

高絶対精度磁場測定 NMR プローブの開発

SATテクノロジー・ショーケース2022

■ はじめに

素粒子の標準理論は様々な実験事実を説明しているが、暗黒物質と暗黒エネルギーの存在や物質優勢の宇宙など説明できない観測事実も存在する。そのため、その綻びを実験的に探索するためには非常に高い精度での測定が要求される。例えば、茨城県東海村の J-PARC で行われる、ミューオンの異常磁気能率および電気双極子の精密測定実験(g-2/EDM)や、ミューオニウム の精密分光測定実験(MuSEUM)では、ミューオンを使った物理実験を行うために、3.0 T や 1.7 T の強さの磁場を一辺 300 mm 程度の広い空間に渡って ± 0.1 ppm 未満の一様性に調整しなければならない。ただ一様であれば良いわけではなく、磁場の絶対値も設計通りとなる必要がある。磁場の時間的、空間的な分布は多数の NMR プローブとホール素子を用いて測定するが、これらの一つ一つのプローブの絶対値を校正するための標準となるプローブを開発する必要がある。これまで J-PARC 低温セクションでは純水中の陽子を用いた NMR プローブの開発に成功しており、新たに ^3He ガスを用いた NMR プローブの開発に取り組んでいる。

■ 活動内容

1. 純水を用いた NMR プローブ開発

数テスラの磁場を測定する方法としては、ホール素子や核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) を用いるのが一般的である。ホール素子の測定精度は 100ppm 程度が限界であるのに対して、NMR を用いたプローブでは原理的には ppm より高い精度が実現できる。そのため純水中の陽子を用いた NMR プローブを開発した[1]。純水は安定な物質であり、その特性が詳細に調べられているため、よく用いられる。

純水を保持するガラスチューブや NMR 信号をピックアップする銅線、NMR 信号の読み出し基板、構造部材

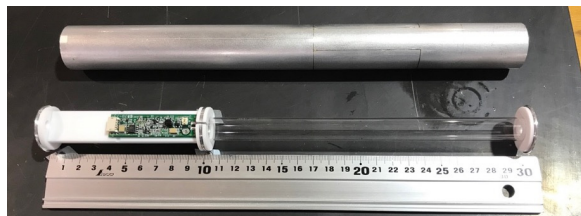


図 1: 純水 NMR プローブ

のアルミとテフロンなどは有限の磁化率(体積磁化率 ppm オーダー)を持っているためプローブを挿入することで測定したい磁場が乱れてしまう。磁化率には正の値を持つもの(アルミ)と負の値を持つもの(ガラス、銅、テフロン、水)が存在するためこれらをうまく組み合わせることで正味の磁化率を 0 に近づけるように設計した(図 1)。現在の不定性は 8.5 ppb であり更なる低減を進めている。

また、純水の磁化率にも温度依存性があるため、温度測定による磁場測定値の補正を行っている。温度による不定性は 11 ppb と見積もられている。

他にも純水の形状(円柱形)による効果、変調磁場の往路と復路の共振ピークの差、LC 共振回路のチューニングのズレ、プローブの向き依存性などを考慮すると総合的に 15 ppb の絶対精度で測定可能な NMR プローブになっている。

2. ^3He ガスを用いた NMR プローブ開発

純水を用いた NMR プローブは、十分な精度で磁場の標準プローブとなるが、使用する核種が 1 種類では評価から漏れた系統誤差の可能性を排除しきれないこと。また、磁化率が温度依存性を持つことなどから他の核種として ^3He ガスを用いた NMR プローブの開発に取り組んでいる。

^3He の利点は純水と比べて磁化率が小さく温度依存性が無視できるほど小さいこと、単原子分子で分子構造に起因する不定性が少ないことが挙げられる。欠点としては純水に比べて密度が小さく、磁場のみにによる偏極

