



## Doctoral Thesis

# A precision measurement of the transverse polarization of positrons from the decay of polarized muons

**Author(s):**

Köhler, Kai-Ulrich

**Publication Date:**

2004

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004998785> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 15865

**A Precision Measurement of the  
Transverse Polarization of Positrons  
from the Decay of Polarized Muons**

A dissertation submitted to the  
**EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE  
ZÜRICH**

for the degree of  
**Doctor of Natural Sciences**

presented by

**Kai-Ulrich Köhler**

Dipl.-Phys. Technische Universität Karlsruhe

born April 9, 1973

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Fetscher, examiner

Prof. Dr. J. Lang, coexaminer

Prof. Dr. A. Rubbia, coexaminer

Prof. Dr. F. Scheck, coexaminer

Zürich, 2004

### Abstract

The transverse polarization of positrons from the decay of polarized muons has been measured at the Paul Scherrer Institute in Villigen, Switzerland. The results are consistent with the predictions of the Standard Model. Improved limits have been obtained for the four muon decay parameters  $\eta$ ,  $\eta''$ ,  $\alpha'/A$ , and  $\beta'/A$ , for the energy averaged transverse polarization components  $\langle P_{T_1} \rangle$  and  $\langle P_{T_2} \rangle$  as well as for the violation of time reversal invariance in a purely leptonic interaction. With the assumption that “ $V-A$ ” is accompanied by one additional, exotic coupling, improved limits have been derived for the complex coupling constant  $g_{RR}^S$ .

The method applied has been used previously [1, 2, 3]. It makes use of a coherent spin precession technique for the stopped polarized muons. The plane defined by the muon polarization vector and the momentum of the accepted decay positrons allows to define the two transverse polarization components,  $P_{T_1}$  and  $P_{T_2}$ , of the positrons. The measurement of the energy-dependence of  $P_{T_1}$  which lies in that plane yields the two parameters  $\eta$  and  $\eta''$ , the first of which enters the definition of the Fermi coupling constant. Any  $P_{T_2}$ , normal to the above mentioned plane, different from zero would indicate the violation of time reversal invariance in muon decay.

Annihilation-in-flight of the decay positrons with polarized electrons in a magnetized foil was used as the analysing reaction by making use of the azimuthal dependence of the event rates. The two annihilation quanta were observed by means of an array of 127 BGO detectors. This resulted in an improved gamma ray detection ability and, together with the associated trigger logic, represents a major improvement with respect to the first experiment. Other improvements are a higher muon stopping rate, a (low -  $Z$ ) beryllium stopping target, a precession field highly homogeneous both in space and time, fast drift chambers as well as an improved trigger logic and data acquisition software adapted to the much higher detected annihilation rate.

The analysis of the data is based on a novel method. The polarization data, as measured at the time of annihilation, are compared with the result of a Monte Carlo simulation based on GEANT 3, but with proper treatment of the  $e^+$  and  $e^-$  polarization. This method has the advantage that the linear dependence of the theoretical polarization distribution on the four decay parameters, given at the moment of muon decay, is preserved up to the moment of annihilation. Thus any unfolding procedure of the measured polarization distribution has been avoided.

A data set of about 10 million annihilation events had already been analyzed within the PhD-thesis of N. Danneberg in 2001 [4]. In the thesis at hand, the results of the analysis of almost 40 million valid events are presented.

In the following, present results are compared with the results of Burkard et al. [1, 2] and of Danneberg [4] (all values given in units of  $10^{-3}$ ):

Burkard et al. [1, 2]	Danneberg [4]	This Experiment
$\eta = 11 \pm 85$	$95 \pm 61$	$71 \pm 37$
$\eta'' = 48 \pm 125$	$98 \pm 58$	$105 \pm 52$
$\alpha'/A = -47 \pm 52$	$-13 \pm 29$	$-3 \pm 22$
$\beta'/A = 17 \pm 18$	$8 \pm 16$	$-1 \pm 8$
$\langle P_{T_1} \rangle = 16 \pm 23$	$5 \pm 16$	$6 \pm 8$
$\langle P_{T_2} \rangle = 7 \pm 23$	$1 \pm 16$	$-4 \pm 8$

In addition, an analysis was performed in which the presence of only one additional coupling was explicitly assumed. It yields

$$\eta = (-1.8 \pm 7.1) \times 10^{-3} \quad \beta'/A = (-1.4 \pm 3.6) \times 10^{-3}$$

and

$$\text{Re}\{g_{RR}^S\} = (-3.6 \pm 14.0) \times 10^{-3} \quad \text{Im}\{g_{RR}^S\} = (5.6 \pm 14.0) \times 10^{-3} .$$

## Zusammenfassung

Am Paul Scherrer Institut in Villigen in der Schweiz wurde die Transversalpolarisation der Positronen aus dem Zerfall polarisierter Myonen gemessen. Die Resultate stimmen mit den Vorhersagen des Standardmodells überein. Aus diesen Resultaten ergeben sich neue experimentelle Grenzen für die vier Myonzerfallspareparameter  $\eta$ ,  $\eta''$ ,  $\alpha'/A$ , und  $\beta'/A$ , für die über alle Positronenenergien gemittelten Transversalpolarisationskomponenten  $\langle P_{T_1} \rangle$  und  $\langle P_{T_2} \rangle$ , sowie für die Verletzung der Zeitumkehrinvarianz bei einer rein leptonischen Wechselwirkung. Unter der Annahme, dass zusätzlich zu “V-A” eine weitere, exotische Kopplung auftritt, wurden verbesserte Grenzen für die komplexe Kopplungskonstante  $g_{RR}^S$  bestimmt.

