

Diss. ETH No. 13105

The Pion Beta Decay Experiment and A Remeasurement of the Panofsky Ratio

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ)
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Thomas Flügel

Dipl. Phys.

born Nov. 7, 1968

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Hofer, examiner

Prof. Dr. H.-C. Walter, co-examiner

March 1999

Abstract

The rare semileptonic decay $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ ($\pi\beta$) is a fundamental manifestation of the weak interaction and thus allows a stringent test of the standard model. Especially the unitarity of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix, the conserved vector current hypothesis and the calculation of radiative corrections can be proved. The beta decay of the pion is analogous to the superallowed pure Fermi transition in nuclear beta decay. Inconsistencies in the analysis of superallowed nuclear beta decays and, furthermore, ambiguities in the measurement of neutron decay parameters call for a new measurement of the $\pi\beta$ decay rate. The difficulty in measuring the $\pi\beta$ decay rate is due to the small branching ratio of $\sim 1 \cdot 10^{-8}$. The current measurement precision is one order of magnitude lower than theoretical calculations. With the goal to reach an accuracy of 0.5% the Pion Beta Decay experiment (PiBeta) at the Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland has been assembled.

The signature for the $\pi\beta$ decay is the coincident detection of the pair of photons following π^0 decay after a pion has stopped in the target. A low systematical error for the determination of the $\pi\beta$ decay rate will be achieved by a normalization to the $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ decay. This demands a properly designed detector with a shower calorimeter as the central part. It must be capable to detect the ~ 70 MeV positron from the $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ decay and the ~ 70 MeV photons from the π^0 decay with similar efficiency. This is provided by the spherical PiBeta calorimeter that consists of 240 CsI crystals. It has a high rate capability and also offers good energy resolution and high granularity. With an optimization of the surface treatment an energy resolution of 4.2 MeV FWHM for 70 MeV (beam) positrons was reached. This way, a good suppression of the background event $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ can be achieved.

The PiBeta detector currently is almost entirely equipped and will be prepared for production runs starting in 1999. Results from laboratory measurements and test beam periods also went into the GEANT simulation, such as optical non-uniformity, photon statistics and electronic noise. With the simulation the development of electromagnetic showers in the calorimeter was studied and compared with measurements.

During the beam period in 1996 an array of 40 CsI crystals comprising a fifth of the final PiBeta calorimeter was used to study the response to the decay $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e (\gamma)$. Since a high efficiency of the PiBeta detector for this process is mandatory to achieve a low systematical error also the radiative decay $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ must be identified. With the well-matched simulation the overall shower distribution within the PiBeta calorimeter was modelled using a threshold function. With this, a cluster finding algorithm was developed to identify radiative decays. Finally the branching ratio for the decay $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ with photons exceeding an energy of 5 MeV was obtained to be $(2.9 \pm 1.2) \cdot 10^{-6}$ which agrees well with the theoretical value of $2.7 \cdot 10^{-6}$. This also shows the feasibility of the final PiBeta detector to measure the branching ratio of $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ within a certain kinematic region. Consequently, the pion vector form factor can be re-measured.

Another beam period in 1997 was dedicated to the calibration of the PiBeta calorimeter with photons. Negative pions therefore were stopped in a liquid hydrogen target. Then either charge exchange or radiative capture occur. The resulting photons with distinct energies were detected in an array of 44 CsI crystals. Additionally the relative strength of the two occurring π -p reactions was determined with high precision thanks to the good energy resolution of the calorimeter. This way, the Panofsky ratio (P) was re-measured. The analysis of the well-separated photon distributions resulted in 1.546 ± 0.010 for P . With this value the isovector π -N scattering length b_1 amounts to -0.085 ± 0.002 inverse pion masses. This result agrees well with the most recent value of $b_1 = -0.00868 \pm 0.0014$ from pionic hydrogen spectroscopy.

Zusammenfassung

Das Standardmodell beschreibt erfolgreich Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen. Insbesondere die Entdeckung postulierter Teilchen wie W^\pm - und Z-Boson und t-Quark machen es zu einem allgemein akzeptierten Modell. Allerdings ist die Abwesenheit einer Erklärung für das Vorhandensein von exakt drei Quark- und Leptonenfamilien, ebenso wie der phänomenologische Ansatz mit 18 freien Parametern - unter anderem die Einfügung der Teilchenmassen - unbefriedigend. Aus diesem Grunde sind neue Modelle beziehungsweise Erweiterungsmodelle erwägenswert. Eine wichtige Aufgabe der Teilchenphysik ist die genaue Untersuchung des Standardmodells und die Suche nach Teilchen, welche von Theorien, wie beispielsweise der Supersymmetrie, vorausgesagt werden. Diesem Zweck dient auch ein Experiment am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen, Schweiz, wo mit dem "PiBeta-Detektor" der seltene Zerfall $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ - der sogenannte Pion Beta-Zerfall ($\pi\beta$) - untersucht wird.

