

Title	Study for muonic atom formation and the following muon cascade process : Muon capture experiment for low pressure gases and Development of charge separation system after muonic atom formation
Author(s)	吉田, 剛
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/61484">https://doi.org/10.18910/61484</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 吉 田 剛 )

## 論文題名

Study for muonic atom formation and the following muon cascade process - Muon capture experiment for low pressure gases and Development of charge separation system after muonic atom formation -  
 ミュオン原子形成とそれに伴うミュオンカスケード過程に関する研究 -低圧気体でのミュオン捕獲実験およびミュオン原子形成後の電荷選別システムの開発-

## 論文内容の要旨

## 【緒言】

ミュオンは正または負の電荷を持つ、寿命2.2  $\mu\text{s}$ 、質量105.6 MeV/c<sup>2</sup>(電子の206.7倍)の素粒子である。負電荷のミュオン(ミュオン)は軌道電子のように原子核の周りに軌道を形成する。このように、電子、原子核の他にミュオンを構成要素に持つ原子系をミュオン原子と呼ぶ。ミュオンが形成する軌道は、ミュオンの質量ゆえに電子のおよそ200分の1と非常に小さいにもかかわらず、ミュオン原子形成の初期過程では、捕獲されるミュオンと軌道電子が相互作用をする。興味深い現象として、分子へのミュオン捕獲時におけるミュオン原子形成過程の変化が知られているが、ミュオン原子形成初期過程における電子との相互作用やミュオンが取りうる準位の詳細は未だ明らかになっていない。

本論文ではこれまで殆ど実験例のない、形成後のミュオン原子を孤立系と見なせる希薄試料条件においてミュオン照射実験を実施し、ミュオン原子が形成後に放出する特性X線を詳細に解析することで、ミュオン原子形成の初期過程におけるミュオンと電子の相互作用の解明を行った。またミュオン原子が形成初期にどのような状態に存在しているのかについて明らかにするために、形成後のミュオン原子イオン観測を目指し、その第一歩として、TOF型質量分析計の原理を用いたミュオン原子イオンの電荷選別システムを開発した。

## 【低圧気体でのミュオン捕獲実験】

本論文では電子構造の単純な軽元素から成る分子(CO, CO<sub>2</sub>, COS, CS<sub>2</sub>)に着目し、1気圧以下の低圧条件でミュオン捕獲実験を行った。このように希薄な試料にミュオンを停止させる試みは、本論文独自である。試料構成原子がミュオンを捕獲することで形成したミュオン原子から放出されるミュオン特性X線をゲルマニウム半導体検出器で測定、詳細な解析を行い、各構成原子へのミュオン捕獲率、ミュオン捕獲初期の量子状態(主量子数、角運動量量子数等)を決定した。また、水素を含有する場合にのみ起こるミュオン転移と呼ばれる特殊なミュオン原子形成過程についても同様の検討を行った。

本論文の成果として、COのC原子へ捕獲されたミュオンは、O原子との相対的な捕獲数が0.753±0.021と、CO<sub>2</sub>: 0.549±0.023, COS: 0.513±0.015 に比べ30%以上も大きく、また、シミュレーションにより、捕獲初期にCO<sub>2</sub>やCOSよりも大きな角運動量量子数分布をしていることが示された。一方、O原子に捕獲されたミュオンの初期角運動量量子数分布はCO, CO<sub>2</sub>, COSともに同じ傾向を示した。これらの結果を総合して検討することにより、COのC原子上の非共有電子対がミュオン捕獲率、初期角運動量量子数に及ぼす影響を初めて定量的に明らかにした。

## 【ミュオン原子形成後の電荷選別システムの開発】

ミュオン原子はその形成過程でミュオンのオーグメント過程により電子を失い多価の正イオンとなり、その後クーロン爆発により元の分子の構造を失うことが知られている。このことを利用し、本論文では固体薄膜へミュオンを照射し、表面近傍から真空中に放出されたミュオン原子を分離、選別するシステムの開発を行った。これまでに実施されたミュオン原子を扱う研究は、大多数が特性X線測定により行われており、本研究のようにミュオン原子そのものを単離しその性質を調べようとする試みは独創的である。

