

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月23日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17546

研究課題名(和文) 移動管法による低エネルギーミュオン衝突の研究

研究課題名(英文) Study of low energy muon collision with a drift tube method

研究代表者

的場 史朗(Matoba, Shiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別助教

研究者番号：80535782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動管法を用いて気相中のミュオン移動度測定を行うことで、ミュオン-中性気体分子間の熱エネルギー領域における運動量移行断面積を導出することや、量子力学的散乱現象に起因する断面積の振動構造を検証することが目的である。

移動管内の緩衝気体中でミュオンから崩壊した高速陽電子を検出する軌跡検出器付き移動管を製作し、J-PARC物質生命科学実験施設ミュオンSラインにて1気圧ヘリウム気体中における正ミュオン停止位置分布測定を行い、運動量移行断面積を導出した。その結果、室温領域のヘリウム気体中における衝突現象ではミュオンは水素の同位体と見なしても差し支えないことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は以下の通りである。

1、緩衝気体によるミュオン減速と崩壊陽電子軌跡検出器を組み合わせることにより、レーザー等の大掛かりな装置を用いずともmeV領域のミュオン原子物理学研究が可能であることを示した。2、熱エネルギー領域の気体中での正ミュオンの振る舞いについて、室温では水素同位体と見なしても差し支えない事が示唆された。環境中のミュオンの挙動について情報を与えるものであり、詳細な第一原理計算による検証が待たれる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to derive the momentum transfer cross sections between muon-neutral gas molecules in the thermal energy region by performing muon mobility measurements in a gas using a drift tube method. We fabricated a drift tube with a trajectory detector that detects high-speed positrons that muon decays in the gas.

The momentum transfer cross sections were derived by measuring the positive muon stop position distribution in helium gas at room temperature and 1 atmosphere pressure at the Muon S-line at the J-PARC Materials and Life Science Experiment Facility. It has been suggested that a muon can be regarded as a hydrogen isotope in collision phenomena in helium gas at room temperature.

研究分野：放射線物理学

キーワード：ミュオン 陽電子 軌跡検出器 移動度 移動管 運動量移行断面積

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ミュオン弾性散乱断面積データの欠如

ミュオン利用研究は核融合( $\mu$ CF)やミュオンスピン回転( $\mu$ SR)等多岐に渡っている。上記のような実験系におけるミュオン付着原子分子の量子状態については、第一原理計算による電子状態の計算結果と実験結果と照らし合わせて間接的に決定していた。ミュオンを伴う第一原理計算には量子ゆらぎの効果も導入する必要がある[1]、未だ発達途上の分野である。この第一原理計算の検証のためには、ミュオンと標的分子との結合エネルギーに対応する低エネルギー領域における衝突断面積の基礎データが不可欠である。特に 1 eV 以下の熱エネルギー領域における弾性散乱の断面積やポテンシャルエネルギー曲面の情報は環境中でのミュオンの振る舞いを考察する上で非常に重要であるが、このエネルギー領域における衝突実験は技術的に困難であるために、孤立系での二体間相互作用、特に弾性散乱についての実験的報告は乏しいのが現状であった。

### 2. 研究の目的

我々はこれまでに移動管法を用いて、イオンと気体分子衝突における弾性散乱の運動量移行断面積測定を行い、熱エネルギー領域における衝突ダイナミクスについて研究してきた。この移動管法をミュオン衝突実験に適用する事で、ビーム法では不可能な 1 eV 以下のミュオン-気体分子相互作用の情報が得られるのではないかと提案するのが本研究である。

### 3. 研究の方法

気体中を電場の方向に移動する荷電粒子の移動速度は、移動管内部に印可された均一電場  $E$  と緩衝気体の数密度  $N$  の比  $E/N$  に比例し、その比例係数を移動度と呼ぶ。移動度は荷電粒子と気体分子の衝突における運動量移行断面積の逆数であり、電場や圧力を変化させることで断面積の衝突エネルギー依存性の情報が得られる。真空中におけるミュオンの寿命は約 2.2  $\mu$ s と短く、低エネルギー領域では輸送中に消失してしまう困難のために、従来の移動管法をミュオン移動度測定に用いることは不可能であった。そこで、本研究では移動管法に崩壊陽電子の軌跡測定装置を組み合わせることによってミュオン移動度の測定を行う。移動管内部でのミュオン崩壊の位置を特定し、その位置を崩壊までの時間の関数で表すことで気体中のミュオン移動度を決定する。

