

氏名・（本籍）	菅原竜平
学位の種類	理学博士
学位記番号	理博第286号
学位授与年月日	昭和47年3月24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	π^-p 8GeV/c における4-Prong Reaction の研究
論文審査委員	（主査）北垣敏男 教授 武田 暁 教 授 秋葉巴也

論 文 目 次

I	序 論
II	実験手続
III	Resonance Production
IV	Longitudinal Phase Space Analysis
V	$\pi^-p \rightarrow d^{++}\pi^-\pi^-$ 及び $\pi^-p \rightarrow p\pi^-\rho^0$
VI	結 論

論文内容要旨

I. 序 論

本研究は米国のBrookhaven国立研究所のAGS(Alternating Gradient Synchrotron)より得られた、運動量8GeV/cの π^- beamを、同研究所の80inch水素泡箱に入射して撮られたフィルム約100K picturesのうちの約30K picturesの測定結果に基づき、下記の二つの反応について解析、研究を行ったものである。

$$(A) \quad \pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+ \quad 931 \quad \text{events}$$

$$(B) \quad \pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+ \pi^0 \quad 1,231 \quad \text{events}$$

$\pi^- p$ 反応は古くから多くの実験の対象とされてきた。そしてこれらのデータの蓄積により resonance の細かな構造が徐々に明らかにされつつある。また1964年にJ. JosephとH. Pilkuhnによって2粒子交換のmechanismが提唱され、それまで終状態が2体ないし準2体の散乱のmechanismしか統一的に説明する理論がなかったが、これにより終状態が3ないし準3体の散乱現象を統一的に説明しようとする理論の方向づけがなされた。その後1967年に至っていくつかのグループによって、2粒子交換のかわりに当時終状態が2体ないし準2体の散乱現象の説明にかなりの成功を収めていたRegge-Role理論をとりいれ、2個のRegge trajectoryの交換を仮定した、いわゆるDouble Regge-pole Model(以後これをDRPMと略す)が提唱された。そして更に2個以上のRegge trajectoryの交換を仮定することによって、終状態が3体以上の散乱現象を説明するmulti-Regge-Pole modelに拡張された。最近これらのDRPM及びmulti-Regge-pole modelが実験でcheckされ、overallによく実験結果を説明することが分かってきた。しかし細かい点ではまだ十分に説明しているとは言えず、理論と実験の両面からの検討がなされつつある。

本研究では、以上の現象を踏まえて、約30K picturesのフィルムの中から得られた反応(A) 931 events及び反応(B) 1,231 eventsを基に次のような研究を行った。つまり第1にresonance production, 第2にlongitudinal phase spaceを使ったoverallなmechanismの解析、そして第3に下記のresonance production反応(a)(b)を使ったDRPMとDeck typeのOne Pion Exchange Model(以後これをOPEMと略す)のcheckである。

$$(a) \quad \pi^- p \rightarrow \Delta^{++} \pi^- \pi^-$$

$$(b) \quad \pi^- p \rightarrow p \pi^- \rho^0$$

以下第II章において実験の種々の手続、第III章においてresonance production, 第IV章でlongitudinal phase space analysis, 第V章でresonance production (a), (b)を使ったDRPMとOPEMのcheckについて述べ、第VI章で本研究で得られた結論について述べる。

II. 実験手続

本研究に使われたフィルムは、米国 Brookhaven 国立研究所の AGS electrostatically separated π^- beam を同研究所の 80 inch 水素泡箱に入射させて撮られたものである。泡箱にかけられた磁場 $B(X, Y, Z)$ は次の式で表わされる。

$$B(X, Y, Z) = C \cdot F(X, Y, Z)$$

$F(X, Y, Z)$ は泡箱内での実測値で与えられており、 C は K^0 からの decay $\pi^+\pi^-$ の effective mass が K^0 の mass の値になるよう求められており、 $C = 1.008 \pm 0.0019$ と求まっている。入射運動量は①入射 beam の曲率を直接精度よく測ること、②弾性散乱の event の secondary track の運動量から入射運動量を逆算、③弾性散乱の event の missing mass squared 分布のピークが 0 GeV^2 になるような入射運動量を求める、という三つの方法から入射運動量 $p_0 = 7.85 \pm 0.05 \text{ GeV}/c$ という値が得られている。

