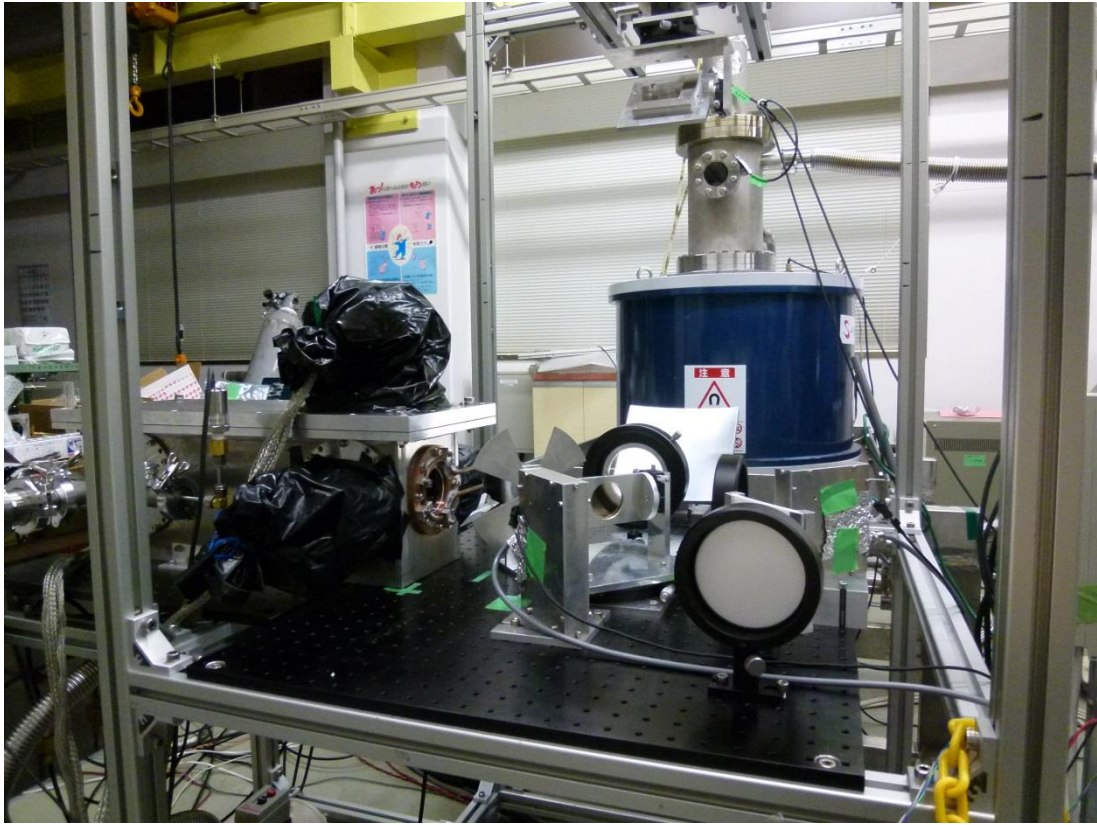


光を用いた素粒子物理学実験

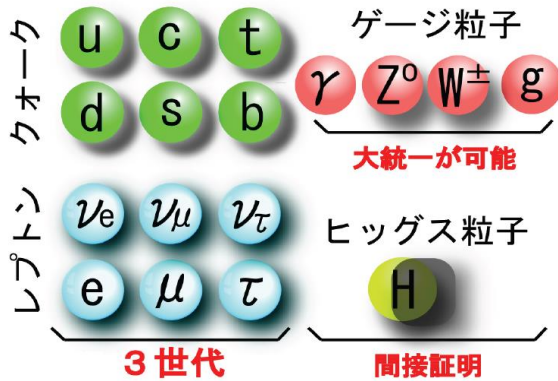


東京大学・素粒子物理国際研究センター

<http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp>

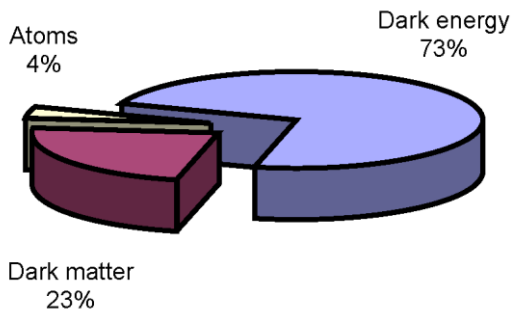
(2013年5月)

