

# Übungen zu Moderne Experimentalphysik II, Teil 2 (Kern- und Teilchenphysik)

Wintersemester 2023/24

Präsenzübungen Nr. 7

Bearbeitung am 15.02.2024

Vervielfältigung und Veröffentlichung nicht gestattet!

---

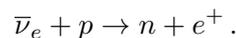
Link zur ILIAS-Hauptseite:

[https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=crs\\_2198626&client\\_id=produktiv](https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=crs_2198626&client_id=produktiv)

## Quiz:

- a) Erklären Sie kurz die klassische Nachweisreaktion für die Entdeckung des Neutrinos wie sie z.B. beim „Project Poltergeist“ Anwendung fand.

Der Nachweis erfolgte über die inverse  $\beta$ -Zerfallsreaktion. Der Prozess ist also



Das Positron wird über die zwei 511 keV Photonen nachgewiesen, welche nach der Annihilation des Positrons mit einem Elektron des Materials entstehen. Das Neutron wird nachgewiesen, indem die  $\gamma$ -Strahlung nach Neutroneneinfang eines Kerns gemessen wird. Beim „Project Poltergeist“ wurden die Paarvernichtungsphotonen und das Gammaphoton in Koinzidenz nachgewiesen.

- b) Wie kann ein Neutrinostrahl erzeugt werden?

Ein Neutrinostrahl kann erzeugt werden, indem ein Protonenstrahl auf ein Target geschossen wird. In den folgenden Reaktionen der starken Wechselwirkung entstehen zu einem großen Teil Pionen. Die geladenen Pionen  $\pi^\pm$  zerfallen dann über die schwache Wechselwirkung in Myonen und Myonenneutrinos. Die elektrisch geladenen Teilchen können dann über magnetische Filterung „aussortiert“ werden. Weitere Teilchen werden durch Absorbermaterialien gestoppt, wodurch schließlich ein Strahl von Neutrinos übrig bleibt.

- c) Welche anderen Quellen von Neutrinos haben Sie in der Vorlesung kennengelernt?

- kosmischer Neutrinohintergrund

- Supernovae und andere astrophysikalische Ursprünge
- solare Neutrinos
- atmosphärische Neutrinos
- Neutrinos aus Kernreaktoren
- Neutrinos aus radioaktiven Zerfällen von instabilen Elementen in der Erde (Geoneutrinos)
- ...

### Präsenzaufgabe 1: Neutrinooszillationen

Im Jahr 2015 wurden Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet für ihre Schlüsselbeiträge zu dem Super-Kamiokande- bzw. SNO-Experiment, mit denen der Nachweis von Neutrinooszillationen gelang. Lesen Sie den von der Royal Swedish Academy of Science aus diesem Anlass herausgegebenen Artikel „Neutrino Oscillations“ [1] und beantworten Sie folgende Fragen, ggf. durch weitere Recherche:

- a) Fassen Sie kurz das Rätsel um die solaren und atmosphärischen Neutrinos zusammen, das vor den Resultaten der SNO- und Super-Kamiokande-Experimenten bestand. Welche Ursachen für die beobachteten Defizite im Neutrinofluss wurden diskutiert?

In der Sonne entstehen Elektroneneutrinos  $\nu_e$  in den ablaufenden Kernfusionsprozessen und diese verlassen die Sonne in der Regel ohne weitere Reaktionen, da sie nur schwach wechselwirken. Der gemessene Fluss dieser solaren Neutrinos auf der Erde, z.B. im Homestake-Experiment, beträgt allerdings nur etwa  $\frac{1}{3}$  des durch das Sonnenmodell erwarteten Flusses. Als mögliche Ursachen dafür wurden diskutiert: experimentelle Fehler bei der Messung, ein falsches Modell der Kernfusionsprozesse in der Sonne und die Umwandlung (Oszillation) der  $\nu_e$  in andere Neutrino flavor.

Atmosphärische Neutrinos entstehen durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre. Dabei werden hauptsächlich  $\pi^\pm$  und  $K^\pm$  erzeugt, die in Myonen zerfallen, welche wiederum in Elektronen und Neutrinos zerfallen, wobei ebenfalls Neutrinos entstehen, und zwar  $\nu_\mu$  und  $\nu_e$  im Verhältnis 2 : 1,

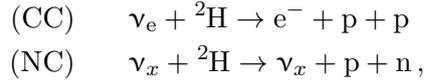
$$\pi \rightarrow \nu_\mu + \mu \rightarrow \nu_\mu + e + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Das z.B. von IMB und Kamiokande gemessene Verhältnis war aber geringer und betrug nur etwa 1.1 : 1. Als mögliche Ursachen dafür wurden diskutiert: Verletzung der Lorentz-Invarianz, flavor-verletzende neutrale Ströme im Neutrinozerfall und Oszillation der  $\nu_\mu$  in andere Neutrino flavor.

- b) Beschreiben Sie das Prinzip und das Ergebnis des SNO-Experiments. Welche Nachweisreaktionen wurden verwendet? Zeichnen Sie die relevanten Feynmandiagramme. Was unterschied das SNO-Experiment von vorherigen Experimenten zur Messung solarer Neutrinos, wodurch der Nachweis der Neutrinooszillationen möglich war?

