

氏 名 神 藤 勝 啓

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第245号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 表面生成型負水素イオン源での高速パルスビームの生成

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 山崎 良成
教 授 山根 功
助 教 授 笹尾 眞實子
助 教 授 入江 吉郎
助 教 授 齊藤 芳男
教 授 森 義治（東京大学）

論文内容の要旨

近年、大型ハドロン計画（JHP）のような高エネルギー大強度陽子ビームを用いる計画が進められている。JHPでは、陽子シンクロトロンで50GeVの高エネルギーで 2×10^{14} pppという大きなビーム強度を達成しようとしている。シンクロトロンでできるだけ多くのビームを加速するためには、ビーム自身の作る空間電荷による発散をなくすようにしなければならない。このため、ビームのラインデンシティが小さく、すなわちバンチングファクターの大きなビームにする必要がある。

リニアックからシンクロトロンへビームを入射する際に、通常は連続的なビームを入射している。シンクロトロンでの粒子の捕獲法は、RF加速電圧を断熱的に増加させるadiabatic capture法が用いられる。しかし、この方法ではRF bucketの先端の部分の粒子は、bucketからこぼれてしまい、ビームロスとなる。また、この方法では、RF bucketに入ったビームの縦方向のエミッタンスを制御して、ラインデンシティ或いはバンチングファクターを変えることができない。

シンクロトロン内での縦方向エミッタンスを調整するためには、予め入射するリニアックビームの段階から、シンクロトロンのRF bucketに同期した高速パルスビームを生成し、ビームをRF bucket内の自由な位相に入射できるようにする必要がある。入射ビームの位相をシンクロトロンのRF bucketの中心位相に対して、いくらかずらして入射し、シンクロトロンで加速中に、シンクロトロン振動でビームをRF bucket内に広げることによって、ラインデンシティを低下させることが可能である。

イオン源からリニアックの間のビーム輸送系に、横方向にビームを偏向してチョップする方法が一般的に用いられている。しかしながら、この方法ではチョッパーの静電場は空間電荷中和効果に影響を与える。その結果、輸送系のミスマッチが生じ、空間電荷力の非線形性によるエミッタンスの増加が引き起こされる。もしイオン源でビームを生成する段階でビームをチョップすることができれば、このような影響が生じずに、シンクロトロンに入射することができる。

高エネルギー物理学研究所陽子加速器では、負水素イオン生成には表面生成型負水素イオン源を用いている。このイオン源では、プラズマチャンバー内に設けられたプラズマに対して負にバイアスされた金属表面とプラズマ中の粒子との相互作用により負水素イオンが生成される。この金属は一般にコンバータと呼ばれる。プラズマチャンバーにはCs等のアルカリ金属を導入して、コンバータ表面に半原子層を形成することで、コンバータの仕事関数を低下させる。低仕事関数のコンバータ表面から電子がトンネル効果により水素原子に遷移することにより、負水素イオンの生成が行われる。負水素イオンの生成量は、プラズマとコンバータの間に印加されるコンバータ電圧によって変化する。従って、パルス的にコンバータ電圧を変調することで、負水素イオンビームのチョッピングが可能となる。高速パルスビームを生成するために、通常は直流のみ印加しているコンバータ電圧に、高周波電圧を重畳して、コンバータ電極に印加した。

負水素イオンの表面生成は、コンバータ表面に吸着している水素原子が脱離するとき、金属表面から電子を1つ受け取って脱出することによって生成される。コンバータ表面に吸着している水素原子は、プラズマ中の正イオンの入射により、コンバータ表面から脱離

する。負水素イオンの生成量は、入射正イオン量と、入射正イオンによるコンバータ表面での水素原子の脱離する割合と、コンバータ表面から脱出するときの負イオンの生存確率の積という形で表される。

入射する正イオン量は、プラズマ密度により制限される。このときの電流量は、イオン飽和電流から求められる。

入射正イオンによるコンバータ表面での水素原子の脱離する割合は、Sigmundのスパッターリングの模型を用いて計算を行った。入射する正イオンには、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 、 Cs^+ の4種類のイオンがある。これらの各種正イオンがコンバータ表面に入射したときに、脱離する水素原子の量の正イオンの入射エネルギーに対する変化を計算した。

通常、プラズマに対してコンバータ表面は約500V程度の負電圧を印加している。入射正イオンのエネルギーが100eV以上のところでは、 Cs^+ による水素原子の脱離量が、他の正イオンに比べて圧倒的に大きいことが分かった。負水素イオンの生成には、 Cs^+ により脱離した水素原子によるものと思われる。

