

理研 18GHz ECRIS を用いた Laser Ablation による ${}^7\text{Li}$ イオン 測定および解析結果について

A. Tamii

ver 1.0 21-FEB-2004

1 序

現在 RCNP にて開発を検討している偏極 ${}^6\text{Li}^{3+}$ イオン源では、ECR 中のイオン化過程における減偏極の大きさがキーポイントの 1 つとなる。減偏極の見積りでは、ECR 中の ${}^6\text{Li}$ イオンの閉じ込め時間 (confinement time) が重要なパラメータとなっている。

2004 年 1 月に 理研 18GHz 超電導 ECR イオン源 (ECRIS) を使い、Laser Ablation 法により、 ${}^7\text{Li}$ イオンの ECR 中での Confinement Time の情報を引き出すテスト実験を行った。

得られたデータの解析結果について報告する。

2 実験セットアップ

使用した ECRIS は、理研の中川氏らにより開発されたものである。詳細については文献 [1, 2, 3] を参照のこと。

今回用いた磁場は、上 1. 下コイルが 25A, 中コイルが -20A, 上 2 コイルが 25A で、磁場計算によれば図 1 のように、最小値が 0.25T, 最大値が 1.40T(上流側) 0.88T (引き出し側) となっている。

導入したマイクロ波は 18GHz 100W である。バッファガスはヘリウムを用いた。真空ポンプヘッド位置での真空度は 4.3×10^{-7} mbar であった。

標的には RCNP から持ち来んだ ${}^7\text{LiF}$ のロッドを用いた。 ${}^6\text{LiF}$ を用いたなかった理由は、 ${}^6\text{Li}^{3+}$ の同定が、 ${}^4\text{He}^{2+}$ のバックグラウンドを被って困難になるためである。

Ablation 用のレーザーには、CNS 所有の YAG 532 nm Max 100 mJ/pulse (幅 5 nsec) を用いた。ガラスの窓を通して Laser 光を ECR 内に照射し、ECR 内に設置したレンズ、ミラー (ともに材質の主成分は BK7) により ${}^7\text{LiF}$ 上に収束させた。

データの取得は、引き出したビームを分析用双極磁石の下流に設置した FC により読み出し、デジタルオシロスコープ (内部抵抗 $1\text{M}\Omega$) で記録することにより行った。オシロスコープのトリガは、YAG レーザーの Q-Switch の同期出力パルスにより行った。

3 実験結果

分析磁石の電流値をスイープしたスペクトルをとり、粒子の同定を済ませた後、短時間の間に ${}^7\text{Li}^{1+}$ のデータを数点, ${}^7\text{Li}^{2+}$ のデータを 1 点取得したが、この時点で ${}^7\text{Li}^{3+}$ のシグナルは検出

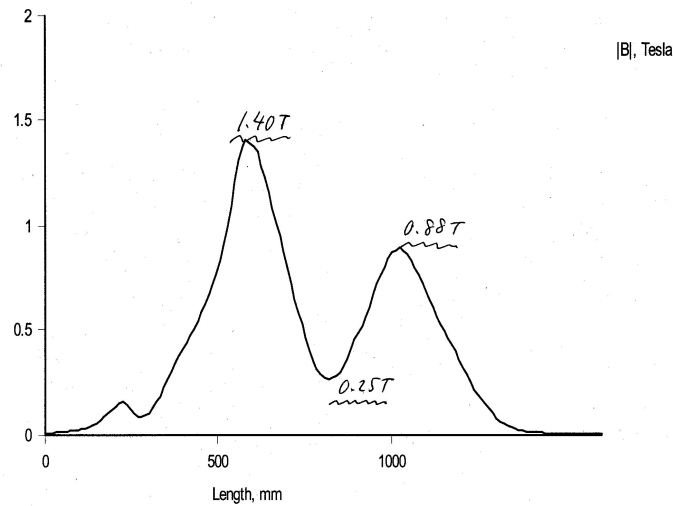


図 1: 使用した ECR 軸上磁場の計算値。中川氏提供。

されていなかった。

この後、Laser Ablation によるシグナルが観測されなくなり、試行錯誤を続けたがデータを得ることをできなかった。最終的に ECR を開けて中をチェックしたところ、内部に設置したレンズおよびミラーが溶けていることが判明した。溶けた原因は不明だが、マイクロ波による効果、プラズマによる加熱が疑われる。ただしホルダに使用していたアルミニウムには何の問題も見られなかった。

