

[P 30– 5]

## HALO FORMATION FROM HIGH-INTENSITY AXISYMMETRIC BEAMS

Masanori Ikegami and Hiromi Okamoto

Accelerator Laboratory, Institute for Chemical Research, Kyoto University  
Gokanoshō, Uji, Kyoto, 611 JAPAN

### ABSTRACT

We study halo formation from high-intensity axisymmetric beams propagating in a uniform focusing channel. We develop a one-dimensional self-consistent simulation code, and apply it to three types of phase space distributions, namely, Gaussian, parabolic and waterbag distribution. The intensity of halo current and the maximum extent of halos are evaluated with the different sizes of mismatch and tune depression to give practical criteria useful for the design considerations of high-power linear accelerators. We find that the ratio of the maximum extent of a halo to the initial rms beam radius is insensitive to the initial beam conditions. It is also confirmed that halo intensity is roughly independent of beam density and the size of mismatch.

### 大強度軸対称ビームにおけるハロー形成過程の研究

#### 1. はじめに

空間電荷効果が支配的な高密度ビームの力学的挙動は本質的に非線形であり、結合効果、ビーム密度の自発的再構成、ビームハローの形成など多種多様な集団効果が引き起こされる。空間電荷効果の研究は、過去数十年にわたって、理論・数値解析の両面から精力的になされてきたが、特に近年、大強度イオンビームを核廃棄物の消滅処理やトリチウム生産などへ応用する計画が各地で検討されるようになってから、その度合を一層増している。将来の大強度加速器では、わずかなビームロスも加速器全体を放射化するのに十分であるため、その設計に際しては、特にビームハローの形成過程に対する基本的理解とその定量的評価が必要不可欠である。この目的のため、例えば、小さなフラクションのビームの振る舞いについても信頼性の高いシミュレーションが要求されている。

ビームハローの形成においては、入射ビームが加速器・ビーム輸送系に対して不整合をもつ場合に発

生するプラズマ振動が本質的な重要性をもつと考えられている[1]。そのため、本研究では、特にビームサイズの不整合によって誘起された脈動モードの振動を行う軸対称ビームの力学的挙動について研究するため、新たにシミュレーションコードを開発した[2]。ビームの軸対称性を仮定することにより、問題が本質的に1次元となるため、従来のコードに比べ、より多数のシミュレーション粒子を用いたより精度の高いシミュレーションをより短時間で行うことができる。また、このコードでは脈動モード以外のビーム振動は原理的に発生しないため、ハロー形成におけるこのモードの役割だけを選択的に調べるのにも適している。

#### 2. シミュレーション方法

ビームを構成する各粒子の質量を  $m$ 、電荷を  $q$ 、速度を  $u$  とすると、軸対称でかつ一様な収束力の下での粒子の運動は次のハミルトニアンに支配される：

$$H = \frac{1}{2} \left( p_r^2 + \frac{p_\theta^2}{r^2} \right) + \frac{1}{2} \kappa_0^2 r^2 + \frac{q}{mu^2} V_{sc}(r; s) \quad (1)$$

ここで、 $p_r$ と $p_\theta$ はそれぞれ動径方向の運動量と角運動量、 $\kappa_0$ は外部収束力の強さを表わすパラメータ、 $V_{sc}(r)$ は空間電荷ポテンシャル、 $s$ は独立変数でビーム輸送系に沿って測った距離を表わす。ビームの振動モードと収束系の軸対称性から、式(1)のように、ハミルトニアンが方位角座標 $\theta$ に依らなくなるため、角運動量 $p_\theta$ は運動の定数となる。式(1)と Gauss の法則より、粒子の従う動径方向の運動方程式は

$$\frac{d^2 r}{ds^2} = -\kappa_0^2 r + \frac{p_\theta^2}{r^3} + K \frac{\xi(r; s)}{r} \quad (2)$$

