

氏名・(本籍)	なか 中	い 井	さとし 聡
学位の種類	理	学	博 士
学位記番号	理博第	1112	号
学位授与年月日	平成元年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・ニュートリノ反応による原子核効果の研究		
論文審査委員	(主査) 教授 田 中 昌		
			教授 菅 原 真 澄 助教授 山 口 晃

## 論 文 目 次

### 序 文

- I. 高エネルギー・原子核反応 (review)
  - I.A. 高エネルギー・ハドロン・原子核反応
  - I.B. レプトン・原子核深非弾性散乱と本実験
- II. 実験の概要
  - II.A.  $\mu$  ニュートリノ及び反  $\mu$  ニュートリノ・ビーム
  - II.B. 東北 1.4 m 高分解能フレオン泡箱
  - II.C. 東北 1.4 m 高分解能フレオン泡箱の光学系
  - II.D. Brown Hodoscope 及びトリガ・カウンタ
  - II.E. 実験経過
- III.  $\mu$  ニュートリノ荷電カレント深非弾性散乱のデータ
  - III.A. 模擬イベントの作成
  - III.B. 普通写真からのデータ収集

III.C. ホログラムからのデータ収集

III.D.  $\mu$  ニュートリノ荷電カレント深非弾性散乱の選出

III.E. 力学変数

IV. 原子核効果

IV.A. ダーク・トラックの性質と分類

IV.B. 荷電ハドロン多重度

IV.C. ダーク・トラックと  $X_B$  分布

IV.D. 長いダークと  $X_B$  分布

IV.E. 短いダークと  $X_B$  分布

V. 結 論

付録：長いダークと  $X_B$  分布の関係に対する C. Ishii らの説

# 論文内容要旨

## 序文

本実験は、昭和62年6月から昭和63年2月までフェルミ国立加速器研究所で行われた高エネルギー・ $\mu$ ニュートリノ・フロン原子核反応実験である。多重粒子生成における space time development の情報として生成荷電ハドロン多重度の解析を行い、更にダーク・トラック発生との関連において  $X_B$  分布を調べるという新しい方法を見出し、標的核における原子核効果の研究を行った。

## 第I章 高エネルギー・原子核反応 (review)

高エネルギー・ハドロン・原子核反応において、ハドロン・陽子反応と比較した平均荷電粒子多重度比  $\langle N_{ch} \rangle_{nA} / \langle N_{ch} \rangle_{np}$  は入射ハドロンの種類、エネルギーに依らず、ほぼ入射ハドロンの平均衝突回数にのみ依存していることが多くの実験により見出されている ( $\bar{\nu}$  universality)。このことは高エネルギー・ハドロン・原子核反応がハドロン・核子反応の単純な重ね合わせでは解釈不可能で、「核内カスケードは抑制されている」ことを示しており、多重粒子生成における space time development の重要な情報となっている。実験データを説明する理論的解釈は未だ定式化されておらず、様々な模型が提唱されている段階である。

一方、原子核標的に高エネルギー・レプトンを入射する実験ならば、入射粒子の大きさを考えなくてよいこと、入射粒子はただ1度反応すると考えられることからより明瞭なデータが期待できる。しかし、実験報告例は少なく、しかも荷電ハドロン多重度を報告した J.P. Berge らの  $\nu A$  反応実験 [1] と L. Hand らの  $\mu$ ・エマルジョン反応実験 [2] とでその結果は一致していない。J.P. Berge らの荷電ハドロン多重度のデータは  $\bar{\nu}$  反応によく一致しているが、L. Hand らのデータは  $\mu p$  反応より多くなっており、彼らは核内カスケードがはっきり起こっていると述べている。従って高エネルギー・レプトン・原子核反応での荷電ハドロン多重度の新しいデータが期待されており、本研究の主題の一つとなっている。

