

OVAL 実験 — 真空を探る —

東京大学理学系研究科

樊 星

xfan@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学理学系研究科

上岡 修 星

kamioka@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学素粒子物理国際研究センター

難波 俊 雄

naniwa@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2017 年 (平成 29 年) 5 月 18 日

1 イントロダクション

昔はよかった。真空には何もなかった。ポンプで真空引きして、最後のひとつの原子まで取り出してしまうばおしまい、何もなし、という幸せな世界。ところが、最近では世知辛い世の中である。暗黒エネルギーであるとか、宇宙のインフレーションであるとか、ヒッグス場による質量生成であるとか、みんな分からないことや説明が面倒なことがある、好き放題に真空にその責を押しつけるようになってしまった。しかも困ったことに、ヒッグス粒子が発見されてしまった。ヒッグス場の自発的対称性の破れによって真空が相転移し、真空期待値が生じたなどというキテレツな話が実験で確認されてしまったのである。こうなってしまった以上、仕方がない、もう少しまじめに真空を調べるかというのが本実験の動機である。

OVAL 実験 — Observing VAcuum with Laser — [1] は、その名の通り、真空をレーザーで調べる。ただし、単に真空にレーザーを通しただけでは何も出てこない。別途、真空を歪ませて、構造を引きずり出す必要がある。われわれのグループはそのために強磁場を利用する。物性実験などでは、強磁場によって物質をポンプして、それに対する反応をレーザーでプローブするというポンプ・プローブ実験を行うが、OVAL 実験はいわば真空のポンプ・プローブ実験である。

1.1 OVAL 実験で見えるもの

強磁場でポンプされる真空の構造とは何であろうか。すぐに思い付くのが量子電磁力学 (QED) の描く真空の

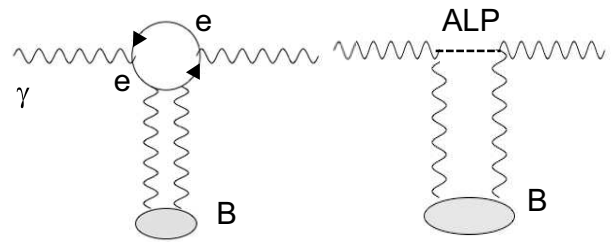


図 1: 仮想電子陽電子対を経由した真空偏極 (左)。ALP を経由した偏光変化 (右)。

構造である。量子場の理論である QED において、真空は仮想的に粒子と反粒子の対が生じては消えている。電荷を持つ粒子で最も軽いのは電子であるため、実質的に電子と陽電子を考える。仮想的に生じた電子陽電子ペアは、印加された電場や磁場の影響を受け、真空の電磁波に対する構造を変化させる (図 1 の左)。この現象は真空偏極と呼ばれる [2]。真空偏極の大きさは印加磁場の方向により異方性を持つため、真空の屈折率の異方性、すなわち真空の複屈折として観測できる。磁場に平行な方向と垂直な方向の屈折率の差は非常にわずかであるが、

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \quad (1)$$

$$= \frac{2\alpha^2 \hbar^3}{15\mu_0 m_e^4 c^5} B^2 \quad (2)$$

$$= 4.0 \times 10^{-24} \left(\frac{B[\text{T}]}{1[\text{T}]} \right)^2 \quad (3)$$

と計算されている [3]。以下、複屈折の係数として、 $k_{vac} \equiv 4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^{-2}]$ と置く。まずはこの QED の真空を見るのが OVAL 実験の第一目標である。

もちろん, QED 以外の真空であっても, 磁場に弱く結合する場であれば OVAL 実験で観測可能であり, 標準理論を超えた場や粒子を探索できる。大きく分けて, 仮想粒子対生成によって真空偏極の効果を生む場合 (図 1 の左の e を未知粒子で置き換えたもの) と, 光子が仮想中性粒子の中間状態を経る場合 (図 1 の右) の二つの寄与が考えられる。前者は一般的にミリチャージド粒子と呼ばれ, 光子との結合の強さを粒子の持つ微小電荷の大きさに置き換えて, 探索されている。後者の代表的なものとしてはアクシオンが挙げられるが, 中性の擬スカラー, あるいはスカラー粒子に関しては, アクシオン様粒子 (Axion Like Particle, ALP) と呼ばれ, 実験室で ALP を探索する際の主要な方法の一つである [4]。

