

兵庫県立大 院 物質理学 石川 潔

Spin dynamics of hot atomic vapor in the glass cells

Graduate School of Material Science, University of Hyogo Kiyoshi Ishikawa

だいたい、ガラス容器なるもの、現代光科学で使われるのだろうか。こんな疑問をもつ人も多いただろうが、ガラス容器中のアルカリ金属原子が時計や磁力計など精密計測に応用される例が多いのも事実である。ここでは、精密計測に際し望ましくない、非ユニタリな時間発展の原因である、原子や壁との衝突について述べる。

ガラス容器を使った携帯型原子時計などでは、動作温度でアルカリ金属膜が残留しない、いわゆるドライセルが使われる。一般に、金属として存在すると、気体原子の状態が(イン)コヒーレントに変化するからである。現実の表面の状態や相互作用を理解するためには、化学反応性の高いアルカリ金属がガラス容器中で存在する形態を知る必要がある。古くから、ガラス表面の金属薄膜が電氣的・光学的に調べられてきたが、近年、高磁場化により感度の向上した NMR 計測で、ガラス容器内の金属を分析できるようになった。分光に使われるような少量のアルカリ金属を封入したガラス容器では、ナイトシフトの温度依存性より、2種類の不純物が金属に溶けていることがわかる。実際には、どちらかが排他的に存在する。一方は酸素である。他方は不明だが、酸素と同様、金属から電子を奪い負イオンになっている。

不純物が必ずしも悪者とは限らない。例えば、核スピン偏極した希ガスを封入する際、使い込んだ汚い容器の方が核スピン緩和時間が長いことが経験的に知られている。不純物が酸素の場合、Cs や Rb 金属ではよくあるが、 O_2^- など局所的な常磁性分子として溶存させるのは避けるべきである。しかし、原子として溶け込めば金属の価電子を奪い O^{2-} になるので、金属中の電子密度が減少し、電子の熱運動により発生する磁場雑音が減少する。また、表面近傍で原子の感じるポテンシャルも変化する。それでいて、完全に酸化されていないので、金属原子の供給源として機能する亜酸化物コーティングになる。つまり、ほどよく酸化されたアルカリ金属は精密計測に適している。

さて、原子を光ポンピングすると、角運動量は電子スピンと核スピンの蓄積する。原子集団のみを見たら、光のあたる所で角運動量が湧き出している。表面処理を施しても、多かれ少なかれガラス容器の壁でスピン偏極が緩和するので、スピン源が空間的に均一であってもスピン状態が不均一になり、容器中に気体原子の運ぶスピン流が発生する。それらは、電子スピン流と核スピン流に分類できる。振動磁場などで動的な変化を誘起しなくてもよい。壁でスピン偏極率ゼロという境界条件を課し拡散方程式を解くと、均一な密度で存在する原子が角運動量の運び屋になり、原子衝突が電子スピン流と核スピン流を結合することがわかる。

スピン流の終着点である壁がガラスの場合、強磁性粉末の混入が少ないものを選んだとしても、表面には孤立電子対、常磁性不純物、あるいは電場勾配などがいたるところに存在し、壁との衝突は電子スピン緩和につながり、角運動量が無駄に消費される。C や Si を骨格にした長鎖分子によるコーティングは、ガラスのこれら欠陥を覆い隠すので、表面処理の主流である。しかし、緩和抑制の物理が曖昧であったり、歩留まりが低いなどの欠点も存在する。一方、希ガスに有効な亜酸化物コーティングでは、NMR 計測という定量的な分析手法により、処方箋が確立することが期待できる。

上では、気体原子系に蓄えた角運動量が他の系に漏れる経路を断つことに注目した。ここでは視点を変え、壁になる固体も含め全体で spin capacitor とし角運動量を蓄えたとしたら、固体試料は次の性質を持つべきだろう。[1] 電子系よりも、長いスピン緩和時間の核スピン系、[2] 核スピン 1/2, あるいは、小さな電気四重極子モーメント、[3] 電子系との結合をスイッチできることである。この数年、我々は、光ポンピングした気体原子のスピン流を固体に注入することを試みている。試料として壁にアルカリ塩 (CsH, CsCl) を付着させ、原子を光ポンピングすると、アルカリ塩の核スピン偏極率の増大を NMR 計測できる。これまでに磁場 9.4 T と 2.7 T の実験を報告したが、最近、さらに低い 0.56 T でもスピン偏極を確認できた。低磁場では熱平衡状態の偏極率が低いので、NMR 信号がスピン注入の効果をそのまま反映している点が特徴である。表面におけるスピン注入の機構を調べ注入効率の向上をめざす過程で、逆に、スピン相互作用から表面の情報を得られることを期待する。