

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03715

研究課題名(和文) 直線偏光ガンマ線のデルブリュック散乱

研究課題名(英文) Delbruck scattering using linearly polarized gamma-rays

研究代表者

早川 岳人 (HAYAKAWA, Takehito)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・首席研究員(定常)

研究者番号：70343944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円

研究成果の概要(和文)：量子電磁力学(QED)は完成された理論体系だと考えられているが、QED自身が予測している未解明の現象が多数ある。そのような現象の一つが、光子と光子の散乱などの光子・光子相互作用である。しかし、これらの現象の実験的にも理論的にも良く分かっていない点が多い。光子・光子相互作用の一つがデルブリュック散乱である。デルブリュック散乱は他の光子・光子相互作用より反応断面積が極めて大きい、理論計算は複雑である。これまで、デルブリュック散乱の振幅のみを計測する手段がなかったが、直線偏光線を用いることを提案した。そこで、UVSOR放射光施設で1MeVのレーザーコンプトン散乱線を生成し、散乱を計測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子電磁力学理論では、光子と光子が散乱などの反応を起こすことが予想されている。このような現象の一つに、デルブリュック散乱と呼ばれる現象がある。このデルブリュック散乱は量子電磁力学理論をさらに発展させるために重要であり20世紀より実験が進められていたが行き詰っていた。そこで、直線偏光した線を使うことで実験を行う新しい手法を提案し、そのために線ビームを作りデルブリュック散乱の実験を行った。

研究成果の概要(英文)：Quantum Electrodynamics (QED) is considered to be one of established theories but there is unverified phenomena that are predicted by QED. One of such phenomena is interactions between photon and photon. These phenomena have not been well studied experimentally and theoretically. One of such interactions is Delbruck scattering, which has remarkable feature that its cross section is much larger than those of other photon-photon interactions but its theoretical calculation is more complex rather than the others. We have proposed a new method to measure selectively the amplitude of Delbruck scattering using linearly polarized gamma-rays. To perform it, we developed a laser Compton scattering gamma-ray beam with an upper energy of 1 MeV and measured its scattering at the UVSOR radiation facility.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：デルブリュック散乱 光子光子相互作用 レーザーコンプトン散乱 線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子電磁力学 (QED) は完成された理論体系だと考えられているが、QED 自身が予言している未解明の現象が多数あり QED はさらに発展する余地がある。そのような現象の一つが、光子・光子相互作用である。光子と光子の散乱、光子が 2 個の光子に分裂するなどの現象が含まれる。光子・光子相互作用の解明は、QED 自身の発展だけでなく、未知の素粒子の探索にも有効である。しかし、これらの現象の反応断面積は極めて小さく高輝度レーザーや X 線 FEL を用いた実験が行われていたが測定できなかった。2017 年になり初めて光子と光子の散乱計測が報告された。LHC における鉛と鉛の衝突実験において、仮想光子と仮想光子の散乱による 5TeV の 2 本の線が 13 イベント測定され、25%の誤差で理論予測と一致することが報告された[1]。しかし、その後も LHC では実験が継続されているが、実験の難易度から統計精度の大きな向上は望めない[1]。また、実光子の光子・光子散乱については X 線 FEL を用いた実験が行われている。ただ、反応断面積が小さいため計測には至っていない[2]。一方、光子分裂については 450MeV のレーザーコンプトン散乱(LCS) 線を用いた実験が 1 例知られているだけである[3]。ただし、計測されたのは 400 イベントのみである。一方、宇宙において光分裂が発生しているのではないかと考えられている。ソフト X 線リピーターと呼ばれる X 線パルサーのスペクトル解析から、極めて強い磁場を持つ中性子星から X 線が生成されていると推測され、その強い磁場中で光分裂が発生しているのではないかと推測されている[4]。このように、光子・光子相互作用の測定は、物理学分野で様々な手法で広く研究されている課題であると同時に、宇宙で自然現象として発生している可能性が高い現象でもある。

