

Neutrinooszillation und CP-Verletzung

Warum etwas ist und nicht nichts und warum man im Kosmos nur Materie, aber keine Antimaterie findet, zählt nach wie vor zu den ungelösten Rätseln der Kosmologie. Wir haben schon mehrmals darauf hingewiesen: Die Ursache könnte in einer Verletzung der CP-Invarianz zu suchen sein. Dabei steht C für „charge“ (Ladung) und P für „parity“ (Parität). Im News-Beitrag „Symmetriebruch der schwachen Kernkraft“ vom 16.09.2015 haben wir am Beispiel eines linkshändigen Neutrinos die Auswirkung einer Ladungskonjugation (C) und einer Spiegelung der Raumkoordinaten (P) besprochen. Zusammenfassend gilt: Eine Ladungskonjugation überführt das linkshändige Neutrino in ein linkshändiges Antineutrino, wogegen eine Spiegelung der Raumkoordinaten zu einem rechtshändiges Neutrino führt. Die Kombination beider Aktionen (C + P) lässt aus einem linkshändigen Neutrino ein rechtshändiges Antineutrino entstehen. Von CP-Invarianz spricht man, wenn eine Wechselwirkung ein Teilchen, nach einem Vorzeichenwechsel all seiner ladungsartigen Quantenzahlen und einer gleichzeitigen Spiegelung aller Raumkoordinaten physikalisch genauso behandelt, wie das ursprüngliche Teilchen. Mit anderen Worten: Besteht CP-Invarianz, so sind Materie und Antimaterie für die vier Grundkräfte ununterscheidbar.

Betrachten wir zur Erinnerung kurz das Standardmodell der Teilchenphysik (SM). Es gliedert sich in drei Teilchenfamilien, die sich ihrerseits in Quarks und Leptonen unterteilen. Zu jeder Familie gehört ein „Leptonendublett“, bestehend aus einem geladenen und einem neutralen Lepton. Zu den geladenen Leptonen zählen das Elektron, das Myon und das Tau, zu den ungeladenen das Elektron-Neutrino (ν_e), das Myon-Neutrino (ν_μ) sowie das Tau-Neutrino (ν_τ). Neutrinos treten also in drei unterschiedlichen Arten, auch Flavour genannt, auf, und zu jedem dieser Teilchen gibt es ein Antiteilchen.

Bleiben wir bei den Neutrinos. Im SM sind alle Neutrinos masselos. Außerdem kennt das SM nur linkshändige Neutrinos und rechtshändige Antineutrinos. Folglich kommen im SM rechtshändige Neutrinos sowie linkshändige Antineutrinos, also Neutrinoformen, wie sie aus der am Beispiel eines linkshändigen Neutrinos durchexerzierten Ladungskonjugation bzw. Spiegelung der Raumkoordinaten resultieren, nicht vor. Ferner besitzt jede Neutrinoart eine sogenannte

Leptonflavourzahl $L_e, L_\mu, L_\tau = 1$ und die Anti-Neutrinos entsprechend $L_e, L_\mu, L_\tau =$ minus 1. Im SM ist die Leptonenzahl eine Erhaltungsgröße. So steht z.B. beim Beta-minus-Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein elektronisches Antineutrino, links vom Reaktionspfeil das Neutron mit den Leptonenzahlen $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$, und rechts vom Pfeil das Neutron mit $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$, das Elektron mit $L_e = 1$ und $L_\mu = L_\tau = 0$ und das Anti-Neutrino mit $L_e =$ minus 1 und $L_\mu = L_\tau = 0$. Im Ausgangszustand wie im Endzustand ist also die Summe der Leptonenzahlen gleich 0, d.h. die Leptonenzahl ist erhalten. Im Rahmen des SM können sich Neutrinos nur in ein geladenes Lepton aus der gleichen Familie umwandeln und umgekehrt, nicht aber in ein Lepton oder Neutrino aus einer anderen Familie. Beispiel: Neutron plus Elektron-Neutrino ergibt ein Proton plus ein Elektron. Die Leptonenzahl bleibt also für jede Familie, hier für die „elektronische Familie“, getrennt erhalten. Bezüglich der vier Wechselwirkungen unterliegen Neutrinos nur der schwachen Kernkraft und nach den Gesetzen der Allg. Relativitätstheorie der Gravitation.

