

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	長谷部 孝
学位授与の要件	学位規則第4条第①・②項該当		
論文題目			
<p>Search for sub-eV scalar and pseudoscalar fields via four-wave mixing with tabletop lasers</p> <p>(テーブルトップレーザーを用いた四光波混合による sub-eV スカラー・擬スカラー場の探索)</p>			
論文審査担当者			
主 査	教 授	杉立 徹	
審査委員	教 授	大川 正典	
審査委員	教 授	木村 昭夫	
審査委員	准教授	高橋 徹	
〔論文審査の要旨〕			
<p>暗黒物質および暗黒エネルギーは現代における最大の謎である。複数の宇宙天文観測結果から星間物質や星などの私たちの目に見える物質は宇宙全体の1割未満であり、残りは局在化する暗黒物質と宇宙全体を覆う暗黒エネルギーと考えられる。ひとつの自然な解釈として、暗黒成分は既知素粒子との結合が極めて弱いため、これまでの素粒子実験等では発見できず、結果として物理学の標準模型に組み込まれていないと説明することもできる。南部陽一郎博士は自発的対称性の破れに伴う質量零の場がπ中間子であることを見出した。この自発的対称性の破れの観念を質量起源に適応したのがヒッグス機構である。ヒッグス粒子発見によりこの観念の妥当性が支持された現在、零質量に近い場を改めて探索することは興味深い。物質場との結合が弱いなら宇宙暗黒物質になり得るアクシオン粒子(擬スカラー場の一種)や暗黒エネルギー源を説明し得るディラトン粒子(スカラー場の一種)の存在が複数の理論から予言されている。</p> <p>本研究では、質量零に近いアクシオンやディラトン粒子を生成探索するために準平行にかする低エネルギービーム衝突を利用する。光子エネルギー1eV程度のレーザー光を光学レンズで集光し衝突させる。零質量に近いスカラーあるいは擬スカラー場が存在し、その場が共鳴的に生成されれば終状態としてローレンツブーストされたフレームで崩壊することにより、レーザー基本波に対して青方偏移した光子が生成され物理信号となり得る。特定の波長域へ崩壊を誘導して未知粒子の検出効率を高めるため、本研究では別色の誘導レーザー光を導入する。つまり、2色のレーザー光を同軸上で混合し、光波混合過程が真空内の非線形性を通じて起こり得ることを見極める。運動学的には物質中の原子を経由して起こる四光波混合現象と酷似しているため、本研究では真空内四光波混合と呼んでいる。</p>			

著者は、この先行実験例のない準平行光子・光子衝突系において、パルスあたり 10^{12} 個相当の可視光レーザー光子から、波長が変化した 1 光子のみを分離検出する分光系を設計構築し、光電子増倍管の波形データから信号光子を計数する特殊な解析手法も開拓した。始めに物理的信号が期待されない環境下で本当に探索粒子の非存在性を主張できるかどうかを検証するため、敢えて弱いパルスレーザー光を生成用レーザー場として連続レーザー光で誘導し崩壊させる検証実験を実施し、有意な信号光が観測されないことを確認し、本番実験に向けた実験技術確立した。この先行実験は真空内四光波混合による世界初の探索結果であり、スカラー場と光子の結合と質量の関係に関する上限値を報告する公表論文として公開した。

著者は先行実験の経験と成果を踏まえ、京都大学化学研究所との共同研究として原子起因の背景光が起り得る実験環境下での探索を開始した。著者は同研究所におけるノイズ源の調査から着手し、デジタル波形の節の数に基づくノイズ検知手法を開発した。その後、2色のレーザーパルスの時空間オーバーラップが成立した瞬間に、予定していた波長域と時間域に原子起因の四光波混合光を検出する実験技術確立した。未知粒子探索には不要な原子起因の背景光を抑制するために、2色レーザー光間の偏光組み合わせ依存性や圧力依存の基礎データを精査し最適な実験条件を見出した。原子起因の四光波混合光が一切入らない圧力領域にて、スカラー場および擬スカラー場の本番探索実験を遂行した。その結果、真空内四光波混合光が統計的に有意に観測されていない結論を得て、スカラー場および擬スカラー場と光子の結合と質量の関係に関する観測上限値を第一著者として論文公表した。

本研究手法は真空中のレーザー場のみを用いることに加えて、量子的な共鳴散乱を明示的に包含する定式に基づいている。そのため、光子と軽い未知場の結合に着眼した他先行実験の探索上限値と厳密には比較することはできないが、本研究は既に先行実験による観測上限値を超える領域にまで到達している。高強度レーザー場を扱う新たな実験的研究が今後発展するなか、本研究は先駆性に富み、高い学術的価値を有する。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

Search for sub-eV scalar and pseudoscalar resonances via four-wave mixing with a laser collider,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2015, 073C01 (19 pages),

DOI: 10.1093/ptep/ptv101

Takashi Hasebe, Kensuke Homma, Yoshihide Nakamiya, Kayo Matsuura, Kazuto Otani, Masaki Hashida, Shunsuke Inoue, and Shuji Sakabe

参考論文

The first search for sub-eV scalar fields via four-wave mixing at a quasi-parallel laser Collider,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2014, 083C01 (25 pages),

Kensuke Homma, Talashi Hasebe, and Kazuki Kume