

氏名・(本籍)	佐々木 万亀夫
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1150 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	高エネルギー・ニュートリノ核子反応におけるハドロン・ ジェットの研究
論文審査委員	(主査) 教 授 田 中 昌 教 授 吉 村 太 彦 助 教 授 山 口 晃

## 論 文 目 次

### 第 I 章 序 論

- I-1 ニュートリノ
- I-2 弱い相互作用
- I-3 QPM と QCD
- I-4 本研究の概要

### 第 II 章 実 験

- II-1 ニュートリノ・ビーム
- II-2 実験装置
- II-3 実験手続

### 第 III 章 荷電カレント反応

- III-1 スキャン効率
- III-2 測定効率

III-3	フィデューシヤル・ボリユーム
III-4	測定精度
III-5	ニュートリノ・ビーム方向
III-6	$F_{\max}$ 法によるミュー粒子選出
III-7	ハイブリッド系によるミュー粒子選出
III-8	ボン法によるニュートリノ・エネルギーの推定及び運動学的変数
III-9	荷電カレント反応の選出とその運動学的変数
第IV章	荷電カレント反応の解析
IV-1	ハドロン荷電多重度
IV-2	横運動量分析
IV-3	ジェット構造の解析
第V章	結論及びまとめ
謝 辞	
Appendix-A	ホログラフィーの原理
Appendix-B	ワイヤー・チェンバーの原理
Appendix-C	LUND シミュレーション
References	
Table Captions	
Figure Captions	
Tables and Figures	

# 論文内容要旨

## 第I章 序論

クォーク間の結合を媒介する粒子としてのグルーオン (gluon) の存在は  $e^+e^-$  衝突実験 (PETRA, Ref.1) により確認された。この後に Fixed Target 実験 (15ftBC, BEBC 泡箱実験, Ref.2, 3) でも, 3 ジェット・イベント解析を行なうことによりグルーオン放出の解析が試みられたが未だに成功を収めていない。その原因としては, Fixed Target 実験の重心系でのエネルギーが  $e^+e^-$  衝突実験のそれと比べれば小さいとこが挙げられる。

本研究は, 米国フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) における世界最高エネルギーのニュートリノ・ビームを用いて行なわれた泡箱実験に基づくものであり, 高エネルギー・ニュートリノ核子反応におけるクォークとグルーオンのハドロン・ジェットを研究するものである。

## 第II章 実験

本研究の基礎となる実験は, 1987年6月から1988年2月まで FNAL において行なわれたニュートリノ泡箱実験であり, 通常写真364991枚, ホログラム62774枚を撮影した。

### II-1 ニュートリノ・ビーム

FNAL の陽子加速器テバトロンにより  $800\text{GeV}/c$  まで加速された陽子をベリリウム標的に入射する。そこで発生した正荷電粒子を三連四極磁石により収束する。次に, ミュー粒子とニュートリノに崩壊させて  $965\text{m}$  の土手を通すことによりミュー粒子を取り除く。この後にニュートリノのみが実験室に入射される。

### II-2 実験装置

#### i) 東北1.4m 泡箱

本実験に用いられた東北1.4m 泡箱の特徴は, 標的兼検出器として液体フレオンをもちいている点及び通常光学系三視野と高分解能ホログラフィー光学系二視野を装備している点である。フレオンを用いることによりイベント数が多くなるという利点がある反面, 二次反応や電磁シャワーが起こり易いという欠点がある。本研究では, ホログラフィーを用いて反応点付近を詳細に調べることによって上述の欠点を補っている。

#### ii) トリガー・カウンター系

トリガー・カウンターはニュートリノ・イベントを効率良く撮影するために用いられた。トリガー・カウンターは大別すれば, 泡箱に対して上流側と下流側とに分けられる。ニュートリノは中性粒子であるから, トリガー・カウンターを通過しても信号は出さない。一方, 反応によって生成したミュー粒子が通過する際には信号を出す。従って, 上流側のカウンターが信号を出さず下流側のカウンターが信号を出した場合をニュートリノ・トリガー・モードとして用いた。

#### iii) ハイブリッド系 (複合型粒子検出器)

ハイブリッド系には三種類のワイヤー・チェンバーが装備され、ミュー粒子識別とその運動量精度向上のために用いられた。

### II-3 実験手続

まず通常写真をスキャンすることによってイベントを見つけ測定する。その後三次元立体再構成され、解析に用いられる。解析を行なうにあたってはモンテ・カルロ・シミュレーションによる比較も行なった。

