

阪大 RCNP における陽子中空ビームによるミュオン生成方法の検討 SIMULATION STUDY OF MUON PRODUCTION USING PROTON HOLLOW BEAM AT RCNP

友野 大^{*,A,B)}, 百合 庸介^{C)}, 森田 泰之^{D)}, 福田 光宏^{A)}

Dai Tomono^{*,A,B)}, Yosuke Yuri^{B)}, Yasuyuki Morita^{C)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

^{B)} Institute of Molecular and Material Science, High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{D)} RIKEN, Nishina Center for Accelerator Based Science

Abstract

A muon beam has been provided for scientific, engineering and archeological analysis at the Research Center for Nuclear Physics (RCNP) with the continuous proton beam (1.1 μ A, 392 MeV). The notable feature of this beamline is that the muon beam is generated by a cylindrical target (20 mm in radius, 200 mm in length) covered with a large-acceptance superconducting solenoid magnet. Here, we discuss a new effective method to produce pion and muon near a surface of the cylindrical target using the proton hollow beam. Simulation results show that by injecting a proton beam at 19.5 mm from the center of the cylindrical target, the muon yield is about three times higher than that of the conventional method. We expect that the number of available muon beams will increase more efficiently for the μ SR, non-destructive elemental analysis, etc., in the next generation muon beamline.

1. はじめに

近年、ミュオンビームはミュオン自身の素粒子研究にとどまらず、ミュオンと原子核の捕獲反応や核融合・核分裂、ミュオン特性 X 線を利用した非破壊分析、この非破壊分析を利用した宇宙地球物理や考古学などの文理融合研究、ミュオンと原子のスピンの相互作用による物性研究や材料開発、ミュオン原子形成、宇宙線ミュオンを再現した人工ビームとしての用途など、さまざまな分野からその有用性が非常に注目されている。大阪大学核物理研究センター [1] ではリングサイクロトロンから供給されるエネルギー 392MeV、ビーム電流 1.1 μ A の陽子ビームを生成に用いた大立体角ミュオン源 MuSIC を建設してビーム供給を開始した。2017 年度よりユーザー実験を行い、前述した様々な分野の実験を実施している [2]。

一方、中空ビームに関する研究は百合らによって進められてきた [3,4]。多重極電磁石の非線形磁場によって均一強度分布等の多様なビーム強度分布を形成できることが研究されてきたが、特に 8 極電磁石を用いると、ビーム強度分布を中空化できるとともに、様々な断面形状に変換できることを見出した。また、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 (TIARA) において、AVF サイクロトロンから引き出された陽子 (10 MeV) および炭素イオン (15.8 MeV/n) のビームを 6 極および 8 極電磁石を各 2 台備えたビームラインに輸送して、ビーム分布の中空化の実験的検証に成功している。

そこで中空ビームのミュオン生成への応用を考える。10 MeV の低エネルギー陽子ビームではミュオン生成に必要なエネルギー閾値 ($2m_{\pi} \sim 290$ MeV、パイ中間子の質量のおよそ 2 倍) を超えないため、392 MeV 陽

子ビームの供給が可能な RCNP での生成可能性を探る必要がある。また、この中空ビームによるミュオン生成は、通常よく用いられる薄いミュオン生成標的ではなく、円柱状といった特殊な形状の標的でミュオン生成する大立体角ミュオン源との組み合わせに相性がよいと考えられる。そこで森田ら [5] はまず RCNP のミュオン源 MuSIC のある WSS ビームラインに 8 極電磁石を 2 台置くことを想定しシミュレーションによる検証を行い、392 MeV の高エネルギー陽子に関してもビーム輸送が可能であり、RCNP のミュオン源においてビームを中空化できることを示した。

