

平成 21年 5月 22日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18684009

研究課題名 (和文) 非破壊型荷電粒子測定のための飛跡の視覚化

研究課題名 (英文) Visualization of trajectories for nondestructive measurements of charged particles

研究代表者

本間 謙輔 (HOMMA KENSUKE)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40304399

研究成果の概要：

微弱な直流電子ビームをセンサーに触れさせず、非破壊的に測定するための検証システムを構築した。電気光学結晶 LiNbO_3 を用いて、荷電粒子電場が結晶表面に与える局所屈折率変動をその領域を透過する光の位相変動として視覚的に捉える測定原理を、定性的な水準で検証した。さらに、電場応答が桁違いに大きくなると期待される KD_2PO_4 (DKDP) 結晶の構造相転移温度近傍まで結晶を冷却するシステムを追加した。それと並行して、粒子軌道を模したワイヤー状電極による DKDP の局所的な静電場応答性の確認に成功した。この冷却検知システムにより、DKDP を冷却する際の解決すべき課題が明確になったと同時に、近い将来、より微弱な電場に対して、非破壊的な荷電粒子検知の可能性が開かれた。加えて、高強度電磁場が真空中で生じさせるであろう真空誘電率変動の空間パターンを、本研究で開拓した手法により捉えられることを見出し、宇宙・素粒子物理分野の精密実験への応用を具体的に検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2007年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
総計	19,300,000	5,790,000	25,090,000

研究分野：数物系科学

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：粒子測定技術

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子を検出器媒体にぶつけて、非弾性散乱の結果生じた効果を増幅するという、従来の手法を捨て、仮に、センサー表面を通過

する荷電粒子の電場が、センサーに与える瞬間的な分極を、センサー内をあらかじめ走査しているパルスレーザー光の位相変化という形で取り出せたと考える。この場合、分極

に必要なエネルギー損失が極めて小さいため、荷電粒子の運動にほとんど影響を与えることなく、荷電粒子のエネルギーをほぼ保ったまま、その軌道上の複数の地点で複数回の位相測定が可能になる。したがって、位相変化が観測された複数点間の飛行時間差の測定により、既知質量の粒子の運動量を高精度で決定することが可能となる。もし、このような測定が可能になると、例えば、ベータ崩壊における電子の最大エネルギー領域における詳細なスペクトラムを得ることが可能になり、ニュートリノ質量の絶対値、さらに温度の低い宇宙背景輻射ニュートリノの吸収反応を見出すことすら原理的には可能になる。

荷電粒子の非破壊測定のため、具体的には電気光学係数を有する一軸性結晶を用いる。このタイプの結晶は、誘電体で中心対称性を有していない。そのため荷電粒子の作る外部電場の強さと入射方向に応じて、異なった屈折率変化を示す。したがって、屈折率変動を位相差という形で検知できれば、非破壊的な測定が可能になる。これまでに、米国ブルックヘブン研究所における RF 加速器内の 10^9 個の電子を含むバンチ長を測る目的で、電子群の電場の影響が LiNbO_3 結晶により非破壊的に実測された例がある[Y.K.Semertzidis et al. Nucl. Instrum. Meth. A452(2000)396-400]。しかし、“単一荷電粒子”に対しては、同様な測定手法では全く歯が立たない。

第一に、位相変化を読み出す方法そのものを見直す必要がある。荷電粒子の電場の影響は、結晶表面に近づかない限り見えない。しかし、それ故、影響は局所化しており、位相変動がある領域が瞬間的に飛跡をもつと考えると、飛跡の形状が議論できる。位相変動を含む領域を透過した光束を、レンズで集光

(回折干渉)させ、焦点面上に広がる分布をフーリエ変換像として捉えることを考案した[発明の名称：荷電粒子検出方法、これを用いる荷電粒子制御方法、特許コード P07P005178]。