本研究で開発を行う軌跡検出器付き移動管の概略図を図 1 に示す。J-PARC MLF ミュオンビームラインから生成される正または負ミュオンは、アルミ板 (2.7 MeV ミュオンの場合は厚さ 0.18 mm 程度) を透過して 10-100 keV 程度に減速する。減速したミュオンは移動管に入射して緩衝気体である He ( $\sim 1$  気圧) との衝突を繰り返すことで数 cm 程度飛行したのち熱化する。移動管内部に印可された均一電場 ( $\sim 1$  kV/cm) によって、ミュオンは移動管の後方に向かって移動する。電場による加速と衝突による減速が釣り合うため、この移動速度はマクロなスケールで見ると一定と見なせる。熱化したミュオンは数 cm 程度移動したのちに寿命 2.2  $\mu$ s で平均運動エネルギー約 35 MeV の陽電子 (負ミュオンの場合は電子) に崩壊する。崩壊陽電子は移動管外部を円筒状に囲むように設置された一層あたり 144 本で構成された二層の 1 mm 角シンチレーションファイバーを貫通する。ファイバーからの発光をマルチピクセルアバランシェフォトダイオード (MPPC) で検出する。MPPC で電気パルスに変換された信号は、KEK が開発した検出器システム KALLIOPE (KEK Advanced Linear and Logic board. Integrated Optical detector for Position and Electrons, [2]) に取り込まれる。プリアンプ、ディスクリミネーター、時間デジタル変換器、メモリが基板上に配置された電子回路である KALLIOPE からの時間情報を含むリストデータはデータ収集サーバーに蓄積される。内外のファイバー間で適切なコインシデンスをとることで陽電子の飛行方向が決定され、崩壊位置の移動管中心軸への射影図が得られる。移動管内のミュオン速度分布は正規分布として近似できるので、軸上射影から崩壊位置を解析可能である。崩壊位置を時間の関数で表すことで、ミュオンの移動管内部での移動速度が求められ、移動度が導出される。

2018 年 2 月に J-PARC MLF ミュオン S1 ビームラインにて実験が行われた。まずは収量の多い正ミュオンを用いて軌跡検出器付き移動管が正常に動作するかを確かめた。ミュオン生成標的に照射する陽子ビームは 25Hz のシングルパルスモードであり、ビームパワーは 500 kW であった。図 2 に示す写真のように、S1 ビームライン末端の  $\mu$ SR 分光器 (本実験では使用せず) の後方に軌跡検出器付き移動管が設置された。S1 ミュオンラインから出射された運動エネルギー 2.7 MeV の正ミュオンは、 $\mu$ SR 分光器内

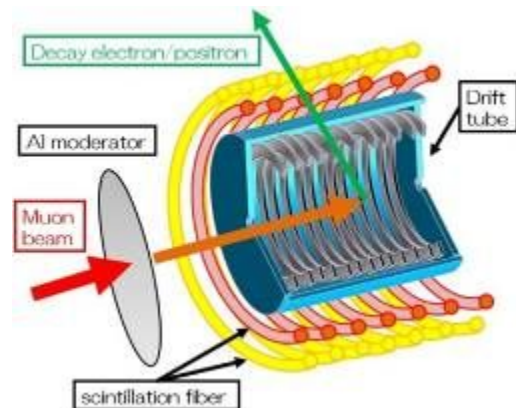


図 1.: シンチレーションファイバー付き移動管の概念図。

に本実験用に設置した内径 35 mm の真空ダクト内を通り、厚さ 0.18 mm のアルミニウム箔を透過して、温度 295 K、圧力 101.5 kPa のヘリウム気体で満たされた内径 308 mm、奥行き 800 mm の移動管に入射する。気体温度は、真空層壁面に接触しないように設置された K 型熱電対で測定される。圧力はキャパシタンスモノクロメーターで測定される。内層のシンチレーションファイバーは外径 320 mm の移動管真空槽に巻き付くように設置され、外層シンチレーションファイバーは中心から直径 520 mm の位置に半円筒状に設置されている。ファイバーのビーム軸方向の位置は可変であり、今回は図 3 で示されるモンテカルロ計算コード PHITS[3]を用いた軌道計算の結果に従い、移動管のビーム入射部先端から 182 mm 後方に設置した。移動管真空槽は前後のフランジ部以外は 4mm 厚のアルミニウム板で構成されているため、高速陽電子の散乱角度は概ね 3 度以下程度に抑えられている。ファイバー全体及び MPPC 基板は遮光塗料で遮光されているが、機器全体を遮光布で覆うことにより、外部光源によるノイズは無視できる程度に低減されている。