本論文では、観測対象としてフッ素原子に着目し、PTFE薄膜より生成するミュオンフッ素原子イオンを静電場で加速、ビームとして取り出す装置を開発した。形成後のミュオンフッ素原子の価数は、 $m/z$ としてTOFスペクトルに現れる。開発した装置の性能評価と最適化は、レーザーアブレーションにより行った。結果、ミュオンの質量0.1 uを識別するのに必要な分解能:  $R=191$ を上回る $R=260$ を装置が有することが<sup>1</sup>H<sup>+</sup>ピークのFWHMより示された。J-PARCにてミュオンビームを用いた予備実験を行い、照射に伴うバックグラウンドの評価も行った。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 吉田 剛 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	篠原 厚
	副 査	教授	岡田美智雄
	副 査	教授	奥村 光隆
	副 査	主任研究員	東 俊行

## 論文審査の結果の要旨

ミュオンは正または負の電荷を持つ、寿命 2.2  $\mu\text{s}$ 、質量 105.6 MeV/c<sup>2</sup>(電子の 206.7 倍)の素粒子である。負電荷のミュオン(ミュオン)は軌道電子のように原子核の周りに軌道を形成する。このように、電子、原子核の他にミュオンを構成要素に持つ原子系をミュオン原子と呼ぶ。興味深い現象として、分子へのミュオン捕獲時におけるミュオン原子形成過程の変化が知られているが、ミュオン原子形成初期過程における電子との相互作用やミュオンが取りうる準位の詳細は未だ明らかになっていない。

本論文ではこれまで殆ど実験例のない、形成後のミュオン原子を孤立系と見なせる希薄試料条件においてミュオン捕獲実験を行い、ミュオン原子が形成後に放出する特性 X 線を詳細に解析することで、ミュオン原子形成の初期過程におけるミュオンと電子の相互作用の解明を行った。また、ミュオン原子が形成初期にどのような状態に存在しているのかについて明らかにするために、形成後のミュオン原子イオン観測を目指し、その第一歩として、TOF 型質量分析計の原理を用いたミュオン原子イオンの電荷選別システムを開発した。

本論文では電子構造の単純な軽元素から成る分子(CO, CO<sub>2</sub>, COS, CS<sub>2</sub>)に着目し、1 気圧以下の低圧条件でミュオン捕獲実験を行った。このように希薄な試料にミュオンを停止させる試みは、本論文独自である。試料構成原子がミュオンを捕獲することで形成したミュオン原子から放出されるミュオン特性 X 線をゲルマニウム半導体検出器で測定、詳細な解析を行い、各構成原子へのミュオン捕獲率、ミュオン捕獲初期の量子状態(主量子数、角運動量量子数等)を決定した。また、水素を含有する場合にのみ起こるミュオン転移と呼ばれる特殊なミュオン原子形成過程についても同様の検討を行った。

本論文の成果として、CO の C 原子へ捕獲されたミュオンは、O 原子との相対的な捕獲数が 0.753 $\pm$ 0.021 と、CO<sub>2</sub>: 0.549 $\pm$ 0.023、COS: 0.513 $\pm$ 0.015 に比べ 30%以上も大きく、また、シミュレーションにより、捕獲初期に CO<sub>2</sub> や COS よりも大きな角運動量量子数分布をしていることが示された。一方、O 原子に捕獲されたミュオンの初期角運動量量子数分布は CO, CO<sub>2</sub>, COS とともに同じ傾向を示した。これらの結果を総合して検討することにより、CO の C 原子上の非共有電子対がミュオン捕獲率、初期角運動量量子数に及ぼす影響を初めて定量的に明らかにした。

ミュオン原子はその形成過程でミュオンのオーグジュ過程により電子を失い多価の正イオンとなり、その後クーロン爆発により元の分子の構造を失うことが知られている。このことを利用し、本論文では固体薄膜へミュオンを照射し、表面近傍から真空中に放出されたミュオン原子を分離、選別するシステムの開発を行った。これまでに実施されたミュオン原子を扱う研究は、大多数が特性 X 線測定により行われており、本研究のようにミュオン原子そのものを単離しその性質を調べようとする試みは独創的である。

本論文では、観測対象としてフッ素原子に着目し、PTFE 薄膜より生成するミュオンフッ素原子イオンを静電場で加速、ビームとして取り出す装置を開発した。形成後のミュオンフッ素原子の価数は、 $m/z$ として TOF スペクトルに現れる。開発した装置の性能評価と最適化は、レーザーアブレーションにより行った。結果、ミュオンの質量 0.1 u を識別するのに必要な分解能:  $R=191$  を上回る  $R=260$  を装置が有することが <sup>1</sup>H<sup>+</sup>ピークの FWHM より示された。J-PARC にてミュオンビームを用いた予備実験を行い、照射に伴うバックグラウンドの評価も行った。結果として、方法論(装置)はほぼ所期の製造を達成し、今後のミュオン実験へ有意な指針を与えた。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認める。