

Diss. ETH No. 14096

Investigation of the long-lived metastable 2S state in muonic hydrogen

A dissertation submitted to the

EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE
ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Randolf Pohl

Dipl.-Phys. TU München
born on December 30th, 1970
in Munich, Bavaria, Germany.

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. Hofer, examiner
Prof. Dr. L. Schaller, coexaminer
Dr. F. Kottmann, coexaminer

Zürich 2001

Zusammenfassung

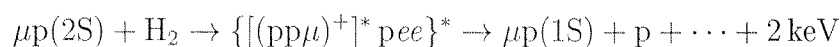
Die Existenz von langlebigen myonischen Wasserstoffatomen im metastabilen 2S Zustand ($\mu\text{p}(2\text{S})$) ist eine wichtige Voraussetzung für das am Paul Scherrer Institut geplante Experiment zur Bestimmung der Lamb Verschiebung (Energiedifferenz zwischen 2S und 2P Zustand) in myonischem Wasserstoff. Aus der Bestimmung der Lamb Verschiebung mittels Laserspektroskopie lässt sich der Ladungsradius des Protons genau bestimmen. Die vorliegende Arbeit liefert den ersten Beweis für die Existenz langlebiger $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome. Die gemessene Population, wie auch die Lebensdauer, sind ausreichend für die Durchführung des Laserexperiments.

Die Verteilung der kinetischen Energien myonischer Wasserstoffatome $\mu\text{p}(1\text{S})$ wurde in einer Flugzeitmessung für Wasserstoffdrücke zwischen 0.0625 und 16 hPa bestimmt. Mittels Monte Carlo Simulationen wurden die Daten auf kinetische Energien zwischen thermischer Energie und 1 keV untersucht. Die mittlere kinetische Energie steigt von 1.3 ± 0.8 eV bei 0.0625 hPa auf 6.0 ± 0.5 eV bei 16 hPa. Die Verteilungen der kinetischen Energien der $\mu\text{p}(1\text{S})$ Atome wurden zur Bestimmung der Population langlebiger $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome verwendet. Etwa 1% aller Myonen, die in Wasserstoffgas zwischen 0.0625 und 16 hPa gestoppt werden, bilden ein langlebiges $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atom. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Mittlere kinetische Energie $\langle E_{\mu\text{p}} \rangle$ der $\mu\text{p}(1\text{S})$ Atome und Anteil $R_{2\text{S}}$ der langlebigen $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome, normiert auf die Summe aller gebildeten μp Atome.

Druck (hPa)	$\langle E_{\mu\text{p}} \rangle$ (eV)	$R_{2\text{S}}$ (%)
0.0625	1.3 ± 0.8	0.85 ± 0.14
0.25	2.5 ± 0.5	0.92 ± 0.08
1.00	3.4 ± 0.4	1.10 ± 0.08
4.00	5.1 ± 0.4	1.03 ± 0.09
16.00	6.0 ± 0.5	1.16 ± 0.12

Eine hochenergetische Komponente von 1 keV wurde in den kinetischen Energieverteilungen der Messungen zwischen 4 und 64 hPa beobachtet. Diese wird als Signal von langlebigen $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atomen interpretiert, die in einem nichtstrahlenden Abregungsprozess hohe kinetische Energien erhalten:



Die Auswertung der bei 16 und 64 hPa gemessenen Zeitspektren ergibt eine dem Wasserstoffdruck umgekehrt proportionale Lebensdauer der $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome, so wie man es für den

genannten Prozess erwartet. Die kombinierte Analyse der Daten liefert für diesen Prozess eine Rate von $5.1_{-2.1}^{+2.4} \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} \times p_{\text{H}_2}$ [hPa]. Für die Population der langlebigen $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome ergeben sich aus dieser Untersuchung die Werte von $1.63_{-0.25}^{+0.81} \%$ bei 64 hPa, $1.07_{-0.21}^{+0.44} \%$ bei 16 hPa und $1.25_{-0.34}^{+0.75} \%$ bei 4 hPa. Die Resultate sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Werte sind in Übereinstimmung mit den oben genannten Resultaten der Analyse der $\mu\text{p}(1\text{S})$ Atome.

