

200 GeV/AMU $^{32}\text{S}+\text{Pb}$ 反応における横方向運動量分布 とクラスター解析 (CERN-EXPERIMENT EMU05)

伊 代 野 淳

岡山理科大学・工学部・機械工学科

(平成4年9月30日受理)

要 旨

EMU05実験は、磁陽中に配置したエマルジョン・チェンバー (MAGIC : Magnetic-Interactive-Emulsion-chamber) によって、200 GeV/AMU $^{32}\text{S}+\text{Pb}$ 反応で生成された荷電二次粒子の横方向運動量 (P_T) 分布及び粒子相関の解析を行った。 P_T 分布は、ターゲット及び中央ラピディティ領域のどちらも P_0 (slope value) が160 から 200 MeV/c の一成分の線形指数分布でフィットすることができ、 $P_0 > 300$ MeV/c 領域における分布の異常な増大は観測されなかった。また、荷電符号のラピディティ方位角空間でのクラスター解析の結果、シミュレーション (ランダム) と比較して統計的に有意なシグナルは得られなかった。

1. 序 章

高エネルギー原子核・原子核相互作用の研究は、1986年から欧州原子核研究所 (CERN) で200 GeV/AMU 酸素及び硫黄原子核による実験が始まり、またブルックヘブン国立研究所 (BNL) で14.6 GeV/AMU 珪素原子核の実験が始まったことによって、近年実験的な進展¹⁾がみられる。高温高密度状態の核物質ではハドロン物質からクォーク・グルーオンプラズマ (QGP : Quark-Gluon Plasma) への相転移並びにカイラル対称性の回復 (CSR : Chiral Symmetry Restoration) が起こることが期待されており²⁾、これらの現象を実験的に捕らえ、検証することが目的である。また、上記の加速器実験が始まる以前に、JACEEグループによる超高エネルギー宇宙線実験³⁾がエネルギー密度増加に伴う平均横方向運動量の増大傾向を示し、加速器実験を始める動機となった。格子ゲージ理論に基づく計算によって相転移の臨界温度 T_c が200 MeV 程度と予想されるハドロン相から QGP 相への相転移と CSR の実験的なシグナル^{1,2)}として、平均横方向運動量増大、ストレンジ粒子の増大、バリオン生成率の増加、非統計的な揺らぎ現象 (intermittency)、 J/Ψ 抑制 (クォークニウム生成のカラースクリーニング)、共鳴粒子の無質量中間状態の生成等が理論的に予想されている。現在までの加速器による実験結果では、荷電粒子多重度や粒子の放出角度分布などの物理量は、高エネルギー原子核・原子核相互作用を原子核を構成している核子同士

の衝突の重ね合わせとして考えるモデル⁴⁾によって再現できることが分かっている。しかし、非統計的揺らぎ現象やストレンジ粒子の増大などは、重ね合わせで十分説明することはできず、QGP 生成のシグナルとして研究が進められている。

EMU05実験⁵⁾は高エネルギー原子核・原子核相互作用で生成される荷電二次粒子の運動量測定から、高温高密状態の生成を確かめることを目的として、1986年に開始されたエマルジョン実験である。本実験で照射を行った原子核ビームは、CERN-SPS 加速器によって核子当たり200GeV/AMUのエネルギーをもつ、酸素 (^{16}O) 及び硫黄 (^{32}S) 原子核である。本実験で使用したエマルジョンチェンバー (Magnetic-Interactive-Emulsion-Chamber: Magic) は、1.8Teslaの磁場中に配置してビーム照射が行われ、大多重度を伴う中心衝突事例で生成される荷電二次粒子の放出角、運動量、荷電符号が観測可能である。

本実験で使用したエマルジョンチェンバー (Fig. 1) は、標的物質として厚さ200 μm の鉛板、飛跡検出器としてエマルジョンフィルム (50 μm 両面, 70 μm ポリスチレンフィルム), 空隙物質としてスチロフォーム板 (1000~3000 μm) から構成されている。また, K/