これらの検討をもとに、本研究では中空化された陽子ビームを RCNP の特殊形状標的でのミュオン生成と組み合わせる。円柱形のグラフィット標的の中心部分に集中して陽子ビームを照射しているが、陽子ビームを標的の中心ではなくて縁にビームを集中させミュオンビームの高強度化、変極度の増大や電磁石との最適化を行うための検討を進めている。本論文では、すでにビーム生成を行なっている RCNP のミュオン源と組み合わせを想定して、ミュオンないしミュオンの親となるパイ中間子生成について議論し、本検討の結果であるミュオンの収量について示す。

2. ミュオンビームライン

今回の研究では、RCNP のミュオンビームライン MuSIC のビームラインの磁石構成を基に検討を行った。MuSIC では実験精度のさらなる向上を目指して、ビームの大強度化、ミュオンの偏極度の向上が課題となっており、その解決方法の一案としてこの新しい陽子ビームの照射方法が検討されている。ここでは特に MuSIC の超伝導ソレノイド電磁石と円柱状の標的の形がこの中空状ビームとの組み合わせの鍵となる [6,7]。

Figure1 は、RCNP に建設されたミュオンビームラインの配置図である。リングサイクロトロンで生成され

* tomono@rcnp.osaka-u.ac.jp

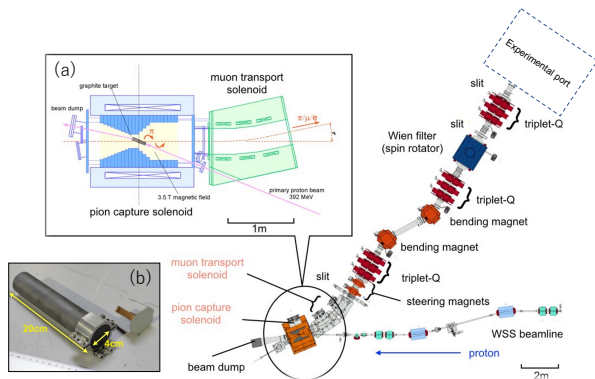


Figure 1: Schematic layout of the WSS and MuSIC beamlines at RCNP. The 392 MeV proton beam is delivered from the Ring Cyclotron accelerator via the WSS beamline. When two octupole magnets are inserted in the WSS beamline, the proton hollow beam can be formed at a muon generation target at the center of the MuSIC muon source. Inset (a) shows a cross-sectional view of the superconducting solenoid and the muon generation target. Inset (b) shows a photograph of the muon generation target made of graphite.

た陽子ビームはWSS ビームラインを通過してミュオン源 MuSIC に到達する。ここで生成されるパイ中間子やミュオンを大立体角ソレノイド電磁石 ($B=3.5\text{T}$) で収集、輸送ソレノイド電磁石 ($B=2\text{T}$) で下流に輸送する。途中で従来型の2極、4極電磁石を用いたビームラインに変換し、バックグラウンドとなる電子を除くためのWien Filter を通って実験ポートまで輸送してビーム照射実験を行っている。ミュオンは表面ミュオンと呼ばれる運動量 $p \sim 28\text{ MeV}/c$ から $100\text{ MeV}/c$ のミュオンまで輸送可能である。パイ中間子はビームライン途中でミュオンに崩壊するため、特に低エネルギービームの場合はほぼすべてがミュオンである。RCNP では標的中心に陽子ビームを入れる方法でのミュオン生成に成功しており、 $p = 50\text{--}60\text{ MeV}/c$ では正電荷ミュオンで $\sim 10^5$ 個/秒、負電荷ミュオンで $\sim 10^4$ 個/秒程度のミュオンビームが得られている。また図中 (a) に示すのがミュオン捕獲用ソレノイドの断面図である。ソレノイド中心付近に図中の写真 (b) に示すような円柱状のグラファイト標的が配置されており、この長手方向に陽子ビームを照射する。この両側や端から放出されたパイ中間子やミュオンをソレノイド磁場で集め下流側へ輸送する。

