

Beam dynamics at ion storage ring S-LSR

M. Ikegami^{1,A)}, H. Okamoto^{B)}, T. Shirai^{A)}, H. Souda^{A)}, M. Tanabe^{A)}, A. Noda^{A)}, K. Noda^{C)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokanosyo, Uji-City, 611-0011, Kyoto, Japan

^{B)} Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-City, 739-8530, Hiroshima, Japan

^{C)} National Institute of Radiological Science, 4-9-1, Inage-Ku, Chiba-City 263-8555, Chiba, Japan

Abstract

Heavy ion storage ring S-LSR is now under construction at Institute for Chemical Research, Kyoto University. S-LSR has an electron cooler, a laser cooling system and the suitable lattice structure for generating ultimate low emittance beams. The existing beam cooling method in S-LSR is expected to generate a very high quality low temperature beam. Furthermore, if a strong three dimensional cooling force is available, the generation of a crystalline beam which is ultimate low temperature beam is also expected. When one aims at the generation of crystalline beams having more particles, the heating mechanism induced by dispersion at the bending section becomes the problem. In order to solve this problem, at S-LSR, new lattice elements which include an electrostatic field in addition to the magnetic field are introduced.

イオン蓄積リングS-LSRにおけるビームダイナミクス

1. はじめに

レーザー冷却では他の冷却法よりも強力な冷却力が得られるため、これをビームに適用した場合、非常に低温のビームを得ることができる。しかしレーザー冷却可能なビームは特定のイオンビームに限られ、レーザーを照射した方向のエミッタンスしか下げられないという問題もある。あらゆる方向のエミッタンスを効率よく下げるためには、結合高周波空洞^[1]を導入し人為的にビーム進行方向と横方向の運動に結合を持たせるか、運動量分散を利用し通常の高周波空洞を介してビーム進行方向と横方向の運動を結合させる必要がある^[2]。このような強力な3次元冷却力が確保できれば、これまででない高品質の低エミッタンスのビームが得られ、さらには、イオントラップ中のクーロン結晶と同様の幾何構造をもつクリスタルビームまで生成できると考えられている。加速器の四重極磁石等のビームを収束させる外場を同様収束場で置き換えたモデルでビームを三次元的に冷却した場合のシミュレーションではクリスタルビームの生成が報告されている^[3]。実際の加速器ではビームを閉じ込める外場はそのラティス構造に応じて周期的に変化する。またビームは同一荷電粒子の集合であるから、冷却が進むにつれてクーロン斥力によって実効的なチューンは次第に低下していく。周期的に変化する外場とベータatron運動の周期が特定の関係を満たすと共鳴が起こりビームは不安定になる。ビームが冷却過程でこのような共鳴に遭遇するとビーム冷却が阻害され、到達可能なビームの温度は制限されてしまうことが知られている。様々な研究から、リングが以下の2つの条件を満たす動作点を持たればビームは強い冷却阻害を受け

ることなくクリスタルビームまで至ることができる^[4]。

- (1). ビームのローレンツ因子 γ がトランジションエネルギー γ_t 未満

$$\gamma < \gamma_t$$

- (2). ベータatronチューン $\nu_{x(y)}$ がリングの周期 N_{SP} を $2\sqrt{2}$ で割ったものより小さい

$$\nu_{x(y)} < N_{SP} / 2\sqrt{2}$$

2. S-LSRのラティスパラメーター

京都大学化学研究所では放射線医学総合研究所と共同でイオン冷却、蓄積リングS-LSRを建設中である^[5]。S-LSRではレーザーイオン源で生成された高温イオンビームの電子冷却のほかレーザー冷却による極低温ビームの生成実験も行われる。

S-LSRのラティス構造は極低温ビーム生成のための条件(1),(2)を考慮に入れて設計されている。主なパラメーターを表1に、1超周期の構造を図1に示す。

表1. S-LSRの主なパラメーター ($^{24}\text{Mg}^+$ のレーザー冷却時)

Quantity	Value
イオン種	$^{24}\text{Mg}^+$
ビーム運動エネルギー	35 keV
リング周長	22.557 m
偏向部曲率半径	1.05 m
超周期の数	6

