

実施報告書

研究組織 大見和史、D. Zhou, J. Flanagan、多和田正文、H. Jin、壽崎義明 (KEK加速器)

1. KEKBにおけるビームノイズによるルミノシティ低下現象

ビームの衝突点での位置がわずかでも揺らぐと、衝突の際の非線形力によりビームサイズが大きくなり、ルミノシティが低下してしまう。単に静的にビーム位置がずれた場合は $L=L_0\exp(-\Delta x^2/2\sigma_x)$ によりルミノシティが低下するが、この場合 $\Delta x/\sigma_x=0.1$ に対して $\Delta L/L_0=0.005$ で無視できる低下である。衝突位置の揺らぎが乱数的である場合、ルミノシティ低下ははるかに顕著(10倍)に表れる。また揺らぎが sin 的である場合、周波数によってビームビーム振動モードが誘起され、特有の周波数応答を示す。

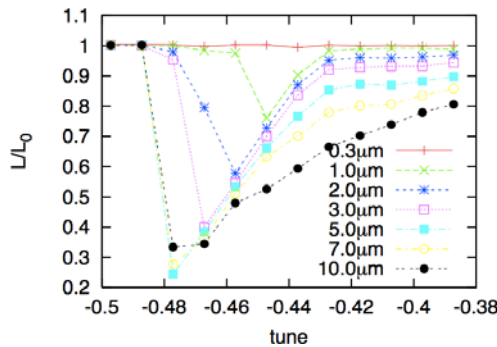


図1. シミュレーションによる振幅毎の衝突位置揺らぎの周波数に対するルミノシティ低下。

衝突ビームの振動位相が π 、つまり逆位相のビームビームモード (π モード) は-0.42近傍に存在するが、振幅が大きいとビームが本来(衝突なしのビーム)の周波数に近い方がルミノシティ低下が激しい。両ビームの位相差は図2に示したが、0と π の間で、ある周波数を境に急激に変化し、対応してルミノシティも大きく変化する。この現象は実験的にも観測されていて、非線形現象特有の振る舞いである。

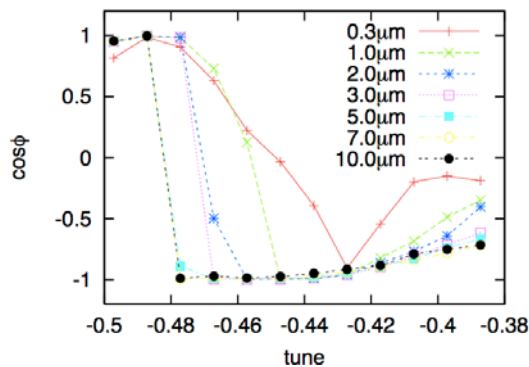


図2: シミュレーションによる振幅毎の周波数に対する両ビームの位相差

2. J-PARCにおける空間電荷効果

非相対論的陽子ビームは、ビーム内での長距離クーロン力を受けつつ運動する。クーロン力はビーム内陽子分布によるPoisson方程式から決まる。これを空間電荷力と呼ぶ。空間電荷力は陽子のベータトロン振動振幅に対して一般に非線形である。大強度になると非線形力が強くなり、エミ

ットランスが大きくなり、ビームが真空パイプ壁でロスし、放射化する。J-PARCにおける大強度化の限界はこのロスによって決まる。

ビームの初期エミッタンスはLINACからRCSに入射する時点で決まる。空間電荷力がなければエミッタンスは相対論因子 $\beta\gamma$ に反比例して加速とともに小さくなる。一方エミッタンスが小さいと、陽子分布が小さいため非線形力が強くなる。現在RCSの入射は陽子運動エネルギー180 MeV($\beta\gamma=0.65$)でエミッタンス $\epsilon=100 \mu\text{m}$ になるよう行われている。このビームを3 GeV ($\beta\gamma=4$)まで加速してMRに入射するので理想的に加速されればエミッタンスは $\epsilon=100 \times 0.65/4=16 \mu\text{m}$ である。MRの入射アパーチャは60 μm であるので、十分余裕があるようだが、実際には強度を上げようとすると、相当のビームロスが発生する。

空間電荷効果に対してどう強度を上げていくかの戦略のためにシミュレーションが行われている。180MeVでの非線形力が強いので2012年に入射エネルギーは400MeV($\beta\gamma=1$)に上げられる。今回はRCS入射ビームを現実に近い状態でシミュレーションを行った。LINACからのビームはRCS入射後のビームに比べはるかに小さい。RCSの位相空間 x, px, y, py の中のある点に放り込む感じで1 μsec 毎に300-500発のLINACビームを入射する。不変量である J_x, J_y 空間であらわすと、図3の左図、紫の点の様に入射される(10発しか入れていない)。 J_x, J_y が理想的な不変量であるなら、その位置は不動であり、少しずつずらして $J_x+J_y=A$ を満足する場所に入れていけば、ビーム分布は J_x-J_y 空間でデルタ関数で表される分布になる、 $f(J_x, J_y)=\delta(J_x+J_y-A)$ 。この分布は実空間で一様分布になる、つまりビームの専有面積に対して最もピーク密度が低い状態になる。この状態はビームの空間電荷力が最も緩やかな状態となる(実際線形力になる)。この J_x-J_y 空間でのデルタ関数的分布をKV分布と呼ぶ。このようなLINACビームを位相空間上に想定したように入射する手法を、ペイント入射と呼ぶ。

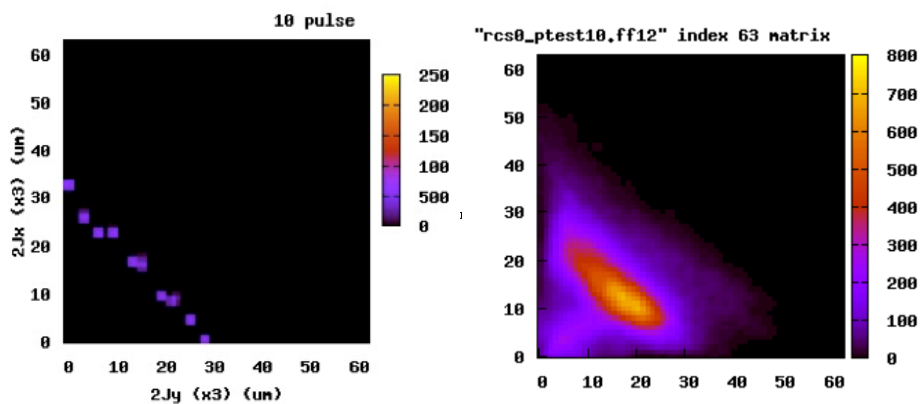


図3: LINACからのペイント入射のシミュレーション例、左図は小電流で位相空間がデルタ関数に近い。右図は大電流で相当な位相空間広がりを持ってしまった例

RCSへの小電流での入射の場合左図のようにデルタ関数を保持することができる。右図のように大電流にして、300発を入射すると、電流が増える毎に空間電荷力が強くなり、デルタ関数から大きくずれてくる。 J_x, J_y の最大振幅がコリメータのアパーチャより大きくなると、そのビーム粒子はロスし、放射能として加速器を汚すことになる。さらに図3右の広がった分布のビームはRCSで加速し、出射、MRへ入射、加速をへてニュートリノラインへ向かうわけであるが、その間にどの程度ビームロスをするか、デルタ関数から始まったビームがどの程度広がっていくかをシミュレーションしている。