

超伝導 J A C E E による  
超高エネルギー原子核衝突の共同研究

課題番号 09044089

平成9年度～平成10年度科学研究費補助金  
国際学術研究成果報告書

平成11年3月

研究代表者 杉立 徹  
(広島大学理学部 助教授)

# 目次

1. はしがき.....	1
2. 研究組織.....	2
3. 研究経費.....	2
4. 研究発表.....	3
5. 研究目的と特色 .....	5
6. 研究経緯.....	7
7. 研究成果.....	9
7.1. 入射重粒子線電荷測定装置の開発と立ち上げ.....	9
7.2. 原子核乾板写真データ解析装置の立ち上げ .....	19
7.3. 重粒子線に対するエネルギー決定法の検討 .....	24
7.4. JACEE実験のデータ解析とまとめ .....	32
8. まとめと今後の方針.....	35
9. 公表論文別刷り .....	37

## 1. はしがき

この研究は、「超伝導 JACEE による超高エネルギー原子核衝突の共同研究」という課題のもとに、平成9年度と10年度の両年にわたり科学研究費補助金国際学術研究を受けて実施したものである。この研究は、高温高密度核物質において顕著に見られると予言されるクォーク多体間の遠距離相互作用、即ち非摂動的 QCD に基づく現象を実験的に探求することを究極の目的とし、高エネルギー原子核衝突に於ける多重粒子発生機構を詳細に研究しようとするものである。その研究方法として JACEE (Japanese-American-Cooperative-Emulsion-Experiment) 国際共同実験グループが超伝導 JACEE スペクトロメータを使って収集した原子核乾板実験データの解析を行った。このデータは、全立体角に放出された全ての荷電粒子の軌跡を 1.2 テスラの磁場中で非常に精度良く原子核乾板に記録するという他のカウンター実験データにはあり得ない極めて優位な特徴を有し、事象ごとの粒子多重発生を詳細に研究するためには最良の実験データである。そのため、JACEE 実験グループの中でも特に原子核衝突現象の解明に物理的動機を共有する H. ウィルチンスキー博士 (クラコウ原子核研究所・ポーランド) を相手側研究代表者として選択し、JACEE 実験グループ (アメリカ合衆国・日本・ポーランド) と国際共同研究を構成して実施した。

## 2. 研究組織

研究代表者	杉立 徹	(広島大学理学部・助教授)
研究分担者	富永 孝宏	(広島大学理学部・助手) (現在：広島国際大学保健医療学部・助教授)
研究分担者	宮村 修	(広島大学理学部・教授)
研究分担者	笠井 聖二	(広島商船高等専門学校商船学科・助教授)
研究分担者	伊代野 淳	(岡山理科大学総合情報学部・助教授)
研究分担者	浅木森 和夫	(神戸女子短期大学総合生活学科・教授)
研究分担者	ハンリック ウィルチンスキー	(クラコウ原子核研究所高エネ部・準教授)
研究分担者	ハーバラ ウィルチンスカ	(クラコウ原子核研究所高エネ部・準教授)
研究分担者	トマス A. ハー礼	(米国航空宇宙局宇宙物理部・主任研究員)
研究分担者	高橋 義幸	(アラバマ大学・物理教室・教授)
研究分担者	マイケル L. チェリー	(ルイジアナ州立大学物理天文教室・教授)
研究分担者	ジェフリー R. ウィルケス	(ワシントン大学・物理学科・教授)

## 3. 研究経費

平成9年度	4,800千円
平成10年度	5,000千円
計	9,800千円

## 4. 研究発表

### 学会誌等

1. K.Asakimori, T.H.Burnett, M.L.Cherry, K.Chevli, M.J.Christ, S.Dake, J.H.Derrickson, W.F.Fountain, M.Fuki, J.C.Gregory, T.Hayashi, R.Holynski, J.Iwai, A.Iyono, J.Johnson, M.Kobayashi, J.Lord, O.Miyamura, K.H.Moon, B.S.Nilsen, H.Oda, T.Ogata, E.D.Olson, T.A.Parnell, F.E.Roberts, K.Sengupta, T.Shiina, S.C.Strausz, T.Sugitate, Y.Takahashi, T.Tominaga, J.W.Watts, J.P.Wefel, B.Wilczynska, H.Wilczynski, R.J.Wilkes, W.Wolter, H.Yokomi and E.Zager  
"Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra; Results from the JACEE Experiment"  
The Astrophysical Journal 520 (1998) 278 - 283
2. Y.Takahashi for the JACEE Collaboration  
"Elemental Abundance of High Energy Cosmic Rays"  
Nuclear Physics 60B (1998) 83 - 92
3. H.Wilczynski for the JACEE Collaboration  
"JACEE Results on Very High Energy Interactions"  
Nuclear Physics 52B (1997) 81 - 91
4. O.Miyamura, T.Sugitate, T.Tominaga, T.Kohno, I.Tanihata, S.Yanagita, H.Yokomi, M.Kobayashi, M.Fuki, A.Iyono, T.Kajino, T.Yuda, S.Kuramata, M.Ichihara, S.Kasai, Y.Takahashi, J.C.Gregory, M.L.Cherry, J.P.Wefel, T.A.Parnell, R.J.Wilkes, H.Wilczynski  
"Emulsion Chamber Experiments for the International Space Station"  
Proc. 25th Int. Conf. on Cosmic Rays 5 (1997) 17 - 20
5. H.Wilczynski for the JACEE Collaboration  
"Measurement of Charges of heavy Ions Using a CCD Camera"  
Proc. 25th Int. Conf. on Cosmic Rays 7 (1997) 285 - 288

6. M.L.Cherry for the JACEE Collaboration  
"Cosmic Ray Proton and Helium Spectra - Results from JACEE"  
Proc. 25th Int. Conf. on Cosmic Rays 4 (1997) 1 - 4
  
7. B.S.Nilsen, K.Asakimori, T.H.Burnett, M.L.Cherry, K.Chevli, M.J.Christl,  
S.Dake, J.H.Derrickson, W.F.Fountain, M.Fuki, J.C.Gregory, T.Hayashi,  
A.Iyono, J.Iwai, J.Johnson, M.Kobayashi, J.Lord, O.Miyamura,  
K.H.Moon, H.Oda, T.Ogata, E.D.Olson, T.A.Panell, F.E.Roberts,  
K.Sengupta, T.Shiina, S.C.Strausz, T.Sugitate, Y.Takahashi, T.Tominaga,  
J.W.Watts, J.P.Wefel, B.Wilczynska, H.Wilczynski, R.J.Wilkes, W.Wolter,  
H.Yokomi, and E.Zager  
"Cosmic Ray H and He Spectra from 2 to 800 TeV/nucleon from the  
JACEE Experiments"  
Sixth Conf. on Intersections of Particle and Nuclear Physics, May 1997.
  
8. B.Nilsen, E.Zager for the JACEE Collaboration  
"Cosmic Ray Hydrogen and Helium Energy Spectra up to the Supernova  
Shock Limit"  
The Antarctic Journal of the United States, 1997

## 口頭発表

9. 伊代野淳ほか  
SuperJACEEによるGeV領域宇宙線原子核成分の測定  
日本物理学会分科会・平成10年3月
  
10. 浅木森和夫ほか  
JACEE実験による宇宙線エネルギースペクトル  
日本物理学会分科会・平成10年3月
  
11. 富永孝宏  
JACEE実験の結果  
研究会「高エネルギー宇宙線の直接観測と宇宙線元素起源」東京大学宇宙線研  
究所・平成10年3月23日

## 5. 研究目的と特色

入射エネルギーが核子当たりGeV領域の原子核+原子核衝突に於いては、同じエネルギーの核子+核子衝突の重ね合わせで説明できない現象が起こる。これは、高エネルギーの原子核衝突では巨視的な核子（即ち少数クォーク）散乱の他に、原子核を構成する核子が保持する多数のクォークが集団としてクォーク多体散乱を起こすための現象であると理解される。従って、高エネルギー原子核衝突の研究は、クォーク多体間に働く遠距離相互作用、即ち非摂動的QCDに基づく現象を実験的に解明する有力な手段である。

この研究は、高エネルギー原子核衝突の特徴である粒子多重生成の機構解明のため、超伝導JACEEスペクトロメータが収集した原子核乾板データから宇宙重粒子線が引き起こした原子核衝突事象を選別し、事象ごとの完全な解析を行うことによりクォーク多体間に働く力学を調べることを目的とした。このデータは全立体角に放出された全ての荷電粒子の軌跡を1.2テスラの磁場中で非常に精度良く原子核乾板に記録するという他の実験データには見られない優位点を有す。

超伝導電磁石と原子核乾板を組み合わせた超伝導JACEEスペクトロメータを使って、95年9月に米国ニューメキシコ州で気球観測実験して収集したデータの解析実施する。H.ウィルチンスキー博士（クラコウ原子核研究所）と共同研究実施方法を検討し、以下の合意を得た。

### ■ 日本側

1. 入射重粒子線の電荷を自動測定するシステムを開発研究する。
2. 国内に原子核乾板の写真解析装置を立ち上げる。
3. 重い原子核宇宙線に対するエネルギー決定方法を検討する。
4. JACEE実験全体としての解析作業も継続して行う。

### ■ クラコウ側

1. 既存の設備で写真解析を実施し粒子多重度の大きな事象を探索する。
2. ビーム実験の写真解析から入射重粒子線の電荷測定法を研究する。
3. JACEE実験全体としての解析作業も継続して行う。

この合意に至る背景として、クラコウ原子核研究所は原子核乾板を使った高エネルギー粒子物理学の研究分野において、欧州の中でも由緒正しい研究所であり、現在でも極めて熟練したスキャナーが常時4名程度、H.ウィルチンスキー博士の指導のもとで仕事している。しかし、その分析機器は20～30年前の旧式のものであり、新しい技術を導入するのはなかなかの困難がある。また、大規模なシミュレーション計算を必要とする検討も直ちに取りかけられる状況ではない。一方、日本国内の研究メンバーを勘案すると、スキャナーを雇用して研究を進めるような状況にないことは明らかであるが、小型計算機を有効利用した自動解析装置を立ち上げることに困難は見られない。また、大型のシミュレーション計算を行うリソースを探し出すことも比較的容易である。即ち、両国の研究機関で最も得意とする項目を分担することで全体として大きな成果を上げることが期待でき、国際共同研究として最適な形態をとることができた。

日本側の共同研究の実施方法として下記のように計画し、結果的にほぼ計画通りに進展させることができた。

- 広島大学理学部に電荷決定のための自動測定装置を立ち上げる。
- 岡山理科大学に飛跡追跡のための写真解析装置を立ち上げる。
- 神戸女子短期大学と高知大学でエネルギー決定法の検討を行う。
- JACEE実験の解析を広島大学理学部で継続する。

