

固体飛跡検出器とX線フィルムによる 一次宇宙線中の超重核の測定*

道家忠義**・林孝義**・伊藤謙哉†・柳町朋樹†
小林繁†・久野慶三†・永田勝明††・宮島光弘#

1. はじめに

一次宇宙線中での $Z = 26$ 以上の核電荷をもつ“超重核”のエネルギー分布や核電荷分布の測定は、宇宙線の起源、伝播、寿命についての貴重な情報を我々に提供してくれる。この種の測定は、数年前から主として California University の Price を中心としたグループ [1] と Washington University の Blanford らのグループ [2] とによって大面積の固体飛跡検出器を用いてなされている。

日本でのこの種の測定においては、入射粒子はすべて相対論的速度領域にあるので粒子のエネルギーを知らなくても核電荷が決定できるという利点があり [3]、アメリカでの測定結果と我々の結果とを合わせることによって明確なエネルギー分布を決定するということを考慮し、我々は 1971 年の予備実験以来 1973 年、1976 年の本実験と進めてきた。ここでは特に、1976 年 5 月東京大学宇宙航空研究所の三陸大気球観測所より飛翔され回収に成功した気球飛翔実験について詳しく述べるとともに、1973 年度の実験結果を合わせて考慮したい。

なお、今回の実験では $Z = 41$ 以上と予想される 5 個の event を cellulose nitrate film で検出し、そのうち 2 個の event を X 線フィルムで検出することができた。現在解析途中であるがこの結果から予想される flux についても報告したい。

2. 観測器と気球飛翔の過程

2.1. 超重核検出器

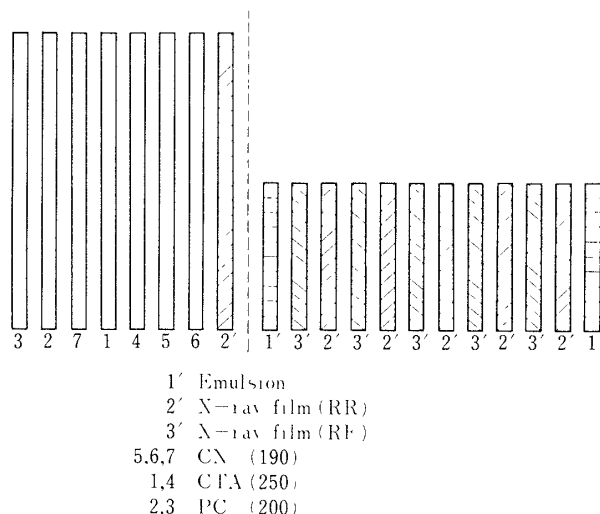
今回の観測に用いた検出器としては、超重核検出用に cellulose nitrate, cellulose triacetate, polycarbonate の 3 種のプラスチック・フィルムと特に軽量化された X 線フィルムを使用し、他に Fe グループの flux の判定と X 線フィルムの較正のために少量の原子核乾板を使用した。以上の検出器の構成を第 1 図に示す。これらは原子核乾板を除きその面積はいずれも $40\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ に規格されている。

このプラスチック・フィルムのうち cellulose nitrate (Daicel) は、厚さ約 $190\text{ }\mu\text{m}$ で、相

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 早大理工学研究所 † 立教大理学部

†† 玉川大工学部 † # 高エネルギー物理学研究所



第1図 1976年度の実験における検出器の構成

対論的速度領域にある $Z > 35$ の核電荷をもつ重荷電粒子の位置検出用に使用される。そして、エッチングの際に生成されるバックグラウンド・ホールと飛跡とを区別するため pair で使用し、容易に飛跡の coincidence が確認されるようになっている。また残りのもう1枚の cellulose nitrate は、超重核による飛跡のエッチ・ピットの成長速度を測定することにより、相対論的速度領域にある $35 < Z < 60$ の重荷電粒子の核電荷弁別に使用される。以上の cellulose nitrate film は、エッチングによるバックグラウンド・ホールの増加を抑えるために飛翔前に真空槽内 (~ 1 mmHg) に4時間放置しその後 80°C の大気中に30分間放置するという特別な熱処理がなされている [4]。この処理は核電荷弁別の際の障害とはならない。

cellulose triacetate (Fujii) は、厚さ約 $250 \mu\text{m}$ で、cellulose nitrate と同様の方法で相対論的速度領域にある $Z > 45$ の重荷電粒子の核電荷弁別に使用される。polycarbonate (Teijin) は、厚さ約 $200 \mu\text{m}$ で、相対論的速度領域にある $Z > 60$ の重荷電粒子の核電荷弁別に使用されている。

