

# SONNENNEUTRINOS

## Was sind Neutrinos?

Neutrinos gehören zu den sogenannten Elementarteilchen. Das sind Teilchen, die nach dem heutigen Stand des Wissens unteilbar sind. Die Teilchenphysik kennt 12 Arten von Elementarteilchen, aus denen unsere Welt besteht: Die 6 Quarks, aus denen die Protonen und Neutronen und damit die Atomkerne aufgebaut sind, und die 6 Leptonen, zu denen das Elektron und die Neutrinos gehören.

Insgesamt gibt es 4 Grundkräfte, die zwischen diesen Teilchen wirken können:

- **Die Gravitation:** zwischen allen Teilchen, verantwortlich für Erdanziehung und Planetenbewegung.
- **Die elektromagnetische Kraft:** nur zwischen geladenen Teilchen, verantwortlich für Strom und Magnetismus.
- **Die starke Kraft:** nur zwischen Quarks, hält Atomkerne zusammen.
- **Die schwache Kraft:** zwischen allen Teilchen, verantwortlich für radioaktiven  $\beta$ -Zerfall und Kernfusion.

Quarks			Leptonen		
1. Familie	2. Familie	3. Familie	1. Familie	2. Familie	3. Familie
<b>u</b> up-Quark (+2/3)	<b>c</b> charm-Quark (+2/3)	<b>t</b> top-Quark (+2/3)	$\bar{\nu}_e$ Elektron-Neutrino (0)	$\bar{\nu}_\mu$ Myon-Neutrino (0)	$\bar{\nu}_\tau$ Tauon-Neutrino (0)
<b>d</b> down-Quark (-1/3)	<b>s</b> strange-Quark (-1/3)	<b>b</b> bottom-Quark (-1/3)	<b>e</b> Elektron (-1)	<b><math>\mu</math></b> Myon (-1)	<b><math>\tau</math></b> Tauon (-1)

Das Schema der 12 Elementarteilchen. In Klammern sind die Ladungen der Teilchen in Einheiten der elektrischen Elementarladung ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Coulomb) angegeben. Die farbigen Kästchen geben die Kräfte an, denen die einzelnen Teilchen unterliegen. Dabei bedeutet:

- = Gravitation
- = elektromagnetische Kraft
- = starke Kraft
- = schwache Kraft

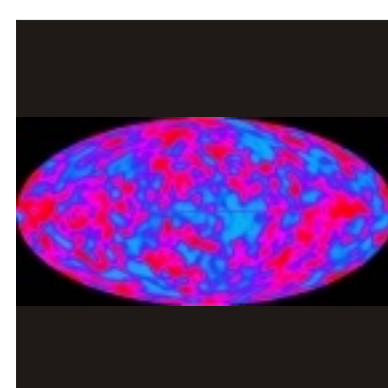
Neutrinos sind die einzigen Elementarteilchen ohne elektrische Ladung. Da sie zudem nicht der starken Kraft unterliegen und die Gravitation bei den extrem leichten Elementarteilchen ohnehin keine Rolle spielt, können Neutrinos nur über die schwache Kraft mit ihrer Umwelt reagieren. Daher können sie Materie fast ungehindert durchdringen. Selbst durch Blei könnten sie einige Lichtjahre<sup>1</sup> weit fliegen, ohne absorbiert zu werden.

<sup>1</sup>Lichtjahr = Distanz, die das Licht in einem Jahr im Vakuum zurücklegt (~9,5 Billionen km)

## Wo entstehen Neutrinos?

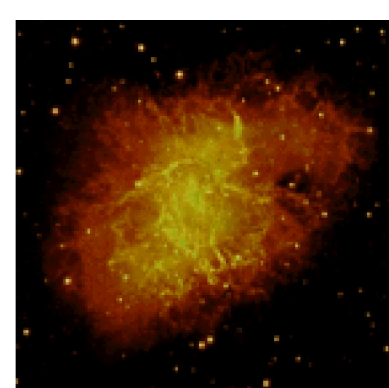
Neutrinos entstehen entweder in natürlichen Prozessen oder können künstlich erzeugt werden.