## 第III章 荷電カレント反応

本研究では、ニュートリノ荷電カレント反応を解析する。

まず初めにスキャン効率と測定効率を求め、測定によるバイアスを除くためにフィデューシャル・ボリュームを定めた。その後、 $F_{\max}$ 法によりミュー粒子を同定し、ボン法によりニュートリノ・エネルギー ( $E\nu$ ) を推定した。

これらのことから、運動量移行 ( $Q^2$ ), エネルギー移行 ( $\nu$ ), ハドロン系の不変質量 ( $W$ ) 及びビヨルケン・スケール ( $x_B, y_H$ ) の運動学的変数を求めた。

本研究においては、ニュートリノ荷電カレント反応を選ぶために  $P_L^{vis} > 10 \text{ GeV}/c$ ,  $P_{TR} > 1.5 \text{ GeV}/c$ ,  $W > 2.0 \text{ GeV}/c^2$  及びマイナス・ミューを持つなどの選別をした。この選別により、全測定イベント6886個中に荷電カレント反応が1593個あった。この選別の方法が妥当であるかをモンテ・カルロ・シミュレーションで調べた結果、上記1593イベント中99%が荷電カレント反応であることが解った。

## 第IV章 荷電カレント反応の解析

第III章で求められた1593個の荷電カレント反応について本研究の主題であるジェット構造の解析を行なった。

ニュートリノは  $W$  粒子の交換により核子内部のクォークと反応する。低エネルギー反応の場合、弾き飛ばされたクォーク (struck quark) と残された二個のクォーク (di-quark) が各々ハドロン・ジェットを作る (Fig.1 にパートンのレベルのファイマン図を示す)。高エネルギー反応の場合、弾き飛ばされたクォークはグルーオンを放出し (Fig.2) 三個のハドロン・ジェットを作る。

### IV-1 ハドロン荷電多重度

平均ハドロン荷電多重度  $\langle N_{ch} \rangle$  と不変質量  $W$  との間には、 $\langle N_{ch} \rangle = a + b \log(W^2)$  の関係式がある。  $4 < W^2 < 200 \text{ (GeV}/c^2)^2$  の領域で、 $a = 1.32 \pm 1.64$ ,  $b = 1.12 \pm 0.40$  の値を採り、過去の実験 (Ref.3) と一致した。さらに、 $4 < W^2 < 400 \text{ (GeV}/c^2)^2$  まで領域を拡げて、 $a = 1.35 \pm 1.43$ ,  $b = 1.12 \pm 0.33$  の値を得た。

## IV-2 横方向運動量 ( $P_T$ ) 分布

ハドロンの  $P_T$  と  $z$  及び  $X_F$  との関係を調べた。

全ての  $z$  の領域に対して、 $200 < W^2 < 800$  ( $\text{GeV}/c^2$ )<sup>2</sup> の領域で  $\langle P_T^2 \rangle$  の値が一定になることを示した。

従来の実験では、 $W$  が大きく且つ  $X_F > 0$  の領域で  $\langle P_T^2 \rangle$  の値が増大することをもって3ジェット・イベント発生理由としていたが本研究により  $\langle P_T^2 \rangle$  の値の増大は測定誤差 (トラックの角度誤差及びカレント軸方向の誤差) によるものであることが示された。

## IV-3 ジェット構造の解析

### i) Sphericity と Thrust

ジェット構造を解析する際に Sphericity と Thrust と呼ばれる量が用いられてきた (PETRA, Ref.1)。

$P_i$  をハドロンの重心系での運動量とし、Sphericity テンソルを次のように定義する。

$$T_{\alpha\beta} = \sum P_{i\alpha} \cdot P_{i\beta} \quad (\alpha, \beta = x, y, z)$$

テンソル  $T_{\alpha\beta}$  に対して次の条件を満たす固有ベクトル  $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$  及び規格化固有値  $Q_k$  ( $k=1, 2, 3$ ) を求める。

$$Q_k = \frac{\sum (\vec{P}_i \cdot \vec{n}_k)^2}{\sum |\vec{P}_i|^2}$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1, \quad 0 \leq Q_1 \leq Q_2 \leq Q_3$$

