

自動サイクロトロン共鳴加速による超低速ミュオン加速の検討 STUDY OF MUON ACCELERATION BY AUTO-RESONANCE CYCLOTRON

大谷将士^{*A)}、近藤恭弘^{B)}

Masashi Otani^{*A)}, Yasuhiro Kondo^{B)} ^{A)}KEK, Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

^{B)}JAEA, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

Abstract

Muon acceleration using the auto-resonance cyclotron scheme has been developed by simulation. Ultra-slow muons are accelerated from 10 keV to 19.6 MeV in axial solenoidal field and a cylindrical cavity for the 850-MHz TE11 mode. The cavity length is 29 cm and acceleration gradient is much higher than that obtained in the muon linac. It is necessary for confirming the feasibility of this scheme to develop a beam injection and extraction method, solenoid magnet design and so on.

1. はじめに

自動サイクロトロン共鳴加速 [1-3] はレーザーや高周波空洞による円偏電磁場と一様磁場中の粒子の回転運動が同期することで加速を行う原理である。これまでに実績のある電子加速では低エネルギー電子で加速効率 89% と非常に高効率の加速が実現されている [4]。陽子では加速勾配約 20 MV/m と低速部加速としては高い勾配の設計が行われている [5,6]。

近年、大強度陽子加速器の発展により、3次粒子として生成されるミュオンを利用した物質科学・基礎科学研究が盛んである。特にミュオニウムレーザーイオン化 [7] による超低速ミュオン (運動エネルギーが数十 /sim 百 meV) 生成後に加速することでこれまでにない低エミッタンスミュオンビームが実現できる見込みであり、ミュオン透過顕微鏡やミュオン異常時期能率精密測定などが計画されている [8,9]。これらの計画のために、ミュオン専用の線型加速器 [10-13] やサイクロトロン加速器 [14] が開発、一部加速の実証 [15] まで行われている。今後、低エミッタンスミュオンビームを用いた応用を展開するうえで、多角的に加速方法を検討することは重要であると考え。特にミュオンは有限の寿命を持つため、高加速勾配で一気に加速することが望ましい。

そこで、TE11 高周波空洞とソレノイド磁石を用いた自動サイクロトロン共鳴によるミュオン加速を検討した。現在検討が進んでいるミュオン線形加速器の低速部は、ドリフトチューブ型加速空洞で加速勾配は数 MeV/m 程度である。そこで、自動サイクロトロン加速で陽子程度の加速勾配が得られれば、崩壊損失の低減ならびに施設のコンパクト化につながる。また、ミュオンは陽子の約 1/9 の質量をもつため、同じサイクロトロン周波数で比較したときに必要となる磁場が小さくなるため、陽子加速の場合にボトルネックの一つとなっていた大口径高

磁場ソレノイドに対する要求が緩和されることも魅力の一つである。

本稿の構成は以下の通りである。まず、シミュレーションのセットアップ等を 2 章で述べる。続いて 3 章で単純な入射粒子分布による結果と考察、および超低速ミュオンの加速について検討する。最後に今後の展望を 4 章で述べる。

2. セットアップ

シミュレーションによる検討手順は以下の通りである。まず、現実的なソレノイド磁場強度・口径を考慮して高周波空洞の形状を決め、TE11 モードの電磁場分布を計算する。次に、電磁場分布を CST PS [16] に実装しミュオンの軌道計算を行う。ミュオンビームの分布は単色点源と、シミュレーションによって得られる現実的な超低速ミュオン分布 [17] の 2 つを用いた。以下にこれらのステップの詳細について述べる。

