

Diss. ETH No. 14458

**Towards an Experimental Test of Time Reversal Invariance Violation  
in the Decay of Polarized Free Neutrons**

Neutron Beam Studies and Detector Development

A dissertation submitted to the

**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZÜRICH**

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

**Christian Hilbes**

Dipl. Phys. ETH

born on December 4th, 1970

citizen of Luxemburg

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Lang, examiner

Prof. Dr. K. Bodek, co-examiner

Prof. Dr. W. Fetscher, co-examiner

Zürich 2001

## Abstract

One of the biggest successes of modern cosmology is the accurate prediction of the abundance of the light elements in the universe. These predictions are based on only one parameter: the baryon to entropy ratio  $\eta$ . According to Sakharov, one of the conditions for this baryon asymmetry is a violation of the invariance under the combined reversal of charge and spatial orientation,  $CP$ . The standard model of particle physics (SM) includes  $CP$  invariance violation as measured in the decay of  $K$  and  $B$  mesons via the Cabbibo-Kobayashi-Maskawa mixing mechanism. However, the measured  $CP$  invariance violation strength is by 7 to 9 orders of magnitude too weak to explain the baryon asymmetry required by the cosmological model. This gives a strong motivation for a search for new physics, beyond the SM, in the field of  $CP$  invariance violation.

Assuming  $CPT$  invariance, where  $T$  expresses a reversal of the orientation of the arrow of time,  $CP$  and  $T$  invariance violation are equivalent. Already in 1957, Jackson, Treiman and Wyld published a paper describing possible tests of time reversal invariance in  $\beta$ -decay. One of the time reversal violating  $\beta$ -decay correlation coefficients is the  $R$ -parameter, quantifying the polarization of the decay electron transversal to both, its momentum and the polarization of the decaying nucleus. It has been measured in several experiments investigating  $\beta$ -decay of selected nuclei, the most precise one being the measurement of  $R$  in the decay of  ${}^8\text{Li}$  performed by our group in 1996. This thesis is part of a follow-up experiment aiming at a measurement of  $R$  in the decay of the most simple nucleus, the free neutron. This measurement requires an intense polarized neutron source and a detection system for the transversal decay electron polarization.

In 1999, we installed a neutron beamline equipped with a supermirror polarizer and two RF spin-flippers at the neutron spallation source SINQ, at PSI, Villigen. The focusing beamline has a cross section of  $4 \times 15 \text{ cm}^2$ . Beam intensity measurements performed with the gold irradiation method revealed a thermal equivalent neutron flux, normalized to the incoming proton beam current onto the SINQ target, of  $\phi_{\text{eq}} = (6.49 \pm 0.10) \cdot 10^{12} (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mA})^{-1}$ . The real mean neutron density is  $\rho_0 = (2.95 \pm 0.04) \cdot 10^9 (\text{m}^3 \cdot \text{mA})^{-1}$ . The horizontal divergence of the beam is found to be  $0.80^\circ$ , the vertical divergence is  $0.65^\circ$ . Using a polarimeter consisting of two supermirror analyzers and two additional RF spin-flippers, the polarization of the neutron beam was investigated. In the center of the beam, the polarization averages to approximately  $P = 95\%$  over the whole width of the beam. The average polarization over the whole cross section has been determined in this work to  $P = (91.2 \pm 1.3) \%$ . However, the polarization can possibly be improved by fixing a defect we discovered in the neutron spin guiding field during the measurements. This will be done during the winter 2001/2002 shutdown of SINQ.

Following successful tests with a small prototype chamber on the neutron beam, a first full size prototype of a  $605 \times 605 \text{ mm}^2$  multiwire proportional chamber for the detection of the low energy electron tracks from neutron  $\beta$ -decay has been designed and constructed. It features up to 6 cathode-anode-cathode cells. All electrodes consist of  $25 \mu\text{m}$  thin, 80% Ni/20% Cr alloy wires. Anode and cathode wires are read out and are oriented perpendicularly to each other, permitting a 3-dimensional reconstruction of the tracks. With 96

active wires per plane, a total of 1152 channels have to be read out. We designed special readout electronics around only six LeCroy multihit TDC modules for one chamber, leading to a significant reduction of the cost of the whole system. The readout electronics is accompanied by a fast trigger system for an event selection based on the wire chamber plane multiplicity. The chamber has been operated with a 5% Methylal, 5% isobutane and 90% helium gas mixture. The anode readout electronics works within the desired specifications. Anode pulses after the amplification electronics of up to 1.5 V have been observed. Laboratory tests of the fast trigger system show its correct functioning, which has been confirmed in tests with the prototype wire chamber with radioactive sources. Both readout and fast trigger electronics were designed in a modular way and are easily scalable to bigger detection systems. The detector electronics as well as the beamline spin-flippers are controlled and monitored by an industrial PC based slow control system written in LabView. Data analysis is done with C++ object oriented analysis software based on the ROOT class collections from CERN.

First tests of the developed detection system will be performed on the neutron beam at the end of 2001. A first measurement of  $R$  with a precision of  $\Delta R = 0.01$  is planned for the beginning of 2003 and a final experiment, aiming at a precision of  $\Delta R = 0.005$  will be done at the end of 2003.

