

日露共同気球実験 RUNJOB

倉 又 秀 一¹

Russia-Nippon Joint Balloon Experiment (RUNJOB)

By

Shuichi KURAMATA¹

Abstract : RUSSIA-NIPPON JOINT Balloon experiment (RUNJOB) started in 1995 to measure the chemical compositions and energy spectra of the primary cosmic rays. We had 4 balloon campaigns till 1999 and launched 11 balloons were launched, out of which 10 balloons were successfully recovered with more than 130 hour flight time.

This collaboration is very close to the end and we shall summarize the experiment and point out some problems.

This report do not represent the opinions of the collaboration but include the personal views of the author.

要 旨

RUNJOBは、一次宇宙線の化学組成とエネルギーの測定を目的として、1995年より日本ロシアの共同研究として始まった。現在まで4回の気球キャンペーンを行い、11機の気球の放球を行い、10機で観測の成功を収めた。解析もほぼ終了の時期に近づいている。

この段階で、これまでの共同研究を振り返り、特徴的なことや課題などを考えてみる。

ここに示すことは、共同研究全体の意見をまとめたものではなく、個人的な意見や評価が含まれていることを前もって申し上げておく。

重要語：一次宇宙線, 化学組成, エネルギースペクトル, 日露共同気球実験

1. はじめに

日露気球実験 RUNJOBは、

M. Furukawa¹, V.I. Galkin⁵, M. Hareyama¹, Y. Hirakawa², M. Ichimura², N. Inoue¹, E. Kamioka⁹, T. Kobayashi¹, V.V. Kopenkin⁶, S. Kuramata², A.K. Managadze⁶, H. Matsutani³, N.P. Misnikova⁴, R.A. Mukhamedshin⁷, S. Nagasawa¹, R. Nakano², M. Namiki⁸, H. Nanjo², S.N. Nazarov⁵, S. Ohta⁸, H. Ohtomo², D.S. Oshuev⁶, P.A. Publichenko⁶, I.V. Rakobolskaya⁵, T.M. Roganova⁶, G.P. Sazhina⁶, H. Semba¹¹, T. Shibata¹, D. Shuto², H. Sugimoto¹⁰, L.G. Sveshnikova⁶, R. Tanaka¹, N. Yajima⁸, T. Yamagami⁸, I.V. Yashin⁶, E.A. Zamchalova⁶, G.T. Zatsepin⁷, I.S. Zayarnaya⁴

¹弘前大学 理工学部

- (1) Faculty of Science and Technology, Aoyama Gakuin University, Tokyo, Japan
- (2) Faculty of Science and Technology, Hirosaki University, Aomori, Japan
- (3) School of Medicine, Hirosaki University, Aomori, Japan
- (4) P.N.Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- (5) Physical Department, Moscow State University, Moscow, Russia
- (6) D.V.Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia
- (7) Institute for Nuclear Researches of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
- (8) Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Japan
- (9) Research and Development Department, National Center for Science Information System, Tokyo, Japan
- (10) Shonan Institute of Technology, Shonan, Japan
- (11) Faculty of Comprehensive Welfare, Urawa University, Urawa, Japan

を共同研究者に持つ実験で、1995年より気球の放球が始められた。

ロシアの経済的に困難な状況のもとではあったが、1999年までに11機の気球をあげ、そのうちの10機が成功した。これにより、 10^6 GeV 近くまでの一次宇宙線の直接観測を行った。

以下に個別の議論を行うが、全体として、プロトン、ヘリウムのスペクトルの伸びは満足のゆくものであるが、重粒子成分に関しては、低エネルギー領域の検出効率が十分でなく、測定したスペクトルの領域がせまく、十分な満足は得られない。これはエマルジョンチェンバーの特質でもあり致し方のない面もあるが、単一の測定器で全ての成分を測定できたことは評価されることであろう。

特に、JACEEの鉄の測定は、サブ鉄の分離を試みていないのに対し、RUNJOBの場合はその区別を行い、伝播の議論を行えるデータを提供している。もちろん統計精度は悪いが、最も高いエネルギー領域での測定となり、モデルの区別に有用である。

以下、経過、気球、エネルギー決定、親粒子同定、運搬等について議論を行う。

2. 経過

これまでの放球を次の表にまとめる。

表1 RUNJOBの気球

No	1995		1996		1997		
	1	2	3	4	5	6	7
放球日	7月15日	7月19日	7月17日	7月18日	7月9日	7月11日	7月16日
飛行時間 時間	130.0	167.0	134.0	147.5	139.5	139.5	3 失敗
平均高度 g/cm ²	10.0	9.6	9.8	10.2	10.5	10.7	
重量 kg	230	230	260	254	260	260	260