本稿では円柱空洞による TE11 モードを用いた。共鳴加速のためには、TE11 モードの角周波数 $\omega_{RF} = c\sqrt{(3.832/a)^2 + (\pi/l)^2}$ (a, l はそれぞれ空洞内径と長さ) とサイクロトロン角周波数 $\Omega_0/\gamma = eB/m\gamma$ が等しくなければならないので、空洞半径、長さと同様にソレノイド磁場の関係が決まる。長さに関しては陽子加速での設計を参考に 29 cm とした。さらに空洞内径を 13cm とすると $\omega_{RF} = 850$ MHz となり、 $B \sim 6.3$ T と求まる。以上の条件で円柱空洞における TE11 モードの電磁場分布を計算した。単純な円柱空洞なので電磁場を解析的に解くことが可能であるが、より複雑な空洞設計による高効率化など今後の検討を見据えて、CST MW Studio で計算した。ソレノイド磁場は簡単のため空洞内で一様と仮定した。

次に電磁場分布を CST PS に実装し軌道計算を行った。その際に、次の 3 章で述べる通り、ソレノイド磁場強度は上記の計算値 6.3 T と加速エネルギー ($\gamma \sim 1.19$) を参考にビームダイナミクスをチェックしながらスキャンした値である。代表的な値とその際のトラッキング結果を表 1、図 1 に示す。

* masashio@post.kek.jp

Table 1: Typical Parameters for Auto-resonance Cy-clotron Muon Acceleration Simulation

高周波空洞	内径	13 cm
	長さ	29 cm
	共振周波数	850 MHz
	Q_0	42000
	P_{peak}	5 MW
ソレノイド	磁場強度	6.7 T
ミューオンビーム	入射エネルギー	10 keV
	ピーク電流	2 μ A

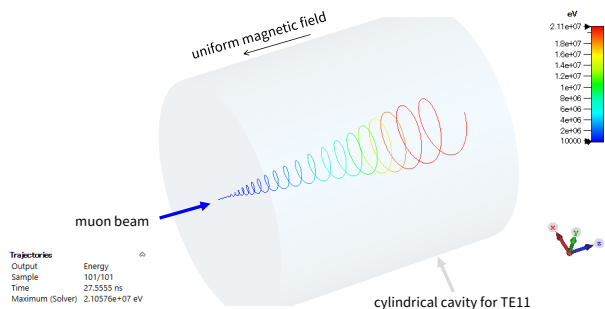


Figure 1: Example of beam tracking simulation in CST PS. Basic parameters in the simulation are shown in Table 1. Muon beam trajectory is shown with its energy.

3. ミューオン加速の検討

3.1 単純な粒子分布での結果と考察

自動サイクロトロン共鳴加速によるミューオン加速の振る舞いを理解するために、単色 (10 keV)・点源のミューオンビームでシミュレーションを行った。ビーム軌道は前の 2 章の図 1 で示した通りである。図 2 に結果を示す。

本シミュレーションではビーム軸 (z 軸) 方向の長さ 29 cm の空洞で、10 keV ($\gamma \sim 1$) から 19.6 MeV ($\gamma \sim 1.19$) まで加速できている。その間にサイクロトロン周波数は 910 MHz から 760 MHz まで変化しており、空洞の共振周波数 850 MHz はほぼその中間にあたる。

図 2 の黒色を見ると、 z 軸方向の速度が変化していることがわかる。これは非線形力であるポンドラモーティブ力 ($F \propto -\nabla E^2$) によるもので、ビーム軌道の詳細に依存する。特に磁場の値によっては速度が反転してしまう (図 2 の黒点線より磁場を大きくすると空洞内部で速度が反転する)。非線形力を考慮して軌道を事前に見積もることが難しかったため、磁場の値はサイクロトロン周波数周辺の値をスキャンして決定した。その際、ミューオンは速度及び γ 変化が大きく、この例でもサイクロトロン周波数が 20% 程変化するため、到達可能なエネルギーを事前に見積もることが可能であれば、磁場の設定値の指標になる。先行研究 [18] によると、自動サイクロトロン共鳴加速の同期粒子に対して保存量 S が存

