

## 自動サイクロトロン共鳴加速原理の陽子加速器への応用

### APPLICATION OF THE CYCLOTRON AUTO-RESONANCE ACCELERATION TO A PROTON ACCELERATION

原隆文<sup>#,A)</sup>、 福田光宏<sup>A)</sup>、 依田哲彦<sup>A)</sup>、 神田浩樹<sup>A)</sup>、 中尾正夫<sup>A)</sup>、 安田裕介<sup>A)</sup>、  
篠塚勉<sup>B)</sup>、 伊藤正俊<sup>B)</sup>、 松田洋平<sup>B)</sup>、 倉島俊<sup>C)</sup>、 宮脇正信<sup>C)</sup>、 涌井崇志<sup>C)</sup>  
Takafumi Hara<sup>#,A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Masao Nakao<sup>A)</sup>,  
Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Tsutomu Shinoduka<sup>B)</sup>, Masatoshi Ito<sup>B)</sup>, Yohei Matsuda<sup>B)</sup>, Shun Kurashima<sup>C)</sup>,  
Nobumasa Miyawaki<sup>C)</sup>, Takashi Wakai<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>RCNP, Osaka, univ

<sup>B)</sup>CYRIC, Tohoku, univ

<sup>C)</sup>QST

#### Abstract

In recent years, there has been a demand for a high intensity accelerator having high power efficiency for massively and inexpensively producing a short life RI, which is expected to be used for treatment of advanced cancers is increasing. We aim to develop an accelerator applying the cyclotron automatic resonance principle to acceleration of protons and helium ions. If it can be applied to protons and light ions, it becomes possible to realize a high intensity accelerator with high power efficiency suitable for RI production. We are planning to develop by analyzing the trajectory using the OPAL of the calculation code which was actually developed at the Paul Scherrer Institute in Switzerland and was used to design the actual accelerator.

#### 1. はじめに

近年、医療用 RI の需要が高まってきており初診時進行癌治療への利用が期待されている短寿命 RI を大量かつ安価に製造するための、高い電力効率をもつ大強度加速器が求められている。私たちはサイクロトロン自動共鳴原理を陽子やヘリウムイオンの加速に適用した加速器の開発を目指している。

一定な磁場とそれに垂直な円偏光をした電磁波中の荷電粒子の運動を考える。エネルギーの収支がない場合荷電粒子は磁力線に巻きつくように螺旋状の軌道を描くが、荷電粒子の回転周波数が電磁波周波数と一致した時、荷電粒子が電磁波のエネルギーを吸収するサイクロトロン共鳴が起こる。サイクロトロン共鳴の維持には電磁波の磁場と電場の関係が大きく関係してくる。電磁波の作る電場によって荷電粒子が加速され、その質量が大きくなって荷電粒子の回転周波数が小さくなることで共鳴条件から外れることが予想される。一方、電磁波の作る磁場によって一定な磁場と螺旋運動の進行方向に荷電粒子が加速されるとドップラーシフトによって荷電粒子から見た電磁波の周波数が元の周波数より小さく見えやはり共鳴条件からは外れることになる。このことによって荷電粒子の回転周波数と電磁波の周波数にズレが生じる。電磁波の作る電場を  $\mathbf{E}$ 、磁場を  $\mathbf{B}$  とすると、 $\mathbf{E}=\mathbf{B}$  のときこれらの影響がキャンセルされ、サイクロトロン共鳴を維持することができる。これを自動共鳴という。過去にも自動サイクロトロン共鳴は非常によく研究されており、自動サイクロトロン共鳴を応用した例がいくつかある。ジャイロトロ