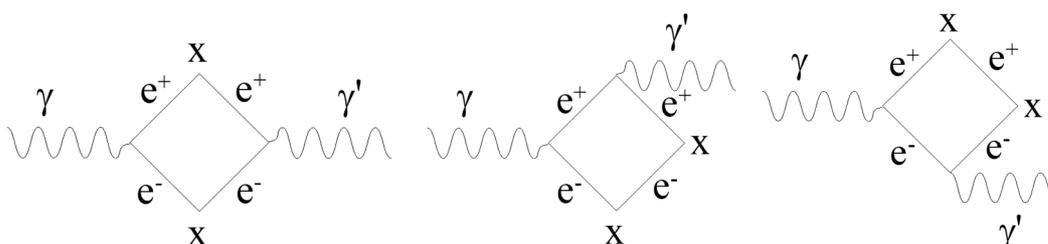


図1 最低次のデルブリュック散乱のファインマンファイナグラム。Xは原子核の生成するクーロン場との相互作用を示す。

光子・光子相互作用の一つがデルブリュック散乱である。デルブリュック散乱とは、線が原子核近傍で対生成し、電子と陽電子がそれぞれ原子核のクーロン場(仮想光子)と相互作用し、対消滅する過程である(図1参照)。結果的には、線が原子核によってエネルギーをほとんど変えずに弾性散乱したように見える。デルブリュック散乱の計算は、他の光子・光子相互作用より著しく複雑である一方、反応断面積は非常に大きいため 20 世紀には精力的に研究された。実験は、入射線と同じエネルギーの線の強度を計測することで行われ、線源として原子炉で生成された線を放出する崩壊核種及び、中性子捕獲線が用いられた。これらの一連の実験によってデルブリュック散乱の反応断面積が系統的に求められた。しかし、この方法には原理的に致命的な問題があることが分かった。線の弾性散乱にはデルブリュック散乱の他に、レーリー散乱、原子核のトムソン散乱、原子核を励起させる核共鳴蛍光散乱などもあり、量子力学的な干渉を引き起こすのである。反応断面積は振幅の 2 乗に比例するが、振幅の符号は不明であるため、デルブリュック散乱の振幅を求めることが原理的に不可能である。そのため、1990 年代以降は研究がほとんど停止していた。

2017 年に、研究分担者の J. Koga 博士及び研究代表者は、直線偏光した LCS 線を用いた場合には、選択的に最低次のデルブリュック散乱が計測できる条件があることを理論計算によって発見した [5]。直線偏光した線の直線偏光面において、前方から約 71 度の角度では、デルブリュック散乱以外の散乱の断面積が、デルブリュック散乱より約 2 桁小さくなるのである(図2(右)参照)。現在、EU がルーマニアに建設中の ELI-NP の次世代 LCS 線装置を使えば、76 日の実験において統計誤差 1%で計測できるとの結論を得た[5]。現在の技術で、光子・光子相互作用の反応断面積を最も高精度に計測できる手法と言える。

また、近年光渦と呼ばれる角運動量を持つ光が広い分野で注目されている。光渦は、レーザーから光学素子の変換で主に生成され、分子の回転やネジ状の構造物生成などマクロに回す力も持つことが実証されている。さらに、光子も渦状の波動関数を持つことが可能であることが示されており、イオントラップを用いた単一原子の励起の制御や、量子もつれ実験などによって、光子渦の実在が実証されている。しかし、量子力学による理論的な取り扱いには十分ではなく不明な点も多い。光子渦の波動関数は 1 種類だけではなく、波動関数は光子渦の生成メカニズムに依存している。また、シンクロトロン放射の高次高長波でも生成されることが古典論で示されているが[7]、ランダウ量子論を用いた計算はされていなかった。光子渦と原子核や電子などの粒子との相互作用も計算が開始されたばかりであった。

2. 研究の目的

デルブリュック散乱の理論計算は、Real part と Imaginary part から構成される。Real Part は主に 1.022MeV 以下で有意であり、Imaginary part は 1.022MeV 以上で有効である。電子と