これらの事情により、取得できたデータは僅かである。データを図 2, 3 に示す。

ピークの立上り時刻がパルス毎に変動していた。通常の Laser Ablation 実験では時刻 0 で立ち上がるはずであり、この原因は不明である。

4 データ解析

${}^7\text{Li}^{1+}$, ${}^7\text{Li}^{2+}$ それぞれ 1 つずつのデータを使用し、confinement time を見積もる解析を行った。次の手順で解析を行った

1. ${}^7\text{Li}^{1+}$ のスペクトルにはほぼ周期的なバックグラウンドが見られる。sin 関数型を仮定してバックグラウンドをフィットし、引き算をおこなって ${}^7\text{Li}^{1+}$ の波形を得た (図 4)。
2. 以下の仮定のもと、 ${}^7\text{Li}^{2+}$ の波形をフィッティングした。
 - ${}^7\text{Li}^{1+}$ および ${}^7\text{Li}^{2+}$ の引き出しビーム量は、それぞれ、その時刻における ECR プラズマ中の閉じ込められているイオン量に比例する。
 - 今回の設定条件では、 ${}^7\text{Li}^{3+}$ のビームは検出されなかったため、2 荷から 3 荷にイオン化されるイオンの量は、2 荷のビーム量に比較して無視できるとする。プロポーザルにおけるシミュレーションでは約 1/10。
 - 2 荷から 1 荷に脱イオン化されるイオンの量は、2 荷のビーム量に比較して無視できるとする。プロポーザルにおけるシミュレーションでは約 1/20。