標準モデルに登場する素粒子



この世の中の物質は究極的には何から出来ていて、どういう法則に従っているのでしょうか。それを解き明かすために、素粒子物理学の研究は進展してきた。現在の素粒子物理学の標準理論によると、物質は陽子や中間子を構成する「クォーク」と、電子やニュートリノなどの「レプトン」からできている。これらの素粒子は、「グルーオン」、「光子」、「W/Z ボソン」と呼ば

れるゲージ粒子を介してそれぞれ「強い相互作用」、「電磁気力」、「弱い相互作用」を及ぼし合う。なお、重力はこの理論モデルでは記述できておらず、重力を含む理論の構築は重要な課題となっている。標準理論では「ヒッグス粒子」と呼ばれる粒子が唯一未発見であり、この粒子が素粒子に質量を与えると考えられている。ヒッグス粒子は LHC 実験において発見が期待されている。



標準理論はほとんどの素粒子現象をうまく記述し、多くの実験でその正しさが検証されている。しかし、重力が理論に含まれておらず、また高いエネルギースケールではうまく適用できない可能性がある。また、宇宙の暗黒物質や暗黒エネルギー、物質と反物質の対称性など、標準理論で

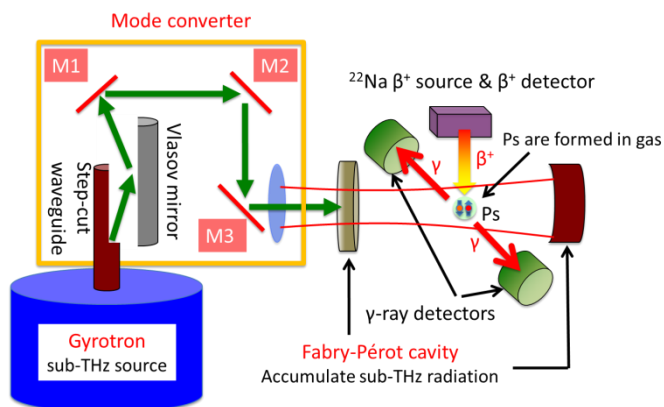
説明できない謎が多い。このため、標準理論を超える物理を記述する理論がいくつも提案されている。

我々は光を用いた素粒子実験を行うことで、標準理論を超えた新しい物理現象の探索や、ミリ波分光などの新しい研究分野の開拓を進めている。加速器実験で用いられる電子や陽子などの物質粒子とは異なり、光子は電磁相互作用を媒介するゲージ粒子であるため、光子のインテンシティーを高めることは場の強さを高めることを意味する。高強度場中における物理はそれ自体が興味深い研究対象であり、光子のエネルギーおよびインテンシティーの二次元平面における未探索領域で光素粒子実験を行うことが重要である。

以下では、我々が行なっている光を用いた素粒子実験を紹介する。現在は、特に光と電波の中間領域であるミリ波および放射光施設の高強度 X 線を用いた実験を行なっている。

[1] ミリ波を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定

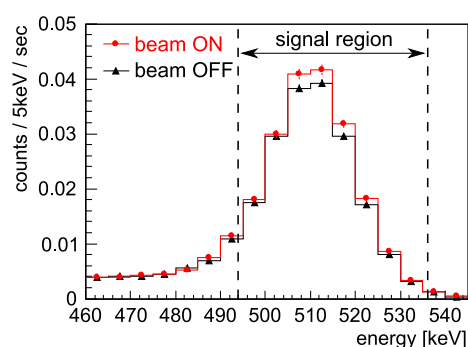
ポジトロニウムは電子とその反粒子である陽電子が電磁相互作用によって結合した準安定な粒子である。ポジトロニウムの基底状態は、電子と陽電子のスピンの平行なオルソポジトロニウムと、反平行なパラポジトロニウムに分けられる。オルソポジトロニウムのほうが $0.84\text{meV} (= 203\text{GHz})$ だけエネルギー準位が高く、このエネルギー準位差は超微細構造と呼ばれる。



