

Astroteilchenphysik

Entdeckung und Enträtselung der Neutrinoeilehen

Wolfram Winnenburg

Unterrichtliche Relevanz der Astroteilchenphysik

Physikunterricht ist mehr als die Aufbereitung klassischer Physik. Physik ist eine lebende Disziplin. Daher beinhaltet heutiger Physikunterricht auch die moderne Physik. Zentrale Punkte der modernen Physik sind Symmetrie- und Erhaltungssätze. Zur Attraktivitätssteigerung des Physikunterrichts halten wir in Siegen neben Zielen auch den Einbezug von Wegen physikalischer Toppforschung in den Unterrichtsstoff für unerlässlich. Die spannende Astroteilchenphysik, speziell die Neutrinoeophysik, ist ein Beispiel, wie Schüler und Schülerinnen an der aktuellen Forschung und dem Wissenszuwachs der Physik im Unterricht teilhaben können.

Das 1930 von Pauli zur Rettung des Energie- und Impulserhaltungssatzes beim Kernbetazerfall fast aus Verzweiflung postulierte Neutrinoeilehen wurde erst 1956 von Cowan und Reines detektiert. Am Savannah River-Kernreaktor konnten sie Neutrinos, die aus den zahlreichen β -Zerfällen der Spaltprodukte von Uran und Plutoniumisotopen des Reaktors stammten, in einem dort aufgebauten Detektor eindeutig nachweisen. Die daraus entstandene Neutrino-Astroteilchenphysik ist ein Paradebeispiel für das fruchtbare Zusammenwirken von Elementarteilchenphysik und Astronomie.

Der genetische Forschungsweg zur heutigen Neutrinoeophysik ist exemplarisch für physikalische Forschung. Er deckt emotionales Engagement bei rationalem Vorgehen auf und legt die Faszination physikalischen Handelns offen.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Quantenphysik	Neutrino, Beta-Zerfall, Energieerhaltung, Leptonen, Fermionen, Cherenkov-Strahlung, Szintillator
Astronomie	Sterne, Kosmos, Astropraxis	Urknall, Sonne, Supernovae, Proton-Proton-Kette, Neutrinoeodetektoren
Fächer- verknüpfungen	Astro-Ch	Radiochemische Reaktionen
Lehre allgemein	Kompetenzen: Wertung	Diskussion des Brief von Pauli oder des „Gigantismus“ in der Teilchenphysik



„Puppenstubenmodell“ des Borexino, dem später im Text noch erwähnten Flüssigszintillationsdetektor zum Nachweis von Neutrinos der Sonne in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso in den italienischen Abruzzen.

Im Modell sieht man links das zwiebelschalenförmig aufgebaute Experiment und rechts das Gebäude mit den Räumen für die Auswertetechnik.

(Quelle: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN)

Start in die Neutrino-Ära

Auf der Suche nach einem einfachen Plan der Materie schienen die Physiker 1932 am Ziel zu sein. Die uns umgebende Materie glaubte man aus vier Teilchen aufgebaut. Es handelte sich um das **Elektron**, das **Proton**, das **Photon** und um das 1932 erstmals von J. CHADWICK experimentell nachgewiesene **Neutron**. Diese Bestandteile bezeichnet man heute als Elementarteilchen. Sie besitzen eine Masse und z. T. eine elektrische Ladung.

Durch die bereits 1896 von Becquerel entdeckte Radioaktivität vermögen sich eine Reihe von Nukliden von selbst - ohne äußere Einwirkung - umzuwandeln und dabei eine charakteristische Strahlung abzugeben. Diese Strahlung wird als radioaktive Strahlung bezeichnet und kann α -, β -, oder γ -Strahlung sein. Der einfachste β -Zerfall ist der eines freien Neutrons – Halbwertszeit etwa 10,8 min – in ein beobachtbares Proton und Elektron. Unter der Annahme, dass die beim Zerfall freiwerdende Energie sich auf das Proton und Elektron verteilt, so ist die Energie des Elektrons aufgrund der Energie- und Impulserhaltung eindeutig bestimmt. Experimentell beobachtet man jedoch eine Verteilung der Elektronenenergie, die von null bis zum maximal möglichen Energiewert reicht (Abb.1).

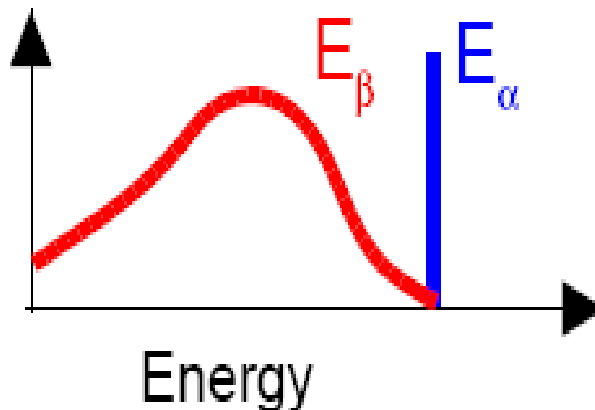


Abb.1: Energiespektrum

Diese scheinbar offensichtliche Verletzung der Energieerhaltung beim **β -Zerfall** stürzte die Physik in eine Krise.

