

氏名・(本籍)	こ ばやし ゆき のり 小 林 幸 則
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1149 号
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の要件	学位規則第 5 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) 原子核理学専攻
学位論文題目	陽子・陽子弾性散乱における偏極分解能のエネルギー依存性 測定と幅の狭いダイバリオン共鳴の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 藤 平 力                      教 授 織 原 彦之丞 教 授 笹 川 辰 弥

## 論 文 目 次

第 1 章	序論
第 2 章	実験装置
第 3 章	実験方法
第 4 章	実験結果
第 5 章	解析結果および議論
第 6 章	結論
	謝辞
	参考文献
	付録 A
	付録 B

# 論文内容要旨

## 第1章 序論

最近、ダイバリオン共鳴の研究において、幅の狭い構造 ( $\Gamma \sim 20 \text{ MeV}$ ) が、少数系の原子核反応による Missing Mass あるいは Invariant Mass スペクトル上に観測され興味を持たれている (表 1)。これらの非常に幅の狭い構造は、核子核子 (NN) 散乱の位相差解析から報告されている  ${}^1\text{D}_2$ ,  ${}^3\text{F}_3$  の幅の広い共鳴 ( $\Gamma: 100 \sim 200 \text{ MeV}$ ) とは区別されている。それは核子や  $\pi$  中間子の自由度によるハドロンレベルの通常の理論で、幅の狭い構造を説明することが困難なため、何か新しい自由度の導入を示唆するからである。Bag 模型等<sup>1)</sup>で予測されている 6 クォーク状態は、必ずしも狭い幅を与えるわけではないが、もし実験的にバリオン数 2 の幅の狭い構造の存在が確立されれば、それは 6 クォーク状態のかなり有力な候補になると期待されている。

NN 散乱における 2 核子系の共鳴探索は、全断面積、微分断面積、Spin Observable などのエネルギー依存性を測定して行なわれる。幅の狭い共鳴探索の場合は、さらに高分解能のエネルギー依存性の測定が要求される。そのような高分解能の実験は、実験的な困難さからこれまで 3 つしか行なわれていないが<sup>2)</sup>、それらの実験データではいずれも統計的に有為な幅の狭い構造は観測されていない。したがって、表 1 に示された幅の狭い構造は、NN 散乱実験では観測されていないというのが現状である。その理由については、いくつかの指摘はあるものの<sup>3)</sup>、まだ高分解能の NN 散乱のデータが十分に得られていないため明らかになっていない。このような背景から、本研究はさらに幅の狭いダイバリオン共鳴に対する情報を得ることを目的として、高分解能の陽子陽子 (pp) 弾性散乱実験を行なった。しかし、すでに 3 つの NN 散乱実験で観測されていないこともあり、もしそれが存在するとしてもかなり小さな構造であると予測されるため、今回の実験は統計精度の良い偏極分解能 (Analyzing Power) のエネルギー依存性測定を行なうことにした。

実験は、高エネルギー物理学研究所の陽子シンクロトロン (KEKPS) の主リングトンネル内において、内部ターゲットを用いて行なわれた。シンクロトロンで偏極陽子ビーム加速中に内部陽子ターゲットをビームライン上に挿入するという方法により、pp 弾性散乱における Analyzing Power のエネルギー依存性が、広いエネルギー領域にわたり、細かなエネルギーステップで、しかも系統的に測定可能になった。しかし、このような測定方法はまだ十分に確立されているわけではなく、実験上困難な問題も多く本実験においてはさまざまな工夫が施された。リングを周回するビームは繰り返しターゲットを通過し、さらに加速途中はバンチ状態になっている。そのため、ビームは安定な加速が保証される最小限の強度とし ( $\sim 1 \times 10^9$  個)、ターゲットには直径  $\sim 30 \mu\text{m}$  のポリエチレンストリングを用いることで、検出器における瞬間計数率をおよそ  $1 \text{ MHz}$  以下に押し、偶然同時計数イベントの低下を実現した。この条件のもとで見積られた pp 弾性散乱に対するルミノシティは、 $\sim 150 \mu\text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$  であった。偏極陽子のスピン状態は、偏極イオン源で 1 サイクル毎に反転を行ない、またシンクロトロンに存在する減偏極共鳴

