

TIARA AVF サイクロトロン の 取出しビーム に対する 中心領域 の 位相バンチング の 効果

EFFECT OF PHASE BUNCHING OF THE CENTRAL REGION ON EXTRACTED BEAM FROM THE TIARA AVF CYCLOTRON

宮脇信正^{#, A)}, 福田光宏^{B)}, 倉島俊^{A)}, 柏木啓次^{A)}

Nobumasa Miyawaki^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}

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

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

Abstract

The effect of phase bunching on extracted beam was investigated by the calculation of the correlation between the radial position and relative phase and measurement of beam transmission in the TIARA AVF cyclotron. The measured transmission in the phase bunching condition was twice larger than that in no phase bunching condition. The calculated beam spread in the radial phase space with phase bunching was smaller than that without phase bunching. The phase bunching effect enhanced the quality and intensity of the extracted beam.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子応用研究所のイオン照射施設(TIARA)のAVFサイクロトロン(K110)[1]では、シングルパルスビームや数百MeV級重イオンマイクロビームのようなビーム応用に応えるため、シングルパルスビームではサイクロトロンからのビーム取出しを数ターン以内に減らす必要があり、取出し時のビームの半径方向の広がりとなるエネルギー幅の縮減が要求される[2]。また、マイクロビーム形成では、4連四重極電磁石を用いた集束システム中の色収差の影響を減らすため、 10^{-4} 台のビームエネルギー幅が必要とされる[3]。このような高品位ビームの加速、取出しを行うため、加速位相幅の縮小に伴ったビームの質の改善が期待される位相バンチングを適用している。

これまでの研究で位相バンチングは、サイクロトロン の 中心領域 で 加速ディー電圧 に 比べて イオン源 から の 引き出し等 の 加速電圧 が 低く、かつ 第 1 加速ギャップ で の 加速電圧波形 の 増加勾配 で 発生 すること を 幾何軌道解析モデル によって 確認 した[4]。TIARA AVF サイクロトロン には、10MeV の H^+ イオン から 27.5MeV/u までの 重イオン を 加速 するため、イオン の 回転周期 と RF の 加速周期 の 比 である 加速ハーモニクス数 (h) は 1,2,3 を 選択 することが でき、 $h=1$ と 2 の 中心領域 の 電極配置 は 同じ である。しかし、 h によって 第 1 加速ギャップ で の 加速位相 が 異なり、位相バンチング は $h=2$ では 発生 し、 $h=1$ では 発生 しない。実際に、入射ビームライン に 設置 された バンチャー の 加速RF に対する 相対位相 と プラスチックシンチレーター を 取り付けた メインプローブ によって 確認 した[5]。この結果、 $h=2$ の 260 MeV $^{20}Ne^{7+}$ ビーム では、サイクロトロン に 入射 可能な バンチャー の 相対位相範囲 が 59RF 度 に対して、取出し前 に 測定 した ビーム位相分布 の ピー

ク に対して $1/4$ の 強度 の 位相範囲 は 28RF 度 と 位相幅 の 縮小 が 確認 された。一方、 $h=1$ の 107 MeV $^4He^{2+}$ ビーム では、バンチャー位相範囲 が 48RF 度 に対して、ビーム位相分布 の 範囲 は 71RF 度 と 広がり、サイクロトロン 内部 で の ビーム位相分布 の 効果 は 証明 された。

今回、位相バンチングの取出しビームに対する効果を明らかにするため、取出し前後のビームの透過効率やエミッタンスの測定結果について報告する。

2. ビーム取出し効率への効果

位相バンチングの取出しビームに対する効果を調べるため、位相バンチングが発生する $h=2$ の 260 MeV $^{20}Ne^{7+}$ ビームと発生しない $h=1$ の 107 MeV $^4He^{2+}$ ビームに対して、サイクロトロン入射前のファラデーカップ(IS5)、取出し前のプローブ(Mag0)、取り出し後のファラデーカップ(TS1)によって、ビーム電流をそれぞれ測定した。その結果を Table 1 に示す。

Table 1: Measured Beam Current

h	1		2	
	Off	On	Off	On
Buncher				
IS5 (nA)	2160		5000	
Mag0 (nA)	300	960	470	1820
TS1 (nA)	70	400	280	1740

サイクロトロンへの入射効率(Mag0/IS5)は、バンチャーの有無に関係なく $h=2$ に比べて $h=1$ の方が高かった。しかし、取出し効率(TS1/Mag0)は、 $h=2$ の方が非常に良く、バンチャーによって取出し効率は 95% に達し、サイクロトロン の 通過効率(Mag0/IS5) は $h=2$ が $h=1$ の約 2 倍であり、位相バンチングの取出しビームへの効

[#] miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

果を確認できた。一方、バンチャー無しの入射効率から得られる位相アクセプタンスは、 $h=1$ は 60RF 度に対して $h=2$ は 34RF 度と狭く、上記の[5]の結果と異なった。位相バンチングは正弦波の勾配を用いるため、正弦波のトップ付近を中心にビームが入射される $h=1$ は、 $h=2$ より位相アクセプタンスは大きいと考えられる。[5]での結果は、バンチャーの相対位相を変化させてシンチレーターによる計数の最大値から 25%以上得られた範囲であり、バンチャーによるバンチングの位相範囲は有限であるため、一致しない。また、バンチャーの電極間ギャップの距離は $h=2$ の最適値に近いので、入射効率の増加は $h=1$ の 3.2 倍に比べて $h=2$ が 3.9 倍と高く、バンチャーによる位相アクセプタンスへの影響がある。このように、バンチャーと位相バンチングの組み合わせによって、取出し効率の向上が可能である。