またレプトン・原子核反応では space time development の研究とは別に、レプトン・核子反応とレプトン・原子核反応とで核子の構造関数  $F_2$  が異なるという、いわゆる EMC 効果が観測されている。EMC 効果は発見以来、その研究の主流はいろいろな原子核標的で効果の大きさを比較すること (質量数依存性の測定) であったが、本研究では同一標的の反応を二種に分け、原子核中に EMC 効果をもたらす成分の反応と、自由核子的成分の反応とが得られた可能性について論議する。さて、S. Daté らの二成分模型 [3] では、原子核は EMC 効果をもたらす成分の exotic component (構造関数  $F_2^{ex}$ ) と自由核子的成分の free-nucleon component ( $F_2^N$ ) より成り、質量数  $A$  の増加に伴って exotic component が見出される確率  $P_{ex}(A)$  が増え、EMC 効果が質量数依存性をもつとしている。よって原子核中の核子の構造関数を  $F_2^A$  とすると

$$F_2^A = \{1 - P_{\text{ex}}(A)\} F_2^N + P_{\text{ex}}(A) F_2^{\text{ex}}$$

と書ける。これから P.G. Arnold らによる原子量依存性の測定データ [4] を元に、 $Q = F_2^{\text{ex}} / F_2^N$  を計算すると、原子核の種類に依らず、その分布はスケールリングすることが見出されている。また exotic component は EMC 効果をもたらす成分を特に選んだものなので、 $Q$  分布は EMC 効果を示すどの実験データよりも傾きが大きい。

## 第II章 実験の概要

本実験に用いた  $\mu$  ニュートリノ・ビームは加速器 Tevatron 800 GeV 陽子ビームを使って発生させたワイド・バンド・ビームである。

標的兼検出器として東北 1.4 m 高分解能フレオン泡箱を用い、標的のフレオンは平均質量数 20.7 である。本泡箱の特長は運動量測定のための普通光学系の他にホログラフィ光学系を備えていることで、これにより泡箱のほぼ全域に渡って 60~100  $\mu\text{m}$  の空間分解能を得ている。

本論文では 30,000 枚の普通写真及びホログラムの解析結果を報告する。

## 第III章 $\mu$ ニュートリノ荷電カレント深非弾性散乱のデータ

本章では普通写真及びホログラムからのデータ収集法について述べる。

普通写真からの  $\mu$  ニュートリノ反応候補のスキャニングについては、従来の泡箱写真解析とほぼ同様な手法による。しかしながら本論文では、特にダーク・トラックが重要な役割をもつ。ダーク・トラックとは原子核反応で放出される陽子、重陽子、その他原子核の破片であるが、主に陽子であることが知られている（エマルジョン実験 [5] より）。ダーク・トラックは泡箱写真上で泡密度の濃いトラックであるが、実際の定義は、速さ  $\beta < 0.69$ 、明らかに負電荷でない、崩壊していない、の条件を満たしていなければならない。

ホログラムでは、ダーク・トラックのうち普通写真では検出不可能な飛程の短いものが探査され、最小 ~ 0.4 mm まで検出可能となっている。

$\mu$  ニュートリノ荷電カレント深非弾性散乱の選出は以下の方法により行った。 $\mu^\pm$  粒子候補の選出は F-max 法を用いた。シミュレーションによると荷電カレント反応に対して識別効率は 98% である。 $P_L^{\text{vis}} > 10$  [GeV/c],  $\mu^\pm$  粒子候補が負電荷,  $P_{\text{TR}} > 1.5$  [GeV/c],  $P_L^{\text{hvis}} > 0$  [GeV/c],  $20 < E_\nu < 250$  [GeV],  $W^2 > 4$  [GeV<sup>2</sup>/c<sup>4</sup>] のカットを行い、解析に用いるイベント 449 を得た。シミュレーションによるとこれは  $\mu$  ニュートリノ荷電カレント深非弾性散乱を 97% 含んでおり、十分な純度といえる。なお、 $E_\nu$  の推定は Bonn Method による。