に対してはその克服のため補正が加えられている<sup>4)</sup>。

pp 弾性散乱の非対称度を測定するため、主リングの一つのストレートセクションに、ビームラインに対して左右対称に 4 組の検出器が配置された (図 1)。前方散乱粒子の検出には、水平方向に 6 個、垂直方向に 5 個のプラスチックシンチレーターによるホドスコープが用意され、それらの組合せにより 30 のセルが形成される。さらに後方反跳粒子を小さなシンチレーターテレスコープにより検出して、前方ホドスコープの 30 セルとの同時計数がとられる。それらの前方後方の同時計数は、加速開始から 1msec ごとにスケーラーで計数されていく。その 1msec の間隔は、ビームのエネルギーステップに相当しており、およそ 4 ~ 17MeV のエネルギー間隔となる。pp 弾性散乱の散乱角度は、後方テレスコープで決定し、前方ホドスコープは、Kinematics によりその対応する角度にセットアップされた。pp 弾性散乱イベントは、Kinematics と Coplanarity の条件により、カーボン原子核からのバックグラウンドイベントや偶然同時計数イベントを分離し選別された。pp 弾性散乱イベントに対するバックグラウンドは、およそ 4 % ~ 15 % 程度であった。

ビーム偏極度のモニターには入射ポラリメーターと呼ばれる装置が使用され、加速が開始される前のおよそ 500MeV における偏極度を絶えず測定している。この測定により得られた実験中における加速開始前のビーム偏極度は、平均 46 % 程度であった。ビームエネルギーはシンクロトロン内に存在する  $\gamma G = 7$  の減偏極共鳴点のエネルギーを基準に、加速開始から 1msec ごとの偏向電磁石の磁場の値を用いて更正され、0.5 % 以下の精度で決定された。

本実験により得られた pp 弾性散乱における Analyzing Power の結果を図 2 に示す。散乱角度は、実験室系  $68.0^\circ$  に固定した。測定されたエネルギー領域はおよそ 0.5 ~ 2.0GeV の範囲で、データの誤差は統計誤差だけを考慮しており 1 % 以下であった。図 2 には、本実験結果とともに以前に測定されたデータも掲載している。掲載されたデータは、とくに我々の散乱角度に近いものだけを選んだ。今回得られたデータは、全体的な傾向としてそれらのデータとよく一致している。幅の狭い構造を観測し確立するためには、異なる実験によるデータ間の規格化の問題を回避するため一つの実験による系統的なエネルギー依存性のデータが望ましい。したがって、系統的に得られた今回のデータは、その規格化の問題がないところに大きな特徴と利点がある。

図 3 に今度は pp 系の Invariant Mass の関数として Analyzing Power を示す。この図は、1.0GeV 以下の低いエネルギー領域の部分のデータを拡大して示した。質量分解能は、2.15GeV 付近で 2MeV、2.30GeV 付近では 5MeV と見積られた。図 3 に見られるように、小さいが幅の狭い構造が観測されている。実線は、4 次の Polynomial に 2 つの Gaussian を加えてデータにフィットさせた結果を示している。構造を示唆する Gaussian の位置および半値幅の値は図中と表 2 に示した。そのフィットの結果は、自由度 51 に対して  $\chi^2$  が 46.1 であった。一方、同じ領域のデータに対する 4 次の Polynomial だけのフィットの結果は、自由度 57 に対して  $\chi^2$  が 79.8 であった。また観測された構造における統計的な有意度として、4 次のスムーズなバックグラ

ンドからの標準偏差で、2.160GeVの方は4.1、2.192GeVの方は3.1という値が得られている。表2には、 ${}^3\text{He}(p, d)X$  反応、 $dp \rightarrow (pp)n$  反応の Missing Mass および Invariant Mass スペクトル上に観測された幅の狭い構造も同時に示したが、興味深いことに今回観測された構造は、それらのピークの位置とよく一致しているという結果が得られた。