Tabelle 2: Lebensdauer $\tau_{2\text{S}}$ der $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome aus der unabhängigen Analyse der bei 64 und 16 hPa gemessenen Daten, sowie die in der kombinierten Analyse aller Daten erhaltenen Werte für den Anteil $R_{2\text{S}}$ der langlebigen $\mu\text{p}(2\text{S})$ Atome.

Druck (hPa)	$\tau_{2\text{S}}$ (ns)	$R_{2\text{S}}$ (%)
64	$30.4_{-7.8}^{+23.1}$	$1.63_{-0.25}^{+0.81}$
16	124_{-54}^{+542}	$1.07_{-0.21}^{+0.44}$
4	–	$1.25_{-0.34}^{+0.75}$

Abstract

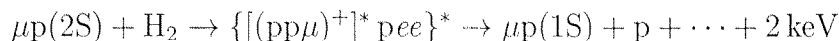
The existence of long-lived muonic hydrogen atoms in the metastable 2S state is a necessary requirement for the experiment to measure the Lamb shift (energy difference between the 2S state and the 2P state) in muonic hydrogen, which is currently under construction at PSI. The determination of the Lamb shift using a laser resonance technique will result in an accurate value for the charge radius of the proton. The present work is the first direct observation of long-lived $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms. Both the population and the lifetime are sufficient for the realisation of the laser experiment.

Kinetic energy distributions of muonic hydrogen atoms $\mu\text{p}(1\text{S})$ have been obtained by means of a time-of-flight technique for hydrogen gas pressures between 0.0625 and 16 hPa. The data have been analyzed using Monte Carlo simulations for kinetic energies between thermal energies and 1 keV. The average kinetic energy increases from 1.3 ± 0.8 eV at 0.0625 hPa to 6.0 ± 0.5 eV at 16 hPa. The kinetic energy distributions of $\mu\text{p}(1\text{S})$ atoms have been used to determine the population of long-lived metastable $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms. About 1% of all muons stopped in gaseous H_2 of pressures between 0.0625 and 16 hPa form a long-lived $\mu\text{p}(2\text{S})$ atom.

Table 1: Average kinetic energy $\langle E_{\mu\text{p}} \rangle$ of the $\mu\text{p}(1\text{S})$ atoms and fraction $R_{2\text{S}}$ of long-lived $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms, normalized to the total number of formed μp atoms.

pressure (hPa)	$\langle E_{\mu\text{p}} \rangle$ (eV)	$R_{2\text{S}}$ (%)
0.0625	1.3 ± 0.8	0.85 ± 0.14
0.25	2.5 ± 0.5	0.92 ± 0.08
1.00	3.4 ± 0.4	1.10 ± 0.08
4.00	5.1 ± 0.4	1.03 ± 0.09
16.00	6.0 ± 0.5	1.16 ± 0.12

A high energy component of ~ 1 keV has been observed in data taken at pressures between 4 and 64 hPa. It is interpreted as the signature of long-lived $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms, which are quenched in a non-radiative process leading to the observed high energy:



The analysis of the time spectra gives a lifetime of the $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms which scales as the inverse of the gas pressure. This is the behavior expected for the abovementioned process. The combined analysis of the data results in a quenching rate of $5.1_{-2.1}^{+2.4} \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} \times p_{\text{H}_2} [\text{hPa}]$.

The long-lived $\mu\text{p}(2\text{S})$ population deduced from this analysis is $1.63^{+0.81}_{-0.25}\%$ at 64 hPa, $1.07^{+0.44}_{-0.21}\%$ at 16 hPa, and $1.25^{+0.75}_{-0.34}\%$ at 4 hPa. The results, which are in agreement with the values from the investigation of the $\mu\text{p}(1\text{S})$ atoms mentioned above, are summarized in Table 2.

Table 2: Lifetime $\tau_{2\text{S}}$ of the $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms from the independent analysis of the data measured at 64 and 16 hPa, and the values for the fraction of long-lived $\mu\text{p}(2\text{S})$ atoms, obtained from the combined analysis of all data between 4 and 64 hPa.

pressure (hPa)	$\tau_{2\text{S}}$ (ns)	$R_{2\text{S}}$ (%)
64	$30.4^{+23.1}_{-7.8}$	$1.63^{+0.81}_{-0.25}$
16	124^{+542}_{-54}	$1.07^{+0.44}_{-0.21}$
4	–	$1.25^{+0.75}_{-0.34}$