一方、X線フィルムとしては、軽量化のために特別に $100 \mu\text{m}$ 厚の mylar film を乳剤の基板とし、両面に $30 \mu\text{m}$ 程度の乳剤を塗付した特製のX線フィルムを使用した。このX線フィルム (Sakura, RR-type) は、相対論的速度領域にある $35 > Z > 15$ の重荷電粒子に対しても一応の検出感度を有するのみならず、 $Z > 35$ の重荷電粒子に対してその検出効率ほぼ 100% と期待される [5]。従ってこのようなX線フィルムの搭載は、比較的軽い超重核に対する情報を我々にもたらすと同時に、それから得られる重い超重核に対する固体飛跡検出器からのよきチェックの資料としての役割を果たすことになる。

以上のようなフィルムは第1図の左側のように並べられ、そのユニットは防水兼遮光用の袋 (肉厚 $14.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 外寸法 $53.5 \text{ cm} \times 44.0 \text{ cm}$) に真空包装された。さらにこの袋を厚さ

0.5 cmの発泡スチロールの板に3ユニットずつ硝子テープで固定し、全部で252ユニットを搭載し、その総面積は50.4 m²であった。なお、この発泡スチロールの板は、回収時には海上で浮きとして働き、また後述する検出器の折畳み操作を容易にする。

この他、主としてFeグループのflux決定のために20 cm×25 cmの面積をもつ乳剤の厚さ400 μmの原子核乾板(Fuji, ET-7B)が使用された。第1図の右側のブロックはその原子核乾板のスタックを示す。そのスタックには同時にRF-typeのX線フィルムも挿入しており、この両者のフィルムの感度の違いの確認と、これらのX線フィルムの較正がなされる。以上のような原子核乾板のスタックは4ユニット作られ、防水兼遮光用の袋に真空包装され、正規のプラスチックフィルム+X線フィルムのスタックとともに気球に搭載された。

2.2 気球搭載機器の機構

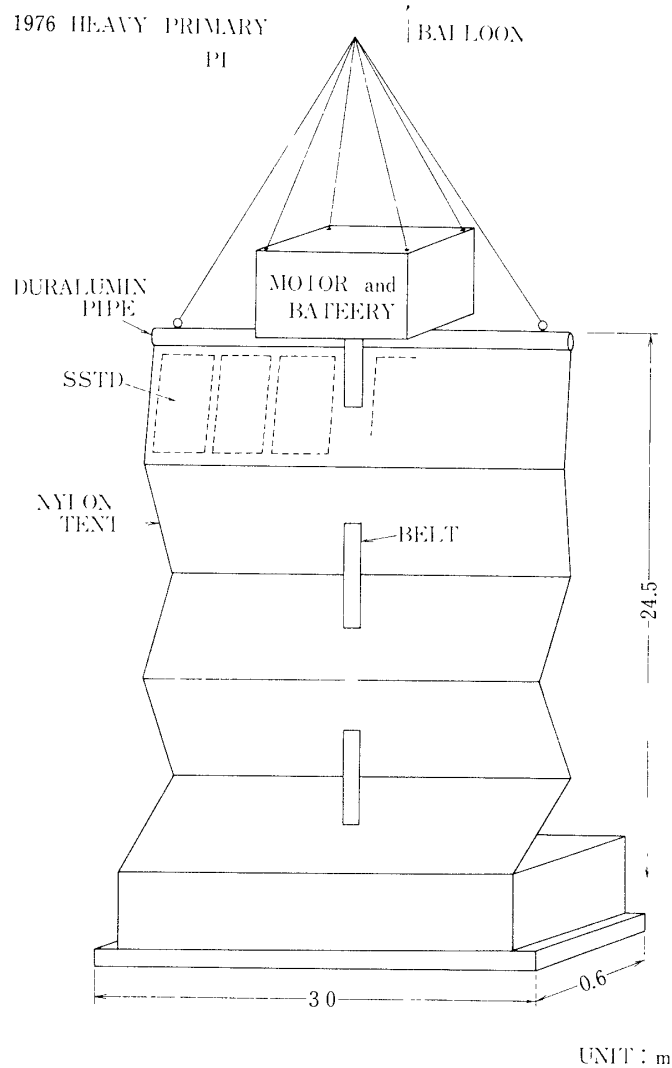
以上のような大面積の観測器を気球で高空に飛翔させる際に、上昇、下降時にはコンパクトに折畳まれ、水平飛行時には検出器がいっぱい開いているという機構が気球飛翔技術上必要とされる。またこのことは、検出粒子が気球の上昇下降時に検出されたものか、水平飛行時に検出されたものかを区別することができるという点で重要である。実際、我々は、検出器を地表に対して垂直に置く方が水平に置くより有利と判断し[3]、また、検出器の折畳み操作をより完全なものにするため、1973年度の飛翔実験に使用した“ORIRO”なる緩降機[3]を採用せず、今回はモーターをギヤ・ダウンして開閉を行った[3]。この原理図を第2図に示す。