この  $Q_1, Q_2, Q_3$  を用いて以下の量を定義する。

$$\text{Sphericity} : S = (3/2) (Q_1 + Q_2)$$

$$\text{Thrust} : T = \frac{\sum |\vec{P}_i \cdot \vec{n}_3|}{\sum |\vec{P}_i|}$$

$$\text{Planarity} : P = (Q_2 - Q_1) / (Q_2 + Q_1)$$

$\langle S \rangle$  と  $\langle 1 - T \rangle$  を  $W$  の関数としてプロットすれば、この二つの分布は同様の傾向を示す。Fig.3 に  $\langle S \rangle$  と  $W$  との関係を示したが、結果は過去の  $e^+e^-$  衝突実験と良く一致する。

### ii) $P_{T\text{in}}, P_{T\text{out}}$ 分布

i) で示した  $\vec{n}_2, \vec{n}_1$  に対する各ハドロンの運動量成分をそれぞれ  $P_{T\text{in}}, P_{T\text{out}}$  と呼ぶ。この中で、 $\sum P_{T\text{in}}^2$  分布について本研究のデータとシミュレーションとの比較をするために  $\chi^2$  検定を行った。データと2ジェット・モデルとの適合度は14.8%であり、(3ジェット+2ジェット)・モデルとの適合度は78.8%である。このことから本研究のデータは3ジェット・イベント生成を強く支持している。

### iii) クラスタ法 (Cluster Method) によるジェット解析

ジェットの多重度を調べる方法として  $e^+e^-$  実験ではクラスタ法が用いられている (Ref.6)。この方法とアイ・スキャンとにより、Fixed Target 実験としては初めて3ジェット・イベント候補を示した (Fig.4)。

### iv) エネルギー・フローの角分布 (Angular Energy Flow)

前方  $P_T$  の増大を定量的に測るものとして  $D_F$  値を定義し、荷電カレント反応1593個中  $W > 9$  ( $\text{GeV}/c^2$ ),  $P > 0.5$ ,  $3.0 < D_F < 6.0$  の条件で選別した68個のイベントについて  $\vec{n}_1, \vec{n}_2$  平面でのエネルギー・フローの角分布を求めた (Fig.5)。この分布は従来の実験 (Ref.2,3) よりも明らかな3ジェット構造を示している。また各ジェットに対する Net Charge 分布も調べた (Fig.6)。その結果,  $0^\circ < \phi_2 < 110^\circ$  のピークの Net Charge の平均値は,  $-120^\circ < \phi_2 < 0^\circ$  のピークの平均値は0.25, 後方のピークの平均値は0.59となった。このことから, 小統計ながらグルーオン, クォーク及びダイ・クォークによるジェットの分離をすることが出来た。

## 第V章 結論及びまとめ

本研究は, 世界最高エネルギーのニュートリノ・ビームを用いて行なわれた実験である。本研究ではエネルギー・フローの角分布の解析を行い, 過去の実験よりも明らかな3ジェット構造を示した。さらに, Net Charge を調べることにより, グルーオン・ジェットとクォーク・ジェットの分離を示した。

### References

- 1) P. Duinker et al., ReV. Mod. Phys. 54, 325(1982)
- 2) H. C. Ballagh et al., Phys. ReV. Lett. 47, 556(1981)
- 3) D. Allasia et al., Z. Phys. C27, 239(1985)
- 4) Ch. Berger et al., Phys. Lett. 78B, 176(1978)  
Phys. Lett. 81B. 410(1979)
- 5) D. Cords et al., DESY Report 80/092(1982)
- 6) B. Naroska et al., Physics Report 148, 67(1987)

