

エマルジョン・スペクトロメーターによる 高エネルギー原子核・原子核衝突の精密測定 (CERN-EMU05実験*)

伊 代 野 淳

岡山理科大学大学院・理学研究科・システム科学専攻

(昭和63年 9 月30日 受理)

概 要

EMU05実験は、200GeV/amu の酸素及び硫黄原子核・鉛原子核衝突で放出される荷電二次粒子の荷電符号及び運動量の精密測定を行ってきた。この実験では、検出器として1.8Teslaの磁場中に置いたエマルジョン・チェンバー (MAGIC) 用い、荷電粒子の運動量測定を行い、運動量測定精度 $\sigma(P)/P=1.5(1+P/3\text{GeV}/c)\%$ の結果を得た。また、これまでの測定結果から、荷電二次粒子の多重度分布、放出角度分布が得られ、包括的な分布については、核子・核子衝突の重ね合わせで説明でき、平均横方向運動量 $\langle P_T \rangle$ は340MeV/cであり、従来の値と比べ大きな変化はないことが分かった。一方、荷電符号については、run-test(連検定)を行った結果、同種電荷粒子のクラスター構造が見られた。ここでは、EMU05実験の概要及びこれまでに得られた結果について述べていく。

序 章

1986年から欧州原子核研究所 (CERN) で200GeV/amu の酸素及び硫黄原子核、アメリカ・ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で15GeV/amu の珪素原子核ビーム実験が始まる以前は、日米共同エマルジョン実験 (JACEE) が宇宙線中の高エネルギー原子核による原子核衝突の研究を行っており、先駆的な実験結果¹⁾を供給してきた。その結果、平均横方向運動量 $\langle P_T \rangle$ のラピディティ密度上昇に伴う増加傾向や、大多重事例の近接荷電粒子対の増加などの現象を観測し、荷電多重度が1000を超える衝突事例の相互作用領域のサイズが3~4 fmであり、非常に小さいことが分かった。EMU05実験は、近接粒子対の荷電符号を測定し、HBT効果²⁾ (Hambury-Brown/Twiss effect) によって相互作用領域のサイズ決定を目的として始められた。

実験及び運動量測定精度³⁾

EMU05実験で使用した検出器は、低密度のスチロフォーム板をスペーサーに用いたエマルジョンチェンバー (Magnetic-Interferometric-Emulsion-Chamber : Magic) であり、

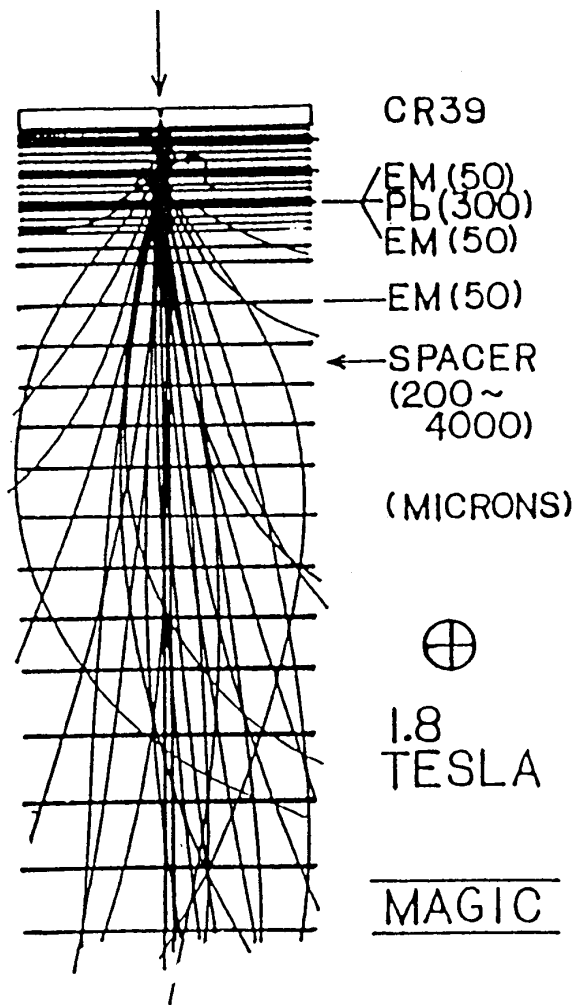


図1 磁場中に置いた検出器(MAGIC)

チェンバー全体は1.8Teslaの磁場中に置いた。チェンバーの構造は図1に示すように、上流側の標的層(酸素ビーム: $300\mu\text{m}$, 硫黄ビーム: $200\mu\text{m}$ pb板)と約4.5cmの奥行きを持つスペクトロメーター層から構成されている。エマルジョンプレートは、 $70\mu\text{m}$ のポリスチレンフィルム両面に $50\mu\text{m}$ のエマルジョンを塗布した薄型のものを用いた。荷電粒子の座標測定(tracking)は、鉛板直下から約4.5cm下流のプレートまで十数層に渡って行われ、曲率半径の測定によって粒子の運動量が決定される。スペクトロメーター層の厚さは、 0.05 rad. l 、ハドロンに対し 0.005 m. f. p. の低密度であり、磁場と多重散乱によるふれ(deflection)の比(S/N ratio) ≈ 7 を実現している。