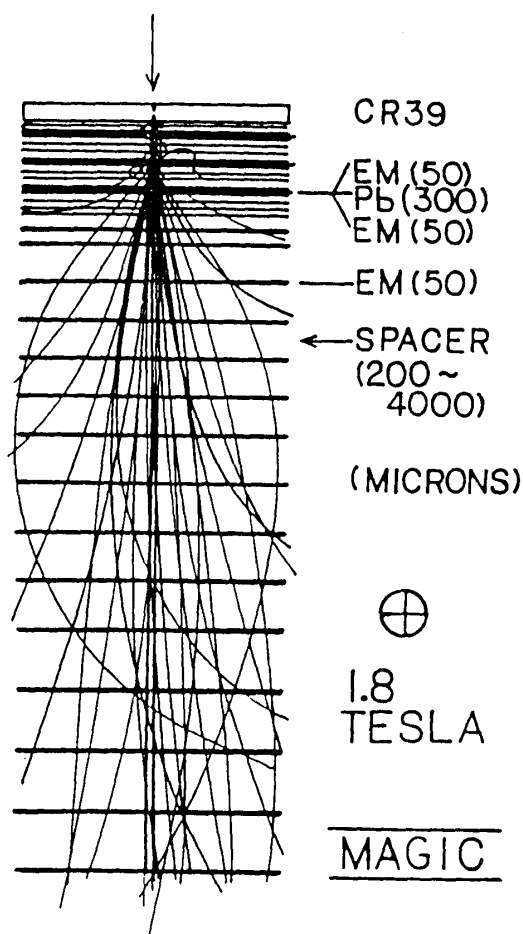


Fig. 1 エマルジョン・スペクトロメーター概念図
(Magnetic-Interactive-emulsion-Chamber)

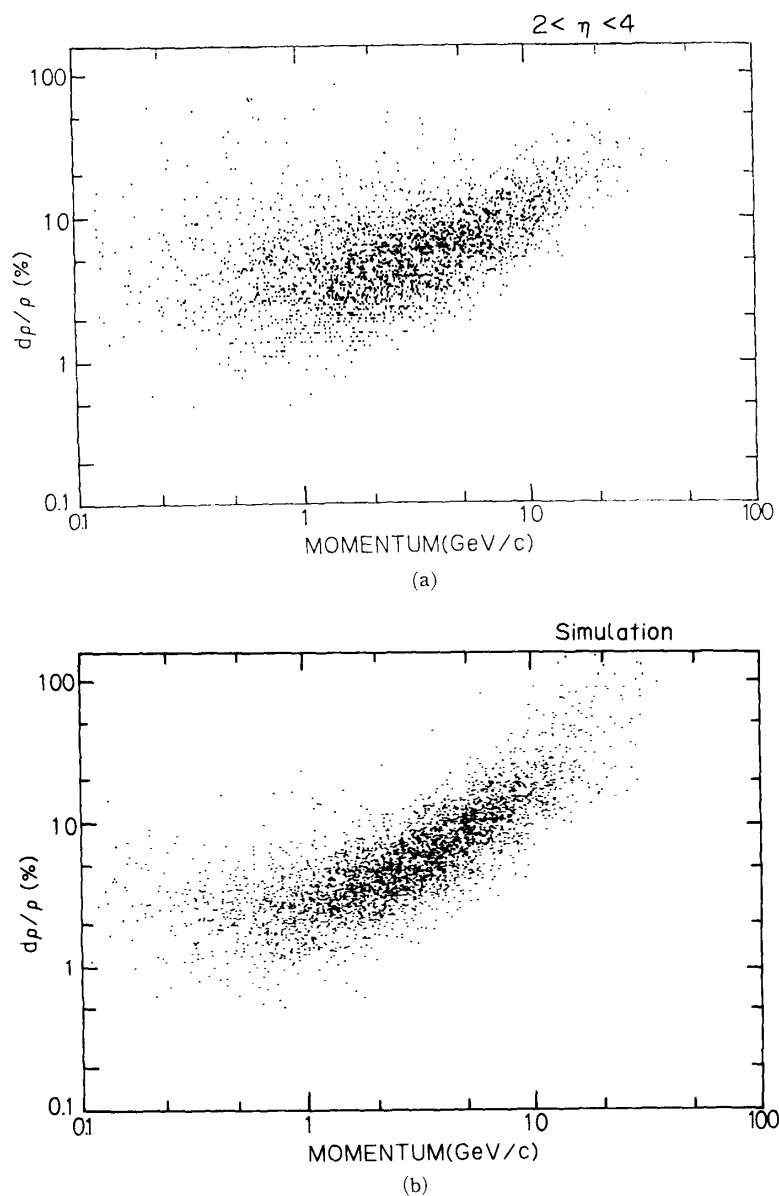


Fig. 2 中央ラピディティ領域での運動量決定精度の運動量依存性 a) 測定データ b) シミュレーション

π 比測定のために、厚型エマルシオンプレートが銀粒子密度測定用として一部のチェンバーに使用されている。測定器によって観測される荷電粒子中には、主として π^0 中間子を起源とする γ 線が標的物質内で創生した電子対を含み、これらは相互作用の解析を行うに当りデータの質を低下させることになる。従って、本実験は、電子対創生を抑制するために、観測する事例の衝突点から鉛を通過する距離を制限した。1986, 87年に照射が行われたがチェンバーの全長約 5 cm, 電磁多重散乱による運動量の相対誤差 ($(\sigma(P)/P)_{EM}$) は, 13% である。1990年のビーム照射では, $(\sigma(P)/P)_{EM}=5\%$ までチェンバー構成を改良した。中央領域の運動量決定精度は, Fig. 2 に示すようにチェンバー構成を考慮したシミュレーションと良く一致している。

