

SAGA-LS 蓄積リングにおけるスピン消極共鳴の観測 OBSERVATION OF RESONANT SPIN DEPOLARIZATION IN SAGA-LS STORAGE RING

金安達夫*, 高林雄一, 岩崎能尊, 江田茂
Tatsuo Kaneyasu*, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Kodai
SAGA Light Source

Abstract

The radiative spin polarization of the 1.4 GeV electron beam was investigated in the SAGA Light Source (SAGA-LS) storage ring. The beam lifetime is dominated by Touschek scattering which has a polarization dependent cross section. Since the operating point of the SAGA-LS ring is close to the linear spin resonances, polarization level is essentially sensitive to the operational condition of the storage ring. As a first step of the experimental investigation on the radiation polarization and its effect to the beam lifetime, we observed resonant spin depolarization of the stored beam. Resonant spin depolarization of the 1.4 GeV beam was observed though changes of the beam lifetime and beam loss rates.

1. はじめに

蓄積リングを周回する電子ビームはスピンドリフトを伴うシンクロトロン放射により、徐々にスピンの向きが偏向電磁石磁場に反平行へ揃ってくる。この現象は電子ビームの放射偏極 (Sokolov-Ternov 効果) として良く知られており、スピン偏極度の測定や消極共鳴を利用したビームエネルギー測定は多くの電子蓄積リングで行われている [1]。偏極度の理論上の最大値はおよそ 92.4% であるが、実際の加速器では不整磁場や電子の運動に起因する様々な消極作用との平衡状態として到達偏極度が決まる。また電子・電子の散乱断面積はスピンの向きに依存するため、タウシェック効果がビーム寿命を支配する蓄積リングでは、ビーム寿命はスピン偏極度に依存することが知られている。

放射光施設 SAGA Light Source (SAGA-LS) の 1.4 GeV 電子蓄積リングのビーム寿命はタウシェック効果が支配的である [2]。さらに偏極時間は 40 分程度と充分短く、日々の運転におけるビーム寿命の変動は到達スピン偏極度の増減を反映している可能性がある。スピン偏極度の変動機構を解明し常に高い偏極度が保たれるよう対処できれば、タウシェック寿命は最大限まで拡大されることとなる。光源用電子蓄積リングにおける放射偏極は、高精度ビームエネルギー測定法としての消極共鳴の利用のみならず、スピン偏極度の変動機構の解明を通じてタウシェック寿命の拡大・安定化へも貢献しうするため、偏極効果の基本的理解は放射光利用の観点からも有益と言える。本研究では SAGA-LS 蓄積リングにおけるスピン偏極効果の探索の第一段階として、振動磁場によるスピン消極共鳴の観測を試みた。

2. スピン放射偏極

2.1 概要

偏極状態へのビルドアップ時間 (偏極時間) は実用式で、

$$\tau_{\text{pol}} [\text{min}] = 98.7 \frac{\rho^2 [\text{m}] R_{\text{ave}} [\text{m}]}{E^5 [\text{GeV}]} \quad (1)$$

* kaneyasu@saga-ls.jp

と表される。ここで ρ, R_{ave}, E はそれぞれ偏向電磁石の曲率半径、蓄積リングの平均半径、ビームエネルギーである。偏極時間はビームエネルギーの 5 乗に反比例し蓄積リングの半径の 3 乗に比例するため、ビームエネルギーの高い蓄積リングの方が偏極時間は短くなりスピン偏極の観測は容易となる。SAGA-LS 蓄積リングは GeV クラスのビームエネルギーながらも比較的小型なことからスピン偏極時間は 40 分程度と充分に短い。またスピン偏極によるタウシェック寿命の増加は 10% 程度と見積もられている。

2.2 偏極度の変動機構

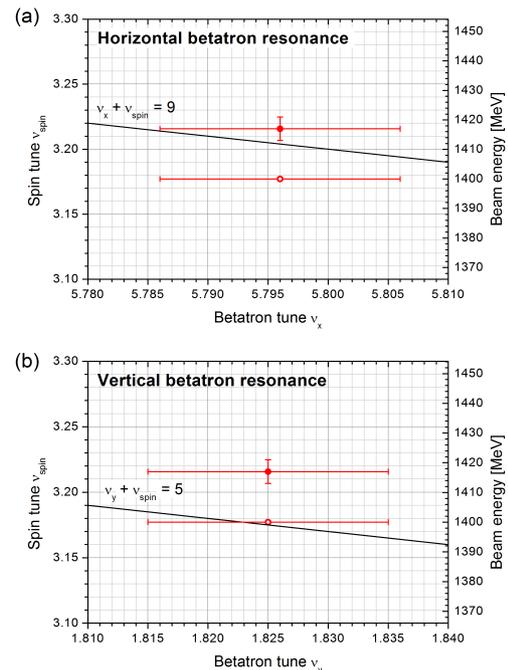


Figure 1: Operating point of the SAGA-LS storage ring and linear spin resonance lines. (a) Horizontal betatron resonance, (b) Vertical betatron resonance.