第一段階の解析として、擬ラピディティ η ($\equiv -\ln \tan \theta/2$) ≥ 2 に放出された荷電粒子の運動量及び荷電の測定を行ってきた。図2は、 $\text{S} + \text{Pb} \rightarrow 535^{\text{ch}}$ 事例のtrackingの様子を示している。この図では、衝突点から放出された二次粒子と別に、近傍のSビームも示してある。これらは、reference-trackとして各層間の回転・平行移動量決定(再構成)に用いられる。再構成された各トラックの座標データをビーム入射方向に垂直な面に投影した図

を、磁場の方向とのなす角が小さい2本のトラックについて図3に示した。これらのトラックは、磁場を通過中に+X方向に曲がっている。次に、再構成された座標データから各トラックの運動量決定を行う。磁場中での荷電粒子の軌跡は、最小二乗法によって二次曲線をフィットし、運動量が決定される。(適当な3層を組合せたデータから Sagitta 法によって、運動量決定を行う場合もある。) 図4は、再構成された座標データ (X_{rec} , Y_{rec}) とフィッティング曲線から求められる座標 (X_{ass} , Y_{ass}) の各層に於けるずれのトラック毎の

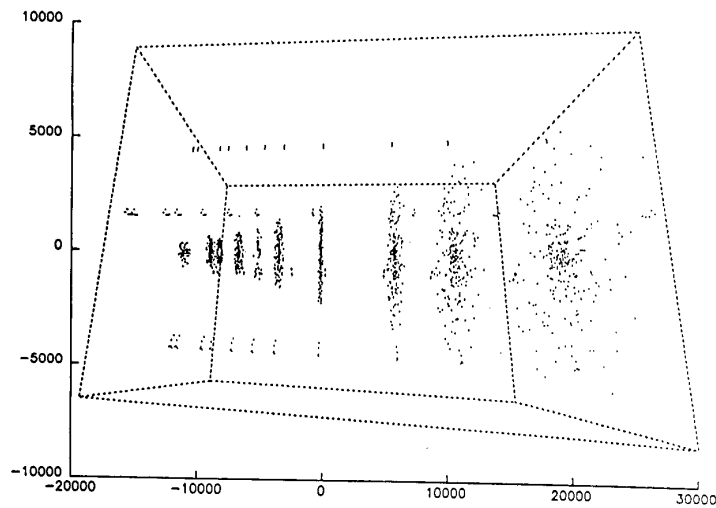