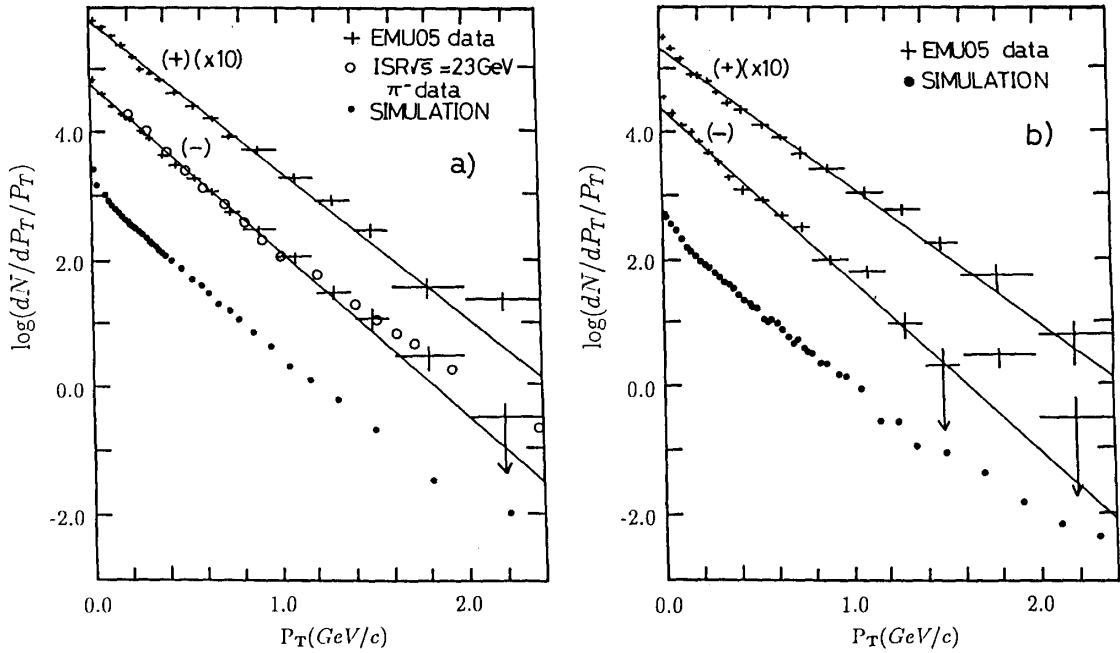


Fig. 3 荷電粒子の横方向運動量分布 a) 中央ラピディティ領域 ($2 < Y < 4$) b) 標的ラピディティ領域 ($1 < Y < 2.5$) +: データ
 ○: π^+ at CERN-ISR $\sqrt{s}=23$ GeV ●: シミュレーション
 実線は最尤法によって決定された線型指数分布 ($dN/dP_T/P_T \propto \exp(-P_T/P_0)$)

2. 横方向運動量分布⁵⁾

平均横方向運動量と中央ラピディティ密度（エネルギー密度）の相関は、衝突によって生成された核物質の状態方程式を反映していることが予想され⁶⁾、相転移がない場合平均横方向運動量はエネルギー密度の増加に伴って単調増加する。一方相転移がある場合（一次の相転移の場合）平均横方向運動量はハドロン相と QGP 相の混合相ではエネルギー密度に依らず一定値を保ち、QGP 相が実現すると再びエネルギー密度の増加に伴って単調増加すると予想されている。また、CERN の実験が始まり、いくつかの実験グループが low P_T 領域の横方向運動量分布に enhancement の存在すること結果を報告し⁷⁾、理論的に様々な解釈が行われてきた。本実験での平均横方向運動量の増加及び low P_T 領域での分布の enhancement の有無について以下に示す。