## 第IV章 原子核効果

荷電ハドロン多重度分布を図 1 に示す。図では  $\nu d$  反応実験のデータ [6] も同時に示してあり、両データはよく一致していると見られる。これは第 I 章で述べた L. Hand らのデータに反

し、J.P. Berge らのデータを支持するものであり、しかも彼らより広い  $W^2$  の領域 ( $5 < W^2 < 140$  [ $\text{GeV}^2/c^2$ ]) に渡っている。L. Hand らのデータとの相異については標的がエマルジョンで質量数が大きいことによる可能性があるが、少なくとも本実験により中位の原子核標的では重陽子標的と荷電ハドロン多重度が一致するほど核内カスケードは抑制されていることを示したといえる。

ダーク・トラックの運動量分布を図 2 に示す。ダーク・トラックを角分布の違いから運動量  $0.25 \text{ GeV}/c$  以下の「短いダーク」と  $0.25 \text{ GeV}/c$  以上の「長いダーク」の二種に分ける。短いダークは等方的で、主に核蒸発及び前平衡過程によるものと考えられる。長いダークは前方寄りであり、主に核内カスケードによるものであるが、その他に  $\mu$  ニュートリノ・核子反応で生成される陽子を含んでいる。

長いダークを伴わないイベント 273 と伴うイベント 176 で  $X_B$  分布を比較したところ、EMC 効果に似た傾向が見られた (図 3)。C. Ishii ら [7] によるとこれは diquark fragmentation と rescattering により説明できるとしており、図 3 には rescattering でダーク・トラックを放出する確率  $K$  を  $0.4$  とした彼らの計算を合わせて示してある。計算値は実験データとよく一致している。

こうして長いダークに関連した効果は説明されたが、次に長いダークを伴わないイベントのうち、短いダークを伴わないイベント 208 と伴うイベント 65 で  $X_B$  分布を比較してみた (図 4)。ここにも EMC 効果に似た傾向が見られる。短いダークは主に核蒸発及び前平衡過程によるものと考えられるので、短いダークの有無は  $\mu$  ニュートリノ反応の標的核子と他の核子の相関を観測していることになり、図 4 は純粋な原子核効果と考えられる。その解釈として第 I 章で述べた二成分模型がある。即ち、図 4 の傾向は過去の EMC 効果を示すどの分布よりもその傾きが大きく、二成分模型の  $Q$  分布の傾向と一致している。従って短いダークを伴うイベントを exotic component を見出したものと考えることができる。短いダークの有無により見出された原子核効果は、本研究により初めて指摘された効果である。この解析方法と関連して、原子核効果について今後の理論的研究が期待される。

## 第 V 章 結 論

本研究の結果をまとめた。

## 参考文献

- [1] J.P. Berge et al., Phys. Rev. D18 (1978) 3905.
- [2] L. Hand et al., Z. Phys. C1 (1979) 139.
- [3] S. Daté et al., Phys. Rev. Lett. 52 (1984) 2344.
- [4] R.G. Arnold et al., Phys. Rev. Lett. 52 (1984) 727.
- [5] U. Camerini et al., Progress in Cosmic Ray Physics (1952) 1.

- [6] D. Zieminska et al., Phys. Rev. D27 (1983) 47.
- [7] C. Ishii et al., Phys. Lett. B216 (1989) 409.

