

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21867

研究課題名(和文)低温金属薄膜中における正ミュオンの研究 - 高強度超低速ミュオンビーム生成を目指して

研究課題名(英文) Study of positive muons in metal films at low temperatures

研究代表者

長嶋 泰之 (Nagashima, Yasuyuki)

東京理科大学・理学部第二部物理学科・教授

研究者番号：60198322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：金属結晶中では伝導電子や陽電子は効率よく拡散する。これに対し正ミュオンを金属に入射した場合には金属中を効率よく拡散することはなく、格子間に束縛される。このように同じレプトンでも、陽電子と正ミュオンでは振る舞いが大きく異なる。その理由は何だろうか。低温の金属中ならばドブロイ波長は格子間隔よりも大きくなり、正ミュオンも粒子としてではなく、波として拡散していくのではないだろうか。本研究課題ではこの解明に挑んだ。

新型コロナウイルス感染症蔓延の影響で準備が遅れ気味であったが、2020年度までに実験の準備はほぼ完了した。2021年度のJPARCでのビームタイムで実験を行い、結果を出す予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、低温の金属中で正ミュオンが効率よく拡散するかどうか調べる。この課題は、金属中における荷電粒子の拡散の本質を突き止める研究である。同時に、低温の金属中で正ミュオンが拡散されることが本当なら、この現象は低速正ミュオンビームを得る方法に利用できるかもしれない。本研究課題は萌芽的な研究ではあるが、成功すれば基礎から応用まで、重要な結果をもたらすものである。

研究成果の概要(英文)：Conduction electrons and positrons diffuse efficiently in metal crystals. On the other hand, when positive muons are incident on metals, they do not diffuse efficiently and are bound between lattices. Although positive muons and positrons are both leptons, their behaviors differ greatly. What is the reason? In low-temperature metals, the de Broglie wavelength will be longer than the lattice spacing and positive muons may diffuse as waves rather than as particles. In this research project, we challenged this elucidation.

Although it seemed to be delayed due to the spread of the new coronavirus infection, preparations for the experiment were almost completed by 2020. We plan to conduct experiments at the beam time at JPARC in 2021 and produce results.

研究分野：量子ビーム

キーワード：正ミュオン 陽電子 電子 低温

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属結晶中では、伝導電子や陽電子は効率よく拡散することが知られている。例えば陽電子は、焼鈍によって格子欠陥を除去した金属結晶中では拡散する。もちろん陽電子は金属中の電子と対消滅し、その寿命は 100 ps 程度であるが、消滅までの拡散距離は 100 nm にもなる。数 keV のエネルギーで金属中に入射した陽電子の侵入距離は数 10 nm であるため、陽電子は拡散の過程で、高い確率で表面に戻る。多くの金属で、陽電子のバルク中におけるエネルギー準位は真空準位よりも高く、陽電子はその差(~ 数 eV)のエネルギーをもって表面から自発的に飛び出す。放射性同位元素から β^+ 崩壊で得られる陽電子は数 100 keV のエネルギーを有しているが、同様に焼鈍によって格子欠陥を除去した金属中に入射するとその一部が表面に戻り、エネルギーの揃った陽電子が再放出する。このような陽電子は、低速陽電子ビームとして表面物理、原子物理など様々な用途に利用されている。

これに対し正ミュオンを金属に入射した場合には、電子や陽電子のように金属中を効率よく拡散することはなく、格子間に束縛される。ただし入射ミュオンのエネルギーを調整して金属薄膜の入射と反対側の面近傍に止まるようにし、しかもこの薄膜(通常はタングステン)を 2000 に加熱しておけば、表面近傍の電子を伴ってミュオニウムとして熱エネルギーで放出する。このミュオニウムをレーザー解離することによって、超低速ミュオンビームが得られている。

2. 研究の目的

1 で述べたように、同じレプトンでも、陽電子と正ミュオンでは振る舞いが大きく異なる。その理由は何だろうか。本研究課題はこの解明に挑むことを目的とする。

陽電子と正ミュオンは、同じレプトンである。違いは質量と寿命である。陽電子は電子が存在しない環境では寿命は無限に長い、物質中では電子と対消滅して線になる。その寿命は、上述のとおり、金属中では 100 ps 程度である。これに対し、正ミュオンは 2.2 μ s の寿命で陽電子とニュートリノに崩壊する。これらの寿命は金属中における振る舞いを考える上では十分に長い。

陽電子とミュオンのもう一つの大きな違いは質量である。陽電子の質量は電子と同じ 9.11×10^{-31} kg である。ミュオンはその 200 倍の質量を持つ。質量の違いは、もちろん速度にも効くが、ドブロイ波長にも効いてくる。温度 T における陽電子のドブロイ波長は、 $6.2(300K/T)^{1/2}$ nm であり、常温では 6.2 nm、従って金属結晶の格子間隔よりもかなり長い。このことを理論物理の研究者であった Werner Brandt は " Positrons in solids are waves. " と表現している。中性原子ではドブロイ波長は格子間隔よりも短くなる。Brandt はこのことを " Thermal hydrogen and all other atoms always behave like heavy classical particles. " と表現している。ミュオンのドブロイ波長は $0.43(300K/T)^{1/2}$ nm であり、常温では 0.43 nm、従って金属結晶の格子間隔と同程度か、あるいはそれよりもやや短い。したがって正ミュオンも格子間隔に補足され、拡散する場合は熱的にホッピングするだけであり、拡散定数は陽電子と比べてはるかに小さくなる。