1.2 真空偏極観測の現状

QED 真空の偏極の存在は 20 世紀のはじめから予言されていたが, 検証には非常に強力な電磁場が必要である。こういった場合の定番? のひとつは, 天体の利用である。真空偏極の手がかりを探す試みとして, コンパクト天体の詳細観測がおこなわれて来た。その結果, つい最近になって, RX J1856.5-3754 と呼ばれる若い中性子星 ($B \sim 10^9 \sim 10^{10}$ [T] と推定される) の観測から真空偏極の効果が見えたという報告が成されている [5]。Very Large Telescope による光学観測と, シミュレーションによる QED 真空偏極あり/なしモデルとを比較した結果, 真空偏極ありモデルの方がより観測と合致しているとのことである。非常に興味深い結果であり, 今後の観測データの充実が望まれる。

一方, 地上実験で真空偏極を見ようという試みも当然おこなわれている。現在世界のトップを走っているのはイタリア INFN の PVLAS というグループである [6]。実はこのグループは 2006 年に真空偏極を発見している [7]。その大きさは QED の予言値よりも 3.5 桁も大きい。ため, アクシオンのような未発見粒子の効果であろうと考えられ, PVLAS グループのみならず, 世界中の多くのグループで追検証実験がおこなわれた。その結果は残念ながら PVLAS グループ自身でもほかのグループでも再現できず, 発見は誤報という結論に至った。PVLAS グループはその後も感度向上とノイズ低減への努力を続け, 現在は QED の予言値に対して, あと 20 倍というところまで探索している。また, 感度においては PVLAS グループには及ばないが, フランスの BMV グループも同様に真空複屈折の探索をおこなっている [8]。これら競合グループより先に QED による真空偏極を見つけ, さらに未知粒子の探索もおこなおうというのがわれわれの OVAL 実験の目的である。

2 OVAL 実験

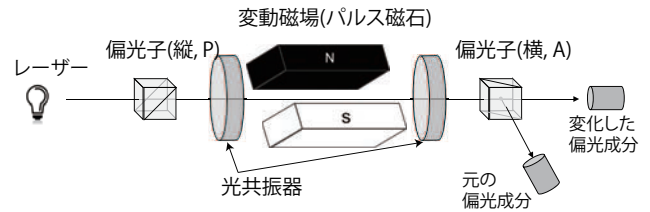


図 2: OVAL 実験の概念図。

OVAL 実験の概念図を図 2 に示す。式 (3) から分かる通り, QED による真空偏極の効果は非常に微弱であり, その測定のためには感度向上のための工夫が必要である。そこで, この実験では変動磁場を用いる。光子の偏光変化を検出するためには偏光子を利用するが, 可視/赤外領域の偏光子の直線偏光の光に対する選択性能 (2 枚直交して配置したときにどれだけ光を遮るかの値で, 消光比と呼ばれる) はせいぜい 10^{-7} 台程度であり, これ以下の微小な偏光は判別できない。印加磁場を変動させることで, 磁場に依存した偏光変化のみを取り出すことが可能になる。PVLAS グループでは, 2.5 [T] の永久磁石を使用するが, 磁石を回転させて磁場の印加方向を変えることで偏光変化を抽出している。これに対し, われわれ OVAL 実験では, パルス磁石 (目標強度 15 [T] 超) を利用して磁場強度自体を変化させる。

もうひとつの工夫として, 光の共振器 (Fabry-Pérot 共振器) と磁石を組み合わせる。真空偏極による偏光変化は磁場を印加した距離に比例して大きくなるため, なるべく長い距離に渡って磁場を印加することが重要である。反射率が 99.999% を超えるスーパーミラーを合わせ鏡として利用することで, 光を実効的に数十万回程度往復させることができる。この往復している部分に磁場を印加することで, 通過の回数がそのまま感度の向上につながる。