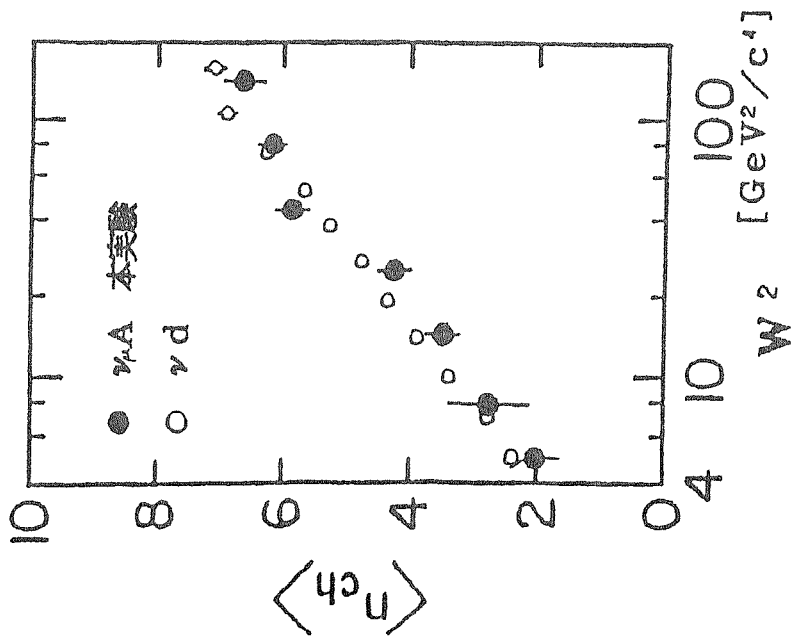


図1. 平均荷電ハドロン多重度  $\langle n_{ch} \rangle$  と  $W^2$  の関係

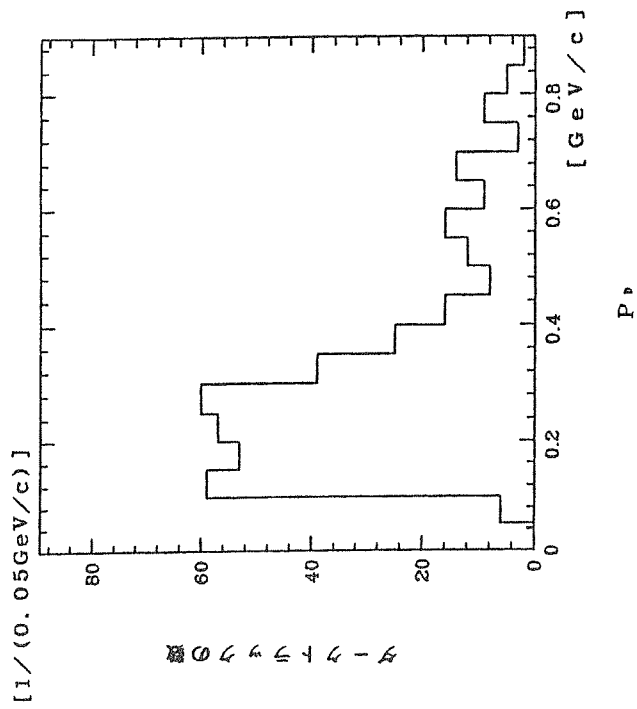


図2. ダーク・トラックの運動量  $P_0$  分布

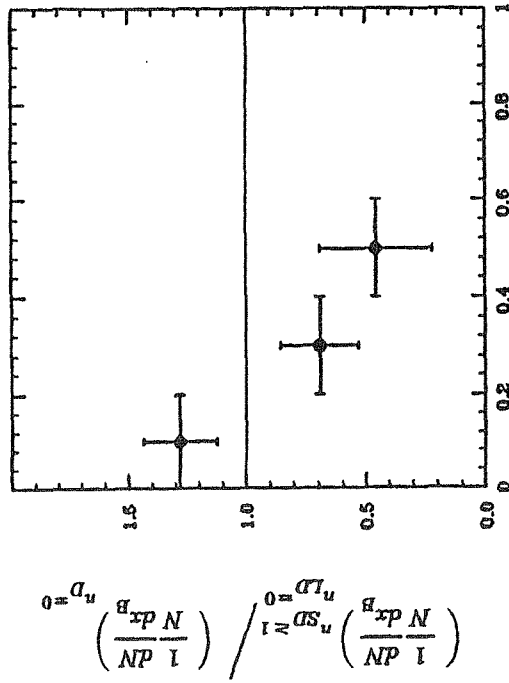


図4. ダーク・トラックを伴わないイベントと長いダークを伴わず短いダークを伴うイベントの  $X_B$  分布の比

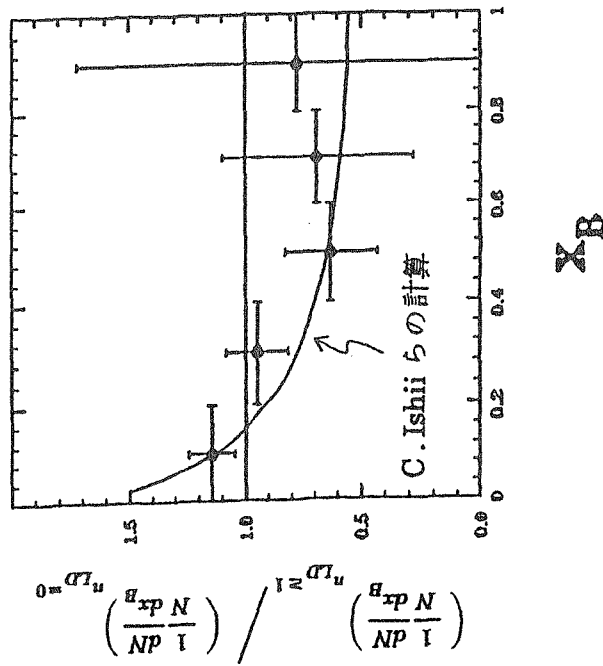


図3. 長いダークを伴わないイベントと伴うイベントの  $X_B$  分布の比, 及びそれに対する C. Ishii らの計算 ( $K=0.4$ )



## 論文審査の結果の要旨

本論文は高エネルギー・ニュートリノ原子核反応を実験的に解析し、標的核における原子核効果について研究を行ったものである。

本論文の第I章では、高エネルギー原子核反応についてハドロン核反応と、レプトン核反応に分けて対比し、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。本実験は1987年、米国フェルミ研究所において行われたものであり、入射ニュートリノ及び東北1.4 m フレオン泡箱を中心とした検出系についての詳述がある。実験中、著者は主としてホログラフィ写真を担当し、高品質の画像撮影に努めた。その結果十分な高分解能を得て0.4 mmまでのトラックが測定可能となり、本研究の主要なデータとなった。解析選別の結果、30,000枚の写真の中からきれいなニュートリノ荷電カレント反応449例を得た。