第二に、より電気光学係数の高い結晶を探すことである。これについては、 KD_2PO_4 (DKDP)という結晶を探し当てた。DKDP は、 -64 度で構造相転移に伴って、その係数が常温時に比べて、千倍程度になる格好の結晶であり、さらに市販品として容易に手に入る上、大きな結晶が製造できる利点を持っている。温度制御された DKDP 結晶を用いることにより、理想的な計算上、単一電子の検知すら可能になる[同特許]。

この案に基づき、光学系を単純化する目的で LiNbO_3 結晶を使用して、 nA 程度の直流の電子銃からの電子線に対する応答を調べた。その結果、電子銃のフィラメント電流の変動に応じて、ゆっくりと干渉模様が揺らぐ現象が捉えられていた。

2. 研究の目的

そこで、レンズ焦点面上で生じる電子線の飛跡イメージのフーリエ変換像を視覚化することを目指して、①光ファイバー束の開発を行い、②レンズ焦点面上において、結晶を透過した検査光の回折パターンをサンプリングし、飛跡イメージのフーリエ変換像を捉えるためのシステムを構築する。その上で、③ LiNbO_3 結晶および④DKDP 結晶を用いた場合の非破壊的検知を検証することを、本申請内の目的とした。

3. 研究の方法

申請時点での非破壊的検知要素の基本デザインおよび問題点を整理しておく。図 1 に考案した検出器要素の概念図を示す。

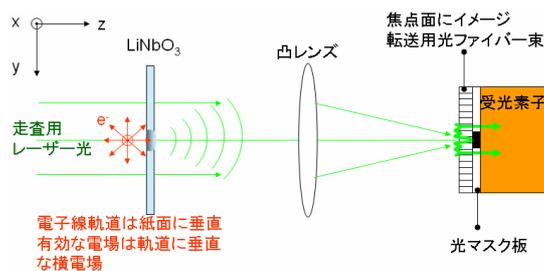


図1 検出器要素の概念図。

荷電粒子の電場の影響は、結晶表面に近づかない限り見えない。しかし、それ故、影響は局所化しており、位相変動のある領域が瞬間的に飛跡をもつと考えられる。この検出原理の骨子は、飛跡形状を含む屈折率媒体を透過した光を、レンズの集光によって回折干渉させ、その結果、焦点面上で生じるフーリエ変換像を利用する点にある。入射レーザーのプロファイルが純粋なガウス分布である場合、そのフーリエ変換像は、径の小さなガウス分布となって焦点に絞られる（図2右）。しかし、荷電粒子の飛跡に沿って結晶内に屈折率変動が起こっている場合、その干渉パターンの特徴は、焦点から離れたところに顕著に現れる（図2左）。

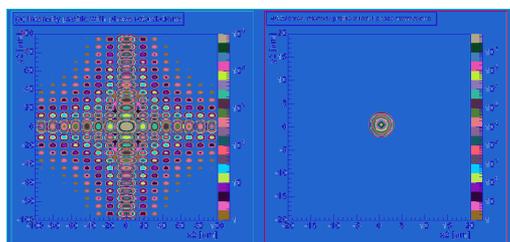


図2 レンズ焦点面上のフーリエ変換像予想図。左)位相変化あり右)位相変化なし。

したがって、焦点に集まった光をマスクした上で、焦点から少し離れたところでパターンを2次的に観測した場合、そのコントラストは極めて大きくなる。その上、荷電粒子飛跡に関するベクトル情報が逆フーリエ変換により再構成できる。図1において、焦点の光は一度イメージ転送用のファイバーの中に閉じ込められる。その後、光ファイバー束の下流面に光マスクを密着させ、光を閉じ込めた

ファイバーにマスクを合わせて消光する。光マスクは、ガラス基板の中に $50\mu\text{m}$ 径のタングステンワイヤーを埋め込み、それを薄く切り出して製作したが、マスク表面で大きな反射がおこるため、理想的な状態には、程遠いというのが、本申請時点での実情であった。以上を踏まえて、以下のような計画で研究を推進した。

計画1) 焦点に集まる高強度の光を避けて、その辺縁にある光のみを下流へ流せるようにするため、フレキシブル光ファイバー束を製造し、高強度部分の迷光によるバックグラウンドが最小になる機構を開発する。