SAGA-LS 蓄積リングにおいて到達スピン偏極度が変動する機構として線形スピン消極共鳴の寄与を推定した。線形スピン消極共鳴は

$$\nu_{\text{spin}} = k \pm \nu_{x,y} \quad (2)$$

と表される。ここで $\nu_{x,y}$ は水平・垂直方向のベータatronチューンであり、 k は任意の整数である。スピンチューン ν_{spin} はリング一周あたりの歳差運動周波数で、

$$\nu_{\text{spin}} = a\gamma \quad (3)$$

とかける。 a と γ は異常磁気モーメントとローレンツ因子である

SAGA-LS 蓄積リングの運動動作点を Figure 1 に示す。ベータatronチューンは設計値 $(\nu_x, \nu_y) = (5.796, 1.825)$ をプロットした。エラーバーはチューンの再現性の運転実績 (± 0.01) に対応する。スピンチューンは磁場測定に基づくビームエネルギーの設定値 (1400 MeV) に加え、レーザーコンプトン散乱を用いた測定値 (1417 ± 4 MeV) [3] を示した。スピンチューンに対応するビームエネルギーはグラフ右側の縦軸に示している。

水平方向に関してはビームエネルギーが 1417 MeV 近傍であれば動作点は線形共鳴に近いことがわかる。一方、垂直方向についてもビームエネルギーが設定値近傍であれば、動作点は線形共鳴に近く偏極度は低下すると考えられる。Figure 1 に示したように SAGA-LS 蓄積リングの運転動作点は線形共鳴に近く、偏極度は低下しやすいと予想される。すなわち、蓄積リング運転条件の微妙な変化によっても動作点は線形共鳴へ近づきやすく、その結果、到達スピン偏極度の減少を通じてタウシェック寿命は短くなる。蓄積リング運転条件の変化には、温度変化や電源安定度といった短期的なものから、建屋の伸縮膨張によるリング周長変化(ビームエネルギー変化)など中長期的な要因まで多くの効果が寄与すると考えられる。将来的にはスピン偏極度の増減を常時モニターできるシステムの構築を目指し、到達偏極度の変動機構の解明に取り組む予定である。

2.3 スピン消極共鳴

スピン歳差運動に同調した水平方向振動磁場を用いれば、スピン消極共鳴による偏極度の低下が起こる。消極共鳴周波数は

$$f_{\text{RSD}} = (n + \nu_{\text{spin}}) f_{\text{rev}} \quad (4)$$

と表される。ここで f_{rev} は周回周波数、 n は任意の整数である。消極共鳴周波数の決定にはスピン偏極度の低下を検出する必要がある。偏極度の測定方法としては、円偏光レーザーを用いた逆コンプトン散乱ガンマ線の空間分布測定(コンプトンポーラリメータ)が用いられる。また簡便な方法としては電子損失率計数が有効と知られている。スピン偏極度が低下すればタウシェック散乱による電子損失率が增加するため、タウシェック散乱による電子損失に鋭敏な箇所(ビームロスモニター)を設置できれば、電子損失率の増加としてスピン消極共鳴を検出できる。電子損失計数を用いたスピン消極共鳴周波数の測定は、タウシェック寿命が支配的な光源用電子蓄積リングにおける高精度ビームエネルギー測定法 [4, 5, 6] として多く用いられており、本研究においても電子損失率計数によるスピン消極共鳴の観測を試みた。

3. 測定方法

水平方向の振動磁場はバンチフィリング制御用の RFKO [7] を利用した。振動磁場周波数の掃引にはスペクトラムアナライザーのトラッキング出力を使用しており、RFKO パワーは電極一本あたり最大 100 W である。電子損失計数を利用したスピン消極共鳴の観測において、ビームロスモニターをタウシェック散乱による電子損失に敏感な箇所へ設置することが必須である。そこでビームロスモニターを蓄積リングの 1 セル内の各所に取り付けて最適な箇所を探した。ビームロスモニターは、小型で設置自由度が高くかつ取扱の容易な Bergoz 製 BLM を用いた。BLM の取り付け箇所と計数率を Figure 2 と Figure 3 に示す。計数率の測定はビーム電流 320 mA、カップリング 1.4% で行った。電子損失計数率は直線部中央付近 (BLM-9) と偏向電磁石 BM13 の出口 (BLM-17) で高いことがわかった。今回の調査では総じて蓄積リング内側の方が計数率が高い傾向であった。

