

# 日ロ共同気球実験で観測された高エネルギー銀河宇宙線の エネルギースペクトル

晴山 慎<sup>1</sup>, V. A. Derbina<sup>2</sup>, V. I. Galkin<sup>3</sup>, 平川 裕輔<sup>4</sup>, 堀内 洋平<sup>5</sup>, 市村 雅一<sup>4</sup>,  
井上 直明<sup>5</sup>, 上岡 英史<sup>6</sup>, 小林 正<sup>5</sup>, V. V. Kopenkin<sup>3</sup>, 倉又 秀一<sup>4</sup>,  
A. K. Managadze<sup>3</sup>, 松谷 秀哉<sup>7</sup>, N. P. Misnikova<sup>3</sup>, R. A. Mukhamedshin<sup>8</sup>, 長澤 信慈<sup>5</sup>,  
中野 理恵<sup>4</sup>, 並木 道義<sup>9</sup>, 中沢 光彦<sup>5</sup>, 南條 宏肇<sup>4</sup>, S. N. Nazarov<sup>8</sup>, 太田 茂雄<sup>9</sup>,  
大友 洋之<sup>4</sup>, V. I. Osedlo<sup>3</sup>, D. S. Oshuev<sup>3</sup>, P. A. Publichenko<sup>8</sup>, I. V. Rakobolskaya<sup>2</sup>,  
T. M. Roganova<sup>3</sup>, 齊藤 千絵<sup>5</sup>, G. P. Sazhina<sup>3</sup>, 仙波 宏史<sup>10</sup>, 柴田 徹<sup>5</sup>, 首藤 大輔<sup>4</sup>,  
杉本 久彦<sup>11</sup>, 鈴木 良<sup>5</sup>, L. G. Sveshnikova<sup>3</sup>, V. M. Taran<sup>8</sup>, 矢島 信之<sup>9</sup>, 山上 隆正<sup>9</sup>,  
I. V. Yashin<sup>3</sup>, E. A. Zamchalova<sup>3</sup>, G. T. Zatsepin<sup>2</sup>, I. S. Zayarnaya<sup>8</sup>

## Energy Spectrum of High Energy Galactic Cosmic Rays Observed by Japanese – Russian Joint Balloon Experiment

RUNJOB COLLABORATION

(Russia – Nippon JOint Balloon – program)

By

M. Hareyama<sup>1</sup>, V. A. Derbina<sup>2</sup>, V. I. Galkin<sup>3</sup>, Y. Hirakawa<sup>4</sup>, Y. Horiuchi<sup>5</sup>, M. Ichimura<sup>4</sup>,  
N. Inoue<sup>5</sup>, E. Kamioka<sup>6</sup>, T. Kobayashi<sup>5</sup>, V. V. Kopenkin<sup>3</sup>, S. Kuramata<sup>4</sup>,  
A. K. Managadze<sup>3</sup>, H. Matsutani<sup>7</sup>, N. P. Misnikova<sup>3</sup>, R. A. Mukhamedshin<sup>8</sup>, S. Nagasawa<sup>5</sup>,  
R. Nakano<sup>4</sup>, M. Namiki<sup>9</sup>, M. Nakazawa<sup>5</sup>, H. Nanjo<sup>4</sup>, S. N. Nazarov<sup>8</sup>, S. Ohata<sup>9</sup>,  
H. Ohtomo<sup>4</sup>, V. I. Osedlo<sup>3</sup>, D. S. Oshuev<sup>3</sup>, P. A. Publichenko<sup>8</sup>, I. V. Rakobolskaya<sup>2</sup>,  
T. M. Roganova<sup>3</sup>, C. Saito<sup>5</sup>, G. P. Sazhina<sup>3</sup>, E. Semba<sup>10</sup>, T. Shibata<sup>5</sup>, D. Shuto<sup>4</sup>,  
H. Sugimoto<sup>11</sup>, R. Suzuki<sup>5</sup>, L. G. Sveshnikova<sup>3</sup>, V. M. Taran<sup>8</sup>, N. Yajima<sup>9</sup>, T. Yamagami<sup>9</sup>,  
I. V. Yashin<sup>3</sup>, E. A. Zamchalova<sup>3</sup>, G. T. Zatsepin<sup>2</sup>, I. S. Zayarnaya<sup>8</sup>

**abstract:** This is a full report on the cosmic-ray spectra and composition obtained by the emulsion chambers on board 10 long-duration balloons, launched from Kamchatka between 1995 and 1999. The total exposure of these campaigns amounts to 575 m<sup>2</sup> hr, with an average flight altitude of 32 km. We

<sup>1</sup> Major in Pure and Applied Physics, Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan

<sup>2</sup> Physical Department of Moscow State University, Moscow 119899, Russia

<sup>3</sup> D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119899, Russia

<sup>4</sup> Faculty of Science and Technology, Hirosaki University, Hirosaki 036-8561, Japan

<sup>5</sup> Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, Tokyo 157-8572, Japan

<sup>6</sup> Multimedia Information Research Division, National Institute of Informatics, The Ministry of Education, Tokyo 101-8430, Japan

<sup>7</sup> School of Medicine, Hirosaki University, Hirosaki 036-8562, Japan

<sup>8</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 117924, Russia

<sup>9</sup> Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara 229-8510, Japan

<sup>10</sup> Faculty of Comprehensive Welfare, Urawa University, Urawa 336-0974, Japan

<sup>11</sup> Shonan Institute of Technology, Fujisawa 251-8511, Japan

present final results on the energy spectra of two light elements, protons and helium nuclei, and on those of three heavy-element groups, CNO, NeMgSi, and Fe, covering the very high energy region of 10~1000 TeV/particle. We additionally present the secondary/primary ratio, the all-particle spectrum, and the average mass of the primary cosmic rays. We find that our proton spectrum is in good agreement with other results, but the intensity of the helium component is nearly half that obtained by JACEE and SOKOL. The slopes of the spectra of these two elements obtained from RUNJOB data are almost parallel, with values of 2.7~2.8 in the energy range of 10~500 TeV/nucleon. RUNJOB heavy-component spectra are in agreement with the extrapolation from those at lower energies obtained by CRN (Chicago group), monotonically decreasing with energy. We have also observed secondary components, such as the LiBeB group and the sub-Fe group, and present the secondary/primary ratio in the TeV/nucleon region. We determine the all-particle spectrum and the average mass of the primary cosmic rays in the energy region of 20~1000 TeV/particle. The intensity of the RUNJOB all-particle spectrum is 40%~50% less than those obtained by JACEE and SOKOL, and the RUNJOB average mass remains almost constant up to 1 PeV.

## 概 要

本報告は、1995年から1999年にかけて行われた10機の長時間気球に搭載したエマルジョンチェンバーによって観測された宇宙線のエネルギースペクトルと化学組成を報告している。この気球観測実験での全露出量は575m<sup>2</sup>hr、平均高度は32kmであった。我々は、10~1000TeV/particleの高エネルギー領域での陽子、ヘリウム核およびCNO核グループ、NeMgSi核グループ、Fe核グループのエネルギースペクトルについての最終解析結果を示す。加えて、2次核/1次核比、全粒子スペクトル、1次宇宙線の平均質量数についても合わせて報告する。我々の陽子の結果は、他の観測結果とよい一致を示しているが、ヘリウム核については、JACEEやSOKOLで得られた強度の約半分であった。これら2つの成分のスペクトルの傾きは、10~500TeV/nucleonの領域ではほぼ平行で、そのべきは2.7~2.8乗である。重粒子成分のスペクトルは、CRNグループによって得られた低エネルギー領域でのスペクトルの延長線上にあり、エネルギーとともに強度を単調に減少している。LiBeBやsub-Feグループによる、2次核/1次核比はTeV/nucleon領域のデータを報告している。全粒子スペクトルと平均質量数については、20~1000TeV/particle領域をカバーしている。RUNJOBの全粒子スペクトルはJACEEやSOKOLに比べ、40%~50%程度低い強度を与え、平均質量数は1PeVまでほぼ一定のままである。

**重要語：**粒子加速、宇宙線、衝撃波、超新星

## 1 はじめに

10<sup>15</sup>eV付近での宇宙線のエネルギースペクトルの折れ曲がり、*knee*は、KulikovとKhristiansenが行った空気シャワー観測によって、1959年に初めて報告された [1]。その後、様々な空気シャワー観測グループによって観測され、*knee*が存在するということは確認された。Tibet AS- $\gamma$  [2] やKASCADE [3]などの最近の空気シャワー観測によるスペクトルは、*knee*は存在するものの、その変化の様子は、初めて報告されたような鋭い折れ曲がりではなく、エネルギーの増加とともに徐々に変化する形が多く報告されている。しかし、空気シャワーの

観測は、入射宇宙線が大気中の原子核と衝突後に起す2次的な現象を観測しているため、親の化学組成や親粒子ごとのエネルギースペクトルを求めることは困難であり、*knee* の内部構造を解明することは難しい。実際、同じグループの結果であっても、使用する核相互作用のモデルにより、スペクトル強度や化学組成が異なっている。

一方、直接観測による *knee* の観測は、気球や人工衛星といった飛翔体による大面積かつ長時間の観測が必要であるが、その困難さのため現在でも観測はなされていない。これまでの代表的な直接観測結果としては日米共同気球実験グループ (JACEE) による観測結果 [4,5] がある。彼らは、エマルジョンチェンバーによる観測を行い、*knee* 手前までの化学組成と粒子ごとのエネルギースペクトルを報告している。他にはロシア (旧ソ連) グループによる SOKOL 衛星による観測 [6] やバルーンを用いた MUBEE [7] による観測などわずかである。これらのグループによる観測も  $10^6$ eV 領域であり、*knee* には到達していない。つまり、直接観測によってもまだ完全に *knee* の詳細な構造は明らかにされていないといつてよい。

このような観測結果を持つ *knee* は、宇宙線の加速機構と伝播機構に密接の関係していると考えられ、多くの研究者により様々なモデルが提唱されている。たとえば、Hörandel は、衝撃波加速限界の核電荷依存性に注目し、*knee* 以上では、エネルギーの増加とともに徐々に重粒子成分が支配的となり、 $10^{17}$ eV 領域では超鉄核成分が卓越している可能性を指摘している [8]。Sveshnikova は、超新星爆発のタイプにより加速限界が違い、その存在度により *knee* を説明できるとしている [9]。また、*knee* 以上では、銀河系外成分が支配的であるためとする考えもある (例えば [10])。一方、*knee* の折れ曲がりには、核相互作用の変化によるものとする研究者も存在する。だが、衝突型加速器で人工的に *knee* 近くのエネルギーでの核相互作用現象が見れるようになり、それらの結果からは特別な変化は見えていないため、否定されつつある。ただし、加速器実験で観測される反応領域は、大角度領域が主であり、宇宙線観測で重要な役割をする前方領域の観測ではないため、完全に否定されるには至っていない。いずれにせよ、*knee* の原因を明らかにするためには、このエネルギー領域において個々の成分のエネルギースペクトルを知る必要があるが、*knee* 領域の宇宙線の到来頻度は小さく、観測器の面積と観測時間の限られる飛翔体による実験では十分な統計量を得ることができない。

しかしながら、近年の気球技術の向上により、JAXA や NASA によって南極大陸周回気球や大陸横断気球などによる数日から数10日の長時間観測が可能になってきた。2000年以降、ATIC [11,12] や CREAM [13] などによって代表されるよう、南極周回長時間気球により  $10^6$ eV 領域での十分な統計精度が期待できるような観測が行われている。このような観測に先駆け、日米共同気球実験 RUNJOB (RUSSIA-NIPPON JOINT BALLOON) experiment が、日本とロシアの国際共同実験として、1995年より開始された。RUNJOB 実験は、シベリア横断長時間気球を用い、高エネルギー宇宙線の直接観測を行い、数100TeV 領域までの化学組成とエネルギースペクトルを明らかにすることを目的とした気球実験である。ロシアの広大な大地を利用し、1カ国の上空のみで、1フライトにつき約140時間の観測を行うことができる。観測器にはエマルジョンチェンバーを使用している。RUNJOB 実験は、1995年から1999年までに全11機の気球を放球し、10機のフライトに成功し観測を終了した。

本報告は、この RUNJOB 実験で得られた最終解析結果をまとめたものである。得られた結果は、これまでに JACEE グループによって報告されていたようなスペクトルとは異なり、rigidity に依存した粒子加速と銀河内伝播で説明されるものであった。本報告では、はじめに RUNJOB 実験の実験概要と解析方法について簡単に説明し、続いて、RUNJOB 実験全フライトで得られた宇宙線データの解析結果について説明する (文献 [16] も参照のこと)。RUNJOB 実験の解析方法の詳細については [14] および [15] を参照していただきたい。

## 2 実験状況

### 2.1 宇宙線観測としてのロシアの地理的環境

日本とロシアの共同気球実験である RUNJOB 実験は、高エネルギー1次宇宙線の長時間観測を行うには非常に適した地理環境で行われている。東京（宇宙科学研究所（現 JAXA/宇宙科学研究本部）、東大宇宙線研究所）で製作された観測器は、放球基地のあるカムチャツカ半島に運ばれる。日本とカムチャツカ半島は近いため、輸送にかかる時間が約1週間と短い。また、回収地点であるボルガ川東岸から解体を行うモスクワ（モスクワ大学）までの距離が近いため、回収後1週間程度で解体が可能である。モスクワでの解体後、感光材は研究者らによって直ちに東京（宇宙線研）へ持ち帰られ、現像を行う。したがって、バックグラウンドとなる観測時以外の宇宙線入射が少なくなるというメリットがある。実際の組み立てから現像までにかかる時間は3ヶ月程度である（表1）。また、気球はシベリア大陸を横断するが、ロシアは広大な大地を持っているため1カ国の上空で約140時間の気球観測が可能であり、回収も地上で比較的容易に行える。例えば1999年の観測では、観測器の切り離し後の落下から着陸までをヘリコプターで確認し、トラックで回収を行った。

さらには、図1に示すように、この地域の宇宙線切断運動量（cut off rigidity）は約2～3GVであり [17]、

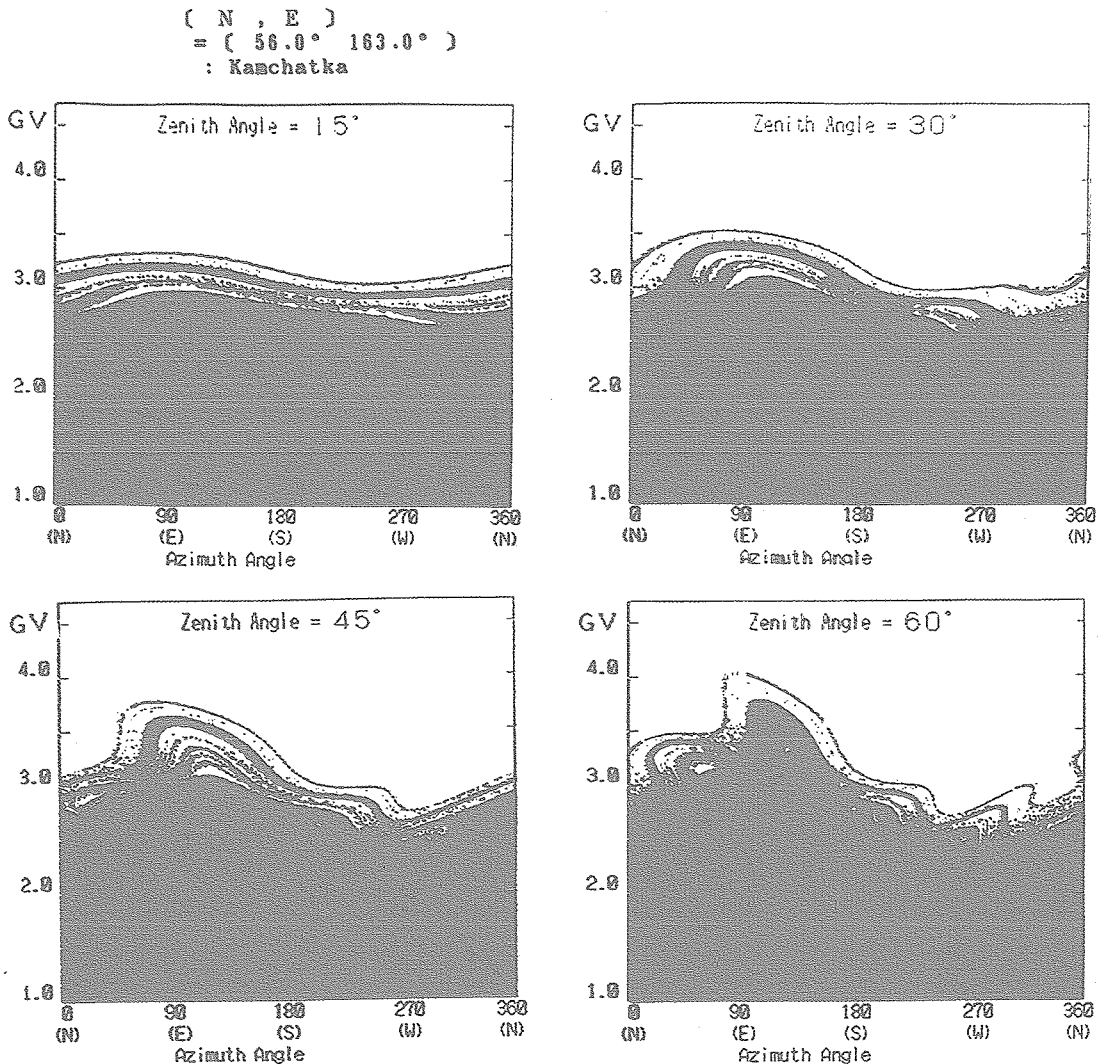


図1：ロシア・カムチャツカ上空での宇宙線切断運動量。入射天頂角ごとに示している。縦軸が rigidity[GV]、横軸が入射方位角である。白が許容帯、黒の部分が禁止帯となっている。

