

# 論文審査の結果の要旨

氏名 山道 智博

本論文は6章からなる。第1章は本実験の重要性を説明するイントロダクションであり、第2章では本論文で採用した実験の原理を述べ、第3章では実験のセットアップと用いられた装置の詳細を述べ、第4章ではデータ収集とその解析の中身が示され、第5章ではその結果と関連する議論及び将来への見通しが述べられ、第6章では結論が述べられている。

アクシオンは強い力の CP 問題を解決するために考えられている理論の予言する擬スカラー粒子である。アクシオンの探索には、アクシオンと光子2個が結合する相互作用を利用することができる。アクシオンの質量は未知であるが、その質量とこの相互作用の強さは比例関係にあることが知られている。一方アクシオン以外にも、それに類似した粒子 axion like particles (ALPs)が、素粒子物理学の標準模型を超えた理論で予言されることがある。例えば Majoron とよばれる大局的レプトン数の破れに関連した南部・ゴールドストーンボゾン、Familon と呼ばれる大局的世代対称性に関連するボゾン、弦理論における非対称テンソルの Kaluza-Klein ゼロモードに起因する粒子等が挙げられる。これらの場合には、アクシオンのように質量と相互作用の強さの間に関係性はない。更にこれらの粒子は宇宙物理学的に興味を持たれている。それはこれらの粒子があれば宇宙物理学における問題、たとえば太陽のコロナを加熱しているメカニズムについての問題を解決する可能性等があるためだ。特に sub-keV 程度の質量を持つアクシオンは理論的にも宇宙物理的にも興味を持たれ、探索の重要性が高い。

論文申請者は、そのような種類の ALP を探索するために上記のアクシオン-2光子結合を利用する方法として、結晶中の原子の持つ強電場を利用する方法を採用した。光子を結晶で ALP に変換し、それを再度結晶で光子に再変換することで信号を観測する手法である。特に sub-keV の質量を持つ ALP を探索するために keV を超えるエネルギーの X 線を用いるのだが、これまで先行研究で検討されてきたブラッグ型の変換(格子面が X 線入射表面に並行)では変換効率が低く実験が行われてこなかった。一方論文申請者は、ラウエ型の変換(格子面が表面に垂直)に注目し、質量の効果を含め厳密な理論計算を行ってきた。この場合ブラッグ角の近くでは光子の透過率が増加し、すなわち変換効率が上昇することが期待されている。さらに結晶の角度を回転することにより、様々な質量の ALP の探索も可能である。

本論文の主眼は第3章と第4章に述べられている実験のセットアップ及びデータ解析である。光源はSpring-8の17 keVの高強度X線を用い、変換・再変換のための結晶はシリコンの単結晶を削り出して作成した。X線の検出器は環境バックグラウンドを低減したゲルマニウム検出器を用い、S/N比を確保した。質量の重いALPを探索するためには、X線に対して結晶を回転する必要がある。回転角度は探索できるALPの質量と対応するため、連続的に異なった質量のALPが探索できることになる。ロッキングカーブと呼ばれる、入射角に対して結晶を透過・回折したX線の強度を測定することにより、入射ビームの角度分散や強度をモニターすることができる。これは装置のドリフトの情報も与えてくれるため、信号を正しく捉えながら系統誤差の評価が行えるように工夫されている。信号の効率に影響する可能性のある系統誤差の評価を行っている。観測されたロッキングカーブは形状、強度とともに期待されるものとよく一致していた。

第4章では、得られたデータに基づき、ALPの探索を行なった。信号は17 keV付近に観測されるため、回転角度を変えてゆくにつれALPの質量に対応する箇所では事象数がピークをなすと期待される。実験では4つのデータセットを組み合わせて用いるため、回転角度に関するドリフトがデータセットによって異なっていることを考慮にいたした解析が行われた。信号の窓を角度方向にスライドさせて事象数のピークを探索する方法を採用し評価した結果、最大で7カウントの事象が得られる角度が2箇所あることがわかった。信号がなく一定のバックグラウンドであると仮定した場合に事象のばらつきでこのような事象が生じる確率は $3\sigma$ 程度であったため、バックグラウンドを超えた信号の存在を主張することはできなかった。そこで90%信頼度でALPの質量に対する光子の結合定数の2次元平面上で、実験室で与えられる初めての制限、特に0.3-1 keVの領域では世界で初めて探索を遂行することに成功した。定量的には $g_{a\gamma\gamma}$ を結合定数として、 $g_{a\gamma\gamma} < 4.2 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1}$  ( $m_a < 10 \text{ eV}$ ),  $g_{a\gamma\gamma} < 5.0 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1}$  ( $46 \text{ eV} < m_a < 1020 \text{ eV}$ )がその上限である。

なお、本論文については申請者本人を含む研究グループの共同研究によるものであるが、本論文の原理をなすラウエ型の変換に関する理論計算を始め、かつ物理学上の主たる成果を得るに重要な実験セットアップの設計、Spring-8での実験とデータ収集、そしてデータ解析に渡る全てを論文提出者が主体となって進めたと判断する。特に自ら行った厳密な理論計算にもとづき実験計画を立てて遂行したことは、ユニークなアプローチに従って信頼性のある世界初の成果を導いたため、高く評価することができる。

従って、博士（理学）の学位を授与できると認める。