脱離した水素原子は、コンバータ表面との相互作用によりコンバータ表面から更にもう一つ電子を受け取ることによって、負水素イオンとなる。付加電子と水素原子との結合エネルギーは、電子親和力という量で定義される。この電子親和力の準位は、コンバータ表面に近づくと鏡像ポテンシャルを受けるために準位がシフトする。この電子親和力の準位がコンバータの仕事関数より低くなると、電子はトンネル効果により、金属内から水素原子に遷移する。しかし、水素負イオンがコンバータ表面から脱出するとき、今度は電子親和力の準位がコンバータの仕事関数よりも高くなる。そのため、電子は水素原子からコンバータ表面へ遷移することになるが、脱出速度が十分に速いと、負水素イオンとして生き残ることができる。このことを考慮して、負水素イオンが脱出時に持つ運動エネルギーに対する生存確率の計算を行った。

以上、3つの物理量から、正イオンの入射による負水素イオンの生成量を評価することができる。この模型を用いて、高速パルスビーム生成実験により得られた負水素イオンビームの波形の解析を試みた。

コンバータ表面に印加する電圧が時間的に変化する場合、正イオンがコンバータ表面に入射したときのエネルギーの大きさも変化することが予想される。正イオンはプラズマとコンバータ表面とを遮蔽しているシースと呼ばれる領域で、加速される。シースの厚さは、電圧の時間的変化に伴い変化する。電圧とシースの厚さの関係は、空間電荷制限電流の式（Child-Langmuirの式）によって決まる。電圧及びシースの厚さ共に変化するため、正イオンがシースを走行中に受ける電場も変化をする。そのため、コンバータ電圧の周波数を大きくしていくと、正イオンがコンバータ表面に入射するときのエネルギーの大きさは電圧に追随することができなくなることが考えられる。周波数の変化による正イオンの入射エネルギー幅とコンバータ電圧の振動の振幅との比を計算し、本方式での高速パルスビーム生成の適用周波数の限界を示した。

この高速パルスビームを用いて、KEK 12GeV陽子シンクロトロンでのビームの縦方向エミッタンスの制御を行った。ブースターRF bucketの位相に対して、入射位相を前後に変化したときの、ブースター取り出し時のバンチングファクターと主リング入射時に生き残る粒子数の変化を調べた。ブースターRF bucketへの入射位相をコントロールすることで、

バンチングファクターの大きなビームを生成し、ビームの空間電荷効果を制御することが可能となり、ビーム強度を従来に比し増加させることができた。

大強度高エネルギー陽子加速器は、原子核・素粒子の研究手段としてばかりでなく、例えば中性子源として、特に数100nsから1 μ sの幅のパルス状中性子源としての有用性も認識され、放射光同様広汎な科学分野で重要な研究手段となっている。特に、中性子が水素に敏感なことから、生命体等複雑な生体高分子の構造解析には放射光以上に強力な武器として発展してきている。また、中性子が水素原子核とほぼ同じ質量を持つことから、質量のない光では探査できない物質の諸相を実現することが可能であり、物質のダイナミズムの研究にとっては最も期待されている研究手段となっている。大強度高エネルギー陽子加速器はさらに、質量の重い電子・陽電子ともいべきミュー粒子をも大量に作り出すことができ、パルス状中性子源同様、その特徴を生かした物質の研究手段として脚光を浴びつつある。

しかし、大電流高エネルギーの陽子ビームとなると、僅かなビーム損失でも多大の残留放射能を生じ、加速器の維持運転が事実上不可能となる。この困難を回避するには、ビーム損失の大幅な低減が必要とされる。すなわち、どれだけビーム損失を低減できるかが、究極的にはビーム電流を規定することとなる。中でも、リニアックからリングへの入射の過程でのビーム損失が非常に大きく、特に大きな問題となっている。

従来最も一般的なものは、入射時にリングには加速電圧をかけないか非常に小さくしておき、ビーム入射後徐々に電圧を上げていく断熱捕獲法であるが、この方法でもリング側の時間的アクセプタンスの端ではいくらかのビーム損失が避けられない。最善の方法は、ビームを時間的に切り分けて(chopping)数100ns幅のパルス状ビームにすることによって、ビームをすべてリング側の時間的アクセプタンスの中に入れることだと考えられている。また、この方法はビームの時間軸におけるパラメータをある程度自由に選ぶことを可能にし、その結果空間電荷効果を低減することによってさらにビーム電流を増強する道を開く可能性がある。

このようなチョップ法については、いくつかの提案がなされているが、それぞれ問題があり、まだ決め手がない。現在実際に行われているのは、コッククロフト・ワルトン型静電加速器とアルヴァレ型線形加速器の間で、750keVのビームをチョップする方法である。これはある程度の成功を収めているが、コッククロフト・ワルトン型静電加速器とバンチャーの組み合わせという従来の加速法は、後段の線形加速器にとって必要なバンチングという点で不十分で、それ自体ビーム損失を引き起こす欠点を持っており、そのコスト高・大きさとともに大強度高エネルギー陽子加速器の初段としての将来性がない。