表 1：1999年度 RUNJOB 実験の日程。1995, 96, 97年の実験では乳剤の塗布は4月中旬から5月初旬にかけて行った。

日 程	作 業 工 程
2月22日～3月27日	原子核乳剤塗布（東大宇宙線研究所）
4月18・24・25日	ゴンドラ作り（文部省宇宙科学研究所）
5月1・2日	チェンバー組み立て（宇宙線研）
5月3日	チェンバー移送（宇宙線研⇒宇宙研）
5月4・5日	チェンバーのゴンドラへの組み立て（宇宙研）
5月10日	発送（宇宙研⇒日通）
5月20日	横浜港⇒ロシアカムチャツカ半島
7月8日	RUNJOB 8号機打ち上げ
7月12日	RUNJOB 9号機打ち上げ
7月13日	RUNJOB10号機打ち上げ
7月14日	RUNJOB11号機打ち上げ
7月14日	RUNJOB 8号機回収
7月18日	RUNJOB 9号機回収
7月19日	RUNJOB10号機回収
7月20日	RUNJOB11号機回収
8月7日	モスクワ⇒東京
8月8・9・10・11日	感光材の現像（宇宙線研）

南極での観測に比べ、我々の観測ではバックグラウンドとなる大量の低エネルギー宇宙線を排除できることになる。特に、我々の観測器はエマルジョンチェンバー（以下、ECと略する）であることを考えると、このようなバックグラウンドの低減化は非常に重要なであり、後の解析の負荷を軽減することになる。

このように、本研究の実験目的において、ロシアで気球実験を行うことは地理上の多くのメリットがある。しかし、ロシアの経済情勢や気球技術の開題によりいくつかの制限があり、これについては Appendix A で詳しく説明する。

## 2.2 放球状況

RUNJOB 実験は1995, 96年にそれぞれ2機, 1997年に3機, 1999年に4機の全11機の気球を放球し, 10機の飛行に成功した。1機（7号機）の失敗は、航空関係の安全装置の誤作動により放球後約3時間で観測器が気球から切り離され、飛行を終えた。観測器は直ちに回収されたが再放球は行われなかった。気球の航跡図を図2に、高度変化の様子を図3に示す。また、詳細な飛行データを表2に示す。気球の位置（緯度、経度）と高度は、それぞれロシアの COSPAS システムと気圧計から得られたものである。また、8, 9, 10号機では宇宙科学研究所（現宇宙科学研究本部）の協力により ARGOS-GPS システムを同時に搭載し気球データの収集を行い、同システムで得られたデータを図2, 3に示している。これら2つのシステムで得られたデータの比較は Appendix A にまとめる。

気球はカムチャツカ半島にある放球基地より放球され、シベリア大陸上空を約130～150時間の飛行の後、ボルガ川東岸で回収された。これは、ボルガ川を越えると人口が多くなり危険なため、この付近で気球から切り離すためである。いずれの飛行も北緯50°～60°を安定して飛行していることがわかる。また、高度は日没の影響による浮力の低下のため上下動を繰り返しながら、27km～36km（大気圧で平均約10g/cm<sup>2</sup>）の間で飛行している。この高度変化は大気圧の変化にして約10g/cm<sup>2</sup>となる、陽子、ヘリウム核の大気中での吸収の平均自由行程はそれ

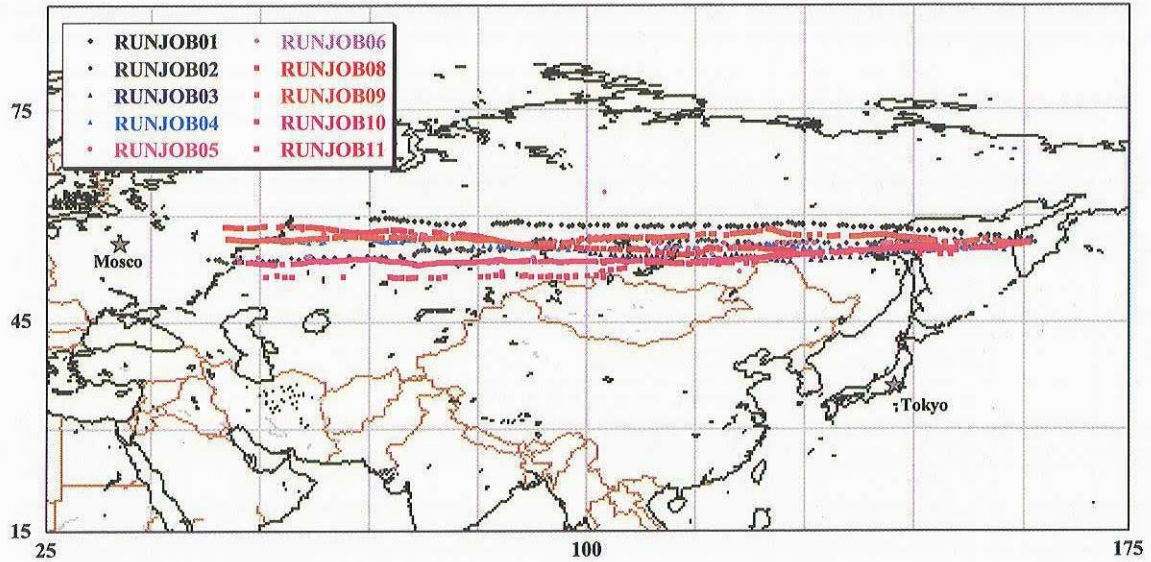


図2：RUNJOB 実験での気球の航跡図。カムチャツカ半島より放球され、ボルガ川付近で回収される。8、9、10号機は ARGOS-GPS システム、その他は COSPAS システムによって得られた航跡データを示している。

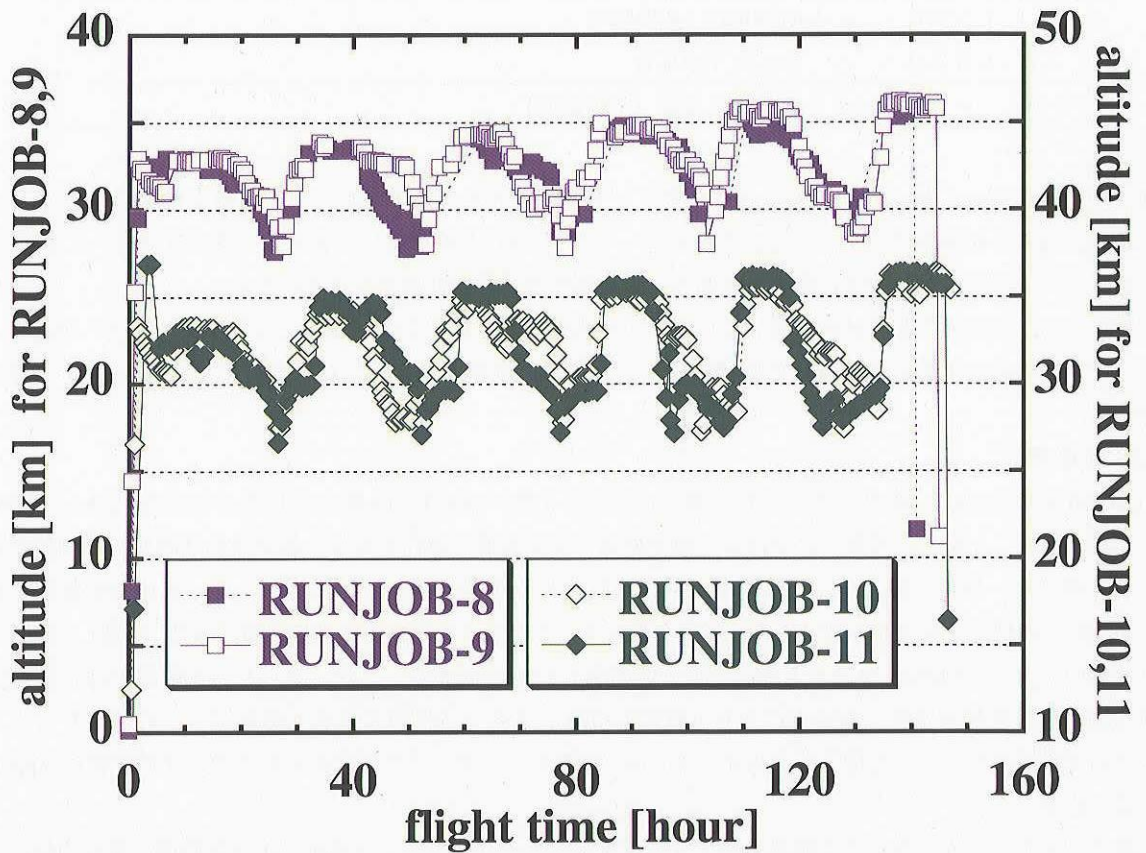


図3：RUNJOB 実験での高度変化の様子。8～10号機は ARGOS-GPS システム、11号機は COSPAS システム（気圧計）による高度を示している。

表 2: RUNJOB 実験全11機のフライトデータ。6号機の回収地点は不明なため空欄となっている。

	1995		1996		1997		1999				
RUTJOB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
launching date	15-Jul	19-Jul	17-Jul	18-Jul	9-Jul	11-Jul	failure	8-Jul	12-Jul	13-Jul	14-Jul
launching time	10:57	9:02	9:00	8:30	10:15	10:00		10:00	9:00	9:10	9:15
recovery date	20-Jul	25-Jul	23-Jul	24-Jul	15-Jul	17-Jul		14-Jul	18-Jul	19-Jul	20-Jul
recovery time	21:00	8:00	8:30	11:00	7:00	9:00		7:30	10:30	13:10	12:00
recovery place	Markushiuno	Inza	Permi	Ufa	Nizhny			Kirov	Rozhki	Tolkay	Orenburug
flight time[hour]	130.0	167.0	134.0	147.5	139.5	139.5		141.0	145.0	148.0	146.0
ave.altitude[g/cm <sup>2</sup> ]	10.0	9.6	9.8	10.2	10.5	10.7		9.5	9.2	9.2	9.0
chamber area[m <sup>2</sup> ]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0.4	0.4	0.4	0.4
chamber weight[kg]	230	230	260	254	260	260		227	227	227	227

表 3: 有効高度  $t_{eff}$  と有効立体角  $\Omega(t_{eff})$ 。表には大気中での吸収の m. f. p.,  $\lambda_a$  も示している。

	$\lambda_a$ [g/cm <sup>2</sup> ]		RJ1	RJ2	RJ3	RJ4	RJ5	RJ6	RJ9
proton	110.00	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	11.23	10.84	11.60	11.85	11.72	11.72	10.50
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.65	2.66	2.64	2.63	2.63	2.63	2.66
helium	48.68	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	11.23	10.84	11.60	11.85	11.72	11.72	10.50
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.65	2.66	2.64	2.63	2.63	2.63	2.66
LiBeB	33.50	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	11.08	10.68	11.42	11.66	11.54	11.54	10.40
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.51	2.53	2.50	2.49	2.49	2.49	2.52
CNO	26.68	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	10.99	10.58	11.31	11.55	11.43	11.43	10.30
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.43	2.44	2.41	2.40	2.41	2.41	2.44
NeMgSi	20.64	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	10.87	10.45	11.16	11.40	11.28	11.28	10.25
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.30	2.33	2.29	2.28	2.28	2.28	2.31
sub-iron	17.14	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	10.74	10.29	10.99	11.23	11.11	11.11	10.10
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.17	2.19	2.15	2.14	2.15	2.15	2.18
iron	14.97	$t_{eff}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	10.67	10.21	10.89	11.14	11.02	11.02	10.11
		$\Omega(t_{eff})$ [sr]	2.09	2.12	2.08	2.06	2.07	2.07	2.10

それ～100g/cm<sup>2</sup>, ~50g/cm<sup>2</sup>なので, 大気トップでの絶対強度を算出する上でこの高度変化はほとんど影響しない。しかし重核に対しては, たとえば鉄核の平均自由行程は大気中で～15g/cm<sup>2</sup>なので, 絶対強度の算出に大きな影響を与えるかもしれない。そこで, 我々はこのような大きな高度変化がある場合の取り扱いを考え, 有効高度と有効立体角を導入し考慮した [14]。各フライトでの有効高度と有効立体角を表3にまとめる。

### 3 チェンバー構造

RUNJOB 実験ではエマルジョンチェンバー (EC) を使用し, 高エネルギー宇宙線を観測している。図4にチェンバー構造の概略とその変遷を示す。観測器は上から, primary 層, target 層, spacer 層, calorimeter 層, diffuser 層 (1997, 99年に導入) の5つのモジュールから構成されている。1フライトに対し2ブロック (1ブロックは40cm×50cm) 製作し, これらを1つの遮蔽箱の中に入れて気球に搭載した。

RUNJOB 実験の EC の特徴は, 広間隙スペーサーと薄型カロリメーターにある。また'97年チェンバーからは, diffuser 層 (シャワー拡散層) を設けていることにある。このような構造は, 気球への搭載重量の制限から十分

な鉛量を使用することができなかつたためである。そのため通常用いられる電磁カスケードシャワーの最大発達点での電子数（黒化度）からエネルギーを決定する方法（photometer 法と呼ぶ）は困難であった。そこで、我々は衝突後に放出された2次 $\gamma$ 線の開き角分布からエネルギーを決定する方法を開発した（ $\gamma$ -core法）。さらに'95年キャンペーンで観測されたPeV陽子の解析の経験から、diffuser層によるエネルギー決定法を開発した（diffuser法）。

観測器の基本的な構造に変更はないが、年度ごとにいくつかの構造の改良を行っている。以下にそれぞれのモジュールの役割を述べる。また、図5には、実際にRUNJOB9号機で観測されたイベントについて示す。

**primary層**：入射粒子の電荷同定を行うためのモジュールである。感光材として、原子核乾板（以下Emと略）とスクリーンタイプX線フィルム（以後SXFと呼ぶ）[18]が挿入されている。ただし、1999年の観測器ではSXFは挿入していない（本論文ではSXFの解析結果は用いていない）。

**target層**：入射粒子を核衝突させるためのモジュールである。標的として'95年、'99年はアクリル板、'96年、'97年はステンレス板が挿入されている。感光材は、X線フィルム（以下X200と略、'95年は未挿入）、SXF（'99年は未挿入）、Emが挿入されている。同じ幾何学的厚さのアクリル板とステンレス板を比較すると、粒子の衝突効率は、特に重粒子にたいして、アクリル板のほうがよい。また、中間子多重発生で生じる二次粒子の平均多重度はステンレス板のほうが大きい。そのため、アクリル板では重量を増やすことなく、重核に対する衝突効率がよい観測器となる。一方ステンレス板では、中間子多重発生での多重度が大きく、核衝突点までの追い上げと検出が容易となる。

**spacer層**：核衝突で発生した2次粒子群を分離するためのモジュールである。スペーサーとして発泡スチロールを挿入し、感光材はEmのみを挿入した。スペーサーの幾何学的厚さは、同じ役割をもつupper calorimeter〔下記calorimeter層参照〕とあわせ、約10cm~20cmと大きく、これは我々のECの幾何学的厚さの約半分を占めている。このように大きなギャップは、 $\gamma$ -core法によるエネルギー決定を考えた場合必要とされる大きさである。

**calorimeter層**：電磁カスケードシャワーを発達させるためのモジュールである。高エネルギーイベントの検出とエネルギー決定を行う。吸収層として鉛板が挿入され、感光材はX線フィルムとEmが使われている。また'95年の場合はSXFも挿入されている。'95年、'96年チェンバーではcalorimeter層はさらに2つのモジュール、upper calorimeterとlower calorimeter（それぞれ、U-Cal、L-Calと略）に分けられる。U-Calは発泡スチロールも挿入されており、spacer層の役割も果たす。L-Calはオーソドックスなカロリメーター構造をしている。'97年、'99年ではU-Calは取り外され、L-Calのみ構造となっている。我々のカロリメーターの厚さは4~5c.u程度であり、カロリメーター型チェンバーとしては極めて薄いカロリメーターである。たとえば同様にECを使って観測しているJACEEの場合7~8c.uである[19]。そのためエネルギー決定に工夫が必要となった。

**diffuser層**：電子シャワーを幾何学的に拡散させるモジュールであり、シャワーの拡散の様子からエネルギーを推定する。'97年から導入され、スペーサーとしてアクリル板と発泡スチロールが挿入されている。感光材は、'97年はX線フィルム、Em、SXF、'99年はX線フィルムのみとなっている。このモジュールによって、電子シャワーが最大発達点まで発達していないようなイベントのエネルギーをより簡単に推定することが可能となった。



