

光ポンピングしたスピン偏極アルカリ金属原子による精密計測

Tutorial Overview of Optically-Pumped and Spin-Polarized Alkali-Metal Atoms for Precision Measurements

石川 潔 (兵庫県立大学)

Kiyoshi ISHIKAWA (University of Hyogo)

1. はじめに

近年、国内外で原子時計 (atomic clock), 電場計 (electrometer), 磁力計 (magnetometer), 回転計 (gyroscope) などの原子センサー (atomic sensor) が開発・市販されている。製品なのでブラックボックスとして使うことができる一方、量子技術を駆使した計測器は、動作原理を理解してこそ、性能を発揮する。講演では、ブラックボックス化の流れに逆らい、原子センサーの原理を解説する。また、原子磁力計を中心に、室温より温度の高いガラス容器 (glass cell) 中の蒸気原子 (warm atomic vapor) を利用した精密計測について、最近の動向を紹介する。以下、原子センサーの概要とキーワードを述べ、講演資料とする。講演スライドでは、文末の参考文献を引用する。

2. 原子センサーの動作原理

容器中の原子数は $N \approx 10^{12}$ であり、原子が独立であれば、原子 (スピン) 数のショット雑音は \sqrt{N} である。原子センサーの計測感度は、このショット雑音を検知できる。例えば、直線偏光を蒸気に照射し、ファラデー回転 (Faraday rotation) によりスピン偏極 (spin polarization) の光軸 (z) 成分を検出する。このとき、信号に重畳する原子数と光子数のショット雑音が感度を決める。十分に非共鳴にすると、光の吸収による原子の状態変化が小さい。厳密には、そのスピン成分 $\langle S_z \rangle$ を変化させない、量子非破壊 (Quantum Non-Demolition) 測定になる。光ポンピング (optical pumping) により、原子すべてを独立な同じ量子状態にすると、スピン状態の検出限界は $1/\sqrt{N}$ になり、外部磁場中のスピンドायナミクスを高感度に検知できる。偏向や振幅スクウィーズド光を使うと、ある条件では検出限界を $1/N$ にすることもできる。

以上の検出限界を実現するためには、測定時間を十分に長くする必要がある。測定時間は、スピン緩和 (spin relaxation) により決まるので、緩和時間が長いほど良い。ガラス容器中で原子がスピン緩和する原因は、次の3つである。1) 壁への衝突、2) 励起原子の発光、3) 原子衝突。壁でのスピン緩和 (wall relaxation) を抑える1つの方法は、有機分子で内壁をコーティング (anti spin-relaxation coating) することである。おもに、原子の吸着時間を短くすることにより、スピン緩和を抑える。2つめは、緩衝ガス (buffer gas) を使うことである。真空中の弾道運動では短時間で原子が壁に衝突するが、緩衝ガス中では拡散運動するの

で壁に衝突するまでの時間が長くなる。2) 光ポンピングにより励起された原子の発光は、再び他の原子に吸収 (self-, re-absorption) されると、原子集団としてスピン偏極が乱れるので、発光を抑える消光 (quenching) ガスを使う。3) について、緩衝ガスも消光ガスも、アルカリ原子との衝突によりスピン緩和させる。緩和を抑える効果とのバランスが重要である。さらに、光学遷移の圧力広が (pressure broadening) により、ファラデー検出光の非共鳴を大きくする必要がある。次に、センサー感度を上げる、つまり、ショット雑音限界 $1/\sqrt{N}$ を下げるため、アルカリ原子数を増やすことが重要である。加熱して原子密度を上げると、信号が大きくなるが、アルカリ原子どうしの衝突による電子のスピン交換相互作用 (spin-exchange interaction) をとおして、スピン緩和が顕著になる。単純には、原子数には最適値があり、それより大きくしてもセンサー感度は上がりそうにない。この問題は、スピン偏極原子どうしが衝突してもスピン緩和しない現象 (光によりスピン偏極するので light narrowing とよぶ) により解決する。またアルカリ原子の基底状態は、超微細分裂 (hyperfine splitting) し、実験室系で互いに逆回りのスピン歳差運動 (spin precession) をする。スピン交換衝突レートが、歳差運動のラーモア (Larmor) 周波数より大きいときも、緩和が小さくなる。この条件で動作するのが SERF (spin-exchange-relaxation-free) 磁力計である。磁場が大きくなるとラーモア周波数が分裂 (non-linear Zeeman splitting) する。この分裂は、回転座標系におけるスピン緩和とみなすことができる。スピン交換衝突レートが周波数分裂より大きいと、回転座標系における SERF 条件が満たされ、歳差運動が長続きする。この条件で動作するのが Spin Precession 磁力計である。