Im Jahr 1957 entwickelte der italienische Physiker Bruno Pontecorvo eine neue Theorie, nach der Neutrinos auf ihrem Weg durch die Raumzeit möglicherweise ihre Flavour-Quantenzahl ändern und, was im SM nicht möglich ist, sich in Neutrinos einer anderen Leptonenfamilie umwandeln. Man bezeichnet das als Neutrinooszillation. 2001 wurden diese Oszillationen am SNO (Sudbury Neutrino Observatory) erstmals direkt nachgewiesen. Die Theorie der Neutrinooszillation beruht auf drei grundlegenden Annahmen:

1. Neutrinos müssen eine Masse besitzen.
2. Nicht alle Neutrinos dürfen die gleiche Masse haben.
3. Die Flavour-Eigenzustände (ν_e, ν_μ, ν_τ) sind eine Linearkombination von Masse-Eigenzuständen (ν_1, ν_2, ν_3) mit den Massen m_1, m_2 und m_3 .

Versuchen wir Punkt 3 zu erklären: Einem Neutrino eines bestimmten Flavours kommt nicht ein bestimmter Massen-Eigenzustand zu, sondern seine Masse ist das Ergebnis einer Überlagerung (Superposition) der drei Massen-Eigenzustände ν_1, ν_2 und ν_3 . Für die drei Neutrinoarten (ν_e, ν_μ, ν_τ) sieht das wie folgt aus:

$$\nu_e = U_{e1} \times \nu_1 + U_{e2} \times \nu_2 + U_{e3} \times \nu_3$$

$$\nu_\mu = U_{\mu 1} \times \nu_1 + U_{\mu 2} \times \nu_2 + U_{\mu 3} \times \nu_3$$

$$\nu_\tau = U_{\tau 1} \times \nu_1 + U_{\tau 2} \times \nu_2 + U_{\tau 3} \times \nu_3$$

Die Komponenten $U(\alpha,\beta)$ mit $\alpha = e, \mu, \tau$ und $\beta = 1,2,3$ stellen die Elemente einer 3×3 Matrix dar, die man auch als Mischungsmatrix bezeichnet. Sie verknüpft die drei Flavour-Eigenzustände mit den drei Massen-Eigenwerten. Somit lauten die obigen Gleichungen in Matrix-Schreibweise:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Zum Zeitpunkt des Entstehens bzw. zum Zeitpunkt der Wechselwirkung mit einem anderen Teilchen, z.B. einem Proton gemäß $\nu_e + n = p + e$, tritt ein Neutrino in einem wohl definierten Flavour-Zustand ν_e, ν_μ oder ν_τ auf. Im Gegensatz dazu befindet es sich jedoch nicht in einem definierten Massenzustand. Der ist vielmehr eine Mischung bzw. eine Superposition wohl definierter *Anteile* der drei möglichen Massen-Eigenzustände ν_1, ν_2 und ν_3 .

In der Spanne zwischen Entstehung und Wechselwirkung des Neutrinos, also längs des Weges L vom Ort der Entstehung bis zum Wechselwirkungspunkt, ändert sich jedoch das Verhältnis der Massenanteile. Das heißt: Längs L befindet sich das Neutrino nicht mehr in dem ursprünglichen definierten Flavourzustand zum Zeitpunkt der Neutrinoentstehung. Der Grund: Quantenmechanisch kann man die Massen-Eigenzustände als ebene Wellen auffassen, deren zeitliche Entwicklung durch die Schrödingergleichung bestimmt wird. Als Ergebnis erhält man die Beziehung:

$$\nu_i(t) = \nu_i \times e^{-i \frac{m_i^2}{2E} \times L} \quad \text{mit } i = 1,2,3 \quad (1)$$