第IV章は、この荷電カレント反応の解析結果である。まづ、従来実験例の乏しい荷電ハドロン多重度について解析し、高エネルギー・ハドロン核反応での解析結果を支持する結論を出している。次いで、標的核からの高い泡密度の「ダーク・トラック」をその運動量と角分布との相関から2つに分類している。「長いダーク・トラック」( $> 0.25 \text{ GeV}/c$ )の有無についての  $X_B$  分布は、最近理論的に diquark fragmentation と rescattering によって説明されることが示されている。しかし、「短いダーク・トラック」( $< 0.25 \text{ GeV}/c$ ) に着目したとき、これらが主に核蒸発及び前平衡過程に起因すると考えられるので標的核内での標的核子と他の核子との相関を観測していることになる。本実験で、「短いダーク・トラック」の有無についての  $X_B$  分布は核内核子の二成分モデルから期待される傾向を明瞭に示していることを見出した。これは free nucleon component の他に exotic component の寄与があらわれている純粋な原子核効果を観測していると結論している。

本研究により、原子核効果の研究について同一標的核の反応を「ダーク・トラック」の有無という標的核からの情報を類別して行う斬新な研究方法を導入確立し、研究成果をあげることができた。これは高エネルギー・レプトン核反応の分野に、原子核効果研究の新らしい道を拓いたことを意味し、価値の高いものである。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。よって中井聡提出の論文は理学博士の論文として合格と認める。