No	1999			
	8	9	10	11
放球日	7月8日	7月12日	7月13日	7月14日
飛行時間 時間	141.0	145.0	148.0	146.0
平均高度 g/cm ²	9.5	9.2	9.2	9.0
重量 kg	227	227	227	227

チェンバーのサイズとしては、すべての飛翔に共通で、40cm×50cmのブロックを2個隣接しておき、他方のブロックへつながるイベントも解析対象として、立体角を大きくしている。チェンバーの面積としては、0.4m²となる。

このうちの1回の失敗は、一定時間内にある高度以上にならないと、気球の飛翔をそれ以上続けさせないためのタイマーが誤動作して、気球を落としたことによる。観測機はカムチャツカ半島内に着地したので、回収することが出来た。再度の放球を試みたが、適当な機会を得ることが出来なかった。

さらにこの気球実験を延長することも検討されたが、より意味のある統計に達するためには、2~3回の延長では意味が無く、また気球のストックも状態のいいものはなくなったので、1999年に4回の放球を行い終了とした。実際、現在のロシアでは気球を適当な値段で作ることは出来ず、これまで使用した気球はすべて旧ソ連時代に作成された物である。放球の記録を見ると、最初用意した気球の状態が悪いので取り替えたという記述も見られる。

あとの運送のところで述べるように、チェンバーはロシアで解体し、手荷物で日本に持ち帰り、宇宙線研究所で現像を行った。

毎年少なくとも4ブロック（1ブロックは40cm×50cmの面積、ひとつの気球に2ブロック搭載）の露出を行ったので、モスクワ大学、レベデフ物理学研究所、青山学院大学、弘前大学で解析を行った。データの最終的なチェックや解析のバックアップは青山学院で行われた。