Dabei bedeuten die m_i die den ν_i entsprechenden Massen, E die Energie des Neutrinos und L die zurückgelegte Strecke. Gleichung (1) zeigt, dass die Massen-Eigenzustände entsprechend ihrer unterschiedlichen Massen, längs L , salopp gesagt, unterschiedlich schnell vorankommen, bzw. sich die Phasen der Wellen relativ zueinander verschieben. Folglich führt die Superposition der veränderten Anteile kontinuierlich zu einer geänderten Zusammensetzung der Massenzustände des Neutrinos. Das wiederum bedeutet, dass sich das Neutrino längs L in einem undefinierten Flavour-Zustand befindet, in einem Zustand, der eine Mischung aller möglichen Flavour-Eigenzustände darstellt. Wechselwirkt das Neutrino schließlich am Ende der Strecke L mit einem Teilchen, so besteht eine gewisse

Wahrscheinlichkeit, dass es dort entweder als das ursprüngliche Neutrino auftritt oder als ein Neutrino mit einem anderen Flavour. Die Wahrscheinlichkeit P für einen Flavourwechsel kann man berechnen. Für den Fall $n = 3$, d.h. der wechselseitigen Mischung der drei Neutrino-Flavours ν_e, ν_μ, ν_τ , ist das mathematisch jedoch ziemlich aufwändig. Aus diesem Grund behandeln wir im Folgenden die Mischung von nur zwei Flavour-Eigenzuständen, die z.B. beim Wechsel von solaren Elektron-Neutrinos in Myon-Neutrinos und dem Übergang atmosphärischer Myon-Neutrinos in Tau-Neutrinos eine Rolle spielt.

Sind nur zwei Flavour-Eigenzustände, z. B. ν_e und ν_μ , im Spiel, so hat man es auch nur mit zwei Masse-Eigenzuständen ν_1 und ν_2 und einer 2×2 -Transformationsmatrix mit vier Elementen zu tun. Da mathematisch die Oszillation wie eine Rotation behandelt werden kann – was natürlich auch für die oben beschriebene Mischung dreier Flavour-Eigenzustände gilt –, sind die Elemente der Matrix reine Sinus- bzw. Cosinus-Funktionen eines Winkels θ , den man als Mischungswinkel bezeichnet und der die Zusammensetzung der Flavour-Eigenzustände aus den Massenzuständen bestimmt. Damit hat die Mischungsmatrix die Form

$$U(\theta) = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

und die Mischung der zwei Flavour-Eigenzustände lautet:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Damit ergeben sich für ν_e und ν_μ die beiden Gleichungen:

$$\nu_e = \nu_1 \cos\theta + \nu_2 \sin\theta \quad (2)$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin\theta + \nu_2 \cos\theta \quad (3)$$

Man sieht, dass zur Masse des Elektron-Neutrinos die Anteile $\nu_1 \times \cos\theta$ und $\nu_2 \times \sin\theta$ der beiden Masse-Eigenzustände ν_1 und ν_2 beitragen. Analoges gilt für das Myon-Neutrino.

Bild 1 veranschaulicht die Überlagerung der zwei den Flavour bestimmenden Masse-Eigenzustände. Die orange und die gelbe Achse symbolisieren die Masse-Eigenzustände, die lila und die grüne Achse die zwei Flavour-Eigenzustände. Der

Mischungswinkel Θ dreht die Basis der Flavour-Eigenwerte relativ zur Basis der Massen-Eigenwerte und bestimmt das Mischungsverhältnis.

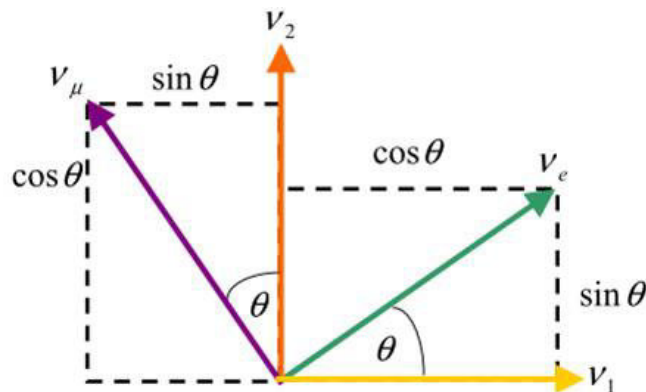


Bild 1: Superposition der Masse-Eigenzustände in einem Neutrino-Flavour
(Bild-Quelle: Nina Hermitschek: Nachweis der Neutrinooszillationen mit SNO)

