

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540334

研究課題名(和文)二重デルタ粒子光生成反応の研究

研究課題名(英文)Study of double Delta photoproduction

研究代表者

神田 浩樹(Kanda, Hiroki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40321971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギーが 0.65 - 1.1 GeV の光子を重水素原子核に照射して、重水素原子核を構成する陽子と中性子をいずれもデルタ粒子というエネルギーの高い状態に変換する特殊な反応の発生する確率(断面積)、およびその反応の角度分布を測定した。

また、1.3 GeV まで加速した電子から光子を発生し、そのエネルギーを測定するための装置の開発を行った。この装置に用いるため、最新の半導体光センサーを利用した検出器を開発した。この光センサーの出力信号の処理回路を設計し、80 ピコ秒という高い精度で光子の発生時刻を捉えることができる検出器を構成した。

研究成果の概要(英文)：I measured the reaction rate, called as the cross section and the angular distribution of the reaction in which the photon with the energy ranging from 0.65 to 1.1 GeV converts the proton and the deuteron in the nucleus of the deuterium into the Delta particles.

I designed a device for the generation and the energy measurement of the high energy photon generated from the electron accelerated up to 1.3 GeV. I developed a radiation detector made of a plastic scintillator bar and a newly developed semiconductor photon sensor. It can measure the timing of the photon generation with the time resolution of 80 picosecond after the fine tuning of the signal processing circuit.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：光中間子生成 核子共鳴 終状態相互作用 光子標識化 シンチレーション検出器 半導体光センサー

1. 研究開始当初の背景

東北大学電子光物理学研究センターでは、荷電粒子スペクトロメーター NKS および後継の NKS2 を用いて 1 GeV 領域光子ビームによる中間子光生成反応の研究を推進してきた。NKS における研究の結果として、0.8 から 1.1 GeV の光子による重陽子を標的とした $\pi^+\pi^-$ 生成反応の中間状態に、重陽子を構成する陽子と中性子がいずれもデルタ粒子に励起される反応（二重デルタ光生成反応）が観測された。しかしながら、この反応確率（反応断面積）は 1993 年に報告されていた TAGX スペクトロメーターによって光子エネルギー 0.57 GeV から 0.85 GeV の範囲で測定された反応断面積よりも小さくかつ光子エネルギー依存性も異なっていた。そこで、2009 年より、NKS2 を用いて低いエネルギー領域も含めた $\pi^+\pi^-$ 生成反応の測定を実施し、TAGX スペクトロメーターで報告されていた反応断面積との比較を目指して研究が進められた。NKS2 は NKS では覆っていない前方角に放出された粒子を検出できる構造となっており、統計量と角度領域の増大によって反応の詳細を高精度で測定することが可能である。2011 年以降にもトリガー用の検出器を工夫して、高い効率でデータ収集を行うべくビームタイムを予定していた中、2011 年の東日本大震災によって電子加速器と光子ビームを生成する光子標識化装置が被害を受け、それらの復旧が急務となった。電子加速器は、電磁石と電磁石電源の置き換えを余儀なくされたが、その結果として電子の最大エネルギーは増大することとなった。それに合わせて、光子標識化装置の構造も見直すこととなり検出器部分の開発・設計を行うこととなった。

2. 研究の目的

研究の目的は 2 項目に分けられる。

(1) 2009 年、2010 年に NKS2 を用いて取得した実験データの解析を進め、TAGX および NKS で収集された $\Delta^{++}\Delta^-$ 生成反応断面積との比較を行うことで、これらの間のデータの違いの原因を探る。また、これらの研究で用いられた実験装置より広い角度範囲にわたって粒子を検出できる NKS2 の能力を生かして、角度分布の導出を行うことで反応の中間状態の詳細を得る。さらに理論研究者との共同研究によって、二重デルタ生成反応機構に迫る。

(2) 震災で被害を受けた光子標識化装置の構造を見直し、最大 0.4 T の磁場中で動作し、かつ 100 ps という高精度の時間決定が可能な電子検出器を開発する。また、その検出器の配置についてはコンピューターシミュレーションを用いて調整し、現行の加速器の真空容器および電磁石の構造において得られる上限のエネルギーの光子を標識化できる検出器の配置を決定する。