図 2: ^3He を封入したガラスセル

代表発表者 角 直幸 (すみ なおゆき)
所 属 高エネルギー加速器研究機構
J-PARC 低温セクション

問合せ先 〒319-1106
茨城県那珂郡東海村大字白方 203-1
TEL: 029-284-4664
nsumi@post.kek.jp

■キーワード: (1) 磁場測定
(2) NMR
(3) 核偏極

■共同研究者: 佐々木憲一, 下村浩一郎,
三部勉, 猪野隆 (KEK),
奥平琢也, 奥隆之 (JAEA)

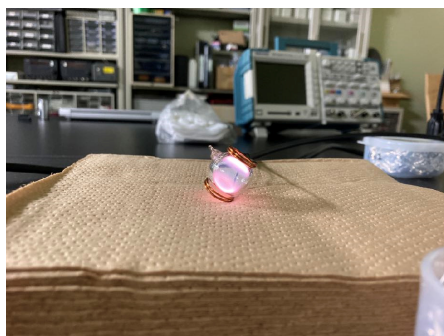


図 3: 高周波を印加し発光する ^3He ガラスセル

度も小さいため、別の方法で原子核の偏極を促し、信号強度を大きくする必要がある。

^3He は、MEOP (Metastability Exchange Optical Pumping)と呼ばれる手法で偏極する。まず、高周波を印加し電子を準安定状態に励起する。励起した電子に 1083 nm の円偏光レーザーを照射することで電子のスピンを偏極させる。最後に電子の偏極が別の基底状態の ^3He の原子核に移ることで偏極が進行する。

ガラスセルは不純物の混入を避けるため、アセトンとエタノールによる洗浄後に、ベーキングを行い 10^{-7} Pa まで真空引き後に ^3He を封入した(図 2)。ガラスセルに高周波を印加しスペクトルを取得し準安定状態への遷移が起こっていることが確認できている。

偏極率を維持するためと形状による磁場測定の不定性を抑えるためにはガラスセルは完全な球状であることが望ましい。これは純水の場合も同様である。しかし、真空引きやガス封入のために突起が残ってしまう。完全な球状のセルの製作が可能であれば測定精度の改善が

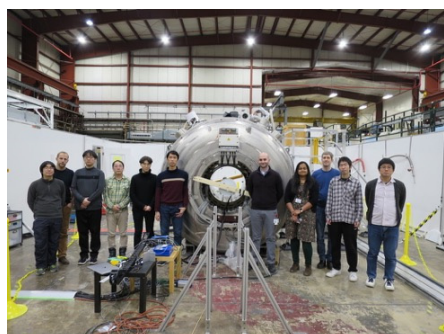


図 4: 日米プローブのクロスキャリブレーション

期待できる。

現在はレーザー設備の準備中で偏極を確認次第 NMR プローブとしての開発を開始し、純水のプローブと同等かそれ以上の精度を目指している。

3. プローブのクロスキャリブレーション

2015 年から日米の研究所でそれぞれ独立に開発した純水 NMR プローブのクロスキャリブレーションを行い(図 4)、系統誤差の検証を重ねてきた。ここに ^3He による NMR プローブを加えることで 2 核種×2 機関=4 種類のプローブによるクロスキャリブレーションでより高い信頼性を担保しようと計画している。

■ 関連情報等(特許関係、施設)

J-PARC の低温セクションでは、図 5 の MRI 磁石を運用しており最大 2.9 T の一様な磁場を利用できる環境がある。この MRI 磁石は一般に医療用に使われているものと同じであるが、内部の磁場調整用のポケットに鉄のシム板や磁性流体を使用して調整することにより 200 ppb の一様性を実現している。MRI 磁石内で資料やプローブを測定したい位置まで移動する専用のステージを備えており再現性の高い測定が可能である。

[1] H. Yamaguchi et al., "Development of a CW-NMR Probe for Precise Measurement of Absolute Magnetic Field," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 5, pp. 1-4, Aug. 2019, Art no. 9000904,



図 5: J-PARC 低温セクションの MRI 磁石