## 6. 研究経緯

### 平成9年度

- 95年の初フライトで収集した超伝導JACEEの原子核乾板データを使い、高エネルギー原子核衝突の機構解明に向けた研究をスタートするために、杉立徹と笠井聖二は8月中旬から米国3研究機関を訪問し、高橋義幸(UAH)、J.ウィルケス(WU)、T.パーネル(NASA)、M.チェリー(LSU)他と会見し、研究方針・手段、測定技術・改良点について意見交換した。その結果、H.ウィルチンスキー（クラコウ原子核研究所）の解析現状をスタートポイントにし、UAHの全自動写真データ解析装置を使って解析を継続し、準備が出来次第順次、広島大学および岡山理科大学へ移行するのが最善策であるとの結論を得た。
- 杉立徹は10月クラコウ原子核研究所を訪問し、原子核衝突機構解明の研究へ向けた写真データ解析状況および方針について、H.ウィルチンスキーとB.ウィルチンスカと意見交換した。その結果、同研究所で行ってきた解析をお互いに協力して更に推進していく合意を得た。
- 1次宇宙線の大気上空における崩壊補正量を定量的に評価するため、8月中旬から9月中旬にかけて富永孝宏と大学院生2名をUAHへ派遣した。W.フォンテイン(NASA)他と共同してシミュレーション計算コードの構築と計算を行った。
- 96年のデータ解析状況の総括的な評価、今後の研究方針、および責任分担体制を検討するため、M.チェリーとH.ウィルチンスキーを招聘し、広島大学理学部において共同研究全体会議を12月9日から12日まで開催した（参加者：国内10名、米国4名、ポーランド1名）。
- この間、JACEE実験データの解析と研究成果公表作業も精力的に行い、1編の論文を投稿（現在印刷中）および4編を国際会議（第25回宇宙線国際会議および第6回素粒子原子核国際会議）へ寄稿した。

## 平成10年度

- 高エネルギー原子核衝突の特徴である多重粒子生成の機構解明のため、超伝導 JACEE スペクトロメータが収集した原子核乾板データから宇宙重粒子線が引き起こした原子核衝突事象を選別し解析作業を実施した。このデータは全立体角に放出された全ての荷電粒子の軌跡を1.2テスラの磁場中で非常に精度良く原子核乾板に記録するという他の実験データには見られない優位点を有す。本年度は原子核乾板の自動解析システムの国内立ち上げの実施、および入射重粒子のエネルギー決定と粒子識別に不可欠なエネルギー損失の解析手法の確立に重点を置いた。
- 杉立徹は5月、クラコウ原子核研究所を訪問し、H.ウィルチンスキーと前年度の研究進捗状況を相互評価すると共に本年度の研究重点項目と手順について議論し合意を得た。松本高明（広大院）は広島大学にPC制御の写真データ自動取込システムを構築し、入射粒子線のエネルギー損失の解析を行った。富永孝宏と松本高明他は9月クラコウ原子核研究所を訪問し、その解析手法と結果につき詳細な技術的意見交換を行った。
- アラバマ州立大学(UAH)の自動写真データ解析装置の機能を岡山理大に既設の写真解析装置に移行するため、11月に富永孝宏と伊代野淳をUAHおよび米国航空宇宙局(NASA)に派遣し、技術資料を入手すると共に、T.パーネル(NASA)他と打ち合わせを行った。
- 大気上空における1次宇宙線の散乱崩壊量を定量的に評価するために、11月、浅木森和夫をNASAに派遣しW.フォンテイン(NASA)他とシミュレーション計算の実施とその結果の検討を行った。
- 7月、M.チェリー（ルイジアナ州立大）とJ.ウィルケス（ワシントン大）を招聘し、国際会議COSPARに公表する研究成果を纏める共同作業を広島大学理学部で実施した。また、JACEE実験データの解析結果も併せて成果公表を精力的に推進し2編の論文を学術誌に公表した。

## 7. 研究成果

### 7.1. 入射重粒子線電荷測定装置の開発と立ち上げ

原子核乾板は透明プラスチック板に乳剤を数10  $\mu\text{m}$ ～数100  $\mu\text{m}$ の厚さで塗布してゼラチン状に固化したものである。高エネルギー原子核がこの乳剤層を通過するとき、乳剤を構成する原子核が作る電磁場と自己の電荷が電磁相互作用を起こし運動エネルギーを極少量だけ失う。これが電離損失であり、その失うエネルギー量は Bethe-Bloch の式として知られており、以下のように表される。

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

表記法は一般的であるのであえて記述しないが、要するに、電荷 ( $z$ ) を持つ高エネルギー原子核が入射した場合、単位長さあたりに損失するエネルギー量は電荷の自乗に比例する。一方、乳剤層で失われたエネルギーの一部は臭化銀をイオン化するのに使われ、その結果、現像過程において銀粒子集団 (grain) の析出が起こる。従って、粒子飛跡に沿ってできた銀粒子集団の数を数えると、その飛跡を作った原子核の電荷 ( $z$ ) を知ることができるわけである。この方法を grain counting 法と呼ぶ。軽い原子核には有効な方法であるが、電荷が大きくなるに従って、その自乗で銀粒子集団の生成数が増加するわけであるから、電荷が4を越えると隣り合う銀粒子集団がつながりはじめ、非常に熟練したスキャナーにおいても精度良い計数は困難になる。まして、訓練を受けていない大学院生などが意味のある測定を行うことなど不可能である。

電荷が大きな原子核の同定は、多くの場合、 $\delta$ 線を計測して行われてきた。 $\delta$ 線とは Energetic knock-on electron と呼ばれ、乳剤を構成する原子の軌道電子が入射荷電粒子の電荷と電磁相互作用を起こし、入射荷電粒子からエネルギーを獲得し軌道外に飛び出す電子のことを総称して指す。飛び出すエネルギーは低いものがとても多い。あるエネルギー以上の $\delta$ 線の発生数密度を計算すると以下のように与えられる。

$$N_{\delta}(E > E_{\min}) = 2\pi \frac{NZ}{A} \frac{z^2}{mc^2\beta^2} \left( \frac{1}{E_{\min}} \right)$$

エネルギー (E) を獲得して飛び出した電子も、乳剤中を通過するとき前述の電離損失を起こしエネルギーを徐々に失いながら最後に止まる。この電子が通過した軌跡には、損失したエネルギーに相応の銀粒子集団が作られる。そのため、入射荷電粒子が通過した飛跡に沿って髭のような薄い  $\delta$  線の飛跡を見つけることができる。あるエネルギー以上、即ちある飛程長以上の  $\delta$  線の発生数分布は以下のように与えられる。

$$N_{\delta}(R > R_{\min}) \propto \frac{z^2}{R^{1/n}}$$

従って、ある飛程長以上の  $\delta$  線の発生数を計測することにより、入射荷電粒子の電荷数を同定できることになる。この方法を delta-ray counting 法と呼ぶ。しかし電荷があまり大きくない入射粒子の場合、発生する  $\delta$  線の数が少ないため入射飛跡に沿って 1 mm 以上の追跡を余儀なくされる。この方法も、大学院生のような初心者にはとても精度の良い計測は期待できない。

いずれの方法も精度良い、信頼できる結果を得るためには熟達したスキャナーの作業が必要である。本研究の相手国側研究機関であるクラコウ研究所のように、専門の熟達したスキャナーを複数抱える場合は良いであろうが、日本国内で小数の研究者により研究を推進するためには幾つかの欠点を有する。まず客観性に欠けると言う点である。人間が数えると言う方法では個人差が生じ、また再現性に乏しいと言う事は明らかである。クラコウ研究所では、熟達したスキャナーによりクロスチェックしているため問題は少ないが、その分時間がかかることは否めない。精度を高める方法として、統計誤差を減らすために飛跡の計測距離を長く取るという方法しかなく、 $\sigma_z \approx 1$  を達成するためには 1mm 以上の飛跡に沿ってトレースしなければならない。これは熟達したスキャナーが膨大な時間を掛けて行うしかなく、今まで以上の測定精度を実現する事は現実的には不可能と言える。また、宇宙線実験では迅速に解析を進め、統計数を確保すると言う事が重要であるが、その点においても現在の方法では作業効率が極端に悪い。特に中重核の電荷測定は grain

counting を行う事が困難であると同時に delta-ray counting 法も  $\delta$  線の発生数が少なく有効な測定法が存在しないと言う事も大きな問題である。

広島大学理学部で実施した研究の目的は、これらの問題を解消し、さらに高い測定精度を実現し得る方法の一つとして、CCDカメラと画像解析による半自動化した光吸収率測定システムの開発を行った。

今回の電荷測定に用いた装置は、Nikon製3眼式光学顕微鏡、Nikon製TVズームCマウントアダプター、Sony製CCDカメラ[XC-75]、サイバーテック製ビデオキャプチャCT3000A(8bitモノクロA/D 640x480 resolution)から構成される。装置の写真と構成を図1～3に示す。原子核乾板中の飛跡は、光学顕微鏡の対物レンズ、Cマウントアダプターを通して、CCDカメラにより撮影され、画像データはビデオキャプチャにより8bitデータとしてPCに取り込まれる。今回用いた対物レンズ×60倍の場合、 $0.2165\mu\text{m}/\text{pixel}$ で640x480画素の画像入力が可能である。これは、grain直径 $\sim 0.5\mu\text{m}$ 、飛跡の幅 $\sim 1\mu\text{m}$ である事を考えれば十分な精度であると同時に、作業効率の良い視野の広さ約 $140\times 100\mu\text{m}$ を実現している。顕微鏡ステージを含めた全てのコントロール及び、取り込み画像の解析はPC用に新たに開発したGUIプログラムで行った。GUIプログラムはVisual C++(Microsoft)、MATLAB(MathWorks)により記述し、半自動電荷測定を可能にする。

欧州高エネルギー研究所(CERN)のSPS加速器を使ったEMU04実験で収集した核子当たり $200\text{GeV}/c$ の高エネルギー酸素原子核が原子核乾板と平行(y軸)に入射したときの飛跡の様子を図4に示す。直線状の濃い線は銀粒子集団が析出した入射原子核の飛跡である、横方向にジグザグに伸びた線が $\delta$ 線の作った飛跡である。各画素の濃淡は透過光強度を示しており、図5に3次元画像を示す。この画像を入射原子核の飛跡に沿ってy軸方向に投影したものをプロフィール図(図6)と呼ぶ。飛跡はある強度のバックグラウンドの上に乗った鋭いピーク(本当はディップであるが、上下逆さまに見て頂きたい)として観測できる。ピークの強さは入射原子核が損失したエネルギーの関数であるはずだから、この強さを計測することにより入射原子核の電荷を決定することができるはずである。ピークの強さの計測はその手法を明確にすることにより客観的に簡単に行うことができる。問題はその関数を如何に知るかである。

この研究では、高エネルギー素粒子実験等では常套手段となっているモンテカルロシミュレーションプログラムを駆使してその関数の決定を試みた。モンテカルロシミュレーションプログラムの構築には、高エネルギー実験業界で最も信頼性の高い Geant3 を利用した。一般的な高エネルギー実験等で行うカウンター実験のシミュレーションと異なり注意しなければならないことは、顕微鏡で見る飛跡は、ひとつひとつの銀粒子集団 (grain) による光の吸収 (obscuration) の結果であり、必ずしもその箇所で失ったエネルギー損失量に等しいわけではないことである。そこで、この研究では、失われたエネルギー量からその箇所にできる銀粒子集団を忠実にシミュレートすることが大問題であったが、図7に示すように私達はこの研究で見事にそのシミュレーションに成功した。図7は、入射原子核の電荷が2, 8, 16, 26の4種類の場合を示している。入射飛跡に沿った銀粒子集団の生成や $\delta$ 線の発生とその飛跡が見事にシミュレートされている。バックグラウンドを適当に付加すると実写真と全く見分けがつかなくなる。