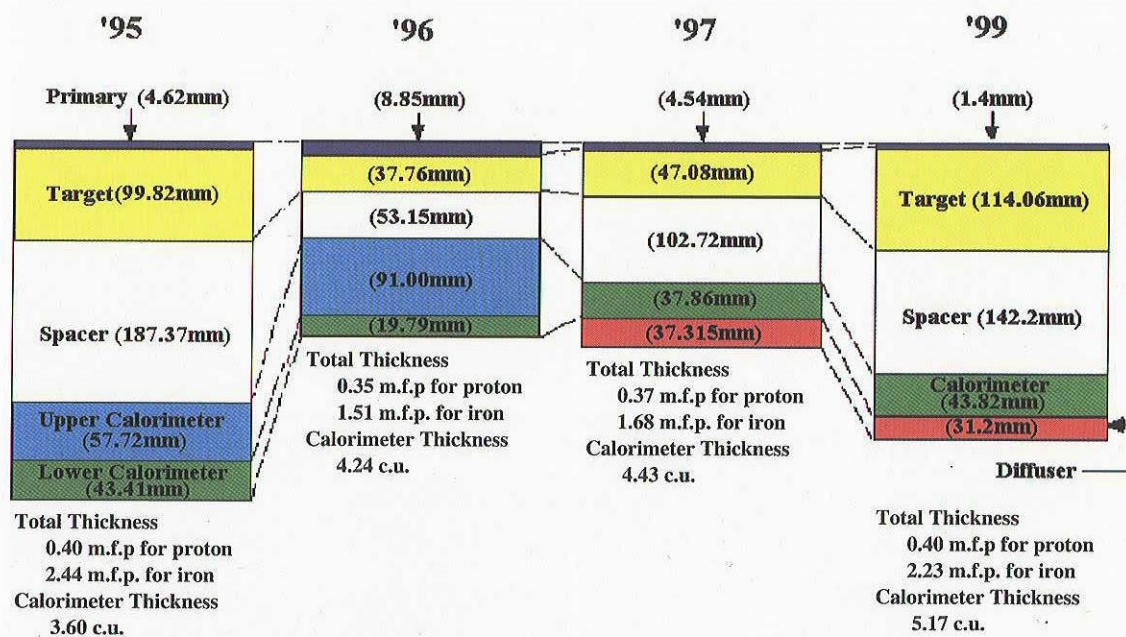


図4：RUNJOB 実験で用いた各年度の観測器の構造。1997年以降は upper calorimeter を廃止し、diffuser を取り入れた。

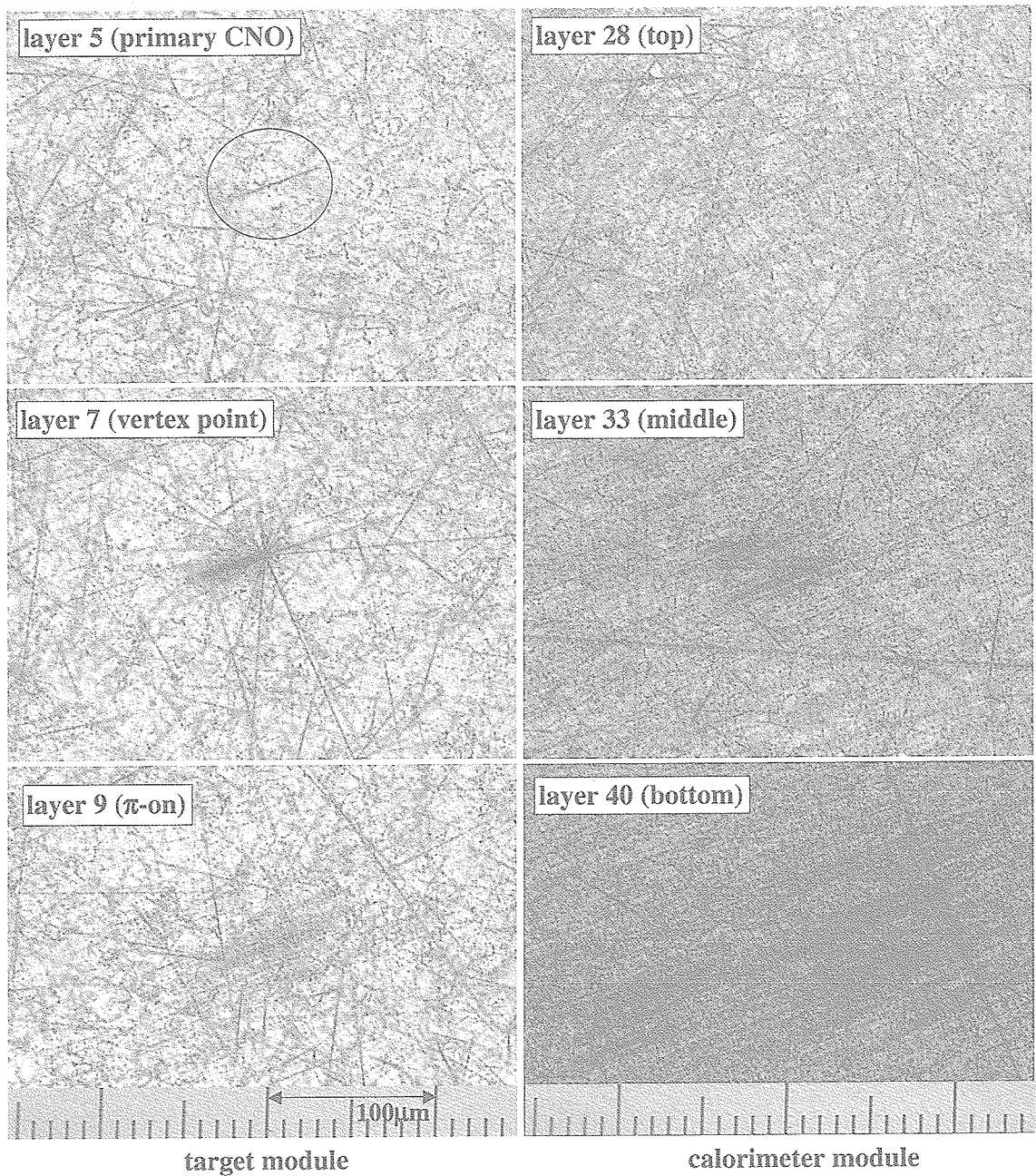


図5：RUNJOB 9号機で観測されたCNO核の様子。粒子は右から左へ進んでいる。入射天頂角は約 $50^\circ$ 、シャワーエネルギーは15.5 TeVである。layer 5：黒丸中に親粒子（CNO核）がある。layer 7：Em中で核衝突を起している。進行方向に多くの中間子（主に $\pi^\pm$ ）が発生している（中間子多重発生，jet）。layer 9：発生した中間子はtarget層そしてspacer層の中で広がっていく。layer 28～40：calorimeter層で $\gamma$ 線が電子シャワーを発達させていく。それぞれの $\gamma$ 線が作ったシャワーコア（ $\gamma$ -core）が分離されていることがわかる。

## 4 解析方法

データ解析の大まかな流れを図6に示す。RUNJOB気球実験で観測された宇宙線データの詳細な解析方法については、既に文献[14]および[15]に詳しく説明がされているので、ここでは簡単に説明する。

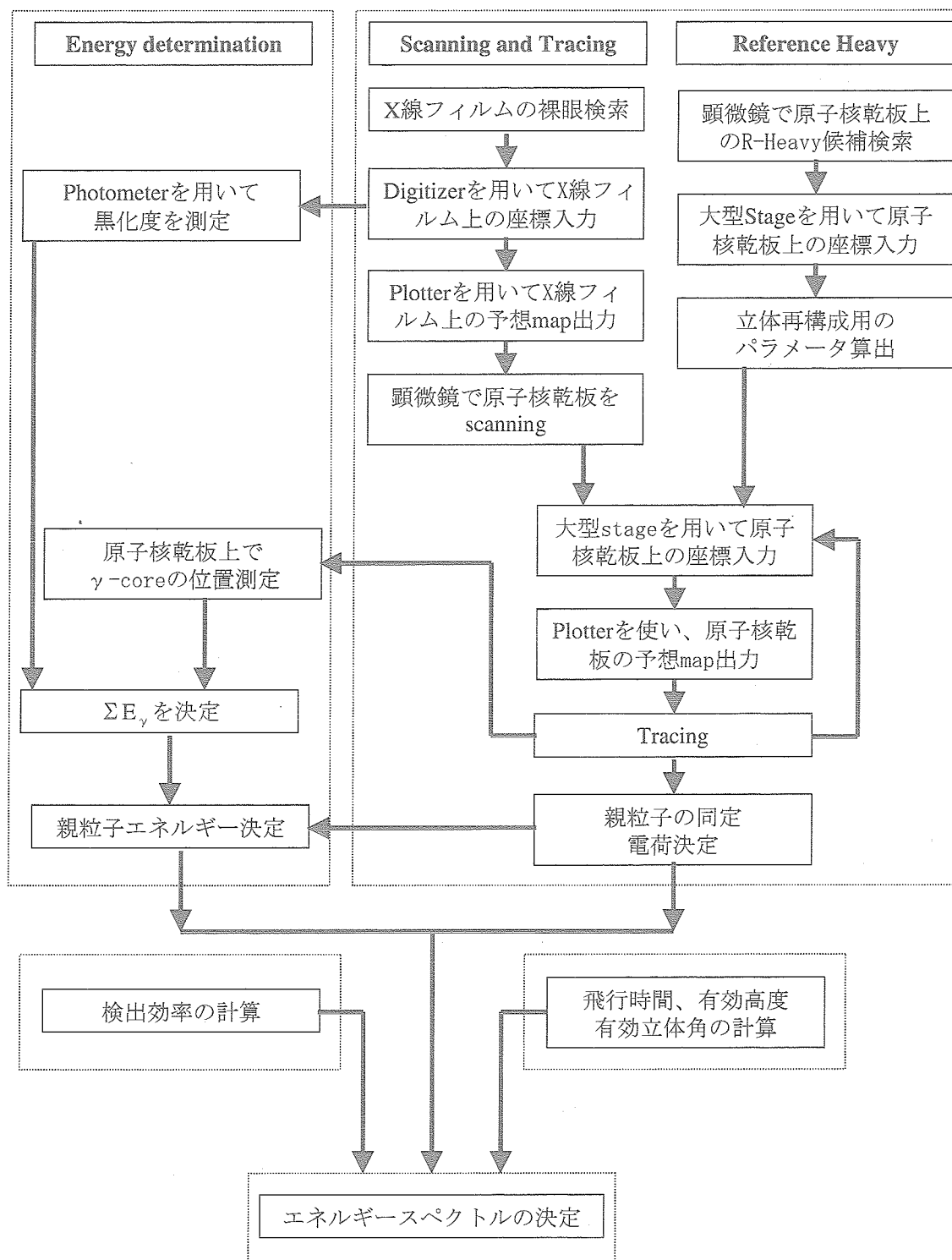


図6：RUNJOB実験における解析の手順。

#### 4.1 シャワー検出とトレーシング

感光材の現像後、初めにカロリメーター層に挿入したX線フィルム上のシャワースポットの裸眼検出を行う。これにより観測器に入射した宇宙線のうち、我々の観測対象である高エネルギーのイベントのみを選択的に抽出が可能となる。RUNJOB 実験では、図7に示すようにシャワースポットの黒化度で約0.1以上、シャワーエネルギーにして約1~3 TeV 以上のイベントを抽出している。そこで、我々は次のような3つの解析条件を設定し、条件を満たさないイベントは解析対象外とした。

- イベント中に  $D > 0.1$  のスポットが2点以上存在する。
- 天頂角  $\tan \theta < 5.0$  である。
- 粒子の軌跡が、calorimeter 層の最下層2層を通過してゐる。

スポット検出後、Em 上にてシャワーを粒子の衝突点まで追上げる（トレーシング）。衝突点まで追上げられたイベントは、さらにその上層のEm 上で衝突をおこした粒子（親粒子と呼ぶ）の飛跡を同定する、このトレーシング作業は、顕微鏡つき大型ステージを用いることで、L50cm×W80cm×H20~30cm の観測器について100 $\mu\text{m}$  以内の精度で立体再構成を行い、精度の良い飛跡地図を作成することで効率よく行った。重粒子の場合、十分な精度で親粒子の同定が可能である。陽子では不十分な場合があり、その際は、局所的な立体再構成を行い、50 $\mu\text{m}$  以下の精度で陽子飛跡を同定した。

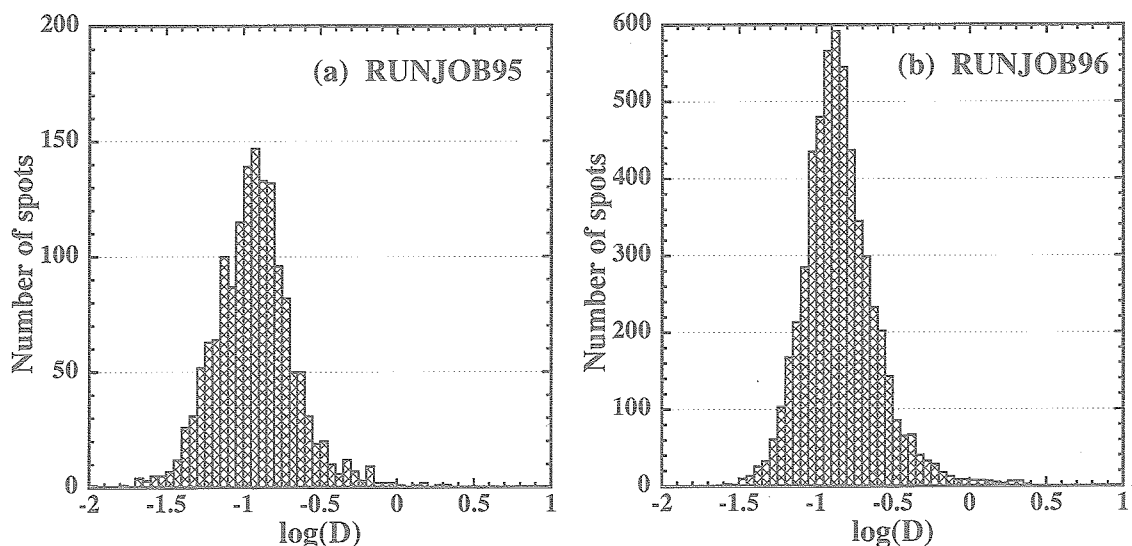


図7：検出された全スポットの黒化度分布、(a)1995年チェンバー、(b)1996年チェンバー。

#### 4.2 電荷決定

親粒子飛跡の同定後、Em 上の飛跡の様子から親粒子の電荷決定を行う。RUNJOB 実験では narrow-slit 方式と呼ぶ、新しい電荷決定方法を開発した [20]、Em 上に記録される粒子の飛跡の太さは、その電荷に依存している。そこで、この飛跡に沿って平行な細いスリットを設定し、そのスリット内の黒化度を計測した。一方、シミュレーション計算から各電荷に対する黒化度曲線をもとめ、これら2つの量を比較し電荷を推定している。シミュレーションは、入射粒子によって放出される  $\delta$ -ray シミュレーション [21] を行い、放出された  $\delta$ -ray によって形成される Em 中の grain 数を求め、そこから期待される黒化度を計算している。もちろん黒化度を計算する際には、観測時間などに伴うバックグラウンドも考慮している。

RUNJOB 実験でのバックグラウンドを考慮し、シミュレーション法により電荷分解能の評価をした結果を図8に示す。測定する飛跡の長さによって分解能に違いがあるが、300 $\mu\text{m}$  程度測定すれば、酸素核で0.5 charge unit、鉄核で1.0 charge unit 程度の分解能があることがわかる。もちろん、偶奇の電荷を同定することは難しい