陽電子の質量の和である 1.022MeV 以下のエネルギーでは通常は対生成が発生しない。しかし、量子力学では不確定性関係よりこのような過程が許される。過去に行われたデルブリュック散乱の実験では 1MeV 以上のエネルギーの線による実験が多かったため、Real Part の理論・実験的な研究が相対的に遅れている。そのため、本研究では 1.022MeV 以下の線をレーザーコンプトン散乱によって生成し、散乱線を計測する。理論計算を併せて行い実験値と理論の比較を行う。

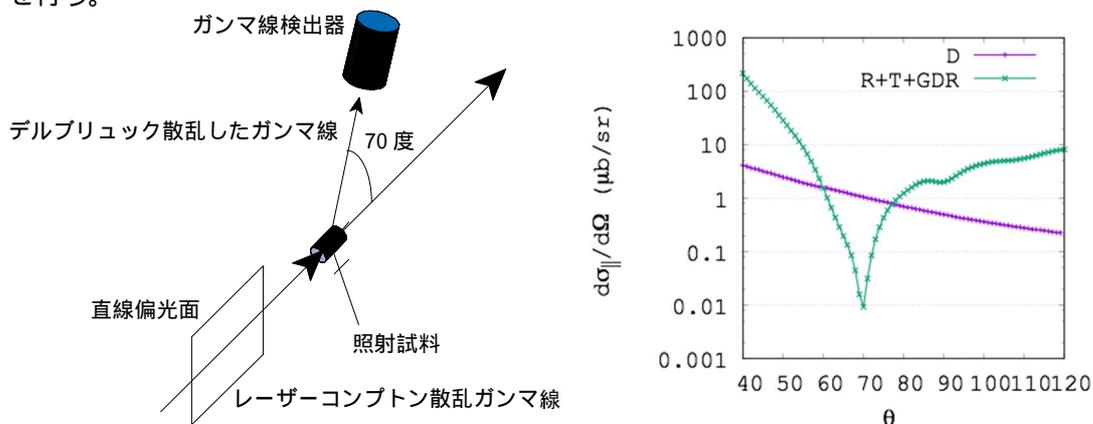


図2 直線偏光線を用いたデルブリュック散乱の選択的計測の模式図(左)と、振幅の理論計算値。Dはデルブリュック散乱、Rはレーリー散乱、Tは原子核トムソン散乱、GDRは巨大双極子共鳴散乱を示す。

また、デルブリュック散乱には図3のように高次の効果があり、2次、3次の断面積は(Z)⁴、(Z)⁶に比例するため Sn より重い元素で急激に顕わになる可能性がある。現在の計算コードでは高次の効果は計算できない。そのため、理論計算の研究および Z>50 以上の重元素をターゲットに用いて実験を行う。また、光子渦において理論研究を進める。

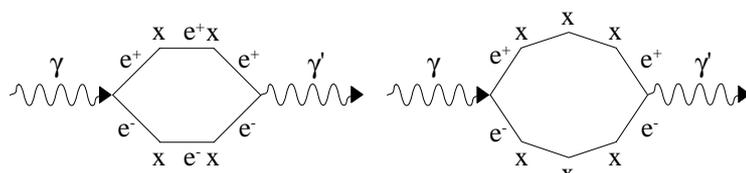


図3 高次のデルブリュック散乱。現在は、高次の効果まで計算できない。

3. 研究の方法

研究を開始した時点では、MeV エネルギー領域で直線偏光した LCS 線が利用可能な施設は、HIgS(米・デューク大)、NewSUBARU(兵庫県立大)、UVSOR-III(分子研)の3か所のみであった。なお、ELI-NPは2019年稼働予定であったが、契約に関するトラブルのために装置の再設計から行い稼働予定は2023年度に延期されている。また、NewSUBARUの線装置は歴史的役割を果たしたため閉鎖された。そのため、2020年度以降では、HIgSとUVSOR-IIIが利用可能な施設である。上記の論文[5]の出版後にHIgSとELI-NPの施設関係者と実験の可能性を議論した。その結果、その時点で1.022MeV以下の低エネルギーLCS線の生成に適しているのはUVSOR-IIIであると結論した。UVSOR-IIIの電子のエネルギーは他の放射光施設より低く750MeVである。このエネルギーの電子とCO₂レーザーとの散乱で1MeVの線を生成可能である。UVSOR-IIIでは、研究代表者の保有する2μmの波長のファイバーレーザーを用いてエネルギー約5.5MeVのLCS線の生成を行い[6]、京大や分子研との共同研究により線CTの基礎研究を行っている。そこで、CO₂レーザーを電子蓄積リングに入射しLCS線を生成し、ターゲットに照射し散乱した線のエネルギースペクトルを計測する。