本研究で event selection の際設けた、selection criteria を次に記す。

- ① V^0 の association または kink track がないこと。
- ② single fit の場合は ionization に矛盾がない限り accept。
- ③ multi-fit の場合、ionization では区別がつかないが、他より chi-square probability が 3 倍大きいときはこれを accept。
- ④ 以上の selection criteria で判定ができず、この中に反応 (A) があつた場合は、反応 (A) に accept。

以上の selection criteria で判定のつかない場合は再測定にまわした。

結局約 30K pictures 中の約 13.5K の 4-prong event が測定され、反応 (A) として 1,082 events, 反応 (B) として 1,443 events が得られた。

- ① 反応点 (vertex point と言う) の X 座標が下記の範囲内であること

$$-16 \leq X \leq 110 \quad \text{cm}$$

- ② Missing mass squared が次の範囲内であること

$$\text{反応 (A)} \quad -0.02 \leq MM^2 \leq 0.02 \quad \text{GeV}^2$$

$$\text{反応 (B)} \quad -0.02 \leq MM^2 \leq 0.24 \quad \text{GeV}^2$$

- ③ chi-square probability が次の範囲内であること。

$$\text{反応 (A)} \quad p(\chi^2) \geq 2\%$$

$$\text{反応 (B)} \quad p(\chi^2) \geq 4\%$$

以上の event cut の結果残った event 数は次のとおりである。

$$\text{(A)} \quad \pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+ \quad 931 \text{ events}$$

$$\text{(B)} \quad \pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+ \pi^0 \quad 1,232 \text{ events}$$

第 III 章以下の解析は全てこの event に基づいている。

また測定不良による event loss, 測定誤差による他の channel の混じり込みと他の channel への流出を考慮して、selected event 数から反応 (A) 及び (B) の $8 \text{ GeV}/c$

における反応断面積を estimate し,

$$\text{反応(A)} \quad \sigma = 1.19 \pm 0.08 \quad \text{mb}$$

$$\text{反応(B)} \quad \sigma = 1.44 \pm 0.08 \quad \text{mb}$$

という値が得られた。これは同じ入射運動量での Notre Dame 大学グループによる測定値と誤差の範囲内で一致している。

また本実験の測定系の check がいくつか行なわれ

① $\beta = \tan^{-1} \left(\frac{P_z}{P_y} \right)$ 分布をとることにより, $\beta \approx 90^\circ$ で event の loss が見られることが

分かった。これはカメラの方向に出た track の測定のにくさによるものと思われる。

② 反応(A)及び反応(B)に対する chi-square 分布の expansion factor は各々 0.94 と 0.98 で, 両方ともほぼ 1 で測定系が正常であることを示している。

③ 本実験の 3π の effective mass の分解能は, 反応(A)については 11 events を数回測定することにより $M \sim 1.200 \text{ MeV}$ で 6.5 MeV , 反応(B)に対しては ω の Γ 巾より $M \sim 800 \text{ MeV}$ で約 40 MeV という値が得られた。

III. Resonance Production

本実験で観測された resonance のピーク及び enhancement をまとめて Table 1 (反応 A) と Table 2 (反応 B) に示す。なお中心値 M_0 , Γ 巾そして cross section を求める際 ($\pi^+ p$) effective mass 分布に対しては phase space を, 他の分布に対しては適当に引いた smooth curve を background として使い, これに Breit-Wigner の式を加えて chi-square fit を行い, 各 parameter を求めた。

IV. Longitudinal Phase Space Analysis

High energy 領域においても各粒子の transverse momentum p_{\perp} が大きくならないことに着目して, 反応の mechanism の特徴は主に longitudinal momentum p_{\parallel} の分布に現れるとし, longitudinal phase space (LPS) 中での event の振舞いを調べることにより, 反応の mechanism を追求する方法が Van Hove⁽²⁾ によって提唱され, J. Bartsh et al⁽³⁾ によって終状態が 4 体の散乱現象の解析に使われた。反応(A)については W. Kittel⁽⁴⁾ らによって 11 及び 16 GeV/c で解析が行なわれており, 反応(B)については同じく W. Kittel らによって 11 GeV/c で解析が行なわれているが, これらの結果が 8 GeV/c でどのように変わるかというのが本解析の興味を中心である。一般に終状態 n 体の散乱現象に対して次のような reduced longitudinal momentum を定義すると