モンテカルロシミュレーションプログラムの構築により、いかなる入射原子核種と入射エネルギーと入射角度の組み合わせでも、実原子核乾板データと全く同じ手法で解析できるシミュレーションデータを生成することに成功した。このシミュレーション実験データが実原子核乾板データをどの程度良く再現しているかを、前出のEMU04実験データを使って検証を行う。検討した電荷は、入射ビームである酸素原子核 ( $z=8$ ) と原子核衝突により生成された $\alpha$ 粒子 ( $z=2$ ) の2点である。本シミュレーション計算が予測する光吸収率 (obscuration) を入射原子核の電荷の関数として図8 (図中の上方の曲線) に示す。詳しく見ると、 $z=4$ までは $z^2$ の立ち上がりと $z=5$ 付近で銀粒子集団密度の飽和現象が見られ、 $z=7$ 付近とそれ以上では $\delta$ 線発生による光吸収率の増大が見られる。EMU04実験の実験値を2点 ( $\diamond$ ) 与えているが、シミュレーション計算と非常によい精度で一致している。図8の下方の曲線に載るデータ点は、D.Kudzia達が測定した光吸収率である。測定条件が異なるため光吸収率の絶対値は異なるが、本シミュレーション計算が予測する光吸収率の関数は、D.Kudzia達の実験データを良く再現していることが分かる。電荷分解能は電荷に対する光吸収率の変化量であるので、電荷が小さいほど良く、大きくなるに従って劣化する。電荷 $z=5$ 付近は光吸収率の変化量が特異的に小さいので、電荷分解能は比較的悪いことが分かる。

入射角度が変わると光学顕微鏡での銀粒子集団の見え方が変わるため光吸収率が変化し、その結果、電荷分解能が変わる。原子核乾板に対して完全に垂直（入射角0度）に入射した場合、顕微鏡で観測される像は真っ黒なただひとつの点である。銀粒子集団は光学軸方向に重なり合い、光の吸収は飽和してしまい、その測定から正しい電荷数の情報を得ることは原理的に困難となる。従って、原理的に入射角が小さいほど電荷分解能は劣化する。入射原子核飛程を100  $\mu\text{m}$ 測定した時の入射角度ごとに電荷分解能の検討を行った。図9に4つの入射角（天頂角）領域に分けた電荷分解能の入射電荷依存性をプロットする。入射電荷に対して電荷分解能はほぼ比例することがわかり、入射角の小さな（10度～30度）な場合を除くと、 $z=8$ において $\sigma_z \leq 0.3$ を達成しており、従来の熟練したスキャナーによる grain counting 法や delta-ray counting 法による $\sigma_z \approx 0.6$ に比較して、大学院生程度の初心者が極めて簡単に測定を行った場合でもこれを充分上回る精度を達成することができるようになった。この成果は、超伝導JACEE実験の原子核乾板中に記録された一次入射原子核ビームの電荷測定そして原子核種同定に極めて重要な寄与をするものである。なお、入射角の小さな領域（10度～30度）のシミュレーション結果に関しては多少の疑義があり、計算精度を含め再度検討する必要があることが判明しているため、この結果にとらわれないで頂きたい。