ここで問題は, これらを組み合わせることで運転できるのかという点である。強磁場パルス磁石や高フィネスの共振器など実験の個別要素は既に世の中に出回っているもので, それほど珍しいものではない。ただし, パルス磁石のような野蛮? な技術と, 高フィネス共振器という高い精度の必要な技術を組み合わせる例は世の中にほとんどない。そこでわれわれは, まずはすぐに手に入る要素でプロトタイプの設定アップを製作し, 組み合わせることで OVAL 実験の全体の検証をおこなった。

2.1 プロトタイプの設定アップ

図 3 の上にプロトタイプの設定アップを, 図 3 の下にその写真を示す。

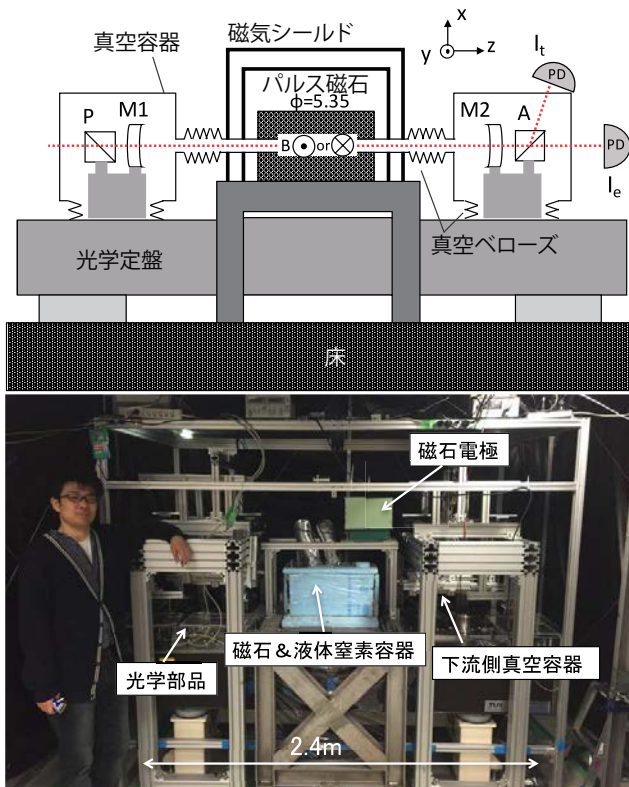


図 3: プロトタイプの設定アップ (上) と実際の写真 (下)。

装置の中央にパルス磁石を配置し、両側に鏡を置いてパルス磁石の軸を通る共振器を組む。パルス磁石はわれわれのグループが開発したもので、1 mm×3 mm の銅の平角線を 15 ターン巻いた長さ 200 mm のレーストラック型コイル ($L = 31 \mu\text{H}$, $R_{DC} = 5 \text{ m}\Omega$) である。

コイルの内側には 1/4 インチのステンレスパイプを通してあり、パイプにほぼ垂直に 200 mm にわたって磁場を印加する。内部に励磁されるパルス磁場は、こちらもわれわれが開発したコンデンサバンクへの充電電圧によって調整される。プロトタイプ測定においては、充電電圧を 2.0 [kV] に設定し、最大パルス磁場 9.0 [T] と逆向きパルス磁場 -4.5 [T] を交互に印加するモードで運転した。図 4 に 9.0 [T] 印加時のパルス磁場の 2 乗分布を示すが、おおよそミリ秒の時間構造を持つ磁場である。ただし、実際に偏光変化としてシグナルで観測されるのは、後述する共振器内の光の寿命でローパスフィルターがかかった形状となる。その形も図 4 にあわせて示す。

実験にあたっては、垂直磁場の 2 乗と印加している長さを掛け合わせたものが重要となるが、測定した磁場の分布を加味して積分すると、9.0 [T] のピーク時に $\int B^2(z) dz = 13.8 \text{ [T}^2\text{m]}$ であった。これは、実効的には 9.0 [T] の均一磁場が 17 [cm] にわたって印加されているということになる。たとえば同じパルス磁場を利用している BMV グループ (磁場 6.5 [T], 長さ 13.7 [cm])

と比較してもずっと大きな値である。

パルス磁石は全体が液体窒素によって冷却されており、磁石の冷却能力で繰り返しの頻度が決まっている。今回は、9.0 [T] パルスから次の 9.0 [T] 励磁までの 1 回のサイクルは 10 秒周期で運転した。なお、パルス磁石およびその駆動電源に関する詳細は [9, 10] を参照されたい。

