

## 論文内容の要旨

## 論文題目

# Experimental Study of a Half Integer Resonance with Space Charge Effects in a Synchrotron

(シンクロトロンにおける空間電荷効果による半整数共鳴の実験的研究)

氏名 上杉智教

粒子加速器のビーム強度を増大するには、機器の放射化を避けるために、ビームロスをも最小限に抑える必要がある。特にビーム強度が増大し、粒子間の相互作用が無視できない場合に、空間電荷効果によるビームロスが深刻な問題を与えると考えられている。空間電荷効果とは、同種荷電粒子間の発散力により、加速器が本来持つ外部集束力が弱められ、さらにそうした集束系の中で粒子の振動（ベータトロン振動）が周期性を持った外場と共鳴することによって起こるというものである。しかしながら、空間電荷効果を考慮したときの共鳴現象は、本来非線形問題であり解析が非常に難しく、詳細なメカニズムに関しては明らかになっていない。

一つの試みとして、ビームサイズの脈動振動を記述するエンベロープ方程式を用いる方法がある。エンベロープ方程式は、定常解が線形の空間電荷力をもつと仮定しているものの、ベータトロン振動と外部の線形力との共鳴（いわゆる半整数共鳴）を考察する有効な手段である。1967年に、Sachererにより一様集束磁場の近似のもとでエンベロープ方程式を用いた解析が行なわれ、その結果（1）ビームサイズの増大が小さければ、半整数共鳴の条件は粒子集団が行なうコヒーレント振動の振動数によって定式化される（2）ビームサイズ増大を考慮した場合、ビームサイズの増大によって空間電荷効果が緩和されるため、共鳴の振動数の条件がずれる。等のことがわかった。しかしながら、空間電荷効果による半整数共鳴現象の実験的検証はまったく行なわれていない。

我々は、実際のシンクロトロンを用いて意図的に半整数共鳴を起こし、ビームの振舞いを観測することによって共鳴の現象を実験的に調べることを計画した。実験の方法は、（1）二台の四重極磁石によってあらかじめ周期的な外場を励起しておく（2）そこへビームを入射して入射エネルギーのまままで周回させる（3）集束磁場強度を時間的に変化させることによってビームのベータトロン振動数を半整数周辺に近付ける（4）ビーム強度を逐次モニターし、ビームが失わ

れる様子を測定する、というものである。実験は、エネルギーが低いために空間電荷効果が顕著に現れるHIMAC重粒子シンクロトロン（放射線医学総合研究所）において行なわれた。特にビームが集団のコヒーレント振動の振動数を把握するため、新たに四極モニターを製作して同シンクロトロンに設置した。

実験の結果、振動数を高い方から共鳴に近付けたときはゆっくりとした、低い方から近付けたときでは急激なビームロスが観測された（図1）。またビームロスがはじまった瞬間のベータトロン振動数はビーム強度が大きいときには高い方へずれることが確認された（図2）。このことは、半整数共鳴の条件が、空間電荷効果によるベータトロン振動数（個々の粒子の振動およびコヒーレント振動）の減少を反映することを示している。

ビームロスの速さの違いは、空間電荷効果によってベータトロン振動数が低くなることから説明できる。ビームの一部が失われれば、空間電荷効果が弱められるため、ベータトロン振動数は高い方へ引き戻される。すなわち、ベータトロン振動数が半整数共鳴線の上側にある時には、ビームロスによってベータトロン振動数が半整数から離れ、逆に下側にあるときには近づく。こうして、ベータトロン振動数を高い方から半整数に近付けた時にはゆっくりとした、低い方から近付けた時は急激なビームロスがおこったと考えられる。

実験結果の解析はシミュレーションとの比較によって行なわれた。シミュレーションにおいても、ビームロスのはじまるベータトロン振動数の値が空間電荷効果のあるときに高い方へずれること、また上側から半整数に近付けた時はゆっくりと、下側から近付けた時は急激にビームが失われることが確認された。また、ビームロスのはじまる前に起こるビームサイズの増大に関しても、上側からベータトロン振動数を半整数に近付けたときはゆっくりと、下側から近付けたときは急激に起こった。rmsビームサイズの増大は、分布によらずエンベロープ方程式を用いて求めたものと完全に一致していた。