我々は高強度ミリ波によってオルソポジトロニウムからパラポジトロニウムへの誘導遷移を引き起こし、超微細構造を世界で初めて直接測定する実験を行なっている。500W クラスのミリ波源であるジャイロトロンを本実験のために福井大学遠赤外領域開発研究センターと共同開発し、そ

の出力を光学共振器内に蓄積することで 10kW を超える高強度ミリ波が得られる。光学共振器内で生成されたオルソポジトロニウムはミリ波によってパラポジトロニウムに誘導遷移するため、ミリ波照射時にはパラポジトロニウム崩壊イベント数が増加する。この遷移は磁気双極子遷移 (M1 遷移) であるため遷移確率が極めて小さく、これまで観測されたことがなかったが、2011 年に我々が初めて観測に成功した。この実験の結果は、Phys. Rev. Lett. 108, 253401 (2012) に掲載された。

超微細構造を測定するためには、ジャイロトロンから出力されるミリ波の周波数を $201\sim 206\text{GHz}$ の範囲で変えながら遷移量の変化を測定する必要がある。新たに内部空洞共振器が交換可能なデマンタブル型ジャイロトロン (表紙写真) を開発し、周波数変更を可能とした。今年 (2013 年) 中に世界で初めてポジトロニウム超微細構造を直接測定する予定である。

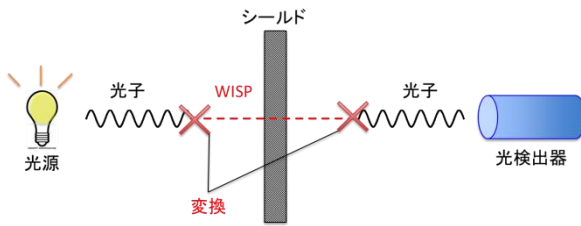


[2] 高強度光源を用いた弱結合未知粒子の探索

標準理論を超えた物理を研究する方法は大きく分けて2つある。1つは、我々も参加している LHC 実験のように大型加速器を用いてエネルギーフロンティアで新たな物

理現象を直接探索する方法である。一方、高エネルギーに未知の物理現象が存在すると低エネルギー領域で標準理論からの僅かなずれが生じる。そのため低エネルギー領域で精密測定を行うことにより間接的に標準理論を超えた物理を探索することが可能である。

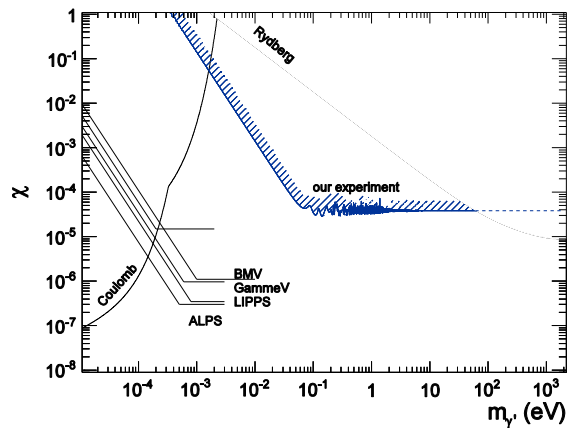
我々は高強度光源を利用し、光と相互作用する未知粒子の探索する実験を行なっている。探索する未知粒子としては、量子色力学(QCD)の CP 問題を解決するために予言されておりダークマターの候補でもあるアクシオンや、ディラトン、パラフォトンなどが挙げられる。



実験のセットアップについて述べる。光子ビームライン上に遮蔽体を設置することで、光子が遮蔽体の前で未知粒子に変換された場合のみ未知粒子が遮蔽体を通り抜けられるようにする。遮蔽体の後ろには光検出器を配置し、遮蔽体を通り抜けた未知粒子が再び光子に変換された場合のみ光が検出される。未知粒子と光の相互作用が弱く変換確率が非常に小さいため、高強度光源が必要となる。このタイプの実験は過去に可視光レーザーで行われているが、我々は光子エネルギーの異なる2種類の高強度光源を用いて新たなエネルギー領域を探索する。