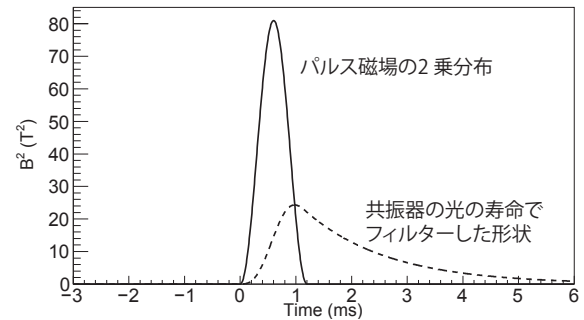


図 4: 9.0 [T] 印加時のパルス磁場 2 乗の時間分布。実線が実際に生じる B^2 、破線はそれを共振器のレスポンスである光の寿命でフィルターした分布である。

パルス磁石を挟んで共振器とレーザー系が配置してある。レーザーは、Nd:YAG 固体レーザー (Coherent 社の Mephisto 500 NE, 1064 nm) をマスターレーザーとして使用し、偏光子 P (シグマ光機, α -BBO グランレーザープリズム) を通して直線偏光にした成分を共振器に導入している。共振器は 2 枚のスーパーミラー, M1 と M2 (Advanced Thin Films 社) から成り、両ミラー間は 1.38 m の距離がある。この部分にレーザー光を往復させる。ただし、共振条件を満たしていない場合、共振器には光が入らない。このため、M1 に入力したときに反射してくる光をモニターし、PDH 法 [11] と呼ばれる手法でマスターレーザーの微小な周波数変化へとフィードバックすることで、安定した共振を達成している。一方、共振後に M2 を透過したわずかなレーザー光は後ろの偏光子 A (P と同じ製品) によって入射光と同じ偏光の光と垂直な光に分けられる。両方の光はシリコンフォトダイオード (浜松ホトニクス社, S11499) によって観測する。以降、入射光と同じ偏光成分を I_t 、垂直な成分を I_e とする。

偏光子の消光比は P と A の相対角度を変えて I_t と I_e の変化を測定することで実測できる。二つの偏光子を平行にしたときと垂直にしたときの光の比から、 3×10^{-7} であった。また、共振器の性能はフィネスと呼ばれる共振の鋭さによってあらわされるが、フィネスは共振を強制的に切った後の I_t の時間変化、すなわち共振器内に蓄積された光の寿命から求めることができる。フィネスの細かな値はミラーの状態などに依存するが、最も良い条件のときにフィネス 670,000 程度、プロトタイプ測定時

には、フィネスは 350,000 程度であった。この値は、レーザー光が共振器の中を実効的に約 20 万回 (往復 10 万回) 通ったことを意味する。偏光の変化は磁場中を光が通過した距離に応じて増えるので、20 万がそのまま共振器による信号へのゲインとなる。なお、このフィネスはほぼ世界最高水準であり、PVLAS グループのフィネス 700,000 と比較しても遜色ないレベルである。

当然ながら、このような高いフィネスの共振器は擾乱に非常に弱く、ちょっとした振動やフィードバック系へのノイズで共振が外れてしまう。このため、共振器とパルス磁石との間は機械的にも電氣的にも徹底して絶縁した。共振器用の光学システムは非磁性の光学定盤にまとめて配置したのに対し、パルス磁石は床から別の大型フレームを設置して配置し、溶接ベローズとセラミックの絶縁フランジを介して接続してある。また、音などの空気振動を介する影響も阻止するため、共振器や偏光子はすべてベローズで浮かせた真空容器に入れてある。磁場による影響を防ぐために、パルス磁石の周囲は全周にわたって二重の磁気シールドで遮蔽してある。パルス励磁時のキロアンペアクラスの電流も周囲に磁場をつくるため、電源からパルス磁石までは可能な限り同軸ケーブルで接続してある。このような努力の結果、パルス磁石を励磁したときでもほぼレーザーの共振が外れることなく動作することが可能となった。さらに、万一共振が外れたときに、自動で共振器の共振を合わせ直す機構 (オートロックシステム) も製作した。 I_t の値をモニタし、共振が落ちたときにはレーザー周波数を掃引する仕組みである。これにより、人間による操作なしで 10 秒サイクルでデータを取り続けることが可能となった。