図2 トラッキングの3次元描像

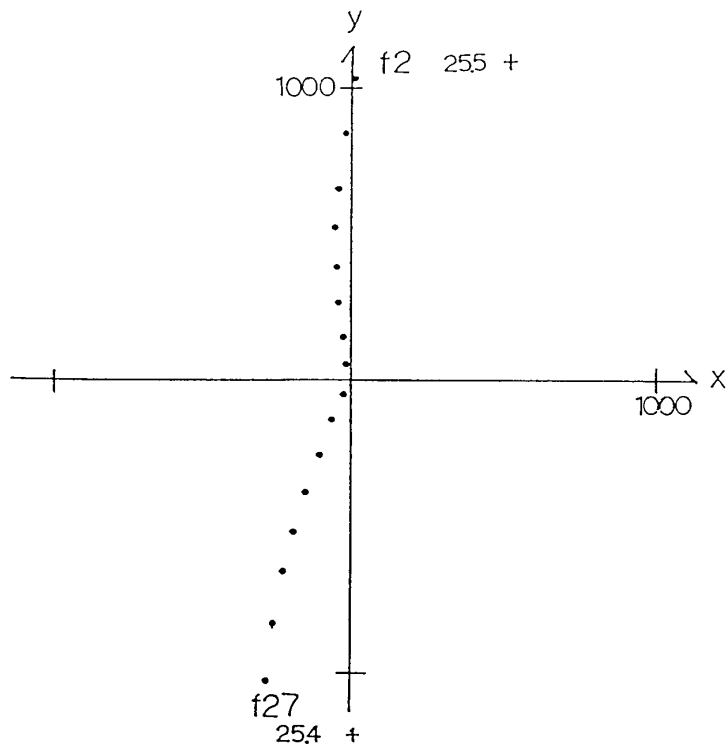


図3 磁場に平行な平面へのトラックの投影図

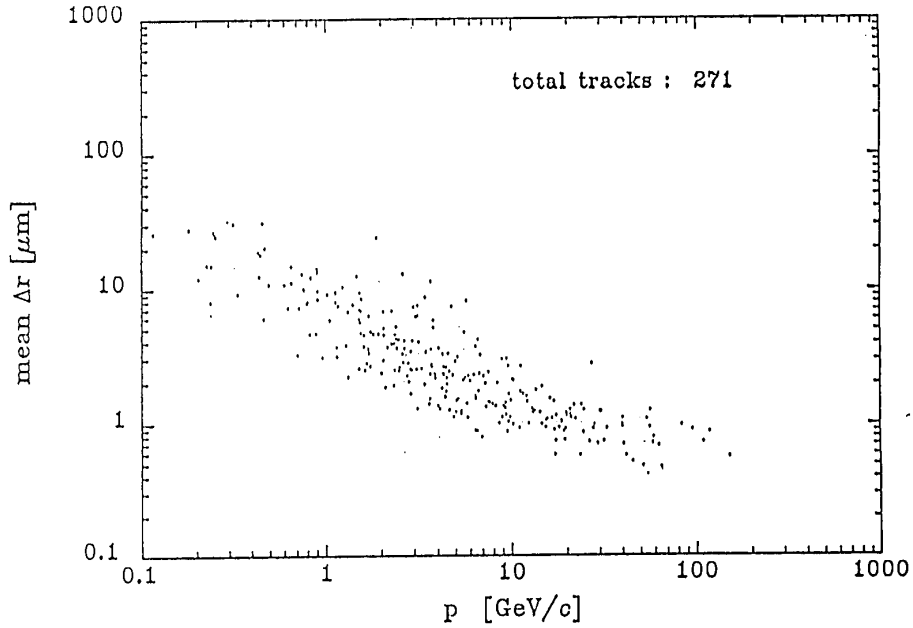


図4 観測したトラック位置とフィッティングした曲線間の距離 Δr の平均値

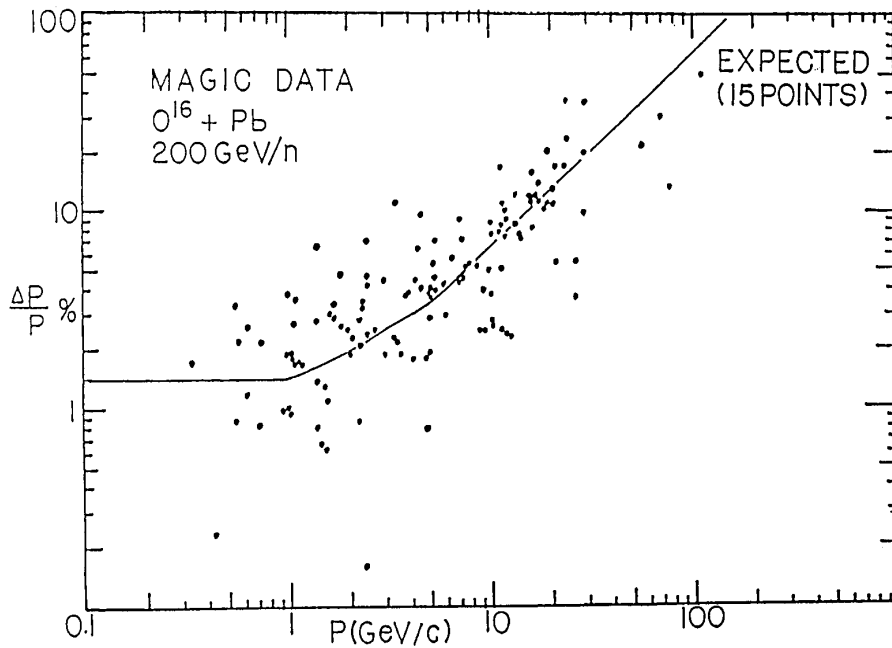


図5 200GeV/amu O+Pb 事例の運動量分解能

平均値 ($\langle \Delta r \rangle \equiv \langle \sqrt{[(X_{\text{rec}} - X_{\text{ass}})^2 + (Y_{\text{rec}} - Y_{\text{ass}})^2]} \rangle$) を、曲線から決定された運動量 (P GeV/c) を横軸にとり示してある。 $P \leq 20$ GeV/c の領域のずれ (Δr) の運動量依存性は、多重散乱による P^{-1} に依存した座標誤差の減少を表している。一方、 $P \geq 20$ GeV/c の領域では一定の Δr ($\approx 1 \mu\text{m}$) を示し、エマルシヨンの空間分解能の限界を示している。