現在、NN 散乱の位相差解析のなかで、Arndt 等は、0～1300MeV のエネルギー範囲にわたるエネルギー依存性の位相差を求めている<sup>5)</sup>。彼等の位相差を用いて計算された Analyzing Power の値は、今回観測されたエネルギー領域においてスムーズな曲線を示し幅の狭い構造を生じない。そこで、一つの試みとして観測された構造が ${}^3P_1$ 、 ${}^3P_2$  の部分波の共鳴により生じたと仮定して、部分波振幅に Breit-Wigner 型の共鳴項を加えて Analyzing Power の計算を行なった。その結果を図4に示す。一点鎖線は共鳴がない場合で、実線はそれぞれの共鳴の存在を仮定した場合である。共鳴のパラメータはその中心位置、半値幅および弾性度で表3に示してある。共鳴項以外はすべて Arndt 等の位相差を用いて計算され部分波振幅にしている。図4に見られるように、それらの共鳴は観測された構造をよく再現している。また、この部分波解析から Analyzing Power では、 ${}^3P_2$  部分波による共鳴の中心は必ずしも観測された幅の狭い構造(ピーク)の中心と一致するわけではないことがわかった。ここでは示されていないが、 ${}^3P_0$  についても同様に試みられている。

本実験により、0.5～2.0GeV、散乱角 $68^\circ$ において、連続的に pp 弾性散乱における偏極分解能のエネルギー依存性を測定した。また、NN 散乱実験ではこれまで見いだされていなかった幅の狭い構造が、2.16GeV、2.19GeV 付近に統計的に有為な構造として初めて観測された。ただしそれらが6クォーク状態であるかどうかを確立するには、追実験やさらに多くのデータの蓄積により慎重な議論を展開していく必要がある。が一方で、今回観測された幅の狭い構造はこれまでまだ実験的にその存在が確認されていない6クォーク状態の有力な候補になり得ると考えられる。

#### 参考文献

- 1) P.J. Mulders et al., Phys. Rev. D21, 2563(1980)
- 2) P.W. Lisowski et al., Phys. Rev. Lett. 49, 255(1982)  
M. Garcon et al., Nucl. Phys. A445, 669(1985)  
M. Garcon et al., Phys. Lett. B183, 273(1987)
- 3) B. Tatischeff et al., Phys. Rev. C36, 1995(1987)
- 4) H. Sato, Jpn. J. Appl. Phys. 27, 1022(1988)
- 5) Arndt et al., Phys. Rev. D35, 128(1987)

表1 これまでに観測された幅の狭い構造

Charge State	Mass ( GeV )	Width ( MeV )	Reaction
proton-proton	2.014±0.001	~5	$\gamma d \rightarrow p p \pi^-$
	2.010±0.010	63±28	$d p \rightarrow (p p) n$
	2.162±0.010	18±26	
	2.035±0.015	30±23	${}^4\text{He } p \rightarrow (p p) d n$
	2.137±0.015	50±20	
	2.121±0.003	25±2	${}^3\text{He } (p, d) p p$
	2.192±0.003	25±6	
	2.240±0.005	16±3	
	2.015±0.005	34±14	
	2.054±0.004	11±6	
	2.125±0.003	6±7	
	2.152±0.004	20±10	
	2.181±0.005	20±8	
proton-neutron	2.020±0.010	45±20	$d p \rightarrow (p n) p$
	2.130±0.010	20±10	
neutron-neutron	2.035±0.010	50±20	$d p \rightarrow (n n) p \pi^+$
	2.143±0.020	60±20	