静磁場一定のとき、装置が回転すると、一定であるはずのラーモア周波数が変化したように見える。回転計は、環境磁場の揺らぎを相殺するようにラーモア周波数の異なる2種類の原子を用いる (co-magnetometer)。つまり、参照原子により磁場を補正し、他方の原子の周波数変化により装置の回転を検知する。原子の組合せとして、2種のアルカリ原子、あるいは、アルカリ原子と希ガス原子などがある。前者では、一方の原子を光ポンピングし、他方の原子のスピン状態を光検知する。検知する原子のスピン状態は、励起光の強度分布や light shift (effective magnetic field) の影響を

受けない。後者では、原子衝突における、アルカリ原子の価電子と希ガス原子の核の接触磁気相互作用により、希ガスの核スピンの偏極を移す。これを、スピン交換光ポンピング (Spin-Exchange Optical Pumping) とよぶ。外部磁場中の希ガス原子の核スピンの向きを、直接光検知することは難しい。SEOP の逆過程によりアルカリ原子を介して検知する、高感度原子磁力計も開発された。また、希ガスの核スピンは、環境との相互作用が非常に小さいので、量子状態を長く保つ量子メモリーになる。

3. まとめ

原子センサーは、センサーの小型化、環境磁場で計測するための高ダイナミックレンジ化、量子計測による高感度化などを中心に開発されている。講演では、次の項目について解説する。

1. Atomic sensors in a vapor cell
2. Optical pumping
3. Faraday rotation
4. Suppression of spin relaxation
5. Spin-exchange interaction
6. Alkali-metal atoms
7. Spin-exchange optical-pumping of noble gases
8. Atomic vapor cells
9. Scalar, Vector, and Differential sensors
10. Quantum technologies