2.3 気球飛翔の経過

以上の超重核観測器を搭載した気球は、1976年5月22日18時22分(JST)東京大学宇宙航空研究所の三陸大気球観測所から飛翔され、太平洋上東345 km、高度31 km付近で水平飛行に入り、23時0分観測用の垂れ幕を開くよう信号を送った。しかし、その際は23段(28.0 m²)までしか開けず、残り(22.4 m²)はそれから5時間後(5月23日4時0分)に開いた。(テレメータ信号は送って来なかったが、解析の結果、垂れ幕の最下段付近のスタックからeventが検出されていることにより、また、検出個数から全面積開いたことを確認した)その後観測を継続し、5月24日1時30分に垂れ幕を閉じ、2時14分に気球と観測器を切り離し秋田沖の日本海上に落下させた。落下時は真夜中であったが、ラジオブイが正常に働き、また、秋田海上保安庁の御好意によって同日正午頃観測器をほぼ完璧に回収することができた。ただ、秋田港への曳航の際、23スタックを海中へ流失している。第3図に、三陸から日本海までの気球の航跡を、第4図に、それに対応する高度曲線を示す。また第1表は以上の飛翔記録をまとめたものである。この実験における全有効検出面積×観測時間の値は968.0 m²・hrで、1回の飛翔で得られた値としては、前回は上まわりこれまでの最大の値である。

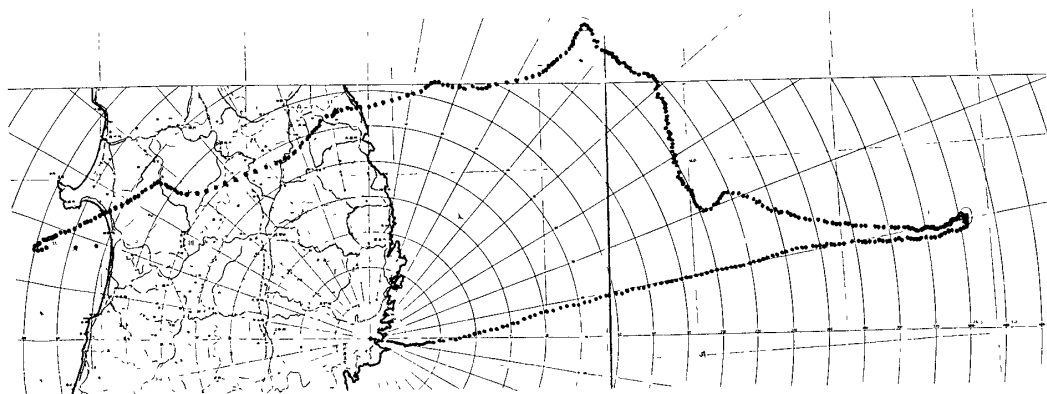
3. 固体飛跡検出器の較正

プラスチックフィルムへ入射する相対論的速度領域にある重荷電粒子の核電荷を決定するには、あらかじめそのフィルムに、核電荷とエネルギーのわかっている粒子を照射して較正を行ない、粒子の飛跡のエッチング速度と相対論的速度領域の重荷電粒子の核電荷の関係を知らなければならない。そこで我々は、米国のBevalacで400 MeV/nのAr⁴⁰イオンを飛

