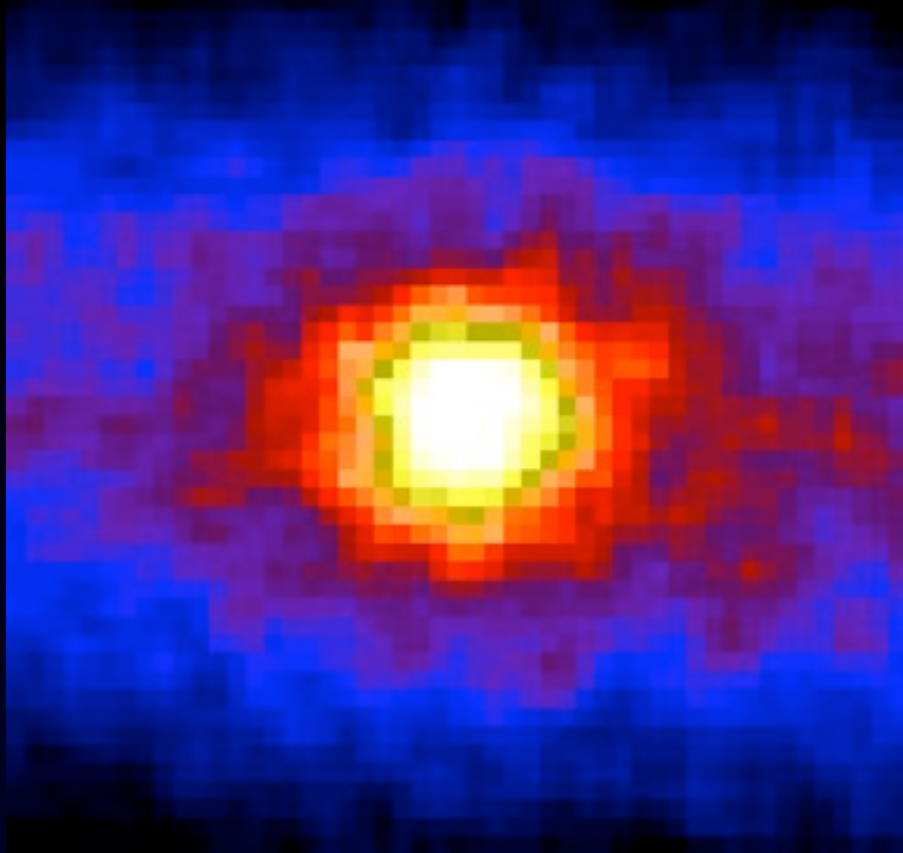


Superschwere Neutrinos:

- 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



Anglo-Australian Observatory



Vielen Dank für Ihr Interesse!