遮蔽体の後ろには光検出器を配置し、遮蔽体を通り抜けた未知粒子が再び光子に変換された場合のみ光が検出される。未知粒子と光の相互作用が弱く変換確率が非常に小さいため、高強度光源が必要となる。このタイプの実験は過去に可視光レーザーで行われているが、我々は光子エネルギーの異なる2種類の高強度光源を用いて新たなエネルギー領域を探索する。

光源の一つは、世界最大の放射光施設である Spring-8 (表紙写真) の X 線ビームラインである。光子フラックスは 10^{14} photons/s 程度であるが、X 線のエネルギーが 10keV 程度と大きいため過去の実験と比較して数桁重い未知粒子を探索することが可能である。高いエネルギー分解能を持つ Ge 検出器を使用し、2012 年の夏に測定を行い、パラフォトンは見つかりなかったが、



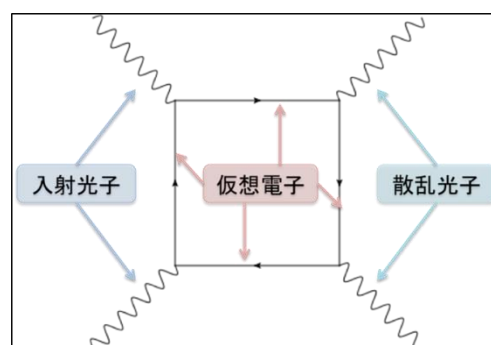
質量が eV 程度のパラフォトンに対して地上実験で最も強い制限を与えた。この結果は Phys. Lett. B 722, 301 (2013) に掲載された。今後は、磁石を用いてアクシオンやディラトンの探索を行う予定である。

もう一つの光源は、ポジトロニウム超微細構造の直接測定実験で開発した高強度ミリ波源である。ミリ波のエネルギーは meV 程度と小さく、可視光レーザーを用いた場合と比べて軽い未知粒子の探索が可能である。光共振器内部に蓄積される光子フラックスは $10^{25} \sim 10^{26}$ photons/s と極めて多く、この点で非常に有利である。ミリ波検出器

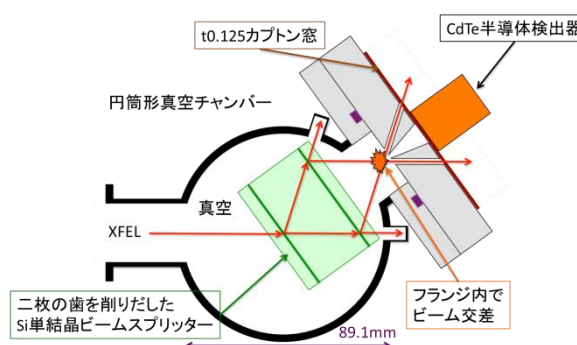
に関しては、ALMA 望遠鏡など電波天文学で用いられている超伝導検出器 SIS (Superconductor Insulator Superconductor) を採用した。これによりジャイロトロン単色性を活かし、帯域を絞った高感度な測定が可能となる。現在、SIS 検出器の性能評価などを行なっている。

[3] X線自由電子レーザーを用いた光子・光子散乱の探索

古典電磁気学において光子は光子自身と相互作用しないが、量子電磁気学(QED)では、仮想電子のループを介する相互作用(右図)が存在するため、光子・光子散乱が予測される。しかし、ループの効果であり散乱断面積が極めて小さく、1936年に予測されて以来、可視/赤外光を用いたいくつかの実験が行われたが未だ観測されていない。



我々は、光子・光子散乱の断面積が入射光子エネルギーの6乗に比例することに着目し、可視光に比べ4桁高いエネルギーを持つX線を光源に用いて実験を行う。大強度X線自由電子レーザーSACLA (8×10^{10} photons/pulse, パルス幅 10fs, $1 \mu\text{m}$ に集光可能)を用い、右図のセットアップでバックグラウンドフリーな測定を行うことで先行実験を上回る感度で光子・光子散乱を探索できる。



(文責: 山崎 yamazaki@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

浅井研究室: shoji.asai@cern.ch

小林研究室: tomio@icepp.s.u-tokyo.ac.jp