### natürliche Neutrinoquellen:



#### 1. Der Urknall:

Die kosmologischen Neutrinos, die beim Urknall erzeugt wurden, sind die häufigsten Teilchen in unserem Universum.



#### 2. Supernovae:

Manche Sterne explodieren am Ende ihres Lebens. Dabei wird kurzzeitig eine riesige Anzahl von Neutrinos erzeugt.



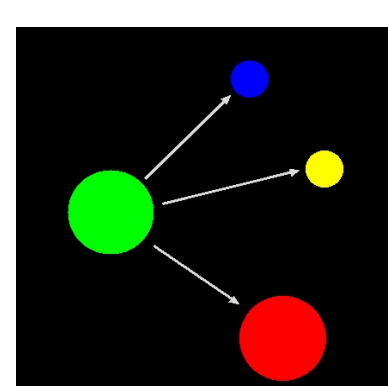
#### 3. Die Sonne:

Wie in allen Sternen werden bei der Kernfusion auch im Sonneninneren Neutrinos erzeugt.



#### 4. Die Erdatmosphäre:

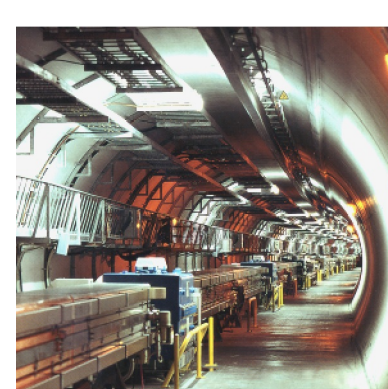
Durch Auftreffen der kosmischen Strahlung auf die Erde werden in der Atmosphäre ständig Neutrinos erzeugt.



#### 5. Radioaktive $\beta$ -Zerfälle:

Bei jedem  $\beta$ -Zerfall eines Atomkerns entsteht ein Neutrino.

### künstliche Neutrinoquellen:



#### 1. Teilchenbeschleuniger:

Mit großen Beschleunigern kann man heute sehr intensive Neutrinostrahlen herstellen.