表2 本解析結果とこれまでの幅の狭い構造

Present Result (KEK) pp 弾性散乱 M <sub>pp</sub> (GeV) Γ <sub>1/2</sub> (MeV)		Tatischeff et al. (Saclay) ${}^3\text{He } (p, d) X$ M <sub>pp</sub> (GeV) Γ <sub>1/2</sub> (MeV)		Santi et al. (LAMPF) ${}^3\text{He } (p, d) X$ M <sub>pp</sub> (GeV) Γ <sub>1/2</sub> (MeV)		Dolizdo et al. (Dubna) $d p \rightarrow (p p) n$ M <sub>pp</sub> (GeV) Γ <sub>1/2</sub> (MeV)	
		2.121±0.003	25±6	2.125±0.003	6±7		
2.160±0.003	13±3	2.155 ?		2.152±0.004	20±10	2.162±0.010	18±26
2.192±0.003	12±3	2.192±0.003	25±6	2.181±0.005	20±10		
2.242 ?		2.240±0.005	16±3				

表3 共鳴のパラメータ (Breit-Wigner型)

部分波	中心位置 (GeV)	半値幅 (MeV)	弾性度
${}^3P_1$	2.160	10	0.03
${}^3P_2$	2.170	18	0.03
	2.200	12	0.03

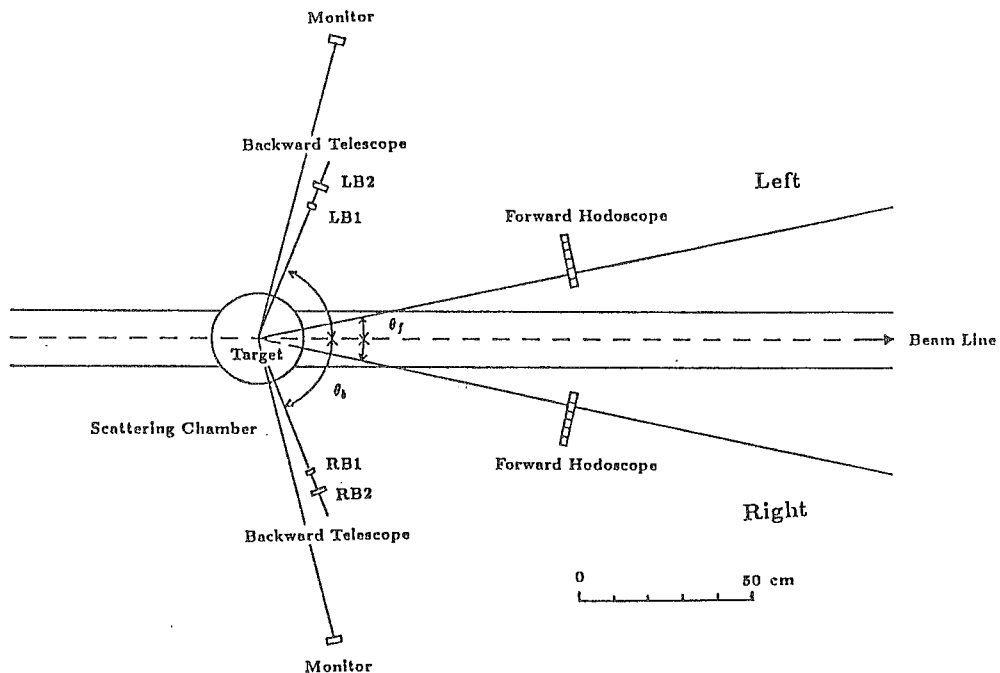


図1 検出器のセットアップ (Top View)