$$x_i \equiv \frac{2p_{i,j}}{\left(\sum_{j=1}^n |p_{i,j}| \right)}$$

次の二つの拘束の式がこれに対して存在する。

$$\begin{cases} \sum_i x_i = 0 \\ \sum_i |x_i| = 2 \end{cases}$$

従って散乱現象は $(n-2)$ 次元の LPS で表わされる。反応 (A), (B) において 2 個の π^- に対して, x_i の大きなものを π_f^- , 小さなものを π_s^- として区別する。反応 (A) においては π^+ と π_s^- の, 反応 (B) においては π^+ と π_s^- と π^0 の reduced longitudinal momentum (x^+ , x_s^-) 及び (x^+ , x_s^-, x_0) を独立変数として選んだ。本実験では簡単のため unweighted distribution をとった。結果を Fig.1 (反応 (A)) 及び Fig.2 (反応 (B)) で示す。

(A) $\pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+$

111

LPS PLOT (unweighted)

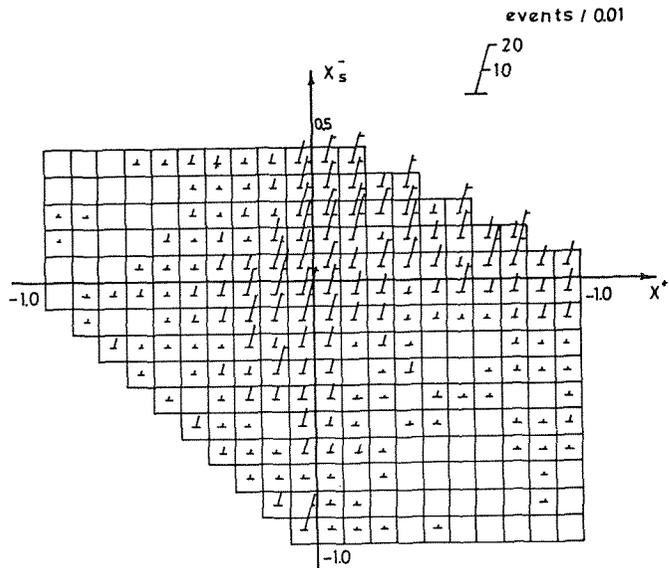
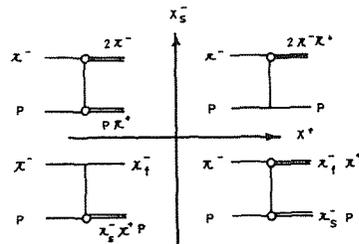
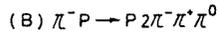


Fig.1 (A) $\pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+$

LPS PLOT (unweighted)



LPS PLOT (unweighted)