現在の段階での最終データをグラフと示す。これらは、2004年4月の物理学会で発表されたものである。

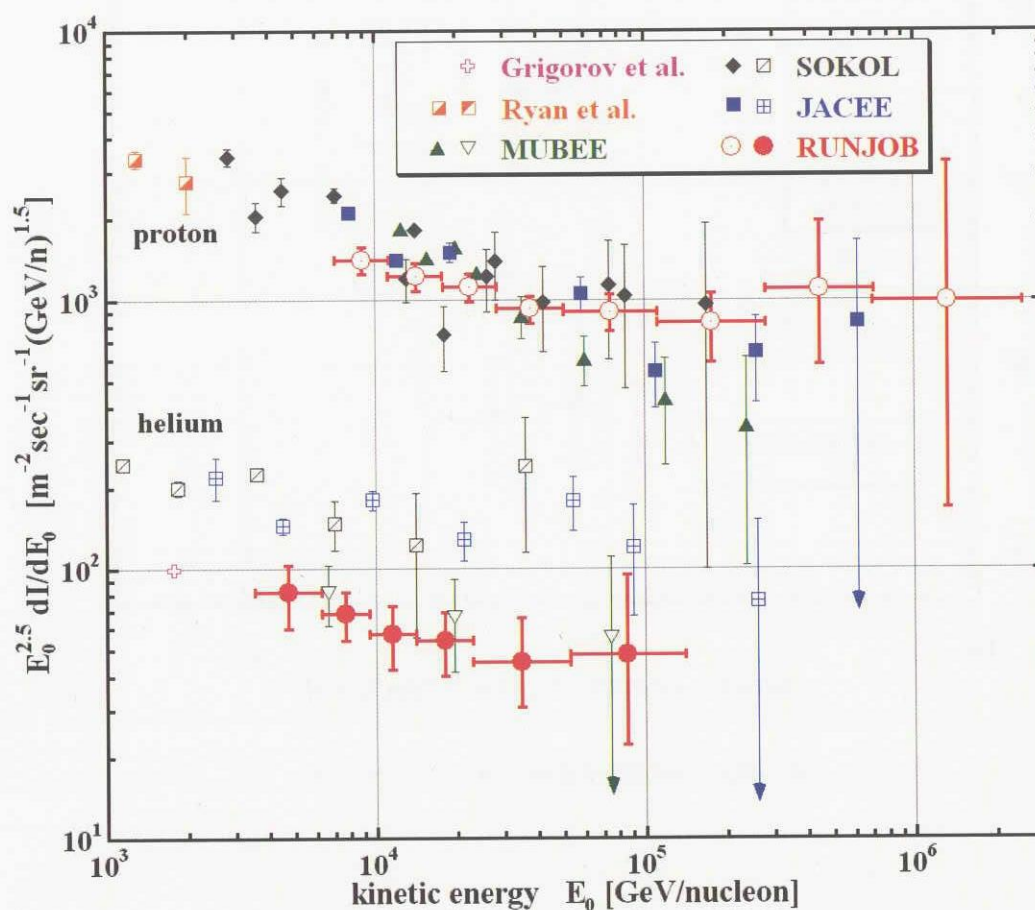


図1 RUNJOBのプロトン・ヘリウムのエネルギースペクトル

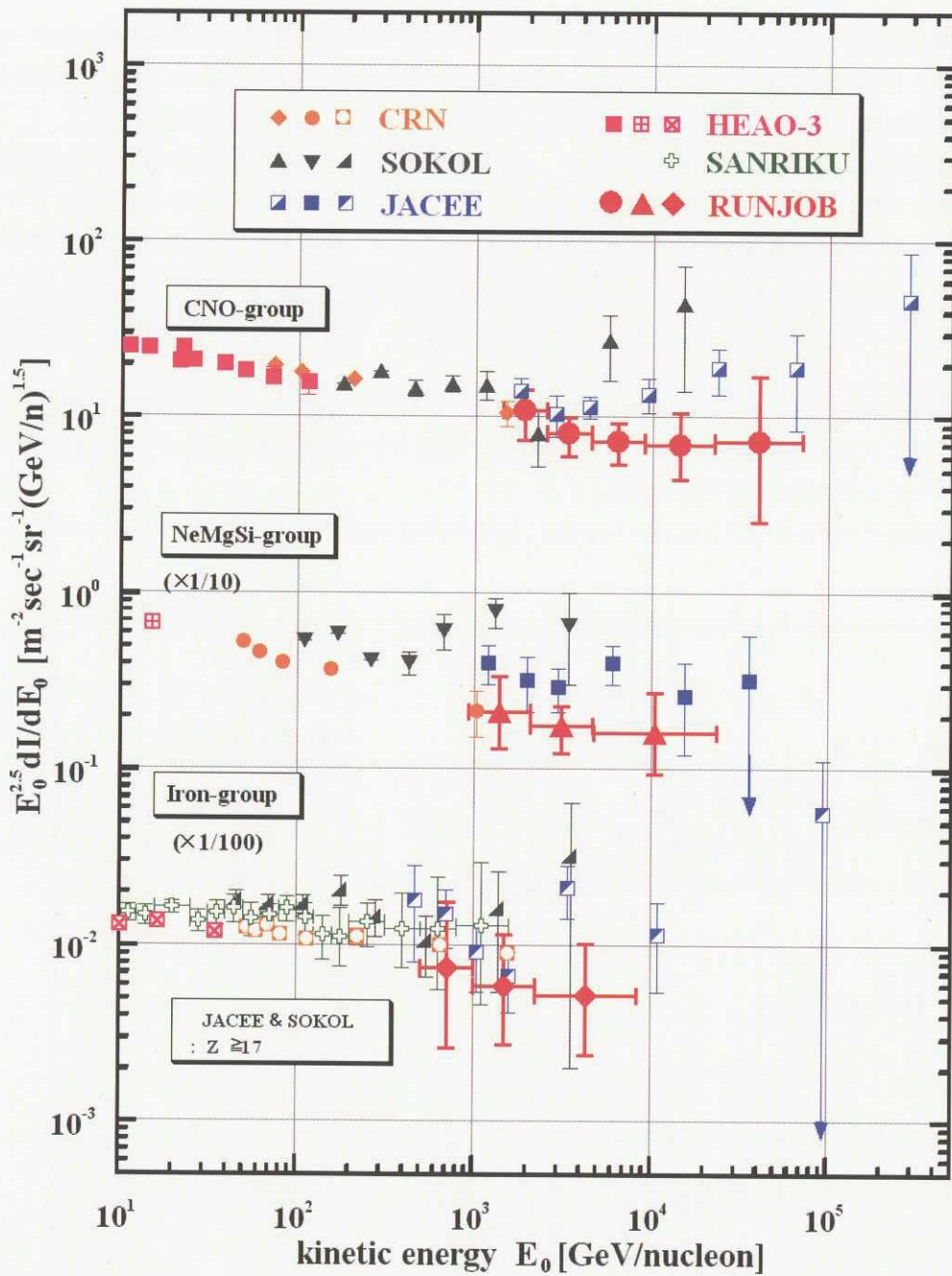


図2 RUNJOBの重粒子成分のエネルギースペクトル

成分別のスペクトルをもとに作成された全粒子スペクトルを示す。

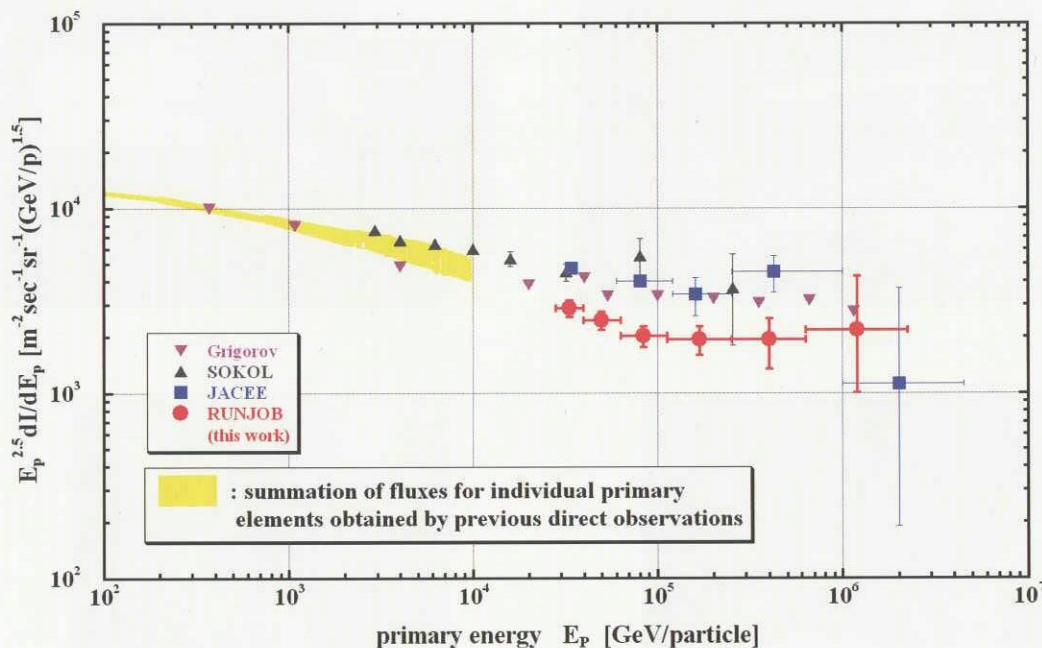


図3 RUNJOBの全粒子エネルギースペクトル

この共同研究を始めるにあたり、研究者の間で取り交わしたメモランダムには、"RUNJOB aims at clarifying the chemical composition and the energy spectrum of the primary cosmic rays in the 'knee' region (about 1 PeV per particle)"

とある。実際にPeV領域のイベントは、何回か報告されている～1PeVのイベントが1例あるのみでknee 領域の探査が十分行われたとは言えない。しかし、観測した領域で陽子の強度が減少するなどの低いエネルギー領域と大きく異なる兆候は見えていない。その意味では、knee 問題説明の手がかりは掴めていない。

しかし、今の規模の実験を後何回か繰り返しかえしても、'knee' region の観測をできないので、この実験を継続しないことになった。別のなんらかの方法を考える必要がある。

3. 気球

ロシアの広大な国土を利用して、カムチャツカ半島からボルガ川流域までの飛翔を行う長時間飛行が可能である。

気球エンベロップもロシア（旧ソ連）製である。新たに気球を作成するとずっと高い値段がつくが、現在の手持ちのものには一応40kUS\$の値段をつけていた。

表2 気球

	重量[kg]
気球(180,000m ³)	650
バラスト	800
パラシュート	180
コントロールデバイス	220
PI	230
総重量	2080

表2に示すように、観測装置の重量に比べて気球関連の重量が大きい。写真1に示すように電池も鉛蓄電池を用い、特に軽量化を図ってはいない。

また気球高度を維持するためには、気圧がある値になった時、写真4に示すバラストの袋から鉄の粒を落としている。

閾値コントロールで、気球の高度を一定にするというよりは、夜間に気球が落ちないように重量を減らす、といった感じのコントロールである。写真2, 3は気球全体の荷姿と球トップの弁である。