在し、以下の式で表される。

$$S = 2\gamma - u_{\perp}^2/b_0 \quad (1)$$

ここで、 $u_{\perp} = \gamma\beta_{\perp}$ 、 $b_0 = \Omega_0/\omega_{RF}$ である。実際に S を計算してみると、加速中で約 3% の範囲内で変化していなかった (図 2 青線)。本シミュレーションでは入射ビームの $\beta_{\perp}=0$ であるため、保存量 S を用いて到達可能なエネルギーを見積もることができる。

以上より、自動サイクロトロン共鳴によるミューオン加速の振る舞いの理解と、設計に関するある程度の指標を得ることができた。磁場の不均一性などに関する指標や、周波数の異なるいくつかの空洞を繋げた追加速の検討が今後の課題である。

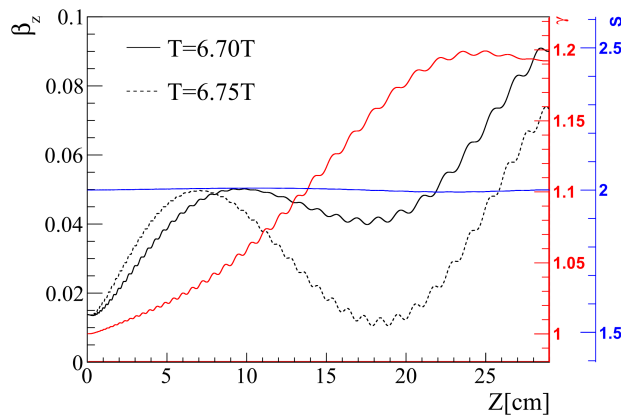


Figure 2: Muon beam velocity in z -direction (black), γ (red), and conserved quantity for synchronous particles S (blue). Muon beam velocity in z -direction when the magnetic field is increased to 6.75 T (black hatched) is also shown.

3.2 超低速ミューオンの加速

先の節で述べたセットアップで、超低速ミューオンの加速を検討した。超低速ミューオン分布は上流のシミュレーションから得られるものを使用した [17]。入射ビームのエネルギーは、超低速ミューオン生成後の静電レンズの印加電圧を調整し、先ほどの例と同じ 10 keV に調整してある。入射ビームの基本パラメータは表 2 の通りである。

Table 2: Basic Parameters of Ultra-slow Muon Beam

規格化横エミッタンス	0.3 π mm mrad
パルス幅	10 nsec
繰り返し	25 Hz
ビームエネルギー	10 keV
ビーム電流	2 μ A

図 3 に出射ビームのエネルギー分布と z 軸方向の分布を示す。出射エネルギーの中心値は 19.6 MeV であり、単色点源の場合と同じエネルギーとなった。 z 軸にはサイクロトロン周期 (の半分) に対応したピー

ク構造が見られ、99%以上の透過率が得られており、連続ビーム入射の場合も同様に加速が可能であることが分かった。ソレノイド磁場中で運動しているために角運動量成分を持っており、横方向エミッタンスなどの評価は今後のビーム取り出し方法の検討などの後に行う予定である。

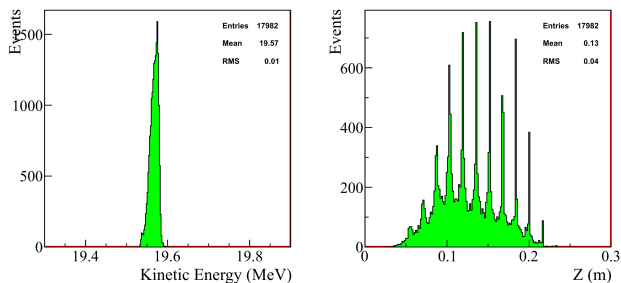


Figure 3: Results of ultra-slow muon simulation: (Left) Kinetic energy. (Right) distance in z-direction.