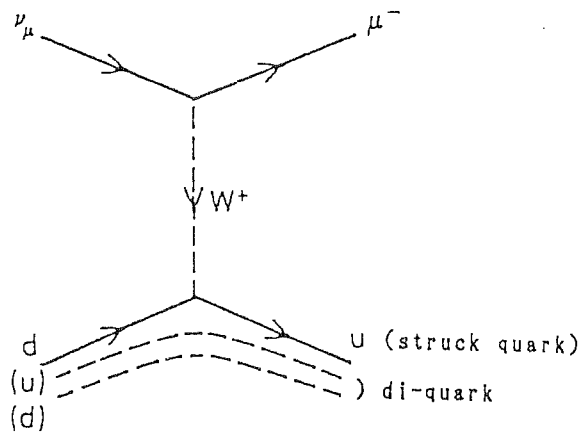


Fig.1

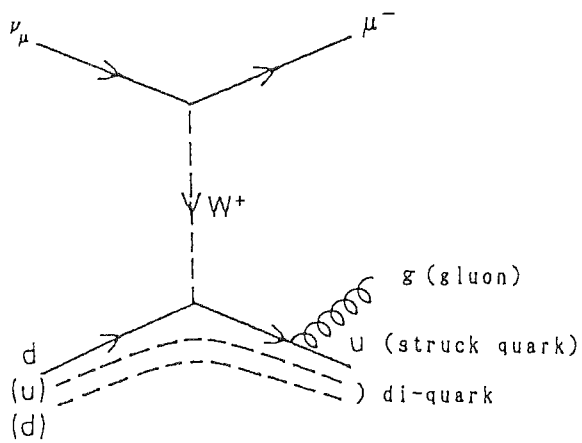


Fig.2

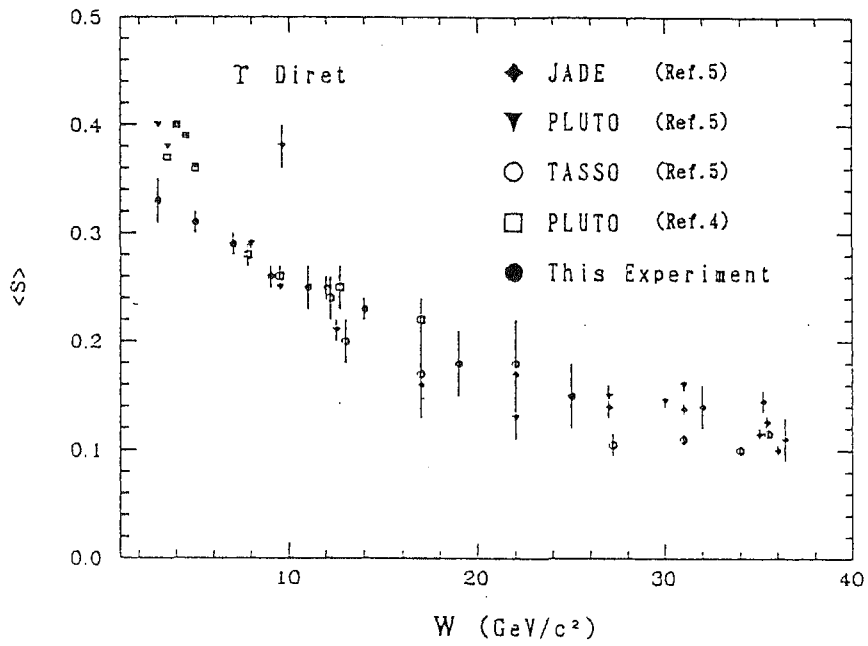


Fig.3 The Averaged Sphericity  $\langle S \rangle$  as the function  $W$



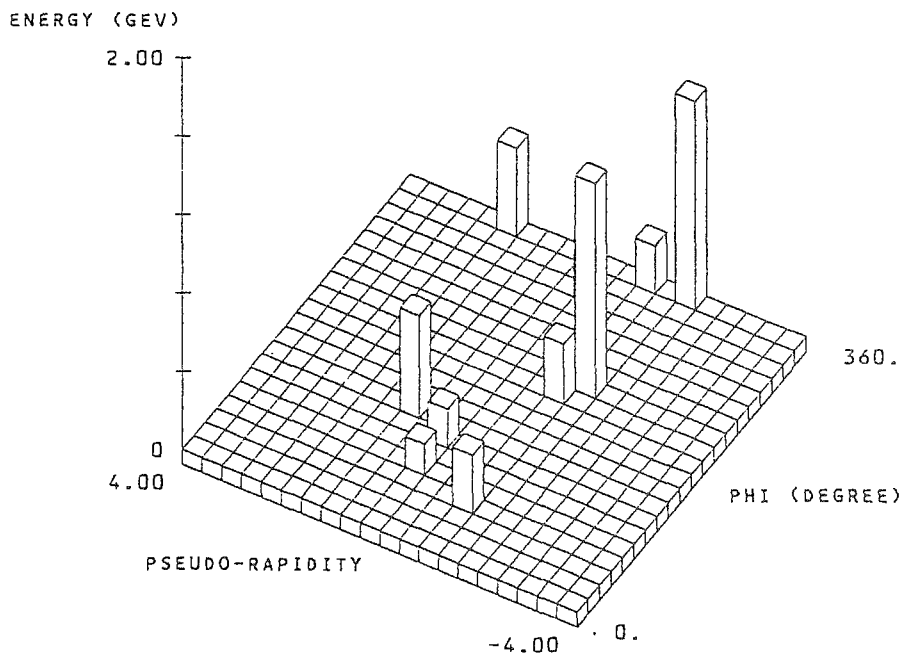