初段加速器として最も将来性があると考えられているのは、高周波四重極(RFQ)リニアックであるが、このリニアックの入射エネルギーは一般に数10keVと低く、大電流でもビーム・エミッタンスの成長を抑えるためには負水素イオンの陽イオンによる空間電荷中和効果は不可欠な要素と考えられている。ところが、負水素イオン源とRFQリニアックの間の低エネルギー・ビーム輸送系にチョッパーを組み込むと、空間電荷中和効果が消滅し、大きなエミッタンス成長が起こってしまう。一方、数MeVのリニアックの後ろにチョッパーを置くのは、既にエネルギーが高過ぎてチョップしにくいこともあるが、折角RFQリニアックによって縦方向にも横方向にも優れたエミッタンスとなったビームの性質を悪くしてしまう。

したがって、現在提案されている将来的に最も可能性の高い方法と考えられているのは、わざわざ2台のRFQリニアックを用意し、初段を1⁻2MeVとしてそこでチョップするというものである。しかし、もし負水素イオン源自身からチョップされたビームが出てくれば、以上のようなチョッピング状の大きな問題点はすべて解決されるはずである。その結果は、大電流高エネルギー陽子加速器の実現にとって大きな一歩となる。

そこで、この論文の著者は、表面生成型負水素イオン源においてビームをチョップすることを初めて試みた。さらに、実際にリングにビームを入射して、その有効性を実証した。

まず著者は、表面生成型負水素イオン源において、ビーム電流のコンバータ電極電圧依存性を測定し、その強い依存性に着目した。そこでは、-200V程度を閾値として、-600V程度まではほぼ線形にビーム電流は増加し、15mA程度に達する。したがって、コンバータ電圧に変調をかければ、イオン源からのビーム電流がチョップできるはずである。そこでまず、直流電圧約-500Vに、振幅約200V、繰り返し2.25MHz、立ち上がり約50ns、幅約220nsのパルス波を重畳してコンバータ電圧とすることにより、チョップされたビームを生成することに成功した。

このビームを高エネルギー物理学研究所40MeVのリニアックで加速し、ピーク電流8mAを得たが、このチョッピングによって横方向エミッタンスに大きな変化が見られず(規格化rmsエミッタンスで水平方向 $1.5\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 垂直方向 $0.9\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$)、横方向に関するかぎり優れたチョッピング法であることを示した。さらにこのビームを適当な位相で500MeVブースター・シンクロトロンへ入射することによって(painting)、縦方向位相空間内において縦方向エミッタンスを増大させることに成功した(パンチング因子を20%大きくした)。その結果、空間電荷限界によって規定されていると考えられている12GeV主シンクロトロンのビーム電流を約10%改善させることができた。

このようにコンバータ電圧に変調をかけることによって、実際にビーム電流の改善に有用なビームのチョッピング法を開発することに成功したが、より大電流の陽子加速器への応用という観点からは、必ずしもまだ満足のいく方法ではない。特に、パルスの立ち上がりの劣化が見られ、更なる改善の大きな障害となっている。こういった観点から、著者は本イオン源におけるビーム・チョッピングのメカニズムの解明に取り組んだ。

まず、負水素イオンビームのコンバータ電圧依存性は、Cs⁺イオンのスパッタリングによってコンバータに吸着されている水素を負水素イオンとして脱離させるというモデルと矛盾しないことを示した(陽子のスパッタリングと考えると閾値も依存性も矛盾する)。次にこうして脱離した負水素イオンはほとんどイオン源から引き出されうることを示し、本表面生成型負水素イオン源のイオン源としてのメカニズムがほぼ矛盾なく説明できた。

コンバータ表面には1⁻2mmのイオン・シースが生成され、イオン・プラズマから遮蔽されている。このイオン・シースを通してCs⁺イオンがコンバータに到着すると仮定し、負水素イオン電流のコンバータ電圧に対する応答の周波数依存性を計算すると、電子温度2eV、Cs⁺イオン密度 $1\times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ を仮定するとほぼ実験結果を説明することができた。もしこのモデルが正しければ、電子温度10eV、Cs⁺イオン密度 $2\times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ にすることが可能であればさらに周波数依存性を改善する(立ち上がりを約半分にする)ことができるはずである。一方ではしかし、これ以上の改善が困難であることも同時に示唆する結果となっている。このモデルの更なる実験的検証は今後の課題である。

以上述べたことから、この研究には博士論文に要求される科学的重要性、創造性が十分に備わっていると判断し、審査は合格とした。