ベータトロン振動数を上側から半整数に近付けるシミュレーションを放物線分布のビームではじめた場合、エミッタンスの小さい粒子ほど早くベータトロン振幅が増大し、その結果ビームの中心部の密度が外側よりも早く減少して分布が崩れることがわかった。このことは、エミッタンスの小さい粒子ほど空間電荷効果によるベータトロン振動数の変化が大きく、より半整数に近い値をもつことから理解できる。しかしながら、このような個々の粒子の振幅の増大は分布の変化をもたらすのみで、即座にその粒子が失われることにはならない。

以上をまとめると、

1. 空間電荷効果によるベータトロン振動数の減少を反映して、半整数共鳴のおきるベータトロン振動数の範囲が高い方へずれることが、実験的にはじめて検証された。
2. ベータトロン振動数が高い方から半整数に近付いたときはゆっくりとビームが失われる。したがって、この場合、ビームロスの起きはじめるベータトロン振動数は、アパーチャーに直接依存する。逆に低い方から近付けたときでは急激なビームロスがおきる。
3. 半整数共鳴の近くでのビームの振舞いについて、強集束を用いた実際の

シンクロトロンにおいても、エンベロープ方程式を用いた解析は有効である。

- ベータトロン振動数を上側から半整数に近付けたとき、エミッタンスの小さい粒子ほど半整数に近いベータトロン振動数をもつために、他の粒子よりも早くベータトロン振幅の増大をおこす。しかしながら、このようにしておこる個々の粒子の振幅の増大は、振幅の増大にともなう空間電荷効果の緩和によって制限されている。

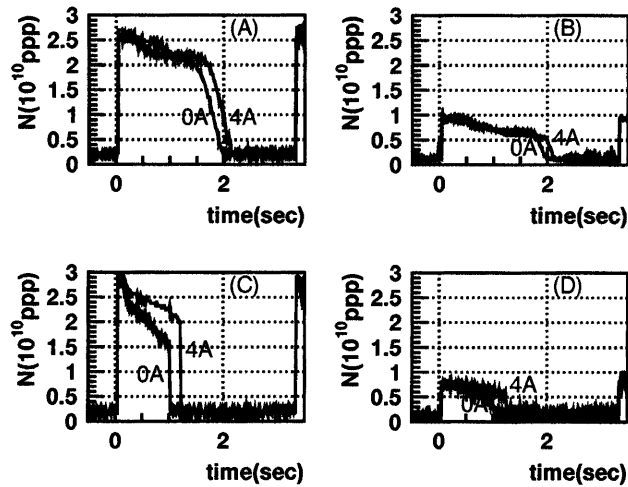


図 1: 半整数共鳴によるビームロスを表す波形。縦軸がビーム強度、横軸が時間で、左上・右上は上側から、左下・右下は下側から半整数のベータトロン振動数に近付けた場合に対応する。また、右側の二つはビーム強度の低い条件での結果。

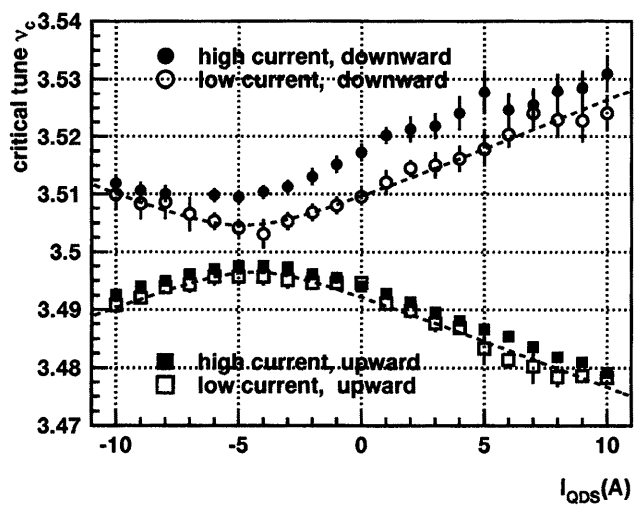


図 2: ビームロスが起きた瞬間のベータトロン振動数を表す図。横軸は、意図的に励起したエラー四極磁場の強度。入射ビーム強度が高い場合と低い場合の比較。入射強度が低いデータは、空間電荷効果を考慮しないで求めた半整数共鳴条件の理論計算（点線）と一致している。