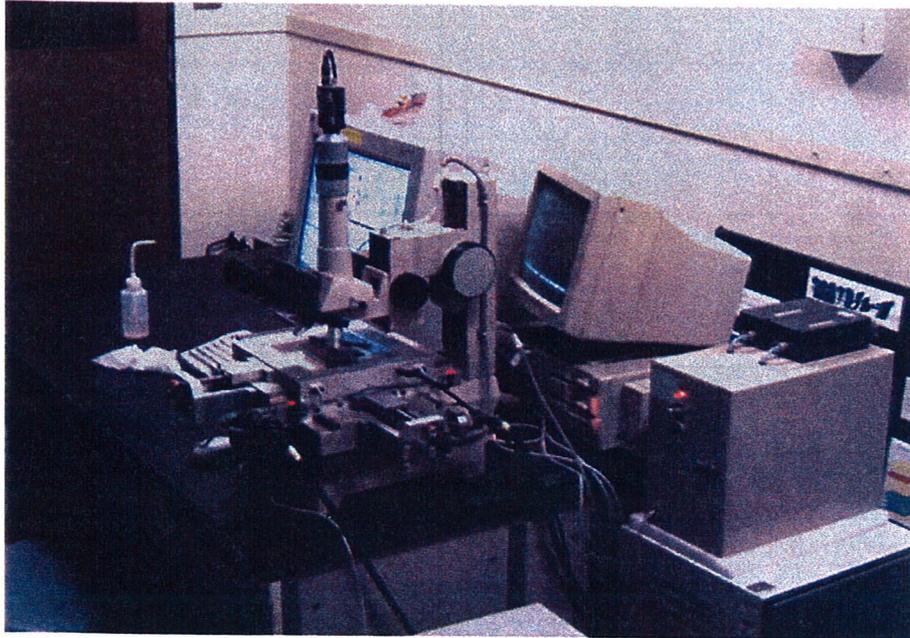


図1. 広島大学理学部に立ち上げた入射重粒子線電荷測定装置

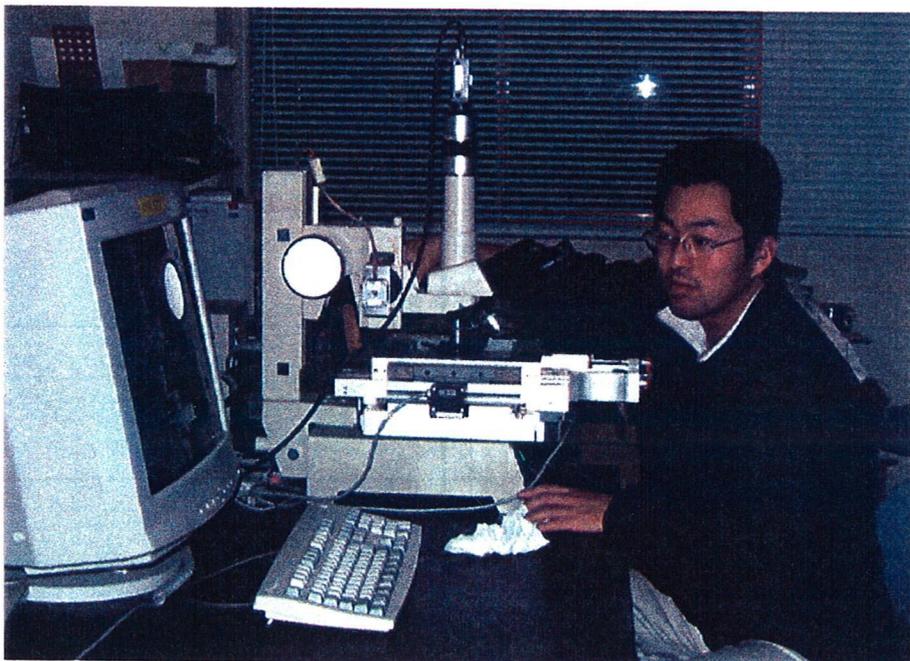


図2. 測定中の研究協力者・松本高明・広島大学大学院理学研究科

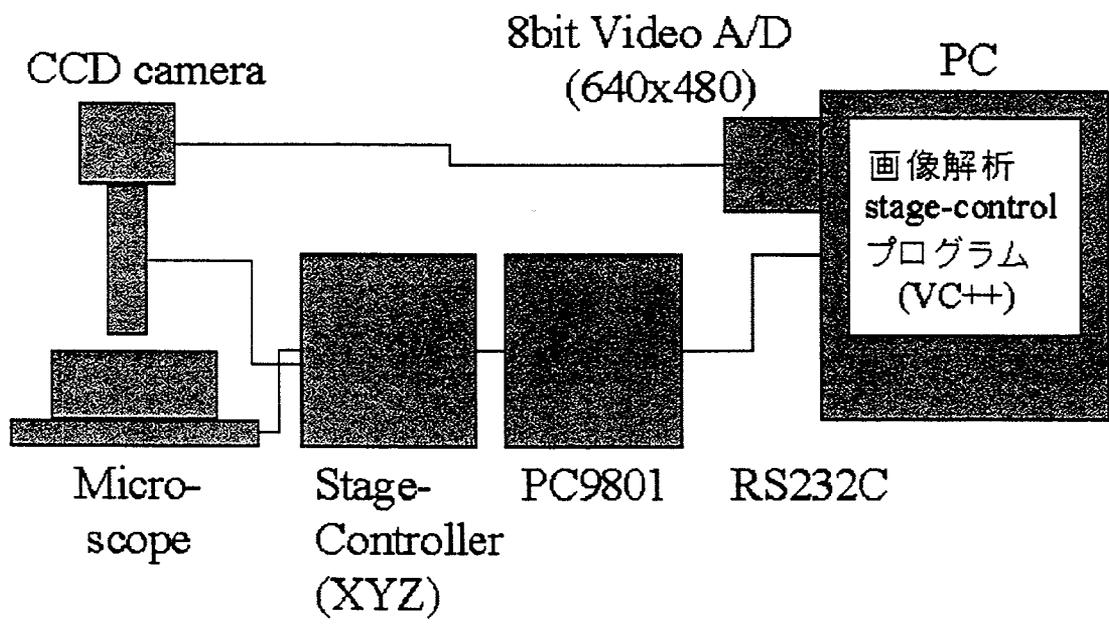


図3. 開発したシステム構成図

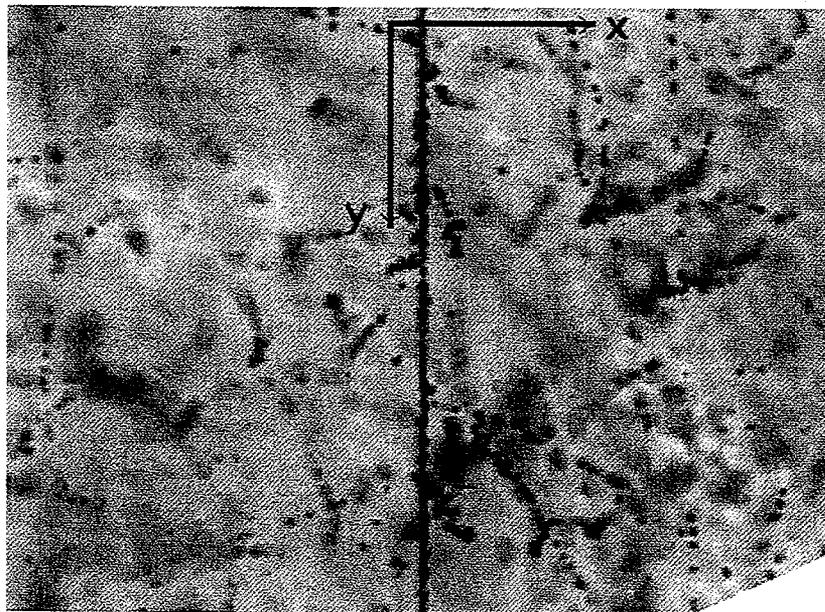


図4. 入射した重粒子線の飛跡

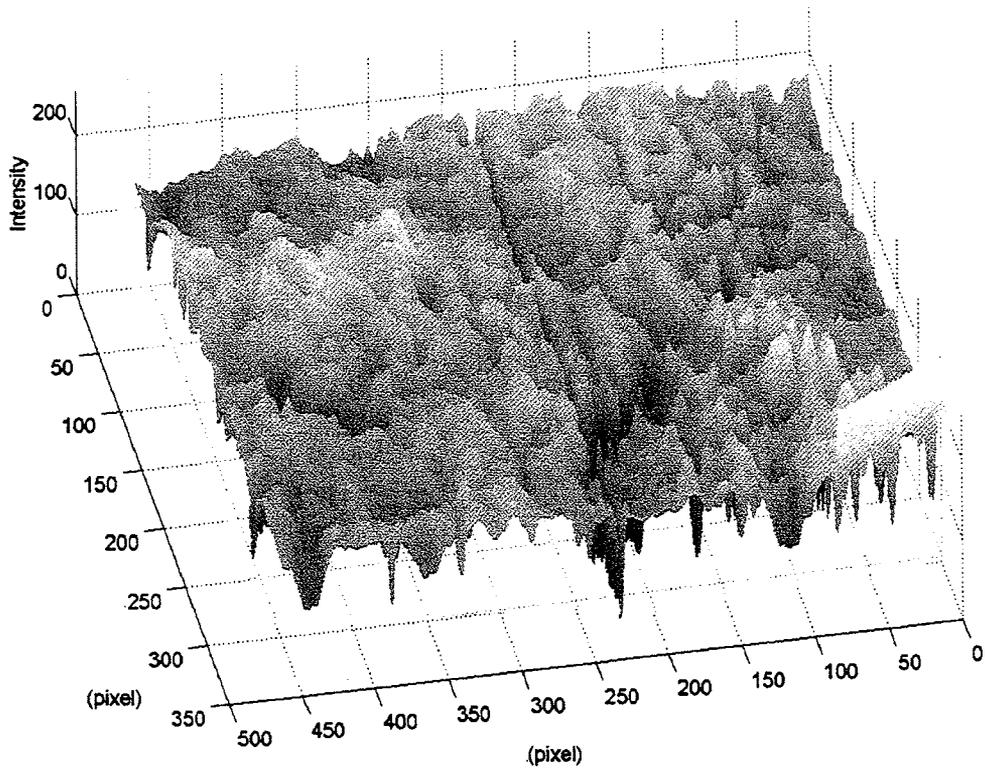


図5. 原子核入射飛跡の3次元画像

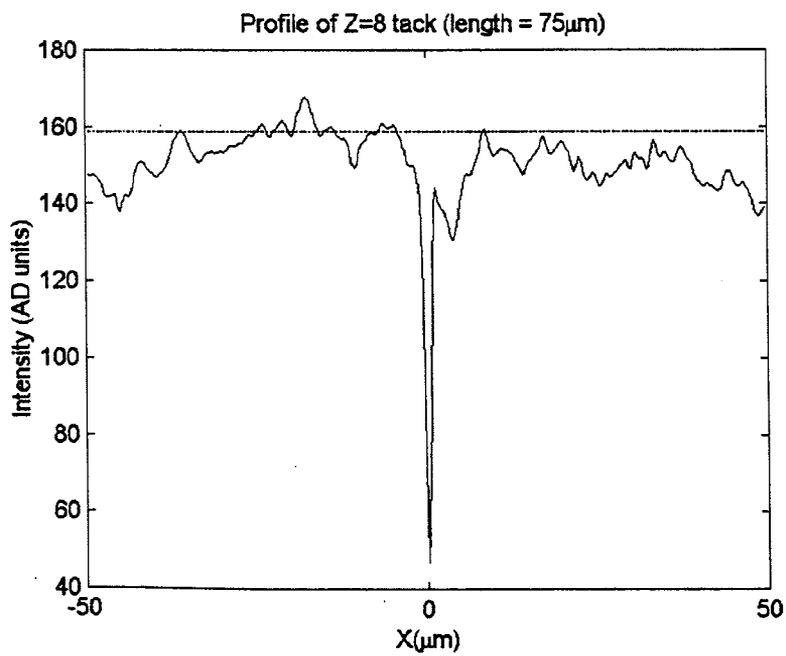


図6. 入射軸方向に沿ったプロフィール図

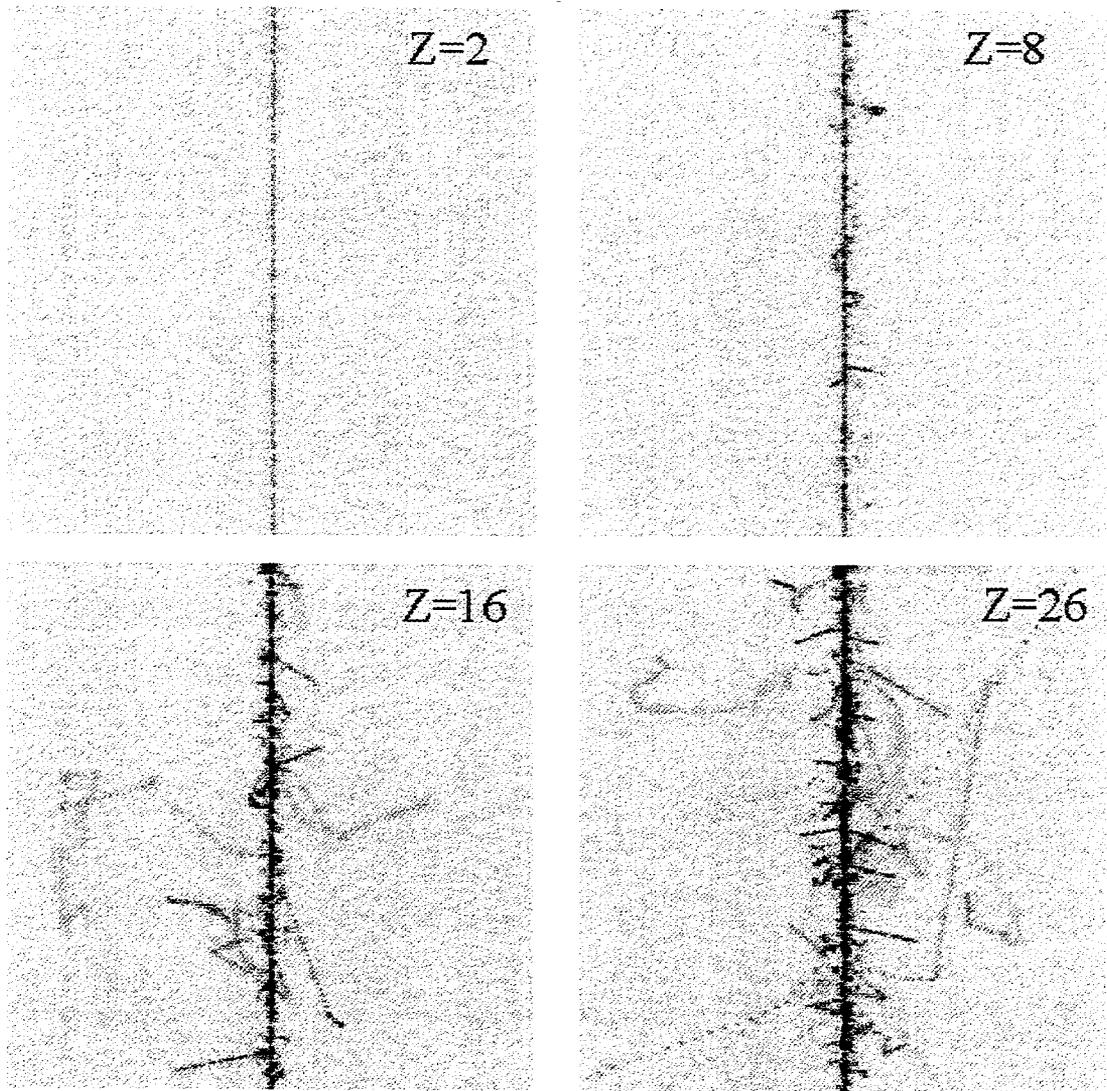


図7. シミュレーション事象の飛跡画像

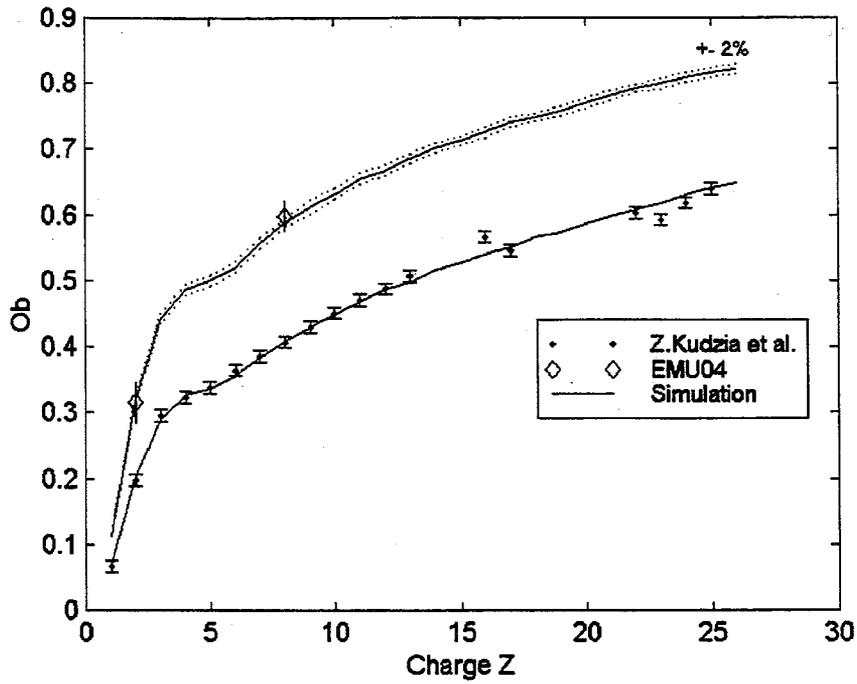


図8. 光吸収率 (obscuration) の実験値とシミュレーション結果の比較

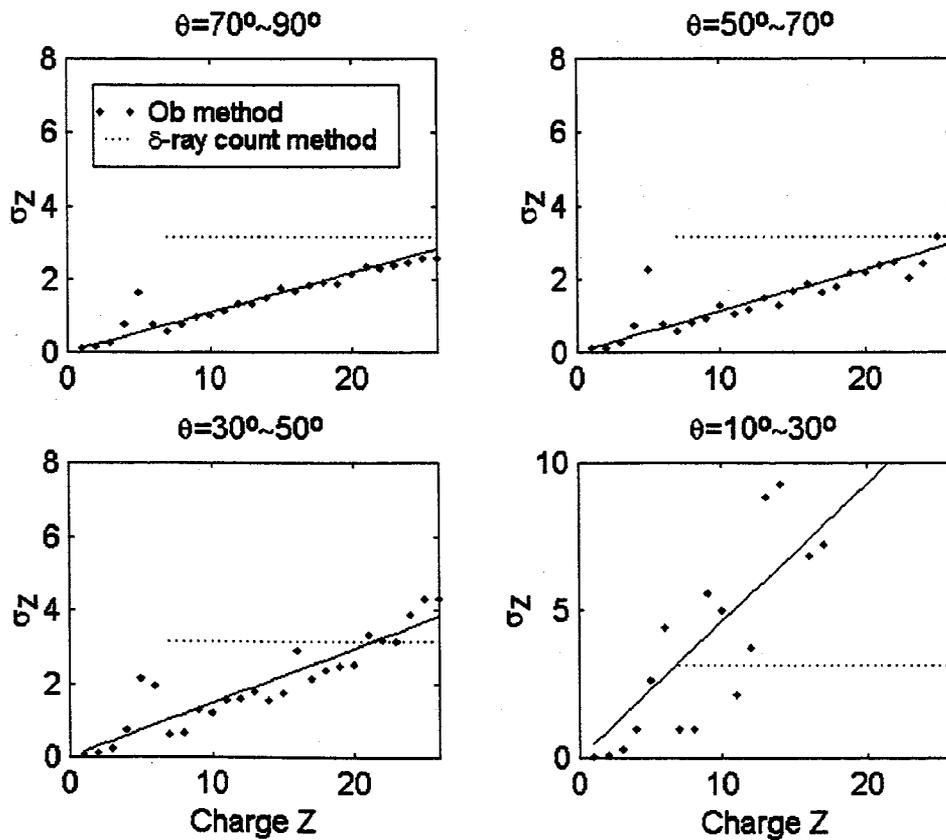


図9. 電荷分解能の入射電荷および入射角度の依存性

## 7.2. 原子核乾板写真データ解析装置の立ち上げ

超伝導JACEE実験に使われた気球搭載用超伝導電磁石は、1990年、山本明博士 (KEK) により開発製作された。国内で励磁テストを経て、94年に米国宇宙航空局 (NASA) マーシャル宇宙センターにおいてゴンドラや衝撃サポート他一連の気球飛行に必要な機器の籐装を行った。電磁石は直径0.8mの超伝導ソレノイドコイルにより永久電磁石モード520Aで中心磁場1.2Tを発生する。250ℓの液体ヘリウムサーバを装備し、10日間のフライドが可能である。全自重は450kgであり、電磁石内に搭載する原子核乾板までの通過物質量は3.5g/cm<sup>2</sup>である。電磁石内の測定器用空間として直径85cm、奥行き130cmが使用可能であり、50×50×40cm<sup>3</sup>の原子核乾板ブロックを2個搭載する。

1995年9月米国ニューメキシコ州 Ft.Sumner において処女飛行を行った。電磁石を430Aの永久電流モードで励磁し、測定器用空間に1.02Tの磁場を発生させた。約17時間の観測飛行を実施し無事回収した。この処女飛行には、原子核乾板ブロック1個を搭載した。このブロックは、一次入射原子核宇宙線を同定するBT (Beam Telescope) 部と一次原子核と標的原子核とが衝突して生成する二次荷電粒子を測定するMAGIC (Magnetic Interaction Emulsion Chamber) 部、最下層部に原子核衝突により生成した電磁エネルギー成分を測定するEMCAL (Emulsion Chamber Calorimeter) 部から構成した。このテスト飛行で期待される事象数を既知の一次宇宙線のスペクトルから計算すると以下の表となり、100GeV/c程度までの一次原子核宇宙線の収量は充分期待できる。

	5 GeV/核子	50 GeV/核子	500 GeV/核子
炭素-酸素	790	15	0.3
ネオン-硫黄	850	17	0.3
鉄近傍	170	6	0.2

BT部は、一次入射原子核の飛跡を磁場中で精度良く測定し、その旋回半径から運動量を直接測定するとともに、固体飛跡検出器によりその電荷を測定する部分である。原子核乾

