

DISS. ETH No. 22549

# Towards next generation fundamental precision measurements with muons

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCE of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Kim Siang Khaw

MSc, Physics, The University of Tokyo

born on 04.02.1984

citizen of  
Malaysia

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Klaus Kirch, examiner  
Prof. Dr. Christoph Grab, co-examiner

2015

---

## Abstract

Several previous fundamental precision measurements with muons ( $\mu^+$ ), such as that of the muonium (Mu) 1S-2S transition frequency and ground-state hyperfine splitting, were limited by the statistics and the beam quality, in terms of vacuum yield, low energy and long term stability. A Mu source with a larger flux can be achieved either by improving the  $\mu^+ \rightarrow \text{Mu}$  conversion rate or by improving the  $\mu^+$  beam (smaller phase space, low energy, high intensity). This thesis reports the ongoing efforts at ETH Zurich (ETHZ) and PSI towards a high yield cryogenic Mu source and a new, low energy, high brilliance positive  $\mu^+$  beam. The former is based on mesoporous silica materials while the latter is making use of a phase space compression of  $\mu^+$  stopping and drifting in a helium gas density gradient within suitable electric and magnetic fields.

The first observation of cryogenic Mu emission into vacuum following muon implantation in mesoporous thin silica films is reported. Based on a simple Geant4 Monte Carlo simulation, a yield of Mu into vacuum of  $F_{\text{Mu}}^v = 0.38(4)$  at 250 K and  $F_{\text{Mu}}^v = 0.20(4)$  at 100 K for 5 keV  $\mu^+$  implantation energy is extracted from the measurements. Based on the implantation energy dependence of the vacuum yield deduced from a quantum tunneling model, a second experiment was performed for implantation energies below 5 keV where higher Mu vacuum yields are expected. Due to an upgrade in the LE- $\mu$ SR apparatus at PSI, new full muon transport simulations had to be performed in order to understand the propagation of  $\mu^+$  beam at very low energy. Mu physics and energy losses in the carbon foil are implemented and validated using time-of-flight (TOF) measurements. The feasibility of Mu confinement is also demonstrated by using a SiN membrane as the  $\mu^+$  entrance window. These two achievements, high vacuum yield and confinement, represent important steps towards next generation Mu spectroscopy.

Research and development (R&D) of the new  $\mu^+$  beam compression scheme which is ongoing at ETHZ and PSI are very encouraging. The feasibility of the longitudinal compression stage was successfully demonstrated in 2011. This demonstration relies on the agreement between the experimental results and the simulation based on Geant4, after implementing  $\mu^+$  physics processes at low energy such as elastic collisions and charge exchange. A neutron radiography experiment has demonstrated the feasibility to sustain the necessary density gradient for the transverse compression stage. A gas density gradient concept was implemented into Geant4 simulations. With this, the simulated time spectra and the experimental data can be compared when data will be available. An engineering run towards the test of transverse compression has been done in Dec 2014. The realization of this beam line will enable one to produce a micro-beam of muons and it will have many applications, especially to the  $\mu$ SR and precision physics community.

---

## Zusammenfassung

Mehrere bisherige fundamentale Präzisionsexperimente mit Myonen ( $\mu^+$ ), wie die Messungen der Myonium (Mu) 1S-2S Übergangsfrequenz und die Hyperfeinstrukturaufspaltung, waren limitiert durch Statistik und Strahlqualität bezüglich Vakuumausbeute, Langzeitstabilität und niedrigen Energien. Eine Mu-Quelle mit höherer Intensität kann entweder durch Verbesserung der  $\mu^+ \rightarrow \text{Mu}$  Umwandlungsrate, oder durch Verbesserung des  $\mu^+$  Strahls (kleinerer Phasenraum, niedrige Energie, hohe Intensität) erreicht werden. In dieser Arbeit wird von den fortlaufenden Bemühungen der ETH Zürich (ETHZ) und des PSI berichtet, welche auf eine kryogene Mu-Quelle mit hohem Ertrag und einen neuen, niederenergetischen  $\mu^+$  Strahl mit hoher Brillanz abzielen. Ersteres wird mittels mesoporösen Silica Materialien erreicht, und letzteres mittels einer Phasenraumkompression der  $\mu^+$ , welche in einem Helium Gas mit einem Dichtegradienten gestoppt werden und durch entsprechende elektrische und magnetische Felder driften.

Es wird von der erstmaligen Beobachtung kryogener Myonium-Emission ins Vakuum berichtet, der Myon-Implantation in mesoporöse, dünne Silica-Schichten vorangeht. Anhand einer einfachen GEANT4-Monte-Carlo-Simulation erhält man eine Ausbeute von Myonium ins Vakuum von  $F_{Mu}^v = 0.38(4)$  bei 250 K und  $F_{Mu}^v = 0.20(4)$  bei 100 K für 5 keV Implantationsenergie. Basierend auf der Abhängigkeit der Vakuumausbeute von der Implantationsenergie wurde ein zweites Experiment mit Implantationsenergien kleiner als 5 keV durchgeführt, bei welchen eine höhere Vakuumausbeute erwartet wird. Aufgrund einer Verbesserung in der LE- $\mu$ SR Apparatur am PSI musste eine neue, komplette Transportsimulation durchgeführt werden, um die Propagation des  $\mu^+$  Strahls bei niedrigen Energien zu verstehen. Die Physik und Energieverluste von Mu in Kohlenstofffolien wurden implementiert und mittels Time-of-Flight (TOF) Messungen validiert. Die Machbarkeit von Mu-Confinement wurde ebenfalls gezeigt indem eine SiN-Membran als  $\mu^+$  Eintrittsfenster benutzt wurde. Diese zwei Errungenschaften, hoher Vakuumertrag und Confinement, sind wichtige Schritte auf dem Weg zu Mu-Spektroskopie der nächsten Generation.

Die Forschung und Entwicklung (R&D) für das neue  $\mu^+$  Strahlkompressions-Projekt, welches an der ETHZ und am PSI stattfinden, ist vielversprechend. Die Machbarkeit der longitudinalen Kompressionsstrecke wurde erfolgreich in 2011 demonstriert. Diese Demonstration stützt sich auf die Übereinstimmung zwischen den experimentellen Resultaten und Simulationen basierend auf GEANT4, nachdem die physikalischen Prozesse bei niedrigen Energien für  $\mu^+$ , wie elastische Stöße und Charge Exchange, implementiert wurden. Durch ein Radiographie-Experiment mit Neutronen konnte die Umsetzbarkeit, den für die transversale Kompression erforderlichen Dichtegradienten aufrecht zu erhalten, gezeigt werden. Ein Konzept für den Dichtegradienten im Gas wurde in

---

GEANT4-Simulationen eingebaut. Mit diesem können simulierte Spektren und experimentelle Daten verglichen werden. Ein “Engineering-Run” in Richtung transversale Kompression wurde im Dezember 2014 durchgeführt. Die Umsetzung dieser Strahllinie wird ein  $\mu^+$  Micro-Beam ermöglichen, welcher viele Anwendungen haben wird, speziell in der  $\mu$ SR und Teilchen- und Atomphysik.