3. エミッタンスへの効果

サイクロトロン内でのエミッタンスの測定は、空間的な制約や強い電磁場中のため困難であるため、幾何軌道解析モデルを用いて、入射直後及び取出し前の半径方向位相空間中の粒子分布を求めた。入射直後の分布は、すでに[6]で測定された位相スリット位置毎に通過したビームの位相分布で得られた相関関係と一致する条件を改訂したモデルの計算によって調べて得られた。[6]での測定結果に計算結果を重ねた図を、 $h=1$ に対して Figure 1 に、 $h=2$ に対して Figure 2 にそれぞれ示す。

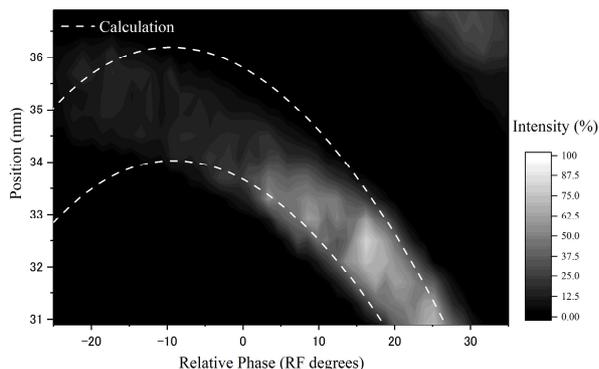


Figure 1: Calculated and measured correlations between radial position and relative phase for $h=1$.

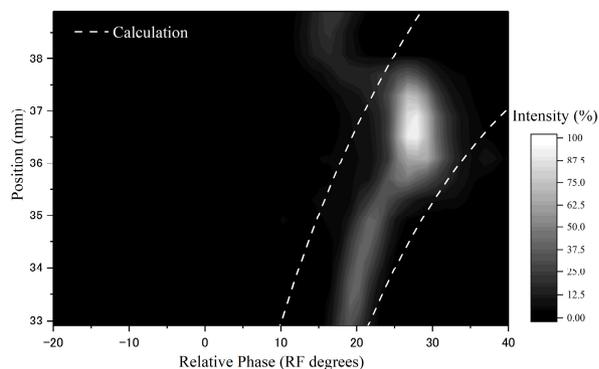


Figure 2: Calculated and measured correlations between radial position and relative phase for $h=2$.

Figure 1 と Figure 2 の計算結果の 2 本の破線は、 $(r, r')=(-1\text{mm}, -20\text{mrad})$ と $(1\text{mm}, 20\text{mrad})$ を示しており、ほぼ測定結果が破線内にほぼ収まった。サイクロトロンへの横方向の位相空間中の入射アクセプタンスは、スリットやアパーチャー、インフレクター電極間のギャップ、中心領域の電極等と同じであるため、入射直後の半径方向位相空間中の分布の大きさを、 $\pm 1\text{mm}$, $\pm 20\text{mrad}$ と仮定した。この分布による $-5, 0, 5\text{RF}$ 度の 3 つの相対初期位相で加速した時の取出し前の半径方向の粒子分布についてモデルを用いた計算を行い、Figure 3 に結果を示す。

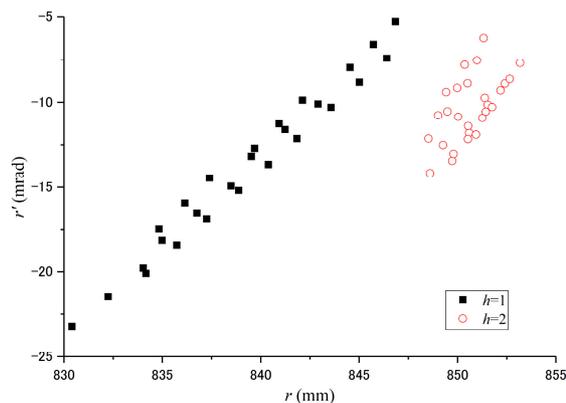


Figure 3: Calculated particle distributions before extraction.

半径方向の位置と角度の広がり、 $h=1$ より $h=2$ の方が明らかに小さいことがわかる。取出しは半周近く狭い間隙を通過するため、ビームの広がり機器との干渉によって損失を生じ、その結果として、前章の取出し効率の結果と一致する。

最後に、取出し後のビームライン上にあるエミッタンスモニターを用いた測定では、サイクロトロンの半径方向と一致する水平方向の 80%エミッタンスの大きさは、 $h=2$ は $h=1$ の 1/3 となり、取出し後までエミッタンスが小さいことを確認した。

4. まとめ

サイクロトロンの中心領域で発生する位相バンチングの取出しビームに対する効果について、TIARA AVF サイクロトロンの $h=1$ と $h=2$ の加速条件でビームの種々の測定と幾何軌道解析モデルを用いた計算によって調べた結果、位相バンチングはサイクロトロン内部の半径方向位相空間中のビームの広がりを小さくするとともに取出し効率を向上させ、取出し後のビームの輝度を高めることがわかった。

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2 (2017).
- [2] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86 (2015) 073311.
- [3] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85.
- [4] N. Miyawaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A715 (2013) 126.
- [5] N. Miyawaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A767 (2014) 372.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 12th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Jpn, (2015) 706.