図4にUVSOR-IIIにおける線発生実験の模式図を示す。ユーザーが常時アクセス可能なエリアから、レーザー光を加速器のポートの一つに入射し、ミラーで集光させ電子蓄積リング内部で電子とコンプトン散乱を発生させる。発生した線は電子ビーム軸上に放出される。コリメーターでビームの発散角度を制限することで、エネルギーの下限を調整する。生成した線の軸上にターゲットを設置して、ターゲットに線を照射させ、一定の角度で散乱した線のエネルギーをGe半導体検出器ないしLaBr₃:Ceシンチレーターで計測する。同時に、入射したLCS線のフラックスを計測する。散乱した後のレーザーは、レーザーパワーのモニターのために蓄積リングの外に導いてモニターする。また、線の直線偏光面は、レーザーの偏光面で決まるが、ミラーによって予期せず偏光面が変わる場合がある。コンプトン散乱後に、レーザーを取り出し、直線偏光面を確認することで線の直線偏光面を確認する。線のフラックスは、新規に導入するLaBr₃:Ceシンチレーターでモニターする。LCS線のエネルギースペクトルは、測定の前後に、保有している相対検出効率130%の大型のGe半導体検出器を用いて、より精密に計測する。断面積計測では、線の直線偏光面に対して垂直及び平行な角度に配置した2台のLaBr₃:Ce検出器ないしGe半導体検出器で散乱線を測定する。なお、検出器は前方から約70度の角度に配置す

る。

レーザーを導入するための光学系を整備する。ミラーで反射させビームラインに90度の角度で入射し、ビームライン内に設置されているミラーで90度角度を変更する。長軸ラインの中央付近で電子と散乱するように光学系でフォーカスさせる。これらの光学系の設計、導入、試験を行う。また電子蓄積リングの入射・取り出し口に2重窓を新規に設置する。これは、事故を防ぐためである。UVSOR-IIIは汎用の放射光施設であり常時ユーザーが利用している。また、蓄積リングは高真空が要求されるため大気に晒すことは避けなければならない。レーザーは100W程度の出力を予定しており、仮に1%が窓にエネルギーを落とすことになった場合1Wになり長期的な照射では窓ガラスが破損する可能性がある。そのため、専用の2重窓を導入し中間部の真空をモニターしどちらかの窓が破損した場合には直ちに停止するようにする。また、重いターゲットに対するデルブリュック散乱、1MeV以上のエネルギーに対する散乱の計算を進める。