Um die Energieerhaltung beim β -Zerfall zu retten, postulierte Wolfgang Pauli im Jahre 1930 in einer Art „Verzweiflungstat“ – wie der nachfolgende Brief belegt – die Existenz eines neuen Teilchens, des später so genannten Neutrinos.

„Physikalisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule,
Zürich, den 4. Dezember 1930:

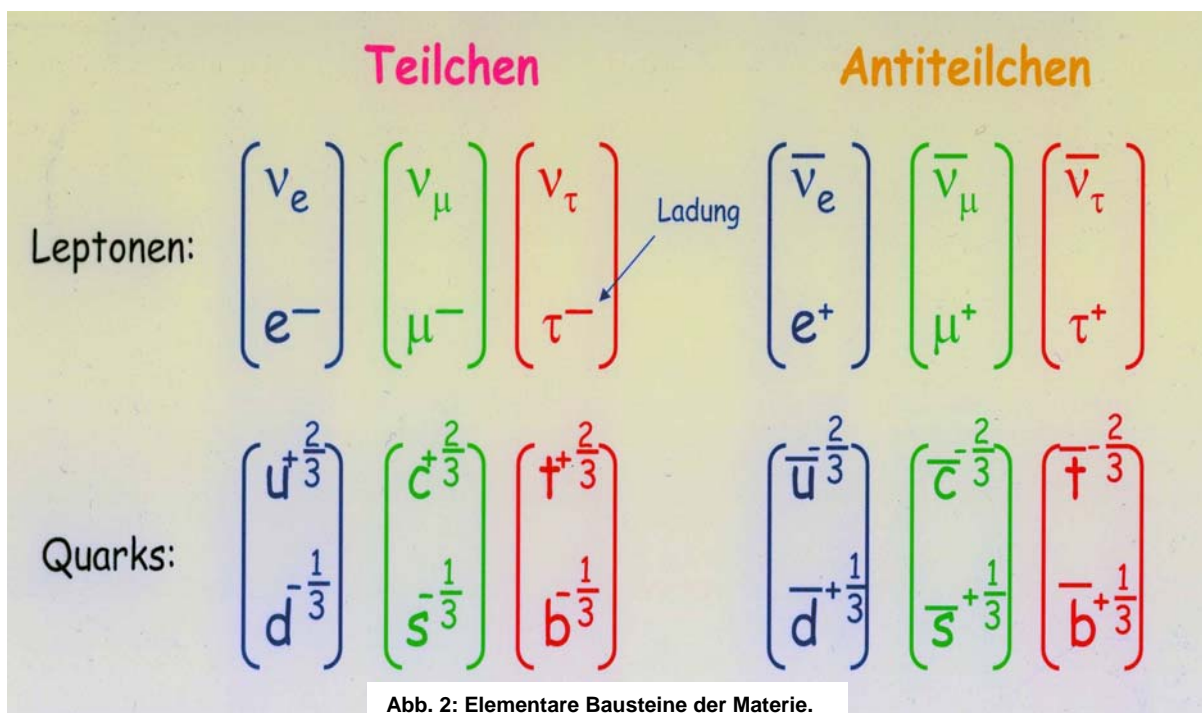
Liebe radioaktive Damen und Herren,

wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts... des kontinuierlichen Beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um ... den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche das Ausschließungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten außerdem noch dadurch unterscheiden, daß sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Ihre Masse müßte von derselben Größenordnung wie die Elektronenmasse sein. Ich traue mich vorläufig nicht, etwas über diese Idee zu publizieren, und wende mich vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis stände, wenn dieses Neutron ein ebensolches oder etwa 100 mal größeres Durchdringungsvermögen besitzen würde wie ein Röntgenstrahl. Ich gebe zu, daß mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen mag, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt, und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen Beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amte, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich gesagt hat: 'Oh, daran soll man am besten gar nicht denken, so wie an die neuen Steuern.' Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. Also, liebe Radioaktive, prüfet und richtet. Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dezember in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.