3. 研究の方法

(1) 東北大学電子光物理学研究施設の標識化光子ビームラインに設置された中性 K 中間子スペクトロメーターと液体重水素標的を用い、エネルギーが 0.65 GeV から 1.08 GeV の光子ビームを照射して生成した荷電粒子を計測した。データ解析によって、同時に観測される荷電粒子の個数が 3 個であるイベントを選択し、測定した運動量と速度から荷電粒子の質量を導出して粒子の識別を行なった。その結果により、3 個の荷電粒子として π^+ 、 π^- 、陽子が観測されている反応を抽出した。これらの粒子に対して、運動量保存則、エネルギー保存則を適用して不変質量を求めることで、中間状態に $\Delta^{++}\Delta^-$ 粒子が存在する反応を選択できる。コンピューターシミュレーションによって導出した選択効率の補正を行ない、反応断面積を導出した。また中間状態における Δ^{++} 粒子の放出角度分布を導出した。

(2) 東北大学電子光物理学研究センターの光子標識化装置は、加速された電子より制動放射によって光子を発生させ、その光子のエネルギーと発生タイミングを決定する（標識化する）装置である。原理は、制動放射によってエネルギーを失った電子を磁場で運動量分析し、シンチレーション検出器を用いて測定することで電子の運動量と検出タイミングを測定し、その情報を元に光子のエネルギーと発生タイミングを導出するというものである。この装置は内部方式と呼ばれる形式で、加速器の真空容器中に制動放射用の標的を配置し、また加速器の偏向電磁石を電子の運動量分析に使用している。震災によって損傷した電子検出器の復旧に、近年注目を浴びている半導体光センサー (MPPC: Multi-Pixel Photon Counter) を用いたシンチレーション検出器を使用した。MPPC は光電子増倍管に匹敵する感度・増幅率、磁場中での動作、低廉な価格といった特長を備えた新しいデバイスで、光子標識化装置の小型のシンチレーション検出器の製作に適している。MPPC の特長を生かし、短所である高い暗電流と高計数率における性能改善を図るための増幅回路を開発した。また、この増幅回路と MPPC を一枚の回路基板上に配置したシンチレーションカウンターユニットを製作し、光子標識化装置に使用する際の荷電粒子通過頻度（最大 200 kHz）までの性能を測定した。光子標識化装置の設計には、コンピューターシミュレーションによる電子の軌道計算を利用した。このシミュレーションでは磁場中での電子の運動、物質と電子の相互作用を再現した。加速器の真空容器に用意してある低エネルギー電子の取り出し窓の形状を生かし、標識化光子エネルギーを最大にし、また合理的な個数の検出器で必要な光子エネルギー範囲を覆うことのできるよう検出器の位置と角度の調整を行った。

4. 研究成果

(1) 解析における時間校正、エネルギー校正、シミュレーションのパラメーターの調整を行い、重陽子を標的とした二重デルタ光生成反応断面積のエネルギー依存性の測定の前備的な結果を光子エネルギー 0.78 GeV から 1.08 GeV の範囲で取得した実験データより導出した (図 1)。