ビーム偏向部の曲率半径は小さいので偏向要素自身が持つ動径方向の収束力も無視できない効果を持つ。図1の二つの四重極磁石の磁場勾配 k_1, k_2 をパラメーターとしてベータatron運動の安定領域を求めると

¹ E-mail: ikegami@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

図2に示したような領域が安定であることが分かる。

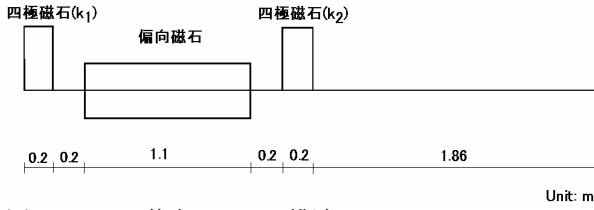


図1. S-LSRの基本ラティス構造

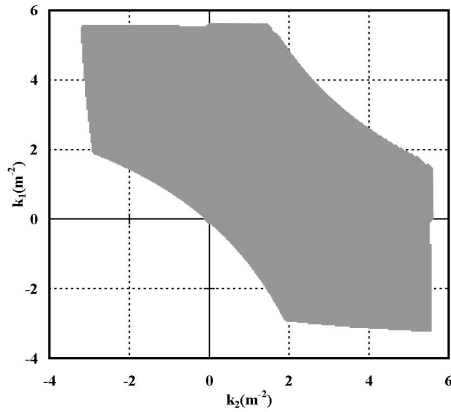


図2. 図1の2つの四重極磁石の磁場勾配 k_1, k_2 をパラメータとしたときのベータトロン運動の安定領域。正の k は四重極磁石が水平方向に発散作用を持つことを示す。偏向磁石の水平方向の収束力が大きいため2つの四重極磁石が同時に水平方向に収束作用を持つことは許されない。

図2のベータトロン運動の安定領域内の多くの動作点で極低温ビーム生成のための条件(1),(2)を満たすことができる。S-LSRでは当初は運動量分散を利用し通常の高周波空洞で共鳴結合法による3次元レーザー冷却を行う予定である。この手法で3方向に均等な冷却力を得るためには、ベータトロンチューン ν_x, ν_y とシンクロトロンチューン ν_s の間に差共鳴条件

$$\nu_x - \nu_y \approx \text{整数} \quad \nu_x - \nu_s \approx \text{整数} \quad (1)$$

が成り立っていないなければならない。ベータトロンチューン(1.45, 1.43)の動作点は $\nu_{x(y)} < N_{sp}/4$ ^{[6][7]}を満たしており低次の共鳴の影響を受けにくく、安定なクリスタルビームを生成するのに最も適していると考えられる。しかし、この動作点で、式(1)の共鳴条件を満たして3次元冷却を行うにはシンクロトロンチューンを高く設定する必要がある。これを実現するためには極めて高性能の高周波空洞が必要である。したがって、この動作点で実験的に極低温ビーム生成を目指すには、高性能の高周波空洞を導入するか、共鳴条件を完全に満たしていないビームや連続ビームに対しても適用可能な新たな3次元冷却法が必要であると考えられる。

S-LSRの現有の装置で3次元冷却が可能でかつ極低温ビームの条件を満たす動作点として、ベータトロンチューン(2.067, 1.073)のものが考えられる。この動作点では共鳴条件を満たすためのシンクロトロ

ンチューンは比較的低い。分子動力学法に基づいたビームシミュレーションコードCRYSTALを用いたシミュレーションの結果は、粒子数が少ない場合、この動作点で1次元構造を持ったクリスタルビームが生成できることを強く示唆している^[8]。