Mit vielen Grüßen an Euch, Euer untertänigster Diener ... Wolfgang Pauli“

Derartige Neutrino-Teilchen sollten beim β -Zerfall zusammen mit dem Elektron erzeugt werden und die Überschussenergie tragen. Da der maximal mögliche Energiewert für die emittierten Elektronen experimentell tatsächlich beobachtet wird, wurden die Ruheenergie und damit auch die Ruhemasse des Neutrinos seinerzeit als null angenommen. Im Jahre 1948 zeigten Impulsmessungen des Elektrons und des zurückgestoßenen Kerns, dass das Neutrino beim β -Zerfall auch für die Impulserhaltung benötigt wird. Im Jahre 1956 gelang schließlich der experimentelle Nachweis des Neutrinos durch Reines und Cowan. Diesem ersten Neutrinentyp (Elektron-Neutrino ν_e) folgte 1962 der Nachweis eines zweiten Neutrinentyps (Myon-Neutrino ν_μ) durch Lederman, Schwartz und Steinberger. 1990 bewiesen LEP-Experimente die Existenz von genau drei Neutrinofamilien. Der dritte Neutrinentyp – das Tau-Neutrino ν_τ – wurde schließlich im Jahre 2000 am Fermi National Laboratory durch die Donut-Kollaboration detektiert.

Neben Elektronen, Protonen und Neutronen und Neutrinos sind heute noch über 200 weitere Elementarteilchen bekannt. Und zu fast allen Teilchen existiert ein Antiteilchen.



Als Grundbausteine der Materie – die keine Anzeichen einer inneren Struktur erkennen lassen – werden in der heutigen **Standardtheorie** der Elementarteilchenphysik die Gruppe der **Leptonen** und die Gruppe der Quarks mit ihren Antiteilchen – gleiche Masse, entgegengesetzte Ladung – angesehen (Abb.2).

Beide Gruppen – die sich in ihren Wechselwirkungen (Abb.3) unterscheiden – enthalten jeweils drei zusammengehörige Paare von Teilchen, welche als Familien bzw. Generationen bezeichnet werden. Es sind zwölf Bausteine als Fundament der Materie im Standardmodell der Elementarteilchenphysik aufgelistet, wobei zum Aufbau der gewöhnlichen uns umgebenden Materie die erste Familie genügt.

Wechselwirkung	Beispiel	Austauschteilchen/ Boson (Feldquant)	Masse [GeV/c ²]	Elektrische Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	System Erde - Mond Lichtablenkung Expansion des Weltalls	Graviton	0	0	10 ⁻³⁹ (∞)
elektromagnetisch	Atombindung Molekülbindung* Rutherford-Streuung	Photon γ	0	0	10 ⁻² (∞)
stark	Quarkbindung Nukleonbindung* Kernspaltung	Gluon g	0	0	1 (1 fm)
schwach	Neutron-Zerfall Fusion zu Deuteron Neutrino-Nukleon-Streuung	Z W [±]	91.2 80.4	0 ±1	10 ⁻⁵ (10 ⁻³ fm)

* Restwechselwirkung

Abb.3: Fundamentale Wechselwirkungen

Alle Materie aufbauenden Teilchen sind **Fermionen**, d. h. sie besitzen einen Spin $\frac{1}{2}$, unterliegen dem Pauli-Prinzip und dürfen damit nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen.

Von den sechs Leptonen sind drei Neutrinos, wobei jeder Neutrino mit einem der restlichen drei Leptonentypen e , μ und τ korrespondiert. Im Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung von Salam, Weinberg und Glashow werden Neutrinos als masselos postuliert. Neutrinomassen sind jedoch nicht verboten, da sie gegen keine grundsätzlichen Prinzipien oder Eichinvarianzen verstoßen. In Erweiterungsmodellen ordnet man Neutrinos somit – wie allen anderen Fermionen – eine Masse zu.

„Maschendraht-Experimente“

Neutrinos treten als Partner in Zerfalls- oder Umwandlungsprozessen in Erscheinung, natürlich und künstlich. Von der Erforschung der spezifischen Neutrinoeigenschaften erhoffen sich die Teilchenphysiker große Fortschritte bei der Suche nach verborgenen Zusammenhängen zwischen den Grundbausteinen und damit auf dem Weg zu den tiefsten Naturgesetzen. Für die Astrophysik und Kosmologie sind von Bedeutung:

- **Urknall:** Die primordialen Neutrinos sind mit einer Dichte von rund 330 Teilchen pro cm³ die häufigsten Teilchen in unserem Universum
- **Sonne:** Über die Energieumwandlung in den Sternen, speziell in der Sonne erfahren wir indirekt etwas aus der Energieabstrahlung dieser Objekte. Dabei brauchen die Photonen aus den im Inneren der Sonne ablaufenden Fusionsprozessen zum Sonnenrand allein schon mehr als 100.000 Jahre. Die in allen stellaren Fusionsreaktoren freigesetzten Neutrinos sind dagegen nahezu lichtschnell beim Empfänger.
- **Supernovae:** Bei massereichen Sternen kommt es am Ende ihres Sternendaseins zu Prozessen, wobei kurzfristig riesige Neutrinoschauer entstehen. Wegen der Vielzahl von SN-Ereignissen ist auch ein diffuser Hintergrund von Neutrinos aus diesen Explosionen zu erwarten.
- **Erdatmosphäre:** Durch das Auftreffen kosmischer Strahlung (im Wesentlichen hochenergetische Protonen) auf die obersten Erdatmosphärenschichten werden in Kernreaktionen Myonen und andere hochinstabile Mesonen mit kurzen Lebensdauern gebildet. Zerfallen diese, werden im Wesentlichen Myonenneutrinos ν_μ gebildet. Deren Energie ist typischerweise im GeV-Bereich, also deutlich höher als z. B. der von solaren Neutrinos.