計画2) 非接触的測定を保証するため、デザインとしてビーム径が半値幅で $50\mu\text{m}$ 、電流が 1nA 、エネルギーが $2-5\text{keV}$ の直流電子ビームのプロファイルを、実測により定量化できる必要がある。そのため、真空容器中でマイクロチャンネルプレート(MCP)を導入する。それに応じて真空容器を改造する。

計画3) これらを組み合わせて、 LiNbO_3 結晶の電子ビームによる電場応答のフーリエ変換像を視覚化する画像取得システムを構築し、この結晶に対して非破壊的検知が可能かどうか検証する。

計画4) DKDP結晶の電場応答が最大になる構造相転移温度下でフーリエ変換像を撮影するため、DKDP結晶用の可動式の冷却系を真空容器中に構築する。

計画5) 焦点光を十分に抑え込めるようになったことを確認した上で、微弱光を検知するための増幅作用のある2次元カメラを導入し、複数の光ファイバー束からの画像を捉え

られるシステムを構築する。そのシステムを用いて、荷電粒子飛跡を模したワイヤー電極による静電場に対する、DKDP 結晶の局所応答性および荷電粒子電場方向に対する適切な結晶配置を実測により確認する。

計画 6) LiNbO₃ 結晶を DKDP 結晶に置き換え、電子ビームと結晶表面との距離および電流値の関数として、透過光ビームのフーリエ変換像の変化を同カメラで実測し、常温から相転移温度までの DKDP の電場応答を調べ、DKDP による非破壊的荷電粒子測定を検証する。

4. 研究成果

計画 1 の成果)

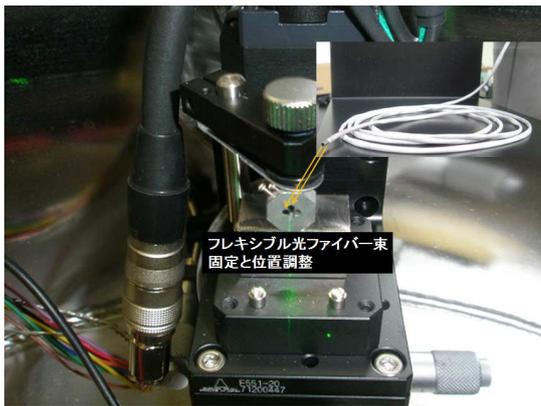


図 3 フレキシブルファイバー束ホルダーに 2 つのファイバー束が固定されている様子。

焦点光をマスクする代わりに、ファイバー束のうち中心付近のファイバーに吸収体を入れたものを作製し、光の閉じ込めを試みたが、十分な遮光効果を達成できなかった。さらに、ファイバー束をほどこき、中心付近のファイバーのみを選びわけて、外に廃棄する手法も試みたが、ほどこいた後の単体ファイバーの断線が頻繁に起こり、困難を極めた。試行錯誤の末、「さわらぬ神に祟りなし」という案を思いついた。図 3 にあるように、複数のファイ

バー束を焦点ぎりぎりまで高精度のステージを使用して互いに近づけ、複数のファイバー束の縁が囲む領域内に焦点光を素通しして、何にも触れさせず下流へと廃棄する方法が、簡単かつ最適であることを見出した。

計画 2 の成果)

図 4 にあるようにマイクロチャンネルプレートを導入し、電子線のプロファイルの確認が行えるシステムを構築した。

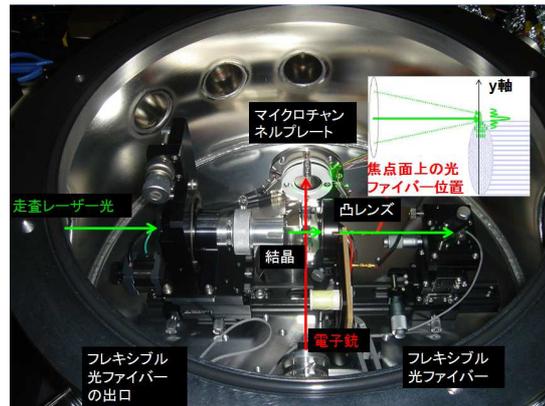


図 4 MCP を含む荷電粒子の非破壊的検知システム。

計画 3 の成果)