写真1 電源



写真2 荷姿



写真3 弁



写真4 バラスト袋

気球の高度が下がるのは、2次核の観測で好ましいことではないので、宇宙研のオートバラストを組み合わせる可能性について検討したが、新しいものを気球に導入するにはかなりのテストが必要で、話は進まなかった。例えば、気球を持ち込んでロシアで放球するためには少なくとも2機の気球をテストに用いなければならないということであった。

しかし、1995年から1999年にかけて、11機の放球を行いそのうち10機の成功をおさめたことは、その技術の高さを示すものである。RUNJOB 一気球をあげている間は、稚内からの放球とか、ヴォルスクの気球基地からの短時間飛翔の放球とか、いろいろな可能性の議論もしたが、共同研究で気球の窓口になった人の逝去もあり、RUNJOBの終了とともに、それらの議論も立ち消えとなったのは残念な気がする。

4. エネルギー決定

ロシアの気球の制限から測定器の重量は望むらくは200kg、最大でも250kgを超えないような要請があった。先に示した表のように、シャワーの発達を観測するカロリメータ部分はきわめて薄い。

そこで、実験を開始する前に、横向き運動量の平均値が最前方では角度依存性があり、これを利用することが検討され、実際の解析に利用された。

また、この実験の前で行われた三陸実験で用いた、破碎角の角度分布からのエネルギー決定も最初は用いるつもりで、チェンバーもそのように設計された。しかし、実際にはカロリメータ層で大きなエネルギーのデポジッ

トがあるイベントが選択されるので、破碎核の検出が困難であり、また入射粒子が陽子の場合にはまったく無力である。そのため、他のエネルギー決定のクロスチェックには用いられたが、実的な適用は無かった。そしてその応じて、チャンバーのデザインも変更し、スペーサーの大きさを小さくした。エネルギー決定の方法がチャンバーのデザインを決定したが、その変遷が次の図に示されている。