Neutrinos sind die einzigen ungeladenen fermionischen Elementarteilchen, die weder elektromagnetisch noch stark wechselwirken. Die nahezu lichtschnellen Neutrinos unterliegen im Prinzip lediglich der schwachen Wechselwirkung. Diese ist weder anziehend noch abstoßend, sondern Teilchen umwandelnd. Sie ist verantwortlich für den **β -Zerfall**, wirkt zwischen allen Quarks und Leptonen, hat eine sehr geringe Reichweite (weniger als ein Atomkernradius) und wird durch den Austausch von Bosonen (Z-, W⁺ und W⁻-Boson) beschrieben. Dabei führt der winzige Wechselwirkungsquerschnitt zu äußerst seltenen Reaktionen mit Materie. Das hieraus resultierende enorme Durchdringungsvermögen gestattet einen Blick in das Innere von Neutrinoquellen. Auf der anderen Seite liegt gerade hierin die Schwierigkeit des Nachweises von Neutrinos. So wechselwirkt nur eins von 10¹¹ solaren Neutrinos beim Durchflug mit der Materie der Erde. Oder anders gesagt: Um die Hälfte der solaren Neutrinos zu stoppen, benötigt man theoretisch eine mehrere tausend Lichtjahre dicke Bleiwand!

Der „Nachweis von Neutrino teilchen“ ist gleichbedeutend mit dem „Nachweis einer stattgefundenen Wechselwirkung“ zwischen dem Neutrino teilchen und irgendeinem Stoßpartner. Um eine Nachweischance zu haben, braucht man – bildlich gesprochen – geeignete „Maschendraht-Experimente“, d. h. Messungen mit „passendem Maßstab“ zur erfolgreichen Detektion wie:

- Großdimensionale Detektoren: Je mehr Masse man ansammelt, und je mehr Neutrinos diese durchfliegen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutrino mit dieser Materie reagiert (Detektormasse: rund 100 – 1000 t).
- 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 Neutrino detektoren deshalb meist unter Tage auf.

Als erstes solches „Massendraht-Experiment“ sind **radiochemische Experimente** zu nennen. Denn gewisse Atomkerne können Neutrinos einfangen und sich dabei umwandeln. Als Beispiele seien genannt:



Im speziellen Fall der Reaktion an Chlorisotopen extrahierte die Gruppe in Homestake von Zeit zu Zeit - typischerweise in Abständen mehrerer Wochen - das flüchtige Argon mit Heliumgas aus dem Tank, um schließlich ³⁷Ar über seinen radioaktiven Rückzerfall (Halbwertszeit 35 Tage) in kleinen Proportionalzählrohren nachzuweisen und die einzelnen Zerfälle zu zählen. Dieses Experiment lief von 1970 bis 1996 und war das erste Projekt, das erfolgreich extraterrestrische Neutrinos nachweisen konnte. Exemplarisch seien neben Homestake auch Gallex genannt. Radiochemische Experimente reagieren allerdings nur sensitiv auf ν_e -Neutrinos. Sie liefern keine Zeitauflösung und keine Informationen über Richtung und Energie.

Im Jahre 1987 wurde in der japanischen Kamioka-Mozumi-Mine erstmals ein sog. **Wasser-Cherenkov-Detektor** errichtet. Geladene Teilchen mit Geschwindigkeiten oberhalb der Lichtgeschwindigkeit in Wasser senden einen Lichtkegel aus, der sich im Medium unter einem bestimmten Winkel symmetrisch um die Spur des Teilchens ausbreitet. Dies ist physikalisch analog zur Bildung und Ausbreitung eines akustischen Überschallknalls bei einem mit Überschallgeschwindigkeit fliegenden Jet. Der Lichtkegel kann mit hochempfindlichen Photosensoren – sog. Photomultiplier – nachgewiesen werden. Die Lage des Lichtkegels verrät die Flugrichtung und Position des Teilchens im Detektor und die Lichtintensität korreliert mit der Teilchenenergie. Kamiokande bestand im Wesentlichen aus einem Zylinder, der mit ca. 2100 t ultrareinem Wasser gefüllt war.