と求められる。ここで、 $K$ は generalized perveance、 $\xi(r; s)$ は半径 $r$ の円内にある電荷量と総電荷量の比である。 $\kappa_0$ および初期ビームの rms emittance  $\epsilon$ を用いて、座標変数を $\tilde{r} = \sqrt{\kappa_0/\epsilon} \cdot r$ 、 $\tilde{p}_r = p_r / \sqrt{\kappa_0 \epsilon}$ 、 $\tilde{p}_\theta = p_\theta / \epsilon$ のようにスケールすると、式(2)は次のように書き直すことができる：

$$\frac{d^2 \tilde{r}}{d\tau^2} = -\tilde{r} + \frac{\tilde{p}_\theta^2}{\tilde{r}^3} + \Gamma \frac{\xi(\tilde{r}; \tau)}{\tilde{r}} \quad (3)$$

尚、独立変数は $\tau = \kappa_0 s$ に変換してある。また、 $\Gamma = K/\kappa_0 \epsilon$ であり、tune depression  $\mu$ と次のような式で関係づけられる：

$$\Gamma = \frac{1 - \mu^2}{\mu} \quad (4)$$

式(3),(4)より、初期ビームが有する不整合の大きさ以外のパラメータで必要なものは $\mu$ だけであることがわかる。 $\mu$ はまた、軸方向の特徴的な長さである scaled plasma wave length  $\tau_p = \kappa_0 \lambda_p$ と次のような式で関係づけられる：

$$\tau_p = \frac{2\pi}{\sqrt{1 - \mu^2}} \quad (5)$$

以後、本論文では常にスケールされた変数を用いるものとし、簡単のためチルダ ( $\tilde{\quad}$ ) は省略する。

本研究のために開発したコードでは、粒子分布の $(r, p_r)$ 位相空間における時間発展を追跡するために、ステップサイズ可変の2次のシンプレクティック法を用いて式(3)の数値積分を行っている。この際、動径方向にメッシュを切り、各粒子の電荷を最も近いメッシュポイントに割り当てることにより、 $\xi(r; \tau)$ の形を決定した。

初期粒子分布として、 $3\sigma$ -truncated Gaussian 分布 (以後、単に Gaussian 分布と呼ぶ)、parabolic 分布、waterbag 分布をもつビームに対してこのコードを適用した。シミュレーション粒子数は  $10^5$ 、動径メッシュサイズは matched rms radius  $\rho_0$ の100分の1、最大の積分ステップサイズは $\tau_p$ の $2^{11}$ 分の1、最小の積分ステップサイズは $\tau_p$ の $2^{25}$ 分の1とした。

### 3. シミュレーション結果

系統的なシミュレーションの結果、ある程度以上の不整合をもつビームについては、初期分布の種類やビーム密度によらず常にハローが形成されることがわかった。図1に、その一例として、tune depression  $\mu$ が0.1、mismatch factor  $\chi$  (初期ビームの rms radius と $\rho_0$ の比)が1.5で、Gaussian 分布をもつビームの初期位相空間分布と  $20\tau_p$  輸送した後の位相空間分布を示す。密度の大きいコアのまわりに、希薄なリング状のハローが形成されていることがわかる。このハローを形成している粒子数はビーム全体の粒子数のおよそ7~8%を占めている。また、ハロー粒子は、初期位相空間分布 (例えば図1(a))においてビームの周辺部に位置していたことも確認されている。これは、ビーム核が基本的にほぼ安定であることを意味している。