参考文献

- 1) D. Budker, D. J. Kimball, **Optical Magnetometry** (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013).
- 2) **High-Sensitivity Atomic Magnetometer Unaffected by Spin-Exchange Relaxation**, J. C. Allred *et al.* PRL **89**, 130801 (2002).
- 3) **Optical magnetometry**, D. Budker, M. Romalis, *Nature Physics* **3**, 227 (2007).
- 4) **Vapor-Cell-Based Atomic Electrometry for Detection Frequencies below 1 kHz**, Y.-Y. Jau *et al.* PRApplied **13**, 054034 (2020).
- 5) **Differentially detected coherent population trapping resonances excited by orthogonally polarized laser fields**, M. Rosenbluh *et al.* Optics Express **14**, 6588 (2006).
- 6) S. J. Seltzer, **Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry** (PhD Thesis, Princeton University, 2008).
- 7) **Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms**, D. Budker *et al.* RMP **74**, 1153 (2002).
- 8) **Optical rotation in excess of 100 rad generated by Rb vapor in a multipass cell**, S. Li *et al.* PRA **84**, 061403(R) (2011).
- 9) **Measurement of dwell times of spin polarized rubidium atoms on octadecyltrichlorosilane- and paraffin-coated surfaces**, E. Ulanski *et al.* APL **98**, 201115 (2011).
- 10) **Polarized Alkali-Metal Vapor with Minute- Long Transverse Spin-Relaxation Time**, M. V. Balabas *et al.* PRL **105**, 0708011 (2010).
- 11) **Spin-Exchange Shift and Narrowing of Magnetic Resonance Lines in Optically Pumped Alkali Vapors**, W. Happer *et al.* PRL **31**, 273 (1973).
- 12) **Light narrowing of rubidium magnetic-resonance lines in high-pressure optical-pumping cells**, S. Appelt *et al.* PRA **59**, 2078 (1999).
- 13) **Hybrid Optical Pumping of Optically Dense Alkali-Metal Vapor without Quenching Gas**, M. V. Romalis, PRL **105**, 243001 (2010).
- 14) **Coherent Coupling of Alkali Atoms by Random Collisions**, O. Katz *et al.* PRL **115**, 113003 (2015).
- 15) **Floquet Spin Amplification**, M. Jiang *et al.* PRL **128**, 233201 (2022).
- 16) **Nuclear Spin Gyroscope Based on an Atomic Comagnetometer**, T. W. Kornack *et al.* PRL **95**, 230801 (2005).
- 17) **Spin-exchange optical pumping of ^3He with Rb-K mixtures and pure K**, W. C. Chen *et al.* PRA **75**, 013416 (2007).
- 18) **Optical quantum memory for noble-gas spins based on spin-exchange collisions**, O. Katz *et al.* PRA **105**, 042606 (2022).
- 19) **Spectroscopic study of a diffusion-bonded sapphire cell for hot metal vapors**, N. Sekiguchi *et al.* Applied Optics **57**, 52 (2018).
- 20) **Lifetime assessment of RbN₃-filled MEMS atomic vapor cells with Al₂O₃ coating**, S. Karlen *et al.* Optics Express **25**, 2187 (2017).
- 21) **Miniature Biplanar Coils for Alkali-Metal-Vapor Magnetometry**, M. C. D. Tayler *et al.* PRApplied **18**, 014036 (2022).
- 22) **Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer**, H. B. Dang *et al.* APL **97**, 151110 (2010).
- 23) **Subfemtotesla Scalar Atomic Magnetometry Using Multipass Cells**, D. Sheng *et al.* PRL **110**, 160802 (2013).
- 24) **All-Optical Vector Atomic Magnetometer**, B. Patton *et al.* PRL **113**, 013001 (2014).
- 25) **Unshielded three-axis vector operation of a spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer**, S. Seltzer *et al.* APL **85**, 4804 (2004).
- 26) **Highly stable atomic vector magnetometer based on free spin precession**, S. Afach *et al.* Optics Express **23**, 22108 (2015).
- 27) **Femtotesla Direct Magnetic Gradiometer Using a Single Multipass Cell**, V. G. Lucivero *et al.* PRApplied **15**, 014004 (2021).
- 28) **Femtotesla Nearly-Quantum-Noise-Limited Pulsed Gradiometer at Earth-Scale Fields**, V. G. Lucivero *et al.* PRApplied **18**, L021001 (2022).
- 29) **Quantum nondemolition measurement of spin via the paramagnetic Faraday rotation**, Y. Takahashi *et al.* PRA **60**, 4974 (1999).
- 30) **Can a Quantum Nondemolition Measurement Improve the Sensitivity of an Atomic Magnetometer?** M. Auzinsh *et al.* PRL **93**, 173002 (2004).
- 31) **Squeezed-Light Enhancement and Backaction Evasion in a High Sensitivity Optically Pumped Magnetometer**, C. Troullinou *et al.* PRL **127**, 193601 (2021).
- 32) **Quantum metrology with nonclassical states of atomic ensembles**, L. Pezzè *et al.* RMP **90**, 035005 (2018).

PRL: Physical Review Letters, PRA: Physical Review A, RMP: Reviews of Modern Physics, PRApplied: Physical Review Applied, APL: Applied Physics Letters