3. 陽子中空ビームによるミュオン生成シミュレーション

本研究では最下流ではなく、ミュオン生成後の複雑な挙動を示すソレノイド出口付近までのミュオン収量を最大化すべく、仮想検出器をミュオンソレノイド出口に置き、中空状ビームの形状や標的の形状を変化させることによってミュオン生成がどのように変化するかを調べた。特に、正電荷ミュオンを用いた物性測定手法 (μSR) で需要の大きい $p = 28\text{ MeV}/c$ 付近の偏極度の大きな表面ミュオンと、他の実験でよく

利用される $p = 40\text{--}60\text{ MeV}/c$ (正電荷、負電荷) ミュオンについて分ける。シミュレーションは Geant4 の物理プロセスをベースとしてビームライン電磁石中の粒子を一粒子ごとにシミュレートできる G4beamline [8] を用いた。ミュオンの場合はビーム密度が十分に低いため、空間電荷効果の考慮は必要ない。標的は円柱で半径 $r=20\text{ mm}$ 、長さ $L=200\text{ mm}$ であり、この長手方向に陽子ビームを入射させる。

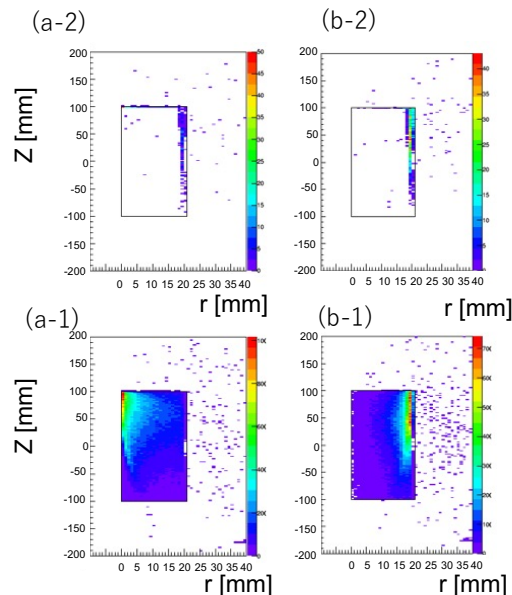


Figure 2: Simulation results of muon generation points in and around the graphite target. A hollow beam radius is (a-1) (a-2) $r = 0$ and (b-1) (b-2) $r = 19.5\text{ mm}$, respectively. (a-1) (b-1) indicate generation points of all muons. (a-2) (b-2) indicate generation points of muons that are detected at the virtual detector installed at the exit of the solenoid magnets.

Figure 2 に $30\text{ MeV}/c$ 以下の低エネルギーミュオン標的中でミュオン生成位置を示す。(a) では以前の方法と同様 $r = 0\text{ mm}$ の中心に入射した場合のミュオン生成位置分布、(b) では陽子ビームを中空化し、円筒標的の半径 $r=19.5\text{ mm}$ のところに5%の幅 (σ) をもった中空ビームを生成し、ミュオン標的に入射させたときのミュオン生成位置分布を示す。また、(a-1) (b-1) は生成したミュオン全体、(a-2) (b-2) は発生させたミュオンのうち、仮想検出器まで到達したミュオンが生成した位置分布を示す。これらより、生成されたパイ中間子は陽子の通過した経路に沿って発生するが、このうち仮想検出器に到達するのは、陽子の入射側に近い標的表面付近で生成したものがほとんどである。これはパイ中間子の二体崩壊でミュオンに崩壊しても、もともとパイ中間子の運動エネルギーがあまり大きくないと生成するミュオンの運動エネルギーも小さく標的外部まで出てこれないことを意味している。陽子の入射方向から 90° 方向、つまり円筒標的の側面方向に向かって走るパイ中間子の生成断面積は定性的には低エネルギー側で大きいことが知られているため、標的側面近くを陽子が通過してパイ中間子が生成され

れば、表面近くのミュオン生成量の増強につながる。この表面近くで止まったパイ中間子から生成される表面ミュオン（運動エネルギーでおよそ 4.1 MeV）の通過できる領域にパイ中間子を多く生成させる中空ビームが有利になると考えられる。