光渦については、光子渦の発生メカニズム、電子との散乱(コンプトン散乱)について理論研究を進める。

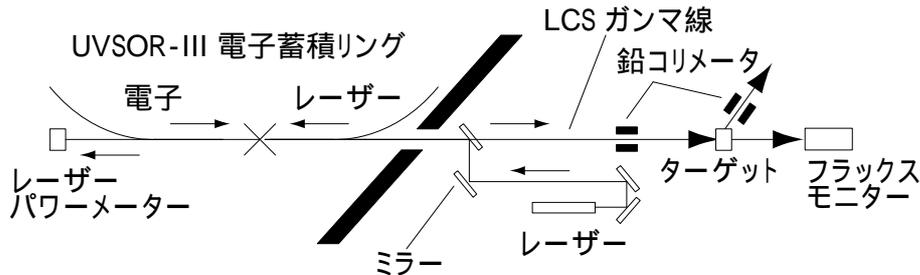


図4 UVSOR-IIIのレーザーコンプトン散乱実験の模式図。実験エリアからレーザーを入射する。

4. 研究成果

最初に電子蓄積リングの真空を保持するためにレーザーの入射口と排出口に、2重窓を設置した。真空計のモニター等によるレーザーに対するインターロックを導入した。次に大出力のCO₂レーザーによるLCS線の生成実験を行った。最も危惧されていた電子蓄積リングの窓の破損による真空悪化による運転停止が起きないことが確認された。電子蓄積リングは放射光として定常運転している装置なので、万が一に破損した場合には施設だけでなく他のユーザーに多大な迷惑をかけることになるため、2重窓の信頼性が確認されたことは重要である。また、LCS線は広いエネルギー幅を持つが、上限はシャープに決まる[図5(右)参照]。エネルギーの計測結果をこのエネルギーが予定通りに1MeVを僅かに下回っていたので、デルブリュック散乱のReal Partの寄与による散乱を選択的に計測できる点で重要である。なお、申請代表者は最初の実験の前日にノロウィルスに罹患して行動不能になった。共同研究者の尽力により実験代表者不在で最初の実験が遂行された。

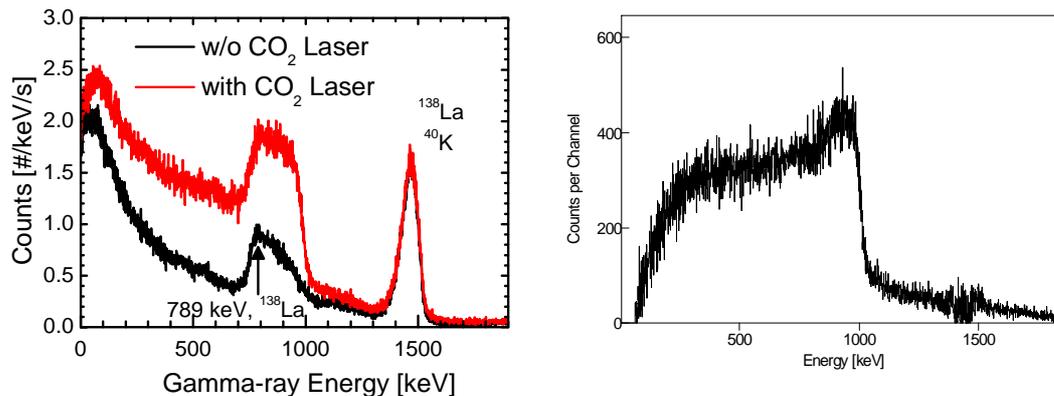


図5 二酸化炭素レーザーを導入した場合と導入しない場合のビームライン上の線スペクトルの比較(左) 差分による生成されたLCS線のエネルギースペクトル(右)。この計測ではエネルギースペクトルの上限から低エネルギーまで計測するためにコリメーターを用いていない。

レーザーの直線の偏光面の角度偏光はこの実験で用いる大出力レーザーでは注意深く行うことが必要である。そのため、検出器を偏光面に対して水平な面と垂直な面に設置する(前方からの角度はそれぞれ70度)と同時に、偏光面の変更を行うことで系統誤差を小さくする手法で実験を行った。レーザーの直線偏光度を高めるためと、線強度を増強するために、光学系の改良を行った。CO₂レーザーを蓄積リングのビーム面と同じ高さに設置して、上下のミラーによる転送を不要とした。レーザーは、蓄積リングの中ほどで焦点を合わせ、電子とのコンプトン散乱が多数回(連続的に)発生するようにした。この手法でLCS線の強度の増加を確認した。LCS線のエネルギースペクトルは直径3.5インチ奥行き4インチのLaBr₃:Ceシンチレーターで計測した。このエネルギースペクトルから生成した線のフラックスを評価し、ほぼ理論予測と一致した。最大エネルギーは1.022MeVの対生成の閾値を下回った。ターゲットとして、スズのターゲットを用いた。直線偏光面に対して垂直・平行な面に、LaBr₃:Ceシンチレーター(直径3.5インチ奥行き4インチ)とGe半導体検出器(相対検出効率130%)を設置してターゲットからの散

