

PRESENT STATUS OF ACCELERATOR LABORATORY AT ICR, KYOTO UNIVERSITY

Akira. Noda^{1,A)}, Masao. Nakao^{A)}, Hikaru Souda^{A)}, Hiromu. Tongu^{A)}, K.. Jimbo^{B)}, Toshiyuki Shirai^{C)},
Manfred. Grieser^{D)}, Alexander. Smirnov^{E)}

^{A)}Institute for Chemical Research, ^{B)}Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokano-sho, Uji-city, Kyoto, Japan, 611-0011

^{C)}National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-city, Chiba, Japan, 263-8555

^{D)}Max-Planck-Institut für Kernphysik, Postfach 103980, D-69029 Heidelberg, Germany

^{E)}Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Moscow Re3gion, Dubna, Russia

Abstract

Transverse laser cooling in horizontal direction by application of synchro-betatron resonance has been demonstrated for the first time by detecting a horizontal beam profile of Mg ion beam with a cooled CCD camera. Laser-produced proton beam up to ~2 MeV has been phase-rotated to create energy peaks resulting ~3 times intensity increase at the peak. Such proton beams are emitted into a rather small angular region in vertical direction. Electron facilities at ICR, KSR and 100 MeV linac are successfully utilized for proof of principle of SCRIT and ion chamber calibration for T2K neutrino experiment, respectively.

京大・化研の加速器・ビーム物理研究グループの現状

1. はじめに

京大・化研の加速器・ビーム物理グループでは1
 昨年電子ビーム冷却による7MeV陽子ビームの1次
 元オーダリングの実現^[1]に引き続き、3次元結晶化
 ビームの実現に向けて、40 keVの²⁴Mg⁺のレーザ
 ー冷却に取り組み、縦方向のレーザ冷却に成功を納
 めている^[2]。更に最近の1年間はビームの進行方向
 と直交する横方向のレーザ冷却を、イントラビーム
 散乱による受動的なものではなく、シンクロ
 ベータトロン共鳴を積極的に活用した手法^[3]を用い
 て能動的に実現するアプローチの最近の成果をまず
 紹介する。ついで、我々のグループが原研・関西研
 の光医療産業バレー拠点との共同研究により推進し
 てきた、位相回転によるレーザ生成陽子ビームの
 ビーム強度増大と性能向上の取り組みの近況を紹
 介する。併せて、化研のイオン線形加速器実験棟内の

電子線形加速器(100 MeV)及び電子蓄積リングKSRを
 用いた最近のActivityについても紹介する。

2. イオン蓄積・冷却リングS-LSRに於る 横方向レーザ冷却実験

2.1 シンクロベータトロン共鳴による縦・横(水
 平)方向自由度の結合

通常の高速イオンのレーザ冷却に於いてはレー
 ザーはイオンビームと併進または逆走するため、光
 子のやり取りによる運動量の授受はイオンビームの
 進行方向(縦方向)に限られる(励起状態から基底
 状態への遷移に伴う光子の放出は等方的であるので
 統計的には運動量の授受は伴わない)。従って横方
 向のレーザ冷却実現のためには、何らかの方法で
 縦・横両方向の自由度間の結合を実現することが不
 可欠となる。これまでにイントラビーム散乱(IFS)
 による横方向から縦方向へのエネルギー流入を利用
 して横方向のレーザ冷却も行う手法^[4]及び水平方
 向の有限(~2m)の軌道分散(Dispersion
 Function)を利用し、Laserの水平方向強度分布の
 勾配を利用して横方向のレーザ冷却を行う手法^[5]
 がドイツ、ハイデルベルグのマックスプランク原子
 核研究所(MPI-K)のイオンリングTSRで行われてい
 るが、前者はIFSを利用した受動的な手法であり、後
 者はシングルパーティクルのダイナミクスを仮定し
 たものであり、冷却が進み、ビームの密度が増大す
 るとIFSの効果がドミネートし、冷却効果が弱くな
 るという制約があり、ビームの結晶化に向けて充分
 な冷却力の確保は困難である。