#### 2. Kernreaktoren:

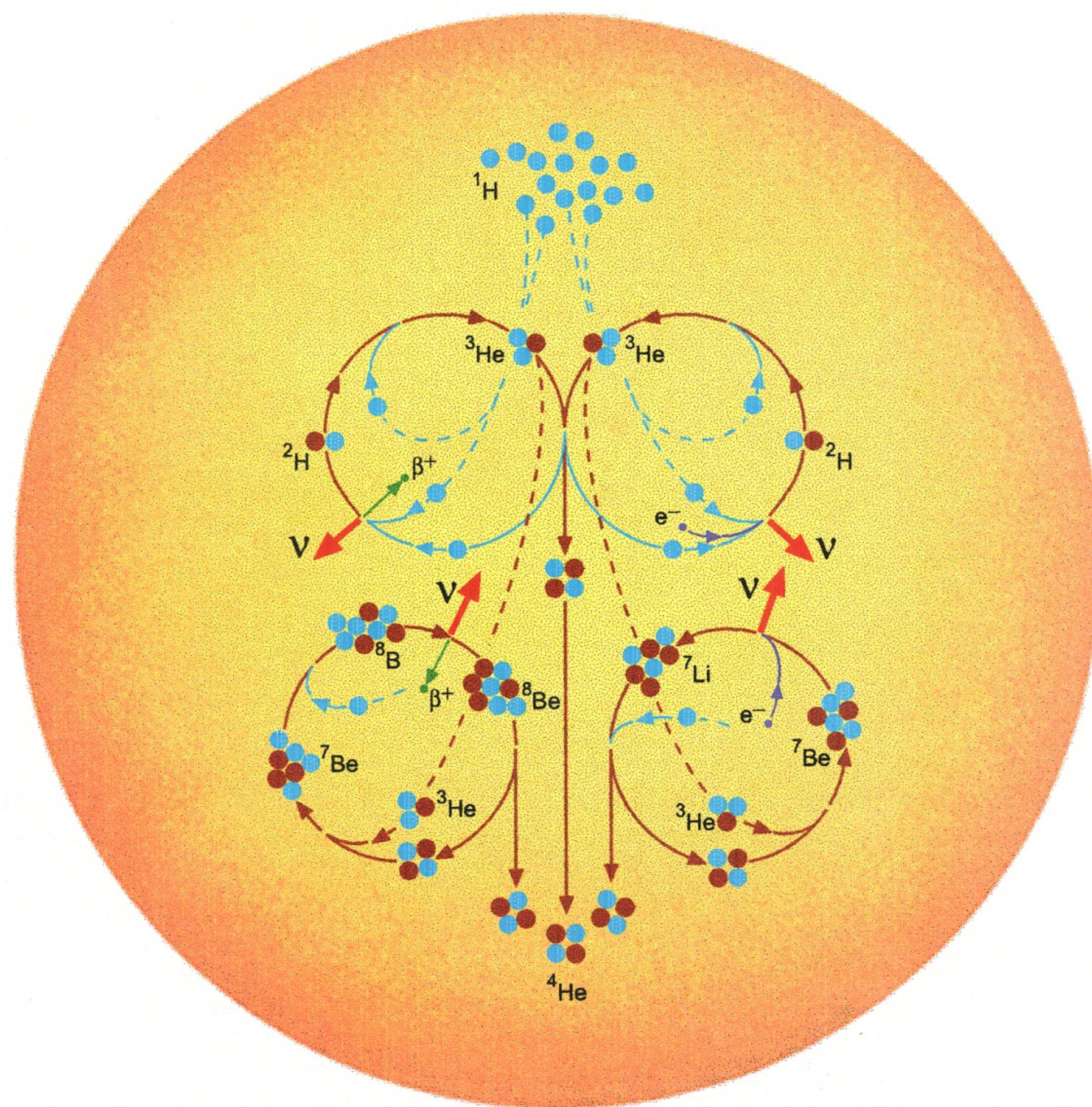
Bei der Kernspaltung in Reaktoren werden ebenfalls Neutrinos freigesetzt.

## Wie kann man Neutrinos messen?

Neutrinos kann man nachweisen, indem man in sie durch Materie fliegen läßt und ihren Stoß mit Elektronen oder ihren Eingang in Atomkernen beobachtet. Da sie aber nur der schwachen Kraft unterliegen und daher fast ungehindert alle Art von Materie durchdringen, sind solche Prozesse sehr selten. Eine Messung ist daher prinzipiell schwierig. Um trotzdem eine Chance zu haben, braucht man:

- **Große Detektoren und viele Neutrinos:** Je mehr Materie man ansammelt und je mehr Neutrinos durchfliegen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Neutrino mit dieser Materie reagiert.
- **Saubere Materialien:** Da ein Neutrinosignal oft nicht von einem radioaktiven Zerfall unterschieden werden kann, stören selbst kleinste radioaktive Verunreinigungen, wie sie überall natürlich vorkommen, die Messung erheblich.
- **Gute Abschirmungen:** Auch von außen in den Detektor eindringende radioaktive Strahlung stört die Messung empfindlich. Daher ist eine gute Abschirmung nötig. Um sich vor der kosmischen Strahlung aus dem Weltraum zu schützen, stellt man Neutrinodetektoren deshalb meist unter Tage auf.