次に、運動量の決定精度 $\sigma(P)/P$ % は、曲率半径が運動量に比例しているため、運動量

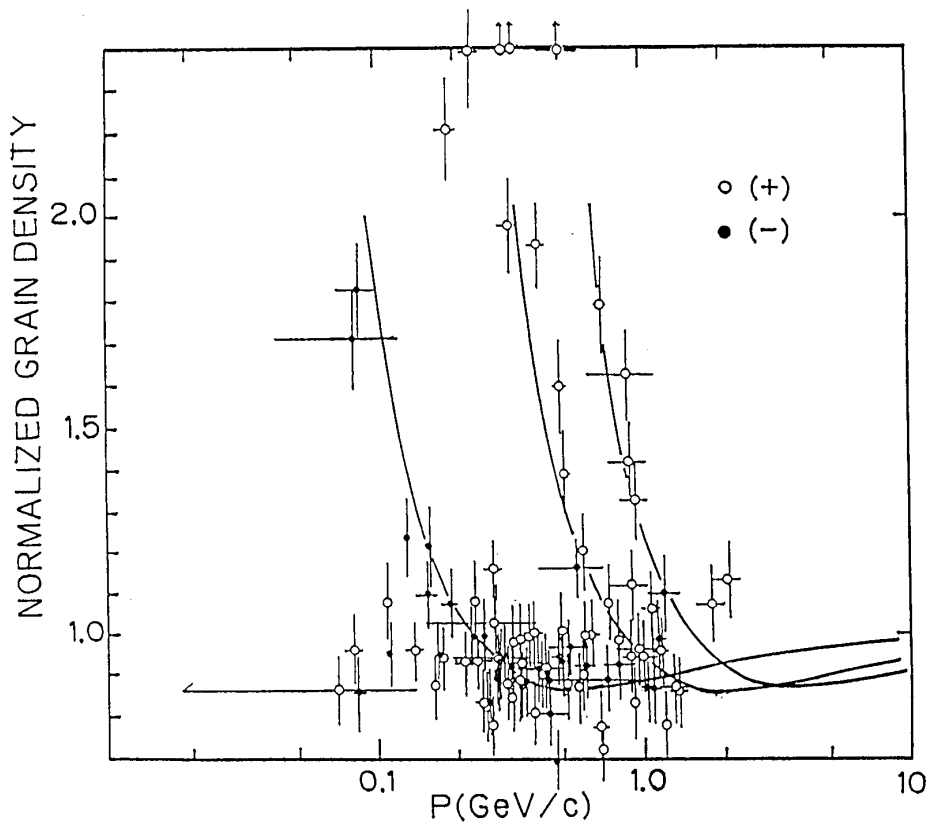


図6 200GeV/amu S+Pb 事例の粒子同定に対する電離損失と運動量の関係

の増加に伴って悪くなる。 $P \leq 20 \text{ GeV/c}$ での精度は良くなるのではなく、多重散乱によって一定になる。一方、多重散乱による座標誤差が無視できる $P \geq 20 \text{ GeV/c}$ では、 P に比例して精度は悪くなっていく。実際のイベントで得られた運動量測定精度を図5に示した。この結果は、衝突点直下のエマルジョンプレートから最下層までの十数層の測定から得られた結果である。運動量とその精度は、 $\sigma(P)/P = 1.5(1 + P/3 \text{ GeV/c})\%$ (1)と表せる。

最後に、銀粒子数カウントによって電離を測定し、粒子の同定を行った結果を図6に示す。ここで、粒子同定の対象となるトラックは、放出角 $\theta \leq 60^\circ$ 、 $P \leq 10 \text{ GeV/c}$ である。放出角の小さいトラックは、銀粒子カウントを行うことができないので、エマルジョンに distortion を生じさせ、銀粒子を分離し、容易にカウントが行える。現在、一層だけによる銀粒子密度の測定精度は3.5%である。

結 果

1. 荷電粒子多重度分布⁴⁾

多重度 N_s は、単位電荷の飛跡の1.4倍までの銀粒子密度をもつ飛跡の数を意味し、生成二次粒子の荷電の他に衝突に関与した荷電も含んでいる。また、我々の測定では、 $N_s < 10$ である事例には測定バイアスがかかっている。酸素原子核について265事例、硫黄原子核について315事例の測定で得られた多重度分布を図7に示す。ここで、平均多重度 $\langle N_s \rangle$ はそ