Für Θ gleich 0 kommt es zu keiner Mischung, denn sowohl das Elektron- als auch das Myon-Neutrino hätten nur einen definierten Masse-Eigenzustand, und die eingangs für das Auftreten von Oszillationen erwähnte nötige Voraussetzung, dass die Flavour-Eigenzustände eine Linearkombination von Masse-Eigenzuständen sind, wäre nicht erfüllt. Für Θ ungleich 0 zeigt die Grafik, dass sich z.B. bei dem Elektron-Neutrino die Massen-Eigenzustände v_1 und v_2 entsprechend dem Cosinus von Θ bzw. dem Sinus von Θ überlagern. Für Θ gleich $\pi/2$ sind die Anteile von v_1 und v_2 gleich groß. Schreiben wir noch die Gleichung für die zeitliche Entwicklung der Mischungsanteile des Elektron-Neutrinos an: Ersetzt man in den Gleichung (2) und (3) v_1 und v_2 durch $v(t)$ aus Gleichung (1), so erhält man für die zeitliche Entwicklung des Elektron-Neutrino-Flavours den Ausdruck:

$$v_e(t) = \cos\Theta e^{-i \frac{m_1^2}{2E} L} \times v_1 + \sin\Theta e^{-i \frac{m_2^2}{2E} L} \times v_2 \quad (4)$$

Für das Myon-Neutrino lautet die Gleichung analog.

Im Falle von zwei Neutrino-Flavours führt die Berechnung der Wahrscheinlichkeit P für einen Wechsel des Flavour-Eigenzustandes zu dem Ausdruck:

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = \sin^2(2\Theta) \sin^2 \left(1,27 \Delta m^2 \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \right) \quad (5)$$

Dabei steht Θ wieder für den Mischungswinkel, Δm^2 für die Differenz der Massenquadrate, E für die Energie des Neutrinos und L für die zurückgelegte

Wegstrecke. Zu einem Flavourwechsel kann es demnach nur kommen, wenn Θ und Δm^2 ungleich Null sind! Man kann die Argumentation auch umdrehen. Da man sowohl bei den Sonnenneutrinos als auch bei den atmosphärischen Neutrinos Oszillationen beobachtet hat, müssen Neutrinos zwangsläufig eine Masse besitzen. Wie groß diese Massen sind, darüber gibt die Gleichung jedoch keine Auskunft, auch dann nicht, wenn Θ , L und E bekannt sind. Erhält man z.B. für Δm^2 den Wert 0,64, so kann das bedeuten, dass m_1 gleich 0 und m_2 gleich 0,8 ist, es kann aber auch bedeuten, dass m_1 den Wert 10,031949... hat und m_2 gleich 10 ist.

Nach dieser „kurzen“ Abhandlung zum Thema Neutrinooszillation zurück zur CP-Symmetrie. Wenn CP-Symmetrie herrscht, dann sollten die Naturgesetze Materie und Antimaterie gleich behandeln. Angewandt auf Neutrinooszillationen bedeutet das, dass die Wahrscheinlichkeit eines Flavour-Wechsels für Neutrinos und Antineutrinos gleich ist. Oder speziell, dass sich Myon-Neutrinos genauso häufig in Elektron-Neutrinos umwandeln wie Anti-Myon-Neutrinos in Anti-Elektron-Neutrinos. Ist das nicht der Fall, so wäre die CP-Symmetrie verletzt.