200 GeV/AMU S+Pb 衝突で生成される正及び負電荷粒子の横方向運動量分布を (Fig. 3) 示した。荷電粒子多重度が400以上、衝突点の高さが $100 \mu\text{m}$ 以下の事例だけを選んで解析を行った。解析を行ったラピディティ領域での、トラッキング効率は99%である。標的物質及び下流のスペクトロメーター層で生成される電子・陽電子対の CONTAMINATION は、トラックの衝突点での集束を $6 \mu\text{m}$ 以下に制限することで、ハドロンデータの約 2% に抑えることができた。測定された横方向運動量分布は、運動量測定誤差による修正がなされている。この修正ファクターは、 $P_T=1.0$ GeV/c 以下では 1 である。シミュレーションはデータ解析と同様の条件で行った。

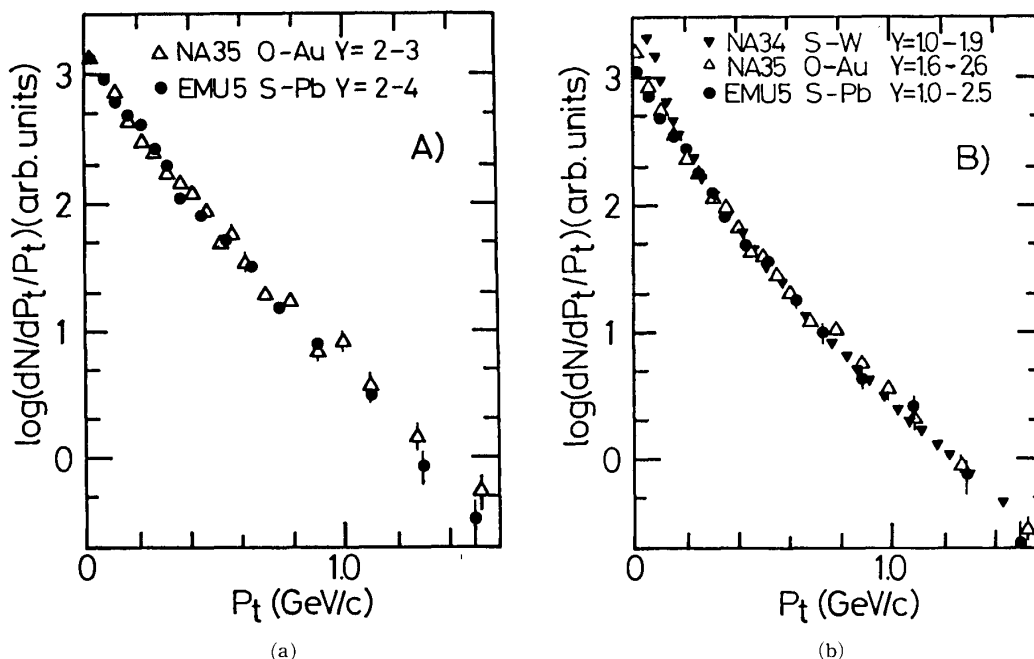


Fig. 4 CERN 200 GeV/AMU 160 , ^{32}S ビーム実験で報告されている横方向運動量分布との比較 a) 中央ラピディティ領域 ($2 < Y < 4$) \triangle : NA34 \bullet : EMU05 b) 標的ラピディティ領域 ($1 < Y < 2.5$) \blacktriangledown : NA34 \triangle : NA35 \bullet : EMU05

$P_T < 1.2$ GeV/c の領域の横方向運動量分布は、一成分の single exponential 関数 ($dN/dP_T \propto \exp(-P_T/P_0)$) で記述することができる。最尤法によって決定した Slope value (P_0) は $2 < Y < 4$ の正及び負電荷粒子に対して各々 190 ± 3 , 168 ± 3 MeV/c, $1 < Y < 2.5$ では各々 203 ± 4 , $16 \pm$ MeV/c であった。データは、CERN-ISR $\sqrt{s} = 23$ GeV の PP 実験⁸⁾ で報告されている π^- と長く一致している。シミュレーションによって得られた横方向運動量分布は、low P_T component の enhancement を示しているが、これは上記の方法で除くことができない電子対によるものである。

EMU05 実験データでの low P_T component の enhancement は非常に小さいものであり、電子対の contamination と考えて矛盾がない。また、 $P_T < 1.5$ GeV/c 領域での分布の enhancement は、実験データ⁹⁾ と誤差の範囲で一致している。これまで low P_T component の enhancement を報告している他の実験と EMU05 実験の比較を行う。central 及び target rapidity 領域の横方向運動量分布をそれぞれ Fig. 4-a,b に示した。

central rapidity 領域の EMU05 実験データは、電子対の contamination を修正した NA35 実験⁷⁾ と一致している。一方、target rapidity 領域では、 $P_T < 0.2$ GeV/c で各実験とも slope value が異なり、特に EMU05 実験⁷⁾ は全く一致していない。