乱線を計測した。なお、2重窓によってレーザーの入出力部分には問題がなかったが、ビームライン内部に施設側によって設置されていたミラーが破損した。幸い、蓄積リングのオペレーションには影響がなかったがLCS線実験は中止になり、慎重な取り扱いが必要であることを再認識した。なお、実験後に施設側によってミラーの改良が行われた。

バックグラウンドの主要な要因は2つであり、天然バックグラウンド (^{40}K やアクチノイド系列の放射性同位体) と、加速器に起因する制動放射である。天然バックグラウンドは検出器の遮蔽を強化することで落とすことができる。加速器による制動放射は予想されていたが、加速器のスタッフ及び専門家の意見では、放射光のための電子蓄積リングでは電子の寿命に真空度(つまり残留ガス)が大きく影響するために極めて高い真空になっている。そのため、制動放射は無視できるくらい小さいはずであるという意見であった。また、放射光では通常、可視光や軟X線が生成されるが、それらの光はミラーを通してビームラインに導かれるため、ビームラインから蓄積リングを直接見ることがない構造になっている。そのため、制動放射X線が直接飛来しないため、通常の条件では測定できずLCS線生成実験において同時に測定する必要があった。

制動放射X線の寄与は、蓄積リングの真空をさらによくするかパルス化することでS/Nを向上させることで改善できる。真空を良くすることは現実には無理なので、パルス化の試験を行った。 CO_2 レーザーはパルス化に対応していないため、1 nsのパルス幅の $1\mu\text{m}$ 波長のファイバーレーザーで試験を行った。その結果、パルス化で予定通りに制動放射X線のバックグラウンドが低減できることが確認できた。なお、特定の電子バンチと衝突するように調整した結果、電子バンチのフィリングパターンに影響を与えることが判明した。さらに副産物としてこの実験でビームラインの中に設置されているレーザーを反射させるためのミラーをX線が通過するときコンプトン散乱し、検出器に入射していることが判明した。これはコンプトン散乱のため低エネルギーにシフトするため弾性散乱に対応するピーク解析には影響しないが、バックグラウンド解析には影響する。なお、これは検出器の前面の遮蔽を強化することで簡単に対処できた。

制動放射X線以外の要因として大気が考えられる。通常の原子核実験では大気による散乱は小さく無視している。計測スペクトルから大気のコンプトン散乱が有意に見えていることが判明した。低エネルギーにシフトするので直接的な影響は小さいが、バックグラウンド解析に影響する。当初の配置は既存のコリメーターと実験架台に制限を受けていたため、コリメーターとターゲットフレームを新規に作りビームラインを全面的に変更し大気中の距離を1/20以下にした。

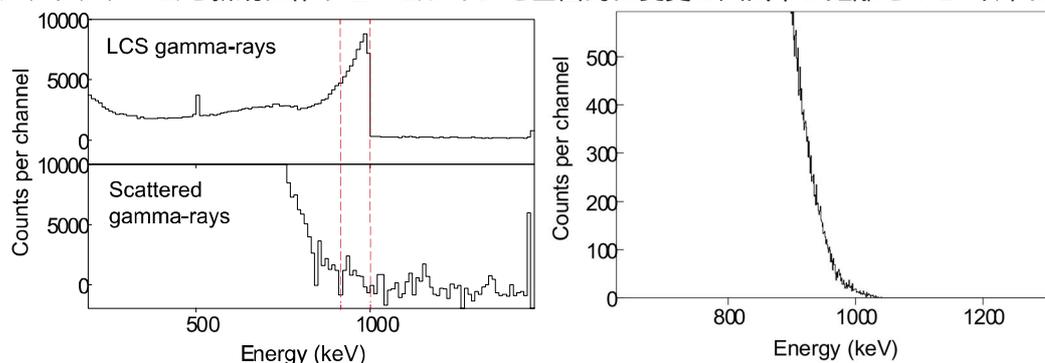


図6 入射LCS線と70度で計測した散乱線の計測スペクトルの例(左)LCS線のエネルギースペクトルのエネルギー領域に弾性散乱線が計測される。デルブリュック散乱も取り入れたGEANT4シミュレーションによるスペクトル(右)

