

Optical beam monitors in S-LSR

Takehiro Ishikawa, Mikio Tanabe, Hikaru Souda, Masahiro Ikegami, Hiromu Tongu, Toshiyuki Shirai, Akira Noda
Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

Using the fluorescence lights from a laser-excited ion beam, we try to observe the longitudinal momentum spread, the transverse size and other beam parameters, for example, the number of ions. The spread is estimated by counting the lights with a photomultiplier tube (PMT) in “negative” laser frequency sweep and the size by imaging them onto a CCD camera. In addition, a post acceleration tube (PAT) will be introduced in order to estimate the spread of laser-cooled beam.

S-LSRにおける光学測定系

1. はじめに

現在、京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リングS-LSR^[1]において、40 keVの²⁴Mg⁺ビームを用いたレーザー冷却^[2]実験を行っており、ビームの結晶化を目指した研究をおこなっている。

この冷却したビームを観測するため、2つの光学測定系が開発している。1つはlongitudinal方向の運動量分散の測定を目的とした光電子増倍管(PMT)測定系、1つはtransverse方向のビームサイズを測定するCCDカメラである。ここではこの2つの測定系について述べている。

CCDカメラおよびPMTは浜松ホトニクス社のC7190-11W、R7056を用いている。それぞれに単レンズの光学系を導入し、CCDカメラでは結像、PMTではほぼ平行光になるように配置している。なお、CCD光学系は両凸レンズ前面にΦ10 mmの絞り、PMT光学系は平凸レンズ前面およびPMT受光面に20 mm×5 mmのapertureを入れている。

S-LSRでのレーザー冷却における主要なパラメータを表1、測定系について表2に示す。

表1：レーザー冷却の主要パラメータ

イオン	40 keV ²⁴ Mg ⁺
質量	22.3559 GeV/c ²
速度	5.68×10 ⁵ m/s
遷移波長(静止系)	279.6352 nm
共鳴周波数(静止系)	1072084 GHz
自然幅	42.6689 MHz
飽和強度	254 mW/cm ²
リング周長	22.557 m
相互作用長	2.66 m

表2：光学測定系のセットアップ

	PMT	CCDカメラ
受光面	Φ25 mm	12.3 × 12.3 mm
画素サイズ	---	24 μm × 24 μm
量子効率	15 %	20 %

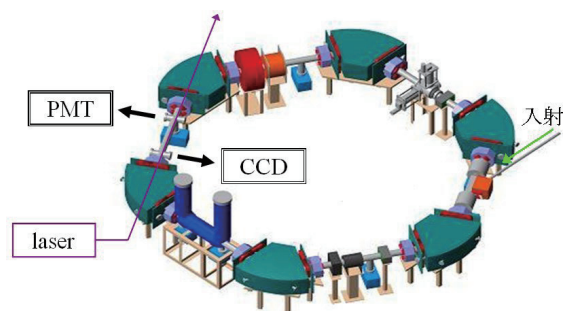


図1：S-LSR 全体図。

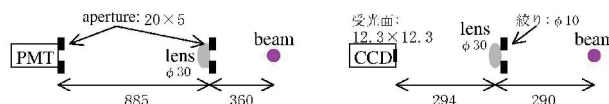


図2：PMT および CCD カメラの測定系模式図。

2. LONGITUDINAL BEAM MONITORS

2.1 レーザーの周波数掃引での光強度

S-LSRでは、レーザーの周波数detuningをマイナス値からプラス値へ掃引(positive sweep)することにより、レーザー冷却が実現する。全ビーム粒子数 5×10^8 で測定した場合の光強度分布を図3に示す。計数は1 binあたり9 ms (掃引量 9.2 MHz)であり、10回積算している。

図3では、冷却によりレーザーと共鳴する粒子が増加しピーク値に達した後、ビームの寿命に従い光強度が減少していく様子が見られる。

光強度の評価のため、まずビームから PMT への平均立体角を $\bar{\Omega}$ 、ビームを観測できる長さを l_{visible} 、リングの周長を C として geometric factor を

$$\eta = \frac{\bar{\Omega} \cdot l_{\text{visible}}}{C} \quad (1)$$

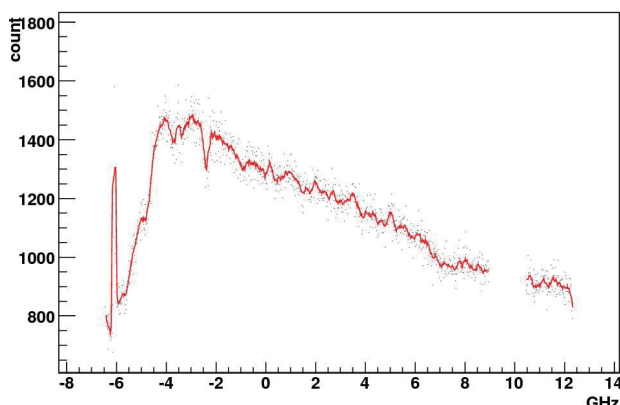


図 3 : Positive sweep をおこなった時の蛍光強度。

と定義する。このとき、PMT に到達する単位時間当たりの光子数 Φ は

$$\Phi = \eta \cdot N \cdot \frac{1}{2} S \Gamma \cdot \xi(T_{\parallel}) \quad (2)$$