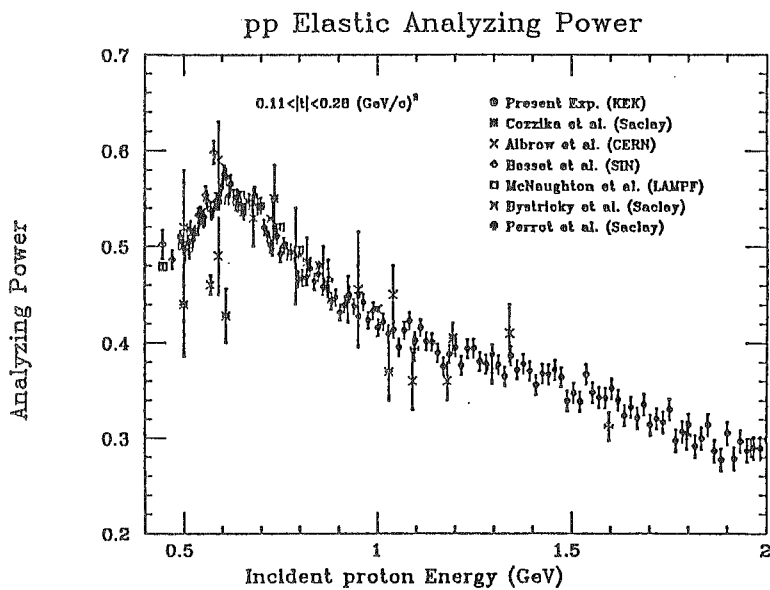


図2 pp 弾性散乱における Analyzing Power のエネルギー依存性  
(黒丸：本実験結果，他：既存のデータ)

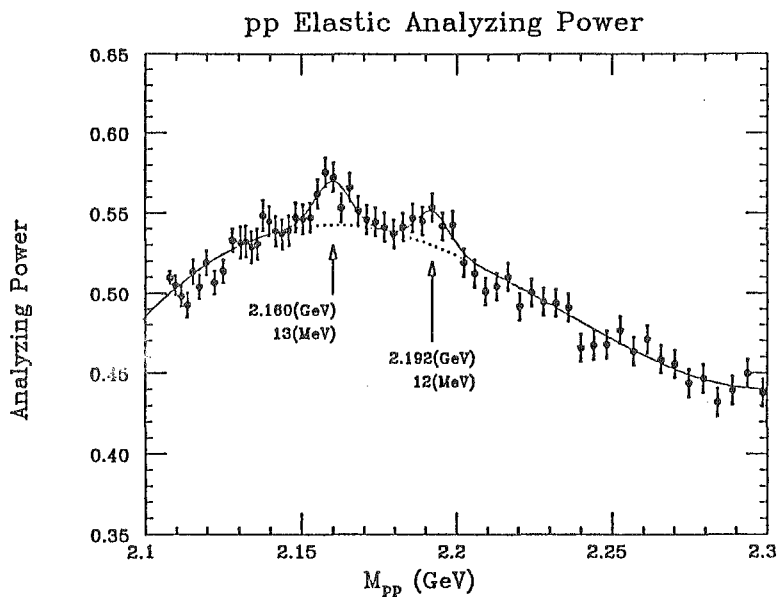


図3 4 次の Polynomial Background+ 2 Gaussians Fitting の結果 ( $\chi^2/\nu=0.90$ ) と幅の狭い構造 ( $\Gamma\sim 15\text{MeV}$ )