図6は計測されたスペクトルの例である。デルブリュック散乱は弾性散乱の一種であるので、入射線の同じエネルギー領域に散乱線が測定される。図6(左下)のようにLCS線領域に散乱線の増加が測定された。この増加部分が線の弾性散乱のピークに該当する。図6(右)にデルブリュック散乱が組み込まれたGEANT4による計算結果を示す。1MeV近傍で増加が予想されている。デルブリュック散乱の理論計算も行った本研究では、このようにLCS線源と測定システムの開発を行い、生成した線を用いて散乱線を計測した。統計誤差を下げるために様々な実験の改善を行った。理論計算では、複数の物質について1MeVだけでなく5MeV、10MeVにおける散乱の計算も行い系統的な計算を進めた。また、デルブリュック散乱の高次の効果を模索するためより大きな原子番号のタンゲステンでも実験を行った。

光子渦については強い磁場中のシンクロトロン放射によって光子渦が生成されること及び、その波動関数を求めた。また、コンプトン散乱の同時係数によって通常的光子(平面波)と光子渦を識別できることをあきらかにした。また、J-PARCの中性子実験及び超新星ニュートリノの元素合成について理論研究を行った。

- [1] ATLAS Coll. Nature Phys. 13, 852 (2017); ATLAS Coll. Phys. Rev. Lett. 123, 052001(2019)
- [2] T. Inada, et al. Phys. Lett. B 732, 356 (2014); T. Yamaji, et al. Phys. Lett. B 763, 454(2016)
- [3] S. Z. Akhmadaliev, et al. Phys. Rev. Lett. 89, 061802 (2002)
- [4] G. Younes, et al. Astrophys. J. 785, 52 (2014)
- [5] J.K.Koga, T. Hayakawa, Phys. Rev. Lett. 118, 204801 (2017)
- [6] H. Zen, et al., AIP Advances 9, 035101 (2019)
- [7] M. Katoh, et al. Phys. Rev. Lett. 118, 094801 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ali Khaled, Zen Heishun, Ohgaki Hideaki, Kii Toshiteru, Hayakawa Takehito, Shizuma Toshiyuki, Toyokawa Hiroyuki, Fujimoto Masaki, Taira Yoshitaka, Katoh Masahiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Three-Dimensional Nondestructive Isotope-Selective Tomographic Imaging of 208Pb Distribution via Nuclear Resonance Fluorescence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3415 ~ 3415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11083415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hayakawa Takehito, Toh Yosuke, Kimura Atsushi, Nakamura Shoji, Shizuma Toshiyuki, Iwamoto Nobuyuki, Chiba Satoshi, Kajino Toshitaka	4. 巻 103
2. 論文標題 Isomer production ratio of the Cd112(n,)Cd113 reaction in an s-process branching point	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 45801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.103.045801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shizuma T., Minato F., Omer M., Hayakawa T., Ohgaki H., Miyamoto S.	4. 巻 103
2. 論文標題 Low-lying electric and magnetic dipole strengths in Pb207	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 24309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.103.024309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ali Khaled, Ohgaki Hideaki, Zen Heishun, Kii Toshiteru, Hayakawa Takehito, Shizuma Toshiyuki, Toyokawa Hiroyuki, Taira Yoshitaka, Iancu Violeta, Turturica Gabriel, Ur Calin Alexandru, Fujimoto Masaki, Katoh Masahiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Selective Isotope CT Imaging Based on Nuclear Resonance Fluorescence Transmission Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1976 ~ 1984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2020.3004565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ko Heamin, Cheoun Myung-Ki, Ha Eunja, Kusakabe Motohiko, Hayakawa Takehito, Sasaki Hirokazu, Kajino Toshitaka, Hashimoto Masa-aki, Ono Masaomi, Usang Mark D., Chiba Satoshi, Nakamura Ko, Tolstov Alexey, Nomoto Ken'ichi, Kawano Toshihiko, Mathews Grant J.	4. 巻 891
2. 論文標題 Neutrino Process in Core-collapse Supernovae with Neutrino Self-interaction and MSW Effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab775b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Hayakawa Takehito, Kajino Toshitaka	4. 巻 9
2. 論文標題 Compton Scattering of γ -Ray Vortex with Laguerre Gaussian Wave Function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-37096-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zen Heishun, Ohgaki Hideaki, Taira Yoshitaka, Hayakawa Takehito, Shizuma Toshiyuki, Daito Izuru, Yamazaki Jun-ichiro, Kii Toshiteru, Toyokawa Hiroyuki, Katoh Masahiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Demonstration of tomographic imaging of isotope distribution by nuclear resonance fluorescence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035101 ~ 035101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5064866	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Hayakawa Takehito, Kajino Toshitaka	4. 巻 9