板と固体飛跡検出器であるCR-39を数mmから数cmの間隔で積層させ、垂直方向に20cmの有感層を形成した。CR-39は、電荷6以上の原子核をエッジピットとして記録し、エッジピットの大きさから電荷量を精度良く決定することができる。原子核乾板を使って高位置精度で飛跡検出することにより、運動量領域としてTeV/cまでの一次入射原子核の運動量を決定することができる。MAGIC部は、標的物質として500 $\mu$ mの鉛板の下流に数100 $\mu$ mから数mmの隙間で原子核乾板を積層したもので、磁場中の二次荷電粒子の飛跡を追跡することによって運動量を決定する。原子核乾板は厚さ300 $\mu$ mのアクリル板両面に50 $\mu$ mの乳剤を塗布して製作した。原子核乾板の位置検出精度が非常に高いので、500GeV/cまでの荷電粒子の運動量を決定でき、仮にTeV領域の一次入射原子核ビームがあったとしても十分な解析能力を有する。EMCAL部は、鉛板と原子核乾板とX線フィルムを交互に重ね合わせて、垂直方向に総計8輻射長の厚みを持たせた。X線フィルムに記録された黒化度から高エネルギー入射事象を選択すると共に、各層の黒化度から電磁シャワーの遷移曲線を求める。この遷移曲線からEMCAL部に吸収した電磁成分のエネルギー量を測定し、一次入射原子核の全エネルギーを算出する。

一次原子核宇宙線と二次荷電粒子の飛跡を原子核乾板あるいはCR-39を用いて追跡することがこの研究の課題である。私達は、欧州高エネルギー研究所のSPS加速器からの原子核ビームを使ったEMU05実験およびEMU16実験を実施し、岡山理科大学の自動駆動台型光学顕微鏡を使って解析を行っており、この方法と設備を本研究に導入することにした。解析の手順として技術的に事象を最も特定しやすい、大多重度の二次荷電粒子生成を含む原子核+原子核事象の発見につとめた。しかし残念ながら原子核乾板中で解析の対象となる大多重度事象は発見できなかった。これは一次原子核宇宙線の入射数は上記程度あるものの、原子核乾板との相互作用の断面積から予想されるものである。BT層の解析は、BT最上層に入れたX線フィルムHRLのマッピングをおこない、入射角度と入射位置を測定した。HRLフィルム上の飛跡の黒化度から入射原子核の電荷を予想し、下層の原子核乾板層及びCR-39層へ追跡を行う。HRLフィルムから入射角度と電荷を精度良く決定することが、下層への追跡に重要である。米国航空宇宙局マーシャル宇宙センターのT.パーネル主任研究員と協力し、同所のMicro-Densitometerを使用した25 $\times$ 25 $\mu$ mのスリット幅でHRLフィルムの全面スキャンを終了した。その後、ワシントン州立大学のJ.ウィルケス教授と協力し、X線フィルム解析装置でデータの解析を行った。現在、岡山理科大学の大型駆動台型光学顕微鏡を立ち上げ(図10)、ひとつひとつの一次原子核宇宙線事

象についてX線フィルムのスキャン結果（図11）をスタートポイントにして、原子核乾板層にまで飛跡の追跡を行いつつある。図12は、同装置に顕微鏡対物レンズ100倍を取り付け、入射重粒子線の飛跡を衝突地点付近まで追跡した画像である。



図10. 岡山理科大学に立ち上げた大型駆動台付き原子核乾板写真データ解析装置

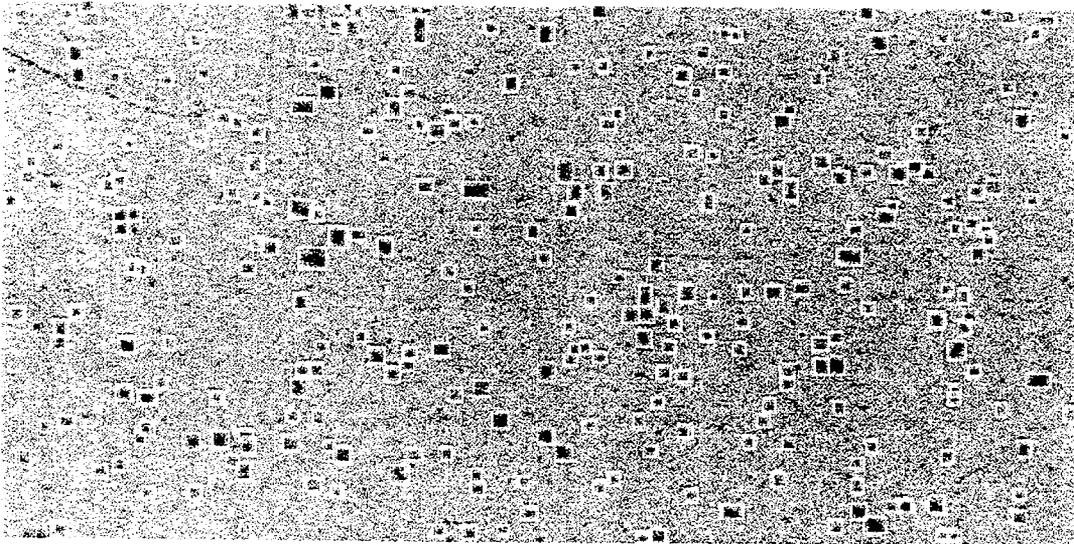


図 1 1 . X線フィルムに記録された入射重粒子線の飛跡

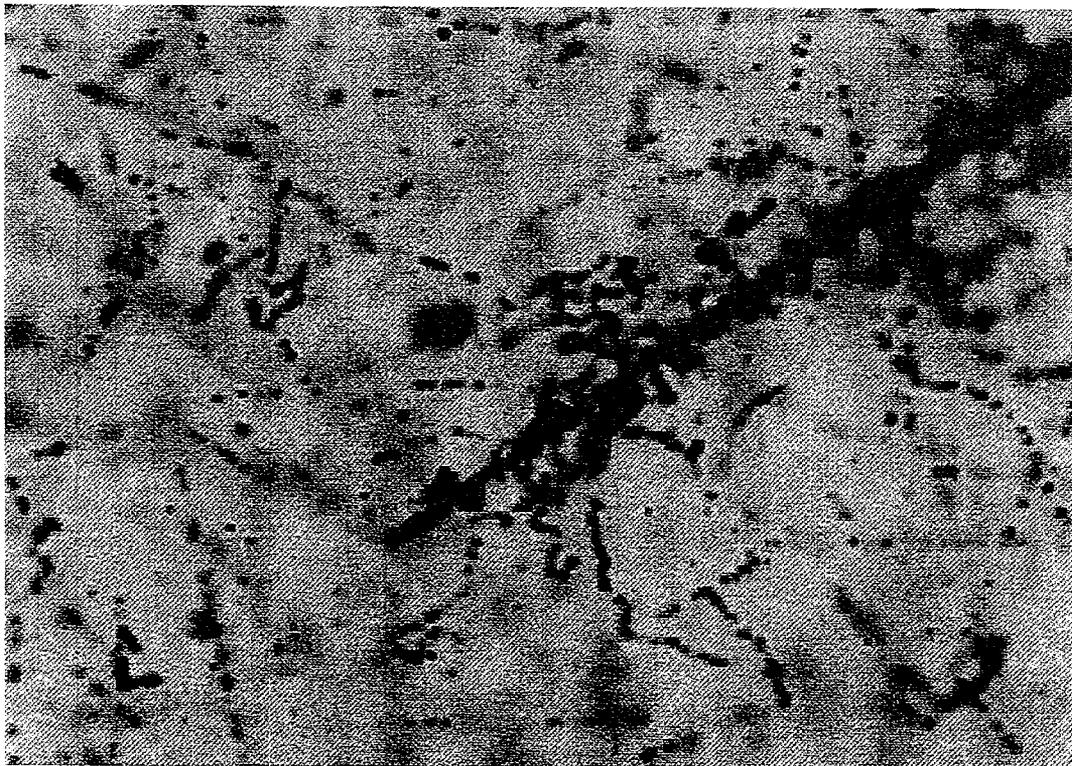


図 1 2 . 原子核乾板の衝突点付近まで追跡した入射重粒子線の飛跡

### 7.3. 重粒子線に対するエネルギー決定法の検討

超伝導JACEEスペクトロメータ実験は、一次原子核宇宙線のエネルギーを決定する方法として、原子核乾板と鉛板を積層構造にした電磁カロリメータを下層部に設置し、入射宇宙線が標的層部の原子核衝突で生成した中性パイ中間子の電磁シャワー成分をこの電磁カロリメータで測定して全エネルギーを算出する。入射宇宙線がガンマ線や電子の場合には、そのエネルギーの全てが制動輻射や電子対創生により電磁シャワーに転化されるので、カスケード成長の揺らぎや測定誤差を除くとこのエネルギーを測定すればそのまま入射粒子の全エネルギーとなる。しかし、入射粒子が陽子や原子核といったハドロン粒子の場合、大部分のエネルギーは高エネルギーの二次粒子としてスペクトロメータの外へ持ち出されてしまうので、電磁カロリメータ部で測定したエネルギー量から入射原子核の全エネルギーを決定するのはそう簡単ではない。入射粒子の全エネルギー  $E_{\text{incident}}$  に対する電磁カロリメータ部に記録されるエネルギー量  $\sum E_{\gamma}$  の比を  $\gamma$  線非弾性度 ( $\gamma$  ray inelasticity)  $K_{\gamma}$  と呼ぶことにする。