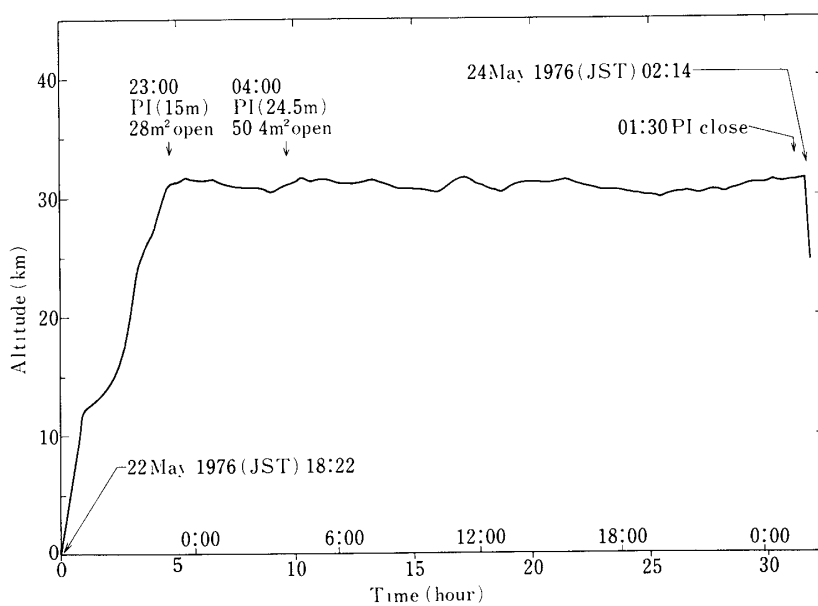


第2図 搭載観測器の開閉機構

翔されたものと同一の cellulose nitrate と cellulose triacetate に照射した。このエネルギーの Ar^{40} は数百枚のフィルムスタック内で完全に止まるので、各々のフィルムを一定条件の下でエッチングし、各フィルム毎にエッチピットの長さを測定すれば、残留飛程と飛跡のエッチング速度の関係が得られる。この関係からただちに相対論的速度領域の核電荷とエッチング速度の関係が得られる [6] こうして得られた cellulose nitrate と cellulose triacetate における以上の関係を第5, 6, 7, 8図に示す。エッチング条件は、それぞれ $30^{\circ}C$, 6.7 規定 NaOH 溶液と $45^{\circ}C$, 6.7 規定 NaOH 溶液である。第7図, 第8図に見られるように、今

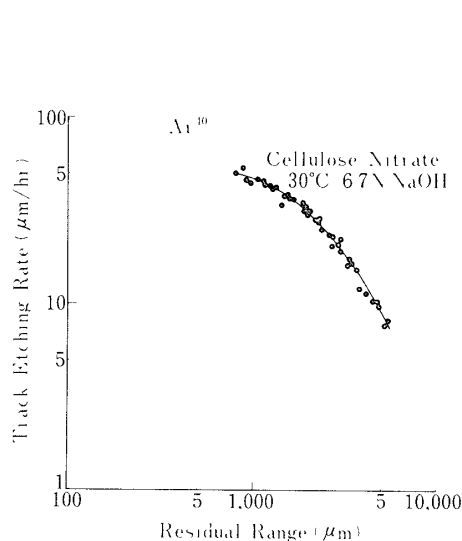


第3図 気球の飛翔経路

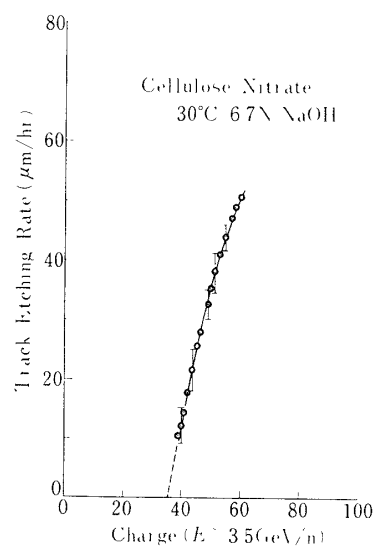


第4図 気球の飛翔曲線

回使用した cellulose triacetate はフィルムの両面で感度特性が異なっており、その原因はまだ明らかになっていない。そのため一方の面（ここでは表面）の特性を用いて核電荷の決定を行なった。このようにして得られた核電荷決定精度は、フィルムによるバラツキも考慮して $Z=50$ 付近で ± 2 程度であった。polycarbonate については、照射したイオンが $2 \text{ GeV}/n$ の He^{56} であったためスタック内で止まらず、この方法では較正曲線が得られなかったの
で以前の結果を用いた。