#### 4. 研究成果

図 4 は、ガードリングに電場を印可せずに測定された外周及び内周のシンチレーションファイバーにおける全信号の積算値を示している。全信号の計数率は 1000 個/秒程度であり、パルスあたりの 1ch の計数率は約 0.14/pulse となり数え落しは殆ど無い。内層シンチレーションファイバーの方が外層よりも信号強度は小さい。これはビームライン上流で生成した崩壊陽電子が移動管真空槽のステンレスフランジによって遮蔽されたためと考えられる。図 5 は、ビーム軸に垂直方向に位置する内外層シンチレーションファイバー間(例えば ch1 と ch160、ch2 と ch161 等の組み合わせ)で同時に信号を計測した際の、外層のシグナル計測時刻を原点として内層計測時刻の時間差分布を示している。内外層間の計測時間差分布は、同一陽電子によって内層と外層ファイバー内で生成された光子群がそれぞれのファイバー端の MPPC に到達するまでの内外層の時間差 (<4.4 ns)、シンチレーションファイバーの素材であるポリスチレンの発光寿命(2.8 ns)、MPPC 増幅率の変動に由来するプリアンプ増幅後のパルス立ち上がり時間の変動幅 (<5 ns)、内外層間 10 cm の陽電子飛行時間差(0.3 ns)によって決定される。平均時間差の実測値は 0.1 ns、時間差の半値全幅は約 12 ns であり上述の電気回路と幾何学的配置から求められる時間差分布とほぼ一致する。以上から、ビーム軸垂直方向に位置する一対の内外層ファイバー間のコインシデンスはピーク全域を採用して中心から前後 8 ns のシグナルを用いた。図 6 は、上記のデータ処理により導出されたミュオン停止位置分布である。停止位置分布は図 3 の PHITS による評価とおおむね一致しており、崩壊陽電子が軌跡検出器によって正しく測定できていることが確かめられた。今回の実験条件では移動管内部の均一電場の有無で停止位置分布に変化



図 2 : MLF S1 ミュオンビームラインにおける実験装置配置。

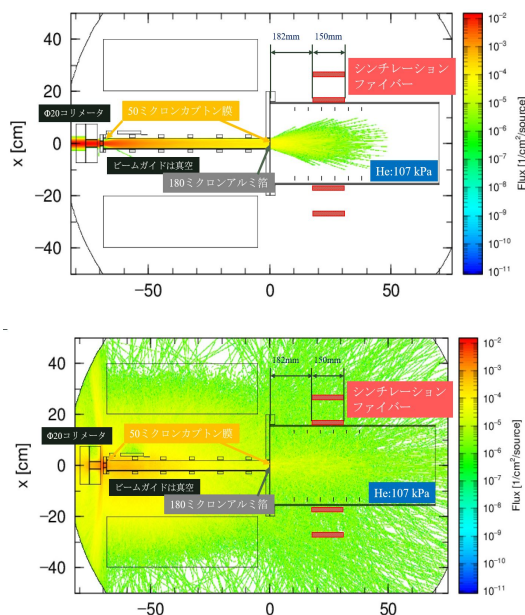


図 3 : PHITS を用いたミュオン(上図)及び崩壊陽電子(下図)のモンテカルロ軌道計算。2.7 MeV のミュオンビームが左方向から入射している。

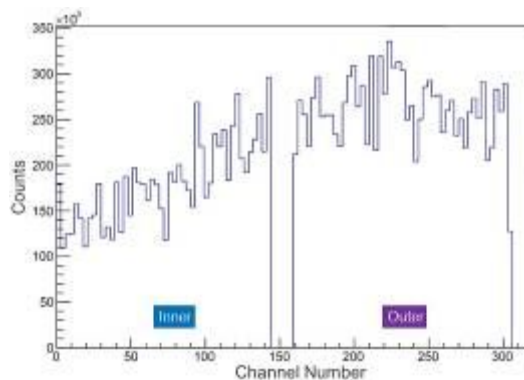


図 4 : シンチレーションファイバーからの信号強度分布。内層 (0 - 133 ch) 及び外層 (159-302 ch)

