



小特集用語解説

ビーム冷却 Beam Cooling

蓄積リングに貯められた粒子群はリング内を有限のエミッタンスと運動量幅を持って運動している。別の表現をすれば、水平・垂直および進行方向の3つの自由度に対する六次元位相空間内で粒子に対応する代表点が有限の体積を持って散らばっている。ビーム冷却とは、ビームを失うことなくこの位相空間内での代表点密度を高めることである。加速器物理学の発展の歴史の中で、ビーム冷却が果たしてきた役割はきわめて大きい。ビーム冷却が可能となるまでは、ビームの力学は基本的にリュービルの定理に支配されていたわけで、ビーム輸送系や加速などのどの過程においても位相空間体積一定の条件から逃れることはできなかった。ビーム冷却が可能になったことにより、位相空間体積を増大させることなく電子・陽電子ビームを大量に蓄積できるし、また蓄積されたビームの密度を上げて高輝度にする、二次ビーム（反陽子や不安定原子核など）をリング内に逐次蓄積しビーム強度を増やすこと、残留ガスやリング内に設けられた内部標的などによるビームの拡散過程を押さえ込むこと、様々なビーム不安定性によるビーム振幅の増大を抑えることなどが可能になった。ビーム冷却法として現在までに確立しているものは、(1)放射冷却、(2)ストカステック冷却、(3)電子ビーム冷却、(4)レーザー冷却の4種類である。また、(5)エネルギー損失冷却法がミュオンビームの冷却に有望ではないかと最近精力的な検討が行われ始めている。上記のビーム冷却法の特徴をまとめると以下ようになる。(東大原子核 片山武司)

	ストカステック冷却	電子冷却	放射冷却	レーザー冷却	アイオニゼーション冷却
適用可能な粒子種	全ての粒子	イオン	電子・陽電子	幾つかの限られたイオン種	ミュオン
ビームエネルギー	任意	中間(0.01 β <math>< 0.1</math>)	高いほど効果的	任意のエネルギー	0.3 GeV 以上
ビーム強度	小	任意	任意	任意	任意
冷却時間	粒子数 $\times 10^{-8}$ 秒	1 ~ 10^2 秒	~ 10^{-3} 秒	10^{-4} ~ 10^{-5} 秒	10^{-4} ~ 10^{-5} 秒
効果的冷却のためのビーム温度	高	低	任意	低	任意

バンチング Bunching

低エネルギー領域ほど空間電荷効果が大きく影響するため、輸送可能な重イオンビームの電流限界は小さくなる。したがって、重イオン慣性核融合の加速器システムでは、燃料標的照射に必要な大電流を達成するために様々なビーム操作を行い、ビームエネルギーの増加に応じて電流値を大きくしていく方法が用いられる。複数のビームを足し合わせることをマーキング、加速電圧に時間勾配をつけ、イオンの飛行時間差を利用して加速軸方向にビームを圧縮することをバンチングと呼ぶ。バンチング操作を行うと、必然的に運動量幅が大きくなりビーム輸送が難しくなる。したがって、通常は標的照射直前に蓄積リングや線形加速器の加速電場に変調をかけて、ビーム出力を増大させる。ビーム圧縮過程に伴う運動量拡がりや空間電荷効果が増加する状況の中で、いかにビーム品質を維持するかが物理的課題であり、エミッタンスの成長を調べる実験や粒子シミュレーションによるビーム運動の解析が行われている。現在、RF 電場に変調をかける方式と誘導加速電場を利用したバンチング方式が検討されているが、高精度の変調をかけることや加速空洞を高繰り返し動作させることが重要な技術的課題である。重イオンドライバーにはkA級のビーム電流が必要であり、最終段階でのビーム圧縮が特に重要である。RF 加速器、インダクション加速器いずれをベースにした重イオンドライバーを想定するにしても、最終輸送領域ではインダクションライナックを用いたバンチングにより大電流化することが検討されている。

(東工大総理工 堀岡一彦)

プラズマ標的 Plasma Target

レーザー核融合と同様、重イオン慣性核融合においても燃料標的はビーム照射前には極低温状態（水素同位体燃料を固化させるため）にある。しかしビーム照射開始とともにこの標的は瞬時にプラズマ化し、その後はこのプラズマをビームが引き続き加熱する。したがってビームから見れば標的はその照射時間のほとんどにおいてプラズマ状態にあり、これが「プラズマ標的」である。高エネルギー密度プラズマ中の重イオンビームのエネルギー付与過程を正しく評価することは、重イオン慣性核融合の加速器システムや燃料標的の設計に不可欠である。現段階では十分な照射強度を実現できる加速器は存在しないので、基礎研究としての重イオンビーム・高温プラズマ相互作用を調べるために標的として用いられるプラズマを指す。Z放電、レーザー照射や爆発に伴う衝