

論文の内容の要旨

Search For Vacuum Magnetic Birefringence with a high repetitive pulsed magnet

(高速繰り返し磁石を用いた真空複屈折の探索)

上岡 修星

Higgs 粒子の発見以降、真空は「真の空」ではなく豊かな物理構造を持つものとして素粒子物理学の研究対象となった。そういった真空中で生じると予測されている物理現象のなかに真空複屈折 (VMB) がある。VMB はたとえ真空中であっても強磁場中で真空の屈折率が異方性を持つという現象である。この現象は真空中の構造が媒介することで古典的には禁止されている電磁場同士の相互作用が可能になることによって生じる。真空複屈折を引き起こすとされている真空中の物理構造としてはまず量子電磁気学 (QED) で記述される真空中の仮想電子対がある。QED の計算から生じる複屈折の大きさは $\Delta n = 4.0 \times 10^{-24} B^2$ と計算される。それに加えて標準模型を超えた物理でその存在が予言されているアクシオン様粒子 (ALPs) や微小電荷粒子 (MCPs) も電磁場同士の相互作用を媒介することができる。特に ALPs に対しては真空複屈折の測定によって質量 0.1eV 付近では地上実験で最も感度よく探索可能であることが計算されている。量子電磁気学の精密検証、そして新物理探索として長年、真空複屈折実験は行われてきたが、未だ観測されていない。

真空複屈折を探索する手法として筆者らは高速繰り返しパルス磁石を用いた探索手法を提案した。真空複屈折による異方性は磁場の 2 乗に依存するため強い磁場が必要となる。パルス磁石はコイルに瞬間的に大電流を流すことでパルス状の強磁場を発生させる装置であり、到達している最大磁場は他の磁石に比べて 10 倍ほど大きい。先行研究では永久磁石を用いた探索が行われてきた。しかし永久磁石による磁場は 3T 程度が限界であり、また、この手法では真空複屈折の信号が数 Hz に現れるが、低周波に原因不明の複屈折雑音が観測されたため真空複屈折の観測には至らなかった。パルス磁石を用いた場合、真空複屈折の信号は数 100Hz の高周波に現れるため、低周波側のノイズも問題を回避できる。パルス磁石は自身の発熱によって通常数 mHz の繰り返し速度となっており、大統計を得るのが困難であった。筆者は、小型で発熱量が小さく冷却効率も良いパルス磁石を用いることでこの問題を解決する。具体的には駆動磁場 8.3 T、繰り返し速度 0.05 Hz のパルス磁石を使用した。これは先行研究に比べて 25 倍ほど繰り返し速度が速い。

真空複屈折の探索では従来より微小な複屈折性をエンハンスするためにファブリーペロー共振器という光学システムが用いられてきた。ファブリーペロー共振器を用いることで光と磁場の相互作用距離を 10 万倍以上もエンハンスすることができる。しかしファブリーペロー共振器はもっとも精密な光学系のひとつであり、先行研究ではパルス磁場の印加直後にパルス磁石特有の擾乱によって共振状態が乱れることが報告された。筆者は、磁石からの擾乱を徹底して光学システムから分離する系を開発することにより安定してパルス磁石と光学システムを組み合わせることのできる実験系を開発した。パルス磁石により瞬間的に 8.3T の強磁場を発生させても共振状態は乱れることはなく、世界初の共振器とパルス磁石の同時安定駆動に成功した。

また、先行研究で報告された複屈折雑音についても調査を行った。これまで 25 Hz 付近の低周波では、先行研究によって多くのノイズ調査が行われてきた。これは永久磁石を用いた実験で重要となる周波数領域である。それに対して、パルス磁石を用いた場合、数百から 1 kHz 付近の感度が重要となる。この領域でのノイズ調査はこれまで数例報告されたのみであった。本研究では、1Hz から 1 kHz までの広い領域での系統的なノイズ評価を行った。また、本研究で採用しているホモダイン方式の測定ではノイズ調査の手法が確立されていなかったため、既知のノイズ源から複屈折信号への影響の理論式の導出ならびに実測からその寄与を見積もる方法を確立した。既知のノイズ源の影響を正しく評価することが可能になったことによってそれらの複屈折信号への影響は十分抑えることが可能になり、複屈折による光路長差への感度は感度に重要となる 200 Hz から 1k Hz 付近で $1 \times 10^{-19} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで到達した。これは単純な光路長差の感度としては大型の重力波干渉計に匹敵する感度を持つ。また永久磁石を用いた先行研究で使用されていた周波数領域に比べると 5 倍ほど感度がよく、

パルス磁石を用いることで感度の良い領域を選択的に使用できることが示された。しかしながら、観測された複屈折雑音は 700Hz 以下の広い帯域で見積もりを乖離しており、先行研究同様に複屈折雑音の超過が観測され、未知のノイズ源が広い領域に渡って分布していることが判明した。またミラーの回転アライメント依存性も測定し、その依存性から観測されたノイズは非複屈折雑音の混入ではなく複屈折として期待される振る舞いを示すことがわかった。また、これらのことから測定方法の詳細によらず複屈折雑音が発生することが示され、測定方法によらず使用している光共振器自体がノイズ源の可能性がさらに高まった。

開発した装置の動作確認並びに解析手法の正当性の確認として窒素ガスを用いたガスの Cotton-Mouton 効果の測定を行った。Cotton-Mouton 効果は磁場や磁場長に対して真空複屈折と全く同じ依存性を持つため従来より装置の動作確認として用いられてきた。ダイポール型パルス磁石を用いて窒素ガスの Cotton-Mouton 効果を異なる圧力で測定し、その圧力依存性を求めた。解析には先行研究とは異なりノイズスペクトルが白色雑音では無いことを考慮した周波数空間でのパラメータ推定を行った。解析により得られた Cotton-Mouton 効果の比例係数は先行研究と誤差の範囲内で一致し、解析手法ならびに装置の validation を行うことができた。

ガスの測定に引き続いて真空複屈折測定を行った。測定は 1 ヶ月に渡って行い、ミラーの回転アライメントを変えながら合計で 26000 パルスが発生させた。これはパルス磁石を用いた先行研究に比べて 260 倍多いパルス数であり、高速繰り返し磁石の利点を活かすことが可能ということが判明した。窒素ガスの測定によって validation された解析手法を適用し、さらにミラーの複屈折の符号依存性を用いた系統誤差の削減を行った。解析の結果、有意な信号は観測されなかった。この結果から真空複屈折の比例係数である k_{cm} への制限が 95% 信頼区間で以下のように得られた。

$$k_{CM} < 1.8 \times 10^{-20} \text{ (95\% C.L.)} \quad (1)$$

得られた結果は永久磁石によって得られた制限には及ばないものの、装置開発、安定駆動、解析手法の各面においてパルス磁石を用いた真空複屈折の確立に成功したと言える。得られた結果を踏まえて将来的な大型化により世界最高感度に到達するプロセスを示した。