以上のような状況に鑑み、我々は岡本等の提案に

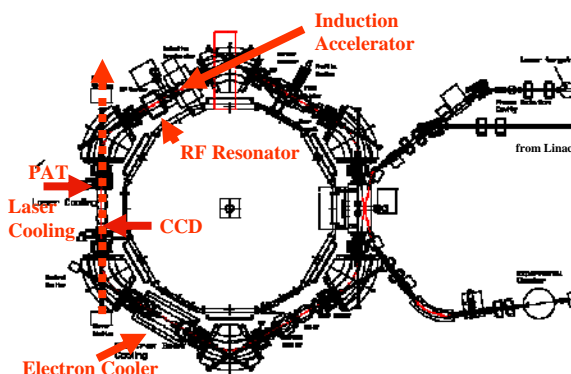


図 1 : S-LSRのレイアウト

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

なるシンクロベータトロン共鳴を積極的に利用した横方向のレーザー冷却に挑戦してきた。既にEPAC08に於いてシンクロベータトロン共鳴条件近傍で縦方向レーザー冷却後の運動量拡がりに極大値が生ずることを示し^[6]、縦・横両方向の自由度の結合を示すことにより、横方向レーザー冷却を間接的に示唆するデータを示してはいるが、その際にはビームのビューポートの関係から垂直方向のビームサイズしか観測が行えず、水平方向ビームサイズの縮減を直接的に示すデータの取得が急務であった。昨夏にCCDカメラでの水平方向ビームサイズの測定を可能とするためのビューポートの設置を行って以来、 $v_s - v_H = m$ (v_s, v_H 及び m は夫々シンクロトロンチューン、水平方向ベータトロンチューン及び任意の整数を表す)を満足する動作点及びRF電圧でパンチドビームのレーザー冷却を行い、水平方向のビームサイズの縮減の観測に挑戦してきた。この過程で、S-LSRは7 MeV陽子($B\rho=0.38 \text{ T}\cdot\text{m}$)の周回も想定しており、40 keVの $^{24}\text{Mg}^+$ ($B\rho=0.006 \text{ T}\cdot\text{m}$)の場合、電磁石の励磁レベルがかなり低くなるため、磁極の鉄材の初期化を条件変更ごとに実施する事により、再現性の良いデータ取得が可能となった。

2.2 水平方向ビームサイズの光学測定及び運動量拡がりの観測

水平方向のビームサイズの観測は図1に示した位置に設置した冷却CCDを用いて実施した。光学測定系の詳細は参考文献[7]を参照されたい。図2にこの水平方向ビームサイズの測定結果をPAT(Post Acceleration Tube)を光電子増倍管と併せ用いて測定したレーザー冷却後のイオンビームの運動量拡がりとともに種々のRF電圧に対して測定した結果を示した。これらの測定は、ベータトロンチューンの動作点(2.068,1.105)に於いて行った。図からシンクロベータトロン共鳴条件で運動量のピークが形成され、この近辺で水平方向のビームサイズが縮減していることが見て取れ、横方向のレーザー冷却がシンクロベータトロン共鳴による縦・横両方向のエネ

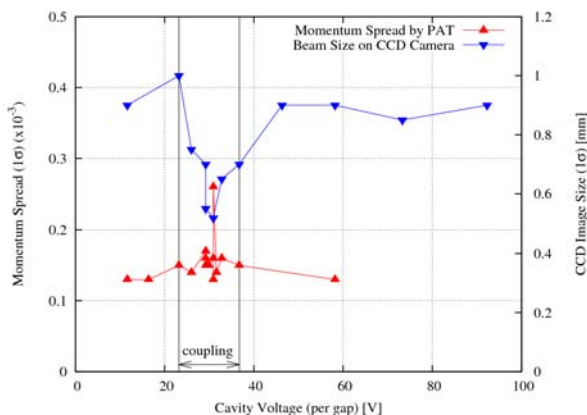


図2：冷却CCDで測定されたレーザー冷却後の水平方向ビームサイズ(青色下向三角形)及びPATと光電子増倍管で測定した冷却後の運動量拡がり(赤色上向三角形)のRF電圧依存性。

ルギー交換により実現していると評価している。ただ、ビームサイズの極小はブロードな分布となっており、これは共鳴条件付近でビームライフが短くなることに定性的には関係していると考えている。こうした状況をより定量的に計算機シミュレーションと併せて解明することが結晶化ビームの実現に向けては重要である。