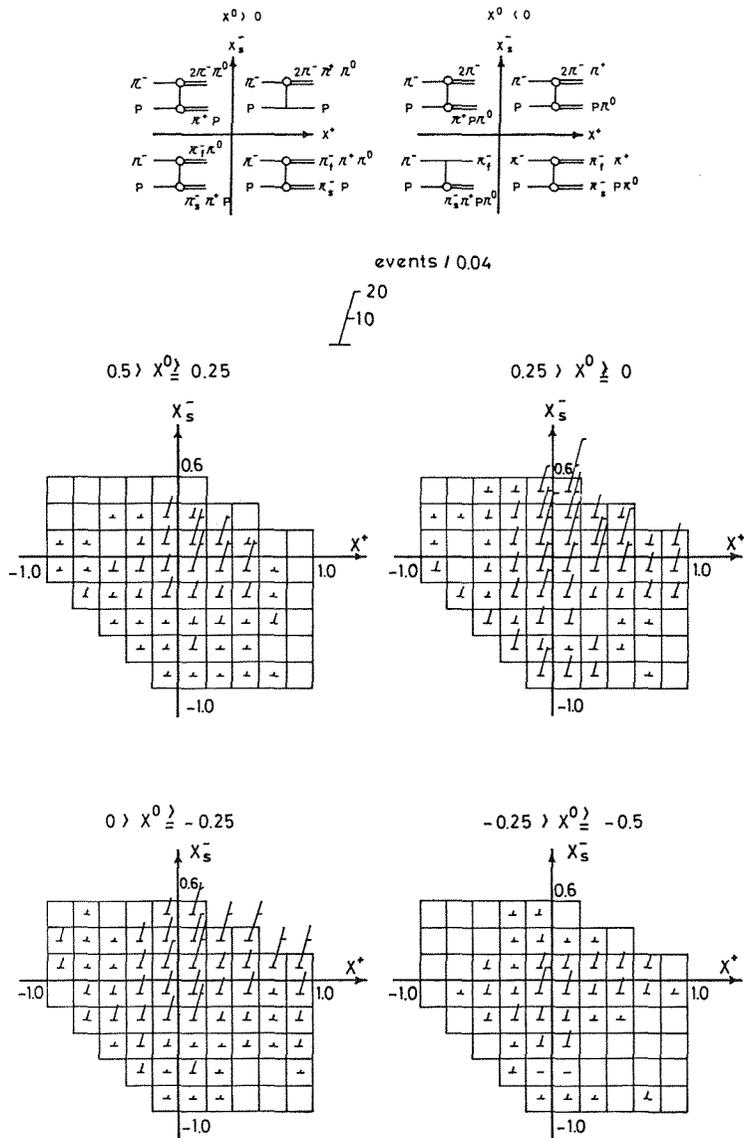


Fig. 2 (B) $\pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+ \pi^0$

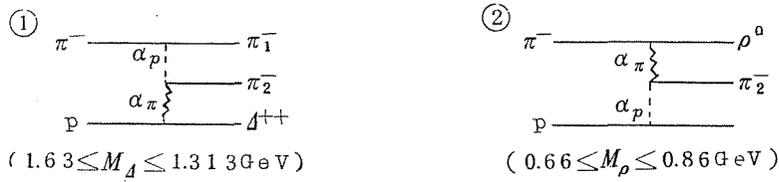
LPS PLOT (unweighted)

V. $\pi^- p \rightarrow \Delta^{++} \pi^- \pi^-$ 及び $\pi^- p \rightarrow p \pi^- \rho^0$

反応(A)における dominant な resonance production channel

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & \pi^- p \rightarrow \Delta^{++} \pi_2^- \pi_1^- & 157 \text{ events} \\ \text{(b)} \quad & \pi^- p \rightarrow p \pi_2^- \rho^0 & 275 \text{ events} \end{aligned}$$

を使って E. L. Berger⁽⁵⁾ によって提唱された DRPM と, Deck type の OPEM を check した。なお 2 個の π^- に対して incident π^- から の four momentum の絶対値 $|t|$ の小さい方を π_1^- , 大きい方を π_2^- と区別した。また反応(a)と(b)の event を選ぶ際, background を減らす目的で(a)については ρ^0 領域を, (b)については Δ^{++} 領域を除いた。 ρ^0 及び Δ^{++} 領域の定義については下の図を参照。Berger は Dorem-Horn-Schmid によって提唱された "duality" の概念をとり入れ, 低 sub-energy 領域まで, 顕著な direct resonance が ない場合は DRPM で説明できるとしている。従って本実験でも反応(a)と(b)の全ての data を使った。



上の diagram は, diagram ①が反応(a)の, diagram ②が反応(b)の DRPM の diagram である。DRPM の amplitude 中の fitting parameter は $\alpha_\pi = 1$ (GeV/c)⁻² とおき反応(a)では $s_0 = 0.6 \text{ GeV}^2$, $a = 3.5 (\text{GeV}/c)^{-2}$, 反応(b)では $s_0 = 0.6 \text{ GeV}^2$, $a = 6.0 (\text{GeV}/c)^{-2}$ と求められた。