$$K_{\gamma} = \frac{\sum E_{\gamma}}{E_{\text{incident}}}$$

最も単純な考えとして、入射原子核の持ち込む全ての運動エネルギーが衝突のエネルギーに転化され、衝突のエネルギーはパイ中間子を生成することに全て費やされたとする。アイソスピン対称性から中性パイ中間子は全エネルギーの1/3を担う。その全てを電磁カロリメータで測定できているとすれば、 $\gamma$ 線非弾性度  $K_{\gamma}$  は0.333である。問題はこの係数が、入射原子核の種類、標的原子核の種類、入射エネルギー、衝突係数、そしてスペクトロメータの構成によってどのくらい変化し拡がるかということである。一見、スペクトロメータの構成は私達が制御している部分なので正しく設計することができそうに思えるのだが、実際には最初の周辺衝突により残った高エネルギーのスペクテータ部（破碎原子核）やそこで発生した2次粒子が引き続きスペクトロメータ内で衝突を繰り返すことを繰り返すとき、私達の制御できない部分として以後の検討に繰り返す必要がある。この係数の評価は、原子核衝突と検出器応答を合わせたモンテカルロシミュレーション計算で行う

のが唯一の方法であり、本研究課題に沿ってシミュレーション計算コードの改良とその検討を行った。

入射核も標的核も陽子の場合をまず考える。1回の衝突で入射陽子が失うエネルギーと入射エネルギーとの比を非弾性度  $K$  と呼ぶ。  $K$  の値は0から1に分布するが、衝突に使われる平均エネルギーは半分程度で、パイ中間子や  $K$  中間子の生成に使われる。残りのエネルギー  $(1-K)$  は、先導核子が持ち出してしまふ。陽子+陽子衝突での  $K_\gamma$  の平均値は1/6程度になると見込まれる。標的核が重い原子核の場合は、標的原子核の中で核内多重衝突が起こる。これは平均衝突回数  $\langle \nu \rangle$  という量によって特徴付けられる。これは標的原子核中の損傷核子数  $\langle w \rangle$  に一致する。この計算は Glauber モデルに従って行ふ。標的原子核の質量数を  $A$  とすると以下の関係式が成り立つ。

$$\langle \nu_A \rangle = \langle w_A \rangle = A \frac{\sigma_{p+N}}{\sigma_{p+A}}$$

ただし、  $\sigma_{p+N}$ 、  $\sigma_{p+A}$  はそれぞれ陽子+核子、陽子+原子核の非弾性衝突断面積である。シミュレーション計算では、衝突係数を変化させながら衝突回数の演算に標的原子核の核子密度分布を反映させ実行した。衝突から発生する2次粒子の多重度や運動量分布は、この衝突回数に基づいて Multi-Chain Model により計算を実行した。陽子+原子核衝突の平均衝突回数は1より大きいので、  $K_\gamma$  は陽子+陽子衝突の場合より必然的に大きくなる。

入射粒子が原子核の場合は、入射原子核のなかで衝突に関与する核子数および衝突回数によって2次粒子に転嫁されるエネルギーの割合が変わってくる。入射原子核の質量数を  $B$  とすると、平均損傷核子数と平均衝突回数は以下のように与えられる。

$$\langle w_B \rangle = B \frac{\sigma_{p+A}}{\sigma_{A+B}}$$

$$\langle \nu_{AB} \rangle = AB \frac{\sigma_{p+N}}{\sigma_{A+B}}$$

ただし、 $\sigma_{AB}$  は原子核+原子核非弾性衝突断面積である。この研究で重要なことは、衝突に関与しなかった  $B \times (1-w)$  個の核子は、破碎原子核としてそのままの核子当たりのエネルギーを持って走り去ることになる。入射原子核が重いほど損傷しない核子の割合が増えるので  $K_\gamma$  は小さくなる。この現象は Multi-Chain Model の計算後、残った原子核に原子核破碎過程を付け加えることによって計算できるようにした。

モンテカルロ計算による  $K_\gamma$  の結果を図 1 3 a と 1 3 b に示す。まず、破碎原子核の多重衝突の影響を繰り込まない場合を紹介する。図 1 3 a は 2 0 0 GeV/c の陽子を入射粒子とし、標的核として陽子、酸素、鉛原子核の例を示した。特徴的なことは、期待されるようにポアソン分布的振る舞いを示す。標的核が軽い場合、その平均値は約 0.15 であり、予想される値  $1/6=0.17$  に近い。鉛原子核標的の場合、核内多重衝突のため  $K_\gamma$  の平均値は 0.22 となった。究極の値 0.33 に近づいたわけである。図 1 3 b は、核子当たり 2 0 0 GeV/c のヘリウム原子核が入射した場合を示した。標的原子核が軽い酸素の場合、その傾向は陽子+陽子衝突にそっくりであるが、平均の  $K_\gamma$  は 0.08 と小さくなる。これは周辺衝突のときそのエネルギーの大部分を破碎原子核が持ち去ってしまうためである。周辺衝突が起こる頻度は、標的原子核が大きくなるに従って減少する。そのため、標的原子核が鉛原子核の場合、その大部分のエネルギーが衝突に費やされる頻度が大きくなりピークを形成するようになる。

次に、破碎原子核の多重衝突の影響を繰り込んだ場合について考察する。入射粒子が最初の衝突を起こした地点で生成した破碎原子核が、電磁カロリメータを通過するまでの空間でどのような原子核衝突を何回引き起こすかは、その空間に充填した物質により決定される。従って、この検討は何らかの検出器を想定する必要がある。ここでは、標準的に JACEE 実験で使われているハイブリッド原子核乾板スペクトロメータを仮定した。

破碎原子核は、スペクトロメータを通過する程度の短時間では安定であり、自ら崩壊しないと仮定した。破碎原子核の 2 回目以降の計算方法は、本質的に、上述の 1 回目の計算で入射原子核種を変えて繰り返すだけである。最初の衝突で生成した高エネルギー 2 次粒子の影響を繰り込んだ。バリオン粒子は全て陽子と中性子とし、前述の陽子入射の場合と同じ手順を使い繰り込んだ。多量に放出されるパイ中間子と K 中間子が原子核と非弾性衝突

する影響を繰り込んだ。パイ中間子およびK中間子が陽子と衝突する場合の非弾性衝突断面積は、陽子+陽子衝突の断面積のそれぞれ約70%および60%である。原子核標的に対してこの比率が変わることは知られているが、この計算では以下のように一定であると仮定して扱った。

$$\sigma_{\pi/K} = R_{\pi/K} \sigma_{pA}$$

ここで、 $R_{\pi/K}$  は断面積比を与えるパラメータであり、 $R_{\pi} = 0.77$ 、 $R_K = 0.61$ とした。

図14.a に2回目以降の衝突を繰り込まない場合 (first only) と繰り込んだ場合 (all successive) の計算結果を示す。入射粒子は1 TeV/cの陽子で、ほぼ垂直入射とした。標的原子核はもはや単一の原子核種でなく原子核乾板スペクトロメータの構造を反映した複合体となっている。まず、2回目以降の衝突を繰り込まない (first only) 分布と、図13.a を比較してみると、図13.aで示した核種による違いを混ぜ込んだ様相を示していることが判る。つまり、小さな $K_{\gamma}$ に大きな頻度を示しながらも、重い原子核標的の効果である $K_{\gamma} \approx 0.2$ 付近の盛り上がりを見ることができる。この結果、 $K_{\gamma}$ の平均値は0.19と得られた。次に、2回目以降の衝突を繰り込んだ (all successive) 分布を first only と比較する。当然のように、小さな $K_{\gamma}$ 成分が減少し、平均値として大きな方向へシフトした分布であるが、もはやポアソン分布とは異なっているようだ。 $K_{\gamma}$ の平均値は0.25と得られた。図14.b は、ヘリウム原子核入射の場合である。 $K_{\gamma}$ の平均値は0.17が得られた。陽子入射の場合に見られたのと全く同等の議論ができる。これら陽子およびヘリウム原子核に対する $K_{\gamma}$ の値は、従来からJACEE実験のスペクトル解析で用いてきた値とコンシステントである。

この研究の目的は、ヘリウム原子よりさらに重い原子核に対する $K_{\gamma}$ の振る舞いである。先に述べたように、 $K_{\gamma}$ は測定器である原子核乾板スペクトロメータの構造に依存するので、解析する実験装置に合わせて評価する必要がある。EMU01実験が、核子当たり200 GeV/cの酸素原子核を原子核乾板に入射させたときの実験結果を、シミュレーション計算結果と比較する。元来、実験的に測定できる電磁シャワー成分のエネルギー量とシミュ

レーション結果を比較するのが最善であるのだが、既存の実験でその目的に利用できるものがないので、ここではその他の測定物理量で比較検討する。図15に荷電粒子多重度分布の比較を示す。計算結果は、周辺衝突からの寄与である多重度0付近のピーク、多重度40から200付近までのプラトー部、そして中心衝突からの寄与である最大多重度300付近の様相の全てを充分良くシミュレートしている。図16に擬ラピディティ分布を比較する。ここでは、核子当たり15 GeV/c、60 GeV/c、200 GeV/cのエネルギー領域で比較を行った。擬ラピディティ分布は釣鐘状の分布を持つが、計算結果(MCMAA)はその様相を充分良くシミュレートしている。さらに、入射原子核と標的原子核が同種原子核でないことに起因する非対称成分に対しても充分良くシミュレートしていることが解る。この研究では、これ以外にも横運動量分布や破砕原子核電荷分布などの比較検討を行っており、いずれもここに示したように実験値との一致が充分良いことが解った。この研究成果によりシミュレーション計算方法を確立する事ができたので、超伝導JACEE実験の解析に不可欠な中重核入射の場合の $K_T$ 値を求めることができる。

