

# 論文審査の結果の要旨

氏名 上杉 智教

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

(シンクロト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)

加速器における粒子ビームの大強度化は、今後の加速器科学が目指すべき一つの方向である。しかし、この大強度化に伴い、空間電荷効果によるビーム・ロスのメカニズムの解明とこのロスの低減が大きな課題となってくる。空間電荷効果とは、ビーム内の荷電粒子間のクーロン斥力のために加速器自体がもつ外部磁場による収束力が弱められ、粒子のベータatron振動数が減少することに伴う効果である。この空間電荷効果は、特にビーム・エネルギーが低い場合に著しいが、もし粒子のもつ振動数が減少して、その振動が周期的な外場と共鳴すると、大きなビーム・ロスを引き起こす。

しかしながら、空間電荷効果を考慮した共鳴現象は解析が難しく、また実験的にもよく調べられていないため、その詳細なメカニズムは明らかになっていない。

論文提出者は、特にビーム・ロスの大きな要因と考えられる半整数共鳴に着目して、空間電荷効果に関するビーム・ロスの実験及びその結果を解釈するための計算機シミュレーションを行い、これを本論文としてまとめている。

本論文は、4章と付録Aから構成される。第1章は、序論として研究の背景、目的等について記述している。第2章は、放射線医科学研究所（放医研）の加速器 HIMAC における四重極振動モニタの開発とビーム実験、第3章は、シミュレーションの方法と結果、第4章は、実験結果と計算結果との比較及び考察について述べている。また、付録Aでは、粒子の運動の線形理論、空間電荷効果を取り入れた envelope 方程式とその解析解について解説している。また、四重極モニタにビームが誘起する電圧についても記述している。

第1章では、まず、空間電荷効果によるビーム強度の限界について略述し、単粒子的な（インコヒーレントな）効果でなく、集団的な（コヒーレントな）効果を取り入れることの重要性が述べられている。これに関連して、F. J. Sacherer による、一様収束場近似の envelope 方程式を用いた電荷効果の解析について解説している。また、他の施設で行われた空間電荷効果に関する実験結果についてもレビューしている。これによれば、インコヒーレントなチューンによる共鳴でビーム・ロスが起きているのではないということが示唆されている。

第2章では、まず本研究で用いた放医研の HIMAC 全体の説明をし、実験に用いたビームモニタ、共鳴幅をコントロールする四極電磁石、四重極モードを励起するための RF

quadrupole について述べている。さらに、論文提出者が自ら開発した四重極ビームモニタ (quadrupole beam monitor) について、その原理と製作、キャリブレーション及び HIMAC でのビーム試験について述べている。この四重極ビームモニタのビーム試験では、コヒーレントな四重極振動及び二重極振動の 2 次高調波が観測され、四重極振動数は、空間電荷効果によりビーム強度に依存するが、二重極振動数にはその依存性ないということがはっきりと実験的に検証された。

また、この章の後半では、本研究の目的である (垂直方向の) 半整数共鳴付近での空間電荷効果を調べるために行われた実験の方法とビーム実験の結果 (Sec. 2.3.1: 入射ビームのプロファイル測定、Sec. 2.3.2: チューン測定、Sec. 2.3.3 and 2.3.4: チューン・シフトのビーム強度依存性及び垂直方向のエミッタンスの推定、Sec. 2.4.1: チューンが半整数共鳴を横切るための方法、Sec. 2.4.2: ビーム・ロスのチューン依存性及びビーム強度依存性の測定) について述べられている。

第 3 章では、まず、マクロ粒子による計算機シミュレーションの方法 (HIMAC のモデリング、空間電荷効果を取り入れたマクロ粒子による計算手法、粒子の初期分布の取り方、シミュレーションから意味のある物理量を求める方法、その他の各種パラメータの選択等) について詳述されている。次に、この方法を適用して、半整数共鳴をチューンが横切る時のビーム・ロスの振る舞いやビームサイズの増大等について、シミュレーションを行っている。

第 4 章は、第 2 章における HIMAC での実験結果と第 3 章におけるシミュレーション結果の比較と、それについての考察に当てられている。実験と計算の結果は、細かい点で差異はあるものの、よく一致している。

結果比較及び考察を要約すると、(1) 空間電荷効果がない場合には、ビーム・ロスが起きるチューンの上限と下限は、単粒子的描像で決まる半整数共鳴の上限・下限とよく一致して、(2) 空間電荷効果がある場合には、この効果によるチューン・シフトのために、ビーム・ロスが起きるチューンの上限・下限は高い方向にずれる、(3) チューンが高い方から半整数に近づく場合には、ビーム・ロスは徐々に起きる。これは、ビーム・ロスによってビーム強度が減少するため、チューン・シフトが小さくなり、チューンが高い方に引き戻されるためであると解釈できる。また、この場合、半整数共鳴によるベータatron 関数の増大に伴ってビーム・サイズが徐々に増大するということがシミュレーションで示されている。(4) 逆に、チューンが低い方から半整数に近づく場合には、急激なビーム・ロスが起きる。これは、ビーム・ロスが起きるとチューンが高い方向にずれ、さらにビーム・ロスを引き起こすという、一種の positive feedback となるためであると解釈できる。このような現象は、ビーム・サイズの増大についても、全く同様になると考えられるが、シミュレーションでは、この急激なサイズの増大とビーム・ロスが同時に起きることが示されている。

以上のように、本研究は、半整数共鳴付近での空間電荷効果を実験的に詳細に調べたものであり、この研究により空間電荷効果によるチューン・シフトのために、ビーム・ロスが起こるチューンの閾値が上方にずれるということを実験的に初めて検証したものである。また、チューンが半整数の上側から近づく場合と下側から近づく場合とでは、ビーム・ロスの様子が大きく異なるということも見いだしている。さらにシミュレーション結果は実験結果と定性的によく一致することを示した。大強度加速器においては、今後、ビーム・ロスのメカニズムの解明が非常に重要になると広く認識されているが、この研究は、空間電荷効果によって生じるビーム・ロスのメカニズムを、半整数共鳴について、実験及びシミュレーションによって明らかにしたものであり、その学術的意義は大きいと判断される。

よって、博士（理学）の学位を授与できると認める。