Mit dem sogenannten T2K-Experiment (T2K = Synonym für „Tokai to Kamioka“), an dem rund 500 Mitarbeiter von 63 Instituten in 11 Ländern beteiligt sind, gelang es 2013 erstmals, die Oszillation von Myon-Neutrinos in Elektron-Neutrinos nachzuweisen. Im August 2017 konnten die Forscher dann ein Ergebnis zur Häufigkeit der Umwandlungen von Myon- in Elektron-Neutrinos im Vergleich zu der von Anti-Myon- in Anti-Elektron-Neutrinos vorlegen. Um die für das Experiment benötigten Neutrinos zu gewinnen, hat man am japanischen J-PARC Beschleunigerzentrum an der Ostküste Japans einen 30 GeV-Protonenstrahl auf einen 900 mal 26 Millimeter großen Graphitzylinder gelenkt. Bei der Kollision werden positiv und negativ geladene Pionen erzeugt, die sofort in positiv geladene Myonen und Myon-Neutrinos bzw. in negativ geladene Myonen und Anti-Myon-Neutrinos zerfallen. Kurz hinter dem Kollisionspunkt werden die Myonen im Strahl sowie verbliebene Pionen und Protonen durch eine zweite Graphitschicht gestoppt, während die Neutrinos ungehindert weiterlaufen. In 120 Metern nach der zweiten Graphitschicht, also noch ehe es zu Neutrinooszillationen kommen kann, wird noch mit Hilfe eines sogenannten Nahdetektors die Zusammensetzung des Neutrino-Strahls gemessen. Von da laufen die Neutrinos zur Analyse zum 295 Kilometer entfernten Superkamiokande-Detektor. Die Energie der Neutrinos im Strahl lag im

Bereich um 600 MeV, da bei dieser Energie die Wahrscheinlichkeit einer Neutrinooszillation bei der vorgegebenen Wegstrecke von 295 Kilometern am größten ist.

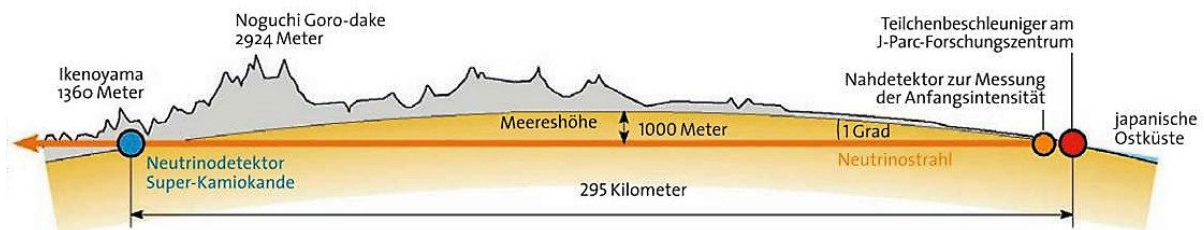


Bild 2: Weg der Neutrinos von Kamioka zum Detektor Super-Kamiokande
(Quelle: www.thphys.uni-heidelberg.de/~wolschin/sdw_neutrinos12.pdf)

Kamiokande besteht im Wesentlichen aus einem Tank mit 50.000 Litern hochreinem Wasser und 11.200 Photomultipliern zur Detektion der Tscherenkow-Strahlung. Treffen die Neutrinos auf eines der Wassermoleküle, so kann das Neutrino mit einem der im Wassermolekül gebundenen Nukleonen über den inversen Beta-Zerfall reagieren und ein geladenes Lepton freisetzen:



Der Buchstabe l am Neutrino steht für ein Elektron-, Myon- oder Tau-Neutrino, die l^- für Elektron, Myon oder Tau, die l^+ für die Antiteilchen der Leptonen und n bzw. p für Neutron bzw. Proton. Entsprechend der obigen Gleichungen liefert die Reaktion eines Elektron-Neutrinos mit einem Neutron stets ein Elektron, die eines Myon-Neutrinos mit einem Neutron ein negativ geladenes Myon und die eines Anti-Elektron-Neutrinos mit einem Proton ein positiv geladenes Positron.

Betrachten wir eines der freigesetzten geladenen Leptonen l^- bzw. l^+ längs seiner Flugbahn durch das Wasser des Detektors. Aufgrund seines elektrischen Feldes polarisiert es die Atome in seiner Umgebung, d.h. die Ladungen der Elektronenhüllen der Atome werden verschoben, sodass lauter einzelne elektrische Dipole entstehen. Bewegt sich das Lepton weiter durch das Wasser, so baut sich die Polarisation aller Atome wieder ab, wobei jeweils pro Atom ein kurzer elektromagnetischer Impuls, d.h. eine Lichtwelle entsteht. Da sich die Polarisation zu dem Teilchen symmetrisch aufbaut, entstehen beim nachfolgenden Zerfall der Polarisation symmetrische Lichtwellen, die miteinander interferieren und sich gegenseitig auslöschen. Folglich entsteht im Bereich um das Teilchen keine Strahlung.