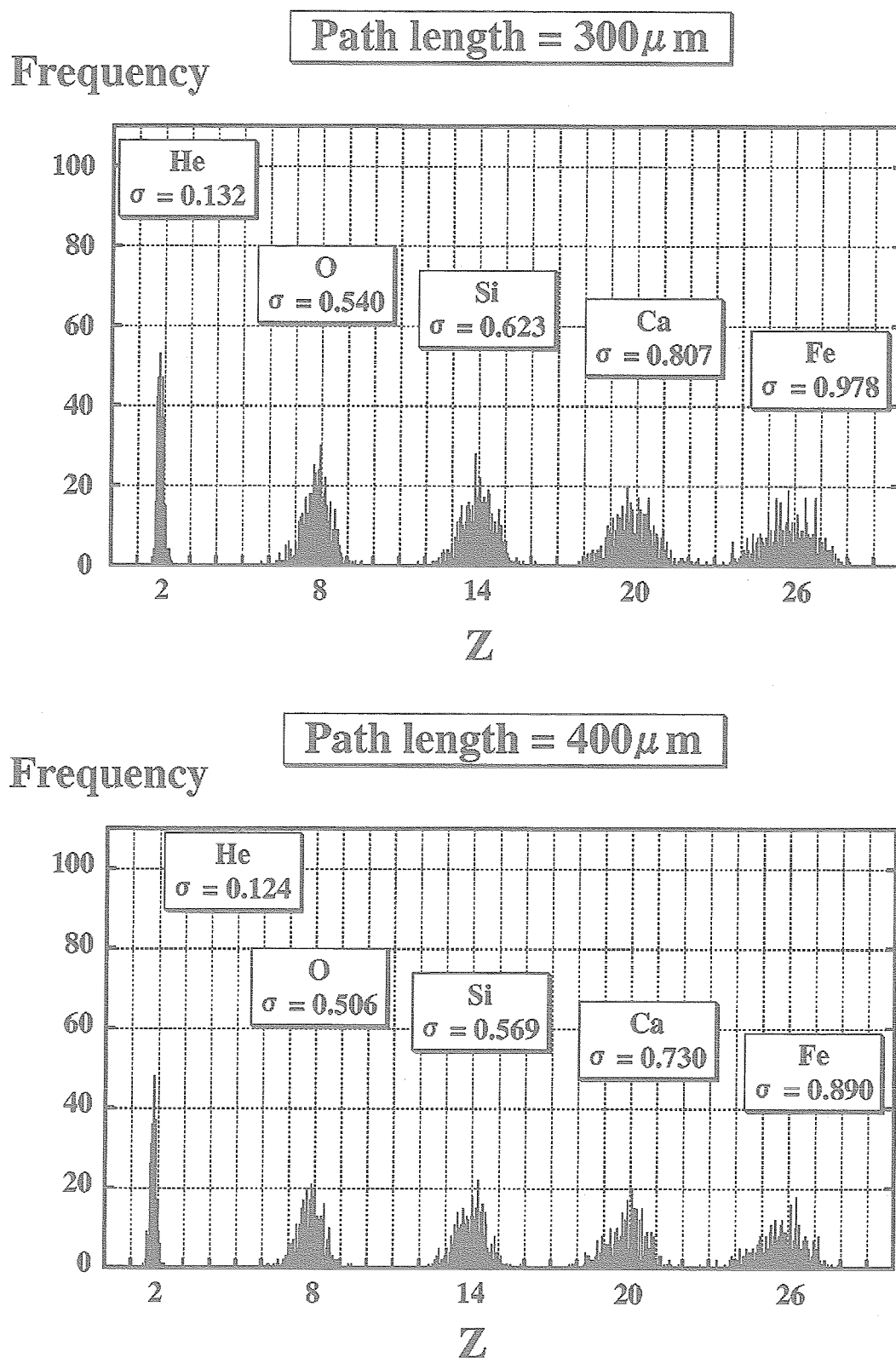


図 8：シミュレーション法で予想される RUNJOB 実験での narrow-slit 方式による電荷分解能。Em 上の飛跡を 300 $\mu$ m (上) および 400 $\mu$ m (下) 測定した場合について示している。

が、RUNJOB 実験では統計量の問題などもあり、核電荷弁別は核種グループ(陽子, ヘリウム核, LiBeB 核, CNO 核, NeMgSi 核, sub 鉄核, 鉄核)として取り扱うため問題とはならない。陽子, ヘリウム核については grain counting や gap length の測定から決定している。

### 4.3 エネルギー決定

本研究で採用しているエネルギー決定法は、photometer 法,  $\gamma$ -core 法, diffuser 法の3つである。図9に、RUNJOB 実験で得られる典型的な2つのシャワーの発達の様子を示す。RUNJOB 実験で用いたカロリメーターは $\sim 5$  c.u.と薄く、図9(b)で示すように、高エネルギーシャワーの最大発達点(シャワー極大)を捕られないイベントが多い。そこで、我々は、新しく2つのエネルギー決定法を開発し、9(b)のようなイベントに適用した。しかし、いずれの方法も検出した電子シャワーのエネルギー、 $\Sigma E_e$  を決定し、その決定精度もほぼ同程度で得た。したがって、シャワーエネルギーから入射親粒子のエネルギーの変換や絶対強度算出するための検出効率の計算を複雑にするものではない。

#### 4.3.1 photometer 法

図9(a)のようなシャワー発達の最大点を捉えているイベントに適用する、伝統的な電子シャワーのエネルギー決定方法である [22,23,24]。我々は、この変化の様子を X 線フィルム上に記録されたシャワースポットの黒化度を photometer を使用し測定している。そこで、この方法を photometer 法と呼ぶ。20%以内でエネルギー決定が可能であることが分かっている。

#### 4.3.2 $\gamma$ -core 法

図9(b)のような、シャワー極大に達していないイベントに対して用いるエネルギー決定法であり、'95年および'96年観測データに適用している。 $\gamma$ -core 法は、核衝突後に放出された2次 $\gamma$ 線の開き角と横運動量の関係からシャワーエネルギー  $\Sigma E_e$  を推定する方法である。この開き角を測定する際に、2次 $\gamma$ 線が作るシャワーコア- $\gamma$ -core (図5参照)の相対位置関係から求めるため、 $\gamma$ -core 法と呼ぶ。チャカルタヤ実験の C-jet データ [25] や FRITIOF コードで生成したジェットデータに適用したところ、15%程度の決定精度があることがわかった。これは我々の実験では充分満足できる精度である。詳しくは文献 [14] にまとめてある。図10は、RUNJOB データに適用した結果であり、横軸が photometer 法で得られたエネルギー、縦軸が  $\gamma$ -core 法で得られたエネルギーになっている。ここで使用しているイベントは全てシャワー極大を捕らえているものばかりである。図からわかるように非常によい相関があり、実用上  $\gamma$ -core 法の適用に問題がないことがわかる。

#### 4.3.3 diffuser 法

'97年、'99年チェンバーで用いた新しいエネルギー決定方法で、図9(b)に適用される。calorimeter 層の下に設けられた diffuser 層(シャワー拡散層)内での電子シャワーの拡散(幾何学的な広がり)の様子からエネルギーを決定する。詳細は文献 [15] に詳しい。

diffuser 層内には感光剤以外の物質はなく、calorimeter 層内で発達したシャワーは、diffuser 内で幾何学的に広がっていく。この広がり様子は、シャワーエネルギーと発達の度合い (shower age) に依存すると考えられる。そこで、calorimeter と合わせ diffuser を用いることでシャワーの最大発達点を捉えることなく、エネルギーが決定できると考えた。

シミュレーションは、photometer 法で用いているシミュレーションコードを改良し用いた。diffuser のシミュレーションに応用するためには、カロリメーターの下に物質が何もないと仮定し、遠くまで電子数カウント位置を設定してやるだけでよい。現実の観測器では diffuser 層内に感光剤が挿入されているので、この感光剤による電子生成を考慮し、補正を行っている。シミュレーション結果を図11に示すが、シャワーのエネルギーや発達段階によって減衰の様子が異なっており、diffuser 内でのシャワーの減衰がエネルギーに依存していることがわかる。また、calorimeter 層内では分離されていない遷移曲線が、diffuser 層内ではよく分離されている。これらのことから diffuser を用いた場合に、シャワー極大を捕らえていなくともエネルギーが決定可能ながわかる。

実際に97年チェンバーで測定されたデータとシミュレーションデータの比較した図12に示す。入射粒子はトレーシングの結果から陽子であることがわかっている。点線は陽子入射のシミュレーションデータ、実線は2つのシミュレーションデータより最小二乗法で内挿した結果である。図を見て明らかなように測定データをよく再現していることがわかる。

エネルギーの決定精度を図13に示す。横軸はシミュレーションで与えた真のエネルギー  $\Sigma E_{\gamma, true}$ 、縦軸は推定されたエネルギー  $\Sigma E_{\gamma, esti} / \Sigma E_{\gamma, true}$ 、比分布の標準偏差  $\sigma$  である。3種類の入射粒子に対し、様々なカロリメーター厚での決定精度を、diffuserのある場合とない場合（photometer法）について求めた。図から diffuser を用いた場合のほうが明らかに決定精度がよいことがわかる。シャワー極大を捕まえている場合の photometer 法による決定精度が  $\sigma \sim 0.2$  程度であることを考えると、7c.u.程度のカロリメーター層と4cm程度のdiffuser層があれば、陽子では数10TeVまで、鉄核では100TeVまでのシャワーエネルギーを決定することが可能である。'97年、99年チェンバーのカロリメーター厚は約5c.u.であり、斜め効果を考えると観測されたほぼ全ての核子成分のイベントに対して diffuser 法を適用できると考えられる。 $\gamma$ 線に対しては、我々の観測器のカロリメーター厚では十分な決定精度は得られないが、本研究での観測対象ではないので問題とはならない。なお、diffuserは観測器の重量をほとんど増すことなく（99年の場合、全体で230kgのところdiffuserの重さは2kgであった。）、より高エネルギーシャワーのエネルギーを精度よく決定できる方法であり、飛翔体によるカロリメーター型観測器に適したエネルギー決定法である。

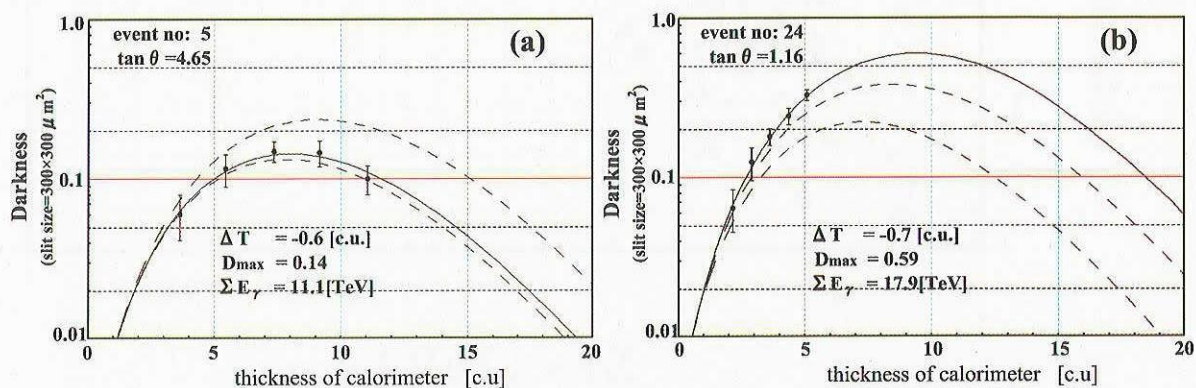


図9：RUNJOB 実験で使用する薄型カロリメーターでの典型的なシャワー発達の場合。図中の曲線は photometer 法によるエネルギー決定の様子である。(a)シャワー極大を捕まえている場合、(b)シャワー極大を捕まえていない場合

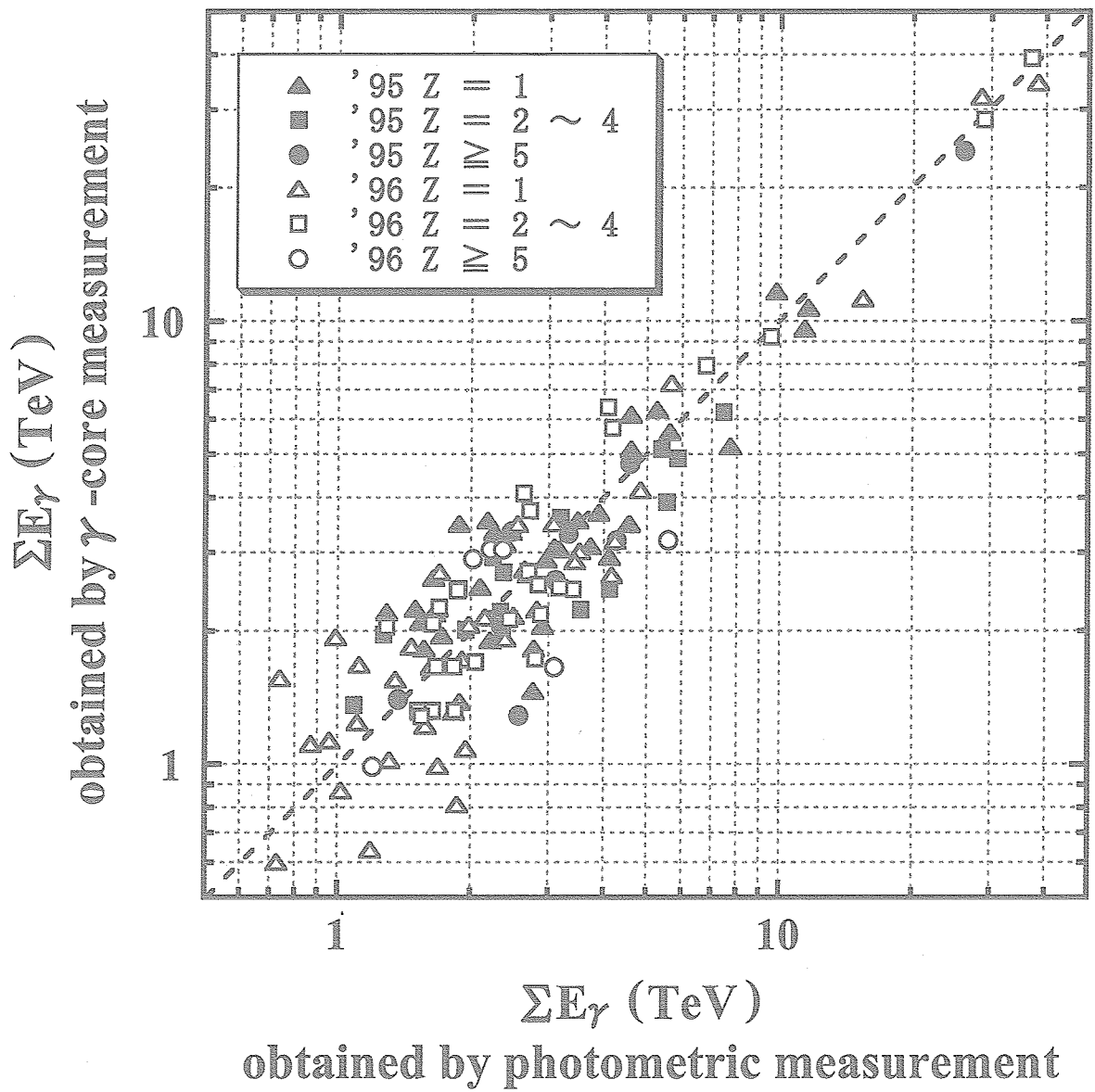


図 10 : RUNJOB 実験データにおける photometer 法と  $\gamma$ -core 法によるシャワーエネルギーの相関.



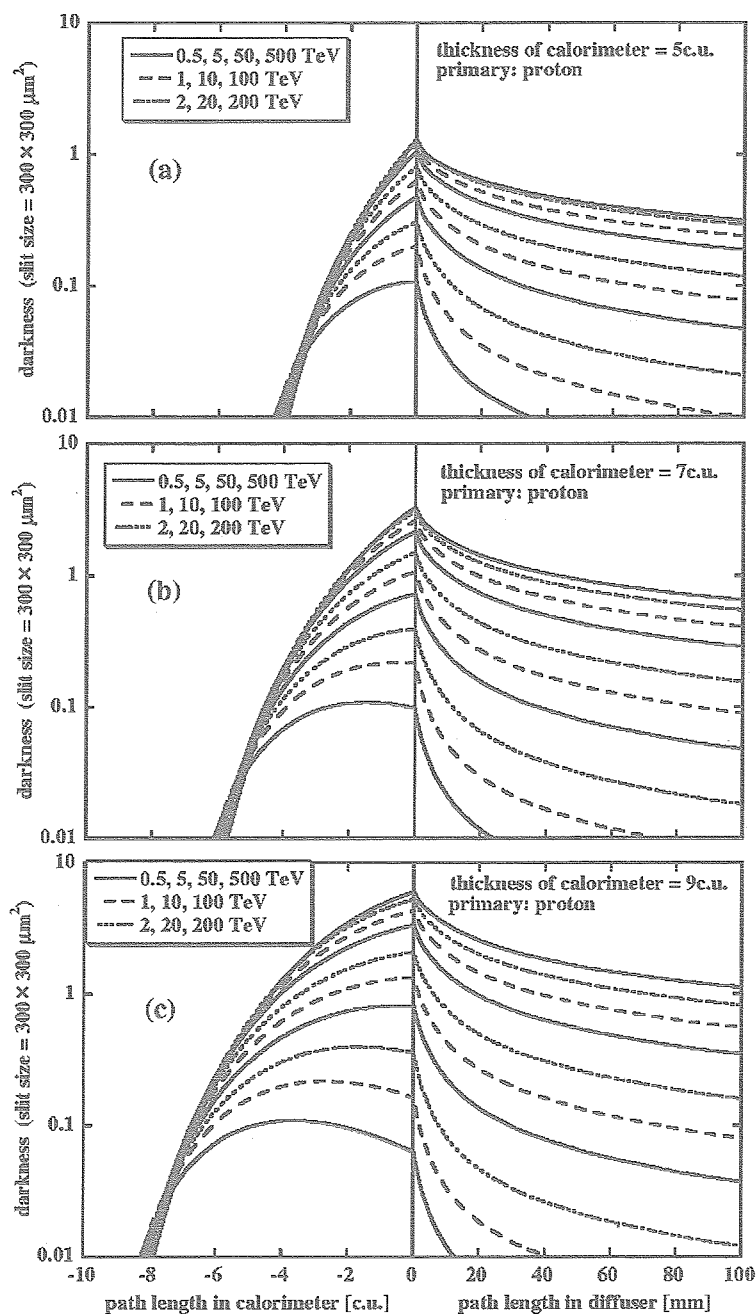


図 11 : diffuser 層付カスケードシミュレーションから得られた遷移曲線。横軸は calorimeter 層と diffuser 層の境界を path length = 0 とし、左が calorimeter 層中の c.u. 単位で測った path length, 右が diffuser 層中の mm 単位で測った path length となっている。入射粒子は陽子であり、calorimeter 厚はそれぞれ (a) 5c.u., (b) 7c.u., (c) 9c.u. である。実線、破線、点線はシャワーエネルギーによる違いを示している。