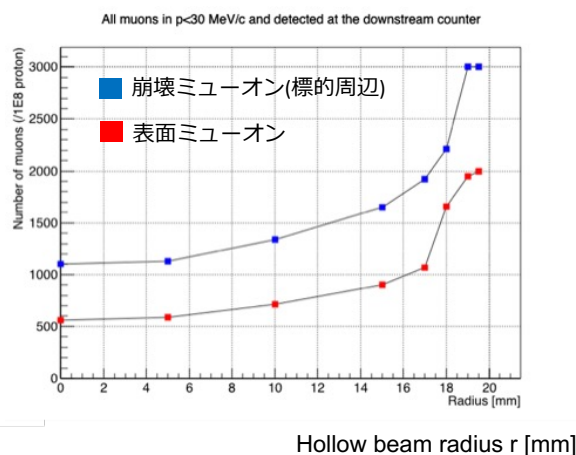


Figure 3: Hollow beam radius dependence of muon yields for surface muons (generated inside of the target, shown in a red square) and decay muons (generated outside of the target, shown in a blue square) when the generated muons is transported to the virtual detector downstream.

Figure 3 にミュオン収量の中空ビームの半径依存性を示す。ミュオンの収量は中空ビームで増やすことが可能であることがわかる。仮想標的まで到達したミュオンの数は、パイ中間子が止りやすくなる r に依存して大きくなるのがわかるが、標的周辺に飛び出していくパイ中間子の数も増える。得られるミュオンの総量はどちらも 3 倍ほど大きくなるのがわかる。ただし、スピン偏極度に関しては、偏極の大きい表面ミュオンに、標的外部までパイ中間子が飛び出し、そこで崩壊した偏極の小さなミュオン（崩壊ミュオン）が混ざるため、全体としての偏極度の議論はこれを考慮して行う必要がある。

4. まとめと展望

多重極電磁石で生成される中空化された陽子ビームを使ったミュオンの生成方法を検討した。この手法と相性が良い円柱標的と大立体角超伝導ソレノイド電磁石を用いた RCNP ミュオン源 MuSIC をモデルに、ミュオン生成のシミュレーションによる検討を行った。ミュオン収量は半径 20 mm 円柱標的の表面近く（半径 $r=19.5\text{mm}$ 付近）に陽子ビームを入射したときに最大化されることがわかった。現在、この方法以外にもミュオン生成方法を評価中であり、今後はこの標的自体の形状や大きさの変更、ミュオンやパイ中間子を収集するソレノイド電磁石等の形状の変更、標的材質やミュオンビームのパラメーターなどの依存性や最適化を合わせて行う予定である。また、スピンに関しては偏極度についての中空ビームの影響について詳細を評価する予定である。この結果をもとにデザインの最適化を行うことで、現状のミュオン源 MuSIC のアップグレードによるビーム増強や、将来的には次期大立体角ミュオン源に関する新たなミュオンビーム生成方法に関する知見が得られることが期待される。

参考文献

- [1] RCNP facility, <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/>.
- [2] D. Tomono *et al.*, "Construction of new DC muon beamline, MuSIC-RCNP, for muon applied science", PoS. **295** (2018) 111, "NuFact2017". doi:10.22323/1.295.0111
- [3] Y. Yuri *et al.*, "Formation of hollow ion beams of various shapes using multipole magnets", Progress of Theoretical and Experimental Physics(PTEP), **5**(2019) 053G01. doi:10.1093/ptep/ptz024
- [4] Y. Yuri *et al.*, "Demonstration of hollow beam formation using multipole magnets", Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), pp. 112-115.
- [5] Y. Morita *et al.*, "Development of hollow beam control method by AI", Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020), pp. 112-115.
- [6] M. Yoshida *et al.*, "Superconducting solenoid magnets for the MuSIC project", IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**,(2011)1752.
- [7] S. Cook *et al.*, "Delivering the world's most intense muon beam", Phys. Rev. Accel. Beams **20** (2017) 030101. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.20.030101
- [8] G4beamline homepage, <https://www.muonsinc.com/>