Fig.4 Lego Plot of 3-Jet Candidate

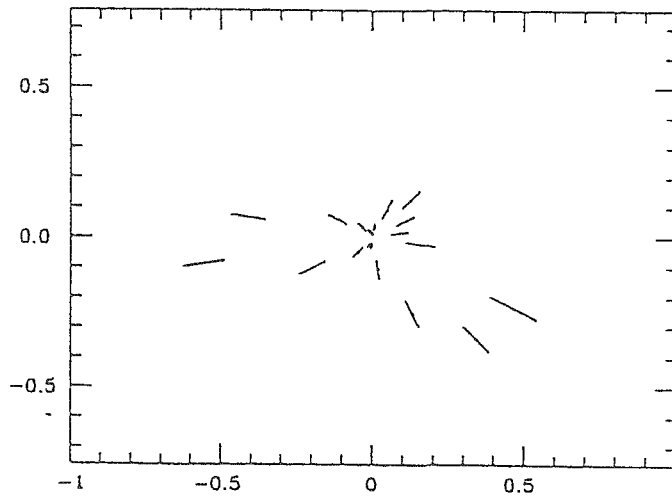
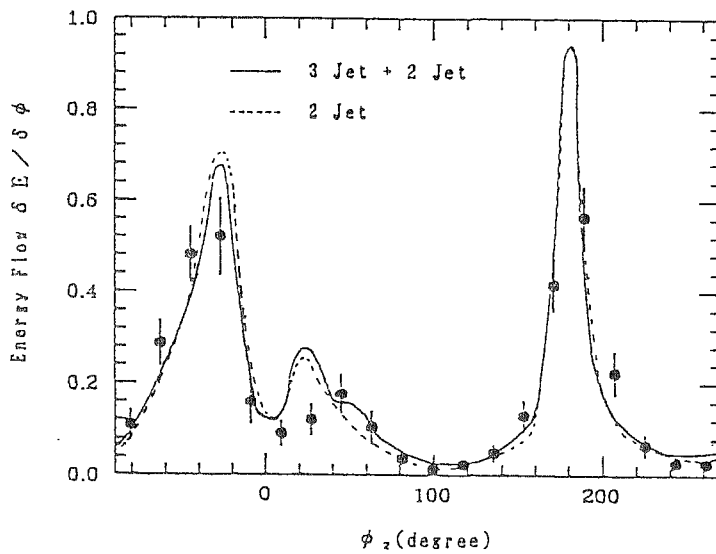


Fig.5 Angular Energy Flow ( $\delta E/\delta\phi_2$ )

The solid line is the Monte Carlo simulation of "3jet+2jet" events. The dashed line is the simulation of "2Jet" events.