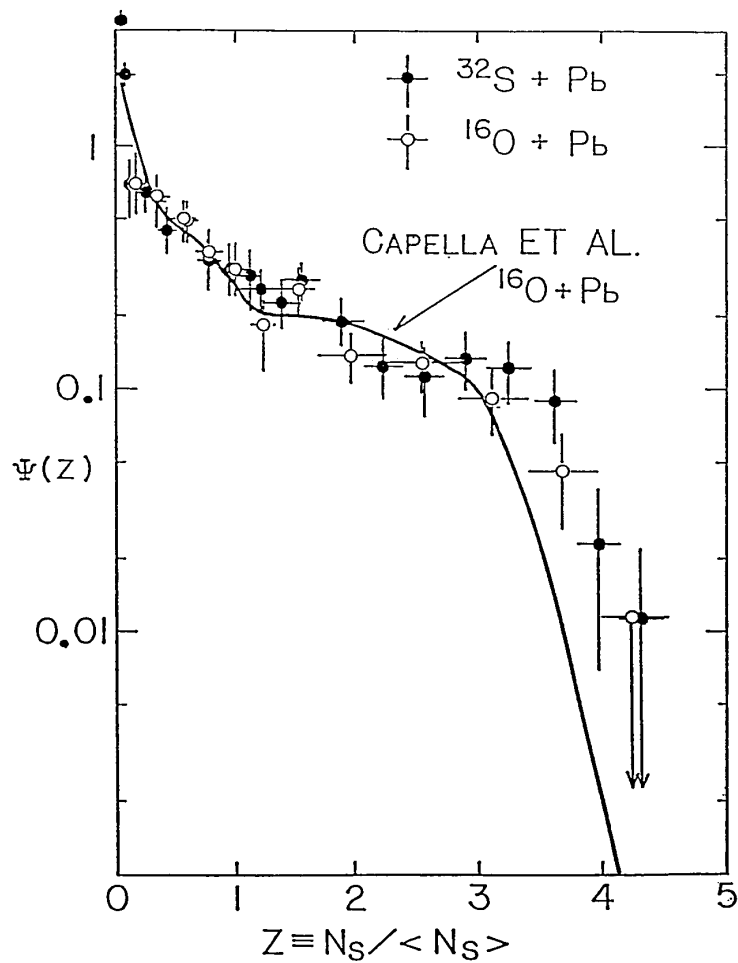


図7 200GeV/amu O, S+Pb 衝突の多重度分布

れぞれ88, 124であった。また, Glauber 模型に基づき核子・核子衝突を重ね合わせた Capella らの計算結果⁵⁾を実線で示した。この図で, 酸素, 硫黄のどちらの分布も横軸 $Z (=N_S / \langle N_S \rangle)$ によって表わすと, 非常によく一致している。一方, 重ね合わせに基づく計算は $Z \geq 3$ でずれが見られ, 大多重度の頻度が, 少ない結果を示している。

2. 包括的な擬ラピディティ分布⁴⁾

ここでは, 酸素について35事例の測定結果から擬ラピディティ ($\eta = -\ln \tan \theta/2$) 分布の包括的な特徴について報告する。図8に, 全事例, 多重度が200以上, 200以下について平均をとった擬ラピディティを示す。各分布は, 核子・核子衝突の重心系である擬ラピディティ $\eta_c (\eta = 3)$ を中心として前後方に非対称な形をし, 後方でラピディティ毎の多重度が大きくなっている。これは, JACEE で観測されている高エネルギー密度事例³⁾に見られる前後方対象な形ではなく, ハドロン・原子核衝突で観測されている非対称な擬ラピディティ分布の傾向と一致する。また, 分布のピーク位置は, 多重度の増大に伴って後方に移動し, その増大は主に後方で起こっていることが分かる。

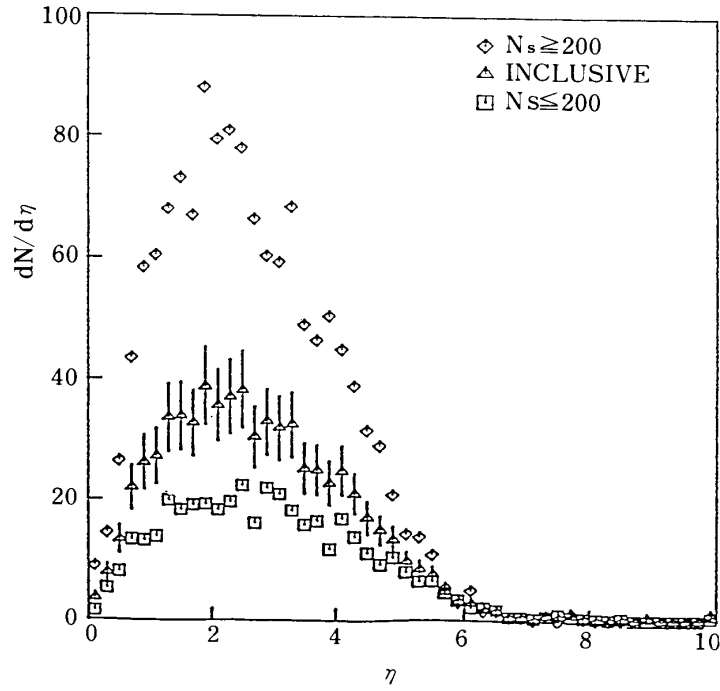


図8 200GeV/amu O+Pb 事例の包括的擬ラピディティ分布

3. 横方向運動量分布及び荷電分布⁶⁾

酸素及び硫黄原子核の衝突について、荷電粒子の運動量及び荷電符号の測定を行った結果得られた横方向運動量(P_T)分布を、図9に示す。平均横方向運動量 $\langle P_T \rangle$ は $340 \pm 20 \text{ MeV/}$