2.3 水平・垂直両方向自由度の結合

水平及び垂直両方向のベータトロン振動間の結合は動作点の v_H 及び v_V を近接する値に選び、これら両方向自由度を結合させる磁場のスキュー成分乃至はソレノイド磁場を印加することで可能となる。ここでは電子ビーム冷却用のソレノイド磁場を活用することとした。図3に水平・垂直両方向ベータトロンチューンのソレノイド電流依存性を示す(ソレノイド電流20Aはソレノイド磁場50Gに対応)。この動作点の場合ソレノイド電流16~20Aの領域で水平・垂直両方向の間でエネルギーのトランスファーが行われていると考えられる。チューン調整の詳細に関しては参考文献[8]を参照されたい。

3. レーザー生成陽子ビームの位相回転

イオンビームによるがん治療装置の小型化をレーザープラズマ相互作用で生成される超高強度場を用いて実現する試みを平成13年度から原研・関西研及び放医研との共同研究として進めている。平成17年度までは「先進小型加速器のための要素技術の開発」として、また平成18年度以降は原研・関西研を拠点とする科学技術振興調整費「光医療産業バレー」拠点創出事業の一環として推進してきた。昨年までに1.4 MeVまでのエネルギーピークをレーザー生成陽子のエネルギースペクトルに位相回転により生成することに成功している^[9]。図4に示したような原研・関西研のJ-KARENレーザーのセットアップで今夏に行った最近の実験ではモノエネルギーピークの形成が2 MeVを超えるまで拡張され、位相回転を行わない場合に比してピーク強度は3倍

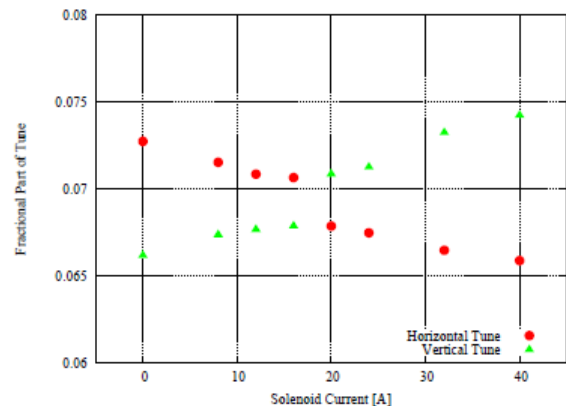


図3：水平・垂直両方向のベータトロンチューンのソレノイド電流依存性(動作点は(2.073,1.067))

程度に増大可能であることが確認されている。この実験に際して位相回転空洞及び分析電磁石の下流に設置した蛍光板で測定したレーザー生成陽子の空間プロファイルを図5(a)位相回転無、(b)位相回転有の場合について夫々示した。我々がつとに指摘していた位相回転空洞のギャップ間電場の動径方向成分による発散効果^[10]が効いていることが見て取れる。また、レーザー生成陽子ビームは、蛍光板で観測する位置のターゲットからの距離を変化させても垂直方向には図5(a)に示されたようになり絞られた状況になっており、ターゲットからの生成時にかなり狭い領域からそろった角度に放出されていると考えられる。今後レーザー生成イオンを活用する可能性を検討する上で重要な情報を含んでいるのではないかと考えている。なお、J-KARENレーザーでは繰り返し低より大パワー照射の状態(数十分に一回、850TW)では7 MeVまでの陽子生成が最近確認されていることを付言しておく。

4. 電子加速器施設の近況

4.1 電子蓄積リングKSRを用いたSCRITの原理検証実験

KSRの長直線部にSCRIT(self-confining radioactive isotope ion target)を設置し、電子蓄積リング中に設置したイオントラップ中の原子核と周回電子ビームとの散乱を検出して、この原子核の内部構造を探る手法のfeasibilityを安定な原子核(Cs)を用いて探る試みは所期の目的を果たし^[11,12]、無事終了した。今後理研内でのRIBFへの移設に向け、7月末にKSRからの撤去作業を無事終了している。