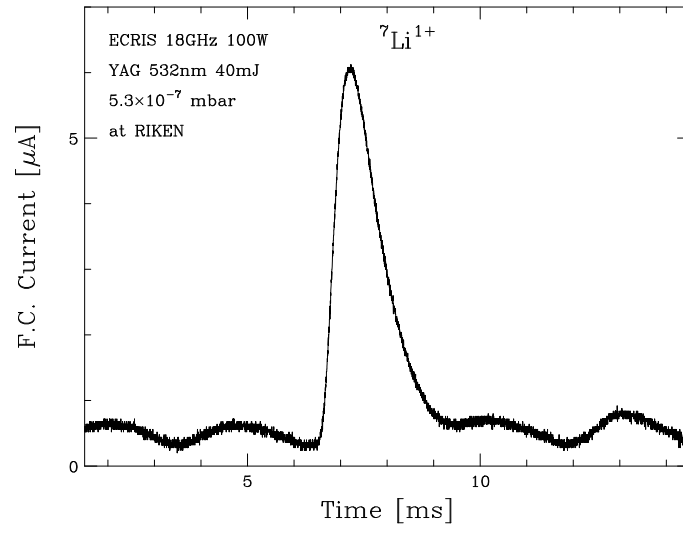


図 2: ${}^7\text{Li}^{1+}$ の引き出し電流。

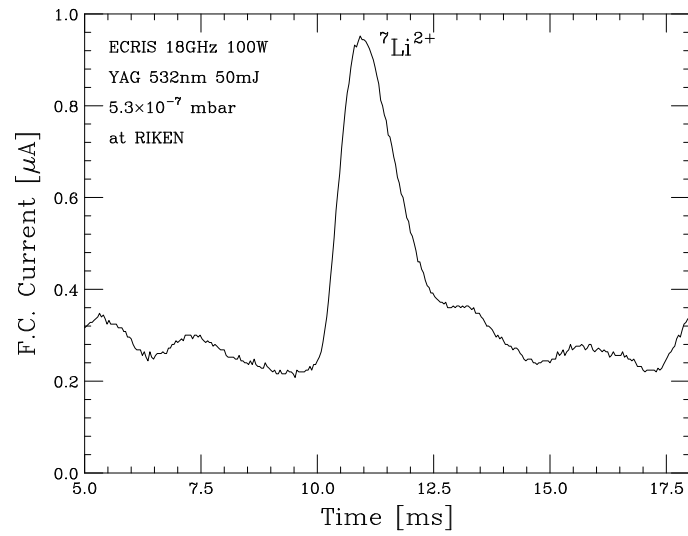


図 3: ${}^7\text{Li}^{2+}$ の引き出し電流。

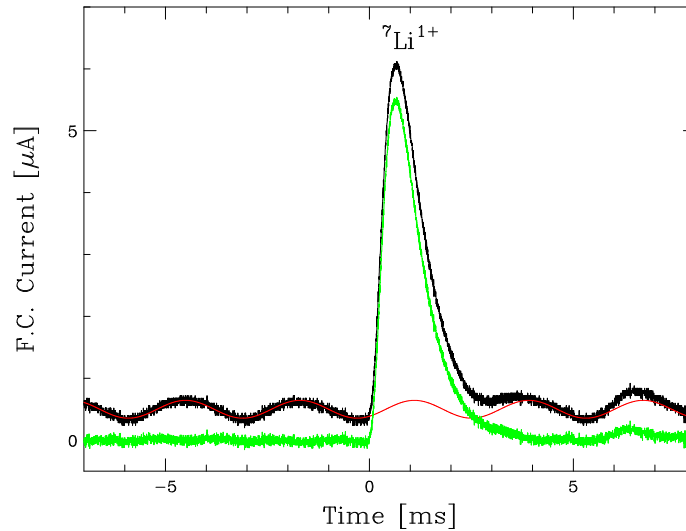


図 4: ${}^7\text{Li}^{1+}$ データ (黒)、sin 関数による周期的バックグラウンドフィット (赤)、バックグラウンド差引後 (緑)。

- laser ablation では、標的の表面状態が変化することから、発生するガス量はパルス毎に変わると考えられる。したがって、実験データのシグナルの大きさについてはフリーパラメータとする。また、時刻の原点もフリーパラメータとする。
- ${}^7\text{Li}^{2+}$ の波形ではバックグラウンドの周期性は乏しい。やむなく定数のバックグラウンドを仮定した。

以上の仮定から、ECR プラズマ中の ${}^7\text{Li}^{1+}$ のイオン量 (n_1) および ${}^7\text{Li}^{2+}$ のイオン量 (n_2) は下記の式に従うと考えられる。

$$\frac{dn_2}{dt} = a\lambda_{1\rightarrow 2}n_1 - \frac{1}{\tau_2}n_2 \quad (1)$$

ここで $\lambda_{1\rightarrow 2}$ は 1 荷から 2 荷へのイオン化レート、 τ_2 は 2 荷の confinement time、 a は規格化定数である。 $a\lambda_{1\rightarrow 2}$ および τ_2 をフリーパラメータとしてフィットする。2 荷イオンビーム量の定数バックグラウンドもフリーパラメータである。(現在のところフィッティングは目視により行っている)

得られた結果を図 5 に示す。

図 5 から 2 荷イオンの confinement time (τ_2) は 0.4 msec 程度であることが分かる。参考のため $\tau_2=0.3, 0.5$ msec の場合の曲線を図 6 に示しておく

5 議論

データ上の制約もあり、解析に用いているモデルはかなりシンプルなものであるが、ラフな confinement time の値を知りたいという今回の目的には十分であると考えられる。