2.2 プロトタイプでの測定

今回のプロトタイプのセットアップの目的は、装置全体の動作確認と、各種問題点の洗い出しである。真空の複屈折を測定するには感度が不足しているため、共振器内に薄い窒素ガスを充填することで、磁場による窒素ガスのポンプ・プローブ実験をおこなった。たとえば窒素ガス 100 [Pa] を封入すると、真空よりも 8 桁も大きな複屈折が期待されるため、プロトタイプの動作確認や、シグナル強度の確認の上で非常に有用である。ただし、物質に磁場をかけた場合は、複屈折だけではなく、進行方向に平行な磁場によってファラデー効果 ($\propto B_{\parallel}$) も生じる。われわれのパルス磁石内の経路は磁場に対して約 2° の角度を持っているため、ファラデー効果の寄与も無視できない。この効果の分離には印加磁場の極性を利用する。複屈折が $\propto B_{\perp}^2$ の依存性であるため、磁場の向きを変えても偏光の回転方向は変わらないのに対し、ファラデー効果は磁場の方向に応じて効果の向きが異なるた

め、9.0 [T] と -4.5 [T] の両方の変化を見ることで分離できる。図 5 にパルス磁場印加時の典型的な I_e/I_t の波形を示す。同時に、複屈折の効果とファラデー効果の両方から予想される効果をフィットした結果も示す。シグナル領域に磁石の振動などによる効果は見られず、きれいに予想通りのカーブを示していることがわかる。

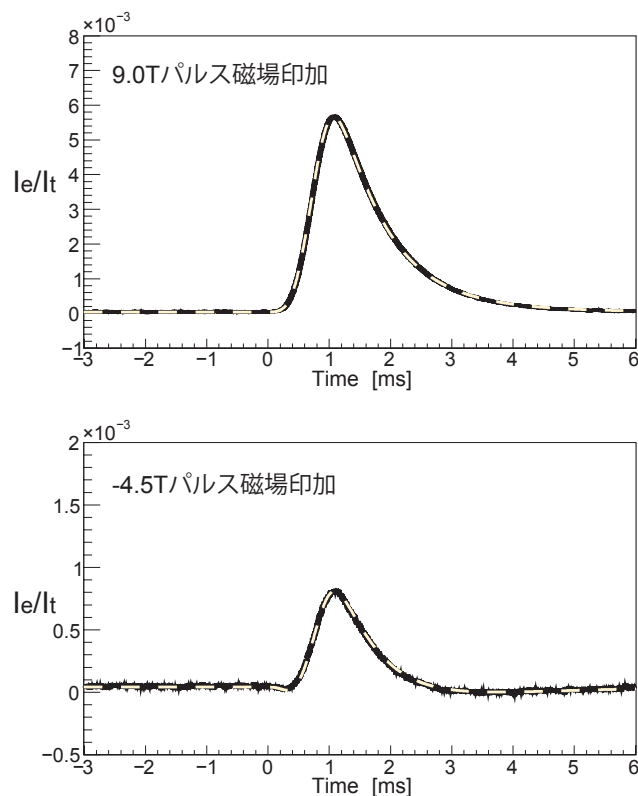


図 5: 窒素ガス下における偏光変化 (I_e/I_t)。9.0 [T] 印加時 (上) と -4.5 [T] 印加時 (下)。 B^2 に比例する複屈折の効果と B に比例するファラデー効果を仮定してフィットした曲線を薄い破線で示す。

窒素ガスの測定は、充填するガスの圧力を約 100 [Pa] から 400 [Pa] まで変化させておこなった。各圧力点でおおよそ 30 から 40 励磁サイクル分のデータを取得している。測定中は、サイクル毎にわざと共振を外して、フィネスの測定とフォトダイオードの較正をおこなっている。まれにオートロックシステムが偽の共振を見つけて合わせてしまうケースがあったが、それを除けば安定して高いフィネスで運転できている。各ガス圧についてフィットをおこない、真空複屈折のガス圧依存性を求めてプロットした結果が図 6 である。圧力の一次関数としてフィットした結果、切片は $k_{vac} = (1.3 \pm 0.9) \times 10^{-16}$ [T^{-2}] とゼロコンシステント、比例係数は $k_{N_2} = (-3.1 \pm 0.4) \times 10^{-17}$ [$T^{-2} Pa^{-1}$] という値が得られた。この窒素ガスの複屈折パラメータの値は、理論

的に計算がされており [12], 温度依存性を考慮した計算値, $k_{N_2}^{\text{Theory}} = -2.7 \times 10^{-17} [\text{T}^{-2} \text{Pa}^{-1}]$ と一致した。

ここには示さないが, ファラデー効果でも同様にガス圧に比例する結果が得られており, ファラデー効果の係数も理論値とほぼ一致した。

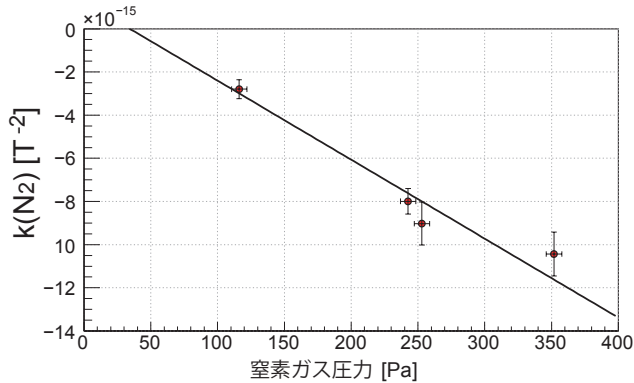


図 6: 窒素ガスの圧力を変えたときの複屈折の大きさ (B^2 依存の成分) の変化。直線はフィット結果をあらわす。

2.3 プロトタイプの評価と今後の予定

プロトタイプでの窒素ガス測定結果は, ほぼ予定通りであり, 最大の懸念であった共振器とパルス磁石の同時運転も問題なくおこなうことが出来た。そこで, 検出器の今後の到達感度を定めるために, 真空での複屈折測定もおこなった。共振器内は $10^{-3} [\text{Pa}]$ よりも良い真空まで排気し, パルス磁石は 100 サイクル運転した。われわれのパルス磁石は繰り返し早いので, 全データ取得に要した時間は 15 分程度である。その結果, ゼロと無矛盾な結果で,

$$k_{vac} = (-0.5 \pm 1.1) \times 10^{-18} [\text{T}^{-2}] \quad (4)$$

という値が得られた。式 (3) と比べると, まだこの値は QED の予言値より 5 桁以上感度が足りない。この感度差を埋める現時点での皮算用は以下の通りである。

まずはパルス磁石を強くする。PVLAS グループのような永久磁石と違って, 電流を増やせば磁場強度を比較的たやすく増やすことができる。現在の磁石では, 14 [T] まで出せることが確認できているが, これ以上は線材の機械強度が不足して破壊されてしまう。このため, 銅線を銅と銀の合金線に置き換えることで機械強度を増し, 20 [T] を目標に 15 [T] 超の励磁可能な磁石の製作を予定している。共振器との組み合わせも問題ないことが分かったので, パルス磁石 4 個を直列に並べ, 長さを 4 倍にする予定である。また, 駆動電源のコンデンサバンクを強化することで, パルスの持続時間も 4 倍にする。

一方, レーザーは, フィネスはほぼ予定通りの値が出ている。ただし, 光子の統計によって感度が制限されて

おり, 入射レーザーの強度を $10 \mu\text{W}$ から 10mW に上げることで共振器内に蓄積する光子数を増やし, 感度向上につなげる。この部分の改造はすでに終了しており, レーザーの強度向上による感度向上はすぐに確認できる予定である。

感度向上とともに, 残留ガスの影響も無視できなくなってくる。残留ガスに対する要求値は, 窒素に対して $1.6 \times 10^{-6} [\text{Pa}]$ 以下, 水蒸気に対して $6.0 \times 10^{-5} [\text{Pa}]$ 以下である。ベーキングと真空排気系の強化によって対応する。

これらのアップグレード, 特に磁石の性能向上は 1 年くらいのタイムスケールを目処におこなっており, 終了次第, 新たな測定に入る予定である。おおよそ 3 ヶ月くらいの測定で, QED の予言する真空偏極が観測できる予定である。

3 まとめと将来の野望

OVAL 実験は, パルス磁石と高フィネスレーザー共振器を組み合わせて真空の構造を探る実験である。この分野ではイタリアの PVLAS グループが先行しており, QED の予言する真空偏極を見るまで, あと 20 倍のところまで来ている。これに対し, OVAL 実験は強力なパルス磁石を武器にゼロから実験を立ち上げたところである。プロトタイプの製作と運転により, 実験の感度が計画通りであることが確認できた。プロトタイプの感度はまだまだ PVLAS グループには及ばないが, 装置のアップグレードにより, 今後数年で PVLAS グループを追い抜き, QED 真空偏極を世界で初めて観測したいと考えている。

私見として付け加えるなら, QED の真空偏極の測定は, あくまでも標準理論のプロセスであり, ベンチマークに過ぎない。本当に見たいものは, それを超えた先に潜んでいる「何か」であり, それを目指して感度向上をおこなっていきたいと考えている。われわれのグループは, OVAL 実験のみならず, XFEL などのさまざまな光の技術を用いて真空の構造を探索している [10, 13]。レーザーに代表される光の技術はすさまじい速さで進歩しており, 今後真空に潜む構造を探索する上で大きな武器になると考えている。

謝辞

本実験は, 東大浅井研究室, 東大素粒子物理国際研究センターを中心にしたグループで遂行しています。レーザーの開発にあたっては, 東大の五神先生の研究室, 吉岡先生の研究室と, パルス磁石の開発にあたっては, 東大物性研の金道先生の研究室, 東北大金属材料研究所の

野尻先生の研究室と共同で進めています。特に磁石の開発においては、東大素粒子物理国際研究センターの山崎研究員、稲田研究員が中核的な役割を果たしています。

本研究は、Advanced Photon Science Alliance (APSA) の支援を受けています。また、本研究は東北大金属材料研究所の共同利用課題 (15K0080, 16K0011, 17K0037) です。本研究は JSPS 科研費 JP16H03970, JP17H05398 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] X. Fan *et al.*, arXiv: 1705.00495.
- [2] W. Heisenberg and H. Euler, Z. Phys. **98**, 714 (1936); V. F. Weisskopf, Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Medd. **14**, 6(1936); J. Schwinger, Phys. Rev. **82**, 664 (1951).
- [3] Z. Bialynicka-Birula and I. Bialynicki-Birula, Phys. Rev. D **2**, 2341 (1970); S. L. Adler, Ann. Phys. **67**, 599 (1971).
- [4] 真空偏極で探索できる粒子のまとめとして、たとえば, M. Ahlers *et al.*, Phys. Rev. D **75**, 035011 (2007).
- [5] R. P. Mignani *et al.*, Mon. Not. Roy. Ast. Soc. **465**, 492 (2017).
- [6] E. Zavattini *et al.* (PVLAS Collaboration), Phys. Rev. D **77**, 032006 (2008); F. Della Valle *et al.*, Phys. Rev. D **90**, 092003 (2014); F. Della Valle *et al.*, Euro. Phys. J. C **76**, 24 (2016).
- [7] E. Zavattini *et al.*, (PVLAS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **96**, 110406 (2006).
- [8] A. Cadène *et al.*, Euro. Phys. J. D **68**, 16 (2014).
- [9] T. Yamazaki *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **833**, 122 (2016).
- [10] 山崎高幸他, 高エネルギーニュース **34**, 97 (2015).
- [11] R. V. Pound, Rev. of Sci. Inst. **17**, 490 (1946); R. W. P. Drever *et al.*, App. Phys. B **31**, 97 (1983).
- [12] C. Rizzo, A. Rizzo, and D. M. Bishop, Int. Rev. in Phys. Chem. **16**, 81 (1997).
- [13] OVAL 実験に限らず、これまでにわれわれのグループで発表した論文、資料は <http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/> にまとめてある。