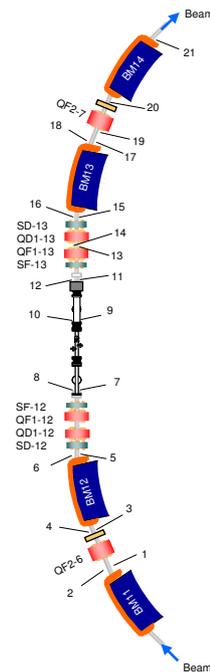


Figure 2: Layout of the BLMs for observing the beam loss events caused by Touschek scattering. The BLMs are attached to the side plane of the beam ducts.

4. 測定結果

スピン消極共鳴の測定は、1.4 GeV 電子ビームの蓄積開始後、1 時間経過してから開始した。タウシェック寿命が支配的となるように、電子ビームのカップリングはスキュー四極電磁石を用いて適宜調整した。振動磁場周波数の掃引速度は 10 Hz/s へ設定し、周波数掃引をしながらビームロスレートと蓄積ビームの各種パラメータを測定した。

スピン消極共鳴の測定例を Figure 4 に示す。Figure 4 に示した測定では、 $f_{\text{RSD}} = \nu_{\text{spin}} f_{\text{rev}}$ の消極共鳴を観測できるよう周波数掃引の範囲を設定した。共鳴周波数に

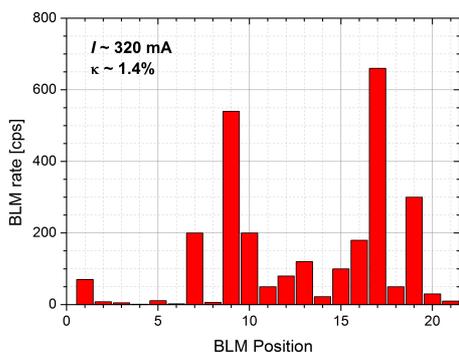


Figure 3: Counting rates of the BLMs attached to the side plane of the storage ring beam duct. The BLM positions are shown in Fig. 2.

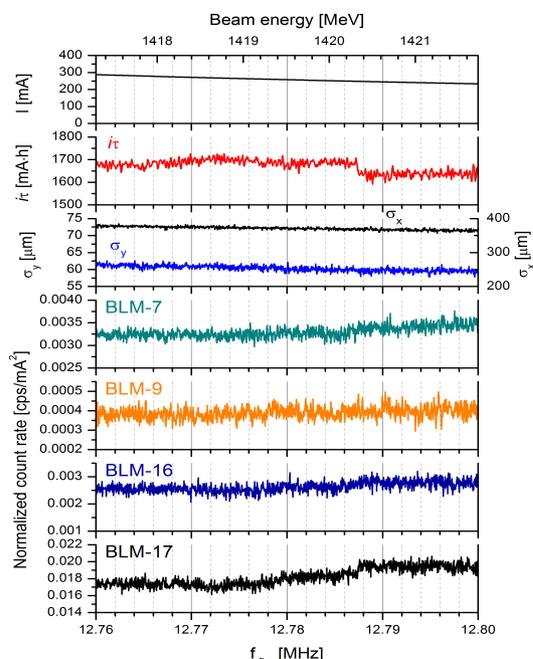


Figure 4: Beam parameters and loss rates during the frequency sweep of the RFKO. The frequency range is set to observe $f = \nu_{\text{spin}} f_{\text{rev}}$ resonance. Measurement positions of the BLMs are shown in Fig. 2.

対応するビームエネルギーはグラフ最上段の横軸に示してある。ビームロスモニターの計数率はビーム電流値で規格化している。

$f_{\text{rfko}} \simeq 12.787$ MHzにて i_t のステップ状の減少と BLM-17 の計数率増加が観測された。水平・垂直方向のビームサイズに変化はなく、蓄積リング真空度の悪化も見られなかったことから、ビーム寿命が急激に変化した要因は消極共鳴によるスピン偏極度の低下と考えられる。消極共鳴周波数に対応するビームエネルギーは 1420.5 MeV となる。ビームエネルギー設定値 (1400 MeV) に比べ、20 MeV 程度高い値であるが、レーザーコンプトン散乱ガンマ線の最大エネルギーから換算した値 (1417 ± 4 MeV) とは整合している。