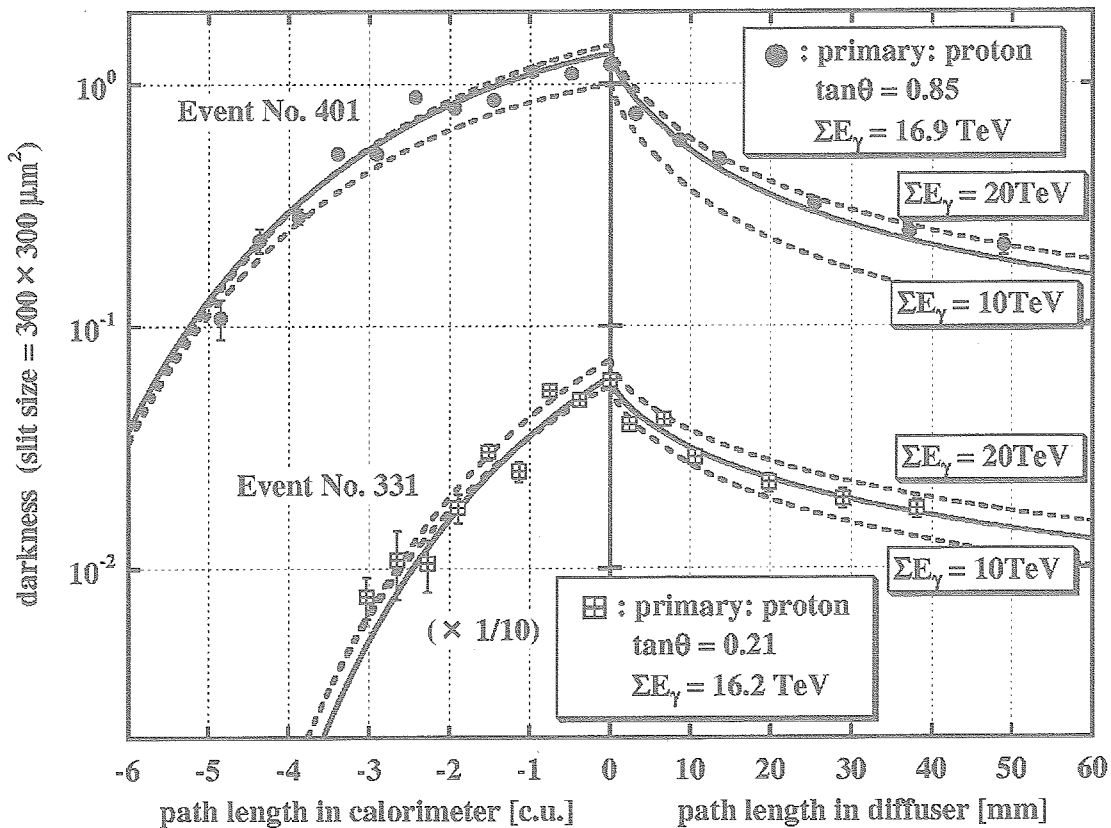


図 12：測定データへのフィッティング。点線はシミュレーションカーブ、実線は最小二乗法フィッティングした結果である。誤差棒は黒化スポット近傍でのバックグラウンド黒化度の揺らぎの大きさを示している。また、No. 331の黒化度は表示のため1/10倍している。

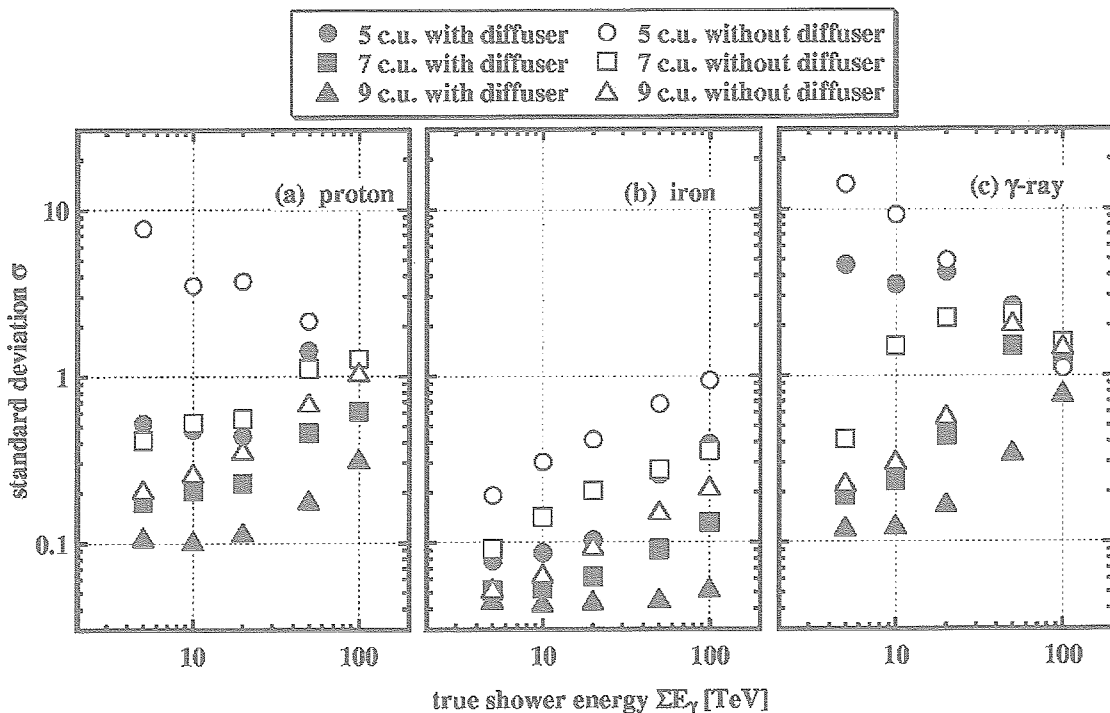


図 13：calorimeter 厚の違いによるエネルギー決定精度の変化。入射粒子は(a)陽子、(b)鉄核、(c)γ線（電子対）について示している。塗潰しは diffuser 法による決定精度、白抜きは diffuser 法を用いなかった場合（photometer 法）の決定精度を示している。

#### 4.4 変換因子の決定

RUNJOB 実験で推定しているエネルギーは、核衝突後に放出された2次 $\gamma$ 線への総エネルギー流、 $\Sigma E_\gamma$ 、であり、入射粒子のエネルギー、 $E_p$ 、ではない、したがって、推定したシャワーエネルギー、 $\Sigma E_\gamma$ 、を入射粒子のエネルギー、 $E_p$ 、へ変換する必要がある。その変換因子、 $C_\gamma (=E_p/\Sigma E_\gamma)$ 、を示す。

これまで、非弾性度の分布は広がっており、特に鉄核の場合は入射エネルギーへの変換に大きな不確実性があると思われていた。非弾性度分布を FRITIOF-code を用いて計算した結果、オリジナルの  $k_\gamma$  分布 (図14の黒丸) を見ると確かに分布が広がっている。一方、検出条件や解析条件を考慮し、検出されるイベントだけの  $k_\gamma$  分布 (灰色のヒストグラム部分) は、より鋭い分布になっていることがわかる。これは、 $k_\gamma$  が小さい場合シャワーエネルギーも小さくなり、検出が困難になるためである。このことから、重粒子成分についても  $\Sigma E_\gamma$  から  $E_p$  へ変換しても陽子と同程度の不確実さしかないことが分かる。

実際の粒子は観測器中の様々な物質と衝突し、しかも1回の衝突のみでなく、衝突によって生成される  $\pi^\pm$  やフラグメント、生き残り陽子などが連続して衝突することもある。このような連続衝突を考慮するため、FRITIOF-code を使い、我々のチェンバー中での衝突シミュレーションを行い検出条件を考慮して、変換因子を求めた。target 層と calorimeter 層では標的物質が大きく違うため、それぞれのモジュールにわけて変換因子をもとめた。'95年~'99年チェンバーの変換因子を表4にまとめる。

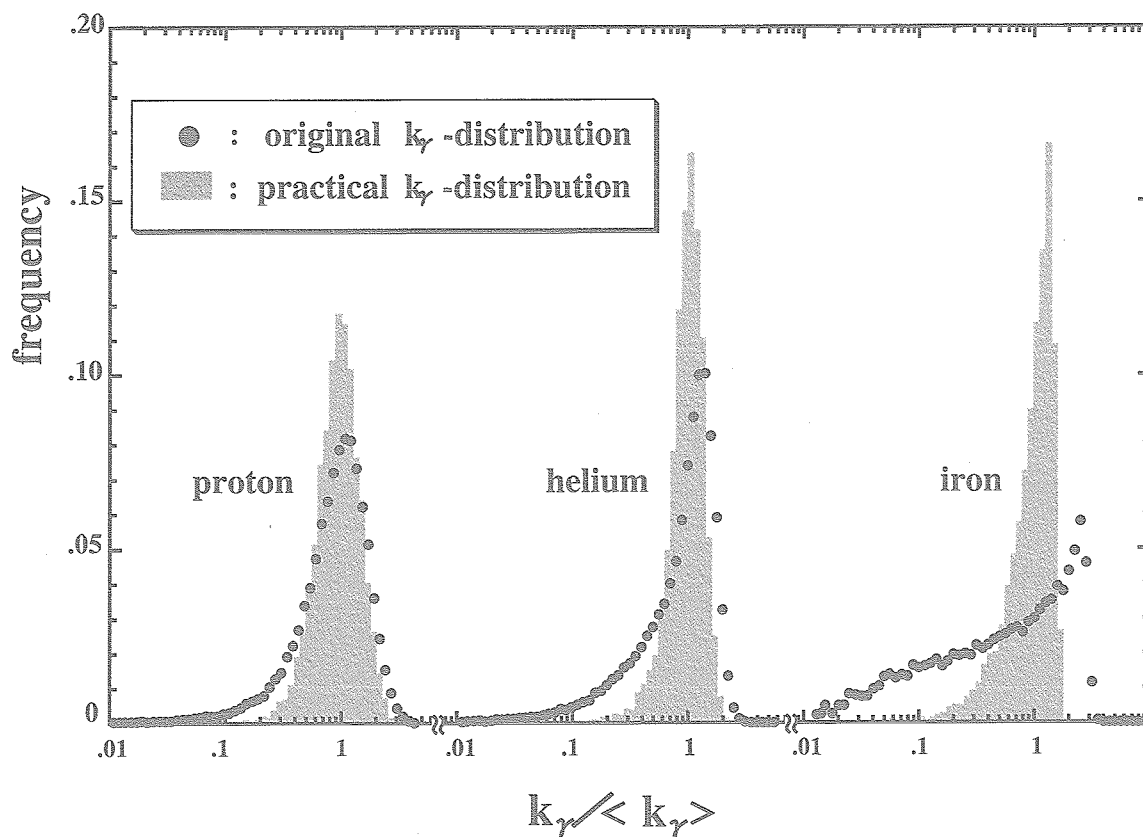


図14:  $k_\gamma$  分布の比較。●はあらゆる衝突についての分布であり、灰色のヒストグラムは検出条件を満たす衝突についてのみの分布となっている。

表 4: 観測器中の衝突シミュレーションによって得られたシャワーエネルギー  $\Sigma E_\gamma$  から親粒子エネルギー  $E_p$  への変換因子  $C_\gamma$  ( $=E_p/\Sigma E_\gamma$ ). それぞれの親粒子について, target 層および calorimeter 層での変換因子を示している.

primary	95		96		97		99	
	target	calori.	target	calori.	target	calori.	target	calori.
proton	4.01	4.00	3.98	3.89	4.10	3.83	4.10	3.83
helium	6.50	6.00	5.72	5.55	5.90	5.43	6.20	5.43
CNO	10.0	8.72	7.98	7.60	8.22	7.42	9.01	6.62
NeMgSi	12.1	10.2	9.20	8.72	9.45	8.52	10.6	7.43
iron	16.2	13.2	11.4	10.8	11.9	10.5	13.9	10.5

#### 4.5 検出効率

検出効率は, 観測器の構造や物質だけでなく, 実験条件や解析条件, 入射粒子などによって異なる. 我々は, このような様々な条件を考慮した検出効率を, コンピュータ内に実際に使用したチェンバーと全く同じ構造をもつ観測器 (観測器を入れる遮蔽箱も含む) を厳密に再現し, 粒子の入射からシャワー検出までをフルシミュレーションで行っている. 計算手順を図15に示す. チェンバー本体の面積は  $S=50 \times 80 \text{cm}^2$ , 厚さ方向の情報としては, 幾何学的な厚さのみでなく, それぞれの核子に対して, 衝突 m.f.p. 単位での厚さ情報, 放射長単位での厚さ情報を構造を再現するように入力している. この観測器に, 実際の宇宙線スペクトルや天頂角分布を考え入射させ, チェンバー中での衝突およびシャワーシミュレーションを行った.

入射サンプリング数を  $N_m$  とし, 解析条件を満たして検出された数を  $N_{obs}$  とすると, ある親粒子エネルギー  $E_p$  での検出効率は,

$$\eta(E_p) = \frac{N_{obs}(E_p)}{N_m(E_p)}$$

とかける. ここで注意しなければならないのは,  $E_p$  の取り扱いである, 実際の観測で我々が知りうるのは親粒子エネルギーではなくシャワーエネルギーであり, そこから親粒子エネルギーへ変換しなければならない. そこで条件に合わせ, 親粒子エネルギー  $E_p$  として, 最初に与えた入射サンプリングエネルギーではなく, 核衝突シミュレーションによって放出された2次  $\gamma$  線への総エネルギー流, つまりシャワーエネルギーと変換因子を使い,  $E_p = C_\gamma \Sigma E_\gamma$  を用いた. このようにして求めた検出効率を図16に示す, 横軸は親粒子エネルギー,  $E_p = C_\gamma \Sigma E_\gamma$ , 縦軸は検出効率になっている, ここでは, チェンバー内のいずれかで衝突した total-jet, カロリメーターで衝突した calorimeter-jet の場合について示している. 図からわかるように, calorimeter-jet は検出バイアスなしに検出されるエネルギー領域が total-jet より低いことがわかる. これは, target-jet の場合スパーサー層で2次  $\gamma$  線が広げられるため, 同じシャワーエネルギーでも測定される黒化度が小さくなってしまうためである. そこで絶対強度を算出する際には, 低エネルギー領域では calorimeter-jet データのみを使用し, 検出閾エネルギーを下げている.