ンは電子銃から一定な磁場中に放出された電子に円偏光する電場をかける。電場の周波数が電子の回転周波数よりわずかに大きい場合、一定の間隔で運動していた電子はバンチングされる、この時電子全体では加速された電子より減速された電子の方が多くなり電子ビームはエネルギーを失う。これにより、電子から高周波の電磁波を取り出すことができる[1]。一方、この逆過程で電子を加速する運用例もあり、その一つに Gyro-Resonant Accelerator (GYRAC)がある[2]。GYRAC は磁場中を回転する電子に電子の回転周波数と同じ周波数をもつ円偏光した電場をかけることによって加速を行う。磁場を時間変化させることでサイクロトロン共鳴を維持することで電子の運動量を増加させる。GYRAC は平面で一定の軌道上で加速を行うことで、小型化が可能であるが連続的にビームの加速を行うことはできない。

もう一つの加速器としての実用例としては、Cyclotron AutoResonant Accelerator (CARA)がある[3]。CARA はテーパ磁場に円偏光した電磁波をかけることで、螺旋運動する電子をサイクロトロン共鳴によって加速し続けることができる。CARA の特徴は電子を螺旋運動させることで連続的なビームの加速ができることである。

サイクロトロン自動共鳴を加速器に応用することで、Hafizi らの計算によれば非常に高い電力効率を実現できる。例えば、陽子を現在 RI 製造に使われている 20 MeV まで加速する時、5 T の磁石と 3 GHz の電磁波で加速を行ったとすると、20 MeV まで加速した時の陽子の回転半径は 13 cm, またキャビティの長さ は 1 m となる。また同じ条件でヘリウムイオンを

$^{211}\text{At}$ の製造に適した 30MeV まで加速するときその回転半径が 16cm となる。

CARA は電子での実用例はあるが、GYRAC の実用例はない。いずれにしても、サイクロトロン自動共鳴用いて陽子や軽イオンの加速に成功した例はなく、荷電粒子と電磁場の相互作用に注目して、注意深く電場と磁場の設計をしなければならない。サイクロトロン自動共鳴を陽子や軽イオンに適用するに当たって、まず我々は計算コードの OPAL を用いて各種論文の条件を用いた電子の加速の再現を行う。そして、陽子やイオンの共鳴条件やそれを実現する電磁場、静磁場、粒子の運動を理解したうえで、それを OPAL に入力し、軌道の解析を行うという方針で開発を進める予定である。

## 2. サイクロトロン自動共鳴

一定な磁場中を運動する質量  $m_r$ 、電荷  $e$  を持つ粒子の運動方程式は

$$\dot{\mathbf{p}} = e[\mathbf{E} + (\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B} + (\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}_0] \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{B}$  はそれぞれ電磁波の電場成分磁場成分とし、 $\mathbf{p}$  は粒子の運動量、 $\mathbf{v}$  は粒子の速度、 $c$  は光速である。電磁波の角振周波数を  $\omega$ 、波数ベクトルを  $\mathbf{k}$  とし、さらに  $\mathbf{k}$  と  $\mathbf{B}_0$  は互いに平行で、 $\mathbf{k}$  と  $\mathbf{E}$  は互いに垂直であるとし、 $\mathbf{k}$  と  $\mathbf{B}_0$  の方向を  $z$  軸とする。一定な磁場と円偏光した電磁波中を運動する電子の運動を Fig. 1 に示す。

粒子の全エネルギーを  $\mathcal{H}$  とすると

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + ev_{\perp 0} E t \cos \theta_0 + e^2 E^2 t^2 / 2m_r \quad (2)$$

となる。 $\theta$  は  $\mathbf{E}$  と速度の垂直成分  $v_{\perp}$  のなす角である。粒子の回転周波数  $\Omega$  を  $\mathcal{H}$  の式で表すと

$$\Omega = -eB_0 c / \mathcal{H} \quad (3)$$

となるなり、サイクロトロン共鳴は  $\omega - k_z - \Omega = 0$  を満たす時に起こる。

電磁場中での荷電粒子のエネルギー変化量は

$$d\mathcal{H}/dt = e(\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}) \quad (4)$$