Ander sieht es aus, wenn sich das Lepton mit einer Geschwindigkeit bewegt, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium Wasser (nur im Vakuum breitet sich das Licht mit $c = 299792,458$ Kilometern pro Sekunde aus, in einem Medium nur mit $v = c/n$, wobei n der Brechungsindex des Mediums ist). Nun ist die Polarisation um das Teilchen nicht mehr symmetrisch. Da der Abbau der Polarisation etwas Zeit benötigt, polarisiert das Lepton bereits in seiner unmittelbaren Umgebung befindliche Atome, obwohl die Polarisation der in Flugrichtung zurückliegenden Atome noch nicht gänzlich abgeklungen ist. Folglich entstehen beim Abbau der Polarisation von den einzelnen Atomen ausgehende, räumlich versetzte Kugelwellen, die längs des Mantels eines Kegels mit dem Öffnungswinkel φ phasengleich aufeinander treffen und den beobachteten Tscherenkow-Lichtkegel bilden, der die Wände des Detektors ringförmig beleuchtet. In alle anderen Richtungen löschen sich die Wellen jedoch gegenseitig aus. Der Winkel φ hängt ab vom Brechungsindex des Mediums und von der Geschwindigkeit des Leptons im Medium.

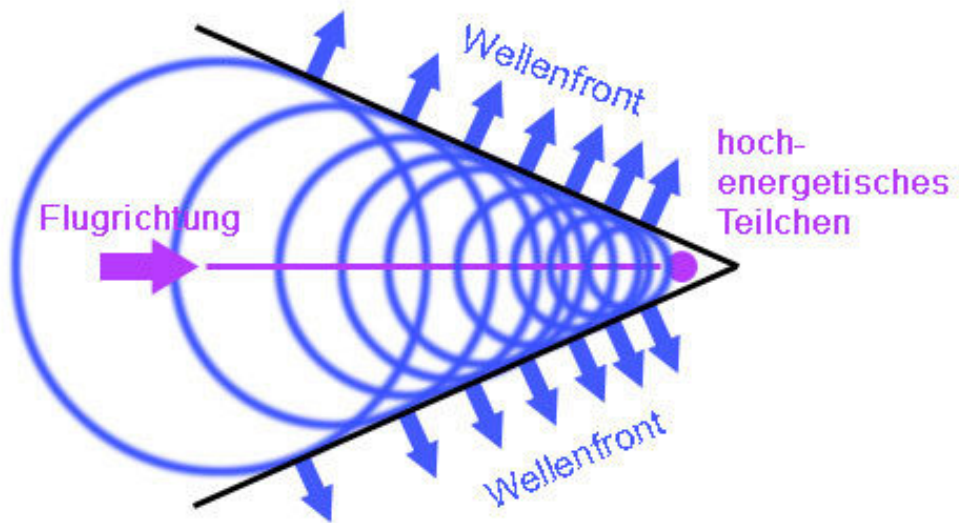


Bild 3: Tscherenkow-Kegel

(Quelle: <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=rich>)

Anhand des Aussehens dieses Lichtringes kann man unterscheiden, ob er von einem Elektron oder von einem Myon ausgelöst wurde: Myonen erzeugen einen scharf gezeichneten Ring, wogegen die Elektronen im Medium Bremsstrahlung emittieren und damit einen elektromagnetischen Schauer auslösen, der zu einem verschmierten Ring führt.