VI. 結 論

① Resonance Production

本実験の結果はまとめて Table 1 と 2 に示した。反応(A)及び(B)において共に A_{1236} と ρ production が dominant である。8 GeV/c における resonance production についてはすでに Notre Dame⁽¹⁾ 大学グループによって報告されているが, 彼らの報告にある反応(A)での A_{15}^- と N_{1518}^{*0} は本実験では観測されず, そのかわりに A_{1100}^- 及び N_{1470}^{*0} が観測された。また反応(A)における $A_3(f\pi^-)$, 反応(B)における $T(\pi^+\pi^-\pi^-)$, g_{1700} 及び $g_{1700}(4\pi)$ のピークも本実験では観測されなかった。一方反応(B)において $R(\pi^+\pi^-\pi^-)_{\sim 1700}$ として報告された $\Gamma \sim 200$ の broad な enhancement が本実験では反応(A)でも観測された。

② Longitudinal Phase Space Analysis

W. Kittel⁽⁴⁾ らの 11 及び 16 GeV/c での結果に比べると, 反応(A)では pion dis-

sociation $\pi^- p \rightarrow p(2\pi^- \pi^+)$ と proton dissociation $\pi^- p \rightarrow (p\pi_s^- \pi^+)$ π_f^- があいかわらず強いが、これと同じくらい charge exchange $\pi^- p \rightarrow (p\pi^+)$ ($\pi_f^- \pi_s^-$) が強くなっている。また反応(B)では pion dissociation $\pi^- p \rightarrow (2\pi^- \pi^+ \pi^0)$ が proton dissociation に比べると約2倍強くなっており、このことは W. Kittel らの pion dissociation が ω -exchange によるという結論を支持している。また 8 GeV/c では 11 GeV/c に比べると double dissociation $\pi^- p \rightarrow (2\pi^- \pi^+)(p\pi^0)$ が非常に強く、次に $\pi^- p \rightarrow (\pi_f^- \pi^+)(p\pi^0 \pi_s^-)$ が強い。この2つの double dissociation は 8 GeV/c では proton dissociation よりも強くなっている。

③ $\pi^- p \rightarrow \Delta^{++} \pi^- \pi^-$ 及び $\pi^- p \rightarrow p \pi^- \rho^0$

両反応において、実験結果が DRPM で over all によく説明されることが分かった。特に Deck type の OPEM では十分に説明できない ($\pi_2^- \Delta^{++}$) 及び ($\pi_2^- \rho^0$) の effective mass 分布における threshold enhancement が、DRPM でよく説明できる。また DPPEM では pion exchange の効果が現われる Treiman-Yang angle 分布 (反応(a)の $\phi_{\pi_1^- \pi_2^-}$ 分布, 反応(b)における $\phi_{\pi_2^- p}$ 分布) の左右非対称が説明できず、これは交換粒子の spin を零にする限り本質的な欠陥として残る。一方 DRPM ではこれをよく説明している。しかし DRPM も Pomeron exchange の効果が現れる Treiman-Yang angle 分布 (反応(a)の $\phi_{\Delta^{++} \pi_2^-}$ 分布, 反応(b)の $\phi_{\rho^0 \pi_2^-}$ 分布) は説明できない。両反応において Pomeron 交換部の sub-energy (反応(a)の $M(\pi_1^- \pi_2^-)$, 反応(b)の $M(\pi_2^- p)$) の高い部分のみをとると DRPM があってくるが、この操作は "duality" の概念をとり入れた Berger の考えに反する。またなぜ Pomeron exchange 部分の sub-energy のみ高くとらねばならないかという疑問も生ずる。

また反応(a)においては $t_{\Delta^{++}}$ と $t_{\pi_1^-}$ の両分布に $t \approx -0.25$ 及び $-0.4(\text{GeV}/c)^2$ にはっきりした dip が、反応(b)においては t_p 分布に $t \approx -0.25$ 及び $-0.6(\text{GeV}/c)^2$ に dip の indication が見られる。これらの dip の位置及び深さは、その反応に効いている mechanism の特徴を最もよく表わすものであり、更に細かな解析をすすめるつもりである。

References

- 1) N. M. Cason et al., Phys. Rev. D1(3) 851(1970); Phys. Rev. 116(5) 1395(1968)
- 2) L. Van Hove, Phys. Letters 28B 429(1969); Nucl. Phys. B9 331(1969)
- 3) J. Bartsch et al., Nucl. Phys. B19 381(1970)
- 4) W. Kittel et al., Nucl. Phys. B30 333(1971)
- 5) E. L. Berger, Phys. Rev. 179(5) 1567(1969)