4.2 100 MeV電子線形加速器を用いたT2Kニュートリノ実験のための検出器校正

標記T2Kニュートリノ実験のためのイオンチェン

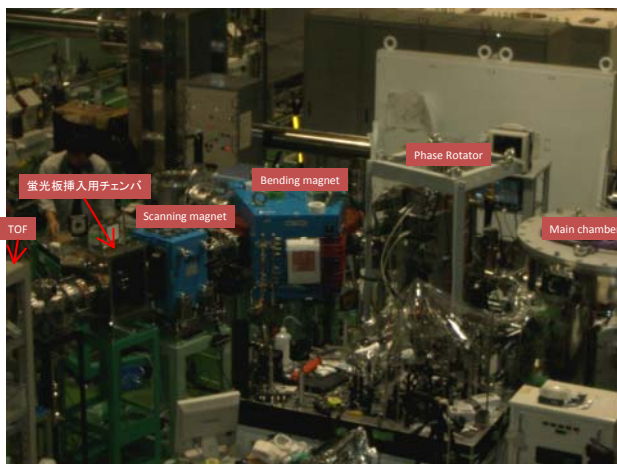


図4：J-KARENレーザーを用いたレーザー生成陽子の位相回転及び生成陽子を用いたビームスキャンシステム

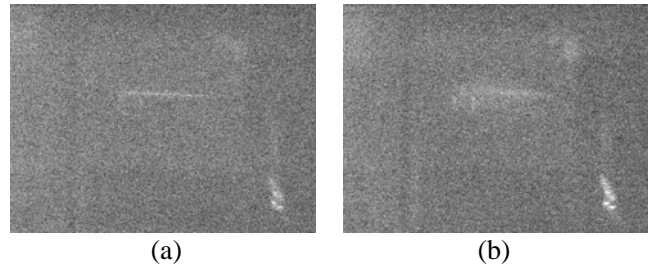


図5：分析電磁石下流に設置した蛍光板で観測したレーザー生成陽子ビームの空間プロファイル、(a)位相回転無、(b)位相回転有

バー校正実験は当初2008年秋に予定されていたが、我々の施設の100MeV電子リニアックのクライストロンの高圧電源の経年劣化による故障のため、その修復後本年7月半ばにずれ込んで実施された。関係者のご理解とご協力に感謝したい。現在までの解析で、J-PARCでのコミッションングで使用されたアルゴン(+窒素2%)ガスでの十分な線形性の確認がなされ、またガス圧の変動に対する予期通りの応答も確認されている。

参考文献

- [1] T. Shirai et al., "One-Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring", PRL **98**, 204801 (2007).
- [2] M. Tanabe et al., "Longitudinal and Transverse Coupling of the Beam Temperature Caused by the Laser Cooling of $^{24}\text{Mg}^{8+}$ ", Applied Physics Express **1**, 028001 (2008).
- [3] H. Okamoto et al., Phys. Rev. Lett. **72**, 3977 (1994).
- [4] H.-J. Miesner et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 623 (1996).
- [5] I. Lauer et al., "Transverse Laser Cooling of a Fast Stored Ion Beam through Dispersive Coupling", Phys. Rev. Lett. **81**, 2052 (1998).
- [6] A. Noda et al., "Recent Status of Laser Cooling of Mg at S-LSR", Proc. of EPAC08, Genova, Italy (2008) 3476.
- [7] 中尾政夫 他、「S-LSRにおけるバンチビームのレーザー冷却実験の光学的観測」、本学会報文集FOBTB04.
- [8] 想田光 他、「S-LSRでの共鳴結合のためのチューン調整」、本学会報文集FOBTB03.
- [9] A. Wakita et al., Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., A **599**, (2009) pp.15-19.
- [10] M. Ikegami et al., "Radial focusing and energy compression of a laser-produced proton beam by a synchronous rf field", Phys. Rev. ST-AB, **12**, 063501 (2009)
- [11] M. Wakasugi et al., "Novel internal target for electron scattering off unstable nuclei", Phys. Rev. Lett. **100**, 164801 (2008).
- [12] T. Suda et al., "First demonstration of electron scattering using a novel target developed for short-lived nuclei", Phys. Rev. Lett., **102**, 102501 (2009).