$k\gamma$  Distribution of first collisions

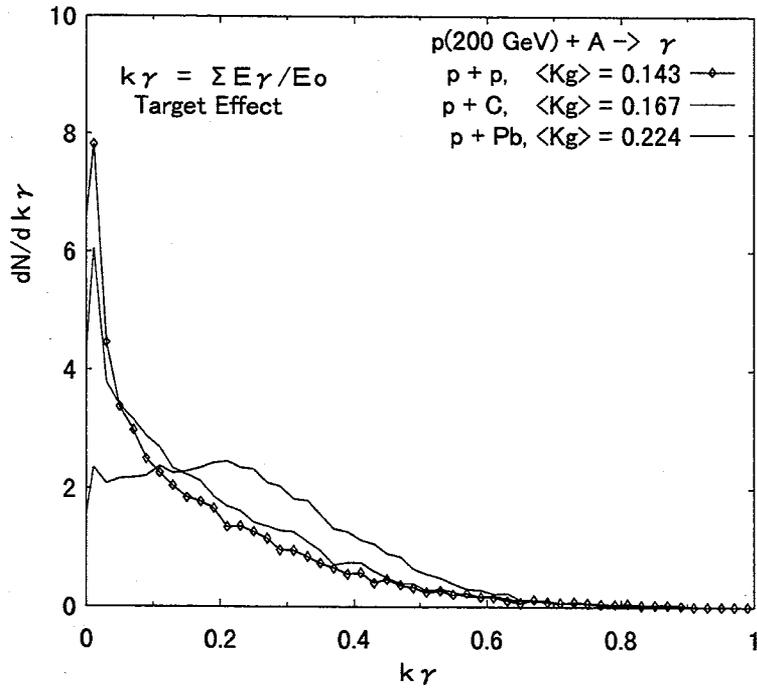


図13.a 陽子+原子核衝突

$k\gamma$  Distribution of first collisions

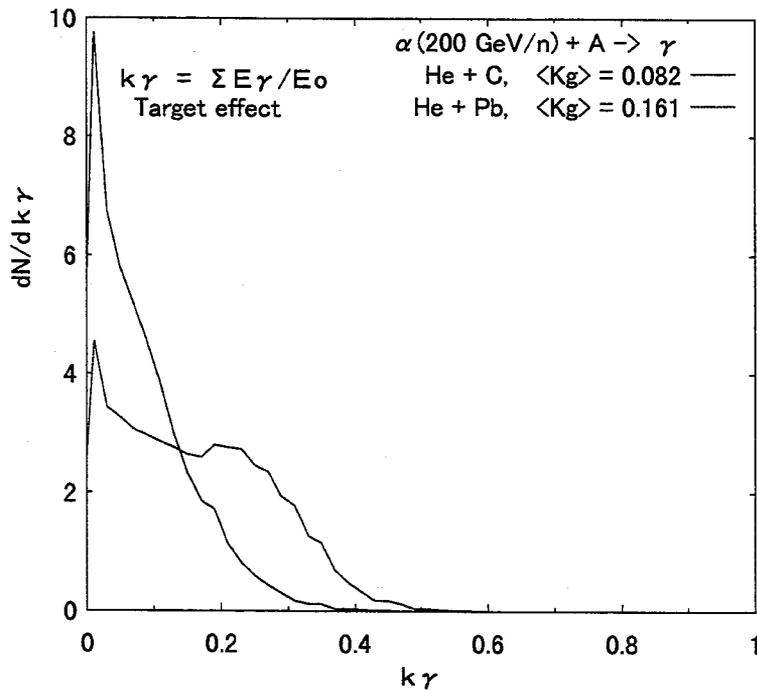


図13.b ヘリウム+原子核衝突

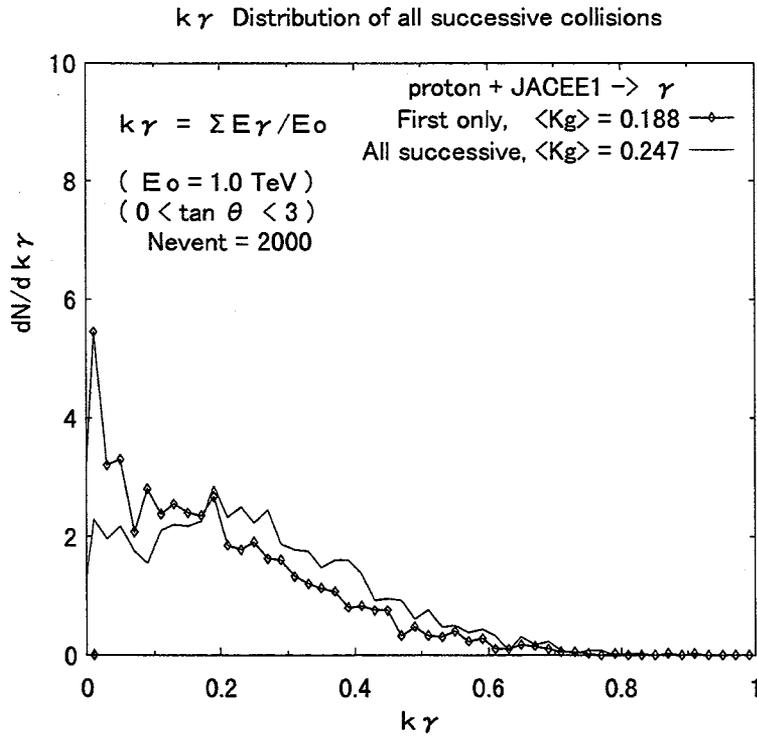


図 1 4 .a 陽子+原子核衝突

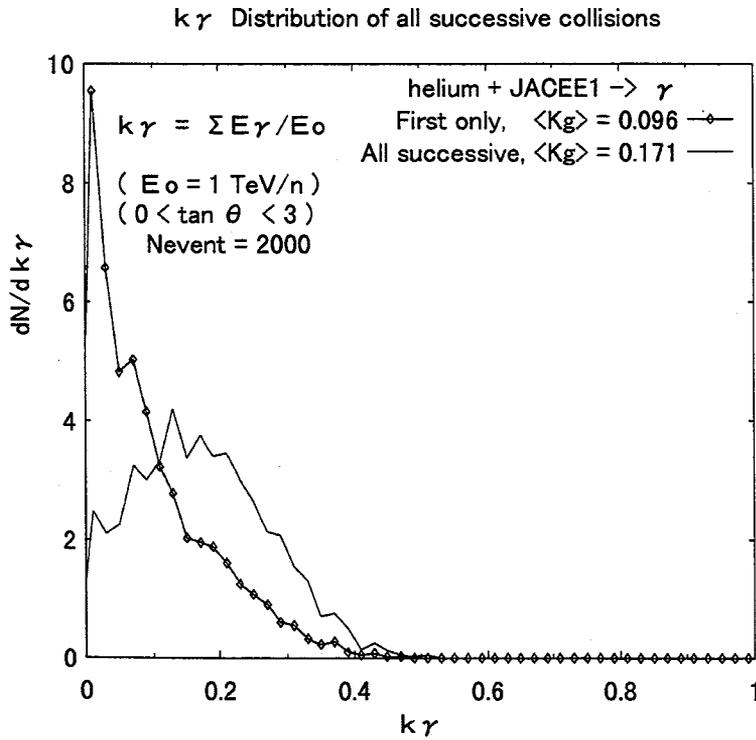


図 1 4 .b ヘリウム+原子核衝突

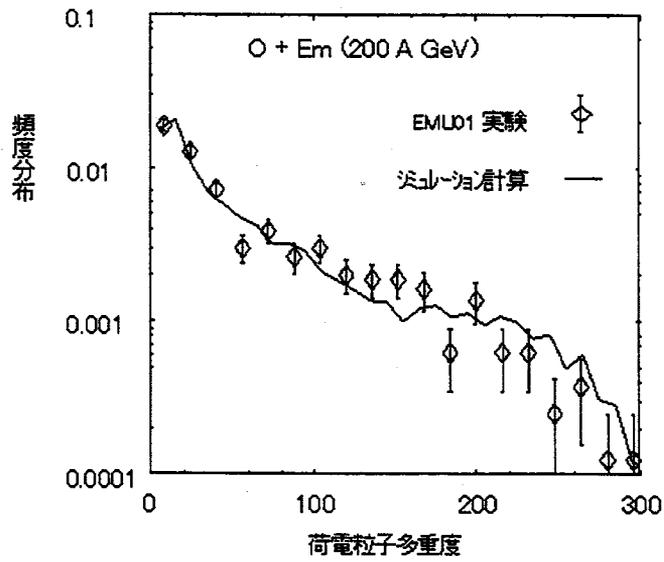


図15 荷電粒子多重度の実験値とシミュレーション結果の比較

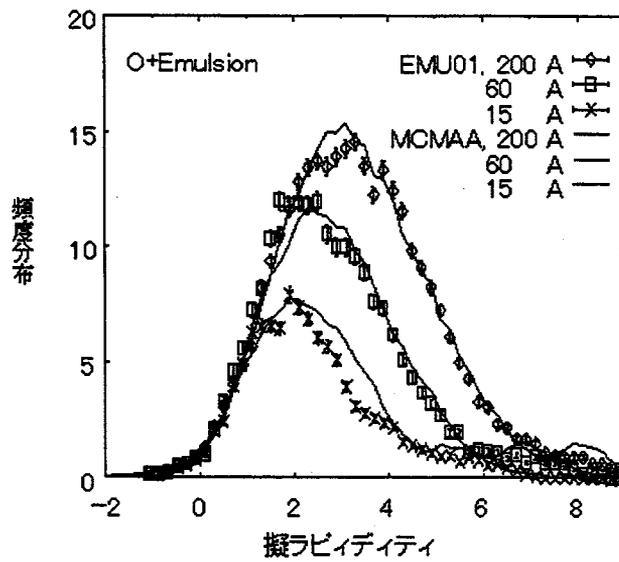


図16 擬ラピディティ分布の実験値とシミュレーション結果の比較

## 7.4. JACEE実験のデータ解析とまとめ

宇宙線全粒子エネルギースペクトルのkneeの原因を加速機構あるいは宇宙線伝播過程の rigidity 依存性と考えると、その影響は陽子において真っ先に表れることが予想できる。JACEE実験結果は陽子について5-500 TeV、ヘリウムについては核子当たり2-50 TeVまで100 GeV領域の観測結果の外挿で表せる。すなわち、1~2 TeVでの急激な傾きの変化はあり得ないことを示した。しかし、その時使用した事象数は、陽子が60事象、ヘリウムが29事象で、10 TeV以上の領域のエネルギースペクトルの傾きを議論するには不十分であった。その後、気球観測飛行を重ねJACEE-6までの観測データを使って陽子168事象から求めたエネルギースペクトルでは、少なくとも100 TeVまではその傾きに変化のないべき関数で表すことができた。しかしながら、80~120 TeVの流束の絶対値はべき関数で期待される量より1 $\sigma$ 以上少なく、このエネルギー領域で何らかの落ち込みを発見した。

