

| | |
|---------|--|
| 氏名・(本籍) | ひろ せ けん たろう 廣 瀬 健太郎 |
| 学位の種類 | 博士(理学) |
| 学位記番号 | 理博第2285号 |
| 学位授与年月日 | 平成18年4月26日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 研究科, 専攻 | 東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻 |
| 学位論文題目 | 重水素からの2パイ中間子光生成の研究 |
| 論文審査委員 | (主査) 教授 宮 瀬 晴 久 教授 橋 本 治, 清 水 肇, 滝 川 昇 助教授 前 田 和 茂 |

論文目次

| | | | | | |
|-------|------------------|----|-------|---|----|
| 1 | はじめに | 1 | 3.3 | 粒子識別 | 34 |
| 1.1 | 光吸収反応 | 1 | 3.4 | バーテックス | 36 |
| 1.1.1 | 核子による光吸収反応 | 1 | 3.5 | ミッシングマス分布 | 39 |
| 1.1.2 | 原子核による光吸収反応 | 2 | 3.5.1 | $\gamma d \rightarrow p\pi^+\pi^-X$ 反応 | 39 |
| 1.2 | π 中間子光生成反応 | 3 | 3.5.2 | $\gamma d \rightarrow p\pi^-X$ 反応 | 41 |
| 1.2.1 | 準自由過程 | 3 | 3.6 | インバリアントマス分布 | 43 |
| 1.2.2 | 非準自由過程 | 5 | 3.6.1 | $\gamma p \rightarrow p\pi^+\pi^-X$ 反応 | 43 |
| 1.3 | 研究の目的 | 7 | 3.6.2 | $\gamma d \rightarrow pn\pi^+\pi^-X$ 反応 | 44 |
| 2 | 実験装置 | 8 | 3.7 | シミュレーション | 50 |
| 2.1 | 光子ビーム | 9 | 3.7.1 | $\gamma p \rightarrow p\pi^+\pi^-$ 反応 | 52 |
| 2.1.1 | 1.2 GeV 電子ビーム | 9 | 3.7.2 | $\gamma d \rightarrow n_p p\pi^+\pi^-$ 反応 (陽子による準自由過程) | 58 |
| 2.1.2 | 光子標識化装置 | 9 | 3.7.3 | $\gamma d \rightarrow pn\pi^+\pi^-$ 反応 (非準自由過程) | 64 |
| 2.2 | 液体水素・重水素標的 | 11 | 3.7.4 | $\gamma d \rightarrow p_p p\pi^-$ 反応 | 69 |
| 2.3 | 中性K 中間子スペクトロメーター | 13 | 3.8 | 効率等 | 72 |
| 2.3.1 | 電磁石 | 13 | 3.8.1 | 入射 γ 線数 | 72 |
| 2.3.2 | ドリフトチェンバー | 15 | 3.8.2 | Tagger 解析効率 | 72 |
| 2.3.3 | ホドスコープ | 16 | 3.8.3 | 標識化効率 | 72 |
| 2.4 | 中性子検出器 | 18 | 3.8.4 | データ収集効率 | 72 |
| 2.5 | データ収集 | 20 | 3.8.5 | トラック候補選択による効率 | 73 |
| 3 | データ解析 | 22 | 3.8.6 | トラッキング効率 | 74 |
| 3.1 | 較正 | 22 | 3.8.7 | バックグラウンド | 76 |
| 3.1.1 | タギングカウンター | 22 | 4 | 結果 | 79 |
| 3.1.2 | ホドスコープ | 24 | 4.1 | 実験結果 | 80 |
| 3.1.3 | 中性子検出器 | 28 | 4.1.1 | $\gamma d \rightarrow p_p p^-$ 反応 | 80 |
| 3.1.4 | ドリフトチェンバー | 29 | | | |
| 3.2 | トラッキング | 31 | | | |

| | | | | | |
|-------|---|----|-----|--------------------|-----|
| 4.1.2 | $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応 | 81 | 4.2 | 議論 | 96 |
| 4.1.3 | $\gamma d \rightarrow n_p p \pi^+ \pi^-$ 反応 (陽子による準自由過程) | 88 | 5 | まとめ | 101 |
| 4.1.4 | $\gamma d \rightarrow p n \pi^+ \pi^-$ 反応 (非準自由過程) | 92 | A | N体の phase space 崩壊 | 103 |
| | | | B | 重陽子内の核子運動量分布 | 107 |
| | | | C | データ分布 | 108 |

論 文 内 容 要 旨

光子エネルギー $E_\gamma < 0.8$ GeVの領域では、陽子からの 1π , 2π 生成反応の実験値は理論模型により説明されてきた。しかし、原子核標的の光吸収反応では、第二、第三共鳴領域において核子共鳴が観測されていない。この現象は今のところ十分には理解されていないため、原子核標的においても陽子の場合と同様に排他的測定が望まれている。原子核による光吸収機構を理解するためには、重陽子による反応機構を解明しなくてはならない。これまで、重陽子を用いた測定では $E_\gamma \sim 0.8$ GeVまでの領域で重陽子内陽子からの $\pi^+ \pi^-$ 生成の測定が行なわれており、準自由過程のほか、 $\Delta^{++} \Delta^-$ 生成反応などについての知見が得られている。

本研究の目的は、現在まで精密な測定データが得られていない $E_\gamma = 0.8 - 1.1$ GeVにおける重水素からの 2π 生成反応により以下の研究を行なうことである。

- ・束縛陽子からの $\pi^+ \pi^-$ 生成断面積。
- ・非準自由過程の寄与。
- ・中性子標的としての重陽子の妥当性。
- ・ $\Delta^{++} \Delta^-$ 生成による二核子過程。
- ・ $\gamma d \rightarrow \Delta^{++} \Delta^-$ 反応を用いた $N^* - N$ 相互作用。

実験は東北大学大学院附属原子核理学研究施設で行なった。線形加速器とストレッチャーブースターリングにより1.2 GeVに加速した電子の制動放射により光子を生成した。制動放射後の電子の運動量を分析し、制動放射光子のエネルギーを同定した。光子のエネルギー領域は0.8–1.1 GeVである。標的には液体水素と液体重水素を用いた。標的の厚さは液体水素で254 mg/cm², 液体重水素で574 mg/cm²である。反応によって生じた荷電粒子は中性K中間子スペクトロメータ(NKS)で検出した。NKSは双極電磁石、ドリフトチェンバー及び、ホドスコープからなる。磁極間に設置したドリフトチェンバーにより磁場内の荷電粒子の飛跡検出を行ない、運動量を再構成した。ドリフトチェンバーの内側と外側に設置したホドスコープの時間差から飛行時間を測定した。

粒子識別は測定した運動量と β から求めた質量分布を用いて行なった。 p , π^+ 及び、 π^- の3粒子の飛跡の交点が標的領域に再構成できる事象を選択した。終状態の同定は欠損質量分布を用いて行なった。この測定では中性子の検出は行なっていないため、欠損運動量が中性子の運動量である。中性子が反応に関与したか否かは運動量の大きさで判断した。 $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応と $\gamma "p" \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応("p"は重陽子内の束縛陽子を表す)における $N\pi$ 不変質量はほぼ同じ分布になっている。不変質量には Δ^{++} 粒子による分布がはっきりと見え、 Δ^0 粒子も確認することができた。 $\gamma d \rightarrow p n \pi^+ \pi^-$ 反応の非準自由過程では $N\pi$ 不変質量から、 Δ^{++} と Δ^- が終状態で同時に生成されていることを確認することができた。

スペクトロメータのアクセプタンスや解析効率はGEANT4を用いて見積もった。このシミュレーション

では可能な反応チャンネルのうち大きな寄与が期待されるサブチャンネル，すなわち $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ ， $\gamma "p" \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応に対しては $\Delta^{++} \pi^-$ ， $\Delta^0 \pi^+$ 生成及び，3体位相空間崩壊を考慮した。 $\gamma d \rightarrow pn \pi^+ \pi^-$ 反応では $\Delta^{++} \Delta^-$ 生成と4体位相空間崩壊の2つのサブチャンネルを考慮した。シミュレーションで得た不変質量分布を実験データに合うように χ^2 フィッティングを行なった。例えば， $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応では3つのサブチャンネルのそれぞれが実験データに占める割合をパラメータとしてフィッティングを行なった。このフィッティングによって各サブチャンネル比を求めた。

本測定では $\gamma "n" \rightarrow p \pi^-$ 反応の測定も行なうことができる。この反応は二体反応であり運動学が明快なため，本測定で用いたスペクトロメータで測定できる最も単純な反応である。過去に測定された π^- の角度分布を用いてアクセプタンスの補正を行なった。求めた断面積が既存の測定値を再現することを確かめた。

各反応の部分断面積 σ_i (サブチャンネルの断面積) は

$$\sigma_i = Y \cdot r_i / (N_T N_p \eta_i \epsilon)$$

で求められる。 $Y \cdot r_i$ はサブチャンネル i の収量であり， r_i は不変質量のフィッティングから求めたものである。 N_T ， N_p はそれぞれ，標的核数 (cm^{-2})，入射光子数である。 η_i はサブチャンネル i に対する解析効率であり，シミュレーションによって求めたものである。 ϵ はデータ取得の不感時間など，その他の補正項である。全断面積はサブチャンネルの和 ($\sigma_{\text{tot}} = \sum \sigma_i$) として求めた。

$\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応の断面積は $E_\gamma > 0.9 \text{ GeV}$ では既存の測定値を再現した。また， $\gamma p \rightarrow \Delta^{++} \pi^-$ 反応の断面積も同様に $E_\gamma > 0.9 \text{ GeV}$ では既存の測定値を再現する結果が得られた。本研究による $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応の断面積の測定値は既存の測定のうち，泡箱を用いた測定値とつながることがわかった。束縛陽子からの $\pi^+ \pi^-$ 生成断面積は自由陽子の場合に比べると50~60%であった。これは準自由 $\pi^+ \pi^-$ 生成の後，放出粒子がスペクテーター中性子と終状態相互作用を起こすためである。

中性子による準自由過程の断面積が陽子と同じであると仮定すると，非準自由過程の寄与は $\sigma_{\text{Nof}} / 2 \sigma_{\text{of}} = 0.28$ であった，これは重陽子標的の場合でも多体効果が無視できないことを示している。 $\gamma d \rightarrow \Delta^{++} \Delta^-$ 生成の断面積は E_γ の増加とともに減少することがわかった。断面積の大きさは既存の測定値や，理論計算値とは一致しない。理論計算では，このエネルギー領域の断面積の振舞いは増加傾向であると予想している。この理論模型は $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応に対する模型を拡張したものである。 $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応の計算においては $E_\gamma > 0.8 \text{ GeV}$ の領域でデータを再現できていないため， $\Delta^{++} \Delta^-$ 生成の場合でも $E_\gamma > 0.8 \text{ GeV}$ の領域に適用できない可能性がある。このエネルギー領域に適合した理論模型との比較が必要である。

本研究の結果をまとめると以下のようなになる。

- ・ $\gamma "p" \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ 反応

断面積の大きさは自由陽子にくらべ50~60%であった。

これは終状態相互作用の影響であり，放出 π^+ の運動量が πN 散乱断面積が最大となる領域に分布しているため終状態相互作用の影響が強調されていると考えられる。

- ・ 非準自由過程の寄与は $\sigma_{\text{Nof}} / \sigma_{\text{of}} = 0.28$ であり，重陽子標的の場合でも多体効果が無視できないことを示している。

- ・ $\gamma d \rightarrow \Delta^{++} \Delta^-$ 反応

原子核標的特有の反応であり， $\pi^+ \pi^-$ 生成断面積に対し10%ほどの割合を占めている。このエネルギー領域に適合した理論模型が必要である。

論文審査の結果の要旨

光子エネルギー $E_\gamma < 0.8$ GeV の領域における陽子からの 1π , 2π 生成反応の実験値は理論模型との比較により理解されている。しかし、原子核標的の光吸収反応では、第2, 第3共鳴領域における核子共鳴の振舞がまだまだ十分に解明されていないため、原子核標的においても陽子の場合と同様に詳細な測定が望まれている。これまで、最も軽い原子核である重水素を用いた実験では $E_\gamma \sim 0.8$ GeV までの領域で陽子からの $\pi^+\pi^-$ 生成の測定が行われており、準自由過程のほか、 $\Delta^{++}\Delta^-$ 生成反応についての知見も得られている。

廣瀬健太郎提出の論文は、現在まで精密な測定が行われていない $E_\gamma = 0.8-1.1$ GeV 領域における重水素からの 2π 光生成反応を調べることにより、 $\pi^+\pi^-$ 生成断面積および非準自由過程の寄与の導出し、 $\Delta^{++}\Delta^-$ 生成による2核子過程および $\gamma d \rightarrow \Delta^{++}\Delta^-$ 反応を用いた N^*-N 相互作用の研究を行い、それらの結果をまとめたものである。

実験は東北大学大学院理学研究科付属原子核理学研究施設で行われた。標的は液体水素と液体重水素が用いられた。これら標的に、電子線形加速器とストレッチャーブースターリング (STBリング) によって加速された1.2 GeV の電子の制動輻射により生成した光子 (利用したエネルギー領域は0.8-1.1 GeV) を照射した。これらの反応によって放出された荷電粒子は、双極電磁石, ドリフトチェンバー, ホドスコープ等からなる, 中性K中間子スペクトロメータ (NKS) により測定された。

これらの実験結果より、 $\pi^+\pi^-$ 生成断面積の大きさは、自由陽子の場合に比べ FSI の影響により50~60% 抑えられるとの結論を得た。非準自由過程の寄与は、準自由過程の寄与に比べ、断面積比で0.28であると結論し、重水素の様に単純な核の場合でも多体効果が無視できないことを示した。更に、 $\gamma d \rightarrow \Delta^{++}\Delta^-$ 反応断面積を導出した。そして、この反応断面積が $\pi^+\pi^-$ 生成断面積に対し10% ほどの割合を占めていることを結論づけた。このことは、原子核での $\Delta\Delta$ 生成の新しい知見を与えるものである。

従って、本論文は博士論文として適当であり、本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、廣瀬健太郎提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。