3. クラスター解析

QGP 生成の臨界温度 T_c では、CSR に伴い局所的な領域内で荷電共役が破れる可能性が予言され²⁾、同種荷電のクラスター生成として観測される期待がある。また、同様のクラスターはラピディティ密度の上昇に伴って、多重ボーズ-アインシュタイン効果によって生

成される可能性⁹⁾もが示されている。荷電クラスターの解析は、今後荷電粒子多重度の増加にしたがって、QGP生成並びにCSRのシグナルを実験的に捕らえる方法として期待されている。

EMU05実験で得られた事例中で、擬ラピディティ (η) - 方位角 (ϕ) 空間内で同種粒子のクラスターが存在する事例が発見され、統計的な検定方法として η - ϕ 空間を $\delta\eta$ 幅のセグメント内で、荷電粒子を方位角順に並べ、荷電符号の並びを連検定 (run test)⁹⁾を行った。その結果、事例ごとには大きな揺らぎを示しているが、平均的にはランダムに粒子生成が起こっているとして説明可能であった。ここで、我々は別のクラスター検定として G-test¹⁰⁾を導入した。G は生成された全粒子について、次のように定義される。

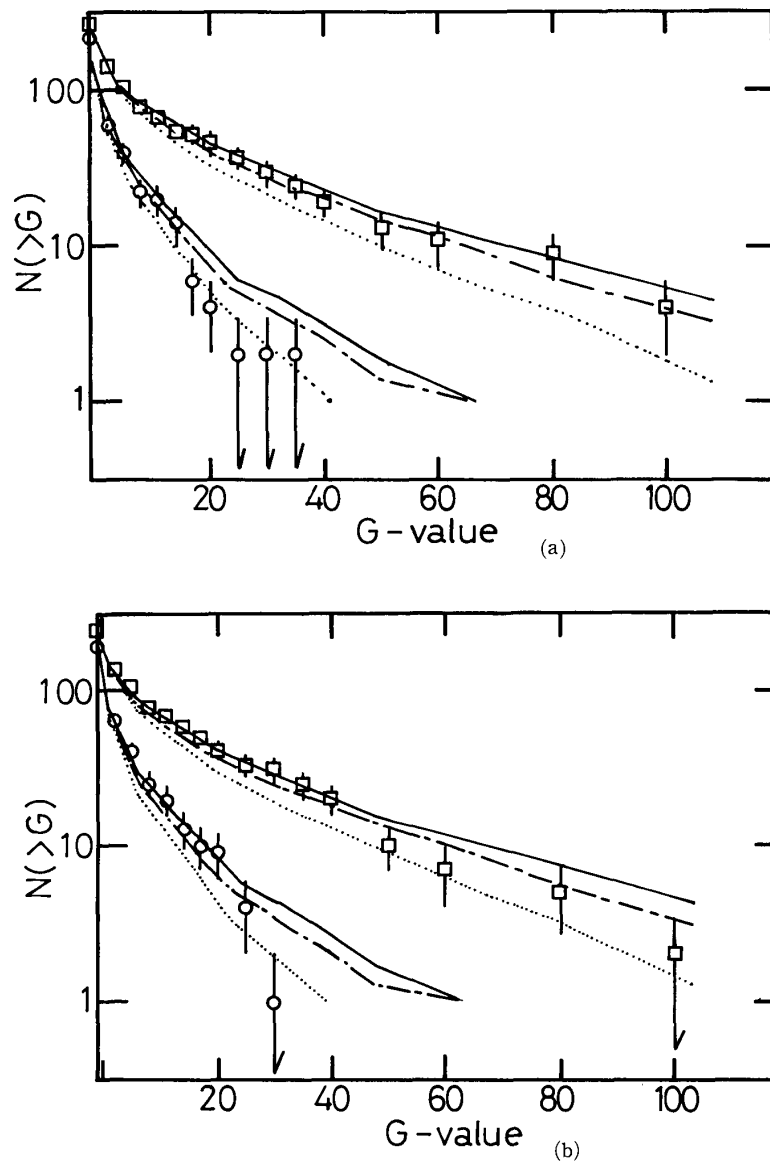


Fig. 5 G-value 頻度分布 (積分) a) 荷電粒子多重度=476の事例 b) 荷電粒子多重度=436の事例
実線, 破線, 点線は各々クラスター数6, 3, 0の場合のシミュレーション結果。