1987年から始めた南半球半周回気球実験は、約150時間の長時間観測を行うことが可能になり、2回の観測結果(JACEE-7, -8)により10 TeV以上の陽子事象の統計を一気に4倍にした。その結果、陽子のエネルギースペクトルは単一の傾きのべき関数より、50 TeV付近を境にして違った傾きの2成分べき関数でよりよく表されることが判った。もしこの変化が理論的に予測される粒子の rigidity に因るものであるなら、ヘリウムのスペクトルについても同じ rigidity (エネルギーにして核子当たり25 TeV付近)において同様の変化が観測されねばならない。しかしながら観測したヘリウムのエネルギースペクトルは単一の傾きを持つべき関数で表すことができた。陽子の折れ曲がり単なる統計的な揺らぎによるものなのか、あるいはヘリウムに関しては別の理由があるのか、統計量が不十分で結論を出すには至らなかった。

1991年から南極大陸での周回気球実験を実施した。南極気球観測の利点は、気球高度を一定に保つためのバラストを必要としないため、大面積長時間(1.2 m<sup>2</sup> × 200~300時間)の観測飛行を行うことができることである。一方、欠点として、地球磁場による rigidity cut off が殆ど無いため、特に太陽活動極小時には銀河起源の低エネルギー宇宙線が感光フィルムのバックグラウンドとなることが挙げられる。これまでに5回の観測飛行(JACEE-10, 11, 12, 13, 14)を行い、今回、JACEE-12までの解析結果を含ん

だ総露出時間 6 4 4 m<sup>2</sup>時間のデータから、陽子とヘリウムのエネルギースペクトルに関して最終結果を得ることに成功し、学術誌にて成果の公表を行った。図 1 7 に陽子とヘリウムのエネルギースペクトルを示す。得られたスペクトルはそれぞれ以下のべき関数で良く表すことができる。

$$\text{陽子} : \frac{dN}{dE} = \left( 1.11^{+0.08}_{-0.06} \right) \times 10^{-1} \times E^{-2.80 \pm 0.04} \quad (\text{m}^2 \text{ sr s TeV})^{-1}$$

$$\text{ヘリウム} : \frac{dN}{dE} = (7.86 \pm 0.24) \times 10^{-3} \times E^{-2.68^{+0.04}_{-0.06}} \quad (\text{m}^2 \text{ sr s TeV})^{-1}$$

南極実験のデータを加えることにより事象数は、陽子 6 5 6 事象、ヘリウム 4 1 4 事象となった。特に 1 0 0 TeV 以上では、陽子についてこれまでの 6 事象から 2 2 事象になった。結果として、陽子エネルギースペクトルの 5 0 TeV 以上も、統計誤差の範囲内で単一の傾きを持つべき関数で表すことができることが判った。しかしながら、1  $\sigma$  程度の頻度の揺らぎは依然として存在し、これが物理的に意味のあるものなのか議論の余地がある。

JACEE 実験は、中重核成分（炭素から酸素およびネオンから硫黄原子核領域）の核子当たりのエネルギー 1 0 TeV 領域の流束は、1 0 0 GeV 領域から外挿して予想する流束より約 2 倍大きいことを発見した。この解析に使用した事象数は炭素から酸素およびネオンから硫黄原子核領域でそれぞれ 1 5 事象であった。この研究で解析結果の纏めを行った JACEE-12 までの積分データによる結果を図 1 8 に示す。ここには、他の実験グループによる結果も併せて表示してあるが、高エネルギー側の全てのデータは JACEE 実験の結果である。積分した事象数は炭素から酸素およびネオンから硫黄原子核領域でそれぞれ 8 9 事象および 4 7 事象であり、その結果、積分流束量のみならずスペクトルの傾きも初めて議論できるようになった。重要な点は、これらの成分が 1 0 0 TeV 領域で増加傾向にあることが再度確認できた。この観測結果を説明すべく、現在、宇宙線の起源、加速、伝播などいろいろな立場から理論的な模型が提案されており、宇宙物理学分野の最もホットな話題のひとつを提供している。

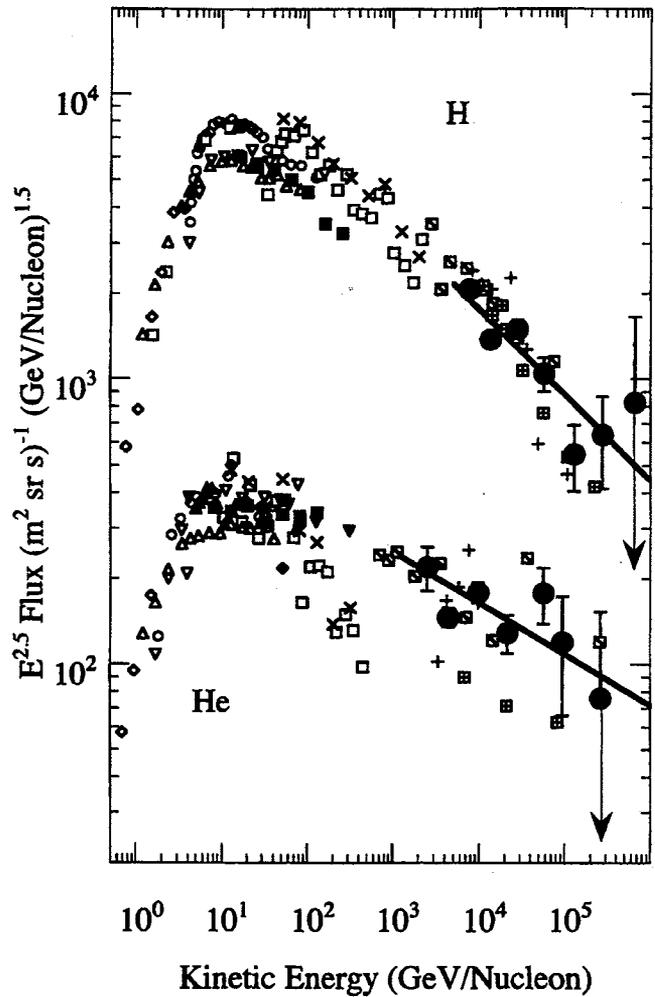


図 15 陽子とヘリウムのエネルギースペクトル

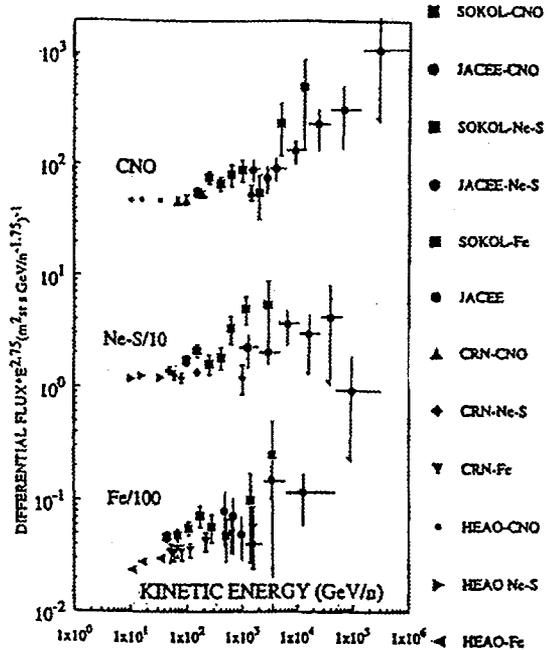


図 16 中重核成分のエネルギースペクトル

## 8. まとめと今後の方針

本研究では、超高エネルギー原子核衝突に顕著に発現すると期待されるクォーク多体間の非摂動的QCD現象の発見を目指し、超伝導JACEEスペクトロメータが一次宇宙線観測飛行で収集した原子核乾板実験データを解析することにより、既存の加速器実験では到達し得ないTeV領域の原子核衝突における荷電粒子の多重発生機構に注目した研究を、H.ウィルチンスキー博士（クラコウ原子核研究所・ポーランド）と国際共同研究として行った。現時点において、最終的な物理成果を得るまでには至っていないが、平成9年度から2年間にわたる研究から下記の成果を得た。

- 従来は極めて熟練したスキャナーしか解析することのできなかった入射原子核宇宙線のエネルギー損失量を、CCDカメラと画像入力装置を用いて半自動的に計算するシステムを広島大学理学部に立ち上げた。短時間に機械的に測定できるため、測定者の負担を著しく減少することができ、同時にひとつに軌跡に対して複数箇所の測定を容易に行うことができる。大学院生程度の初心者でも再現性の充分良い精度ある測定を行うことができるようになった。その結果、従来の熟達したスキャナーが grain counting 法や delta-ray counting 法により得ていた  $\sigma_z \approx 0.6$  の精度に対して、この研究で新しく開発した方法は、 $z=8$  において  $\sigma_z \leq 0.3$  を達成する。
- 原子核乾板の詳細な写真解析作業はアラバマ大学ハンツビル校（UAH）を中心に行ってきた。この研究課題においても、本研究期間内に国内から研究協力者を合わせて約70人日の研究者が滞在し解析作業等に従事した。今後、本研究を発展的に継続するためには、国内にUAHと同等な解析機能を有する拠点が熱望されていた。この研究により、JACEE共同研究者らの支援を受け、岡山理科大学の大型駆動台型光学顕微鏡を立ち上げ、超伝導JACEE原子核乾板データの写真解析を開始することができた。
- 非常に幸いなことに、普喜満生博士（高知大学教育学部・助教授）は平成10年4月から10ヶ月間、広島大学理学部に内地留学する機会を得た。普喜氏はJACEE共同実験の一員であり、原子核乾板スペクトロメータのモンテカルロシミュレーション計算に熟達しており、この機会を利用して本研究に多大なる協力を得ることができた。

この研究では、一次原子核宇宙線の中でも、より重い入射原子核が引き起こす衝突事象が興味の対象であり、この場合に電磁シャワーカロリメータに記録されたエネルギー量から入射エネルギーを算出するときの変換係数  $K_{\gamma}$  をどのように見積もるかの研究を行った。その結果、入射原子核が初めの衝突を起こした後、その破碎原子核（スペクテータ部）が原子核乾板スペクトロメータ中で2回目以降の衝突を起こす効果を定量的に把握し取り込むことが本質的に重要であることを明らかにした。

- JACEE気球観測実験のデータ解析も本研究活動の一環として実施した。本研究成果と併せて、学術学会誌へ3編の投稿論文および国際会議へ5編の寄稿論文として成果発表を行った。

今後の研究方針は、岡山理科大学で立ち上げた大型駆動台型光学顕微鏡を利用して、超伝導JACEE実験の原子核乾板飛跡の追跡作業を継続し、ひとつひとつの原子核衝突事象について全立体角に放出された2次荷電粒子の運動量を決定し、荷電粒子多重度について完全測定を実施することである。研究分担者であった富永孝宏博士が広島国際大学放射線診療学科の助教授として本研究期間中に転任された。同大学は広島大学と非常に近い距離にあり、富永孝宏博士と伊代野淳博士（岡山理科大学・助教授）と協力し、今後の研究を進めていく予定である。現在解析を行っている超伝導JACEE実験データは飛行観測時間が17時間と短いため、期待した大多重度事象は記録されなかった。現在、より長時間の観測飛行を目標に、研究分担者であるT.パーネル主任研究官（米国航空宇宙局）が航空宇宙局にその実現を要請中である。また、この研究の発展的な研究計画として、原子核乾板スペクトロメータを宇宙空間に長期間設置し、より高エネルギー成分の重い原子核宇宙線の流束観測を目指したJEM実験計画を本研究期間中に立案し、宇宙開発事業団に提案したが、残念ながら現在まで採択されるに至っていない。残念なことである。今後の研究の進展を見極めながら、再度、挑戦したい。

## 9. 公表論文別刷り