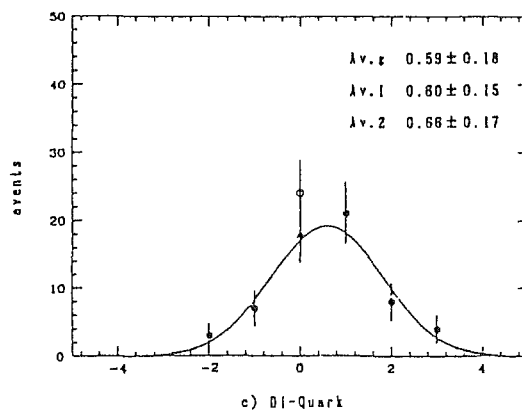
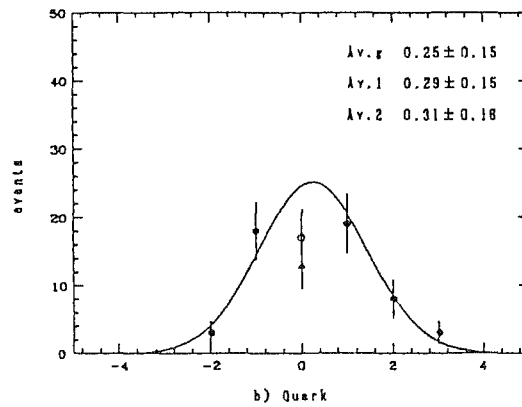
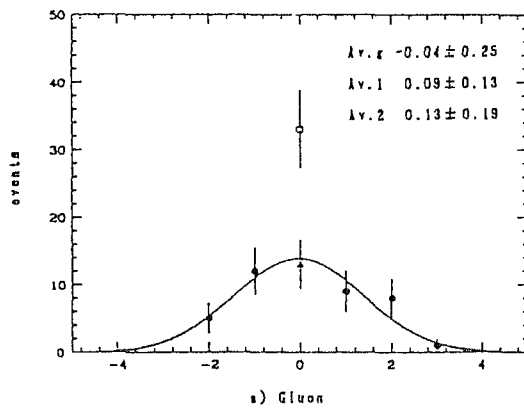


Fig.6 Net Charge Distribution

## 論文審査の結果の要旨

佐々木万亀夫提出の論文は高エネルギーニュートリノ核子反応の実験的研究である。実験は米国フェルミ研究所において1987年東北1.4m 高分解能泡箱を用いて実施され、著者も参加して行われた。本研究は、この泡箱写真を用い世界最高エネルギー領域でのニュートリノ反応の解析を行ったものである。特に、放出ハドロンジェット構造を詳細にしらべることにより、ニュートリノ反応における量子色力学効果をはじめ明瞭にとらえ論じている。

論文は5章よりなり、第I章には序論としてニュートリノと弱い相互作用の記述があり、クォーク・パートン模型並びに量子色力学について概説している。

第II及び第III章は、実験及び測定解析の概要である。実験装置並びに泡箱写真解析の手続きにつき記述があり、荷電カレント反応の選出を注意深く行い、且つシミュレーションを用いて選出されたイベントの純度等にも言及している。撮影された泡箱写真の約60%にあたる212,309枚を処理した結果、きれいなニュートリノ荷電カレント反応1,593を得た。

第IV章はこの荷電カレント反応の解析結果である。まづ、ハドロン荷電多重度についてハドロン系エネルギー $W$ との関係をしらべ過去の実験との一致を示し、横運動量分布に関しても $W$ 依存性を論じている。次のジェット構造の解析は本論文の主題である。ジェット軸として Sphericity  $S$  及び Thrust  $T$  をとり、 $\langle S \rangle$  及び  $\langle 1 - T \rangle$  を  $W$  の関数として示し、 $e^+e^-$  衝撃実験結果とよく一致するという興味ある結果を見出した。又、 $(S, T)$  面に対して垂直方向へのハドロン横運動量  $\Sigma P_{T,in}^2$  においてシミュレーション LUND による理論値と実験値とを比較し  $\chi^2$  検定の結果、3ジェットの生成を示すことができた。更に、荷電カレント反応イベントにつき、 $W > 9 \text{ GeV}/c^2$ 、Planarity  $P > 0.5$  及び  $P_T$  の拡がり  $3 < D_F < 6$  の領域にある68イベントを高純度の3ジェットとして選別して、エネルギー・フローの角分布を求めた。そこで、過去の実験データに示されていない明らかな3ジェット分布構造を得た。著者は更に、エネルギー・フロー角分布の各領域での Net Charge 分布を詳細にしらべた結果、3ジェットの構造をクォーク・ジェット、ダイ・クォーク・ジェット及びグルーオン・ジェットとして明瞭に分離することに成功した。

本研究は泡箱写真解析の特色を生かした詳細な解析を行い、高エネルギー・ニュートリノ核子反応において3ジェット構造を始めて実験的に明瞭に示し、ニュートリノ反応における量子色力学効果を確認したもので価値の高いものである。即ち、本論文は著者が自立して研究活動を行うに足る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、佐々木万亀夫提出の論文は理学博士の論文として合格と認める。