Das SNO-Experiment war ein Schwerwasser-Cherenkov-Detektor, der auf Neutrinos mit Energien ab einigen MeV sensitiv war, die in der Sonne hauptsächlich im  $\beta$ -Zerfall von  ${}^8\text{B}$  entstehen. Es waren mehrere Neutrinonachweisreaktionen möglich,

insbesondere



wobei die durch ein  $W$ -Boson vermittelte Reaktion mit geladenem Strom (CC) nur für Elektroneneutrinos, die durch ein  $Z$ -Boson vermittelte Reaktion mit neutralem Strom (NC) aber für alle Flavours möglich ist. Somit war es möglich, im Unterschied zu vorherigen Experimenten, gleichzeitig die Rate von Elektroneneutrinos und von allen Neutrino Flavours zu messen.

Es konnte so zum einen die Vorhersage des Sonnenmodells für den Gesamtfluss bestätigt werden. Aus dem gemessenen Verhältnis der  $\nu_e$ -Rate zur Gesamtrate ließ sich dann schlussfolgern, dass  $\nu_e$  auf dem Weg von der Sonne zur Erde zum Teil in  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  oszillieren.

- c) Beschreiben Sie das Prinzip und das Ergebnis des Super-Kamiokande-Experiments. Welche Nachweisreaktionen wurden verwendet? Zeichnen Sie die relevanten Feynmandiagramme.

Das Super-Kamiokande-Experiment war ein Wasser-Cherenkov-Detektor. Damit war es möglich, die in Reaktionen mit geladenem Strom aus  $\nu_e$  und  $\nu_\mu$  entstehenden Elektronen bzw. Myonen zu identifizieren und zu unterscheiden. Außerdem konnte durch Vermessung des Cherenkov-Kegels die Richtung der Elektronen und Myonen und daraus die Richtung der urspr. Neutrinos bestimmt werden.

Es wurde nun gefunden, dass die Rate von Myonneutrinos davon abhängt, ob sie von oben oder von unten in den Detektor eintreten. Dabei ist die Rate der von unten kommenden  $\nu_\mu$ , die den deutlich längeren Weg von ihrem Entstehungsort in der Atmosphäre zurücklegen, geringer. Da die Rate an  $\nu_e$  richtungsunabhängig ist, kann das Ergebnis so gedeutet werden, dass die  $\nu_\mu$  auf der längeren Strecke durch die Erde in  $\nu_\tau$  oszillieren.

- d) Was impliziert die Existenz von Neutrinooszillationen für die Massen von Neutrinos? Wovon hängen in einem vereinfachten Modell mit nur zwei Neutrino Flavours die Amplitude und Phase der Oszillationen ab?

Neutrinooszillationen können auftreten, wenn die Masseneigenzustände, in denen die Propagation durch den Raum erfolgt, nicht gleich den Flavoreigenzuständen der elektroschwachen Wechselwirkung sind, sondern Superpositionen der Flavoreigenzustände. Die entsprechende Mischungsmatrix wird als Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix (PMNS-Matrix) bezeichnet. Unter der Annahme von nicht-verschwindender Mischung (nicht-diagonale Elemente ungleich 0 in der PMNS-Matrix) findet man eine Wahrscheinlichkeit für den Übergang zwischen zwei Neutrino Flavours, die u.a. von der zurückgelegten Strecke  $L$  sowie der Differenz  $\Delta m^2$  der quadrierten Neutrinomassen abhängt.

In einem vereinfachten Modell mit nur zwei Neutrino Flavours, wie es z.B. in guter Näherung für die atmosphärischen Neutrinos gilt, ergibt sich eine Oszillationswahrscheinlichkeit von

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right),$$

mit  $\Delta m^2 = m_\mu^2 - m_\tau^2$ . Die Phase ist abhängig von  $L$ ,  $\Delta m^2$  und der Energie  $E$  des Neutrinos. Die Amplitude ist abhängig von dem Mischungswinkel  $\theta$ , der als Parameter in der PMNS-Matrix auftritt.

Die Tatsache, dass es Neutrinooszillationen gibt, bedeutet also, dass Neutrinos im allgemeinen eine Masse haben. Da experimentell gefunden wurde, dass Mischungen zwischen allen drei Flavor auftreten können, müssen mindestens zwei Neutrinos massiv sein.

- e) Kann man durch Vermessung von Neutrinooszillationen die Massen der Neutrinos bestimmen? Begründen Sie Ihre Antwort.

Da die Oszillationswahrscheinlichkeit von  $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$  abhängt, kann man die absoluten Massen der Neutrinos nicht bestimmen, sondern nur nicht-eindeutige Aussagen über die Massenhierarchie machen.

## Literatur

- [1] Nobelprize.org. Nobel Media AB. The Nobel Prize in Physics 2015 - Advanced Information. Web. 8 Jul 2016. [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2015/advanced.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced.html), 2014.