

2023年3月16日

研究課題：高温動作するリチウム原子センサーの開発と核磁化の検知

研究代表者：石川 潔

所属・職名：兵庫県立大学大学院理学研究科・准教授

【研究背景】

蒸気原子と光を使ったセンサーは非常に精度が高い。測定する量は、一般に、磁場、電場、回転、時間である。例えば、生体が発する磁場、スマホのような通信端末の電波、航空機ナビに搭載するジャイロ（回転計）、周波数や時間の精度は、現在、原子センサーが最も高い。磁場測定の場合、センサー本来の感度に加え、非測定物に接近できるか、小型であるか、センサー温度などの条件が測定対象の機能を損なわないか、などが重要である。既存の蒸気原子センサー（リチウムとは異なるアルカリ金属、例えば、ルビジウムやセシウムを使用する）は室温～100℃のガラスセル中で動作し、上で挙げた既存の使用例に適している。しかし、さらに高温では、蒸気原子の数密度が濃くなりすぎて光を透過しなくなり、センサーの機能は失われる。そこで、室温付近では蒸気圧が低く、高温で濃度が最適になるリチウム原子が、高温で動作する原子センサーに適している。期待する動作温度は250～350℃である。ただし、高温におけるリチウム原子の分光は前例が少ないので、基礎的な分光研究が必要である。

【研究目的】

本研究は、リチウム原子を使った磁気センサーを開発し、感度と温度範囲を改善することを目的とした。現在、高温で動作するリチウム原子センサーの感度は、基底状態の超微細準位暗状態を利用した方法により、 $15 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。本研究の具体的な目標を以下に示す。

1. 磁気シールド内に印加したバイアス磁場 $1 \mu\text{T}$ 中の磁場感度を $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ に向上させる。センサーが動作する温度範囲は、現在の $250\sim 350^\circ\text{C}$ から $200\sim 400^\circ\text{C}$ に広げる。これらの改善により、広い温度範囲でスピン雑音（原子集団のスピンに由来する雑音）を観測できるようになる。原子が磁気センサーとして働くのは、原子が小さな磁石であり、原子の向きが外部から加えられる磁場により変化するからである。原子集団のスピン雑音を観測できるということは、センサーが究極の感度を有していることである。
2. リチウム原子センサーを用いて、同じガラスセルに封入した固体の核磁化（蒸気原子1個に比べ、固体中の原子核1個が発する磁場は 10^{-3} の強さ）の時間変化を測定する。高温になると、蒸気リチウム原子と固体中のリチウム原子の交換が激しくなるので、核磁化の時間変化が期待される。
3. 上記の目標を達成するため、リチウム原子の量子状態の緩和を詳しく調べる。緩和時間が長いほど、高精度な計測が可能になる。

【研究成果】

磁気シールドボックスの中央に設置した恒温槽内で、リチウム金属と希ガス (He, Ne, Ar, あるいは Xe) を封入したガラスセルを約 300 °C にした。ガラスセルに、リチウム原子の吸収波長 (D₁ 線, 671 nm) のレーザー光を照射し、蒸気原子の量子状態を初期化する。その後照射した微弱な検出レーザー光の強さや偏光状態を検知し、外部磁場中で変化する原子の状態を調べる。この外部磁場が、測定したい磁場である。検出光を吸収した励起原子からの発光を検知すると、原子の状態を高感度に検知できる。

1. 量子干渉効果 (原子の複数の状態の重ね合わせにより発現する量子効果) を利用し、検出レーザー光が吸収される割合により磁場計測した。
2. 原子からの発光を検知し、高感度化を実現し、粗いながらも位置分解能を持たせることができた。透過光は原子に吸収されなかった光なのに対し、発光は原子が検出光を吸収した分だけ放出する光である。したがって、発光に含まれる信号成分の割合は大きい。この発光検知により温度範囲を広げることができた。また、透過光は光路全体の平均的な情報を与えるのに対し、横から発光を検知すると、光路のそれぞれの位置における原子の情報を得ることができた。
3. 上記の量子干渉効果とは別の方法、つまり、外部磁場中の電子スピンの歳差運動を検出し、その周波数より磁場の大きさを求めた (歳差運動周波数は磁場に比例する)。歳差運動が持続する時間 (スピンの位相緩和時間) で平均した磁場測定である。したがって、歳差運動を繰り返し測定することにより、磁場の時間変化を得る。
4. リチウム原子分光により、希ガス原子との衝突によるエネルギー準位のシフトや緩和現象を観測した。希ガス原子が接近すると、パウリの排他律による反発力とファンデルワールス引力により、リチウム原子の価電子分布が変化する。電子基底状態の超微細分裂は、電子と核のスピンの相互作用によるので、電子密度が変化するとエネルギー準位のシフトや重ね合わせ状態の位相が変化する。希ガスの種類や密度に対するシフトと緩和の定量的な解析を論文で発表した。また、希薄な蒸気原子の量子状態を調べるため、光子統計を考慮した発光検知の感度を検討したので物理学会で発表する。アルカリ金属原子を利用した磁場や電場の量子精密計測について、レーザー学会で最近の動向について解説した。

【研究実績】

1. K. Ishikawa, "Pseudopotential analysis on hyperfine splitting frequency shift of alkali-metal atoms in noble gases, revisited", *The Journal of Chemical Physics*, **158**, 084306 (9 pages) (2023).
2. 石川 潔 「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」レーザー学会第 43 回年次大会 2023 年 1 月 20 日 E07-20a-IX-01, 名古屋市 (ウィンクあいち) .
3. 石川 潔, 井上真里 「発光検知による基底状態 Li 原子の CPT 暗共鳴の観測」日本物理学会春季大会 2023 年 3 月 24 日 24aA1-7, online.

【研究費】 備品費 217,800 円, 消耗品費 182,200 円, 合計 400,000 円