

機関番号：82118

研究種目：若手研究A

研究期間：2008～2010

課題番号：20684009

研究課題名（和文） レーザー・アクシオン探査実験 PVLAS の検証

研究課題名（英文） Inspection of Laser-Axion Experiment PVLAS

研究代表者

都丸 隆行 (TOMARU TAKAYUKI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・助教

研究者番号：80391712

研究成果の概要（和文）：

イタリアのレーザーアクシオン探査実験 PVLAS と同じ手法のレーザー偏光角回転精密実験を行い、PVLAS の検証を試みた。小型のダイポール磁気回路と偏光変調子の導入により、高周波での偏光変調を達成し、 10^{-5} rad/rHz での検証を実施し、Axion のような磁場起因の偏光回転現象が無いことを確認した。また、窒素ガスの Cotton-Mouton 効果によりキャリブレーションを行い、実験の正当性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

Precise polarization rotation measurement like a laser-axion search experiment PVLAS in Italy has been performed and tried the PVLAS inspection. By introducing small dipole magnetic circuit and polarization modulator PEM, high frequency modulation of polarization was achieved, no polarization rotation signal due to magnetic modulation was confirmed. Moreover, we verified our experiment by using Cotton-Mouton effect of nitrogen gas.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：重力物理実験、宇宙物理実験、低温工学、

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子、宇宙物理、レーザー、超精密計測

1. 研究開始当初の背景

(1) アクシオンは素粒子の標準理論から予測される未知の素粒子であり、宇宙物理学最大の謎の1つ、ダークマターの有力候補である。アクシオン探査の試みは世界各地で行われているが、主な方法には、

- 銀河系ハローに充満するダークマターアクシオンを探査する、マイクロ波キャビティー実験

- 太陽中心部で生成されるアクシオンを探す、太陽アクシオン実験
- レーザー光を用いて実験室内でアクシオンを生成し、観測しようとする、レーザーアクシオン実験

などがある。この中で、レーザーを用いたアクシオン探査実験は、測定感度では他の計測に劣るものの、パラメータの不確定性が極めて少ないという利点がある。

(2) このような中で、2006年にイタリアのレーザーアクション探索実験PVLASは、アクションの可能性のあるシグナルを発見したと発表した。しかし、発見された質量および相互作用の領域は、マイクロ波Cavity実験や太陽アクション実験によりすでに棄却されていた領域であったため、真偽を含めて大きな話題となった。

(3) これにより、世界各地でレーザーを用いたPVLASの追試実験が行われた。すでにいくつかの実験でPVLAS実験の結果を否定する結果が出されているが、本研究もPVLAS実験の検証を目的としたものである。これらの否定的実験のほとんどはShinning Light Through the Wall型のレーザー実験であり、PVLASのような偏光回転角の精密計測で検証した実験は他にほとんど無い。偏光の回転角の精密計測で否定的結果を報告したのは、当のPVLAS自身のみであり、このような計測手法で独立に計測を行い、問題点を洗い出す必要があった。