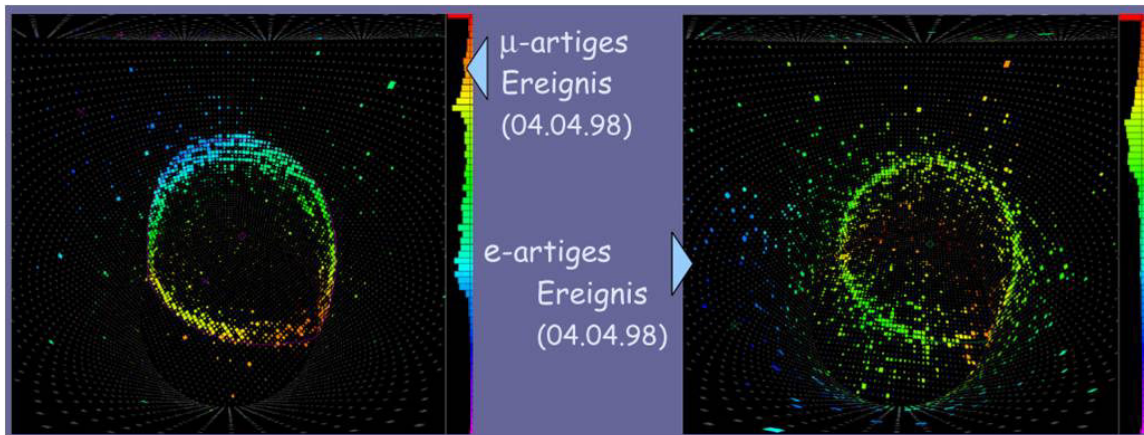


Bild 4: Tscherenkow-Ringe ausgelöst von einem Myon bzw. Elektron
 (Quelle: <https://web.physik.rwth-aachen.de/~stahl/Seminar/Raab.pdf>)

Bleibt noch die Frage: Warum tragen die bei den Prozessen entstehenden geladenen Protonen nicht zur Tscherenkow-Strahlung bei? Antwort: Sie haben zu wenig Energie, um die Tscherenkow-Schwelle zu überschreiten, d.h. ihre Geschwindigkeit im Medium ist zu gering, um Tscherenkow-Licht hervorzurufen. Soweit zu den experimentellen Details.

Nun zu den Meßergebnissen. Es hat sich gezeigt, dass Neutrino-Oszillationen häufiger stattfinden als Anti-Neutrino-Oszillationen. Die Forscher konnten deutlich mehr Elektron-Neutrinos beobachten, als bei CP-Symmetrie zu erwarten gewesen wäre. Bei den Anti-Materie-Neutrinos war es umgekehrt. Dort hat man weniger Anti-Elektron-Neutrinos beobachtet, als man hätte messen müssen, wenn CP-Symmetrie herrscht. In Zahlen: Anstelle von 23 erwarteten Elektron-Neutrinos hat man 32 detektiert, und anstelle von 7 erwarteten Anti-Elektron-Neutrinos fand man nur 4. Es hatten sich also 32 Myon-Neutrinos in Elektron-Neutrinos umgewandelt und nur 4 Myon-Anti-Neutrinos in Anti-Elektron-Neutrinos.

Obwohl insbesondere bei den Anti-Materie-Neutrinos die Datenmenge für eine tragfähige Aussage zu klein ist, halten die Forscher dennoch die Aussage für gerechtfertigt, dass mit einer statistischen Sicherheit von 95 Prozent (2σ) die Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie bei Neutrino-Oszillationen verletzt ist. Trifft das zu, dann könnten die Neutrinos auch eine Rolle bei den Prozessen der schwachen Wechselwirkung gespielt haben, die im frühen Universum der Materie den Vorzug vor der Antimaterie gegeben haben.

Um diese Aussagen mit neuen Ergebnissen zu untermauern, benötigen die Forscher am T2K-Experiment mehr Neutrinooszillationsdaten. Bis 2021 soll daher der Beschleuniger so verbessert werden, dass der Strahl, der auf das Graphit-Target trifft, rund dreimal mehr Protonen enthält. Bis 2026 soll dann der Protonenfluss nochmals um den Faktor 2,5 gesteigert werden. Dann soll für die Messung der Neutrinooszillationen auch der vermutlich 2026 fertiggestellte neue Hyper-Kamiokande-Detektor mit einem Volumen von einer Megatonne Wasser eingesetzt werden.