1nA、4keV、50 μ m 直径の直流電子線を、LiNbO₃ 結晶の表面近傍 300 μ m に配置し、準静的な線状の屈折率変動イメージを生じさせ、その結晶を透過した連続レーザー光を、レンズ焦点面上で観測した。図 4 にあるように、この観測では、焦点に集光する高強度部分を、直接ファイバー束に入射させることなく、焦点から上下 (y 軸方向) に、少しずれた位置で、回折像を部分的にサンプリングして、その回折パターンの有無を調査した。その結果、図 5 に示されるように定性的に理解できる回折画像が、電子の有無と関連して得られた。図 5 の上 4 つの回折像は、電子線がない状態で、強度勾配から焦点位置が割り出せるように、わざと焦点光の端を含むように、

光ファイバー束でサンプルした 4 ショットである。左下 4 つは、電子がない場合の、無作為に選んだ 2 ショット間の差分の回折強度。そして、右下の 4 つは、電子がある場合とない場合が無作為に選んだ 2 ショット間の差分の回折強度である。これらから、電子線が存在している場合、結晶の上下 (y 軸) 方向に回折強度が増していることがわかる。この実験結果については、3 つの国際会議にて公表した。

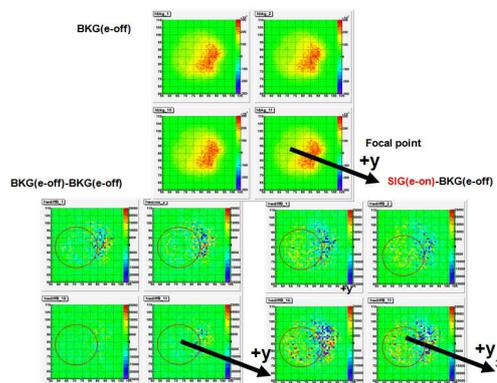


図 5 LiNbO₃ 結晶を用いた際の焦点面上の回折強度分布の一部分。

計画 4 の成果)

図 6 にあるように、エタノール冷媒を可動式の結晶ホルダー内部で循環させ、そのホルダー上に設置したペルチェ素子により、相転移温度以下 -70 度程度まで、±0.1 度の精度で制御可能な結晶冷却システムの構築に成功した。

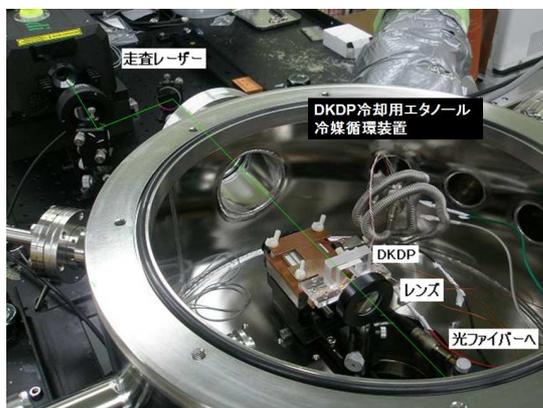


図 6 DKDP 結晶用可動式冷却装置を組み込んだセットアップ。

計画 5 の成果)

図 7 にあるように、DKDP 結晶の裏表を 50 μm 直径のワイヤー電極で挟み、電極間電圧の変化にともない、期待された焦点面上の領域に、回折強度変化が見られることの確認に成功した (図 8 の説明文を参照)。これにより、DKDP の局所電場応答性およびカメラへの結像が確認されたことになる。