Wasser-Cherenkov-Detektoren – wie auch Super-Kamiokande oder SNO (Sudbury Neutrino Observatory) – sind sensitiv auf alle Neutrino-Sorten und lassen eine Bestimmung von Energie und Richtung des Neutrinos ebenso zu wie den Zeitpunkt des Ereignisses. Diese – wie auch alle späteren Cherenkov-Detektoren – sind aber nur auf die hochenergetischen solaren ${}^8\text{B}$ -Neutrinos sensitiv. Beim Elektronrückstoß eines ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos würden im Super-Kamiokande gerade einmal vier der mehr als 10.000 Photosensoren ansprechen; mithin ein Signal, das sich vom Rauschen der Sensoren nicht mehr unterscheiden lässt. Weitere Cherenkov-Detektoren sind das Experiment ICECUBE am Südpol, das das dortige Eis als Detektor nutzt und ANTARES im Mittelmeer. Künftige Detektoren dieser Art streben Größen von etwa 1 km^3 Volumen an.

Während der 90er Jahre hat sich in der Neutrinophysik ein weiterer Detektortyp etabliert: der sog. **Flüssigszintillator**. Diese verwenden an Stelle von Wasser organische Lösungsmittel zum Neutrinonachweis. Das Prinzip von Szintillatoren ist aus dem Einsatz in der Medizin bekannt. Im Flüssigkeitsszintillator spielt der Cherenkov-Effekt nur noch eine untergeordnete Rolle. Der Unterschied zum Cherenkov-Zähler steckt im Prozess der Lichterzeugung. Ein den Detektor durchquerendes Neutrino wird in seltenen Fällen an einem Elektron streuen und dabei einen Teil seiner Energie übertragen. Wird dieses Elektron dann in der Flüssigkeit abgebremst, gibt es seine Energie an die Umgebung ab. Dabei hinterlässt es eine Spur angeregter Moleküle, die nach kurzer Zeit wieder in ihren Grundzustand zurückkehren. Die durch diesen Vorgang in bestimmten Materialien erzeugten sichtbaren Lichtblitze sind wesentlich intensiver als die in einem Cherenkov-Detektor und werden von Lichtdetektoren aufgefangen. Nachteilig ist allerdings, dass in der Flüssigkeit gelöste radioaktive Spuren Signale erzeugen, die von denen der Neutrinos nicht unterscheidbar sind. Dabei gilt: Je niedriger die Energie der untersuchten Neutrinos, desto größer ist die Zahl der das Neutrino-Signal überlagernden Untergrundereignisse.

Im Mai 2007 startete das **Borexino-Experiment** – ein Flüssigszintillationsdetektor in den Laboratori Nationali del Gran Sasso in den italienischen Abruzzen, geschützt von 1300 m Gestein – mit der Messung niederenergetischer solarer Neutrinos. Borexino bietet die Chance, den Übergangsbereich von Vakuum- zu Materieoszillationen bei mittleren Energien zu testen, da auch der Nachweis der dort angesiedelten pep-Neutrinos für die Zukunft möglich erscheint. Eine genaue Vermessung der Raten niederenergetischer Neutrinos wird zu einem besseren Verständnis der im Inneren der Sonne vorherrschenden Bedingungen beitragen. Insbesondere liegt eine Bestimmung des CNO-Zyklus-Beitrags zur solaren Energieproduktion in der Reichweite des Borexino-Experiments. Die beste obere Grenze von etwa 5 % liefern derzeit noch radiochemische Neutrinoexperimente.

Neutrino- Messungen

Nach dem gängigen Sonnenmodell wird die Energie der Sonne überwiegend durch die Fusion von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern unter Emission von Neutrinos erzeugt (Abb.4).

In der **Sonne** dominiert die sog. **Proton-Proton-Kette** (pp), in massereichen Sternen dagegen überwiegt der CNO-Zyklus, bei dem Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffkerne als Katalysatoren wirken. Die dabei gewonnene Energie wird entweder in Form von γ -Strahlung oder als kinetische Bewegungsenergie der entstehenden Teilchen freigesetzt und zunächst über Strahlungstransport und dann weiter außen über konvektive Prozesse an die Sonnenoberfläche transportiert. Von dort gelangt sie als elektromagnetische Strahlung in den Weltraum. Die in den Fusionsreaktionen der Sonne erzeugten Neutrinos sind alle von dem Typ ν_e . Derartige Elektronneutrinos gestatten sozusagen zeitnah in das Innerste der Sonne zu schauen. Sie durchdringen die Schichten der Sonne ohne Mühe. Nach ca. 2 Sekunden haben sie die Sonne verlassen und nach 499 Sekunden erreichen sie die Erde, die uns über die Abläufe der thermonuklearen Fusionsreaktionen im zeitnahen Zustand informieren.