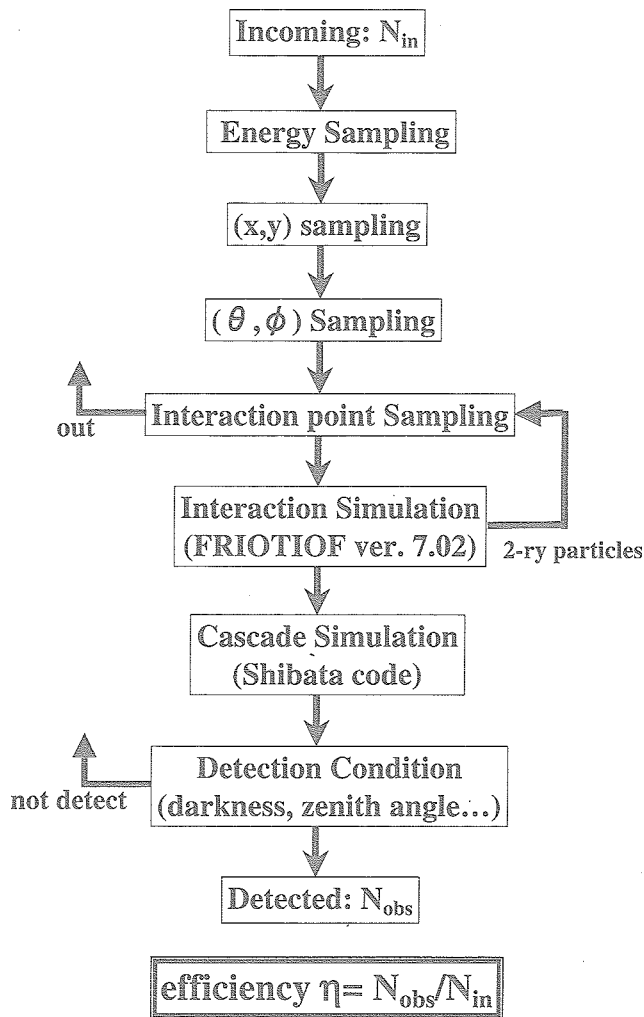


図 15：検出効率計算のフローチャート。

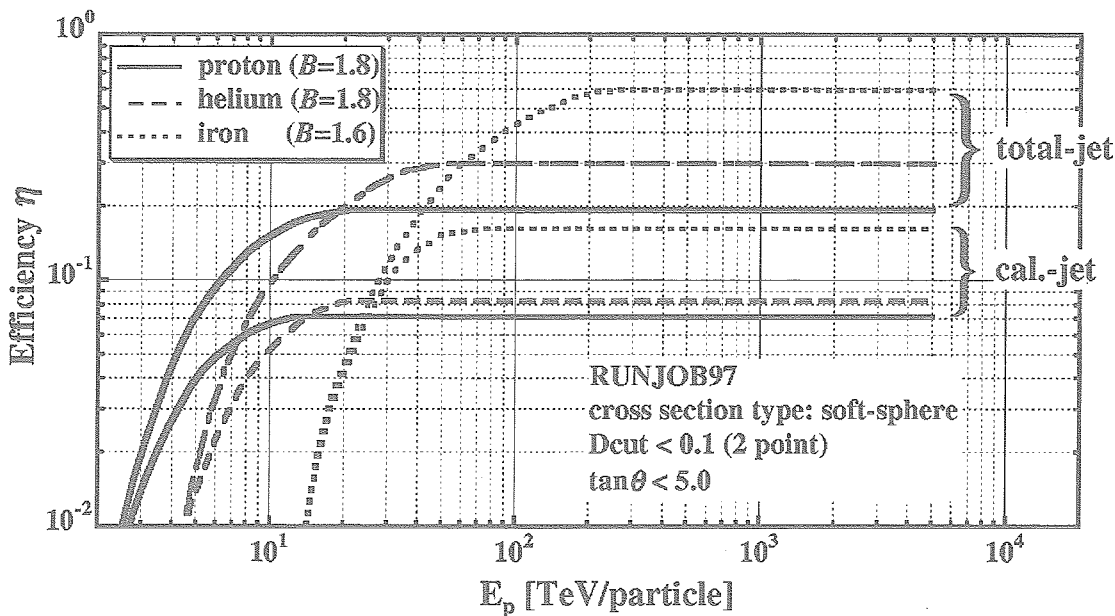


図 16：シミュレーション計算によって得られた検出効率。total-jet は観測器のいずれかの層で衝突した場合、cal-jet は calorimeter 層のみで衝突した場合を表す。横軸の親粒子エネルギー  $E_p$  は、 $E_p = C \sum E_i$  であることに注意。

## 5 解析結果

観測に成功した10フライト、全露出量575m<sup>2</sup>hrで得られた観測統計量を表5に示す。実際に同定されたイベントより解析に用いた統計量が少ないが、これは低エネルギー領域での検出バイアスが大きいイベントを含めていないためである。RUNJOB 実験では約2ヶ月の観測を行い、陽子、ヘリウム核については十分な統計が得られた。だが、重粒子成分、特に鉄核はわずか10イベント程度しか得られなかった。だが、鉄核成分についてはSXFによる解析を現在行っており、これにより得られる数100GeV/n 領域での鉄核のスペクトルを報告する予定である。

表5：RUNJOB 実験で同定された宇宙線のイベント数

粒子	proton	helium	CNO	NeMgSi	iron	total
検出されたイベント数	598	152	87	39	12	907
解析に用いたイベント数	360	78	46	22	8	521

### 5.1 陽子、ヘリウム成分

図17に RUNJOB 実験で得られた陽子およびヘリウム核のエネルギースペクトルを示す。縦軸は強度に  $E^{2.75}$  を掛けている。誤差棒は、統計誤差を表している。図には JACEE [4], MUBEE [7], SOKOL [6] のデータも示してある。低エネルギー領域では、最近報告された AMS [26,27], IMAX [29], BESS [28] の観測結果も示している。これらはすべて気球や衛星を使った直接観測の結果であり、JACEE 及び MUBEE の実験は我々と同じような原子核乾板を用いた実験で、他はすべてカウンター型検出器を用いた実験である。

RUNJOB で得られた陽子成分は、10~1000TeV 領域をカバーし、JACEE などの我々と同じエネルギー領域の強度とよく一致している。BESS などの低エネルギー領域からの結果と合わせて見ると、数10GeV~数100TeV の4桁にわたるエネルギー領域でほぼ $-2.75$ 乗の冪でスペクトルが伸びていることが分かる。数100TeV 以上で、我々のスペクトルの傾きはハードになっているように見える。もちろん、我々の結果は統計精度として十分でなく、有意にスペクトルが変化しているとはいえない。最近の拡散衝撃波加速の理論によれば、スペクトルは加速限界直前の領域で一度ハードになり、その後加速限界のため急激に強度が小さくなると言われている（例えば [30]）。我々の結果は、その兆候が見えているのかもしれない。また、1995年の観測で PeV 陽子の存在が確認された。これは陽子が $10^{15}$ eV 以上まで加速されていることを示した直接的な証拠であり、既に文献 [14] などで報告をしたが、その後の観測で PeV を越える粒子は観測されなかった。

ヘリウム成分に注目すると、RUNJOB の結果は MUBEE に近いデータを示しており、その傾きはほぼ陽子に平行である。一方、JACEE, SOKOL の結果は我々の2倍近い強度を与え、スペクトルの傾きは明らかに異なっている。我々の結果は、1997年にダーバンで行われた国際宇宙線会議で1995年の観測結果 [31] を始めて報告して以来、全く変化していない。なお、ATIC グループは、2回の南極長時間気球実験の結果を報告し、2003年の国際会議で報告された ATIC-1 の結果は RUNJOB の結果に近いものであったが [11]、2005年の国際会議で報告された ATIC-2 の結果は JACEE の結果に近いものであった [12]。ただし、数10TeV/n 以上の統計はまだ十分でなく、CREAM の結果と合わせ今後の解析を待ちたい。

図18にヘリウムと陽子の比を示す、この図から明らかなように、我々の数10TeV/n 領域の観測結果は、数10 GeV/n 領域での比とほぼ変わらず、 $He/p \sim 0.05$ とエネルギーによらずほぼ一定である。一方 JACEE の結果 [32] は、低エネルギー領域の結果と合わせてみると、数100GeV/n 領域からエネルギーとともにその比は徐々に大きくなっていくようである。源でのスペクトルの冪が平行で、伝播中の拡散がエネルギーのべき乗に依存することを仮定すると、つまり、現在の標準的な衝撃波加速と宇宙線伝播と考えられている rigidity に依存した粒子加速と伝播を仮定すると、数10GeV/n~数10TeV/n の領域の地球近傍で観測される陽子とヘリウム比がほぼ一定にな

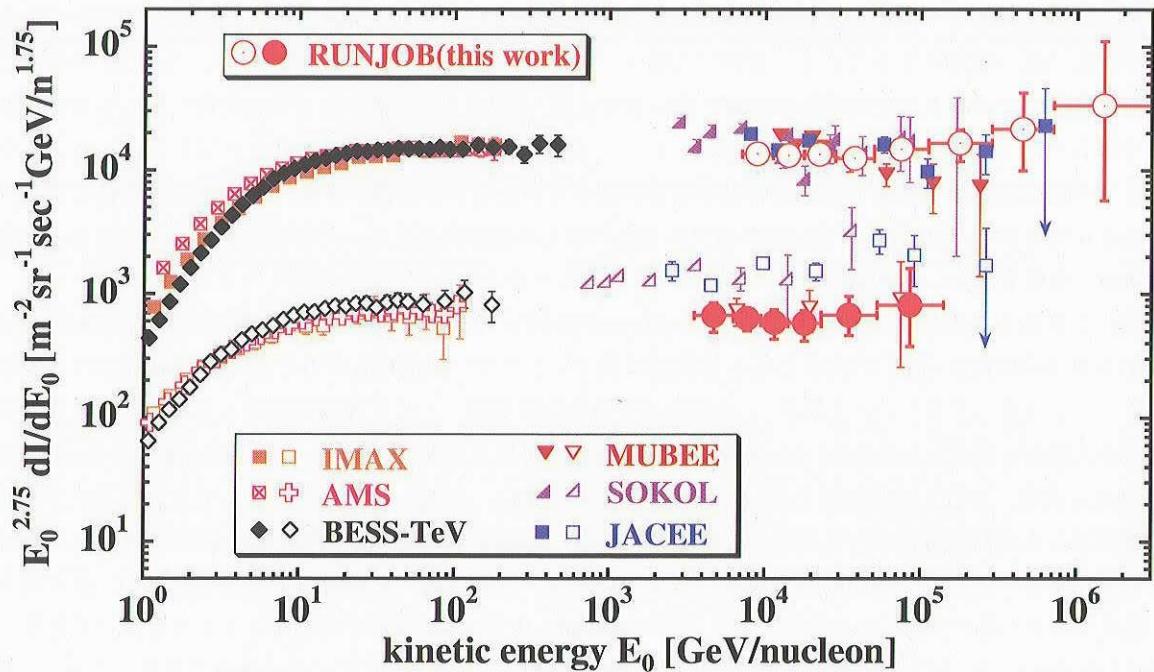


図 17：陽子、ヘリウム成分のエネルギースペクトル。縦軸は  $E_0^{2.75}$  を掛けている。

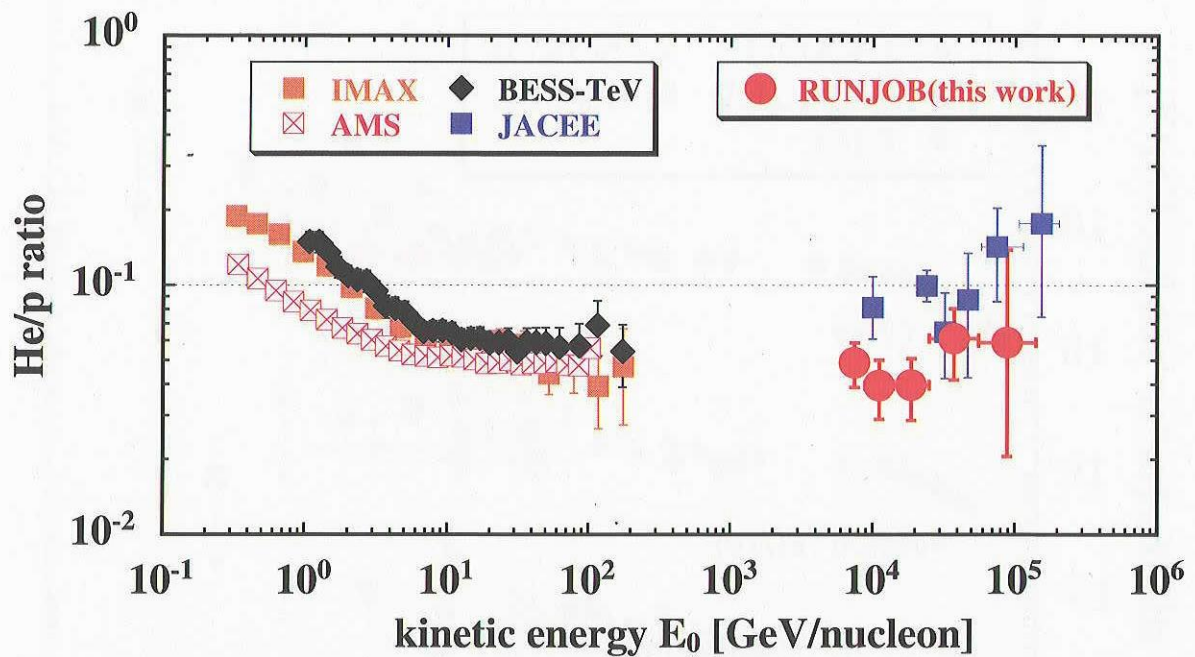


図 18：ヘリウム/陽子成分の比。AMS、BESS、IMAX のデータは著者の一人 M.H. によって図17から計算されたものである。

ることが分かっている [33, 34]。これは RUNJOB の結果と一致するものである。

## 5.2 重粒子成分

図19に重粒子成分のエネルギースペクトルを、JACEE [5]、SOKOL [6]、CRN [35]、HEAO-3 [36]、SANRIKU [37] の各グループの結果とともに示す。JACEE、SOKOL の鉄成分には sub-Fe ( $Z \geq 17$ ) も含まれている。縦軸は強度に  $E^{2.75}$  をかけている。

RUNJOB のデータは、いずれの核種グループにおいても低エネルギー領域、特に CRN グループの観測結果からスムーズにつながり、数10GeV/n 領域からほぼ平行にスペクトルが伸びているようである。JACEE や SOKOL

のデータと比較すると、JACEE とは統計誤差の範囲内で一致しているようであるが、傾向としてこれらの2グループに比べ低い強度を与えている。前節での陽子・ヘリウム核のスペクトルと比べると、JACEE の結果は陽子とそれ以外のスペクトルでは明らかに冪に違いが見える。特に、CNO核スペクトルでは、低エネルギー側の観測で得られたスペクトルと比較し、数 TeV/n あたりでその傾きが変化しているように見える。このようなスペクトルの変化は、宇宙空間でなにか特別な現象が起きていることを想像させる。一方、RUNJOB で得られたスペクトルはその傾きはほぼ平行か CRN のデータ合わせてみた場合若干ハードになっているようである。我々の結果は、前節で議論した衝撃波加速と伝播モデルによく一致するものである [34]。

次に、2次核と1次核の比、boron/carbon と sub-iron ( $Z=21\sim 22$ )/iron 比を、ACE/CRIS [39]、HEAO-3 [36, 40] および SANRIKU [41] の結果とともに図20に示す。ここで、RUNJOB の B/C 比は、LiBeB/CNO 比になっていることに注意してほしい。2次核/1次核比は宇宙線伝播問題、とくに通過物質厚と拡散のエネルギー依存性に大きく関わってくる。その違いは、TeV/n 領域で顕著に現れてくるが、これまで観測例はなかった。我々は、この TeV/n 領域に初めて観測結果を示した。我々の観測結果は、大気との核衝突によって生成された2次核成分の混ざりこみの補正も行った大気頂上での結果である。LiBeB の大気伝播中の生成は全体の約70%、sun-iron 核で45%である。混ざりこみの詳細な計算方法については、文献 [38] を参照していただきたい。我々の結果は、低エネルギー側からスムーズにつながり、特に subFe/Fe 比では SANRIKU の結果とよくつながっており、Seo ら [33] や Shibata ら [34] の伝播モデルでの拡散係数の rigidity 依存性  $D \propto R^{-1/3}$  に合いそうである。しかし、我々

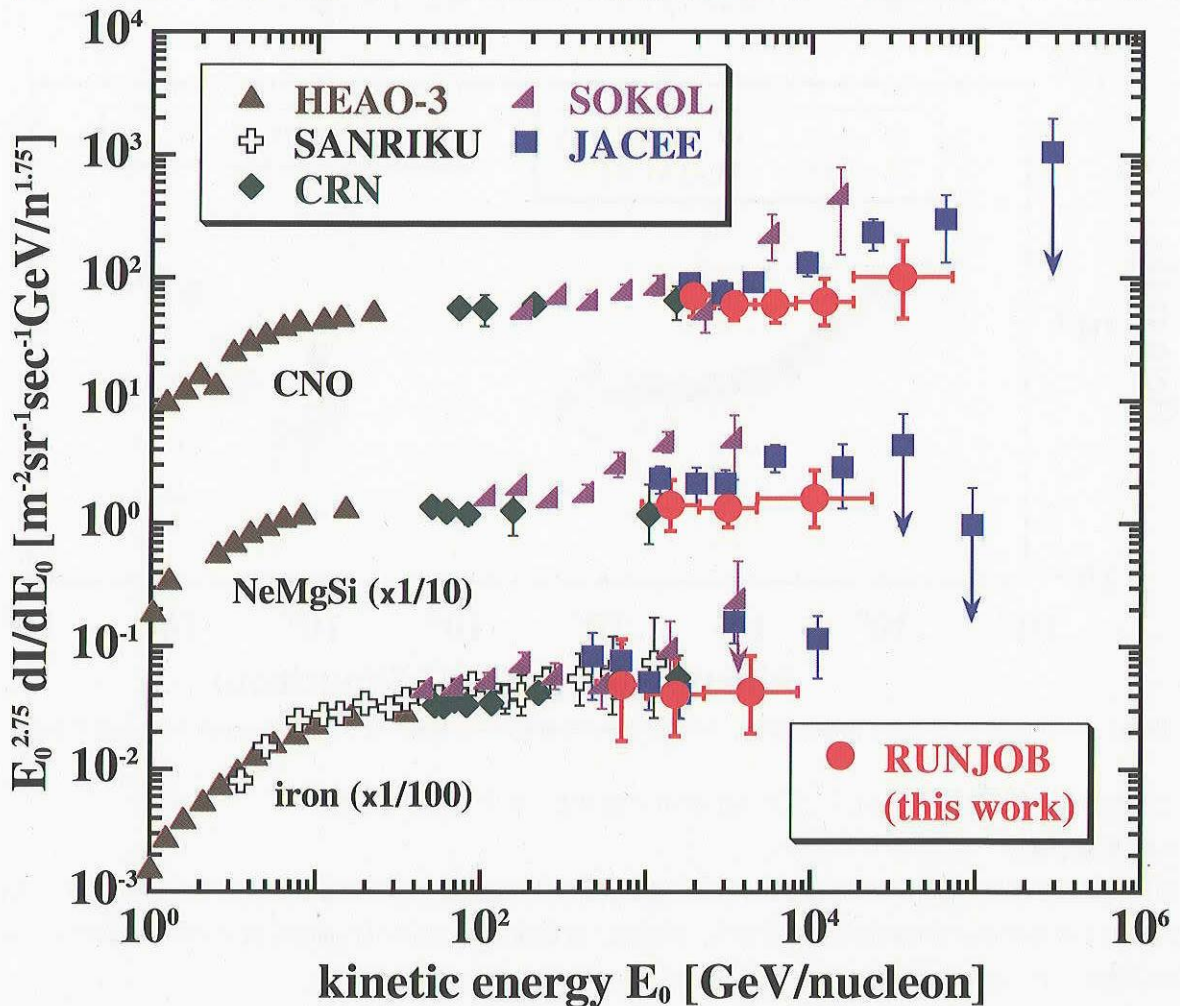


図 19：重粒子成分のエネルギースペクトル。NeMgSi グループ、iron グループはそれぞれ強度を 1/10 倍、1/100 倍にして表示してある。



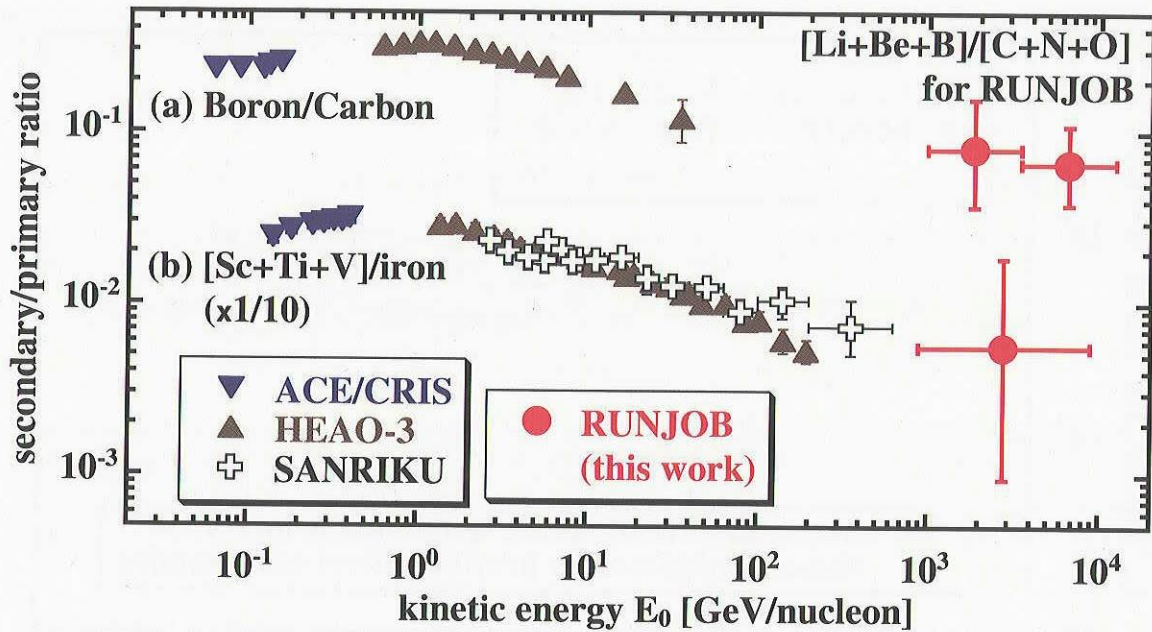


図 20：2次核/1次核比。(a)B/C比，ただし，RUNJOBの結果はLiBeB/CNO比になっていることに注意してほしい。(b)subFe/Fe比。subFeとしてZ=21~23としている。

のデータは，その統計量と混ざりこみの大きさから分かるように，取り扱いには注意が必要である．SXFの解析での数100GeV/n領域のsubFe/Fe比の報告を待っていただきたい。

## 6 全粒子スペクトルと平均質量数

全粒子スペクトルを図21に示す。我々の結果は，JACEE [5] や SOKOL [6] に比べ，強度が約40~50%低い。これは，陽子以外の各元素の強度がこれらのグループの結果に比べ低いので，当然の結果である。図中の低エネルギー領域の帯は，過去の直接観測の結果を Ichimura らによって1993年にまとめられたものである [38]。我々のデータは，この帯の下限の延長線上に位置している。しかし，彼らは数100GeV領域の陽子データとして Ryan ら [42] のデータを用いているが，BESS や AMS に代表される最近の観測は，Ryan らのデータに比べ20~30%程度低い強度を与えている。このことを考慮すれば，我々のデータは低エネルギー領域で得られているだろう全粒子強度とよく一致し，数100GeV~数100TeVまで，ほぼまっすぐとスペクトルが伸びていると考えられる。より詳細に見ると，いずれの観測グループのスペクトルも，低エネルギー側の帯に比べ，ややハードなスペクトルをしているように見え，明らかな *knee* の折れ曲がりは見えていない。このスペクトルの変化が本当であれば，超新星爆発による加速限界付近でのスペクトルの変化や銀河系外などからの新しい成分の盛り上がりを表しているのかも知れない。

平均質量数を図22に示す。低エネルギー領域での帯は，全粒子スペクトルと同様，過去の直接観測の結果をまとめたものである [38]。最高エネルギー領域のプロットが2点あるが，PeV陽子を含んだ場合と含まない場合にあたる。RUNJOBの結果は，帯から1000TeVまでほぼ一定値で伸びており，JACEEのようなエネルギーの増加とともにある質量数の増加は見られない。これは，RUNJOBの粒子ごとのエネルギースペクトルは陽子から鉄核までほぼ平行だったのに対し，JACEEの陽子とヘリウム核以上の成分ではスペクトルの傾きが明らかに違い，重粒子成分で明らかにハードになっているためである。JACEEの平均質量数の増加は，衝撃波加速限界の電荷依存性による変化ではないことに注意してほしい。なお，RUNJOBの平均質量数は大体He~Li程度である。

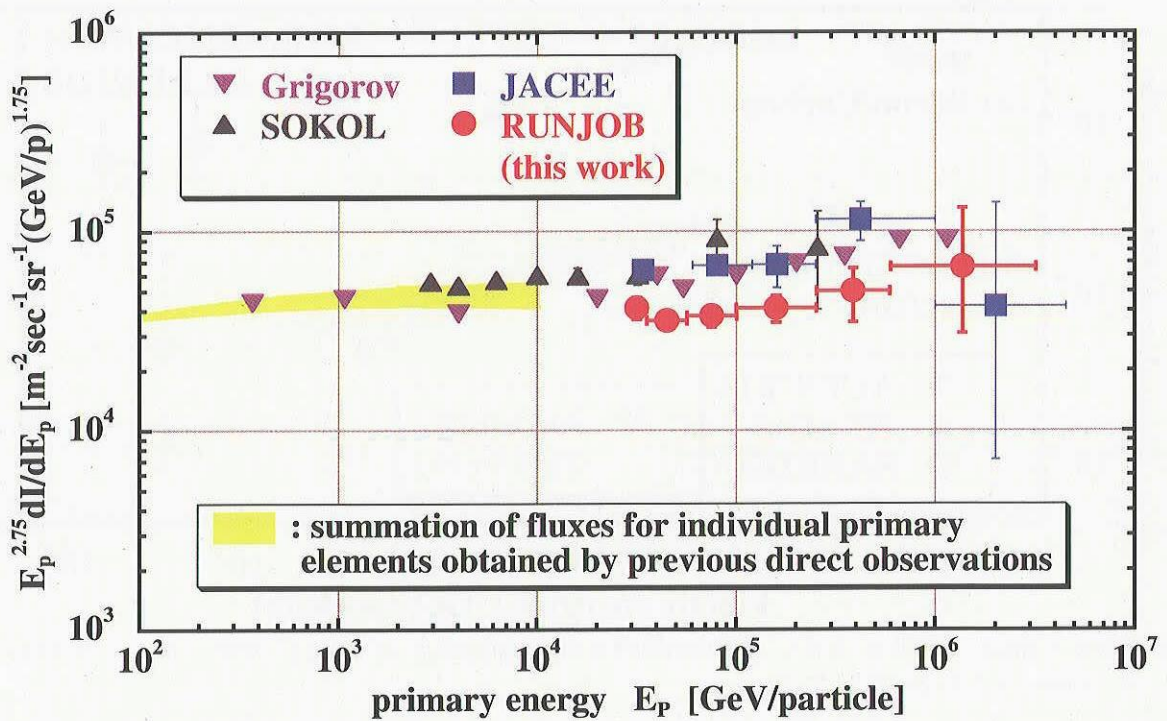


図 21：全粒子スペクトル。縦軸は強度の  $E^{2.75}$  倍している。低エネルギー領域での帯は、過去の直接観測の結果をまとめたものである [38]。

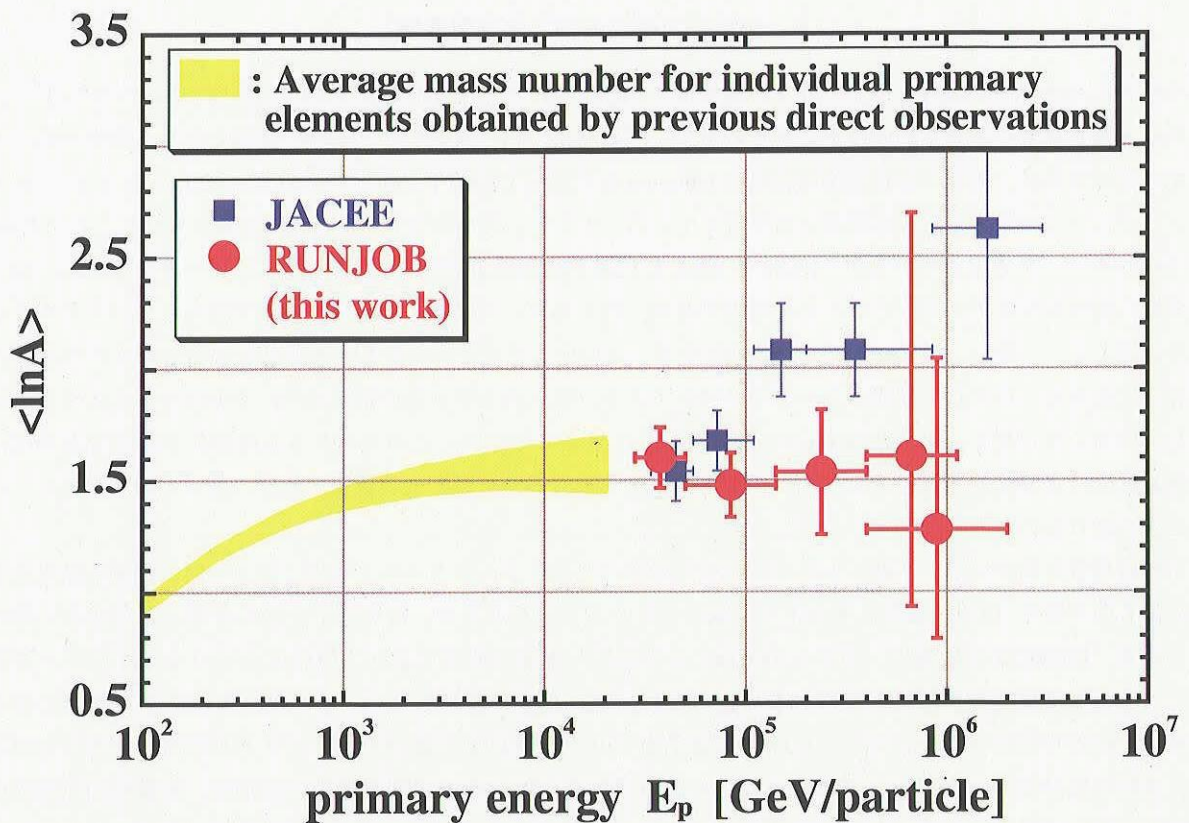


図 22：平均質量数のエネルギー依存性。低エネルギー領域での帯は、過去の直接観測の結果をまとめたものである [38]。

## 7 まとめ

RUNJOB 実験は1995年にスタートし、1999年までに計10機のシベリア上空での長時間観測に成功した。総観測時間は約60日、露出量にして575m<sup>2</sup>になる。これは、JACEE グループのこれまでの解析露出量に匹敵するものである。我々の観測では、観測器の気球搭載重量の制限から、非常に薄いカロリメーターを用いなければならなかったが、 $\gamma$ -core 法と diffuser 法の新しい2つのシャワーエネルギー決定法を開発し、エネルギー決定の困難さを解決した。

本報告は、RUMOB 実験により約600イベントの解析イベントを観測し、 $10^{13}\sim 10^{15}$ eV 領域の宇宙線陽子から鉄核までのエネルギースペクトルと全粒子スペクトル、平均質量数のエネルギー依存性を報告した。我々の観測結果は以下の通りである。

- 陽子のエネルギースペクトルは10~1000TeV 領域をカバーし、JACEE や SOKOL の結果と一致し、また、~数100GeV までの AMS や BESS の結果の延長線上に位置する。
- ヘリウム核のスペクトルは、5~100TeV/n 領域をカバーし、その強度は JACEE, SOKOL の約半分の強度である。
- 陽子とヘリウムのスペクトルの傾きは、BESS などの結果とあわせてみると、10GeV/n~100TeV/n の間ではほぼ平行で-2.75乗であり、He/p 比は、0.04~0.05程度である。
- 重粒子成分のスペクトルは、1~数10TeV/n 領域をカバーし、JACEE や SOKOL の結果より低い強度を与え、特に CNO 核では、スペクトルの傾き大きな違いが見られる。
- 重粒子成分のスペクトルは、CRN や HEAO の結果と合わせて見ると、数10GeV/n~10TeV/n の領域ではほぼ並行であり、陽子、ヘリウム核のスペクトルともほぼ平行か若干ハードなようがある。
- 2次核/1次核比は、大気中で生成される2次核の混ざりこみの割合が大きいが、これまでに報告のなかった TeV 領域のデータを示し、低エネルギー領域の結果の単純な延長線上に位置している。
- 全粒子。スペクトルは、数10~1000TeV をカバーし、JACEE や SOKOL の結果より30~40%低い強度であるが、これまでの低エネルギー領域の観測結果の延長線上に位置している。
- 全粒子スペクトルの傾きは、低エネルギー領域の結果と比較すると、ほぼ-2.75乗で数100GeV から数10TeV まで伸びている。数10TeV 以上でハードなように見えるが、数100TeV 以上の統計がまだ少なく明らかかなことは言えない。
- 平均質量数は、数10GeV から1000TeV までほぼ一定で、He~Li 程度の平均質量数を与えている。この結果は、低エネルギー領域の結果の単純な延長線上に位置する。

以上のような結果は、これまで JACEE グループが報告していた結果とは異なり、単純な rigidity に依存した粒子加速と伝播過程で期待されるモデルと一致し、源でのスペクトルが粒子よらず平行であることを予想させる。残念ながら、我々の観測によっても、数100TeV 以上のイベントはわずか10数イベントであり、*knee* 直前でのスペクトルの詳細な変化については明らかにできていない。現在開発が進んでいるスーパープレッシャー気球が実用化されれば、1フライトで RUMJOB 実験の観測時間を得る事が可能となり、将来、数100TeV 領域の詳細な観測が可能になるであろう。

## A ロシアでの気球観測

### A.1 気球観測上の制限

高エネルギーの宇宙線観測には、ロシアでの気球実験環境は §2.1 で示したように非常に都合がよい。しかし、ロシアの経済事情や気球技術の問題によりいくつかの制限がある。ここでは RUNJOB 実験における重要な

2つの制限について説明する。

表6に1995年の放球した気球の詳細なデータを示す。ロシアでの気球実験でRUNJOB実験にとって最大の制限となったのは観測器重量である。RUNJOB実験では観測器の重量は最大250kgとされていた。そのため、オーソドックスな十分な鉛を使用したカロリメーターではなく、薄いカロリメーターを使わざるを得なかった。それに伴って、エネルギー決定に新しい方法が必要となった。この制限は、気球の自重および気球のコントロールデバイスの重量が重いために、観測器に十分な重量を割けないためである。表を見てわかるように、総重量に対して、観測器の重量は約1割程度であるのに対し、気球およびコントロールデバイスの重量は5割を超えるものである。残り4割がバラストの重量である。これは、ロシアの経済事情により新しいバルーンが購入できないことや新しい装置開発ができないことによると思われる。したがってこれらについては、外国製の気球や装置を使用したり、ARGOS-GPSシステムのような小型軽量の装置を導入することで改善できる問題である。これにより、より大型の観測器を高高度まで飛翔させることが可能であろう。