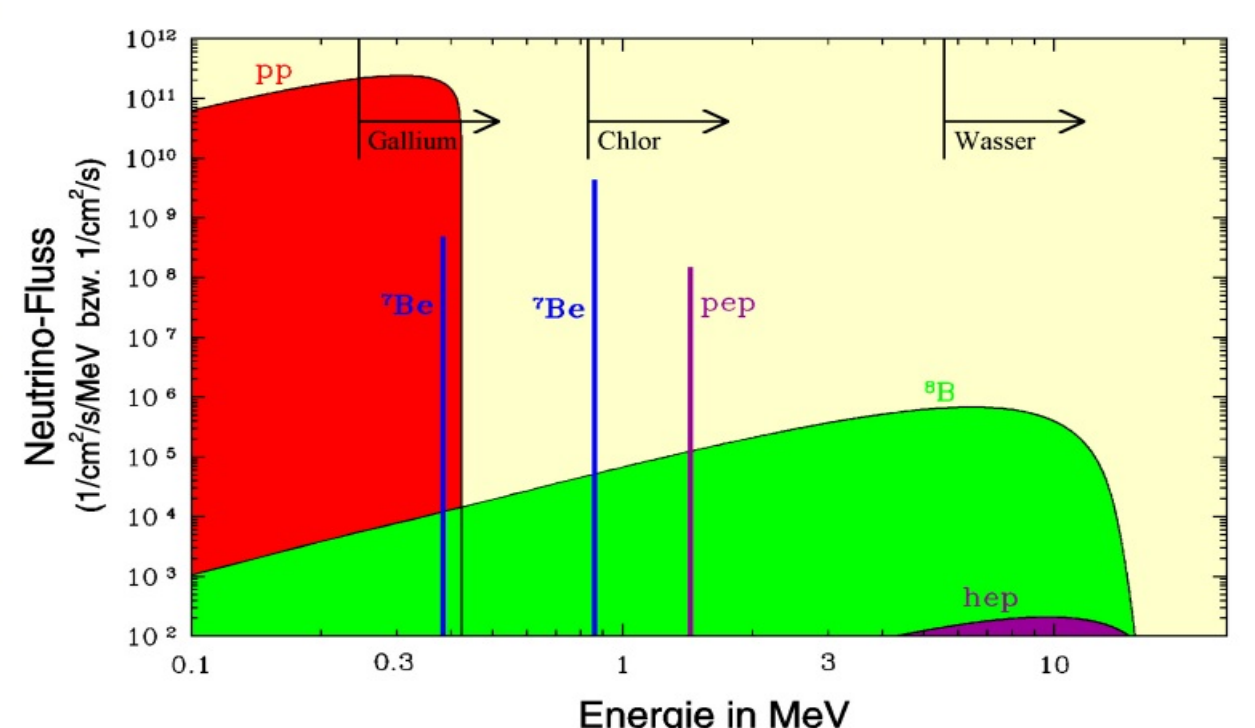
## Die Sonne und ihre Neutrinos



Der pp-Zyklus, der die Energie der Sonne erzeugt. Bei diesem komplizierten Fusionsprozeß werden pro Sekunde fast 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium verbrannt. Dabei entstehen neben dem Sonnenlicht auch Sonnenneutrinos mit verschiedenen Energien, abhängig von der Stelle im Zyklus, an der sie erzeugt werden.

Im Zentrum unserer Sonne werden in einem komplizierten Zyklus (dem sogenannten pp-Zyklus) und unter unvorstellbar hohen Temperaturen und Drücken ständig Protonen zu Heliumkernen verschmolzen. Neben der dabei freigesetzten Fusionsenergie, die die Sonne zum Leuchten bringt, werden an mehreren Stellen dieses Zyklus auch Neutrinos erzeugt. Diese Neutrinos fliegen aus dem Sonneninneren in alle Richtungen des Weltraums. Selbst auf der 150 Millionen Kilometer entfernten Erde durchqueren pro Sekunde noch mehr als 60 Milliarden Sonnenneutrinos die Fläche eines Daumennagels und zwar unabhängig von der Tageszeit: Wegen ihres großen Durchdringungsvermögens erreichen sie uns sogar nachts, nachdem sie zunächst die Erde ungehindert passiert haben.

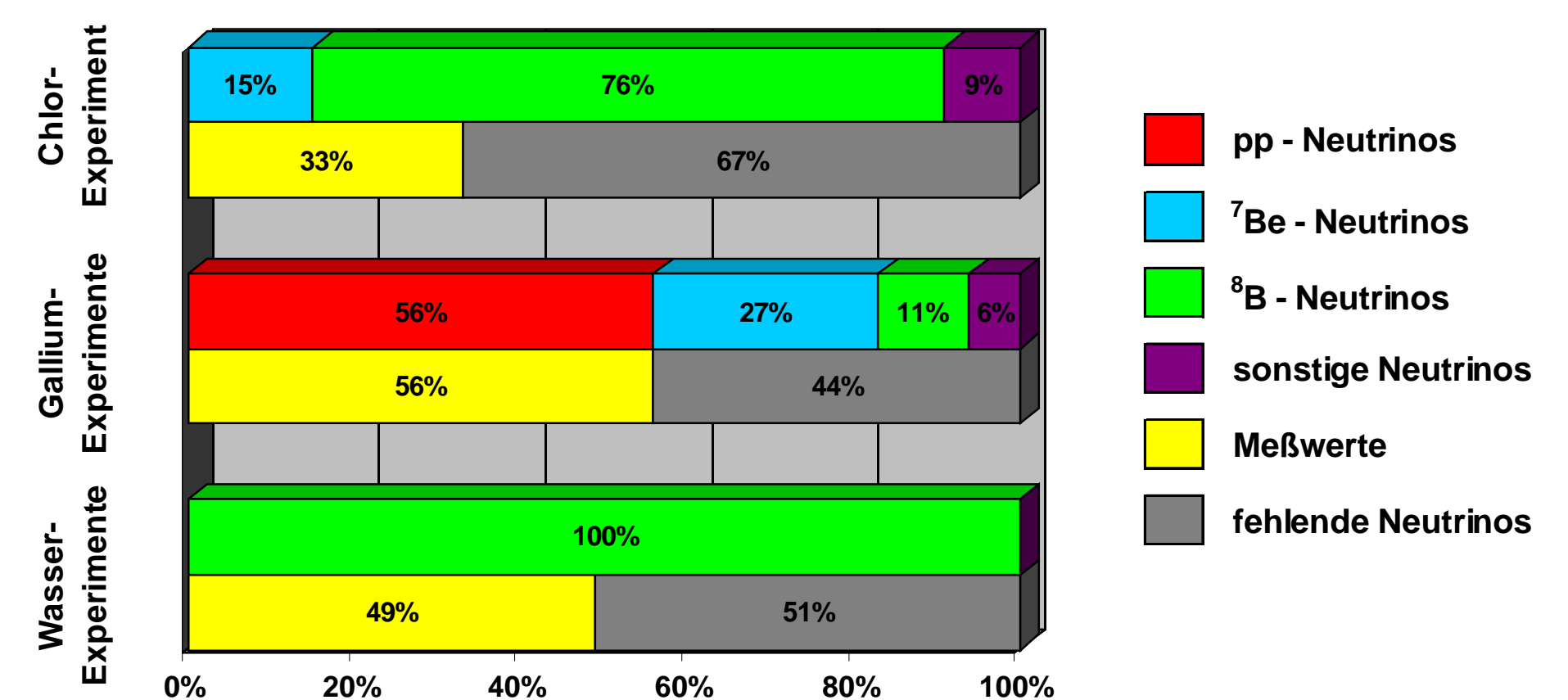
Heute hat man für die Prozesse im Sonneninneren gute theoretische Modelle. Daher läßt sich das Spektrum der solaren Neutrinos auch sehr genau vorhersagen, das heißt man weiß mit großer Sicherheit, wie viele Neutrinos die Sonne emittiert und welche Energien sie haben. Die Messung von Sonnenneutrinos ist deshalb auch ein Test zur Überprüfung von Sonnenmodellen. Darüberhinaus erlauben Sonnenneutrinos einen direkten Blick ins Sonneninnere. Anders als Licht, welches erst etwa 100.000 Jahre nach seiner Produktion die Sonnenoberfläche erreicht, verlassen solare Neutrinos unmittelbar nach ihrer Entstehung unser Zentralgestirn. Im "Neutrinolicht" betrachtet können wir unserer Sonne also direkt bis in den Kern schauen!



Das für die Erde vorhergesagte Sonnenneutrinospektrum. Neben den einzelnen Komponenten sind auch die Bereiche angedeutet, für die die Gallium-, Chlor-, und Wasser- Experimente sensitiv sind.

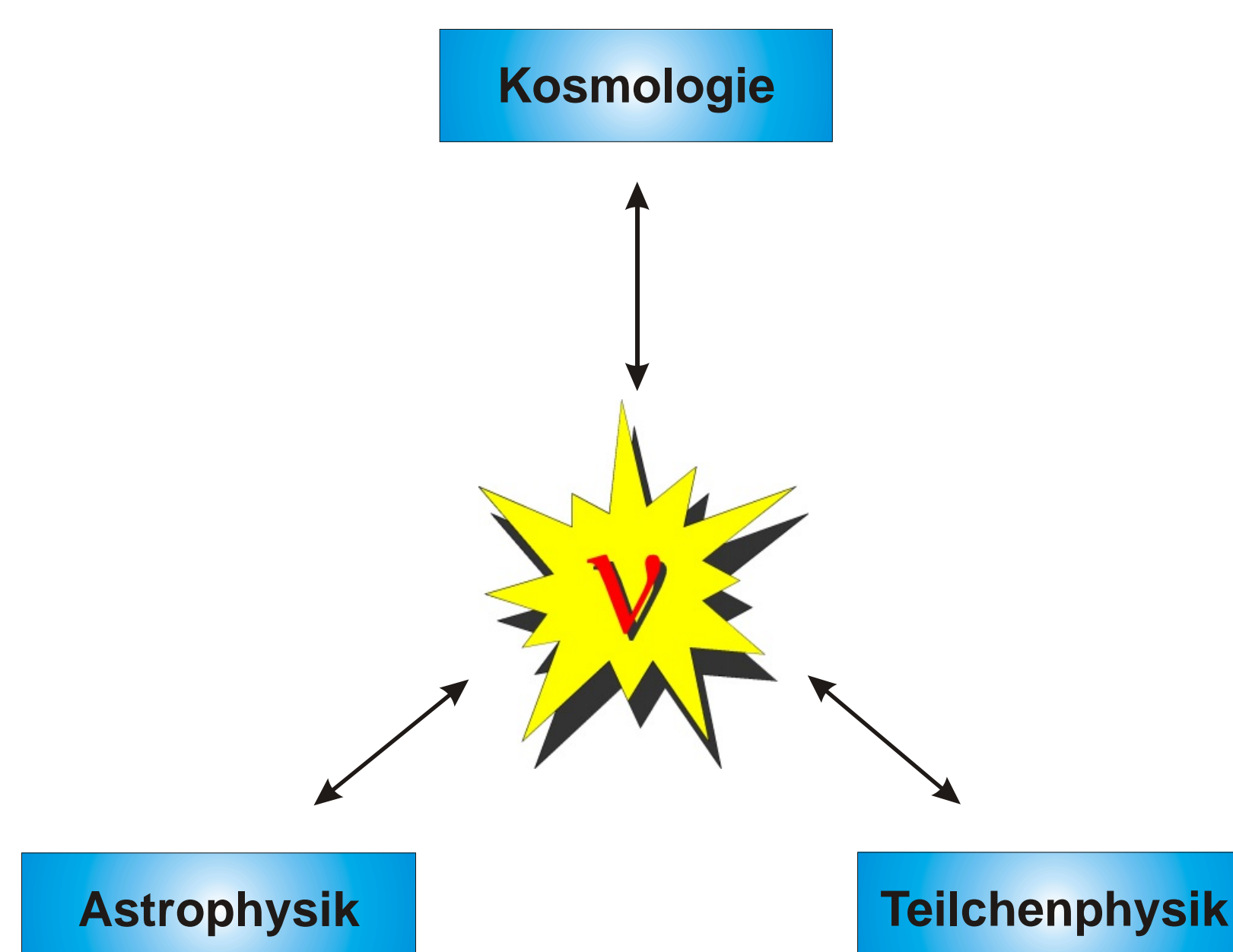
## Das Sonnenneutrino Problem

Seit Beginn der experimentellen Sonnenneutrino-forschung im Jahr 1967 hat man bei allen 5 bisher durchgeführten Sonnenneutrinoexperimenten weniger solare Neutrinos gemessen, als erwartet. Diese Resultate schienen das theoretische Sonnenmodell zu widerlegen. Seit langem versuchten Astronomen daher Sonnenmodelle zu entwickeln, die die Beobachtungen erklären können. Alle diese Versuche sind gescheitert. Das Sonnenneutrino-defizit blieb damit ein ungelöstes Problem! In den letzten Jahren zeigte sich jedoch, daß die Lösung bei den Neutrinos selbst zu suchen ist: Die 3 verschiedenen Neutrinotypen können sich im Flug ineinander umwandeln. Die Detektoren sehen aber hauptsächlich einen Typ, wodurch ein scheinbares Neutrinodefizit entsteht. Die Wahrscheinlichkeit für solche Umwandlungen (auch Neutrino-Oszillationen genannt) hängt aber von den sehr kleinen Neutrinomassen ab. Daher ist ein Sonnenneutrinodetektor eine sehr empfindliche Waage für Neutrinos. Überhaupt sind solche Umwandlungen der erste Hinweis darauf, daß Neutrinos nicht masselos sind, wie es die Physiker seit mehr als 50 Jahren glaubten.



Die Ergebnisse der bis zum Jahr 1999 durchgeführten Sonnenneutrinoexperimente. Die oberen Balken geben den erwarteten Fluß solarer Neutrinos an, unterteilt in die einzelnen beitragenden Komponenten. Die unteren Balken zeigen die gemessenen Werte sowie die fehlenden Sonnenneutrinos.

## Neutrinos - ein Tor zu neuer Physik



Obwohl die Physik in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte im Verständnis unserer Welt gemacht hat, sind noch viele grundlegende Fragen offen geblieben. Um solche Fragen beantworten zu können, müssen Theorien entwickelt werden, die über die bis heute bekannte Physik hinausgehen. Gerade bei der Entwicklung solcher Theorien ist eine genauere Kenntnis der Neutrinoeigenschaften von entscheidender Bedeutung, denn die Neutrinos spielen sowohl im Großen (Kosmologie, Astrophysik) wie auch im Kleinen (Teilchenphysik) eine wichtige Rolle. In der Teilchenphysik sieht man die Sonderstellung der Neutrinos sofort daran, daß sie die einzigen ungeladenen Elementarteilchen sind. Zudem haben sie, wenn überhaupt, eine im Vergleich zu den anderen Elementarteilchen verschwindend geringe Masse. Dadurch können sie Eigenschaften aufweisen, die bei anderen Teilchen nicht auftreten können, und die jenseits unserer bisherigen Theorien stehen. Von der Erforschung dieser Eigenschaften erwarten sich die Teilchenphysiker große Fortschritte bei der Suche nach verborgenen Zusammenhängen zwischen den Grundbausteinen unserer Welt.

Die Neutrinos haben aber auch für die Kosmologie eine große Bedeutung. Da sie die häufigsten Teilchen im Universum sind, kann ihre Gesamtmasse sehr groß sein, selbst wenn ihre Einzelmasse äußerst klein sind. Dadurch könnten sie das Schicksal unseres Universums wesentlich beeinflussen.

Die Astrophysik dagegen nutzt das große Durchdringungsvermögen der Neutrinos aus. Da sie mit ihrer Umgebung kaum in Wechselwirkung treten, können sie astronomische Entfernungen beinahe ungestört überbrücken und uns so unverfälschte Informationen vom Ort ihrer Entstehung übermitteln. Neben einem genaueren Verständnis der Prozesse im Sternenninneren können sie daher auch bei der Untersuchung bisher völlig unverstandener Prozesse weit draußen im Universum helfen.



Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg