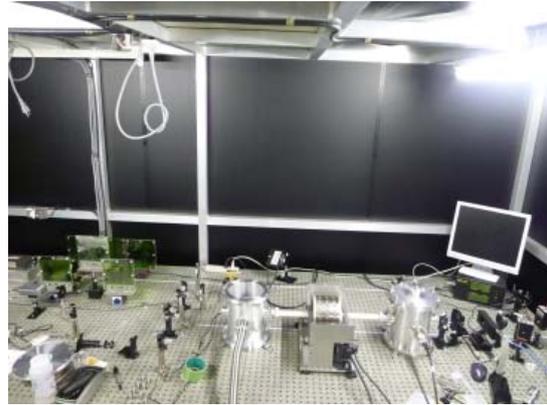
2. 研究の目的

したがって、本研究の目的はPVLAS型の偏光精密計測でのアクション探索を検証することである。偏光の精密計測でアクション探索を行う方法は、Shinning Light Through the Wall (SLTW)型実験に比べて、それぞれ長所および短所が存在する。まず、長所としては $\text{photon} \leftrightarrow \text{Axion}$ の変換確率がSLTW型実験では2回であるのに対し、PVLAS型実験では1回であり、信号強度は大きくなる。しかしながら、SLTW型では極めて低ノイズでの計測が可能であるのに対し、PVLAS型は様々なノイズの影響を受けやすい。結果として両手法のS/Nは同程度になっている。本研究では、よりノイズの影響が出にくいようにセットアップを工夫し、これらPVLAS型の実験を再試行し、実験手法の検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、PVLAS型のレーザー偏光角回転の精密計測により、Axion like particleを探索する手法をトレースし、技術的課題や達成感度を精査する。したがって、実験セットアップはPVLASのものをベースに、より測

定しやすいものに工夫する。下図は測定レイアウト図および計測システムの写真である。



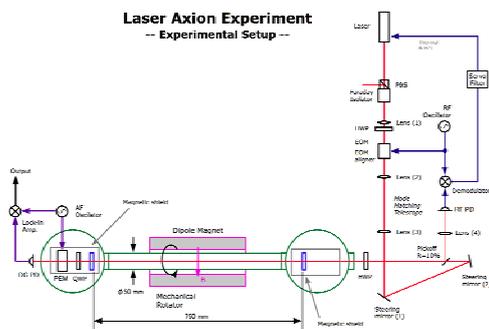
(2) このセットアップについていくつかの工夫点を行った。

① 小型強磁場ダイポール磁気回路の導入

PVLASでは強い磁場を発生させるために超伝導磁石を用いている。本実験でも当初はLHC用のテスト機として開発された古い超伝導ダイポールマグネットを用いる予定であった。しかし、老朽化のためにクライオスタットの破損および磁石絶縁の劣化が見られたため、この利用をやめ、新たに実験用磁石を開発することとした。近年の技術革新により、ネオジウム磁石を組み合わせた磁気回路で1Tを超える極めて強い磁場を発生させる事が可能になり、これにより超伝導磁石利用の煩雑さから解放されることが可能になった。下図は開発した磁気回路の写真である。



この開発したダイポール磁石は中心磁場1.6Tであり、直径は18cm、長さ12cm、重量20kgと極めて小型である。この小型マグネットの利用は磁場との相互作用長や磁場強度ではPVLASに劣るものの、複数の利点をもたらした。1つは、テーブルトップに横置きが



可能になった点である。PVLAS では磁場に変調をかけるために実験室に櫓をたて、その櫓上に回転盤を置いて磁石を縦にぶら下げた状態で回転させている。この方法では磁石の回転システムが大型化し、レーザー光路とのアライメントがずれやすい。さらに大きな問題は、磁石の回転周波数が 0.3Hz とゆっくりになってしまうことである。本実験では小型磁石を用いる事により光軸とのアライメント精度向上と回転周波数 10Hz を達成した。

(3) 高周波偏光変調器の導入

PVLAS では約 500Hz の偏光変調器 SOM を使用している。本実験では、光弾性効果を利用した 100kHz の偏光変調 PEM を採用した。

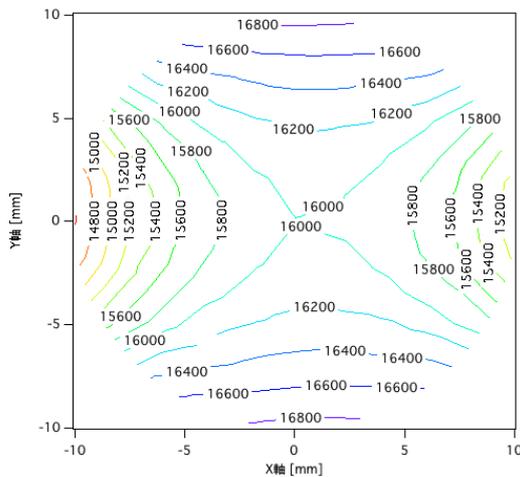
このように磁場変調周波数 10Hz および偏光変調周波数 100kHz と高周波にすることにより、PVLAS に比べノイズに強い測定系を開発した。

(3) さらに、よりハイフィネスの Fabry-Perot Cavity を構築するため、高反射率ミラーの試作を行った。残念ながら TAMA300 の時に培われた高反射率ミラーのノウハウは不況の影響でメーカーから失われており、条件だしからのスタートとなった。できあがったミラーの性能を調べたところ、ロスが大きく、残念ながら目標とするフィネス 30000 以上は達成出来なかった。このため、実験では以前製作したフィネス 10000 のミラーを用いた。

4. 研究成果

(1) 技術的進展

本研究の過程において得られた技術的進展として、強磁場ダイポール磁気回路がある。この磁気回路では、常伝導・超伝導磁石のような冷却、電源等が必要ではなく、コンパクトで極めて強い磁場を発生させる事ができる。下図は、磁石中央断面で計測した磁場



分布である。

測定結果から、中心±10mm の範囲で、磁場は 1.60T±0.02T の非常に強い磁場が実現したとともにビーム直径 (約 2mm) 以内では高い一様性を達成した。また、Skew 角は 1.6° rms と非常に小さい。

この強力かつコンパクトな磁石の採用により、磁場の変調周波数 10Hz という高速が達成出来た。PVLAS では 0.3Hz であり、ノイズフロアの大幅低減に成功した。

(2) 偏光回転角の精密計測

ダイポール磁気回路内に Fabry-Perot 干渉計で多重反射させた光を打ち込み、磁場変調および偏光角変調をかけた場合、透過光の偏光回転の周波数依存性は次の表のようにまとめられる。

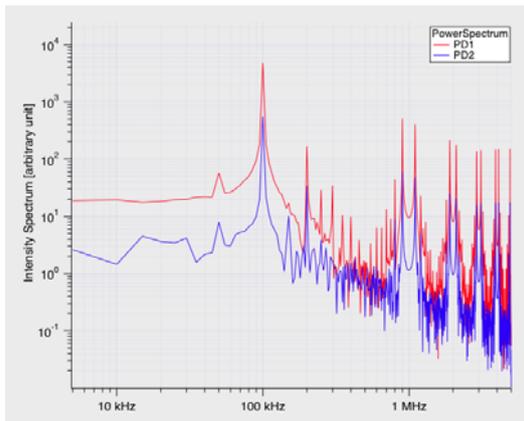
Angular frequency	Amplitude (with the QWP)	Amplitude (without the QWP)
DC	$\sigma^2 + \alpha^2 + \frac{\eta_0}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)^2 + \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \sin 2\xi \right)^2 + 2\alpha \left(\frac{2F}{\pi} \right) \epsilon_0 \sin 2\xi$	$\sigma^2 + \alpha^2 + \frac{\eta_0}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)^2 + \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \sin 2\xi \right)^2$
$2\omega_m$	$2 \left(\alpha + \frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \sin 2\xi \right) \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)$	$2 \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right) \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)$
$4\omega_m$	$\frac{1}{2} \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)^2$	$\frac{1}{2} \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)^2$
ω_f	$2 \left(\alpha + \frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \sin 2\xi \right) \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right)$	$2\alpha \eta_0$
$\omega_f \pm 2\omega_m$	$\left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right) \eta_0$	$\left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right) \left(\frac{2F}{\pi} \epsilon_0 \right) \eta_0$
$2\omega_f$	$\frac{\eta_0^2}{2}$	$\frac{\eta_0^2}{2}$

これらの周波数成分解析を行うことで、磁場変調に追従した Axion like particle 起因の偏光回転の影響を調べた。

下のグラフは測定した偏光回転のスペクトラムの一例である。ただし、この時の測定では Fabry-Perot Cavity のフィネスは 200 と低反射率のミラーを用いている。この測定では、 10^{-5} rad の感度で磁場に起因する偏光回転は観測されなかった。この感度は、実験で利用した Gran-Tailor 偏光子の消光比 10^{-5} と同等であり、消光比リミットと考えられる。

この結果を検証するため、真空槽内に 1atm の窒素ガスを注入し、Cotton-Mouton 効果による磁場偏光回転でキャリブレーションを行った。この結果、 10^{-4} rad で偏光の回転を観測し、Cotton-Mouton 効果の予測値と一致することを確認した。

さらに、ミラーをフィネス 10000 のものに交換して偏光回転の計測を行った。フィネス 200 の時に比べ 50 倍のフィネスを達成しているため、Axion like particle の感度も 50 倍改善されているはずであるが、現在まだデータ解析の途上である。



(3) 今後の展望

PVLAS 型の偏光回転の精密測定により Axion like particle を探査する手法の検証を行った。変調周波数の高周波化等により、本測定では極めて低いノイズを達成出来たが、PVLAS に比べて磁場および磁場とレーザーの相互作用長が小さい影響で、Axion の感度に換算すると残念ながら PVLAS に及ばなかったが、偏光計測精度では PVLAS に肉薄した。したがって、5T を超えるような大型磁石の導入により PVLAS 感度は達成出来る。

しかしながら、超伝導電磁石等で磁場の強度を上げる方法はすでに限界に達しつつある。CERN の 9T ダイポールマグネットを用いた計画が進行中であるが、これを用いても Axion の理論予測レベルには到底到達出来ない。斬新なアイデアが必要になっている。

我々のグループでは、本研究の途上において、2つの独創的アイデアに帰着した。1つは超伝導電磁石の静磁場ではなく、超短パルスレーザーの電磁場を用いる方法で、PW 級レーザーを用いた場合には 10^5 T もの強磁場が期待出来る。もう1つは、レーザーではなく、マイクロ波を用いる方法である。この場合フォトン数が 10^5 倍期待出来る。今後はこのような方法を詳細に検討し、大幅な感度アップを狙う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 2 件)

- ① PLARBEAR collaboration, “The POARBEAR CMB polarization experiment”, SPIE 2010, 査読有, (2010)
- ② 都丸隆行 他, 「超高純度金属による伝熱冷却 I -高純度アルミニウム-」, 低温工学, 査読有, 46, (2010)
- ③ 新富孝和、都丸隆行 他, 「超高純度金属による伝熱冷却 II -高純度銅-」, 低温工

学, 査読有, 46, (2010)

- ④ 幾島悠喜、都丸隆行 他, 「無振動冷却への道」, 低温工学, 低温工学, 査読有, 46, (2010)
- ⑤ 都丸隆行, 「金属パイプ内を伝搬する輻射の考え方」, 低温工学, 査読有, 44 (2009) 77-80
- ⑥ “Status of Japanese gravitational wave detector”, K. Arai et al., Class. Quantum Grav., 26 (2009) 204020-1 - 9
- ⑦ T. Tomaru et al., “Conduction Effect of Thermal Radiation in a Metal Shield Pipe in a Cryostat for a Cryogenic Interferometric Gravitational Wave Detector”, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 47 (2008) 1771-1774
- ⑧ T. Tomaru et al., “Reduction of heat load of LCGT cryostat”, J. Phys. Conf. Ser., 122 (2008) 012002 査読有
- ⑨ T. Tomaru et al., “Thermal radiation through a metal pipe and its reduction”, Proceedings of ICEC22 (2008)
- ⑩ T. Suzuki, T. Tomaru et al., “Lateral motion of cold stage in a pulse tube cryocooler using the self-cancellation method”, Proceedings of ICEC22 (2008)
- ⑪ Y. Ikushima, T. Tomaru et al. “Ultra-low-vibration pulse-tube cryocooler system - Cooling capacity and vibration-”, Cryogenics 48, (2008) 406-412
- ⑫ 幾島悠喜, 都丸隆行 他, 「超低振動パルス管冷凍装置 -冷凍能力と振動-」, 低温工学 43, (2008) 25-32