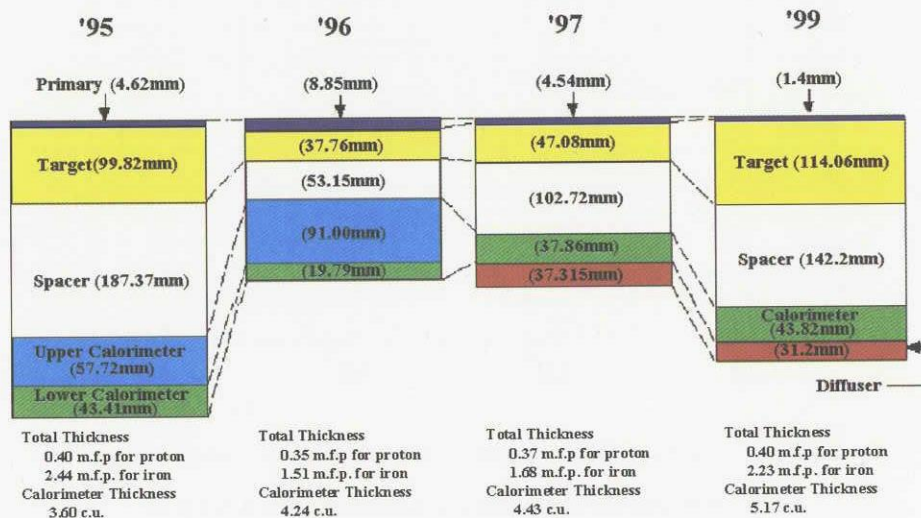


図4 RUNJOBのチャンバー構造の変化

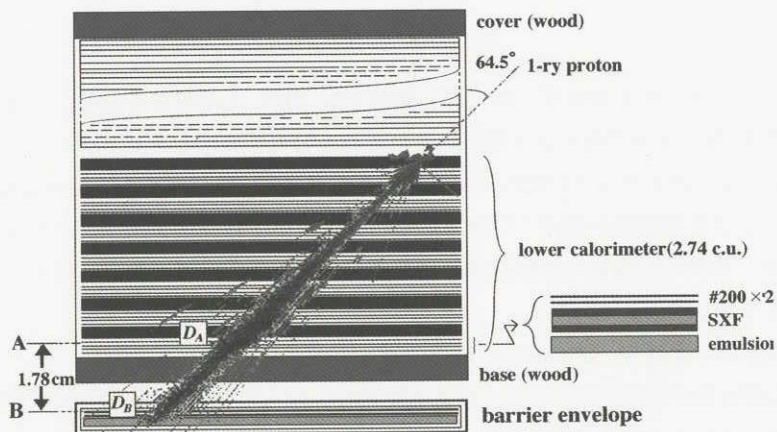


図5 1 PeV event

'95チャンバーで観測されたPeVの陽子イベントの図を示す。図で、barrier envelop とあるのは、チャンバーの外に置いたテストプレートで、このイベントのシャワーが観測されている。間隔をおいてシャワーを観測することにより、その横方向の構造が測定され、エネルギーを決定できることがわかった。

'99チャンバーでは積極的にこの方法を利用し、エネルギー決定に用いた。(diffuser法) これにより薄いカロリメータでも、非常に高い領域までエネルギー決定が可能になった。(晴山 博士論文 2003)

また、エネルギー決定とは直接関係ないが、核の衝突点の直下で、多重発生したパイ中間子群をX線フィルムで捕らえて、核衝突を見出す "jet trigger" という方法が確立され、鉄の絶対強度が求められた。この方法は、多重度

が大きくなる重核について有効で、重核のエネルギースペクトルを低いエネルギーから測定することが可能になる。

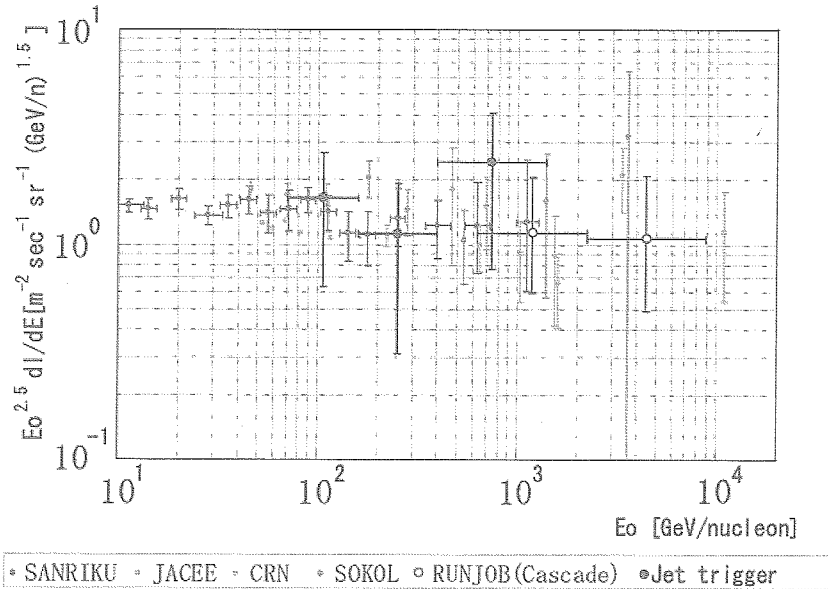


図6 RUNJOBのjet trigger方式による鉄のエネルギースペクトル

このように、エネルギー決定については、気球の制約から来たとはいえ、その制約を乗り越え、あらたな手法も開発されて、成果をあげたということができる。

5. 親粒子の同定

核種別のエネルギースペクトルを求めるためには、親粒子を同定しその電荷を測ることは不可欠である。電荷の決定は、顕微鏡の像をTVカメラで取り込み処理することで、労力を要するグレイン・カウントの方法は避けることが出来るが、果たしてどのトラックが親粒子かを決定するためには、幾何学的方法が必要である。

極に比べてシベリア上空での気球の飛翔は切断運動量が高いので、バックグラウンドが高く、親の粒子の同定は比較的容易であるが、それでも陽子の半数が親の粒子が同定されていない。親が見つからないので、陽子の分類に入れるということである。

具体的にどの程度の幾何学的精度があるかは、以下の通りである。

「(親粒子の) 予想位置近傍の重粒子を reference として用い、ローカルな領域で三角法を適用することにした。実際の測定は、対象としているイベントの核衝突点から半径3cm以内の2本の重粒子を用いた。この場合も走査する領域をtracingの時と同様、重粒子を用いて計算したところ、半径100 μ mの円内におさまっていることが分かったので、その2倍、すなわち、半径200 μ mの円内を走査範囲とした。」(上岡 博士論文 1997)