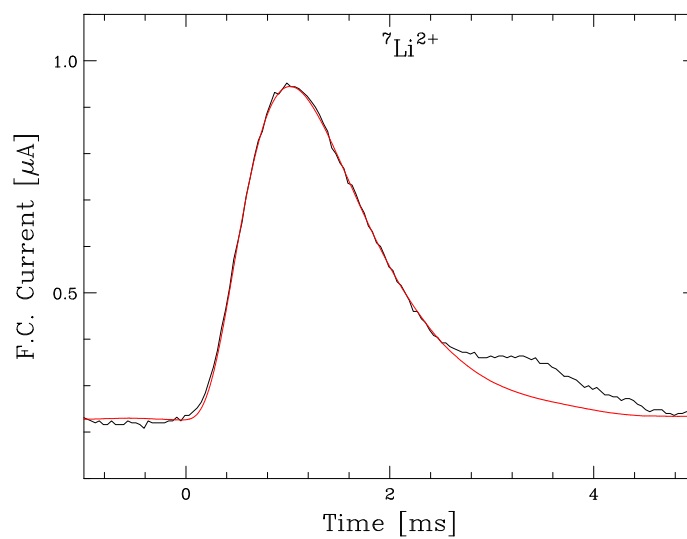


図 5: ${}^7\text{Li}^{2+}$ データ (黒)、式 (2) を用いたフィット (赤) ($\tau_2=0.4$ msec)。

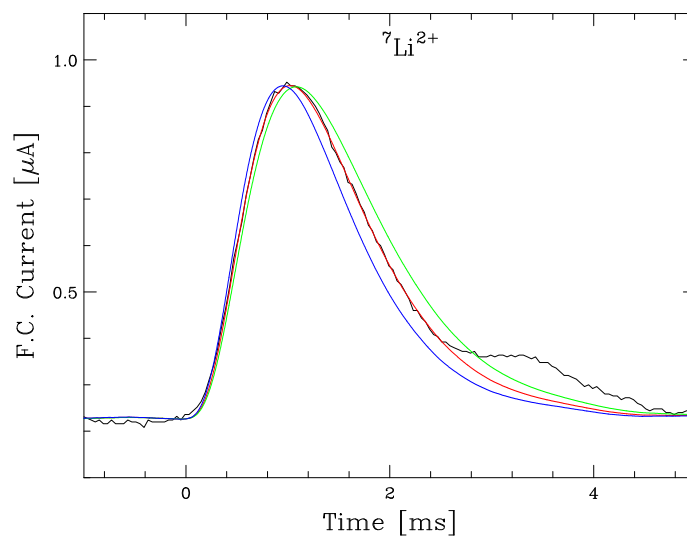


図 6: ${}^7\text{Li}^{2+}$ データ (黒)、および式 (2) を用いたフィット $\tau_2=0.4$ msec(赤)、0.3 msec(青)、0.5 msec(緑)。

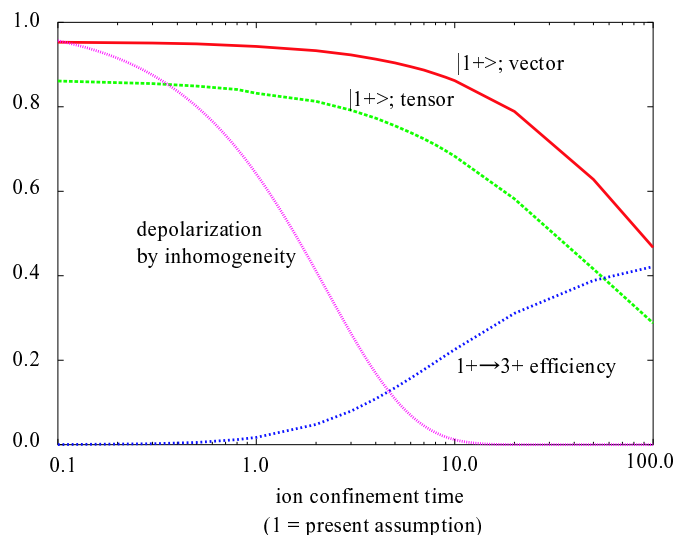


図 7: $|1+\rangle$ 状態に完全に偏極させた ${}^6\text{Li}^{1+}$ (vector、tensor ともに偏極度は 1.0) を 14.5GHz ECRIS に入射した場合の、引き出される ${}^6\text{Li}^{3+}$ ビーム偏極度おシミュレーション結果 (赤と緑。磁場不均一性 (inhomogeneity) の効果は含まない)。横軸はシミュレーションのパラメータである ${}^6\text{Li}^{3+}$ の confinement time (単位 msec)。ピンクは ECR 内の磁場不均一性のみによる減偏極効果のシミュレーション結果。従って、vector は赤×ピンク、tensor は緑×ピンクの値がシミュレーションによる予測と考えて良い。計算の詳細については [4] を参考のこと。

プロポーザルでは、confinement time (τ_i) の荷数 (i) 依存性および質量 (A) 依存性として下記の簡素な式を仮定している。

$$\tau_i \propto i\sqrt{A} \quad (2)$$

今回の結果をこの式にあてはめれば、3 荷の ${}^6\text{Li}$ イオンの confinement time は 0.6 msec となり、プロポーザル中で仮定した値 (Al イオンの Laser Ablation 結果から推測した値) 1 msec は妥当であると言える。confinement time が短くなると、減偏極は小さくなると考えられる。

ただし、今回の実験では実験上の問題が発生したこともあり、ECR の運転条件を ${}^7\text{Li}^{3+}$ に最適化することができなかった。実際、実験中に ${}^7\text{Li}^{3+}$ は観測されていない。 ${}^7\text{Li}^{3+}$ を効率良く生成するには、2 荷から 3 荷へのイオン化効率を上げるように ECR 運転条件を調整する必要があり、この最適化によって confinement time が長くなる方向にシフトすると考えられるので注意が必要である。

ECR による ${}^7\text{Li}^{3+}$ イオン生成のイオン化効率、およびそれを最適化した時の confinement time を実験から引き出すには、ECRIS を用いた Laser Ablation 実験を再度行うことが必要である。

参考のため、プロポーザルのシミュレーションにおける減偏極度の confinement time 依存性を図 7 に示しておく。

参考文献

- [1] T. Nakagawa, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73** (2002) 513.

- [2] T. Nakagawa, *et al.*, in Proceedings on Cyclotron and Their Applications 2001, (2002, AIP, New York) pp. 232.
- [3] T. Nakagawa, *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **35** (2002) 254.
- [4] K. Hatanaka, *et al.*, Feasibility study of a polarized ${}^6\text{Li}^{3+}$ ion source, 2003, RCNP proposal.