2点目の制限として高度変化がある。昼夜の浮力の変化による高度変化は避けることはできないが、その大きさはできるだけ小さいほうがよい。この高度変化を防ぐためにロシアではオートバラストシステムにより、高度28kmより高度が下がらないようにしている。しかし、図3を見てもらえばわかるように、日中の30数kmの高度から28kmまで降下する時間は最大で約10時間ほどもあり、観測を行った季節（7月）を考えれば、夜間はずっと降下を続けていると考えられる。したがってオートバラストシステムを改良することにより改善可能であろう。これに対し、我々は有効高度を導入することで解決したが、高度変化はできるだけ小さいほうが良いことは明らかである。

表6：1995年 RUNJOB 実験の気球データ

	RUNJOB1	RUNJOB2
Balloon type:		
Envelop volume	180,000m <sup>3</sup>	180,000m <sup>3</sup>
Envelop weight	650kg	650kg
Ballast masses	800kg	800kg
Parachute weight	180kg	180kg
Control device weight	220kg	220kg
Date of launching	July15,'95	July19,'95
Time of launching(Moscow time)	10h57m	13h02m
Flight duration	130h	167h
Wind velocity at launching position	2-4m/s	2-4m/s
Length of flight trajectory	5357km	7200km
Altitude: initial	32.1km	32.1km
final	34.8km	36.2km
Altitude of ballasting	28.1km	28.1km
Point of landing	Markushino (Tyumen region)	Inza (Uiyanovsk region)
Payload recovery after landing	Saved with helicopter	Saved with car
State of sci.equipment	normal	normal
Weight of PI	230kg	230kg
Area of PI	0.4m <sup>2</sup>	0.4m <sup>2</sup>
Total weight of balloon	2080kg	2080kg

このようにロシアでの気球実験には、現在のところ重要な制限があるが、いずれも改善が可能なものである。また、1カ国での長時間観測が可能で日本から近いという地理的な環境やRUNJOBでの気球実験の成功率(10機/11機)を考えれば、やはりロシアでの気球実験は魅力的なものである。将来これらの問題が改善されることを期待したい。

## A.2 COSPAS システムと ARGOS-GPS システムの比較

ロシアでは、気球の位置データの取得に、緯度経度データはCOSPASシステムにより、高度データは気圧計を用いている。緯度経度は、COSPAS衛星を利用し、ほぼリアルタイムで気球の位置がわかる。気圧データは、飛行中に記録され回収後に解析される。1999年の気球実験では、COSPASシステムと同時に、宇宙科学研究所(現JAXA/宇宙科学研究本部)の協力により、フランスのARGOS-GPSシステムも搭載することができた。ARGOS-GPSシステムでは、GPSを用いて気球の緯度経度および高度を飛行中に30分おきに取得できる。そこで、これら2つの位置測定システムから得られたデータを比較する。なお、ARGOS-GPSシステムの詳細は文献[43]を参照してほしい。

図23は、2つのシステムで得られた経度を縦軸に、飛行時間を横軸にして示している。COSPASとARGOS-GPSでは、若干のずれはあるが1度以下であり、位置データはほとんど一致していることがわかる。ARGOS-GPSでは安定してデータ取得ができていたが、COSPASではデータの空白時間が存在する。この原因は不明であるが、我々の実験結果に影響しない。

図24は、高度の比較を示した。縦軸は高度[km]、横軸は時間になっている。COSPASデータは気圧計で得られたデータを高度に変換している<sup>1</sup>。ARGOS-GPSは、GPSによって得られた高度である。両システムで、高度

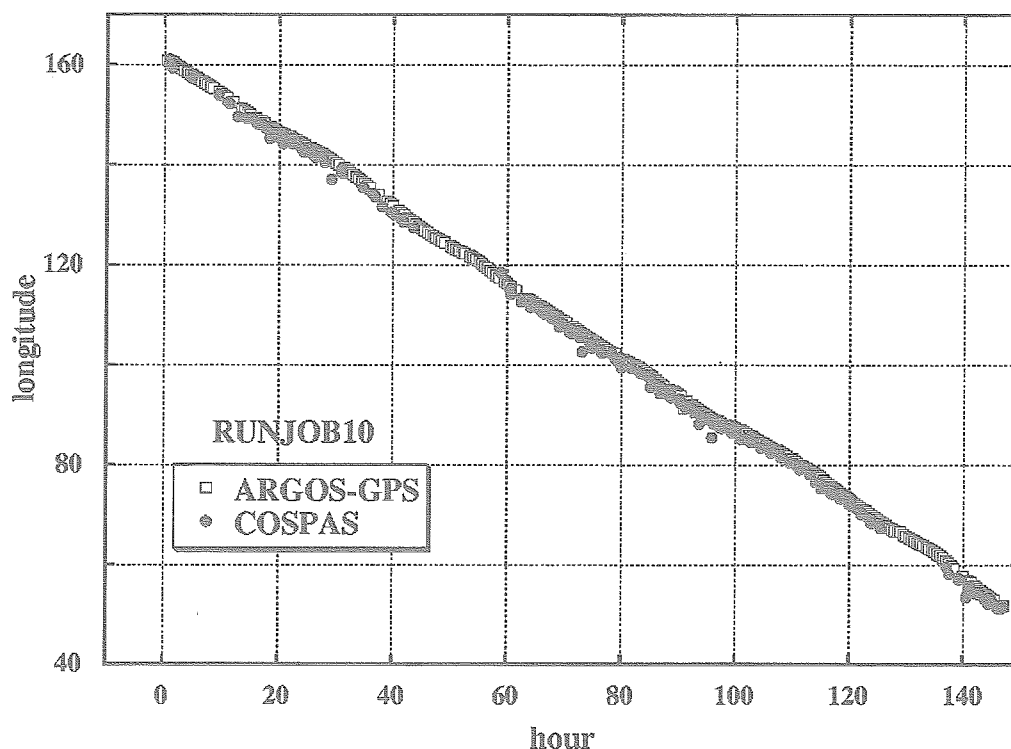


図 23 : ARGOS-GPS と COSPAS で得られた RUNJOB10号機での経度データの比較

<sup>1</sup> 本来、気圧計で得られるデータはCOSPASシステムとは別のものである。COSPASシステムとは、COSPAS衛星を使った緯度経度を測定するシステムことを呼ぶ。だが、ここではわかりやすく区別するため、気圧計より得られたデータもCOSPASデータと呼ぶことにする

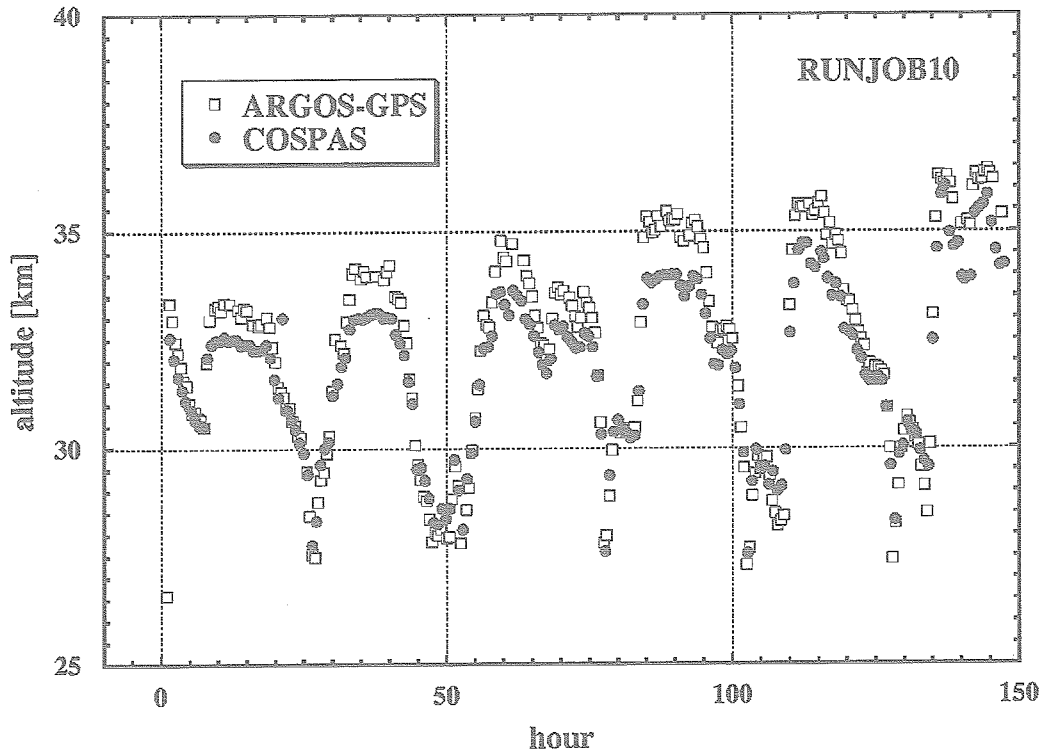


図 24 : ARGOS-GPS と気圧計で得られた RUNJOB10号機での高度データの比較

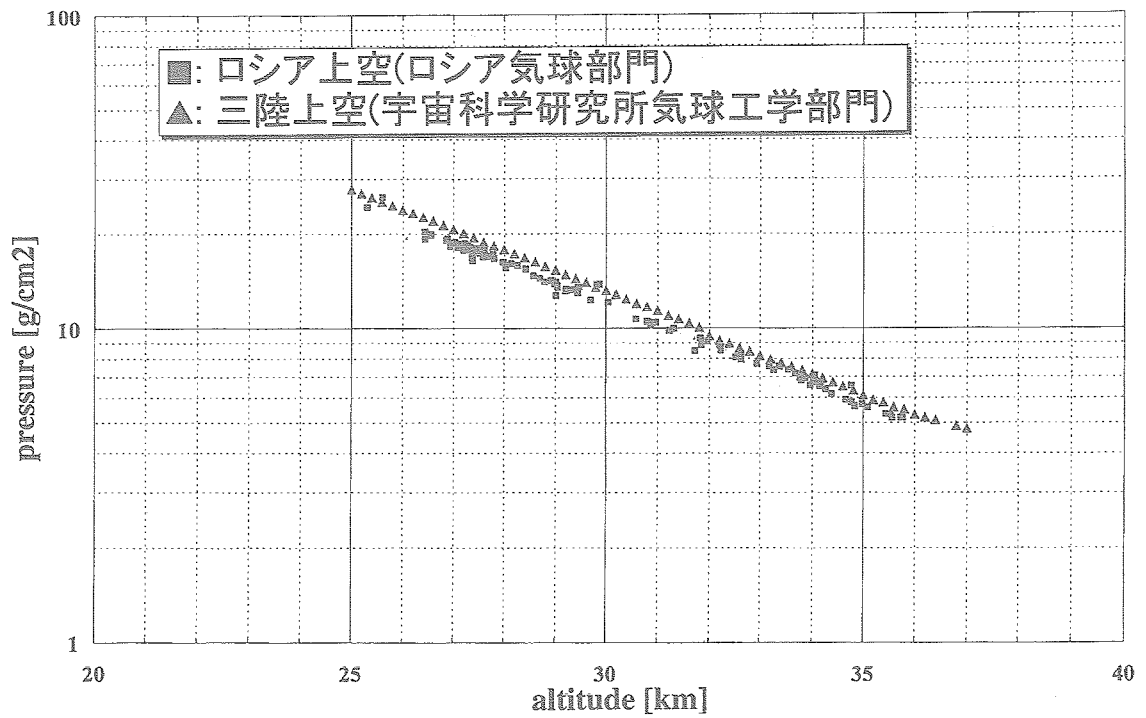


図 25 : 三陸上空およびロシア上空での高度と気圧の関係。

変化の様子はよく一致している。だが、日中の高高度の時に2つのシステムで違いが見られ、系統的に ARGOS-GPS システムの高度が2 km ほど高い。これは、気圧から高度に変換する際に生じるものであろう。図25に三陸上空およびロシア上空での高度と大気圧の関係を示す。三陸上空のデータは宇宙科学研究所（現 JAXA/宇宙科学研究本部）気球工学部門によって測定されたものであり、ロシア上空のものはロシア側の気球工学部門の好意によって提供を受けたものである。図から明らかのように、RUNJOB 気球高度に置いて2つのデータは数%の違いが見える。RUNJOB 気球実験では高度データは km 単位で提供されるため、解析のために高度 [km] から大気深さ [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ] への変換する。本研究においては三陸上空での関係を用いて変換を行っている。そのため、実際の大気深さとは若干の違いがあるかもしれない。これらの違いは観測高度においてほぼ  $1 \sim \text{g}/\text{cm}^2$  以下であり、大気吸収効果を考慮した絶対強度の差は、陽子で1%以下、鉄核でも6%以下の差であり、エネルギーの決定精度や統計精度を考えれば、この程度の違いは絶対強度の算出に問題とならない。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] G. V. Kulikov, G. B. Khristiansen, Sov. Phys. JEPT, 35 (1959) 436.
- [ 2 ] M. Amenomori et al., Phys. Rev., D62 (2000) 072007.
- [ 3 ] H. Ulrich et al, Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. (Humberg, Germany), 1 (2001) 95,
- [ 4 ] K. Asakimori et al., AstroPhys. J, 502 (1998) 278.
- [ 5 ] K. Asakimori et al., Proc 25th Int. Cosmic Ray Conf. (Durban, South Africa), 4 (1997) 1.
- [ 6 ] I. P. Ivanenko et al., Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conf. (Calgary, Canada), 2 (1993) 17.
- [ 7 ] V. I. Zatsepin et al., Yad, Fiz., 57 (1994) 684.
- [ 8 ] J. R. Hörandel, Astropart. Phys., 19 (2003) 193
- [ 9 ] L. G. Sveshnikova, Astron. & Astrophys., 409 (2003) 799
- [10] R. J. Protheroe and A. P. Szabo, Phys. Rev., Lett., 69 (1992) 2885
- [11] H. S. Ann, Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba, Japan), OG (2003) 1833
- [12] H. S. Ann, Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf. (Pune, India), (2005)
- [13] E. S. Seo, Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf. (Pune, India), (2005)
- [14] A. V. Apnassenko et al., Astropart. Phys., 16 (2001) 13.
- [15] M. Hareyama et al., Nucl. Instr. Meth., 512 (2003) 553
- [16] V. A. Derbina et al., AstroPhys. J., 628 (2005) L41
- [17] 上岡英史, 中村 晃, 柴田 徹, 大気球シンポジウム報告集, 宇宙科学研究所 (1995) 151.
- [18] M. Ichimura et al., Nucl. Instr. Meth. A300 (1991) 374.
- [19] Erik Olson, Ph. D. thesis, University of Washington (1996).
- [20] 塩田哲也, 修士論文, 青山学院大学 (1997)
- [21] M. Ichimura et al., Nucl. Instr. Meth., A300 (1991) 616.
- [22] I. Ohta, Suppl. Prog. Theor. Phys., 47 (1970) 271
- [23] M. Okamoto and T. Shibata, Nucl. Instr. Meth., A257 (1987) 155
- [24] T. Fujinaga, M. Ichimura, Y. Niihori and T. Shibata, Nucl. Instr. Meth., A276 (1989) 317
- [25] C. M. G. Lattes, Y. Fujimoto and S. Hasegawa, Phys. Rep., 65 (1980) 151
- [26] J. Alcaraz et al., Phys. Lett. B 490 (2000) 27
- [27] J. Alcaraz et al., Phys. Lett. B 494 (2000) 193

- [28] S. Haino et al., *Phys. Lett. B*, 545 (2004) 1135,
- [29] W. Menn et al., *AstroPhys. J.*, 533 (2000) 281
- [30] D. C. Ellison, L. O' C. Drury & J.P. Mayer, *AstroPhys. J.*, 487 (1997) 197
- [31] A. V. Apanasenko et al., *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf. (Durban, South Africa)*, 4 (1997) 137
- [32] K. Asakimori et al., *Proc. 23th Int. Cosmic Ray Conf. (Calgary, Canada)*, 2 (1993) 25
- [33] E. S. Seo and V. S. Ptuskin, *AstroPhys. J.*, 431 (1994) 705
- [34] T. Shibata et al., *AstroPhys. J.* 612 (2004) 238
- [35] S. P. Swordy et al., *Astrophys. J.*, 403 (1993) 658.
- [36] J. J. Engelmann et al., *Astron. & Astrophys.*, 233 (1990) 96.
- [37] E. Kamioka et al., *Astropart. Phys.*, 6 (1997) 155.
- [38] M. Ichimura et al., *Phys. Rev.*, D48 (1993) 1949
- [39] A. J. Davis et al., *AIP Conf. Proc.*, 528 (2000) 421.
- [40] W. R. Binns et al., *Astrophys. J.*, 324 (1988) 1106.
- [41] M. Hareyama et al., *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf. (Salt Lake City, America)*, 3 (1999) 105.
- [42] M. J. Ryan et al., *Phys. Rev. Lett.*, 28 (1972) 985
- [43] 鳥海道彦 et al., 大気球シンポジウム報告集, 宇宙科学研究所 (1998) 56.