以上のように、自動サイクロトロン共鳴加速の原理によって、長さ 29 cm の空洞で超低速ミュオンを 10 keV から 19.6 MeV まで加速できる可能性があることが分かった。加速によって得られるミュオンビームを実験で用いるにはビーム品質も問題となってくるため、ミュオンビーム取り出し方法の検討とともに出射ビームのエミッタンス評価を行う必要がある。また、ビーム入射方法やソレノイド電磁石の設計なども必要であり、より現実的な設計での詳細な検討が今後の課題である。

4. まとめ

高周波空洞を用いた自動サイクロトロン共鳴加速の原理により、超低速ミュオン(運動エネルギーが数十~百 meV)生成及び静電レンズ取り出し(10 keVまで加速)後の加速について検討した。検討には CST などのソフトウェアを用いた。

まず、静電レンズ取り出しと同じエネルギー 10 keV の単色点源ミュオンの加速について考察した。長さ 29cm の円筒空洞による共鳴周波数 850 MHz の TE11 モード及び 6.7 T の一様な軸方向磁場を用いて、ミュオンを 10 keV から 19.6 MeV まで加速できることが分かった。加速中のビームダイナミクスや同期加速中の保存量 [18] などから、設計に対するある程度の指標を得ることができた。磁場不均一性やいくつかの空洞を繋げた追加速の検討が今後の課題である。

上記と同様のセットアップで、超低速ミュオン [17] の加速を検討した。単色点源の場合と同様に 19.6 MeV まで加速が可能で、透過率は 99% であった。ビーム取り出しとエミッタンス評価、ビーム入射方法の検討などは今後の課題である。

以上から、自動サイクロトロン共鳴加速は低速部のミュオン加速においても、陽子と同様に非常に高い加速勾配が得られる可能性を示した。一方で、現在計画されている実験で要求されるビーム品質が

担保できているか確認するには、今後の詳細検討が必要である。

謝辞

本研究はビーム物理研究会若手ポスターセッションにおける原隆文氏(阪大 RCNP)の発表「自動サイクロトロン共鳴による陽子の加速」から着想を得たものである。原氏とその共同研究者ならびにビーム物理研究会に感謝したい。

本研究は JSPS 科研費 JP18H03707 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] C. Chen, Phys. Fluids B 3, 2933 (1991); Phys. Rev. A 46, 6654 (1992).
- [2] B. Hafzi, P. Sprangle and J. L. Hirshfield, Phys. Rev. E. 50, 3077 (1994).
- [3] L. Friedland, Phys. Plasmas 1, 421 (1994).
- [4] M. A. LaPointe, R. B. Yoder, C. Wang, A. K. Ganguly, and J. L. Hirshfield, Phys. Rev. Lett. 76, 2718 (1996).
- [5] J. L. Hirshfield, C. Wang, and R. Symons, AIP Conference Proceedings 569, 833 (2001).
- [6] J. L. Hirshfield, Changbiao Wang, and V. P. Yakovlev, Phys. Rev. ST Accel. Beams 5, 081301 (2002).
- [7] P. Bakule *et al.*, Nucl. Instr. Meth. B 266, 335-346, 2008.
- [8] Y. Miyake *et al.*, JPS. Conf. Proc. 2 (2014) 010101; for further information see also http://slowmuon.kek.jp/MuonMicroscopy_e.html
- [9] K. Abe *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02.
- [10] Y. Kondo *et al.*, Proceedings of IPAC2015, Richimond, USA, THPF045.
- [11] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 040101 (2016).
- [12] M. Otani *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. 1350, 012097 (2019).
- [13] Y. Kondo *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 874, 012054 (2017).
- [14] 大西純一 他、「ミュオン加速用サイクロトロン軌道計算」、第 16 回日本加速器学会年会論文集, pp. 121-125 (2019).
- [15] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 050101 (2018).
- [16] Computer Simulation Technology (CST); <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [17] M. Otani *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. 1067, 052018 (2018).
- [18] C. Wang and J. L. Hirshfield, Phys. Rev. E. 51, 2456 (1995).