となる^[3]。ここで、 N は粒子数、 S は飽和パラメータ、 τ を励起状態の寿命として $\Gamma = 1/\tau$ であり、

$$\xi(T_{\parallel}) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\Gamma/2)^2}{(\delta - \nu k)^2 + (\Gamma/2)^2 (1+S)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\parallel}} \exp\left(-\frac{\nu^2}{\sigma_{\parallel}^2}\right) d\nu \quad (3)$$

である。 δ はレーザー detuning、 ν はビームの中心速度からのずれ、 σ_{\parallel} は速度広がりである。

図 3 のピークを冷却が完了した周波数とすると、この時点での光強度は 8 kHz である。また、ショットキーノイズの解析から、冷却後の運動量広がり 4×10^{-4} と得られている。よって、冷却後のビームの中心速度からのレーザー detuning を無視すると、式 (2) よりレーザーと相互作用が生じているビームの粒子数は 3×10^5 である。

ビームの全粒子数に対し、レーザー冷却される粒子が 10^{-3} のオーダーであるのは、過剰な粒子数による IBS の増加、レーザーとビームのアライメントのずれ、が考えられる。実際、ビーム粒子数を減らすことで冷却される粒子数の割合は改善されたが、現在はバックグラウンド光により 10^5 以下の粒子数からの蛍光は計数できていない。

2.2 レーザーの周波数掃引での速度分布測定

周波数 detuning をプラス値からマイナス値へ掃引 (negative sweep) した場合、一度共鳴を起こした粒子は以後共鳴しないため、光強度の時間変化は速度分布を示す。この掃引について、positive sweep と同様の条件で測定したものを図 4 に示す。ただし、バックグラウンド光を 1 bin あたり 550 count と見なし、減算を行っている。

周波数 detuning が -4 GHz から 4 GHz で Gaussian による fitting を行った場合、蛍光の広がり 2.2 GHz (1σ) であり、これは $\Delta v/v \sim 1.1 \times 10^{-3}$ に相当する。

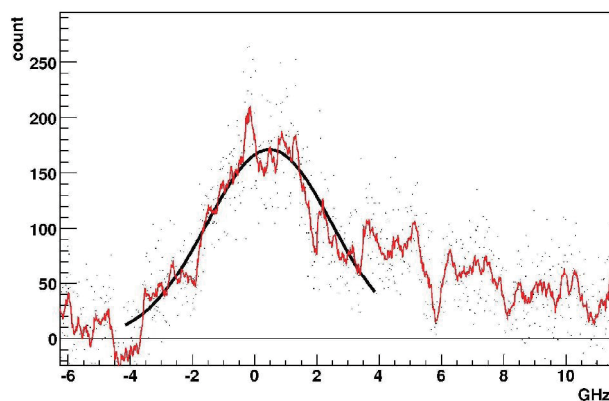


図 4 : Negative sweep をおこなった時の蛍光強度。

2.3 冷却されたビームの速度分布測定

現在、冷却後の速度広がり 10^4 程度にショットキーノイズから評価している。しかし、クリスタルビームの実現にはビーム粒子数を 10^4 程度にする必要があり、このときショットキーノイズでは十分な測定が不可能となる。そこで、冷却後の速度分布を自発放射光から評価するべく、リング内に Post Acceleration Tube (PAT) を導入する。

ビームの冷却状態を維持するためには、レーザーを positive sweep し続ける、もしくは蛍光が飽和した周波数で停止しておく必要がある。そのため前節のような negative sweep も適用できない。

PAT は円筒形のチューブであり、電圧をかけることで粒子の速度を PAT 内のみで増減できる。そこで、レーザーの周波数掃引による冷却が終了した時点で周波数を固定し、PAT の印加電圧を掃引すると、negative sweep と同様の速度分布測定ができる。

