

氏名	いけ がみ まさ ひろ 池 上 将 弘
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2863 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Beam dynamics in a dispersionless ion storage ring (無分散イオン蓄積リングにおけるビーム運動学)
論文調査委員	(主 査) 教授 野田 章 教授 今井 憲一 教授 阪部 周二

論 文 内 容 の 要 旨

イオンビームの結晶化に関しては線形のイオントラップにおいては 3 次元のクーロン結晶が実現しているが、ドップラー効果が有意に作用するような高速のイオンビームを蓄積リング中で結晶化させる試みは、偏向要素中の軌道の運動量分散に起因する shear heating のため未だ実現するに至っていない。本研究は、リング中の偏向要素に生じる軌道の運動量分散を磁場に電場を重畳することによりキャンセルアウトし、リング全周にわたって無分散化することにより、shear heating を抑制して、こうした状況を克服する事を試みている。ビームの結晶化のためには、レーザー冷却のような強力な冷却力が必要とされるが、通常のレーザー冷却はビーム進行方向のみに作用するので、3 次元的な冷却を行うためには、縦方向と横方向のカップリングが必要となる。無分散化したリングでは有限の dispersion function の位置に縦方向加速空洞を設置する手法は適用できず、動径方向の位置に依存して異なる縦方向加速電場を発生できるカップリングキャビティーを用いて 3 次元レーザー冷却を行うスキームを採用している。蓄積リングとしては、京都大学化学研究所で建設中のイオン蓄積リング S-LSR を想定し、この 6 台の偏向電磁石中に電場を重畳することで上記の無分散化に挑戦している。

具体的には 35 keV の $^{24}\text{Mg}^+$ を想定し、周長 22.6 m、超周期 6 の S-LSR における 3 次元結晶化ビームの実現を目指している。理論的な計算から 3 次元結晶化のためには、(1)イオンビームのエネルギーがリングの遷移エネルギーより低い、(2)水平、垂直両方向のベータatron振動数が $N/2\sqrt{2}$ (N はリングの超周期) より小さい、という 2 つの maintenance condition を満たしている必要が有る事が判っているが、S-LSR は通常の磁場のみの偏向電磁石を用いるモードの (1.46, 1.46) の動作点では、これらの条件を満たしており、2 次元までの結晶化は容易であると期待されている。本研究はこれをさらに発展させ、3 次元に拡大するという野心的な取り組みといえる。

S-LSR の偏向電磁石は 70 mm のギャップ中に最大 0.95T の磁場を発生できる設計となっているが、35keV の $^{24}\text{Mg}^+$ を無分散化して周回させる場合には 0.25T の磁場を逆向きに偏向する $6.67 \times 10^2 \text{V/cm}$ の電場と重畳させて用いる事になり、放電等に関しては特段の問題は生じないが、70 mm という限られた電磁石ギャップ中に設置される真空槽中に上記の電場を実現することが最大の課題となる。本研究に於いては、70mm のギャップ中に設置された内法 45mm の真空槽中に高さ 26mm のシリンダカル形状の主電極を 30mm 間隔で設置し、これら主電極間のギャップの上下に複数 (上下各 4 本) の中間電極を追加することで必要な電場の精度を確保するスキームを提案し、実際に製作を行っている。このデザインの採用により、結晶化に向けた冷却イオンビームの周回に必要なとされる平衡軌道を中心とする $\pm 10\text{mm}$ の領域で 1×10^{-3} より高精度の電場を実現できることを 2 次元電場計算により示している。

本研究では、上述の maintenance condition の要請から来るリングの超周期性の重要性にも留意し、電磁石の設計・製作において、極力個性差を抑え、また多極成分の発生も抑えるための努力を傾注している。具体的には、2 次元の計算機コード POISSON による磁場計算に加えて、電磁石端部での磁場分布に関しては、3 次元磁場計算コード TOSCA を用いた解析を駆使し、フリンジング領域における磁場分布を正確に算出し、多極成分の抑制のために設計に工夫を凝らすと共に、製

作された6台全ての電磁石について、ホール素子を用いた詳細なマッピングを遂行し、個性差による閉軌道の歪みを最小化する電磁石配置を求めている。この磁場のマッピングデータは、上述の電場を磁場と重畳させる無分散偏向要素の設計の際に、電場と磁場の有効長を一致させるためにも重要な情報として活用されている。

以上のように、本研究は無分散偏向要素により、shear heating の効果を抑えて3次元結晶化イオンビームの実現を目指すスキームを提案しているが、当面想定している S-LSR では曲率半径が 1.05m と比較的小さいため偏向部での radial focusing の効果が大きいこと及び超周期が6と限られている事情のため、前述のようなシリンダカルな形状の主電極で実現できる、曲率半径に逆比例する電場では、2番目の maintenance condition を満たす動作点が実現できないことが計算機解析により判明した。この点に関しても先に述べた中間電極にかけるポテンシャルを調整することにより、半双曲電極によって実現される動径方向に一樣な電場分布を近似的にビームアパーチャー全体にわたって実現できることを2次元電場計算によって示し、maintenance condition を両方とも満たしつつ無分散化を実現して、shear heating を抑え、イオンビームの3次元結晶化に肉薄するスキームを提示している。

論文審査の結果の要旨

申請者は、イオントラップに於いて実現しているクーロン結晶を、高速で蓄積リング中を周回するイオンビームについても、レーザー冷却の強力な冷却力を用いて3次元的に実現する可能性を追求してきた。通常のレーザー冷却では、ビームの進行方向の温度しか冷却できないが、申請者は縦方向の運動エネルギーを横方向の運動エネルギーとカップリングさせる手法により3次元的なレーザー冷却を行うことを想定し、安定な3次元結晶の実現を追求している。この目的のためには、(1)イオンのエネルギーがリングの遷移エネルギーに比して低い、(2)イオンのベータatron振動の振動数が、リングの超周期 N を $2\sqrt{2}$ で除した値より小さい、という2つの条件(Maintenance Condition と称している)を満たすことが必要であることが、理論的に知られているがこれに加えてビームの平衡軌道がエネルギーの違いにより異なることに起因する shear heating の存在が、3次元結晶化ビームの実現に大きな障害となってきた。申請者はこの状況の克服のため、蓄積リングの偏向部に磁場に電場を重畳させたシステムを用いることにより、リング全周にわたって軌道のエネルギー分散をキャンセルアウトし、無分散化したラティスを実現することにより、shear heating の効果を避ける手法を提案している。電場を磁場と重畳することによりビーム軌道の運動量分散を打ち消して軌道のオーバーラップを図るという手法は、つとに質量分析等の分野において知られており、目新しいものではないがこれをリングに適用し、ビームの3次元の結晶化に結びつけるという試みは世界初であり独創的といえる。

上記の目的のため申請者は、磁場と電場を重畳したイオン光学要素の数学的な定式化に取り組み、Hamiltonian 形式及び Transfer Matrix を用いた解析を用いて、具体的な京都大学化学研究所で建設中のイオン蓄積・冷却リング S-LSR に適用したビームダイナミックスの計算を実行し、無分散化したラティスについて軌道解析を行っている。これにより偏向部のポテンシャルによる加減速による速度の違いを用いて、軌道長の差を打ち消すことが出来、shear heating を抑制できることを示している。

申請者は上述のスキームを現実のハードウェアで実現することにも意を用い、ギャップ 70mm の偏向電磁石中に設置される内法 45mm の真空槽中に設置可能な高さ 26 mm のシリンダー状の一对の主電極に、これらの間の上下に設置される複数(上下各4本)の中間電極を組み合わせることで、必要な精度の電場を実現する設計を提示し、実際の電極の製作を実行に移している。

S-LSR の場合には曲率半径が 1.05 m と比較的小さく、また超周期も6と限られていることから、磁場に重畳する電場として通常の1対のシリンダー形状の電極で実現される動径に逆比例する電場を用いる条件では、前述の2番目の maintenance condition を満たす解が存在しないことを突き止めている。更に、その解決策として、半双曲型電極で実現出来る動径方向に一樣な電場を用いれば maintenance condition を満たす無分散化ラティスが実現できることを示した上で、先に述べた中間電極に印加するポテンシャルの調整により、このような動径方向に一樣な電場が製作の簡単なシリンダー形状の主電極を用いて近似的に実現可能であることを示し、maintenance condition を満たしつつ、shear heating を避けるスキームを提示している。これはイオンビームの結晶化に向けた整合性のある手法を世界的にみても初めて提示したものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。