$$G_i(\text{MAX}) = \text{MAX} [G_{ij}(r)]$$

$$G_{ij}(r) = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m (C_k \cdot C_l) \quad m=1 \sim n$$

$$R_{ij} = \cosh(|\eta_i - \eta_j|) - \cos(|\phi_i - \phi_j|)$$

$$r = R_{im} \quad (0 < r < R_{ij})$$

ここで、 R_{ij} は i 番目の粒子と j 番目の粒子の擬ラピディティと方位角によって決まる領域であり、この領域内に含まれる荷電粒子数を n 個とする。 C_k 並びに C_l は k 及び l -th 粒子の荷電符号を意味し、 $+1$ または -1 である。 m を $1 \sim n$ まで変化させ、 G_{ij} の最大値 $G_i(\text{MAX})$ を i 番目の粒子の G -value と定義する。 G_i の取り得る最大値は R_{ij} 領域内の全粒子 n 個が

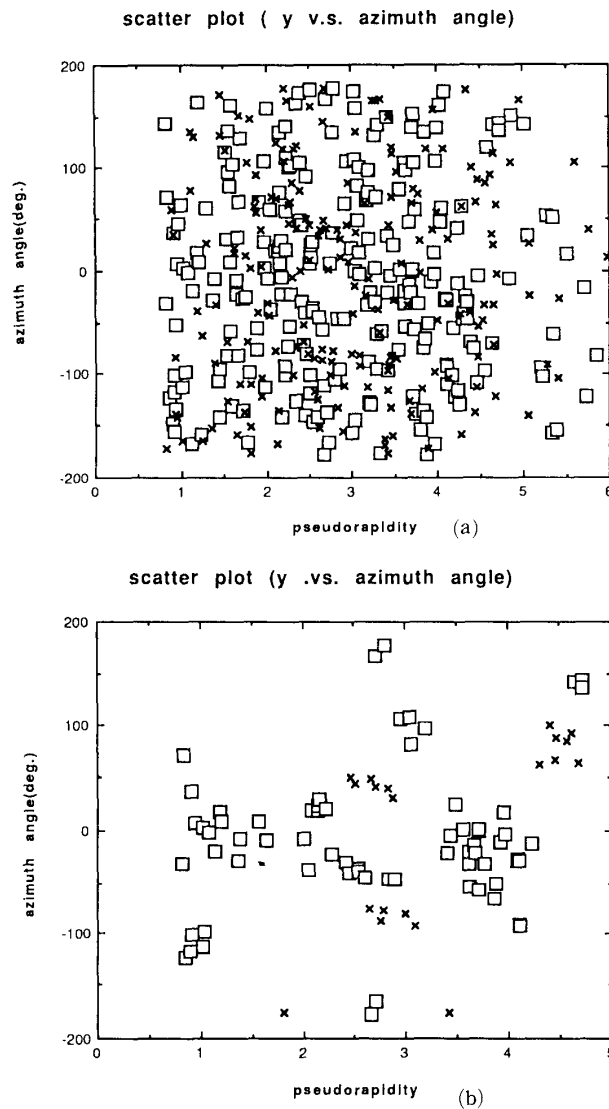


Fig. 6 $\eta-\phi$ 空間内での G -value の分散図 (荷電粒子多重度 = 476 の事例)
 a) 全荷電粒子 b) G -value > 10 の荷電粒子
 \square = 正電荷粒子 \times : 負電荷粒子