Figure 5 に $f_{\text{RSD}} = (\nu_{\text{spin}} - 3)f_{\text{rev}}$ の消極共鳴を対象

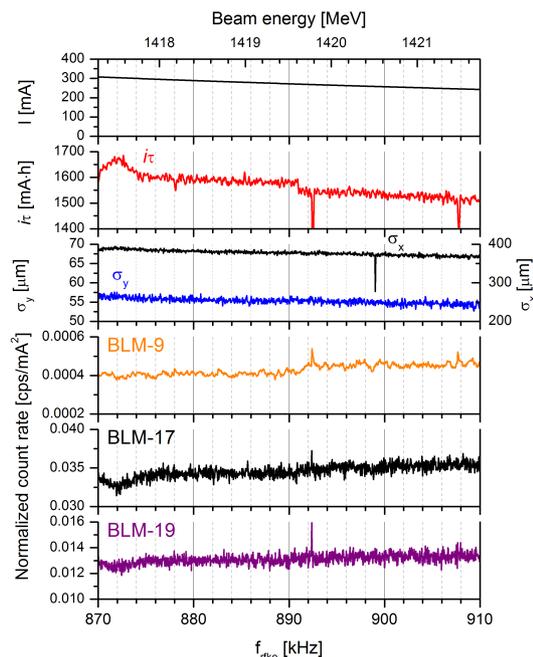


Figure 5: Beam parameters and loss rates during the frequency sweep of the RFKO. The frequency range is set to observe $f = (\nu_{\text{spin}} - 3)f_{\text{rev}}$ resonance. Measurement positions of the BLMs are shown in Fig. 2.

とした測定結果を示す。 $f_{\text{rfko}} \simeq 872$ kHzにおける i_t の増加および電子損失率の減少は、垂直方向のベータトロン振動の共鳴励起 ($f = (5 - \nu_y)f_{\text{rev}} + 3f_s$) によるビームサイズの増大に起因する。また周波数掃引中に数回観測されたスパイク状の i_t の減少は、微小なビームロスが突発的に生じたためと考えている。スピン消極共鳴らしき i_t のステップ状の減少は $f_{\text{rfko}} \simeq 890.9$ kHzで観測された。この i_t のステップ状の減少を消極共鳴と解釈すると、対応するビームエネルギーは 1420.9 MeV となる。しかしながらこの測定では電子損失率の増加傾向は観測されておらず、ビームロスモニターの取り付け位置が適切では無かった可能性が高い。

これまでにスピン消極共鳴の測定を複数回繰り返しているが、電子損失率の変化が観測されたのは測定 3 回につき 1 回程度であり再現性に乏しいことが問題となっている。ただし消極共鳴周波数はいずれもビームエネルギーに換算すると 1420 MeV 付近であった。実験的な確証を得るにはさらなる検証が必要であるが、現段階でもスピン消極共鳴を観測した可能性が高いと考えている。今後はシンクロトロン振動によるサイドバンド構造の検証やビームエネルギー設定値を変えた測定など、スピン消極共鳴の観測を確実なものとするためにさらなる測定に取り組む予定である。また現状の測定系では BLM による電子損失計数率が低く、十分な統計精度を得るには測定時間がかかることが問題となっている。そこで今後はより大型の検出器 (5 インチ NaI 検出器) をビームロスモニターとして採用するなど測定系の改善にも取り組んでいく。

5. まとめ

SAGA-LS 蓄積リングにて電子損失計数によるスピン消極共鳴の観測を試みた。水平方向振動磁場の周波数を掃引しながら電子損失率を計数し消極共鳴周波数を決定した。消極共鳴周波数から換算したビームエネルギーは設定値より 20 MeV 程度高い値であった。測定の再現性は乏しいものの、現段階でもスピン消極共鳴を検出した可能性が高いと考えている。今後は消極共鳴の測定系の改善に加え、円偏光レーザーを用いたコンプトンポラリメータの開発にも取り組み、スピン偏極度の変動機構の解明を目指す予定である。

6. 謝辞

本研究で使用したビームロスモニターは分子研 UVSOR の加藤政博教授ならびに関係者のご好意により借用させていただきました。ビームロスモニターの使用方法に関して林憲志技術職員より助言を得ました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] S. R. Mane et al., Rep. Prog. Phys. 68 (2005) 1997.
- [2] T. Kaneyasu et al., Nucl. Instr. and Meth. A 694 (2012) 107.
- [3] T. Kaneyasu et al., Nucl. Instr. and Meth. A 659 (2011) 30.
- [4] C. Steier et al., Proc. of EPAC2000, p. 1566.
- [5] I.P.S. Martien et al., Proc. of IPAC2011, p. 1404.
- [6] J. Zhang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 697 (2013) 1.
- [7] 江田茂他, 第 2 回日本加速器学会年会プロシーディングス, p. 693 (2005).