これを運動量の式で表すと

$$d\mathcal{H}/dt = (\omega/k) p_z \quad (5)$$

となり、式(6)を

$$\omega - k_z - \Omega = 0$$

の条件でローレンツ変換すると

$$d(\omega - k_z)/dt = (d_1 + 1)\Omega \quad (6)$$

が求まる。 $d_1$  は初期条件から求まる値で

$$d_1 = (n^2 \omega - k_z - \Omega_0) / \Omega_0 \quad (7)$$

(7)を積分すると

$$(\omega - k_z - \Omega) = d_1 \Omega + d_2 \omega \quad (8)$$

ただし

$$d_2 = 1 - n^2 \quad (9)$$

(8)と(10)から  $\omega - k_z - \Omega = 0$  ,ここで  $n$  として、以下の式で表せる電磁波の屈折率を用いた。

$$n = kc/\omega = B/E \quad (10)$$

$n = 1$  のとき  $d_1 = d_2 = 0$  となり常に

$$(\omega - k_z - \Omega) = 0$$

となることがわかり、共鳴条件からスタートすると常に共鳴が維持されることがわかる[4]。

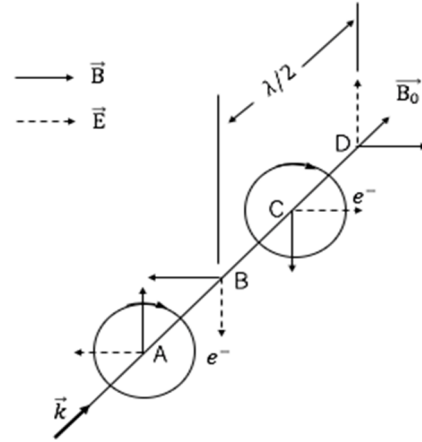


Figure 1: An electron in a circularly polarized electromagnetic field and a constant magnetic field [4].

## 3. OPAL による軌道計算

OPAL はスイスのポールシェラー研究所で開発された計算コードで、加速器中やビームラインでの荷電粒子の軌道を計算することができる[5]。OPAL は磁場と電場を設定することで、多くの荷電粒子の加速器中での空間電荷効果を考慮したビームの軌道とエミッタンスを求めることができる。実際に加速器の設計の際に使われた実績もあり我々の研究に適した計算コードであると考えられる。多くの先行研究においては、サイクロトロン共鳴状態の粒子の運動方程式をそれぞれ独自の方法で近似し、時間発展もしくは位置依存性を表す微分方程式に展開して解を求めている。私たちは汎用のコードを用いて粒子の軌道の解析を行うことで、サイクロトロン自動共鳴を応用した加速の原理を確認し、陽子やイオンなど電子より重い粒子の加速へ適用の可能性を探る。

## 4. まとめと今後の予定

一定磁場とそれに垂直な円偏光された電磁波中を運動する荷電粒子が、ある条件を満たした時に常にサイクロトロン共鳴を維持した状態で運動を続ける。これをサイクロトロン自動共鳴といい、このサイクロトロン自動共鳴を陽子や He などの軽イオンの加速に用いることで高効率で小型の加速器を実現できると考えられる。

計算コードの OPAL を用いて電子の加速に成功している CARA の再現をし、陽子の加速の計算を行い最適な条件を探していく予定である

## 参考文献

- [1] 岡本正, 杉森欣三: 核融合研究 51. 369.
- [2] Olivier Gall, IEEE Trans. Plasma Sci. 17. 4.
- [3] B. Hafizi, P. Sprangle, and J. L. Hirshfield, "Electron beam quality in a cyclotron autoresonance accelerator," Phys. Rev. E 50, 3077, (1994).

- [4] Charles S. Roberts and S. J. Buchsbaum, Phys. Rev. 135, A381, (1964).
- [5] A. Adelman *et al.*, “The Object Oriented Parallel Accelerator Library (OPAL), Design, Implementation and Application”, Proceedings of ICAP09, p. 107, 2009.