このような精度に基づいて、親粒子の誤同定が無視できる大きさであることは、ヘリウム核以上については定性的にいえると考えているが、量的な評価は行われていない。

例えば、2次粒子をいくつか測定し、それらの2次粒子への垂直距離の和が最小になる点を衝突点とし、この衝突点と親粒子の垂直距離の分布を調べることにより、量的な評価が可能となろう。

2次粒子を表す直線を、空間中の1点 a_i と方向余弦 b_i で表し、衝突点の候補の座標を x とすれば、

$$S = \sum_{i=1}^n |a_i + t_i b_i - x|^2$$

を最小にする x を求めればよい。ただし、 t_i は、 x から2次粒子の直線に降ろした垂線の足を与えるパラメータで、垂線の足ということで別に決定され、

$$t_i = (x - a_i) \cdot b_i$$

で与えられる。

S を最小にする条件から $x=(x, y, z)$ を求めれば、

$$\begin{pmatrix} \sum(\alpha_i^2 - 1) & \sum\alpha_i\beta_i & \sum\gamma_i\alpha_i \\ \sum\alpha_i\beta_i & \sum(\beta_i^2 - 1) & \sum\beta_i\gamma_i \\ \sum\gamma_i\alpha_i & \sum\beta_i\gamma_i & \sum(\gamma_i^2 - 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum[(\alpha_i^2 - 1)x_i + \alpha_i\beta_i y_i + \gamma_i\alpha_i z_i] \\ \sum[\alpha_i\beta_i x_i + (\beta_i^2 - 1)y_i + \beta_i\gamma_i z_i] \\ \sum[\gamma_i\alpha_i x_i + \beta_i\gamma_i y_i + (\gamma_i^2 - 1)z_i] \end{pmatrix}$$

となり、この x に対し、親粒子がどのくらい離れて通過するか調べればよい。一部卒論で試みたが、議論に使える程の量の解析が済んでいない。

このように親粒子の同定に関しては、先行のJACEEとくらべ、具体的な走査範囲などが明かになっている面はあるが、量的な評価の困難は克服されていない。

しかし、親粒子の電荷はトラックの原子核乾板上のTV画像を解析し、サブ鉄、鉄の分離を行い、伝播の議論に必要な、サブ鉄-鉄比の測定を行っている。次のグラフに示されているように、誤差棒は大きいが高いエネルギーでの測定なので、モデルの区別には有効である。実際、低エネルギーからの延長で、比がどんどん小さくなるのではなく、減り方が小さくなっている傾向が見える。この傾向は、宇宙線の異方性が見えないという観測事実と一致するものである。