Die angewandte Methode wurde schon bei einem früheren Experiment eingesetzt [1, 2, 3]. Sie basiert auf einem Verfahren mit kohärenter Spin-Präzession der gestoppten polarisierten Myonen. Die Ebene, die durch den Vektor der Myonenpolarisation und den Impuls der akzeptierten Positronen aufgespannt wird, ermöglicht die Definition zweier Transversalpolarisationskomponenten,  $P_{T_1}$  und  $P_{T_2}$ , der Positronen. Die Messung der Energieabhängigkeit der Komponente  $P_{T_1}$ , welche in dieser Ebene liegt, liefert die beiden Parameter  $\eta$  and  $\eta''$ , wobei ersterer in die Definition der Fermi-Kopplungskonstanten eingeht. Eine von Null verschiedene Komponente  $P_{T_2}$ , senkrecht zur oben erwähnten Ebene, wäre ein Indiz für die Verletzung der Zeitumkehrinvarianz beim Myonzerfall.

Als Analysereaktion diente die Annihilation im Flug der Zerfallspositronen mit polarisierten Elektronen in einer magnetisierten Folie unter Ausnutzung der Abhängigkeit der Ereignisraten vom Azimutwinkel. Die beiden Annihilationsquanten wurden mit Hilfe von 127 BGO-Detektoren erfasst. Dies ermöglichte eine zuverlässigere Detektion der Gammastrahlen und stellt, zusammen mit der zugehörigen Triggerlogik, eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem ersten Experiment dar. Andere Verbesserungen sind eine höhere Myon-Stopprate, ein Beryllium-Stopptarget (mit niedrigem  $Z$ ), ein sowohl räumlich als auch zeitlich äusserst homogenes Präzessionsmagnetfeld, schnelle Driftkammern sowie eine verbesserte Triggerlogik und Datenaufzeichnungs-Software, die der viel höheren Annihilationsereignisrate angepasst wurden.

Die Datenanalyse basiert auf einer neuartigen Methode. Die Polarisationsdaten, die zum Zeitpunkt der Annihilation gemessen wurden, werden verglichen mit den Ergebnissen einer Monte-Carlo-Simulation auf Grundlage von GEANT 3, allerdings mit korrekter Behandlung der Polarisierungen der  $e^+$  und  $e^-$ . Der Vorteil

dieser Methode liegt darin, dass die lineare Abhängigkeit der theoretischen Polarisationsverteilung von den vier Zerfallsparametern, die ja für den Zeitpunkt des Myonzerfalls vorliegen, bis zum Moment der Annihilation erhalten bleibt. Somit wurde jegliche Entfaltungsprozedur für die gemessene Polarisationsverteilung vermieden.

Ein Datensatz von etwa 10 Millionen Annihilationsereignissen ist bereits im Rahmen der Dissertation von N. Danneberg im Jahr 2001 analysiert worden [4]. In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse der Analyse von fast 40 Millionen gültigen Ereignissen vorgestellt.

Im Folgenden werden die gegenwärtigen Resultate mit den Ergebnissen von Burkard et al. [1, 2] und von Danneberg [4] verglichen (alle Werte sind in Einheiten von  $10^{-3}$  angegeben):

Burkard et al. [1, 2]	Danneberg [4]	Dieses Experiment
$\eta = 11 \pm 85$	$95 \pm 61$	$71 \pm 37$
$\eta'' = 48 \pm 125$	$98 \pm 58$	$105 \pm 52$
$\alpha'/A = -47 \pm 52$	$-13 \pm 29$	$-3 \pm 22$
$\beta'/A = 17 \pm 18$	$8 \pm 16$	$-1 \pm 8$
$\langle P_{T_1} \rangle = 16 \pm 23$	$5 \pm 16$	$6 \pm 8$
$\langle P_{T_2} \rangle = 7 \pm 23$	$1 \pm 16$	$-4 \pm 8$

Zusätzlich wurde eine Analyse durchgeführt, bei der explizit das Vorhandensein von nur einer zusätzlichen Kopplung angenommen wurde. Diese Analyse ergibt

$$\eta = (-1.8 \pm 7.1) \times 10^{-3} \quad \beta'/A = (-1.4 \pm 3.6) \times 10^{-3}$$

und

$$Re\{g_{RR}^S\} = (-3.6 \pm 14.0) \times 10^{-3} \quad Im\{g_{RR}^S\} = (5.6 \pm 14.0) \times 10^{-3}.$$