

μ 粒子スピン歳差運動の超精密測定のためのビーム入射技術開発

素粒子、原子核、宇宙物理学
およびその関連分野

研究者所属・職名 : 大学院理工学研究科・准教授

ふりがな いいぬま ひろみ

氏名 : 飯沼 裕美

主な採択課題 :

- [基盤研究\(A\) 「ミュオンg-2・EDMの同時測定に向けた、3次元螺旋ビーム入射の精密制御の確立」\(2019-2022\)](#)
- [基盤研究\(B\) 「ソレノイド型蓄積磁石への3次元らせん軌道によるビーム入射の実証試験」\(2014-2017\)](#)
- [若手研究\(B\) 「3次元らせん軌道ビーム入射のためのパルス状磁場発生装置の開発」\(2011-2013\)](#)

分野 : 素粒子実験、加速器ビーム実験

キーワード : g-2/EDM実験、3次元らせん軌道入射、強いX-Y結合、医療用MRI磁石技術応用

課題

●なぜこの研究をおこなったのか？(研究の背景・目的)

素粒子 μ 粒子の異常磁気能率(g-2)および電気双極子(EDM)を同時に超精密測定する実験の要素技術開発を担う。磁場中の μ 粒子スピン歳差運動はg-2からの寄与が主だが、過去の実験によるEDM上限値程度の有限値を仮定すると、スピン歳差運動の角速度ベクトルの向きを1mrad程度変える可能性がある。世界初のEDM成分の直接検出と、更なるg-2測定精度向上をもたらす、標準理論を超える物理探索に挑む。実験の中心技術「医療用MRIを応用した超電導磁石の蓄積リング」に入射した相対論的エネルギーの加速器 μ 粒子ビームの「蓄積軌道平面を0.01mradで安定制御」する手法の確立に取り組む。

●研究するにあたっての苦労や工夫(研究の手法)

医療用MRIレベルの磁束密度3T, 調整精度 ± 0.1 ppm以内の超精密磁石をビームラインに導入すること、しかも直径66.6cmの円軌道にほぼ光速の μ 粒子ビームをどうやって入射するか？前例のないビーム入射手法を、ゼロの状態から発案し、超電導磁石の磁場設計とビーム軌道設計を計算機シミュレーションにより取り組み、3次元らせんビーム入射手法を開発し、その原理実証を行うため、 μ 粒子の代わりに電子ビームを用いた1/3スケールのテストベンチを科研費サポートにより構築した。



図1 医療用MRIサイズの蓄積リングに μ 粒子を蓄積するイメージ

μ粒子スピン歳差運動の超精密測定のためのビーム入射技術開発

素粒子、原子核、宇宙物理学
およびその関連分野

研究成果

●どんな成果がでたか？どんな発見があったか？

成果1) 加速器ビームラインに設置すると超電導蓄積磁石の設計 (図2)
ビーム蓄積領域の磁場調整均一度を ± 0.1 ppm以内に抑えつつ、ビーム入射に適した磁場空間分布を実現するために、打ち切り特異値分解(tSVD)と3次元有限要素法による磁場解析を組み合わせた磁場設計を行い、実機製作に向けた仕様を決定した。また、3次元螺旋軌道入射の中心軌道の設計を完了した。

成果2) 3次元らせん軌道入射に必要な強いX-Y結合の決定と実証実験 (図3)
蓄積超電導磁石は軸対称なソレノイド磁場であり、入射ビームの位相空間は「強いX-Y結合」を必要とする。このため、3次元らせん軌道入射に適したビーム位相空間パラメータを見積もり、ビーム輸送区間に設置する回転4極磁石の仕様を決定した。

また、原理実証実験として、高エネ研加速器研究施設との共同研究により、電子銃を用いたテストベンチを構築した。その結果、適切なX-Y結合を与えたビームが蓄積磁石内部で設計通りのビーム形状を保つように制御が可能であることを確認した。

成果3) シールド機能付きステアリング磁石の設計と試作

静磁場中 (1.5T ~ 2T)に設置可能な銅コイルのみからなる磁石をtSVDを用いて設計し、試作機の製作、および磁場測定を行い、実機製作のための仕様を決定した。

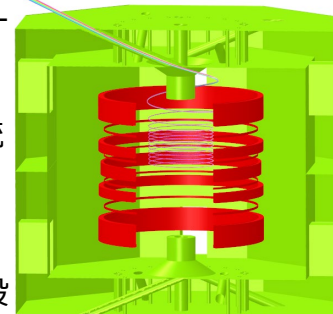


図2 蓄積超電導磁石

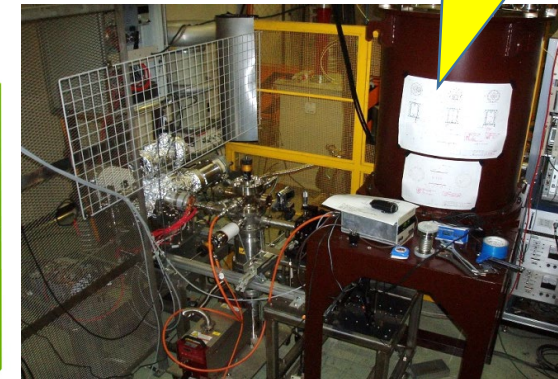


図3 ビーム入射実証実験テストベンチ

今後の展望

●今後の展望・期待される効果

J-PARC 物質生命科学実験施設のH-Line(μ粒子を用いた基礎物理実験用ビームライン)に、μ粒子スピン歳差運動の超精密測定実験施設の建設が開始している。上記の研究成果により、実験ビームライン建設に不可欠な装置の仕様は決定済みである。5年後の物理実験開始を目標に研究装置の製作・試運転作業に取り組む。μ粒子の異常磁気能率(g-2)と電気双極子(EDM)の同時測定を行い、標準理論を超える物理探索に挑む。図4にEDM上限値から期待される信号予想例を示す。

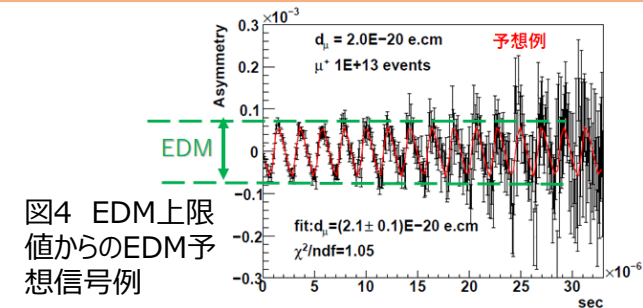


図4 EDM上限値からのEDM予想信号例