しかしながら低温の金属中では、ドブロイ波長は格子間隔よりも大きくなり、正ミュオンが粒子的ではなく、波として拡散していくことが期待できる。これまでに、正ミュオンの拡散は、超伝導によって大きくなるとの報告があったが、本研究は、単に低温の状態でもドブロイ波長が長くなるために、正ミュオンが金属中を高い効率で拡散するのではないだろうか、との考察に基づくものである。

仮にこの仮定が正しいとすれば、10 K 程度に冷却した金属中で、正ミュオンは自由に拡散するはずである。加速器で生成された正ミュオンビームを 10 K 程度のタングステン箔に入射すれば、正ミュオンは金属箔中を拡散し、高い確率で下流側の面に到達する。このようなミュオンが、ミュオニウムを形成して表面から飛び出していくことも期待できる。またもし仮に、正ミュオンのエネルギー準位が、陽電子のように真空準位よりも高ければ、ミュオンはそのまま自発的に飛び出し、超低速ミュオンビームを形成する。すなわち、容易に、しかも高い効率で超低速正ミュオンビームが得られることが期待できる。実現すれば、超低速ミュオンビームを利用する様々な研究の発展が期待できる。

本研究課題の目的は、このようなことが起こるかどうかを調べることである。

3. 研究の方法

本研究費で、以下のような性能を有する試料ホルダーを製作した。

- (1) タングステン薄膜試料を 2000 で焼鈍することが可能であること。この焼鈍は、薄膜中の格子欠陥を除去するために必要である。
- (2) 焼鈍した試料を、そのまま液体ヘリウムを用いて 10 K 以下まで冷却することが可能である

- こと。
- (3) 既存のミュオンターゲットチェンバーに取り付けて、ミュオンビームを入射して下流から放出されるミュオンやミュオニウムを検出することが可能であること。

以上のような性能を満たす試料ホルダーとして図1に示すような装置を製作した。さらに、ヘリウムを供給するためのトランスファチューブやマイクロチャンネルプレートなども購入した。本研究課題にはミュオンビームが必要である。このため、実験は高エネルギー加速器研究機構 JPARC 物質・生命科学実験施設(MLF)の共同利用で行うこととした。

4. 研究成果

新型コロナウイルス感染症蔓延のため実験準備が遅れ気味となり、また高エネルギー加速器研究機構 JPARC 物質・生命科学実験施設(MLF)の共同利用時間が削減されビームタイムが配分されなかったため、現時点ではミュオンビームを用いた実験には至っていない。しかしながら装置の準備はほぼ完了している。2021年度にはビームタイムを得て、成果を出すことができると考えている。

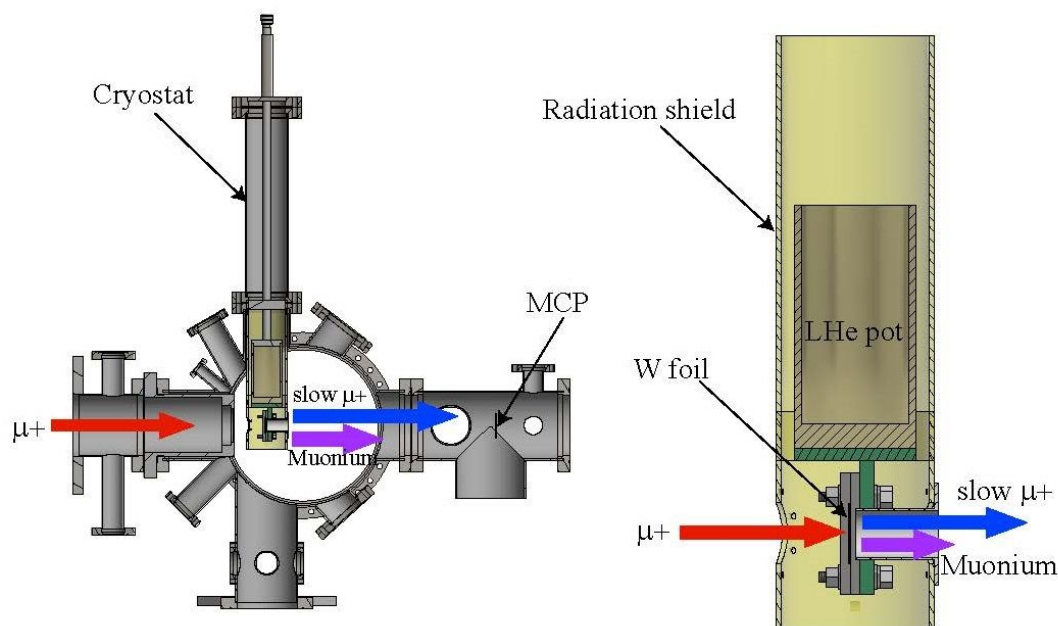


図1 製作した試料ホルダー。既存のターゲットチェンバーに取り付けた状態で、通電加熱による試料の焼鈍と液体ヘリウムによる冷却が可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永田祐吾、有留翔一、神田聡太郎、門野良典、下村浩一郎、長嶋泰之
2. 発表標題 極低温タングステンからの低速ミュオン生成実験
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	永田 祐吾 (Nagata Yugo) (30574115)	東京理科大学・理学部第二部物理学科・助教 (32660)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	立花 隆行 (Tachibana Takayuki) (90449306)	東京理科大学・理学部第二部・研究員 (32660)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------