

ミュオン $g-2$ /EDM の精密測定を実現する ミュオン高周波加速

大谷 将士 〈高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 masashio@post.kek.jp〉

近藤 恭弘 〈日本原子力研究開発機構 yasuhiko.kondo@j-parc.jp〉

三部 勉 〈高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 mibe@post.kek.jp〉

ミュオンはスピンに伴う磁気双極子能率・電気双極子能率を持つ。それぞれボーア磁子を単位として、無次元量ランダウの g 因子と η を用いて表される。ディラック方程式の最低次では、 g 因子は2となるが、量子論的効果により、 g 因子は様々な相互作用に起因する量子補正を受ける。このズレを $g-2$ あるいは、 $a_\mu = (g-2)/2$ と表し、異常磁気(双極子)能率と呼ぶ。また、電気双極子能率の大きさを示す無次元量 η は、パリティ (P)・時間反転 (T) 対称性を破る相互作用により決定される。

$g-2$ は素粒子標準理論で精密に計算することができ、実験値と予想値のズレを測ることで標準理論を超える物理現象の有無を探ることができる。ミュオンの $g-2$ の測定は1960年代にCERNで測定が行われて以来、60年近い歴史がある。先行実験である米国BNL E821実験はミュオン a_μ を0.54 ppmの精度で測定した。これは標準理論の予想値よりも約 3σ 大きい値になっていることがわかった。標準理論の計算は様々な実験データによって精度が向上している一方、 a_μ の測定をこのような精度で行ったのはBNLの実験だけである。

素粒子の電気双極子能率 (EDM) は P 対称性・T 対称性を破る物理量である。CPT 定理を仮定すれば、T 対称性の破れは CP 対称性の破れを意味する。標準理論では EDM は極めて小さな値を持つと予想されている。EDM の測定においては有限値は得られておらず、BNLの実験より上限値が与えられている。

著者らは、大強度陽子加速器施設 J-PARC において、エミッタンスが極めて小

さいミュオンビームを用いて、従来とは全く異なる方法で $g-2$ と EDM を精密測定する実験を準備している。そのようなビームを生成するためには、ミュオンを一度静止したのち、再加速することが必要であるが、ミュオンの高周波加速はこれまでに前例がなかった。

本実験計画のため、著者らはミュオン専用の高周波加速器の設計に着手した。粒子加速のために粒子に同期して高周波加速電場を印加するには、速度変化に応じて加速器の構造を変える必要がある。ミュオンの質量は電子よりも約200倍大きく、陽子の9分の1である。よって、電子・陽子とミュオンでは同じ加速エネルギーでも速度変化が異なる。さらに、ミュオンは有限の寿命を持つため、高効率で加速しなければならない。これまで陽子加速器・電子加速器で培われてきた加速技術を応用し、ほぼ静止したミュオンを212 MeVまで加速するミュオン線形加速器の基本設計を行った。次のステップはミュオン高周波加速の実証であった。

2017年10月に、J-PARCのパルスミュオンビームを用いて、ミュオニウム負イオンをほぼ静止した状態から高周波加速空洞を用いて90 keVまで再加速する実験を行い、再加速されたミュオニウム負イオンを確認した。ミュオンそのものではないが、ミュオン加速とミュオニウム負イオン加速は技術的には等価である。今回成功したミュオニウム負イオンの加速により、新しい $g-2$ /EDM の精密測定の実現のマイルストーンが達成された。

—Keywords—

異常磁気能率 ($g-2$):

量子補正によって g 因子が2からズレる大きさ。量子補正は、不確定性原理によって粒子が仮想的に生成・消滅することに起因する。素粒子標準理論では、それを構成する粒子と相互作用(電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用)によって補正値を正確に計算することができる。未知の粒子や相互作用がある場合も、量子補正として現れる。

電気双極子能率 (EDM):

電場に対して、粒子スピンの応答を示す物理量で、パリティ対称性・時間対称性を破る。現在のところ、ミュオンに限らず、素粒子の EDM はどれも未発見である。

エミッタンス:

ビームが位相空間(位置・角度・エネルギー・時間)上に占める体積のこと。ビーム進行方向の加速・収束によらない不変量であり、粒子ビームの性質を表す重要なパラメータである。ミュオンは陽子ビームが原子核と反応して生成するパイオンの崩壊によって得られる3次粒子であるため、通常はエミッタンスが大きいビームとなる。ミュオンを一度減速させて再加速するというステップを取り入れることでエミッタンスを小さくすることができる。

高周波加速:

空洞を連続的に配置し、隣り合った空洞間に異符号の高周波電圧を印加して高周波に同期させて荷電粒子を加速すること。