Table1 Observed Resonances and Enhancements ①

	M_0 (MeV)	Γ (MeV)	Fraction(%)	σ (mb)
(A) $\pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+$	(931 events)			1.19 ± 0.08
Δ_{1236}^{++}	1244 ± 11	102_{-6}^{+20}	39 ± 2	0.46 ± 0.04
Δ_{1236}^0	1225 ± 10	8.2_{-14}^{+18}	~ 8	~ 0.09
N_{1470}^{*0}				
N_{1688}^{*0}				
N_{1900}^{*0}				
ρ^0	760 ± 6	128 ± 12	54 ± 2	0.64 ± 0.05
A_1^-	~ 1100			
A_2^-	~ 1300			
$(3\pi)^-$	~ 1700	~ 200		
$(\Delta^{++} \pi^-)$	~ 1560	~ 280		

Table2 Observed Resonances and Enhancements ②

	M_0 (MeV)	Γ (MeV)	Fraction(%)	σ (mb)
(B) $\pi^- p \rightarrow p 2\pi^- \pi^+ \pi^0$	(1232 events)			1.44 ± 0.08
Δ_{1236}^{++}	1228 ± 4	89 ± 12	23 ± 1	0.33 ± 0.03
Δ_{1236}^0	1272 ± 8	113_{-17}^{+23}	15 ± 1	0.21 ± 0.02
N_{1688}^{*0}				
ρ^+	724 ± 11	100 ± 12	~ 10	~ 0.15
ρ^0	744 ± 5	116_{-12}^{+14}	34 ± 2	0.49 ± 0.04
ρ^-	770 ± 7	152_{-20}^{+25}	24 ± 1	0.35 ± 0.03
ω	784 ± 3	40.2 ± 5	14 ± 1	0.21 ± 0.02
A_1^0	~ 1000			
$A_{1.5}^0$	1012 ± 12	< 25		
$(3\pi)^-$	~ 1750	~ 200		
$(\Delta^{++} \pi^-)$	~ 1600	~ 200		
$(\omega \pi^-)$	~ 1250	~ 1100		
η	~ 550		1.6 ± 0.4	0.023 ± 0.006

論文審査結果の要旨

菅原龍平提出の論文は $80 \text{ eV}/c$ における $\pi^- p$ 反応の泡箱写真を測定解析し、特に4ヶの荷電2次粒子を発生する過程について研究したものである。

論文は6章よりなるが、第1章序論においては $\pi^- p$ 反応研究を概観し、問題を反応による数多くの素粒子共鳴状態の生成と反応機構の追究とに整理している。これは同時に本研究の目的でもある。

第2章では本研究実行に関する莫大な手続きの詳細が述べられているが、注目に価するのは測定された反応の選別に関する事項、測定結果の信頼性に関する保証及び分解能に関する事項である。

泡箱写真による研究においては、これらのデータの取り扱いの結果の価値を左右する極めて重要な事であり、著者はここに慎重な配慮を示しているが、例えば3中間子系の質量分解能を見ても本研究の質が海外データに劣らぬものであることが判る。

第3章では本研究で明らかにされた素粒子共鳴状態の質量、巾、生成断面積について述べ、これ等は合理的な結果である。

第4章以下は反応機構の研究で、longitudinal phase space analysisによる力学的解析及びresonance productionの解析が述べられている。後者は特に著者が力を入れた部分であるが $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ \Delta^{++}$ 及び $\pi^- p \rightarrow \rho^0 \pi^- p$ の終状態をもつ反応を分離し、この実験結果とone pion exchange model及びdouble Regge model計算とを比較している。

その結果前者のmodelでは説明困難な所のある粒子間質量分布、各粒子の t -分布 longitudinal momentum 分布、崩壊角分布等のほとんどがdouble Regge modelによって統一的に再現出来ることが示された。

更に詳細として、崩壊角分布でdouble Regge modelの限界を押えたことは価値ある知見と云える。

本研究は整然とした一連の測定解析であり、その結果として3体終状態に対するdouble Regge modelの良好な再現性及びその限界を明らかにしたことは高く評価出来る。

よって菅原龍平提出の論文は理学博士論文に価するものと認める。