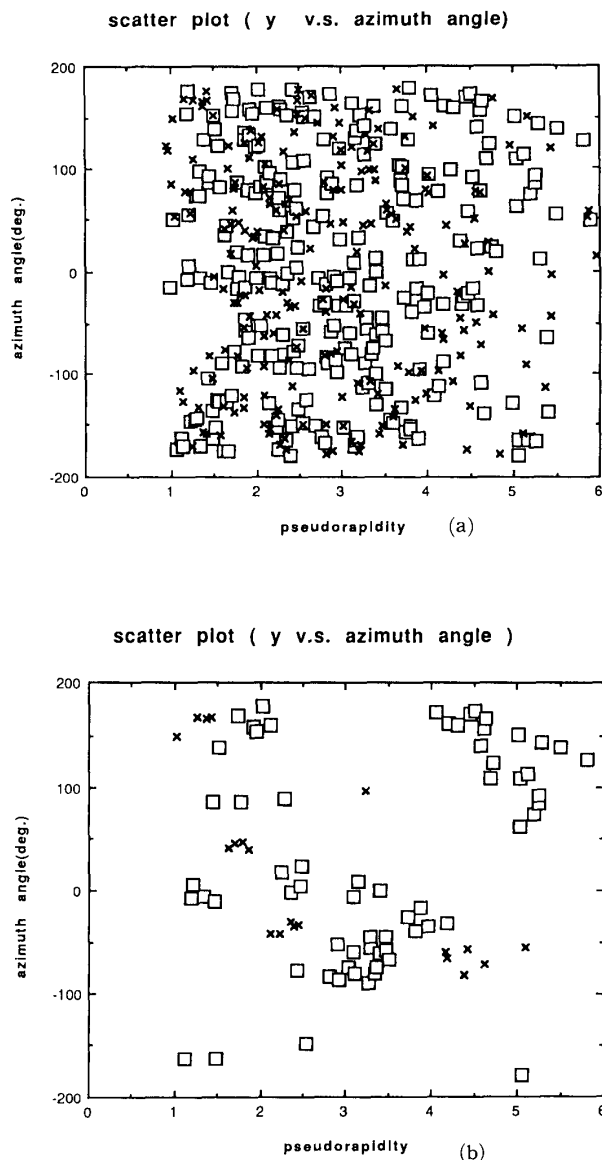


Fig. 7 $\eta-\phi$ 空間内での G-value の分散図(荷電粒子多重度=436の事例)
 a) 全荷電粒子 b) G-value>10の荷電粒子
 □=正電荷粒子 ×:負電荷粒子

i 番目の粒子と同種の荷電符号を持っている場合, $n(n+1)/2$ となる。また, n が偶数で, R_{ij} 領域内に同数の正及び負電荷粒子が存在する場合, $-n^2/4$ となる。

観測された二事例について, G-value の頻度分布を Fig. 5-a, b に示した。実線, 破線及び点線は, 各事例で得られた擬ラピディティ分布に基づき生成されたシミュレーション結果を示し, それぞれ人工的に生成したクラスターの個数(6, 3, 0)を示している。また, シミュレーション中でのクラスターは, 擬ラピディティ方向に幅0.1, 方位角方向に 30° の標準偏差をもつガウス分布に従うと仮定し生成された。G-value の頻度分布のクラスターの数依存性が弱いため, 実験データとの比較からクラスターの有無を統計的に有意に示することはできない。今回行ったシミュレーションでは, クラスターのサイズ及び広が

りとして上記の値だけを使用しているため、今後異なるクラスターサイズ及びクラスター内の粒子分布幅を用い計算を行う必要がある。次に、同じ事例について、G-value の $\eta-\phi$ 空間内での分散図を Fig. 6-a, b 及び Fig. 7-a, b に示した。これらの図で、a はすべての正(\square)及び負(\times)電荷粒子を表し、b は G-value > 10 の荷電粒子のみを示した。高い G-value を持つクラスターは、 $\eta-\phi$ 空間内に一様に分布しているのではなく、互いに距離を保って存在している。現段階で G-test によって荷電クラスターを検出したかどうかは結論できないが、G-value が特定の値より多き（クラスター性を示す）荷電粒子だけについて、 ϕ 方向のフーリエ解析を行い、シミュレーションでは再現できないクラスター間の相関を示すことができると考えられる。

4. 結 論

200 GeV/AMU S+Pb 中心衝突で生成される正及び負電荷粒子の横方向運動量分布は、 $P_T < 1.2$ GeV/c 領域で一成分の single exponential 関数によって表すことができ、slope value P_0 は、 $2 < Y < 4$ の正及び負電荷粒子に対して各々 190 ± 3 , 168 ± 3 MeV/c, $1 < Y < 2.5$ では各々 203 ± 4 , 164 ± 4 MeV/c であった。データは僅かに low P_T component の enhancement が見られるが、予想される電子対の contamination を起えていない。slope value は、pp 実験とほぼ同じ結果となり、JACEE 実験で観測されている平均横方向運動量は観測されなかった。

同種荷電クラスター解析の方法として、G-test を導入した。その結果、G-value は、クラスター性を示す領域の荷電粒子を確実に検出できることは示せたが、データ及びシミュレーション結果の G-value 頻度分布の比較から、データのクラスター出現頻度は、ランダムに粒子生成が起こっている場合から統計的に有意に異なっていた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、御協力して下さった岡山理科大学・田代勤教授、山本勲助教授に深く感謝致します。また、本実験は日米共同 CERN-EMU05 実験の一部であり、東京大学宇宙線研究所・尾形健助教授を初めとする日本側メンバー並びにアラバマ大学・高橋義幸助教授を初めとする米国側メンバーに深く感謝致します。