2. 論文標題 Compton Scattering of Hermite Gaussian Wave γ Ray	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-44120-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Hayakawa Takehito, Kajino Toshitaka	4. 巻 9
2. 論文標題 Compton Scattering of γ -Ray Vortex with Laguerre Gaussian Wave Function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-37096-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayakawa Takehito, Ko Heamin, Cheoun Myung-Ki, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka, Usang Mark D., Chiba Satoshi, Nakamura Ko, Tolstov Alexey, Nomoto Ken'ichi, Hashimoto Masa-aki, Ono Masaomi, Kawano Toshihiko, Mathews Grant J.	4. 巻 121
2. 論文標題 Short-Lived Radioisotope Tc98 Synthesized by the Supernova Neutrino Process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 102701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.102701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kikuchi Yuma, Ogata Kazuyuki, Hayakawa Takehito, Chiba Satoshi	4. 巻 98
2. 論文標題 Azimuthal angle distributions of neutrons emitted from the Be9(α ,n) reaction with linearly polarized α rays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.064611	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shin Jae Won, Cheoun Myung-Ki, Kajino Toshitaka, Hayakawa Takehito	4. 巻 2018
2. 論文標題 Spectral shape analysis for electron antineutrino oscillation study by using ^8Li generator with ^{252}Cf source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 024 ~ 024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/09/024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zen H, Hayakawa T, Salehi E, Fujimoto M, Shizuma T, Koga J K, Kii T, Katoh M, Ohgaki H	4. 巻 1067
2. 論文標題 Generation of 1-MeV quasi-monochromatic gamma-ray for precise measurement of Delbruck scattering by laser Compton scattering	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 092003 ~ 092003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1067/9/092003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 早川岳人、川瀬啓悟、静間俊行、羽島良一、コーガ・ジェームズ、全炳俊、紀井俊輝、大垣英明、藤本将輝、加藤政博
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱 線によるデルブリュック散乱の計測II
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.Haykaawa
2. 発表標題 Vortex photon generation in magnetars
3. 学会等名 Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川 岳人、コーガ ジェームズ、静間俊行、全炳俊、紀井俊輝、大垣英明、藤本将輝、加藤政博
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱ガンマ線によるデルブリュック散乱
3. 学会等名 日本原子力学会 2018年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehito Hayakawa
2. 発表標題 Delbruck Scattering using linearly polarized Laser Compton Scattering gamma-rays
3. 学会等名 XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehito Hayakawa, Toshiyuki Shizuma, Jame K. Koga, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki, Masaki Fujimoto, Masahiro Katoh
2. 発表標題 Laser Compton scattering gamma-ray generation for Delbruck scattering experiments
3. 学会等名 Nuclear Photonics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大垣 英明 (OHGAKI Hideaki) (10335226)	京都大学・エネルギー理工学研究所・教授 (14301)	
研究分担者	加藤 政博 (KATOH Masahiro) (30185871)	分子科学研究所・極端紫外光研究施設・特任教授 (63903)	
研究分担者	静岡 俊行 (SHIZUMA Toshiyuki) (50282299)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員(定常) (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川瀬 啓悟 (KAWASE Keigo) (60455277)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・主幹研究員（定常） (82502)	
研究分担者	K o g a J a m e s (KOGA James) (70370393)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光子科学研究部・専門業務員（任常） (82502)	
研究分担者	全 炳俊 (ZEN Heishun) (80548371)	京都大学・エネルギー理工学研究所・助教 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関