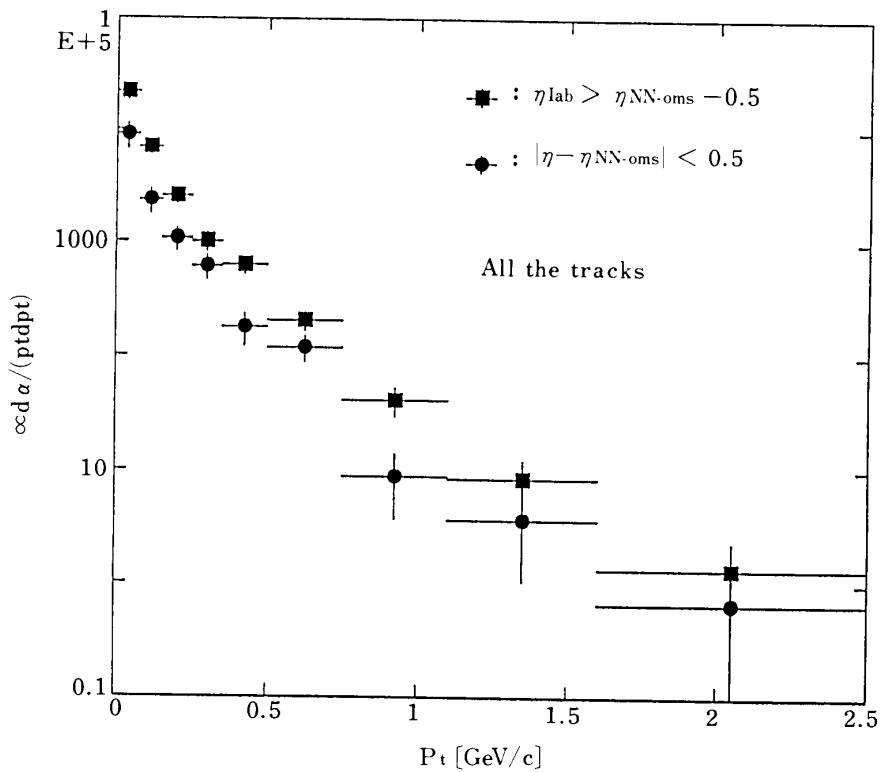


図9 横方向運動量分布

cであり、核子・核子衝突で観測されている値とよく一致し、 $\langle P_T \rangle$ の増大傾向は見られない。この分布では $P_T < 300 \text{ MeV}/c$ で小 $\langle P_T \rangle$ 成分の存在が見られ、WA80⁷⁾も同様の結果を報告している。この成分の存在は、原子核・原子核衝突の特徴であるとの解釈もあるが、我々は衝突点へ取れんが十数 μm を超えるトラック (off vertex component) を除くことで、この成分が消えることが分かり、この成分は π^0 起源の γ 線による鉛内での電磁カスケードによって生成された e^\pm であると考えている。

次に、S+Pb $\rightarrow 535$ の事例の $\eta-\phi$ の分散図を図10に示した。ここでは、正電荷を○、負電荷を□、更に off vertex 成分を●、■で表した。この図で、前方 ($\eta > 6$) に負電荷の粒子が多い傾向にあり、どの事例にも共通している。一般的な衝突の描像として、入射原子核正電荷を持っており、衝突後も比較的高いエネルギーを持ち最前方に放出され、前方には正電荷を持った粒子が多いと予想されていた。しかし、中心衝突事例では、入射原子核中の核子は衝突によって大きくエネルギーをロスし、前方に放出されていないと考えられる。

$\eta-\phi$ 空間で同じ電荷の粒子のクラスターの存在を以下のように検定した。 $\eta-\phi$ 空間内で η を適当な幅 $d\eta$ にきり、その中で ϕ 順の荷電符号の並び方を調べる連 (run) 検定によって調べた。run 検定は、ある $d\eta$ 内の正、負電荷の数を N_+ , N_- とすると、run の平均値 $\langle r \rangle$ 、分散 V^2 は