不整合ビームのハロー強度 (ハローを形成してい

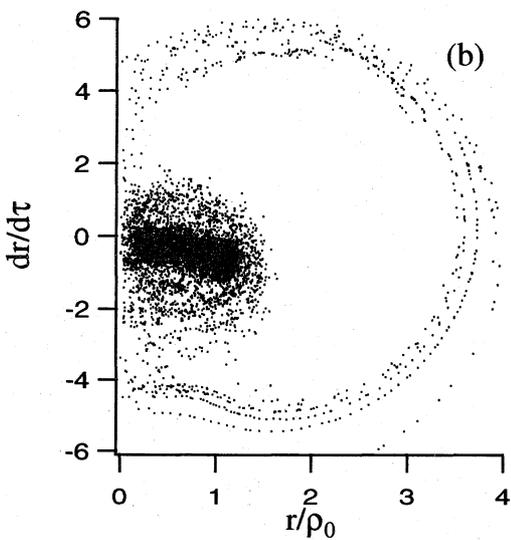
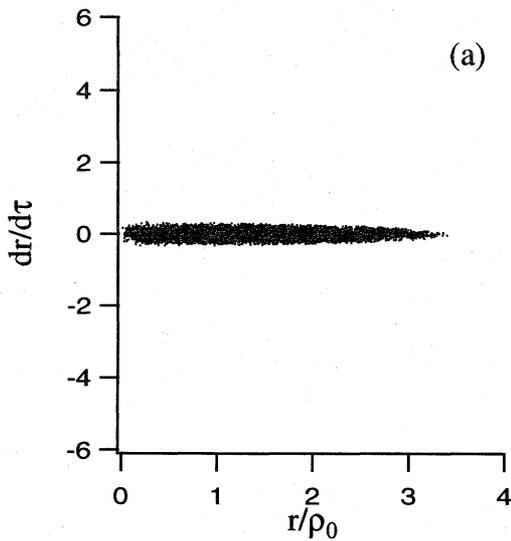


図1 不整合のある Gaussian ビーム ( $\mu=0.1$ ,  $\chi=1.5$ ) の位相空間分布 (a) 初期分布 (b)  $20\tau_p$  輸送した後の分布

る粒子数の全粒子数に対する割合) は、不整合の大きさやビーム密度にあまり依存せず、常に5~10%程度あることがわかった。また、ハローの半径(ビームの最大半径)  $r_{\max}$  と  $\rho_0$  との比もビーム密度にあまり依存せず、ある程度以上の不整合をもつビームに対しては、 $r_{\max}/(\chi \cdot \rho_0) \sim 2.8$  が成り立つことも見いだされた(図2参照)。このことから、加速構造の放

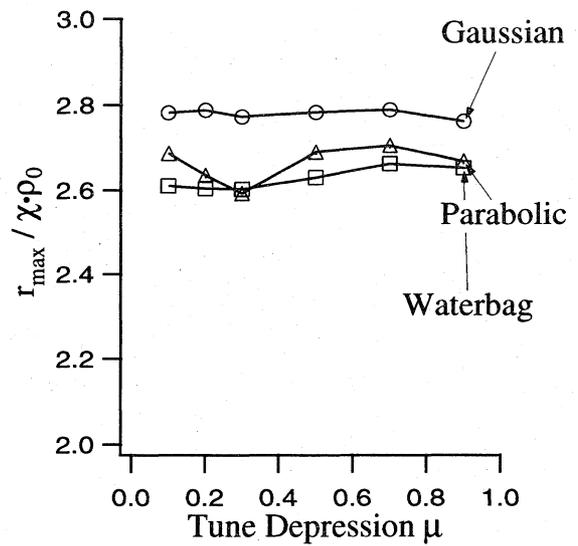


図2 ハロー半径の tune depression に対する依存性 初期分布として Gaussian 分布、parabolic 分布、waterbag 分布をもつビームについてそれぞれ示してある。mismatch factor  $\chi$  は 1.5 とした。尚、 $\chi$  は常に 1 より大きいものとして定義してある。

射化を回避するためには、起こりうる最大の不整合値を  $\chi_{\max}$  と書くと、少なくとも約  $3\chi_{\max} \cdot \rho_0$  以上のビームダクト径を確保しなければならないことがわかる。このようにハローの広がりが不整合の大きさ  $\chi$  にはほぼ比例することから、実際に大強度加速器を建設する際には、当然の事ながら  $\chi$  の値をできる限り小さくする工夫が不可欠である。

#### 参考文献

- [1] R. A. Jameson, Los Alamos Report LA-UR-93-1029 (1993).
- [2] Hiromi Okamoto and Masanori Ikegami, "Simulation Study of Halo Formation in Breathing Round Beams", to be published.