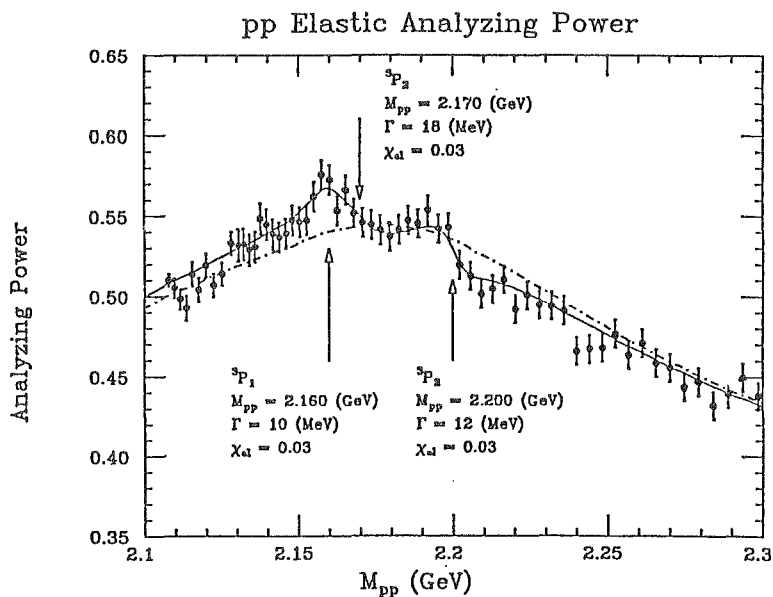


図4 幅の狭い  $^3P_1$  共鳴と2つの  $^3P_2$  共鳴を含んだ pp 弾性散乱における Analyzing Power の計算値と本実験結果

## 論文審査の結果の要旨

中高エネルギー領域において、ダイバリオン共鳴として、実験と理論の両面から精力的に行われてきた研究の中で、本研究の目的は偏極陽子による陽子・陽子散乱実験での偏極分解能のエネルギー依存性を系統的にこまかに測定することにより、二核子系の幅の狭い共鳴状態 ( $\Gamma \sim 20\text{MeV}$ ) を探すことにある。核子・核子散乱の位相差解析から推論される幅の広い共鳴 ( $\Gamma \sim 100 \sim 200\text{MeV}$ ) と区別されるこれらの状態は Bag 模型等から予測される 6 クォーク状態に何か新しい自由度が導入されて説明し得る、幅の狭い共鳴状態の可能性がある。幅の狭い構造は少数系の原子核反応による Missing Mass あるいは Invariant Mass スペクトルの上に観測されるものと同一の物理量であるかどうかは非常に興味のある問題である。

本実験は、高エネルギー物理学研究所の陽子シンクロトロン主リングトンネル内におかれた内部水素ターゲットによる偏極陽子ビームの偏極分解能を測定することによって行われた。第二章は、これらの実験装置をいかにして設置し、実験を成功に導いたかを述べ、第三章においてその実験方法を、そして第四章に結果をまとめている。パルスビーム強度の問題点を克服し、 $0.5 \sim 3.5\text{GeV}$  の広いエネルギー領域にわたり、 $4 \sim 17\text{MeV}$  のステップで統計精度のよい陽子・陽子弾性散乱の偏極分解能の測定に成功した。得られた実験データは、統計精度が 1% 以下と非常によく、二核子系の Invariant mass で  $2.16\text{GeV}$ ,  $2.19\text{GeV}$  付近に統計的に有為な幅の狭い構造 ( $\Gamma \sim 15\text{MeV}$ ) が見られた。これだけ広い領域にわたり、系統的に実験を行ったのも、この実験が最初であるが、この幅の狭い構造が観測されたのは N-N 散乱実験では初めてである。これらの構造は、少数系の原子核反応  ${}^3\text{He}(pd)X, dp \rightarrow (p, p)n$  を用いて測定された Missing Mass, 又は Invariant Mass スペクトル上の幅の狭い構造の質量とよい一致を示している。

第五章において Arndt 等によって得られたエネルギー依存型の位相差解析を行い、Breit-Wigner 型の部分波振幅を導入して、幅の狭い共鳴状態の存在を仮定した偏極分解能の計算を行った。本論文では共鳴を  ${}^3\text{P}$  部分に限定しているが  ${}^3\text{P}_1, {}^3\text{P}_2$  部分波共鳴により、構造部分がかなりよく再現されている。すでに実験された 3 つの NN 散乱では、これらの幅の狭い共鳴は観測されておらず、この計算結果からしても、幅の狭い共鳴状態の弾性はかなり小さく、部分波解析からの偏極分解能では共鳴状態の中心が必ずしも構造の中心と一致しないこともわかった。しかし、NN 散乱実験で初めて幅の狭い構造が  $2.16\text{GeV}$ ,  $2.19\text{GeV}$  付近に統計的に有為な構造として確認された。これらの構造が、いかなる 6 クォーク状態であり得るかは多くのデータ集積と理論の発展が必要である。

以上、見てきたように、本研究は、実験的に困難とされてきた NN 散乱における偏極分解能のエネルギー依存性のデータを  $0.5 \sim 3.5\text{GeV}$  にわたり測定し、幅の狭い構造に関する貴重な知見を得た。

よって、著者は自立した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おり、小林幸則提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。