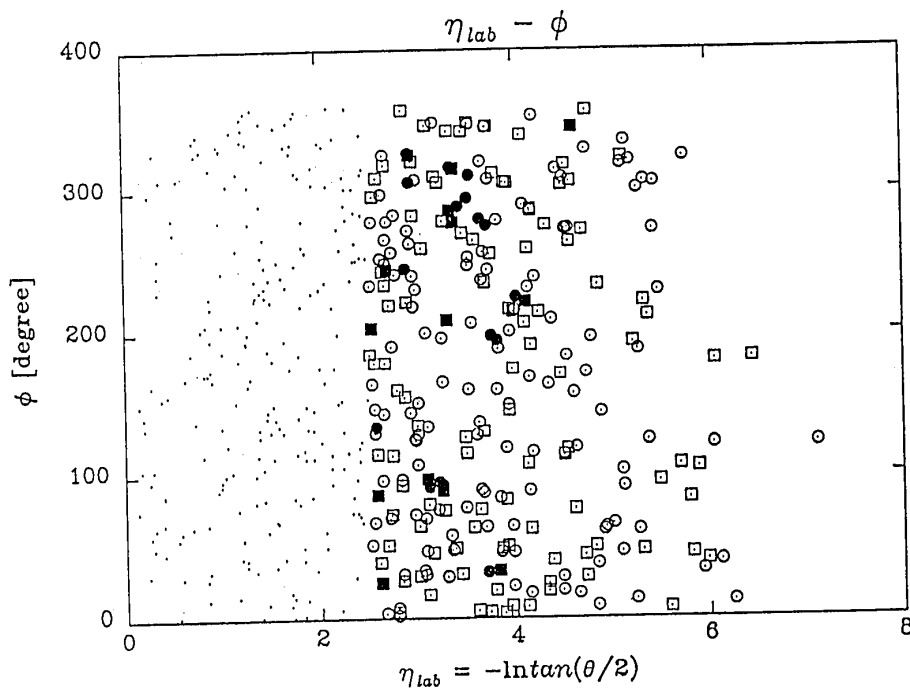


図10 200GeV/amu S+Pb $\rightarrow 535$ ch 事例の $\eta-\phi$ 分散図

$$\langle r \rangle = 2N_+N_- / (N_+ + N_-) + 1,$$

$$V^2 = 2N_+N_- (2N_+N_- - N_+ - N_-) / (N_+ + N_-)^2 / (N_+ + N_- - 1)$$

と表せ、規格化した run の数 X は、

$$X = (r - \langle r \rangle) / V$$

と定義される。 X は、 N_+ 、 N_- が 10 以上で、正負の電荷のトラックが、ランダムに生成される場合は、 $(0, 1)$ の正規分布に従う。 $S+Pb \rightarrow 535$ の事例の $1.5 < \eta < 3$ の領域について、 X の分布を図 11-a に示した。この図で、分布が X のマイナス側にずれ、run の不足を示している。これは、同じ電荷の粒子の並びが多く、荷電クラスターの様相を示している。こ

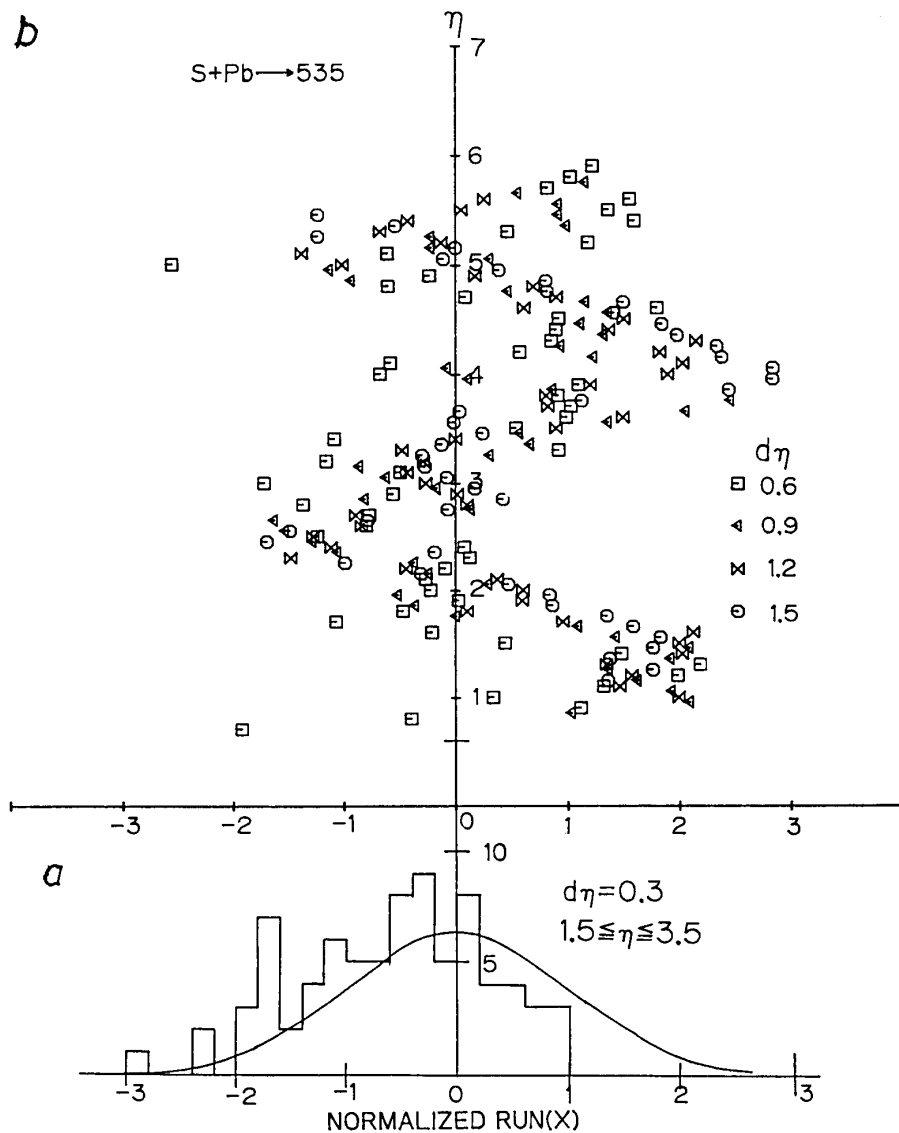


図11-a, b 200GeV/amu S+Pb \rightarrow 535ch 事例の規格化した run (X) の分布と X の幅 $d\eta$ の中央値に対する変化

ここで、Bose-Einstein 効果による粒子相関は負の X を示し、中央値として $X = -.24$ を与える。一方、荷電粒子が局所的に正負電荷の対生成が起こっている場合は、正の X を示し、およそ $X = 2$ である。