参考文献

- 1) Quark-Matter Conference Proceedings, Z. Phys. C38 (1988); Nucl. Phys. A498 (1989)
- 2) R. D. Pisarski, Phys. Lett. 110B, 155 (1982) R. D. Pisarski and F. Wilczek, Phys. Rev. D29, 338 (1984) T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Lett. B185, 304 (1987)
- 3) T. H. Burnett et al., Nucl. Instr. Methods Phys. A251, 583 (1986) T. H. Burnett et al., Phys. Rev. Lett., 50, 2062 (1983) T. H. Burnett et al., Lecture Notes in Physics, 221, Quark Matter, 84, 187 (1984). T. H. Burnett et al., Phys. Rev. Lett., 51, 1010 (1983) T. H. Burnett et al., Phys. Rev. D35,

- 824 (1987) T. H. Burnett et al., Phys. Rev. Lett., 57, 3249 (1986)
- 4) 普喜満生, 岡山理科大学理学研究科博士論文 (1986) A. Capela et al., Phys. Rev. D35, 2921 (1987). J. Ranft, Nucl. Phys. A498, 111c (1989)
 - 5) Y. Takahashi et al., Nucl. Phys. A498, 529c (1989). Y. Takahashi et al., J. Phys. Soc. Jpn. Supple. 58, 746 (1989)
 - 6) L. van Hove, Phys. Lett. 118B, 138 (1982)
 - 7) (WA80): R. Albercht et al., Phys. Lett. B199, 297 (1987); B201, 390 (1988); H. Lohner et al., Z. Phys. C38, 97 (1988); T. Peitzmann et al., Nucl. Phys. A498, 38c (1989). (NA35): T. J. Humanic et al., Z. Phys. C38, 79 (1988); A. Bamberger et al., Phys. Lett. 184B, 271 (1987); B. Renfordt et al., Nucl. Phys. A498, 385c (1989); J. Harris et al., ibid. 133c (1989). (NA34): Shukraft et al., Nucl. Phys. A498, 79 (1989). T. Akesson et al., Z. Phys. c46, 361 (1990)
 - 8) B. Andersson and W. Hofmann Phys. Lett. B169, 364 (1986) A. Cooper et al., Phys. Lett. 87B, 393 (1979)
 - 9) W. A. Zajc, Phys. Rev. D35, 3396 (1987)
 - 10) Y. Takahashi et al., Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf. 8, 95 and 103 (1990); A. Iyono et al., Nucl. Phys. A544, 455 (1992)

*CERN-EXPERIMENT EMU05 Collaboration

Y. Takahashi¹, J. C. Gregory¹, T. Shiina¹,
 M. J. Christl², J. H. Derrickson², W. F. Fountain², T. A. Parnell²,
 B. Rubin², J. W. Watts², S. Nagamiya³, T. Tominaga⁴, S. Dake⁵,
 M. Fuki⁶, A. Iyono⁷, T. Ogata⁸, O. Miyamura⁹, Yokomi¹⁰

- 1 University of Alabama in Huntsville, AL. 35899, USA;
- 2 ES-62, NASA/Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL. 35812, USA;
- 3 Physics Department, Columbia University, New York, NY. 10027, USA;
- 4 Louisiana State University, Baton Rouge, LA. 70803, USA;
- 5 Department of Physics, Kobe University, Kobe 657 Japan;
- 6 Faculty of Education, Kochi University, Kochi 780, Japan;
- 7 Okayama University of Science, Okayama 700, Japan;
- 8 Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tokyo 188, Japan;
- 9 Department of Physics, Hiroshima University, Hiroshima 730, Japan ;
- 10 Tezukayama University, Nara 631, Japan.

Transverse Momentum Spectra and Cluster Analyses in S+Pb Collisions at 200 GeV/AMU (CERN Experiment EMU05)

Atsushi IYONO

Department of Mechanical Engineering,

Okayama University of Science

Didai-cho 1-1, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1992)

Transverse momentum distributions of both positive and negative charged particles produced in 200 GeV/AMU heavy ion collisions are obtained with Magnetic-Interferometric-Emulsitn-Chamber by CERN-EMU05 experiments. The Transverse momentum (P_T) spectra at both central and target rapidity regions showed no anomalous enhancement of low P_T components over a conventional, single exponential function with slope values ranging from 160 to 200 MeV/c.

Charge-sign clustering test were tested. G-test were applied for some high multiplicity event. Charge-sign clustering does not exceed that from a random coincidence.