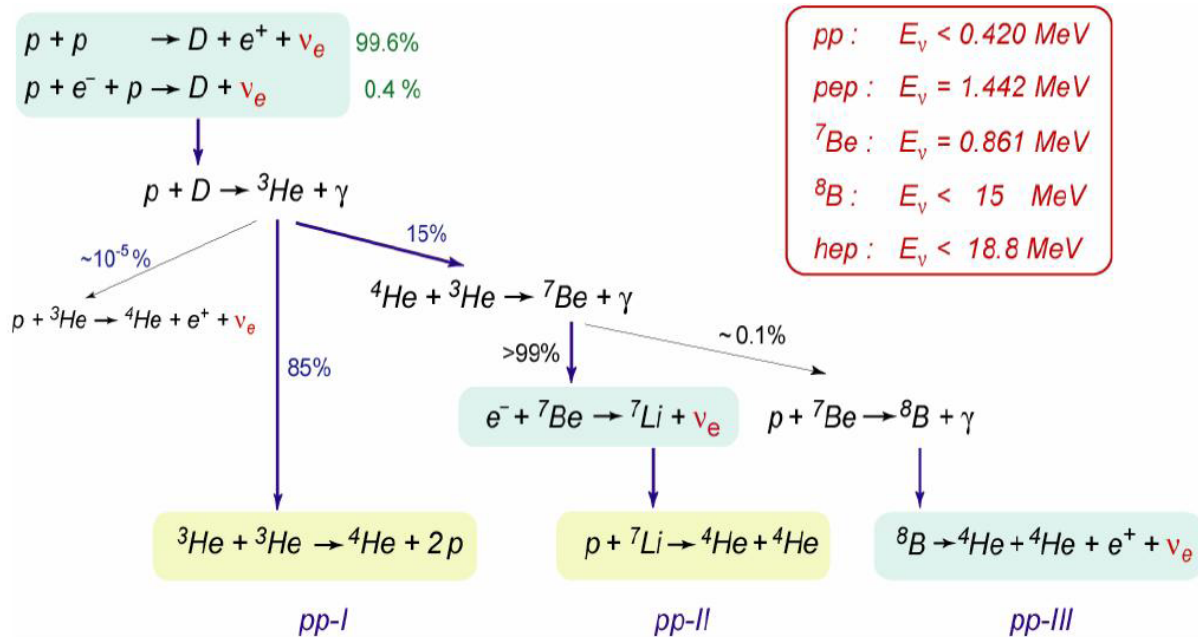
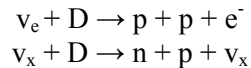


Abb.4: Solare Fusionsprozesse.

Auf der Erde messen wir einen solaren Energiefluss von etwa $8.5 \times 10^{11} \text{ MeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Mit dem bekannten mittleren Abstand der Erde zur Sonne von ca. $1,5 \times 10^{13} \text{ cm}$ errechnet sich leicht ein zu erwartender Fluss solarer Neutrinos von etwa $6,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Seit Beginn der solaren Neutrino-Experimente im Jahre 1968 zeigen alle Messungen zum Spektrum der solaren Neutrinos in Bezug zum Standardsonnenmodell ein Neutrino Defizit um etwa den Faktor 2 bis 3 auf. Da durch unzählige Nebenversuche im Laufe der Jahre alle nur erdenklichen Möglichkeiten experimentell ausgeschlossen werden konnten, insbesondere auch falsche Temperaturwerte für das Sonneninnere und unser Wissen über die solaren Entstehungsprozesse sehr detailliert und abgesichert ist, lag der Schluss nahe, dass das solare Neutrino-Defizit eine Folge von unverständlichen Neutrinoeigenschaften ist. Letztlich hat sich dieses anfängliche solare Neutrioproblem dann durch die Postulierung von Neutrino umwandlungen auf dem Weg vom Ursprung bis zur Target auf der Erde lösen lassen.