図11-b は、同事例について、幅 $d\eta$ の中央値に対する X の値の変化を示している。この図で、 $1 < \eta < 2$ と $3.5 < \eta < 5$ の領域では、 $X > 0$ の傾向を示し、局所的に正負電荷の粒子が生成される傾向を示しているのに対し、 $2 < \eta < 3$ と $5 < \eta$ では、 $X < 0$ を示し、同種電荷クラスターの様相が見られる。しかし、クラスターを示す領域は、解析を行った事例全てについて一致してはいない。この事例以外は、最前方の fragmentation 領域で、 $X < 0$ を示している。run 検定の結果、クラスターの様相と局所的な対生成成分の存在が明らかになった。更に、run によるクラスターの検定は、二つのクラスターが隣合わせに並んでいる場合に、シグナルは顕著であるが、一般には弱いと考えられるので、我々が得たシグナルは十分に大きいと言えるかもしれない。また、run 検定は、幅 $d\eta$ 、 $d\phi$ 内の荷電密度に対する χ^2 検定と独立であり、両者を組み合わせることによってより明かな結果が得られると考えられる。

ま と め

EMU05実験は、Magic という新しいタイプの検出器を用い、 ^{16}O 、 ^{32}S (200GeV/n) + Pb 衝突の解析によって、運動量、荷電符号の測定及び粒子同定を行っており、(1)式で与えられる運動量測定精度を得ている。また、これまでの測定結果から、包括的な多重度分布、放出角度分布は核子・核子衝突の重ね合せに基づく描像で説明できることが分かった。一方、荷電クラスターの存在も明らかになった。我々は、JACEE が観測した異常現象の検証という立場を踏襲しつつ、Magic を JACEE に利用する実験 (Super-JACEE)⁹⁾ を計画している。測定・解析に時間を要するという問題点もあり、特に'91年に CERN で予定される Pb ビーム実験では $N_{ch} \geq 1000$ の事例が解析対象になり、測定・解析システムの充実を図る必要がある。

* *The EMU05 Collaboration* :

Y. Takahashi, J. C. Gregory, T. Hayashi, J. H. Derrickson¹, P. B. Edy¹,
W. F. Fountain¹, T. A. Parnell¹, F. E. Roberts¹, T. Tabuki¹, J. W. Watts¹,
S. Nagamiya², S. Dake³, M. Fuki⁴, A. Iyano⁵, T. Ogata⁶,
O. Miyamura⁷, T. Tominaga⁸

School of Science, University of Alabama in Huntsville, USA

(1) Space Science laboratory, NASA Marshall space Flight Center, USA

(2) Department of Physics, Columbia University, USA

(3) Department physics, Kobe University, Japan

- (4) Matusyou-Gakuen Junior College, Japan
- (5) Department of Electric Science, Okayama University of Science, Japan
- (6) Institute for Cosmic ray research, University of Tokyo, Japan
- (7) Department of Applied Mathematics, Osaka University, Japan
- (8) Department of Physics and Astronomy, Luisiana State University, USA

参考文献

- 1) The JACEE Collaboration : T. H. Burnett et al., Phys. Rev. Lett., **57**, 3249 (1986), Y. Takahashi and S. Dake, Quark Matter 86 conference, Nucl. Phys. **A461**, 263c (1987)
- 2) R. Hambury Brown and R. O. Twiss, Nature 177 (1957) 27.
- 3) A. Iyono et al., EMU05 collaboration, Proc. of the Workshop on Quark-Gluon Plasma, KEK REPORT '87 (in press)
- 4) 伊代野淳, 神戸大学理学研究科修士学位論文 (1988)
- 5) A. Capela et al., Phys. Rev. **D35**, 2921 (1987)
- 6) Y. Takahashi et al. (EMU05 Collaboration), J. Phys. Soc. Supple. Jan. 1989 (in press)
- 7) R. Albrecht et al. (WA80 Collaboration), Phys. Lett **201B**, 390 (1988)
- 8) Y. Takahashi, Proc. of the Workshop on Quark-Gluon Plasma, KEK REPORT '87 (in press)

Charge-signs and Momenta Measurements
in High Energy Nucleus-nucleus Interactions
by the Emulsion-spectrometer
(The EMU05 Experiment*)

Atushi IYONO

Graduate School of Science

Okayama University of Science

Ridai-cho 1-1, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1988)

In the EMU05 experiments, emission angles, momenta and charge-signs of all charged particles have been measured in $^{16}\text{O}+\text{Pb}$ and $^{32}\text{S}+\text{Pb}$ interactions at incident energy of 200 GeV per nucleon. The multiplicity distributions of ^{16}O and ^{32}S nucleus interactions are almost scaling expressed as a function of scaling variable Z ($\equiv N_s / \langle N_s \rangle$). Measuring momentum of charged particles for high multiplicity events, momentum resolution is expressed $\sigma(P) / P = 1.5 (1 + P/3\text{GeV}/c)$ and we have obtained their transverse momentum (P_T) distributions as preliminary results and the average transverse momentum $\langle P_T \rangle$ is 340 MeV/c. A statistical "run-test" was performed for each measured event. We observed charge clusters for like-sign.