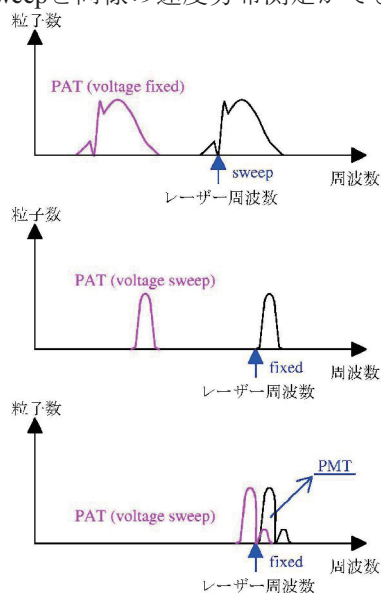


図 5 : PAT による longitudinal 方向の速度分布測定。

PAT 内で電圧 U をかけた場合の速度変化 Δv は近似的に

$$E_0 + eU = \frac{1}{2} m(v_0 + \Delta v)^2 \quad (4)$$

$$\Delta v \approx eU/mv_0$$

である。冷却前の運動量広がりには 1×10^{-3} 程度なので、最初にPAT内で $\Delta v/v \sim 5 \times 10^{-3}$ にすると仮定すると400 Vが必要となる。冷却後は現状で 1σ が 5×10^{-4} であり、100 V(2σ)からの自発放出光を見込んで設計をする。具体的なPATの電場と形状を図6および図7に示す。

自発放出光を観測する穴の位置を中心から1 mmずらしているのは、励起状態の寿命3.7 nsに対応する走行距離 ~ 2.1 mmを考慮したためである。このPATに100 Vの電圧をかけた場合、ビーム軸から3 mm離れた位置までを考慮すると、自発放出光を発生するイオンは24 MHz以内の速度分布であり、これは現在使用しているレーザーの調整限界と同程度であり、レーザーの自然幅より十分小さい。

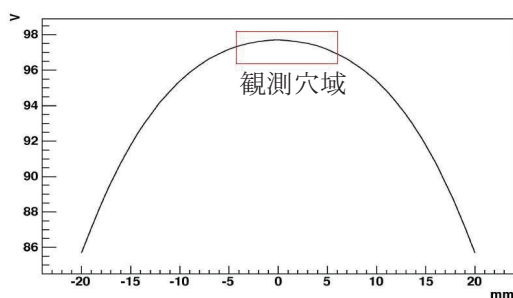


図6：ビーム軸上、PAT内部の電場。

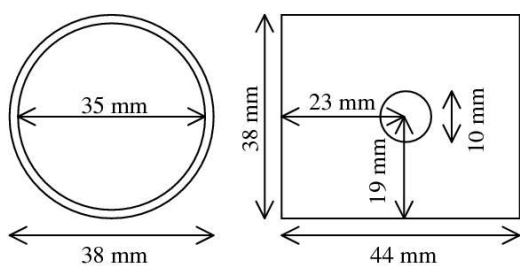


図7：PAT設計。

3. TRANSVERSE BEAM MONITORS

ビームの3次元冷却を行うとき、transverse方向の温度はそのビームサイズから見積もることができる。そこで、ビームからの蛍光を単レンズ光学系でCCDカメラに集光し、ビームサイズを撮像する。光学系の分解能は100 μm 程度である。

現在のところ横方向への冷却は行っていないため、レーザー径と同程度の領域から光が得られる。図7にレーザーを蛍光板にあてCCDカメラで撮像したもの、図8に蛍光板を取り除きビームを周回させた場合の蛍光を示す。ビーム、レーザーともに図中の左から右へ通っている。蛍光の幅は2 mm (1σ)である。

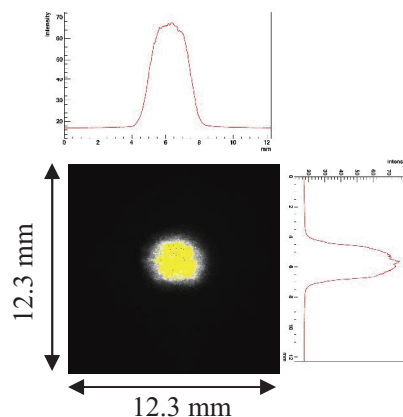


図7：冷却レーザーのスポットサイズ。

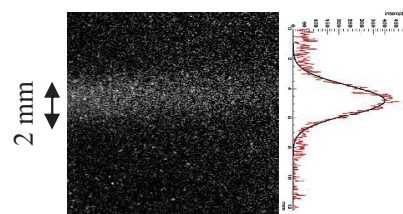


図8：ビームからの自発放出光。

4. 結論

PMTにより冷却前のlongitudinal方向の速度分布、冷却された粒子数が測定できる。加えて、PATの導入により、冷却後の速度分布も測定する予定である。また、transverse方向への冷却の確認もCCDカメラにより十分におこなうことができる。

結晶化の実現には粒子数 10^5 以下でのレーザー冷却が必要であり、今後は光強度の増強とバックグラウンド光の削減を目的とした光学系を作成していく。

謝辞

本研究は、先進小型加速器事業および、京都大学21世紀COEプログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」の援助を得て、おこなわれました。

参考文献

- [1] A. Noda, "Present Status of Ion Storage and Cooler Ring, S-LSR", this meeting.
- [2] M. Tanabe, "Laser Cooling of Mg^+ beam at S-LSR", this meeting.
- [3] N. Madsen, "Dynamics of laser-cooled ion beams", PHD Thesis, Univ. of Aarhus, 114, (1998).