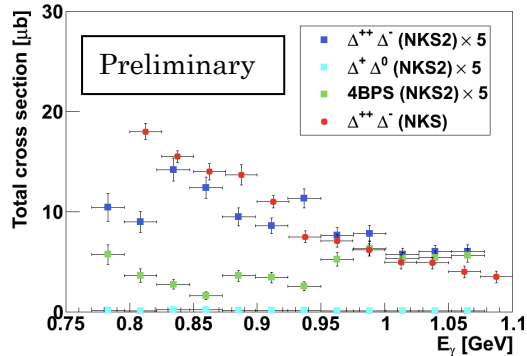


図 1 アイソスピンチャンネル毎の二重デルタ生成反応断面積のエネルギー依存性。

これによると、反応断面積の絶対値は小さいものの、その光子エネルギー依存性は NKS による測定結果と類似しているということが分かった。アイソスピンチャンネルによる断面積の違いは、幾何学的なアイソスピン選択則を反映しており、NKS の結果とも合致する結果であった。絶対値の違いを検証するため、各種の校正や選択条件による反応の選択効率を見直している。Δ⁺⁺Δ⁻生成反応については、Δ⁺⁺Δ⁻重心系でのΔ⁺⁺放出角分布の導出を試みた (図 2)。このデータは、これまで公表されることのなかった新しいデータである。この角分布にはΔ⁺⁺散乱波の角運動量が反映するので、反応において支配的な軌道角運動量、また軌道角運動量の散乱波の干渉についての情報が得られる。この結果によると、分布が 90 度対称であることから軌道角運動量が 1 である P 波と軌道角運動量が 0 である S 波の干渉がほとんど無いこと、また、π⁺p 系の不変質量がデルタ粒子の質量(1.232 GeV/c²)にある場合は、P 波が支配的で二次関数的な角分布を持つが、デルタ領域より大きな不変質量を持つ場合には、S 波が支配的な様子が窺える。これらの成果は雑誌論文①②⑤および学会発表①③⑦⑧⑨⑬⑭⑱にて公表した。光子エネルギー0.65 GeV から 0.9 GeV において収集したデータの解析については現在、各種の校正を進めている。NKS では測定しなかった低エネルギー領域における反応断面積の様子が得られるため、広いエネルギー範囲において、TAGX データおよび理論計算値と断面積の比較が可能となる。

二重デルタ生成反応の理論的な解釈に関しては、重陽子における中間子生成理論の権威である、ロシア・トムスク工科大学の A. Fix 教授と議論を重ねており、今後の共同研究に

よって、二重デルタ光生成反応機構についての重要な知見が得られると期待される。

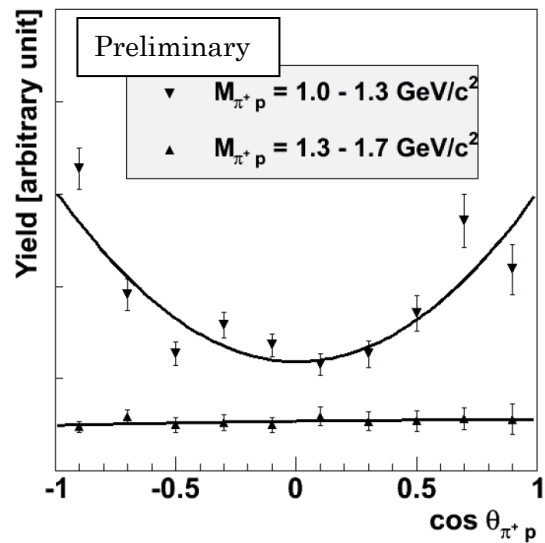


図 2 Δ⁺⁺Δ⁻ 重心系での π⁺p 系の角度分布。不変質量で 2 通りに分けて表示している。

(2) MPPC を用いたシンチレーション検出器の読み出し用増幅回路として、コンデンサーを増幅回路の入力側に直列に接続した交流結合型の回路を新しく設計した。この回路には広い帯域が特長であるアナログデバイス社製演算増幅 IC を使用した。コンピューターの回路シミュレーションによって、この IC は帯域が広いのみならず、発振に対する安定性も優れており設計の自由度が高いことが分かった。MPPC の製造会社の推奨するバイアス電圧供給・信号読み出し回路に変更を加えて、バイアス電圧の計数率依存性を減少させるように回路の素子の選定を行った。素子を実装した回路基板の写真を図 3 に示す。

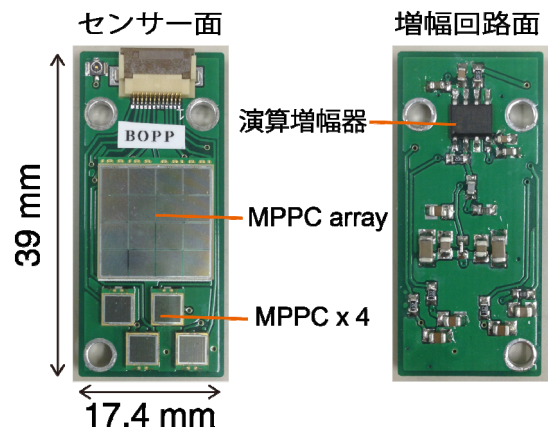


図 3 製作した回路基板の写真。

この回路に実装した MPPC にプラスチックシンチレーターを取付けたものを検出器の 1 単位ということでカウンターユニットと呼ぶ。光子標識化装置においてはカウンター