## Résumé

Un des plus grands succès de la cosmologie moderne est l'explication de l'abondance des éléments légers observée dans l'univers. Pour ce faire, la théorie se base sur un seul paramètre, le rapport entre la densité baryonique et de la densité d'entropie dans l'univers  $\eta$ . Selon Sakharov, une des conditions pour obtenir l'asymétrie baryonique observée est la violation de l'invariance sous parité combinée à la conjugaison de charge,  $CP$ . Le Modèle Standard de la physique des particules tiens compte de la violation de  $CP$  observée dans les désintégrations de mésons  $K$  et  $B$  par l'intermédiaire de la matrice de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa. Cependant, l'intensité de l'effet mesuré est de 7 à 9 ordres de grandeurs trop faible pour expliquer l'asymétrie baryonique requise dans le modèle cosmologique. Ce fait constitue une forte motivation pour la recherche de nouveaux phénomènes physiques, au-delà du Modèle Standard, dans le domaine de la violation de  $CP$ .

En assumant la validité de la symétrie  $CPT$ ,  $T$  exprimant un renversement du temps, une violation de  $CP$  est équivalente à une violation de  $T$ . Déjà en 1957, Jackson, Treiman et Wyld ont publié un article démontrant la possibilité de vérifier l'invariance sous  $T$  dans la désintégration  $\beta$  de noyaux polarisés. Un des coefficients de corrélation violant  $T$  est le paramètre  $R$  qui quantifie la polarisation transversale des électrons  $\beta$  par rapport à leur impulsion et à la polarisation du noyau. Ce paramètre a été mesuré à plusieurs reprises dans des expériences étudiant la désintégration  $\beta$  de noyaux sélectionnés, la plus précise étant celle dédiée à l'investigation du  $^8\text{Li}$  faite par notre groupe en 1996. Cette thèse fait partie de l'expérience suivante ayant pour but la détermination de  $R$  dans la désintégration  $\beta$  du plus simple des noyaux, le neutron libre. Cette expérience nécessite une source intense de neutrons polarisés ainsi qu'un détecteur capable de mesurer la polarisation transversale des électrons  $\beta$ .

En 1999, nous avons installé une ligne de neutrons froids équipée d'un polarisateur à super-miroirs et de deux inverseurs à haute fréquence pour la polarisation du faisceau à la source de neutrons par spallation SINQ, au PSI à Villigen. La surface de la section du guide focalisant est de  $4 \times 15 \text{ cm}^2$  et la détermination de l'intensité du faisceau par la méthode d'irradiation de feuilles d'or a révélé un flux équivalent thermique, normalisé par rapport au courant du faisceau de protons incident sur la cible de la SINQ, de  $\phi_{\text{eq}} = (6.49 \pm 0.10) \cdot 10^{12} (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mA})^{-1}$ . La densité réelle moyenne est  $\rho_0 = (2.95 \pm 0.04) \cdot 10^9 (\text{m}^3 \cdot \text{mA})^{-1}$ . La divergence horizontale du faisceau est de  $0.80^\circ$ , la divergence verticale de  $0.65^\circ$ . La polarisation du faisceau a été déterminée à l'aide d'un polarimètre constitué de deux analyseurs à super-miroirs et de deux inverseurs de polarisation à haute fréquence. La polarisation moyenne au centre du faisceau, mesurée sur toute sa largeur, est approximativement  $P = 95\%$ , tandis que la moyenne prise sur toute la surface de la section du faisceau s'élève à  $P = (91.2 \pm 1.3) \%$ . Cependant, il faut tenir compte d'une possible baisse de la polarisation du faisceau due à un défaut localisé dans le champ magnétique de guidage pour le spin des neutrons auquel on essaiera de remédier lors de la pause d'hiver 2001/2002 de la SINQ.

Suite aux essais positifs d'un prototype d'une chambre à fils proportionnelle à échelle réduite pour la détection de trajectoires d'électrons résultant de la désintégration  $\beta$  des neutrons, un premier prototype d'une chambre à pleine échelle ayant pour dimensions  $605 \times 605 \text{ mm}^2$  a été réalisé. Le détecteur contient jusqu'à 6 cellules cathode-anode-cathode, l'anode et une cathode étant active, la deuxième cathode étant passive, permettant ainsi une reconstruction en trois dimensions de la trajectoire de l'électron. Toutes les électrodes sont équipées de fils de  $25 \mu\text{m}$  de diamètre et composés d'un alliage à 80% de Ni et à 20% de Cr. 96 canaux sont lus par électrode active, donnant lieu à la lecture de 1152 canaux pour une chambre à fils complète. Nous avons développé un système de lecture électronique basé six modules TDC 'multihit' de LeCroy par chambre. Ceci permet une réduction significative du coût total de l'installation. Le système de lecture est accompagné d'un système de déclenchement rapide du détecteur, dit trigger rapide, permettant une sélection des événements basée sur la multiplicité des électrodes activées. Les deux systèmes ont été réalisés d'une façon modulaire, permettant une adaptation facile à toute évolution du détecteur. Tous les systèmes électroniques ainsi que les inverseurs haute fréquence de la ligne de neutrons sont contrôlés et surveillés par l'intermédiaire d'un ordinateur type PC industriel et d'un logiciel programmé en LabView. L'analyse des données est faite par un logiciel écrit en C++, basé sur la collection de classes ROOT élaborée au CERN.

Les premiers essais avec le système de détection vont être réalisés sur la ligne de faisceau de neutrons à la fin de l'année 2001. Une première expérience ayant pour but la détermination de  $R$  avec une précision de  $\Delta R = 0.01$  est planifiée pour le début de 2003 et une expérience finale visant une précision de  $\Delta R = 0.005$  sera faite à la fin de 2003.