第5図 cellulose nitrate における
Ar⁴⁰ イオンによる残留飛程と飛
跡のエッチング速度の関係



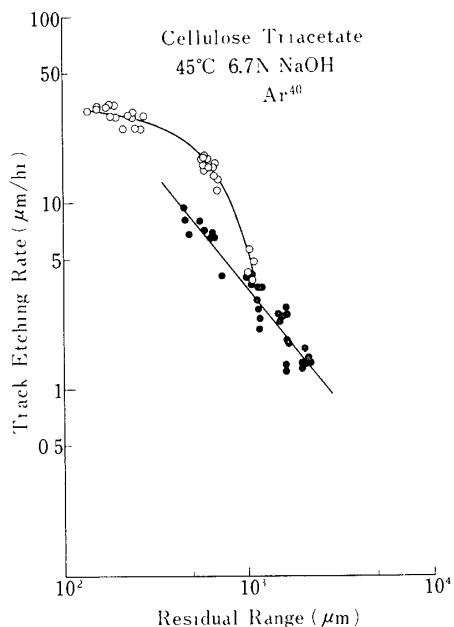
第6図 cellulose nitrate における
核電荷と飛跡のエッチング速
度の関係

第1表 1976年度の実験における飛行記録

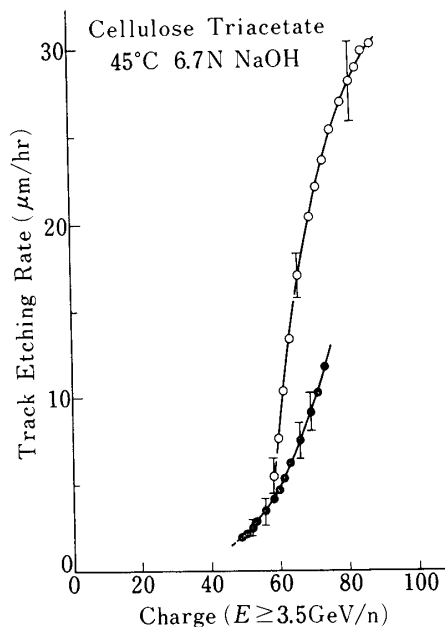
B₅₀-13 (1976) BALLOON FLIGHT DATA

Launch Place	Sanriku, Iwate, Japan (N 39° 09' 24", E 141° 49' 00")	
Date	18:22 5/22/1976 (JST)	
Level Flight	23:00 5/22	
PI - Open	23:5/22/1976	28.0 m ²
	4:5/23	50.4 m ²
Close	1:30 5/24	
Cut	2:14 5/24 at Japan Sea	
Recovery	Akita	
Altitude	300 - 31.8 km (Mean 31 km) 102 mb, 10.4 g/cm ²	
Exposure Time • Area	9680 m ² hr	
Cut-off Rigidity	10.3 GV (vertical)	

X線フィルムの校正は原子核乾板スタックを用いて行われているが現在解析中であり近いうちに結果が得られる予定である。



第7図 cellulose triacetate における Ar^{40} イオンによる残留飛程と飛跡のエッチング速度の関係。●表面 ○裏面



第8図 cellulose triacetate における核電荷と飛跡のエッチング速度の関係。●表面 ○裏面

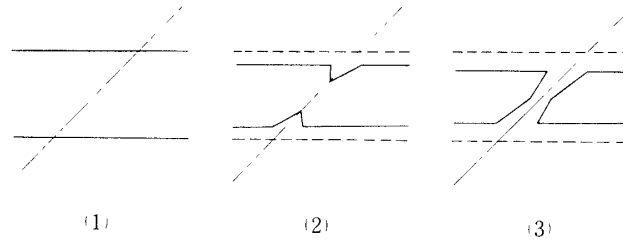
4. 固体飛跡検出器の解析と経過

回収したプラスチックフィルムはただちに水道水で洗浄され、十分に乾燥させた後飛跡の fading を防ぐため大型冷蔵庫に納められた。X線フィルムと原子核乾板は、ただちに現像され、保管された。