は見られなかったが、移動度の最大値に制限をかけることに成功した。移動管内の平均的な衝突エネルギーに相当する実効温度が 320 K においてヘリウム気体中における正ミュオンの換算移動度は、 $150 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  以下であることが分かった。これは、水素ヘリウム間のポテンシャルエネルギー曲面を用いた古典的運動量移行理論による計算値である  $85 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  を範囲に含んでおり、室温領域の衝突現象ではミュオンは水素の同位体と見なしても差し支えないことが示唆された。

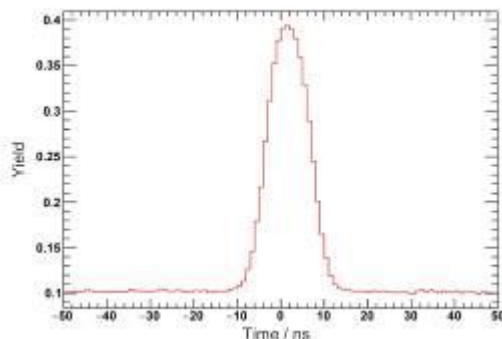


図5：外周層と内周層ファイバーシンチレーションからの信号時間差分布。

- [1] K. Yamada *et al.* J. Chem. Theor. Comput., 10, (2014), p2005.]  
 [2] Kojima *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 551 (2014) 012063 <http://openit.kek.jp/project/lists/mppc-tdc-sitcp/public/mppc-tdc-sitc>  
 [3] T. Sato *et al.*, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, (2013) 913-923K.

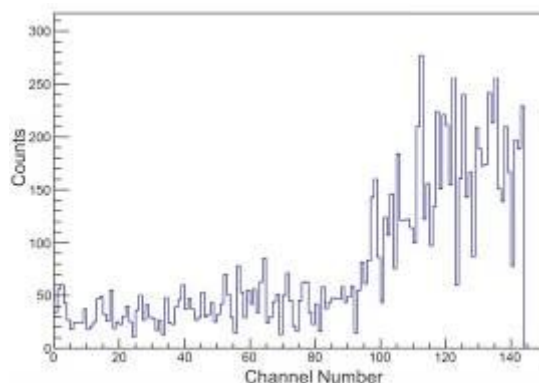


図6：ヘリウム気体で充填された移動管中におけるミュオン停止位置分布。

## 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- [1] “Development of Drift Tube for Study of a Quantum Mechanical Scattering of Muons in a Gas”  
 S. Matoba, L. Hua, N. Kawamura, and K. M. Kojima  
 KEK-MSL REPORT 2017, p85, (2018)

〔学会発表〕(計 7 件)

(国内学会)

- [1] ”気相中のミュオン移動度測定装置の開発”  
 的場 史朗, 小嶋 健児, 李 華, 河村 成肇  
 日本物理学会 2018 年秋季大会  
 同志社大学 2018 年 9 月 10 日

- [2] “気相中のミュオン移動度の測定”  
 的場 史朗  
 第 7 回イオン移動度研究会  
 立教大学 2018 年 4 月 14 日

- [3] ”ミュオン移動度測定に向けた装置開発”  
 的場 史朗, 小嶋 健児, 李 華, 河村 成肇  
 原子衝突学会第 42 回年会  
 上智大学 2017 年 9 月 8 日

[4] “ ミュオン移動度測定のための装置開発 ”

的場 史朗, 小嶋 健児, 河村 成肇

第6回イオン移動度研究会

奈良女子大学 2017年4月23日

[5] ” 希ガス中におけるミュオン移動度測定に向けた装置開発 ”

的場 史朗, 小嶋 健児, 河村 成肇

原子衝突学会第41回年会 一般講演

富山大学 2016年12月11日

(国際学会)

[6] ” Equipment development for muon mobility measurement in rare gases ”

Shiro Matoba, Kenji Kojima, Naritoshi Kawamura

XXX INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHOTONIC, ELECTRONIC AND ATOMIC COLLISIONS

QUEENSLAND, AUSTRALIA, 31 JULY, 2017

[7] “ Development of an apparatus for muon mobility measurement in rare gases ”

Shiro Matoba, Naritoshi Kawamura, and Kenji M. Kojima

XIX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics

Amaroo On Mandalay Resort, Magnetic Island, Queensland, Australia, 23 JUL. 2017

## 6 . 研究組織

本研究は個人研究である .

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。