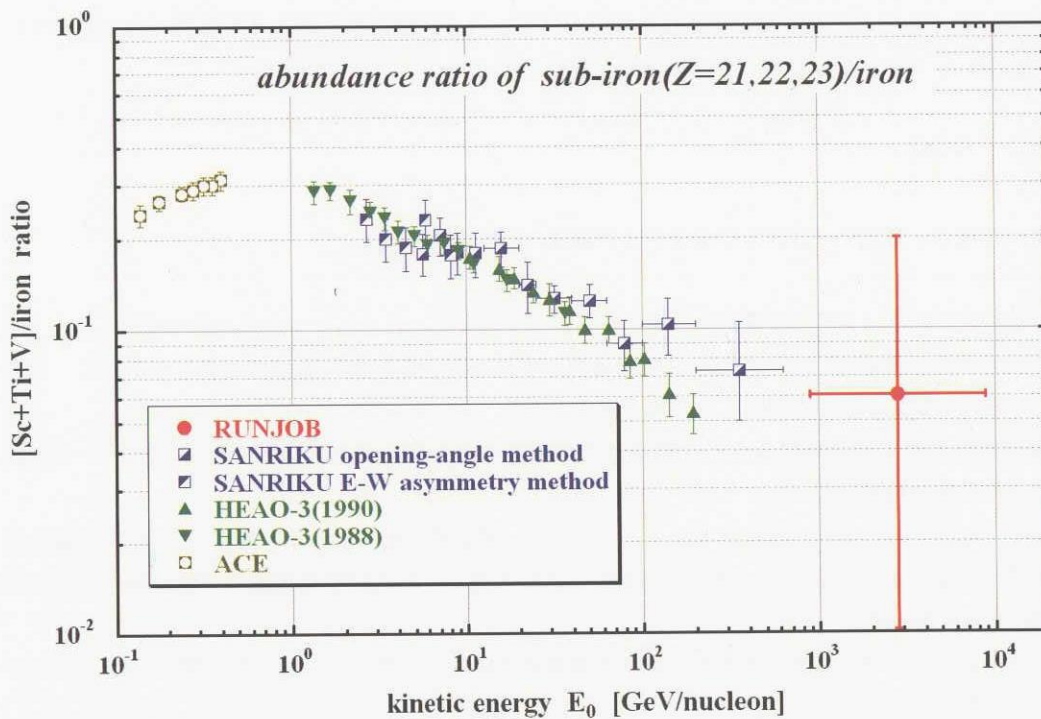


図7 RUNJOBのsub-Fe/Fe比

6. 輸送

チェンバーの組み立ては日本で行ったので、それをカムチャツカにある気球放球基地まで輸送する必要がある。ロシアと日本の間の輸送路が安定していないため、その年ごとに最適の手段で輸送を行った。

ロシアでの通関は、たいそう面倒なことで、そのたび毎にロシア側の多大な労力を必要とした。

以下に年毎の輸送の経過を簡単に示す。

1995年

気球キャンペーンの経過を以下に示す。

表3 経過

5月24日	チェンバー作成終了
6月8日	チェンバーをハバロフスクへ空路発送
6月29日	気球チームがハバロフスクでチェンバーをピックアップ
7月15日	RUNJOB1 放球
7月19日	RUNJOB2 放球
7月24日	RUNJOB1 回収
7月31日	RUNJOB2 回収
8月8日	手荷物で乾板を持ち帰る
8月9-10日	宇宙線研で現像

気球チームがハバロフスクでピックアップしてカムチャツカの基地へ向かう。ハバロフスクで、気球チームが到着するまで、チェンバーをとっておく条件を知らせておいたが、実際にどのような条件で保存されていたかわからない。しかし、エマルジョンのトラブルは無かった。

1996年

ハバロフスクへ空輸。

1997年

モスクワへ空輸し、気球チームがカムチャツカの基地へ運んだ。

1999年

横浜からウラジオストックへ船で輸送し、そこからロシア側がさらにカムチャツカで船で輸送した。

いろいろのルートで輸送を行ったのは、日本と極東ロシアへの空路の中に廃止になるものが多く、同じルートが使えず、その時の最良のものを利用したためである。

ロシア側の通関の努力は非常に大きく、協定書や使用目的の説明文書など書類などでサポートしたが、その時々で異なった対応が必要になった。

露出後のチェンバーは、キャリアオン・ラゲッジとして、研究者が運んだ。この時も、空港でのX線検査を避けるための交渉が大変なものであった。書類は用意しておいたが、それだけでは担当の係官が納得せず、その場での交渉が避けられなかった。

またアルゴスは、COCOMに引っかかる。これも書類の準備でクリアしたが、これに関しては、ISASからの指示が貴重であった。

しかし、輸送毎にあらたな問題が起こり、必要以上にエネルギーを消耗したという印象を持っている。

7. ロシアとの共同研究について

この共同研究を始めるに当たり、「よくロシアとやる気になったね」という類の感想をいただいたが、これまで共同研究を行って来た感想を述べれば、特にロシアとの共同研究が大変であるということはない。

ただ、経済的な面や役割の担い方として含めて、共同研究のメンバーとしての独立性を持ってくれたら、という印象は持っている。解析に必要なシミュレーションなどで、各々独自にやればとても意味があるが、ある部分は共通のものを使わざるを得ない（一方が他方から借りる）ようなことがあっては、価値が下がる。

しかし、共同研究をこの段階で打ち切ったのは、継続に意味が無くなったからである。チェンバーに含まれたデータを最大限活用するために、今暫く解析の共同研究は続く。

参 考 文 献

RUNJOBの結果などについては宇宙線の国際会議やそこに引用されているジャーナルへの投稿論文を参照して頂きたい。

技術的な細かい点をなるべく論文にかくようにしてきたが、ページの制約などから除いた部分もある。そして、時間がたつとともに忘れていくことも多いが、その点、この共同実験から生まれた博士論文は記録としても重要である。日本側の博士論文をあげておく。

上岡英史「高エネルギー銀河宇宙線の組成とエネルギースペクトルの研究」青山学院 1997

晴山慎「日ロ共同気球実験による高エネルギー銀河宇宙線の観測」青山学院 2003