[学会発表] (計 1 1 件)

- ① Takayuki Tomaru et al., “Over view of present Axion Searches and Future possibility in KEK”, Extra-dimension probe by cosmophysics, 2010/11/12, Japan
- ② Takayuki Tomaru et al., “Axion & QED Experiment in KEK”, Physics in Intense Field, 2010/11/24, Japan
- ③ T. Tomaru et al., “POLARBEAR 実験 -2010 年観測テスト-”, 2010/09/11, 日本物理学会, 福岡
- ④ N. Kanda, T. Tomaru et al., 「レーザー誘導型アクシオン探査の予備実験」, 2011/3/28, 日本物理学会, 新潟
- ⑤ D. Tatsumi, T. Tomaru et al., 「高強度パルスレーザーを用いた真空分極の測定実験」, 日本物理学会, 2011/3/28, 新潟
- ⑥ T. Tomaru et al., 「POLARBEAR 望遠鏡の開発」, 第 11 回高エネ研メカワークショップ, 2010/4/7, つくば

- ⑦ T. Tomaru et al., 「低温用高純度金属の研究」, 第11回高エネ研メカワークショップ, 2010/4/7, つくば
- ⑧ 都丸隆行 他, 「Gravity Induced Electric Field の研究 II」, 日本物理学会, 2009.3.30, 東京
- ⑨ 都丸隆行 他, 「Gravity Induced Electric Field の研究 I」, 日本物理学会, 2008.9.22, 山形
- ⑩ 都丸隆行 他, 6N 超高純度アルミニウムの開発と電気伝導・熱伝導の評価, 超伝導・低温工学会, 2008/12/03
- ⑪ T. Tomaru et al., “Thermal radiation through a metal pipe and its reduction”, International Cryogenics Engineer Conference 2008/07/23, Soul

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

① 名称: 粒子加速器用銅材料、粒子加速器用銅管及び粒子加速器用銅管の製造方法、並びに粒子加速器
発明者: 都丸隆行 他4名
権利者: 高エネルギー加速器研究機構, 三菱マテリアル, 日本大学
種類: 特許
番号: 特願 2010-110454
出願年月日: 2010/ 5/12
国内外の別: 国内

② 名称: 低温容器
発明者: 都丸隆行, 鈴木敏一
権利者: 高エネルギー加速器研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2008-195576
出願年月日: 2008/ 7/30
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

① 名称: Method for cooling an article using cryocooler and cryocooler
発明者: T. Tomaru 他3名
権利者: 高エネルギー加速器研究機構
種類: 特許
番号: CN160318B
取得年月日: 2010/11/15
国内外の別: 外国 (香港)

② 名称: 冷凍機を用いた物品の冷却方法、及び冷凍機
発明者: T. Tomaru 他3名
権利者: 高エネルギー加速器研究機構
種類: 特許
番号: No. ZL200410058779.9
取得年月日: 2010/01/15

国内外の別: 外国 (中国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

都丸隆行 (TOMARU Takayuki)
高エネルギー加速器研究機構・共通基盤研究施設・助教
研究者番号: 80391712

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

辰巳大輔 (TATSUMI Daisuke)
国立天文台・助教
研究者番号:
神田展行 (KANDA Nobuyuki)
大阪市立大学・教授
研究者番号:
鈴木敏一 (SUZUKI Toshikazu)
高エネルギー加速器研究機構
・共通基盤研究施設・教授
研究者番号: