

氏名・(本籍)	さ　　とう　　たか　　ひろ 佐　藤　任　弘
学位の種類	理　学　博　士
学位記番号	理博第238号
学位授与年月日	昭和46年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻修了
学位論文題目	8 GeV/c における $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$ 反応の研究
論文審査委員	(主査) 教授 北 垣 敏 男 教授 武 田 暁 助教授 高 橋 嘉 右

## 論 文 目 次

- I 序 論
- II 測定及びデータプロセス
- III Overall feature
- IV  $\pi^- p \rightarrow \rho^0 n$
- V  $\pi^- p \rightarrow f^0 n$
- VI High Mass Resonances
- VII 結 論

# 論文内容要旨

## I 序 論

最近、高エネルギーの理論で急速に発展してきたものの一つに、Veneziano modelがある。Shapiro は、 $\pi-\pi$  散乱にこのmodelを適用して、 $\rho$  及びその daughter trajectories の pole の elastic width を計算している。一方  $\pi N$  の missing mass spectrometer の実験によれば、 $m_{\pi\pi} \gtrsim 2 \text{ GeV}$  の boson resonance がいくつか発見されている。

$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$  反応は、 $\pi-\pi$  散乱の cross section を実験的に調べるための重要な channel である。しかしこの反応が simple な one pion exchange model では、説明できないことはよく知られている。そこで absorption の効果を考慮に入れた、one pion exchange model が提唱され、特に  $\pi^- p \rightarrow \rho^0 n$  の production の角分布、 $\rho^0$  の spin density matrix 等をかなりよく説明できる。従って、Chew - Low extrapolation によって、 $\pi-\pi$  散乱の cross section を求めるにあたっては、absorption の correction を入れるべきであろうと考えられる。

我々の実験の目的は、第一に high mass の  $\pi-\pi$  resonance を調べることであり、第二に、 $8 \text{ GeV}/c$  における  $\pi-p$  interaction での  $\rho^0$ 、 $f^0$  の production の mechanism を調べることであり、第三に、absorption effect を考慮に入れた extrapolation によって、 $\pi-\pi$  散乱の cross section を求めることである。

以上の目的のためには、 $\pi-\pi$  mass 及び four momentum transfer squared 等の測定精度を上げると共に、統計精度を上げることが是非必要である。

この論文の解析では、我々のデータに、Pennsylvania 大学、Notre Dame 大学で測定されたデータを合わせて、analysis を行っている。

## II 測定及びデータプロセス

これまでに、約 23,000 frames のフィルムから、約 12,500 events の 2-prong events が測定された。 $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$  反応の cross section を求めるためには、このうちの約 19,000 frames 分の sample が使われ、その値として、 $(1.12 \pm 0.15) \text{ mb}$  が得られた。この値は Pennsylvania 大学、Notre Dame 大学で得られた Cross section の値（夫々、 $[1.08 \pm 0.08] \text{ mb}$ 、 $[0.89 \pm 0.05] \text{ mb}$ ）とよく一致している。さらに、 $(\pi^+ \pi^-)$ 、 $(\pi^+ n)$ 、 $(\pi^- n)$  夫々の invariant mass distribution も、Pennsylvania 大学、Notre Dame 大学、及び我々の group のデータの間大きな食い違いのないことが認められたので、以後の解析は、三者のデータを combine して行うこととした。

## III Overall feature

Dalitz Plot 及び  $(\pi^+ n)$ 、 $(\pi^- n)$  の invariant mass distribution の研究から、 $(\pi^+ \pi^-)$  mass distribution に影響を与えるような nucleon isobar の production は認められないことがわかった。又、全体としては、 $\pi^-$  が peripheral に produce されている傾向にあり、この傾向は、resonance

production が少くなる領域、すなわち、 $\pi-\pi$  mass  
の大きな領域で特に顕著となっている。 $(\pi^+\pi^-)$

invariant mass distribution には、 $\sim 780\text{MeV}(\rho)$ 、  
 $\sim 1260\text{MeV}(f)$ 、 $\sim 1660\text{MeV}(g)$ 、 $\sim 2100\text{MeV}(g')$  に  
それぞれ顕著な peak が見られる。(Fig. 1)

我々は、 $(\pi^+\pi^-)$  mass distribution に対する、  
(phase space + Breit Wigner 公式) の fit から、そ  
れぞれの peak の値、及び cross section を求めた。

(Table 1)

この fit から  $g'$  の統計的 significance は、 $\sim 5.8$   
 $\times$  standard deviation であることがわかった。

#### IV $\pi^-p \rightarrow \rho^0 n$

i) One pion exchange model と absorption  
effect

この channel の  $t$ -distribution は、simple one  
pion exchange より予想されるような超前方での dip は  
認められない。ちなみに、我々の測定精度は、 $\rho$ -mass  
region の  $|t| \approx 0.01$  の region で、 $\Delta t \approx 0.003$  であ  
る [(GeV/c)<sup>2</sup> unit]。さらに、one pion exchange  
の prediction は  $|t|$  の大きな region でも実験データ  
と合わない。

Fig. 1  $(\pi^+\pi^-)$  Invariant Mass

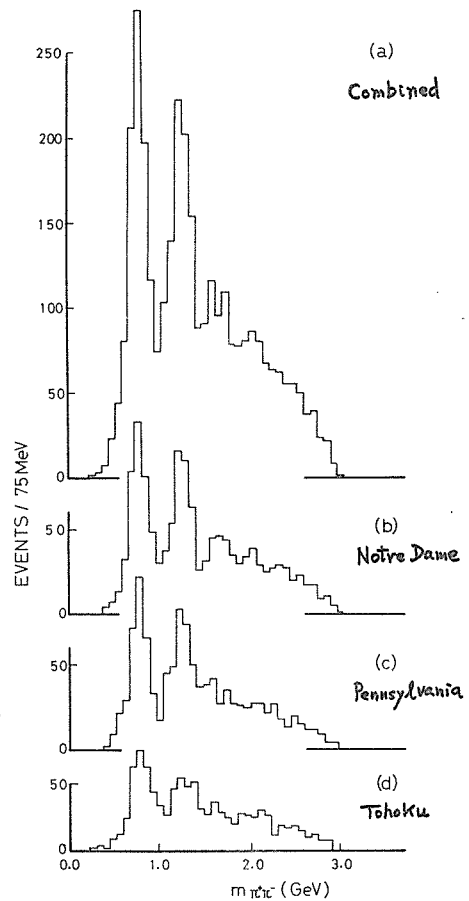


Table 1 : Parameters for the reaction  $\pi^-p \rightarrow \pi^-\pi^+n$  at 8 GeV/c

	Events	(mb)	$M_0$ (GeV)	$\Gamma$ (GeV)
Notre Dame	1,321	$0.89 \pm 0.05$		
Pennsylvania	1,127	$1.08 \pm 0.08$		
Tohoku	781	$1.12 \pm 0.15$		
Weighted Average	3,229	$0.99 \pm 0.07$		
(Fitted Parameters)				
$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	795	$0.244 \pm 0.019$	0.79	0.18
$f^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	600	$0.184 \pm 0.017$	1.27	0.19
$g^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	216	$0.066 \pm 0.011$	1.68	0.30
$g'^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	112	$0.034 \pm 0.010$	2.08	0.16

これに対して、Williamsによる、absorption effectを考慮した計算は比較的よくデータを説明している。 $\rho^0$ -regionには巾の広いS-waveのresonanceが存在することが知られている。我々は $\rho^0$ のspin density matrixをP waveとS waveの両方のcontributionを入れて計算した。Williamsのabsorption modelによる計算は、density matrixをもかなりよく説明できる。

### ii) Chew-Low extrapolation

このabsorptionのmodelを基礎としたextrapolationを行った結果 $\rho^0$ -regionでの $\pi^+\pi^-$ 散乱のcross sectionとして、 $[\sim 150]$  mbを得た。 $\rho^0$ -regionでのunitarity limitは $\sim 110$  mbである。

### iii) Vector Dominance Model

最近、Vector Dominance Modelに関する実験で、このmodelに対する否定的な結果と肯定的な結果が、それぞれいくつか報告されている。これに対して、ChoとSakuraiは、Vector Dominance Modelに対する新しいtestを提案している。

ここでは彼らのpredictionを我々の、 $s^2 d\sigma/dt$ 、 $2\rho_{11}s^2 d\sigma/dt$ のデータと比較した。彼らのpredictionは、誤差の範囲内で我々のデータと一致している。このmodelがadjustableなparameterを全く含んでいないことを考えると、この一致は非常によいといえる。

## V $\pi^- p \rightarrow f^0 n$

このchannelのt-distribution、 $f^0$ のspin density matrix等は、one pion exchange modelのpredictionでは実験データをよく説明できない。又、absorptionの効果を入れたone pion exchange modelのpredictionは $d\sigma/dt$ のt-dependenceは比較的データと一致しているが、絶対値の点では、実験データより大きすぎる値を与えている。これに対して、Takedaとその協力者によって計算されたprediction (Gauge invariance model)はt-distribution及び、 $f^0$ のspin density matrix elementsのいくつかとかなりよく一致している。

$f^0$ のdecayの角分布の $\varphi$  (helicity frame)にはかなりのasymmetryが見られる。さらにD-waveのcontributionのみを考慮して得られたdensity matrix element  $\rho_{22}$ が負の値をとるということは、 $f^0$ -regionにP wave又はD waveの $\pi\pi$  interactionが存在していることを示唆していると考えられる。

## VI High Mass Resonances

( $\pi^+\pi^-$ ) invariant mass distributionには、 $\sim 1660$  MeV及び $2100$  MeVに顕著なbumpが見られることは先に述べた。これらのbumpは、夫々、phase spaceより9.5及び5.8 standard deviationのbumpとして認められる。

$\sim 1660$  MeVのbumpは、すでに $\pi\pi$  systemのresonanceとして認められている(通称g meson,  $I^G = 1^+$ ,  $J^P = 3^-$ )ので、ここでは詳しく述べない。

1969年、Nicholson et al (Cal Teck)によって、 $\bar{p}p \rightarrow \pi^+\pi^-$ のannihilation角分布の解析が

ら、 $\sim 2120\text{MeV}$ に、 $J^P = 3^-, I = 1$ と考えられる resonance の存在を報告しており、又、Anderson et al (B.N.L.)は、 $\pi^-p \rightarrow pX^-$  という missing mass spectrometer の実験で、 $\sim 2100\text{MeV}$ に bump を見出している。我々の $\sim 2100\text{MeV}$ の bump は、おそらくこの resonance に対応するものと考えられる。そこで、これが $(\pi^+\pi^-)$ の resonance であることを確かめるために、我々はこの mass region に対して、次のような check を行った。

i) Production の角分布

Production の角分布を  $d\sigma/dt \sim e^{At}$  と表わしたときの A を  $m_{\pi\pi}$  の関数として見てみると、多少の変化は見られるが、あまり顕著ではない。

ii)  $\pi^-$  の decay の Forward -Backward Ratio ( $R \equiv \frac{F-B}{F+B}$ )

$\pi^-p \rightarrow \pi^-\pi^+n$  反応での、 $\pi^-$  の production は、 $(\pi^+\pi^-)$  resonance を経由しない場合は、peripheral に行われていることは先にも述べた。これに対して pure な resonance からの decay  $\pi^-$  は前後方 symmetric に放出される。つまり  $R=0$  となる。 $\sim 2100\text{MeV}$ の bump の付近では、background が大きいことと、いくつかの resonance が共存している可能性もあるため、 $R=0$  となることは期待できない。しかし、我々のデータでは、 $\rho, \omega, g^-$  region と同様に、 $m_{\pi\pi} \approx 2100\text{MeV}$ 付近にも R の変化が見られ、これが resonance である可能性を支持している。

iii) Legendre Moments

$(\pi^+\pi^-)$  system の decay の角分布を、Legendre の Polynomial で展開して、その係数 ( $A_n$ ) を  $m_{\pi\pi}$  の関数として plot すると、 $m_{\pi\pi} \sim 2100\text{MeV}$ の bump は  $A_6$  ないし  $A_8$  まで残っているのが見られる。

iv) Isospin 状態

$\pi^-p \rightarrow \pi^-\pi^0p$  反応での  $(\pi^-\pi^0)$  mass にも  $\sim 2100\text{MeV}$ に約 60 events の bump が見られる。このことは  $\sigma(\pi^+\pi^-)/\sigma(\pi^-\pi^0) \sim 2/1$  を与え、 $\sigma(\rho^0)/\sigma(\rho^-)$ ,  $\sigma(g^0)/\sigma(g^-)$  とほぼ等しい値になっている。このことは、 $\sim 2100\text{MeV}$ の bump が  $I = 1$  であることと consistent である。

以上の解析から、 $\sim 2100\text{MeV}$ の bump は、 $I = 1, G = +1, J^P = 3^-$  が favorable であると考えられる。但し、 $I^G = 0^+, J^P = 4^+$  の resonance が共存している可能性も否定できない。

## Ⅶ 結 論

$\pi^-p \rightarrow \rho^0n$  反応は absorption の効果を入れた one pion exchange model でよく説明できる。

absorption の効果を考慮した extrapolation を行った結果、 $\pi^+\pi^-$  散乱の cross section として、 $\sim 150\text{mb}$  という値が得られた。 $(\rho^0^- \text{region})$  で

Vector dominance model の prediction は、 $\rho^0^-$  production の  $d\sigma/dt$  及び  $\rho^0$  の spin density matrix element をかなりよく説明できることがわかった。

$\pi^-p \rightarrow f^0n$  反応は、absorption の効果を入れた one pion exchange model でも、cross section の絶対値の点で、データとよく一致しない。これに対して、Gauge invariance model の prediction は、 $d\sigma/dt$  及び  $f^0$  の spin density matrix elements のいくつかと比較的良好一致を見せている。

$(\pi^+\pi^-)$  mass distribution には,  $\rho^0$ ,  $f^0$ ,  $g^0$  meson の peak と並んで  $\sim 2100\text{MeV}$  に peak が見られる。この peak は, forward-backward ratio ( $R \equiv \frac{F-B}{F+B}$ ), Legendre moments 等の研究から, resonance ( $g^0$ ) に対応することが確められ, その量子数としては,  $I^G = 1^+$ ,  $J^P = 3^-$  が favorable である。しかし,  $I^G = 0^+$ ,  $J^P = 4^+$  の resonance が共存している可能性も否定はできない。

## 論文審査結果の要旨

佐藤任弘提出の論文は、 $8\text{GeV}/c$  の負中間子と陽子との反応により、正中間子を生成する過程を研究したものである。

研究の方法としては、米国のブルックヘーブン研究所の80インチ水素泡箱でとった写真の28k枚を索査し、そのうちより11,900個の2荷電反応を測定して、計算解析の結果670個の正中間子生成反応を得た。

さらに、このデータに米国ペンシルバニア大学及びノートルダム大学でえられた2400反応分のデータを合わせて、物理解析に進んだ。

先づ、この反応はパイ中間子-パイ中間子散乱断面積を調べる適当な反応であるので、吸収を考慮に入れた外挿理論により、断面積を計算し、 $g$ 中間子領域迄の結果を得た。

又、本研究の他の面は、質量の大きなパイ中間子-パイ中間子の共鳴状態の存在を調べることである。この線に沿っては、 $\rho$ 、 $f$ 、 $g$ の各状態を確認した他、さらに質量の大きい $2100\text{MeV}$ の山をみいだすことに成功した。

スピン解析の結果これはスピン3、アイソトピックスピン1の $g'$ 状態であろうとの結論をえた。

このようなパイ中間子-パイ中間子相互作用の研究は素粒子相互作用の中でも最も基本的なものであり、歴史的にも、高エネルギー物理学研究の当初以来追求されている。

重要な問題であるが、現在歴史的な研究の進展の上に立って新にこれを取扱う意義は大変大きい。

本研究は非常に精細に行なわれたものであって、特に、 $f$ 、 $g$ 状態を伸展させたことの価値は高く評価される。

よって佐藤任弘提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。