In der Sonne werden ausschließlich Elektronneutrinos produziert. Die radiochemischen Experimente sind einzig auf diese Neutrinoart empfindlich. Ein Myon- oder Tauneutrino kann obige Reaktionen an den Cl- bzw. Ga-Kernen nicht auslösen, da die Energien der Neutrinos nicht ausreichen, die wesentlich schwereren Leptonen μ^- und τ^- zu produzieren. Ebenso ist die Wahrscheinlichkeit für die Streuung an Elektronen für ν_e um einen Faktor ca. 5 größer als für Myon- oder Tauneutrinos. Neutrino umwandlungen könnten die geringere Messquote erklären: Man kann die drei bekannten Neutrino-Arten sowohl nach ihren Wechselwirkungspartnern, also den Flavour-Zuständen ν_e, ν_μ, ν_τ oder nach ihren Massen ν_1, ν_2, ν_3 klassifizieren. Dabei sind die drei Neutrino massen nicht direkt den drei Neutrino arten zugeordnet. Viel mehr ist jedes der drei Neutrinos ν_e, ν_μ, ν_τ eine kohärente Überlagerung aus den 3 Massenzuständen. Da sich die einzelnen Massenzustände auf ihrem Weg von der Quelle zum Detektor mit unterschiedlichen Phasen ausbreiten, verändert sich die Mischung und damit auch die Flavour- bzw. Neutrino arten-Zusammensetzung. Der jeweilige Anteil variiert periodisch mit der charakteristischen Oszillationslänge. Aufgrund der Mischung von Neutrinos kann man streng genommen so auch nicht mehr von der Masse eines Neutrino typs reden, da es aus drei Masseneigenzuständen mit definierten Massen zusammengesetzt ist. Massenunterschiede und Mischungswinkel können heute gut bestimmt werden. Derzeit gilt als guter Parameterwert: $0.056 \text{ eV} < m_{\nu, \text{tot}} < 0.17 \text{ eV} - 1.8 \text{ eV}$

Im SNO-Experiment konnte erstmals durch Vergleich zweier radiochemischer Reaktionen:



die einerseits von ν_e ausschließlich und andererseits von ν_e und ν_μ (bzw. ν_τ) ausgelöst wurden, der Nachweis für Neutrinooszillationen erbracht. So ist seit dem Jahre 2000 der gemessene Fluss in der zweiten Reaktion – wie zu erwarten – deutlich höher.

Neutrinooszillationen sind eine Konsequenz der intrinsischen Eigenschaft dieser Teilchen und sollten auch bei anderen Neutrinoquellen nachweisbar sein. In KamLAND gelang dies mit Elektronantineutrinos aus Kernreaktoren, also völlig unabhängig von solaren Neutrino-Experimenten. Weitere Ergebnisse von solaren, atmosphärischen und Reaktor-Neutrinoexperimenten erhärteten das Bild von Neutrinooszillationen als Ursache für das solare Neutrino Defizit. Die seit 2007 in Borexino gemessene ${}^7\text{Be}$ - und auch ${}^8\text{B}$ -Neutrino Raten bestätigen das derzeit gängige Modell von Neutrinooszillationen, das bei den niedrigen Energien der ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos die Dominanz von Vakuum-Effekten und bei den hochenergetischen ${}^8\text{B}$ -Neutrinos das Vorherrschen von Materie-Effekten vorhersagt.

Man kann sich den Mischungsvorgang recht anschaulich in Analogie zur Oszillation von zirkumpolaren Polarisationszuständen verdeutlichen (Abb.5).

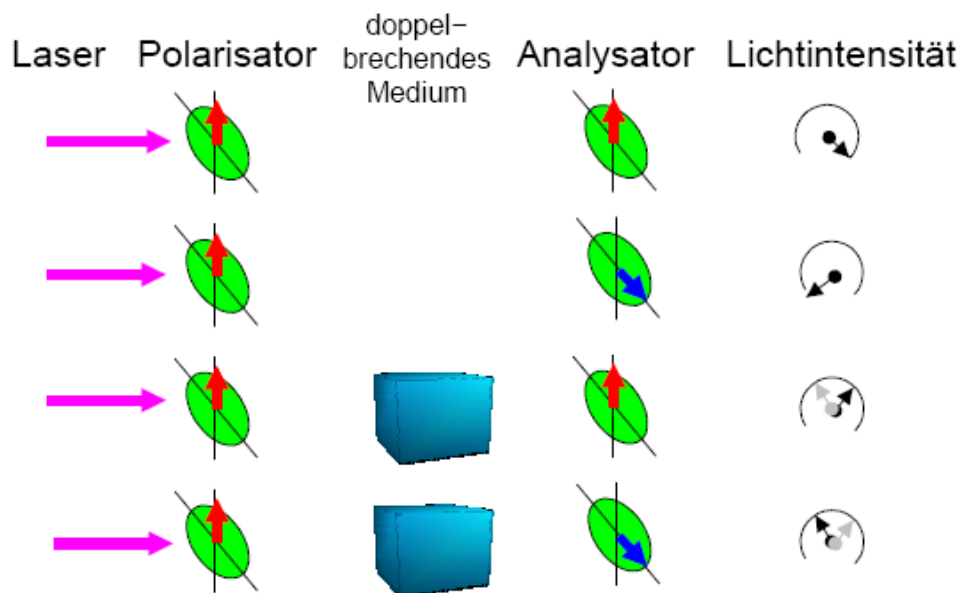


Abb.5: Oszillation von Polarisationszuständen.