ユニットを複数配置することによって、製作とメンテナンスを容易とした。カウンターユニットの性能評価は、兵庫県立大学のニュースバル放射光施設の光子ビームおよびドイツ・マインツ大学の電子ビームを用いて行った。その結果、カウンターユニットは、PMTを用いたリファレンス検出器との時間差分布の標準偏差として、170 kHz の計数率において 80 ps の時間分解能を得ることが出来た。また、光子標識化装置で使用する場合に想定される計数率である 20 kHz から 170 kHz の範囲で、ほぼ一定の時間分解能を示すことが分かった (図 4)。

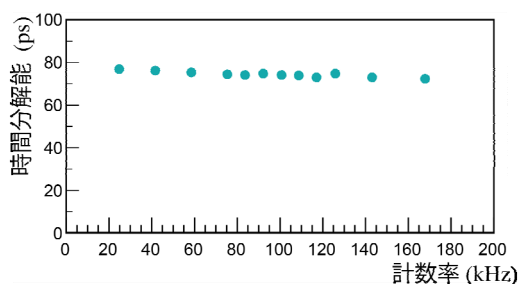


図 4 計数率と時間分解能の関係。

リファレンス検出器単独での時間分解能は、別の測定によって 45 ps であったので、MPPCを用いたカウンターの時間分解能は 60 ps であることが分かった。これらの結果は雑誌論文③⑤、および学会発表⑤⑩⑪⑫⑬⑭⑯として公表した。

このカウンターユニットを用いて電子検出器を構成すべく、光子標識化装置の設計を行った。コンピューターシミュレーションによって、1.319 GeV の電子が炭素標的によって発生する制動放射と光子放出後の電子、磁場中での電子の運動、物質と電子の相互作用を再現し、電子検出器の応答を調査した。

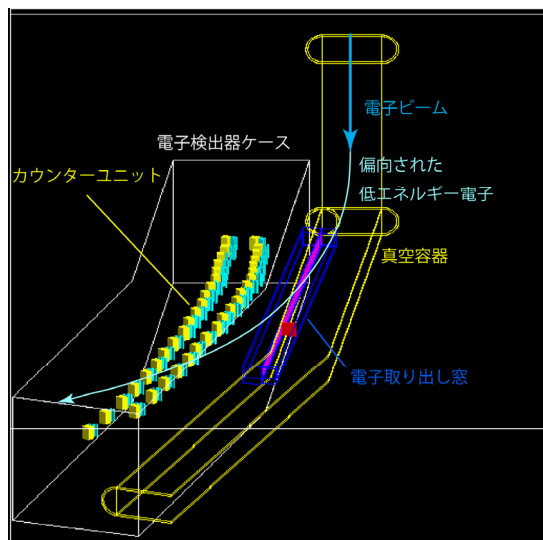


図 5 コンピューターシミュレーションにおける物体の配置。

シミュレーションプログラムで考慮した、電子検出器関連の物体の配置を図 5 に示す。シミュレーションの結果を利用して、電子が通過する各カウンターユニットへの入射角がすべてのカウンターで ± 0.1 rad 以内に収まる様に配置角の決定と、複数のユニット間の位置の干渉を防ぎ、かつ同時に通過する電子の数を抑制するように位置の調整を繰り返して実施し、最終的な配置を決定した。この配置における標識化光子エネルギーは 0.804 GeV から 1.275 GeV であり、今後実施する中間子生成反応実験のために必要とされるエネルギー範囲を覆うことができる (図 6)。

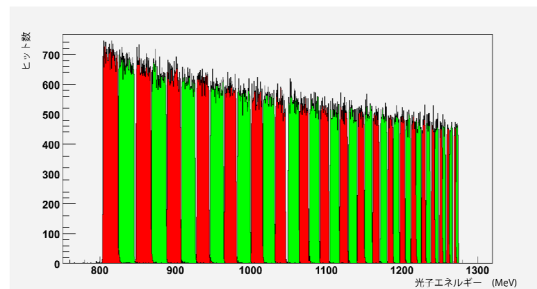


図 6 カウンターユニットで電子を検出した場合の光子エネルギー分布。緑色が奇数番、赤色が偶数番のユニットを表す。

また、カウンター1 個当たりの覆うエネルギー幅は 0.001 GeV から 0.005 GeV で、これも中間子生成反応による反応断面積のエネルギー依存性の測定のためには十分に細分化である。これらの結果は学会発表④⑥にて公表した。新しい光子標識化装置の設計はこの検出器配置を元にして行うこととし、テスト機の製作と電子ビームを用いた性能評価を電子光理学研究センターにて実施した。その結果、カウンターユニットの磁場中での動作と 110 ps という時間分解能が得られた。これはマインツ大学における測定で得られた時間分解能より悪化している。しかしながら、この原因は、解析における詳細な条件設定が未完であったこと、実験環境でのノイズの影響、さらに、検出器から測定装置までのケーブルの長さが増大したことによるパルス信号の高周波成分の減衰によるものと考えている。この結果については、学会発表②にて公表した。現在、原因を追及すべく、詳細なデータ解析と新しいテスト実験の計画を進めている。

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 5 件)

① Fumiya Yamamoto, Brian Beckford, Takeji Fujibayashi, Takao Fujii, Yu Fujii, Kenta Futatsukawa, Toshiyuki Gogami, Yun-Cheng Han, Osamu Hashimoto, Kentaro Hirose, Kenji Hosomi, Ryotaro Honda, Alan Iguchi, Takatsugu Ishikawa, Hiroki Kanda, Masashi

Kaneta, Yusuke Kaneko, Taito Kawasaki, Chigusa Kimura, et al., “Study of Double Delta Photoproduction on the Deuteron in the Energy Region of $E_\gamma = 0.65 - 1.1$ GeV”, JPS Conference Proceedings, 査読有, 1巻, 2014, 13072

DOI: 10.7566/JSPSC.1.013072

② Hiroki Kanda, Brian Beckford, Takeji Fujibayashi, Takao Fujii, Yu Fujii, Kenta Futatsukawa, Toshiyuki Gogami, Yun-Cheng Han, Osamu Hashimoto, Kentaro Hirose, Kenji Hosomi, Ryotaro Honda, Alan Iguchi, Takatsugu Ishikawa, Masashi Kaneta, Yusuke Kaneko, Yuma Kasai, Taito Kawasaki, Chigusa Kimura, Shogo Kiyokawa et al.,

“Measurement of Charged Pion Photoproduction at ELPH”, JPS Conference Proceedings, 査読有, 1巻, 2014, 13075

DOI: 10.7566/JSPSC.1.013075

③ T. Nishizawa, Y. Fujii, H. Kanda, M. Kaneta, Y. Kasai, J. Kusaka, K. Maeda, S. Nagao, S. N. Nakamura, K. Tsukada, and F. Yamamoto, “Development of a fast timing counter with a monolithic MPPC array”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 査読有り, 印刷中, 2014

DOI: 10.1109/TNS.2014.2321657

④ C. Kimura, B. Beckford, T. Fujibayashi, T. Fujii, Y. Fujii, K. Futatsukawa, T. Gogami, O. Hashimoto, Y. C. Han, K. Hirose, R. Honda, K. Hosomi, A. Iguchi, T. Ishikawa, H. Kanda, M. Kaneta et al., “Study of $\gamma d \rightarrow \pi^+ \pi^- d$ Reaction in an Energy Region of $0.67 \leq E_\gamma \leq 1.08$ GeV”, Few-Body Systems, 査読有, 54巻, 2013, pp. 1319 - 1322

DOI: 10.1007/s00601-013-0674-5

⑤ Hiroki KANDA, Yuma KASAI, Kazushige MAEDA, Takashi NISHIZAWA, and Fumiya YAMAMOTO, “Development of a scintillation counter with MPPC readout for the internal tagging system”, Proceedings of Science (PhotoDet2012), 査読有, 2013, 18

[学会発表] (計18件)

① 山本 郁也, “エネルギー領域 $E_\gamma = 0.65 - 1.1$ GeV における重陽子標的を用いた $\Delta\Delta$ 光生成反応の研究”, 日本物理学会第六九回年次大会, 2014年3月30日, 東海大学

② 佐々木 貴之, “NKS2 実験に用いる新光子標識化装置のビームテスト”, 日本物理学会第六九回年次大会, 2014年3月27日, 東海大学

③ 山本 郁也, “エネルギー領域 $E_\gamma = 0.65 - 1.1$ GeV における重陽子標的を用いた $\Delta\Delta$ 光生成反応の研究”, ELPH 研究会 C008 「GeV 領域光子で探るメソン生成反応の物理」, 2014年2月21日, 東北大学

④ 佐々木 貴之, “NKS2 実験に用いる新光子標識化装置”, ELPH 研究会 C008 「GeV 領域光子で探るメソン生成反応の物理」, 2014年2月20日, 東北大学

⑤ Hiroki Kanda, “MPPC Based Scintillation Counters for the Internal Photon Tagger”, 2013 IEEE Nuclear Science Symposium, 2013年10月31日, 韓国ソウル市

⑥ 神田 浩樹, “NKS2 実験に用いる新光子標識化装置の電子検出器の設計”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013年9月20日, 高知大学

⑦ Hiroki Kanda, “Measurement of Charged Pion Photoproduction at ELPH”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 2013年7月18日, 幕張メッセ

⑧ Fumiya Yamamoto, “Study of Double Delta Photoproduction on the Deuteron in the Energy Resion of $E_\gamma = 0.65 - 1.1$ GeV”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 2013年7月18日, 幕張メッセ

⑨ 神田 浩樹, “重陽子標的における $\pi^+ \pi^-$ 光生成反応の研究”, 日本物理学会 第68回年次大会, 2013年3月27日, 広島大学

⑩ 葛西 裕磨, “NKS2 実験に用いる新光子標識化装置の開発”, 日本物理学会 第68回年次大会, 2013年3月26日, 広島大学

⑪ 西澤 敬之, “MPPC を用いたシンチレーション検出器読み出し回路の開発”, 日本物理学会 第68回年次大会, 2013年3月26日, 広島大学

⑫ 神田 浩樹, “光子標識化装置のための MPPC 読み出し型シンチレーション検出器の開発”, 第4回次世代光センサーワークショップ兼 EASIROC 研究会, 2012年12月26日, 大阪大学

⑬ 山本 郁也, “重陽子標的を用いたダブルデルタ光生成反応の研究”, ELPH 研究会 C005 「ダブルメソン生成とバリオン分光 ~LEPS/ELPH におけるハドロン光生成反応の最近の進展~」, 2012年11月30日, 東北大学

⑭ 木村 千草, “光子エネルギー領域 $0.6 - 1.0$ GeV における $\gamma d \rightarrow \pi^+ \pi^- d$ 反応の研究”, ELPH 研究会 C005 「ダブルメソン生成とバリオン分光 ~LEPS/ELPH におけるハドロン光生成反応の最近の進展~」, 2012年11月29日, 東北大学

⑮ 西澤 敬之, “MPPC を用いた高時間分解能小型シンチレーション検出器の開発”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012年9月11日, 京都産業大学

⑯ H. Kanda, “Development of a scintillation counter with MPPC readout for the internal tagging system”, International Workshop on New Photon-Detectors (PhotoDet2012), 2012年6月15日, フランス・オルセー市

⑰ 葛西 裕磨, “光子標識化装置のため

の MPPC を用いた電子線検出器の性能評価” ,
日本物理学会, 2012/3/25, 関西学院大学

⑱ 神田 浩樹, “NKS2 を用いた重水素標
的における二重パイオン光生成反応の研究” , 日本物理学会, 2011/9/16, 弘前大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 浩樹 (KANDA, Hiroki)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 4 0 3 2 1 9 7 1