Die Wahrscheinlichkeit für den Pion Beta-Zerfall ist ausschliesslich durch die Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung bestimmt. Mit der angestrebten Messgenauigkeit von 0.5% können theoretische Voraussagen und Rechnungskorrekturen überprüft werden, welche grössenordnungsmässig die gleiche Genauigkeit aufweisen. Das Interesse an diesem Zerfallsmodus ist gegeben durch die Bedeutung des Resultates bezüglich der Universalität der schwachen Wechselwirkung, der Erhaltung des Vektorstromes und der Unitarität der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM-Matrix). Die Berechnung der Zerfallswahrscheinlichkeit hiermit führt zu einem Verzweigungsverhältnis von $(1.025 \pm 0.002) \cdot 10^{-8}$.

Die theoretische Beschreibung fusst auf der Fermi-Theorie des Beta-Zerfalls, welche die Kopplungsstärke des hadronischen Stromes der Pionen mit dem leptonischen Strom durch die Fermi-Konstante G_F bestimmt. Deren Gleichheit mit der Kopplungsstärke für den μ -Zerfall ist eine Folge der Universalität der schwachen Wechselwirkung. Weiterhin wird angenommen, dass der vektorielle Anteil des Stromes für Hadronen¹ und Leptonen identisch ist. Ein von den Berechnungen abweichender Wert für die Pion Beta-Zerfallsrate würde diese Hypothesen relativieren.

Die von Glashow, Weinberg und Salam formulierte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung erklärt mit der Parität- und CP-Verletzung auch die Nichterhaltung der Quarkflavour-Quantenzahlen. Dieses wird durch die CKM-Matrix beschrieben, welche durch Drehungen im Raum des elektroschwachen Isospins die Quark-Eigenzustände der elektroschwachen WW darstellt. Mit Kenntnis der Kopplungskonstante kann das Matrixelement V_{ud} , der Kosinus des Cabibbo-Winkels, aus dem Beta-Zerfall bestimmt werden. Mit einem Wert von ~ 0.974 [PDG98] stellt V_{ud} den wesentlichen Beitrag zur quadratischen Summe der Zeilenelemente der CKM-Matrix dar. Ein von eins abweichender Wert hätte weitreichende Konsequenzen für das Standardmodell.

Um experimentell ähnliche Genauigkeiten wie die theoretischen Vorhersagen zu erreichen, ist zum einen eine sehr hohe Detektoreffizienz bei hoher Strahlintensität und zum anderen eine optimale Auslegung des Detektors notwendig. Zur Messung der Pion Beta-Zerfallsrate wird ein Pionenstrahl in einem aktiven Target gestoppt und das in 10^{-16} s in zwei Photonen mit einer Energie von ~ 68 MeV zerfallende π^0 indirekt nachgewiesen. Anstelle einer absoluten Messung wird die Zerfallsrate relativ zu dem Prozess $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ bestimmt, was eine höhere Genauigkeit zulässt, da die Zerfallsrate von $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ auf 0.3% genau bekannt ist. Die relative Messung, welche durch die gegebene Positronenergie von ~ 69 MeV ermöglicht wird, bedingt aber auch, dass die Detektorakzeptanz für beide Prozesse vergleichbar ist. Dies kann mit dem PiBeta-Kalorimeter gewährleistet werden, welches durch Wahl des Szintillatormaterials und der Form hierauf optimiert ist. Die 240 zu einer Kugel angeordneten CsI-Szintillatoren weisen eine hohe Nachweeffizienz bei einer Raumwinkelabdeckung von 80% auf.

Für die Abgrenzung zu Untergrundereignissen ist eine gute Energieauflösung des PiBeta-Kalorimeters notwendig, da bei dem Zerfall ruhender geladener Pionen vorwiegend Positronen mit einer Energie bis zu 53 MeV aus der Zerfallskette $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ auftreten. Um die Energieauflösung zu optimieren, sind die

¹ Lediglich ein Formfaktor muss berücksichtigt werden.

Szintillatoren und deren Lichtausbeute optimiert und anschliessend einzeln vermessen und getestet worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen gehen auch in die Simulation des Detektors ein.