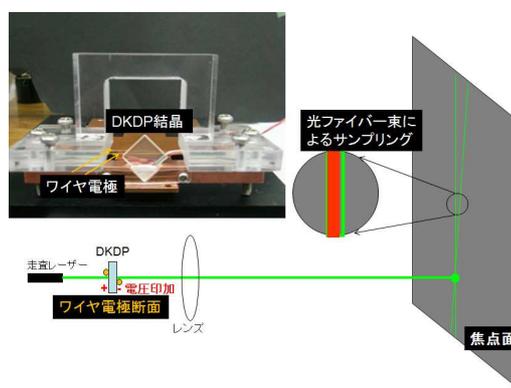


図 7 DKDP のワイヤー形状電場に対する局所応答を確認するためのセットアップ。

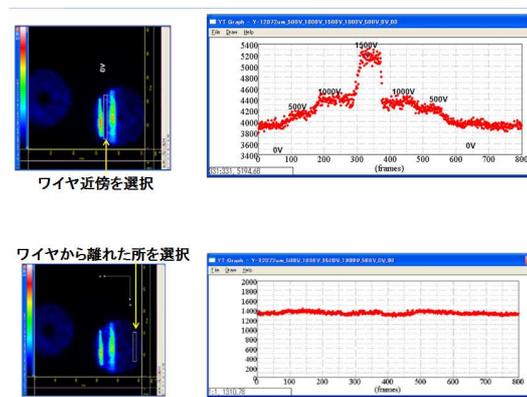


図 8 増幅機能付き 2 次元微弱光カメラによる焦点面上の回折像の一部 (図 7 右の円内の画像に相当)。焦点面上の 2 本線は、裏表にあるワイヤーそのものからの回折像。電圧変動の影響は、それら 2 つの線に囲まれた領域にのみ期待される。右上は、囲まれた領域内の強度が電圧に応じて変化していることを

示す。右下は、ワイヤーから離れた領域内の強度が電圧に依存していないことを示す。

計画6の成果)

DKDP結晶を冷却する過程で、結晶に微細なクラックが入る現象に遭遇した。その要因として、温調のスピードと結晶の断面積が大き過ぎることが分かってきた。今後、これらを最適化することにより、この問題を克服し、低温度での荷電粒子電場応答の測定を可能にする道が開かれた。

計画外の成果)

荷電粒子非破壊測定の本質は、結局のところ如何に小さな局所屈折率変動を検知できるかという技術であり、これを真空中の高強度電磁場がもたらす真空の誘電率変化測定に利用できることを思いついた。そのため本研究で開発した手法の基礎物理実験への具体的な応用案を、日本物理学会および国際会議にて公表した。

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 2 件)

① 「Fundamental physics on natures of the macroscopic vacuum under high intense electromagnetic fields with accelerator」

By K. Homma, AIP conference proceedings volume (in press) 査読あり。

② 「Nondestructive Measurement of Charged Particles」

By K. Homma and K. Hosokawa,

Nuclear Physics A 805 (2008) 609-611
(Proc. INPC2007 vol. II 609-11).

査読なし。

[学会発表] (計 5 件)

① 「Fundamental physics on natures of the macroscopic vacuum under high intense electromagnetic fields with accelerator」

by K. Homma, The second international symposium on laser-driven relativistic plasmas applied to science, industry and medicine 日本原子力機構関西光量子科学研究所(2009. 1. 20)

② 「荷電粒子非破壊測定原理の未知スカラー・擬スカラー場探索への応用」

本間謙輔, 日本物理学会山形大学・日本(2008. 9. 23)

③ 「Nondestructive measurement of charged particles」

by K. Homma, International Nuclear Physics Conference 2007(第 23 回原子核物理学国際会議) 東京・日本(2007. 6. 4)

④ 「Novel charged particle detection with EO crystal by laser readout」

by K. Homma, International Workshop on Education and Research for Accelerator Sciences, 日本・広島(2007. 3. 1)

⑤ 「Nondestructive Measurement of charged particles by laser diffraction readout」

by K. Homma, The 11th Vienna Conference on Instrumentation ウィーン・オーストリア(2007. 2. 19-24)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本間 謙輔 (HOMMA KENSUKE)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40304399

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者