Derartige Neutrino-Oszillationen existieren nur, wenn zumindest eine Neutrinoart massebehaftet ist. Dies ist aber im Standardmodell der Teilchenphysik nicht vorgesehen. Die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen erfordert somit eine Erweiterung des Standardmodells.

Neutrinos sind aufgrund ihrer schwach wechselwirkenden Eigenschaft ein Kandidat für die Dunkle Materie. Trotz ihrer Häufigkeit sind Neutrinos aber nur ein unbedeutender Bestandteil derselben. Denn erstens tragen sie aufgrund ihrer geringen Gesamtmasse weniger als 1 % zur Dunklen Materie bei, und zweitens können die nahezu lichtschnellen Neutrinos aufgrund ihres „heißen“ Charakters nicht die Funktion der Dunklen Materie als Auslöser der globalen Strukturen erfüllen.

Nachdem im vorigen Jahrhundert die intrinsischen Eigenschaften von Neutrinos im Forschungsfokus standen, wendet sich nun die Astrophysik der eigentlichen Funktion der Neutrinos als zeitnahe Botenteilchen von Zerfalls- oder Umwandlungsprozessen in bisher unerschlossenen Regionen verstärkt zu.

Die zukünftige Generation solarer Neutrinoexperimente steht schon in ihren Startlöchern: Der SNO-Detektor, der den solaren Neutrinos bis ins Jahr 2006 als Wasser-Cherenkov-Detektor hinterher spürte, soll binnen weniger Jahre mit einem Flüssigszintillator gefüllt und erneut zur Untersuchung solarer Neutrinos bei niedrigen Energien eingesetzt werden. Das zum Nachweis benutzte Szintillationsvolumen von SNO+ wird etwa das Dreifache des Borexino-Experiments sein; auch der von Myonen erzeugte Untergrund wird aufgrund der besseren Abschirmung von etwa 2 km Gestein bedeutend weniger störend sein. So steht eine noch präzisere Messung von pep- und CNO-Neutrinos an.

Ab 2020 dann sollen großvolumige Neutrinoobservatorien eine noch genauere Untersuchung solarer Neutrinos ermöglichen: Die Planungen für das europäische LENA-Experiment (Low Energy Neutrino Astronomy), ein Detektor, der 50 Millionen Liter oder 50 Tausend Tonnen Flüssigszintillator umfassen soll, sind angelaufen. Neben hochpräzisen Messungen der einzelnen Beiträge zum Neutrinofluss könnte dann auch nach zeitlichen Fluktuationen im Fluss gesucht werden.

NeutrinoPhysik im Unterricht

Neutrinos spielen in der Teilchenphysik, der Astrophysik als auch in der Kosmologie eine gewichtige Rolle. Kenntnis über die wichtigsten physikalischen Verfahren und Gesetze zu vermitteln sehen wir in Siegen als eine langfristige Aufgabe der Schulphysik. Inhaltlich sind über das reine Fachwissen und der Beschreibung von Forschungsergebnissen hinaus verstärkt Einsichten zu vermitteln. Wie kann man das besser, als Schüler an der Wissenschaftsgenese teilhaben zu lassen? Die NeutrinoPhysik entwickelt sich momentan vor unseren Augen. Das ist kein langweiliger Prozess, sondern ein gewaltiges Ringen um Erkenntnisgewinnung. Von der Postulierung der Neutrinos im 1930 bis heute haben Physiker viele Fragen zur NeutrinoPhysik beantworten können, viele neue Fragen aufgeworfen und dennoch bedürfen viele Geheimnisse noch der Entschlüsselung.

Eine forschend-entwickelnde Behandlung der NeutrinoPhysik im Unterricht bietet Schülern die Chance, nicht nur isolierte, sondern vernetzte Kenntnisse zu erwerben. Schwerpunkte einer multimedialen Aufbereitung könnten sein:

- Diskussion des offenen Briefes von Pauli an die Gruppe der Radioaktiven
- Rettung des Energiesatzes beim Beta-Zerfall durch Einführung des Neutrinos
- Erörterung der Bedeutung von Symmetrie- und Erhaltungssätzen
- Stärken und Schwächen des Standardmodells der Teilchenphysik
- Abschätzung des solaren Neutrinoflusses auf der Erde aus der pp-Reaktion
- Lösung des solaren Neutrino-Problems
- Verdeutlichung der Neutrinooszillation durch den Analogieversuch Polarisation
- Diskussion des „Gigantismus“ in der Teilchenphysik
- Neutrinos als Bestandteil der Dunklen Materie
- Neutrinos als kosmische Botschafter

Mit einem diskussionswerten Zitat von Haim Harari möchte ich meine Ausführungen schließen:

„Neutrino-Physik ist zum großen Teil die Kunst, eine Menge zu lernen, indem man nichts beobachtet“