Die fortlaufende Angleichung der Simulation an Messergebnisse und die experimentelle Bestätigung von simulierten Resultaten, lässt Studien über das Verhalten elektromagnetischer Schauer und die Entwicklung von Analyseschritten ebenso zu, wie eine Fehlerabschätzung für Korrekturen und Cuts.

Die vorliegende Arbeit gibt im ersten Teil, ausser einer Einführung in die Theorie des Beta-Zerfalls, einen Einblick in das Pion Beta-Zerfallsexperiment. Hierbei werden die einzelnen Detektorkomponenten und deren Eigenschaften erläutert. Besonderes Gewicht wird dabei auf das elektromagnetische Kalorimeter gelegt. Die Entwicklungsschritte, welche zur Favorisierung der Oberflächenbehandlung mit wellenlängenschiebenden Lack und Teflonfolie führten, werden dargestellt und die Qualitätskontrolle für die CsI-Kristalle erläutert. Darüberhinaus werden einige Simulationen zum elektromagnetischen Kalorimeter und die Auswertung physikalisch relevanter Daten aus zwei Test-Strahlzeiten vorgestellt und diskutiert.

Mit Hilfe von GEANT Simulationen wurde die Winkelauflösung des Kalorimeters bestimmt und das Ergebnis bei einer Teststrahlzeit bestätigt. Der ermittelte Wert von $3.6^\circ \pm 0.2^\circ$ für das auf Nachweiseffizienz und Energieauflösung optimierte Kalorimeter ermöglicht kinematische Berechnungen auch neutraler Teilchen¹ und liefert somit eine weitere Bestimmungsgrösse des zugrundeliegenden Prozesses. Hierauf aufbauend wurde ein Spurrekonstruktions-Algorithmus entwickelt, der die Aufgabe hat, die Verteilung elektromagnetischer Schauer im Kalorimeter daraufhin zu prüfen, ob sie von einem oder von mehreren Teilchen herrühren und die entsprechenden Energien zu bestimmen. Dies ist besonders bei der Betrachtung strahlender Pion- und Myonzerfälle relevant.

Während zufällige Koinzidenzen des Zerfalls $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$ zum $\pi\beta$ -Untergrund beitragen, erlaubt die Bestimmung der Energie- und Winkelverteilung von $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ die Messung des Verhältnisses der Pion-Formfaktoren, denn mögliche innere Anregungen gehen einher mit der Aussendung von Photonen. Gleichwohl ist der Hauptanteil an strahlenden Zerfällen auf Bremsstrahlungsprozesse zurückzuführen. Unter Anwendung des Spurrekonstruktions-Algorithmus konnte das Verzweigungsverhältnis für $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ zu $(2.9 \pm 1.2) \cdot 10^{-6}$ für Photonen mit einer Energie über 5 MeV bestimmt werden. Dieses Resultat stimmt gut mit dem berechneten Wert von $2.7 \cdot 10^{-6}$ überein. Dadurch konnte die Anwendbarkeit dieses Verfahrens erwiesen und eine weitere Einsatzmöglichkeit des PiBeta-Detektors aufgezeigt werden.

Schliesslich wurde die Reaktion $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n \rightarrow \gamma \gamma n$ benutzt, um das Kalorimeter mit Photonen zu kalibrieren. Hierfür wurden negative Pionen in einem Flüssigwasserstoff-Target zur Ruhe gebracht. Dabei können zwei Reaktionen auftreten, deren relative Stärke das Panofsky-Verhältnis festlegt. Die oben bezeichnete Ladungsaustauschreaktion resultiert in einer Energieverteilung der Photonen zwischen 55 MeV und 83 MeV. Mit geringerer Häufigkeit entstehen ein Neutron und ein Photon im Endkanal. Die Energie dieses Photons beträgt 129.4 MeV. Bei hinreichend guter Energieauflösung lassen sich beide Reaktionen im Photonenspektrum identifizieren. Eine Neubestimmung des Panofsky-Verhältnisses mit einem Teil des PiBeta-Kalorimeters liefert das Ergebnis 1.546 ± 0.010 . Dieses ist proportional zu der isovektoriellen Pion-Nukleon Streulänge b_1 , welche sich hiermit zu $(-0.085 \pm 0.002)/m_\pi$ ergibt.

¹ Für die Spurrekonstruktion geladener Teilchen stehen zwei zylindrische Vieldraht-Proportionalkammern zur Verfügung