3. 静電場と静磁場を重畳した加速器要素

3.1 Dispersion-suppressor

クリスタルビームの構造は、それを構成する粒子数が増加するにつれて1次元紐状構造から、2次元ジグザグ、3次元殻構造へと変化していく^[9]。3次元構造を持ったクリスタルビームは必然的に水平方向に広がりを持つ。通常のレーザー冷却力はビームを構成する全粒子の縦方向運動量をそろえるように作用する。この場合、水平方向に有限の広がりをもつクリスタルビームでは、偏向磁石を通過する度に軌道の外側に位置する粒子が内側の粒子に比べて遅れることになりその構造は歪みを受けてしまう。つまり、極低温状態では通常の冷却力はかえってビームを加熱してしまうのである。結果として、結晶構造を安定に維持できない可能性も生じる。この問題を解決するには、ビーム偏向領域では外側の軌道を通る粒子ほど大きな運動量をもつような定常状態を実現する必要がある。

通常の偏向磁石のギャップ内に静電デフレクターを組み込み、電場と磁場を併用してビームを偏向するdispersion-suppressorは3次元結晶構造の分散的加熱効果を軽減する新たな解決策として最近提案された。Dispersion-suppressorはその名の通りビーム偏向部での運動量分散によるビームの広がりを抑制することを可能にする。クリスタルビームに対しては、その静電ポテンシャルの加減速の効果で外側軌道を周回する粒子と内側軌道を周回する粒子の偏向部の通過時間を等しくすることができる。一見、独立に見えるこれら効果はハミルトニアンで記述すれば、分散を生み出す、水平方向の座標とビーム進行方向の運動量の結合項が静電場の導入によって消去されることに帰着することが分かる^[10]。

ビーム偏向部にDispersion-suppressorを導入した蓄積リングでの極低温ビームの生成条件(1),(2)を考える。まず、線形分散が無くなるためトランジションエネルギーは原理的には無限大になり、(1)の条件はラティス構造に依らず必ず満たされる。(2)の条件はラティス構造によって変わるが、大きな超周期を持つリングでは満たされる。

次にS-LSRへの応用を考える。S-LSRでdispersion-suppressorを実現するためには偏向磁石のギャップ内に静電デフレクターを挿入する必要がある。偏向電磁石のギャップは70 mm、偏向角 60° エッジ角 0° である。静電デフレクターを偏向電磁石の真空槽に挿入した場合、電極のすぐ上下に真空槽の内壁等の導体が存在することになる。そのため、電極間に出来る電場は弱くなり、その分布も理想値から著しくずれる。この問題を解決するため、中間電極を

持った静電デフレクターを採用し発生させる電場の強度、一様性を向上させた。電極の間隔は30 mmで製作されている。また、磁場のみでイオンを蓄積する場合もあるため静電デフレクターはビーム通過領域の外へ退避させることが出来る。S-LSRでは運動エネルギー35keVの $^{24}\text{Mg}^+$ ビームのレーザー冷却を行う予定である。このビームを、分散を最小に抑えた状態で蓄積するのに必要な電場、磁場はそれぞれ 6.67×10^{-4} V/m, 0.252 Tである。これらは製作した静電デフレクター、磁石で十分達成可能である。

3.2 テーパー冷却

ビーム偏向部でクリスタルビームが受ける歪みを回避するもう一つの方法として外側の軌道を通る粒子ほど大きな運動量をもつような定常状態を実現する特殊な冷却力を利用する方法がある。このような平衡状態を生み出す特殊な散逸力はテーパー冷却力として知られている^[11]。しかし、実現するためには波長が場所によって異なる特殊な光（テーパー光）を用意する必要があり技術的に難しい。

テーパー冷却を比較的容易に実現する方法として我々はWien Filterを利用する方法を考えている^[12]。Wien Filterはdispersion-suppressorと同様、双極磁石と静電デフレクターを組み合わせ、ビーム進行方向に垂直な方向の磁場と電場を重畳することで実現できる。Dispersion-suppressorとの違いは電場と磁場の強度の比でWien Filterの場合はビーム偏向作用がない。Wien Filter内部だけでレーザー冷却が起きるようにすれば静電ポテンシャルの効果で、その外部では軌道位置によって異なる運動量を持つ平衡状態が実現できる。外側軌道と内側軌道の粒子につく速度差は電場、磁場の強さを変えることで調整できる。

Wien Filterを実際にS-LSRのリング直線部に組み込む場合、ビーム入射系、電子冷却装置のスペースの都合から6カ所の直線部のうち1カ所にしかWien Filterを導入できない。また、その直線部でも全体をWien Filterで占めることはできず、テーパー冷却を実現するためにはWien Filter部だけ少しビーム軌道をずらしておく必要がある（図3）。

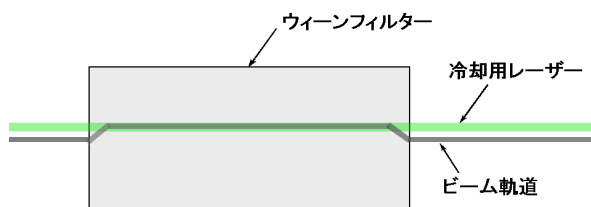


図3 テーパー冷却時のWien Filter、ビームとレーザーの位置関係

このような操作を行った場合、リングの対称性は1になってしまう。するとクリスタルビーム生成の条件(2)を満たす動作点はなくなってしまうという問題が生じる。

4. 要約、問題点

S-LSRでは現有の装置でも1次元構造を持ったクリスタルビームまでは生成可能であると考えられる。3次元的構造を持った比較的粒子数の多いクリスタルビーム生成を目指す場合はテーパー冷却かDispersion-suppressorを利用する必要がある。

Dispersion-suppressorを用いる方法では分散が極めて小さく抑えられてしまうため、通常の高周波空洞で3次元冷却を行うことはできない。3次元冷却を行うためには新たに結合高周波空洞を導入する必要がある。S-LSRではクリスタルビームの条件(1),(2)を満たす動作点は存在するものの比較的チューンが高いため低次の線形共鳴の影響を受ける可能性もある。しかし、分散がないためバンチされたクリスタルビームの揺らぎが起らないという利点もある。

Wien Filterを用いたテーパー冷却で、ラティスの対称性が崩れ、クリスタルビームの条件(2)を満たす動作点が無くなってしまう問題は、Wien Filterの電磁場を時間的に変化させることで回避できる可能性がある。冷却を開始する段階ではWien Filterは使用しないでおく。この段階ではリングの対称性は6のままである。冷却が進み十分なチューンディプレッションが起り、レーザー冷却力が逆に加熱作用を持つ程の極低温状態に至った後にWien Filterに電磁場を印加し適切なテーパー因子を持たせれば安定な3次元構造を持ったクリスタルビームが生成できる可能性がある。

上記の問題では、いずれも空間電荷効果の影響が無視できないためシミュレーションコードCRYSTALを利用して調査を行う予定である。

謝辞

本研究は文部科学省の先進小型加速器開発の支援を得て遂行された。また、京都大学の21COEプログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」及び「京都大学化学連携研究教育拠点」からもご支援を頂いた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- [1] H. Okamoto, A. M. Sessler, D. Möhl, Phys. Rev. Lett. **72**, 3977 (1994)
- [2] H. Okamoto, Phys. Rev. E. **50**, 4982 (1994)
- [3] A. Rahman and J. P. Schiffer, Phys. Rev. Lett. **57**, 1133 (1986).
- [4] J. Wei, H. Okamoto, and A. M. Sessler, Phys. Rev. Lett. **80**, 2606 (1998).
- [5] A. Noda, Nucl. Instrum. Methods A. **532**, 150 (2004)
- [6] H. Okamoto, AIP Conf. Proc., in press.
- [7] H. Okamoto, Nucl. Instrum. Methods A. **532**, 32 (2004)
- [8] Y. Yuri and H. Okamoto, Phys. Rev. Lett. **93**, 204801 (2004)
- [9] R. W. Hasse and J. P. Schiffer, Annals Phys. **203**, 419 (1990).
- [10] M. Ikegami, A. Noda, M. Tanabe, M. Grieser, H. Okamoto, Phys. Rev. ST Accel. Beams **7**, 120101 (2004)
- [11] H. Okamoto, J. Wei, Phys. Rev. E. **58**, 3817 (1998)
- [12] A. Noda and M. Grieser, Beam Science and Technology, **9** (2004)pp12-15.