**O**bserving VAcuum with **OVAL**実験: Laser パルス磁石と高フィネス共振 器を用いた真空複屈折の探索

上岡修星、稲田聡明A、難波俊雄A、浅井祥仁、 吉岡孝高<sup>B</sup>、五神真、 松尾晶<sup>c</sup>、金道浩一<sup>c</sup>、野尻浩之<sup>D</sup>

東大理,東大素セ<sup>A</sup>、東大工<sup>B</sup>、東大物性研<sup>C</sup>、東北大金研<sup>D</sup>





## おしながき

- 1. 真空複屈折とは
- 2. 探索手法
- 3. setup紹介
- 4. ガスを用いたvalidation
- 5. 真空複屈折探索
- 6. 結果とこれから

## 真空複屈折とは

- 標準模型や多くのnew physicsは 真空中の電磁場の相互作用を予言
- ・磁場と光の相互作用で屈折率に異 方性→真空複屈折
- Δ n = n<sub>||</sub> n<sub>⊥</sub> = k<sub>CM</sub> × B<sup>2</sup>
   (QED理論値 k<sub>CM</sub>=4.0×10<sup>-24</sup>[T<sup>-2</sup>])
- 未知粒子も寄与: 0.1eVのALPsに
   対して地上実験で最も感度が良い
- 世界中で実験が行われ、伊の groupが3年間の測定でQEDまで 後20倍まで達したが、未発見

我々はOVAL実験と称して 真空複屈折探索実験を行っている





## 探索手法

- ・ 複屈折媒質は偏光の変化を生む ∝ Δn × L<sub>複屈折</sub>
- 偏光子: 偏光変化を光の強度変化として検出
- Fabry-Perot共振器と呼ばれる光共振器で相互作用長さを finesse倍 エンハンス (finesse~共振の鋭さ)
  - 感度∝ finesse×磁場<sup>2</sup>×磁場長×統計<sup>1/2</sup>



## 探索手法

- ・ 複屈折媒質は偏光の変化を生む ∝ Δn × L<sub>複屈折</sub>
- ・ 偏光子: 偏光変化を光の強度変化として検出
- Fabry-Perot共振器と呼ばれる光共振器で相互作用長さを finesse倍 エンハンス (finesse~共振の鋭さ)

感度∝ finesse×磁場<sup>2</sup>×磁場長×統計<sup>1/2</sup>



実験セットアップ全体



- 2.4mの光学定盤で実験
- 偏光子とミラーは真空中に封入
- •1.4mの共振器の中央に磁石が1個設置
- 磁石からの擾乱への対策が実験の鍵



## Key technology 1: パルス磁石

# ✓ 磁場長20cm、パルス幅1.2ms。最大磁場11.4T ✓ LqN₂で冷却しながら繰り返し0.06Hz、8.3Tで運転



beam pipe φ 5.3mm



磁場のタイミングスペクトル



#### Key technology 2: 光学システム

- 長さ1.4mのFabry-Pérot共振器を用いた高精度の偏光変化測
   定光学系を構築 → 波長1064nmでfinesse ~ 40万の共振器
- 磁場非発生時の偏光信号の周波数スペクトルから光学系の 感度を評価

偏光が変わった光の光強度検出器出力→このスペクトルを評価

∆n×L<sub>複屈折</sub>への感度 →偏光間の実効的な 光路長差への感度 で評価



#### Key technology 2: 光学システム

- ・長さ1.4mのFabry-Pérot共振器を用いた高精度の偏光変化測 定光学系を構築 → 波長1064nmでfinesse ~ 40万の共振器
- •磁場非発生時の偏光信号の周波数スペクトルから光学系の



## Key technology 3: 磁石起因の擾乱対策

- ・パルス磁石: 音や振動も 発生⇔共振器の共鳴曲 線の半値幅は200Hz(距 離に換算して3 pm!)
- ・先行研究は磁場発生数
   m秒で共振維持が不可
   能に→繰り返しの妨げ&
   雑音の増加
- 磁石と光学系を機械的 に分離
- 防音
- ・ 強固なfeedback制御
   で対策

昔の我々(t=0で磁場発生)







## ガスを用いたvalidation run

- ・装置・解析手法のvalidationとして窒素ガスのCotton-Mouton効果を測定→VMBと同じ磁場依存性を持つ
- ・ 偏光変化の周波数スペクトルから磁場<sup>2</sup>に比例する成分 を推定→符号の違う磁場を発生させて磁場に比例する 効果はcancel → +/- 0.9T



## 圧力依存性の確認

- ガスのCotton-Mouton効果は圧力に依存
- ・同様の測定を合計4点のガス圧で行いその結果を1次関数でfit→単位圧力あたりのCM効果の係数を取得できる

推定結果の圧力依存性



この傾きの 推定から以下の値が得られる $|k_{\rm CM}^{\rm N_2}| = (2.16 \pm 0.05) \times 10^{-18} [{\rm T}^{-2}{
m Pa}^{-1}].$ 

正しく装置の動作を確認!!

## 真空複屈折の探索

- 8.3T/-4.5Tで合計24000発のパルス磁場を発生
- 複屈折信号と微小な擾乱の効果を区別する必要がある
- ▶ 複屈折信号の向きは光学系のconfigurationで決定→2つの 異なるconfigurationで測定し擾乱などの複屈折以外の効果 によるパラメータ推定へのバイアスをキャンセルする

実測された信号波形とパラメータ推定の例



## 真空複屈折の探索

- 8.3T/-4.5Tで合計24000発のパルス磁場を発生
- 複屈折信号と微小な擾乱の効果を区別する必要がある
- ▶ 複屈折信号の向きは光学系のconfigurationで決定→2つの 異なるconfigurationで測定し擾乱などの複屈折以外の効果 によるパラメータ推定へのバイアスをキャンセルする

実測された信号波形とパラメータ推定の例





探索結果 2

- •2種類のrunにおける全パルスのパラメータ推定の結果の分布
- 真の複屈折信号は同じ方向に、それ以外のbiasは逆方向に 現れる
- 両者の分布の平均値を推定→ k<sub>cm</sub> = (2.5 ± 5.4)×10<sup>-21</sup> [T<sup>-2</sup>]



## 結果/今後の展望

- •系統誤差も含めたk<sub>CM</sub>への制限: k<sub>cm</sub> < 1.8×10<sup>-20</sup> [T<sup>-2</sup>] @ 95% C.L.
- パルス磁石を用いたVMB探索として過去の100倍以上の統計
- 発生磁場は世界一

過去の実験との比較



#### 結果/今後の展望

- 今後の展望
  - 1. 強磁場化:銅線自体は~20TまでOK。補強構造の最適化 → 感度~6倍
  - 2. 磁場長の延長:電源の改良+増大化で8個駆動可 → 感度 ~8倍

過去の実験との比較



## まとめ

- 真空複屈折はQEDや標準理論を超えた物理で予測される 真空中の電磁場の相互作用である。
- パルス磁石とFabry-Pérot共振器を組み合わせたセット アップを開発しVMBの探索を行った
  - 強磁場&高速繰り返しのパルス磁石
  - •距離にして10<sup>-19</sup> [m/Hz<sup>1/2</sup>]の光学システム
  - •磁石起因の擾乱への対策
- ・装置/解析手法のvalidationとして窒素ガスのCM効果を 測定→正しく装置/解析がworkしていることを確認
- 真空複屈折探索を行い合計24,000発のパルスを発生。得られた制限はk<sub>cm</sub> < 1.8×10<sup>-20</sup> [T<sup>-2</sup>] @ 95% C.L.