4.1 位置検出器としての cellulose nitrate の解析

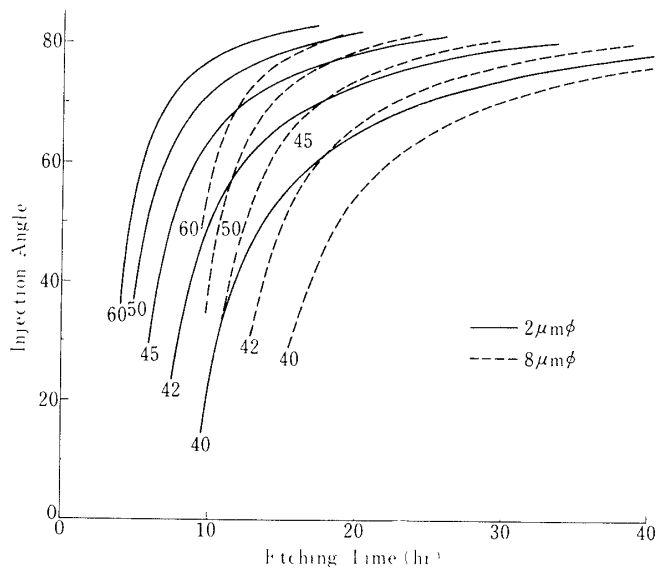
相対論的速度領域にある超重核の通過位置決定には、前論文 [3] で示したようなピンホール検出法が使用された。すなわち、超重核通過後の潜在飛跡の残されたプラスチックフィルムをNaOH溶液でエッチングすれば第9図のようにフィルムの両側からコーン状のエッチピットが成長し、ついにはそれらがつながるようになる。このようにして拡大された孔の直径がある寸法以上に達するとアンモニアガスがその孔を通過し、反対側にフィルムに密着して置かれた感光紙に触れ着色して青いスポットが記録される。このように孔がある程度の大きさに位置が確認されるまでのエッチング時間は、通過粒子の核電荷に伴う飛跡のエッチング速度とその粒子のフィルムへの入射角に依存する。この関係を示したのが第10図である。同図は第6図を引用し、核電荷をパラメータとして、横軸にエッチング時間、縦軸に入射臨界角をとり、孔の最小断面の直径が $2\ \mu\text{m}$ と $8\ \mu\text{m}$ の2つの場合について示してある。この図から、あるエッチング時間での個々の核電荷の検出効率が算出できるようになっている。今までの経験では、最小断面の直径が $8\ \mu\text{m}$ 程度であれば100%の確率で検出可能

であるが、 $2\mu\text{m}$ であっても100%に近い確率で検出可能であると思われる



第9図 飛跡位置検出用のプラスチックフィルムのエッチング過程

以上のような飛跡検出法でエッチング時間を長くとした場合、バックグラウンド・ホールが増加するという問題があるが、前述したように今回使用した cellulose nitrate film は特別な熱処理が行なわれており [4], その結果としてバックグラウンド・ホールは前回の cellulose nitrate film の約半分の個数であった。しかもスキャン不能となったフィルムはほとんどなく、この処理はかなり成功したように思われる。また今回のエッチングは、前回



第10図 cellulose nitrate のエッチング時間とアンモニア法で検出可能な超重核の入射角との関係

のように2~3時間ずつ段階的にエッチングするようなことはせず、一度に18時間エッチングするという方法をとった。このため、数回の洗浄でフィルムの表面が荒れるという状態が

避けられた。またこのことは、再エッチングの際にエッチング溶液がエッチピットの先端に到達するまでの不明な時間がなく、エッチング時間が正確に決定できる利点がある。

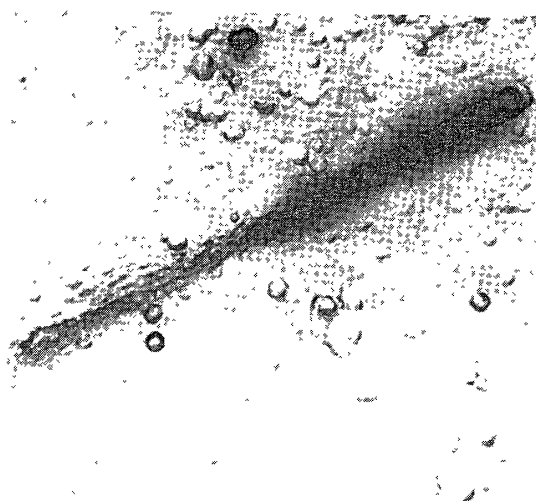
以上のようにして位置検出の pair の cellulose nitrate (No. 5, 6) が、30°C, 6.7 規定 NaOH 溶液で 18 時間エッチングされ、アンモニア法によるピンホール検出器にかけられた。第 10 図により、このエッチング時間は $Z = 41$ 以上の粒子はいずれも $0^\circ \sim 70^\circ$ までのすべての入射角において検出可能であることがわかる。そして、アンモニア法によるスポットに対応するフィルム上の場所を、実体顕微鏡で慎重に観察し、その形状が第 9 図のような飛跡によるピンホールが幾何学的なコーン状であることから粒子による飛跡であることが確かめられた。バックグラウンド・ホールはひび割状の複雑な形状をしているので飛跡によるピンホールとの区別は容易である。さらに飛跡によるピンホールは、pair のもう 1 枚の cellulose nitrate を実体顕微鏡で観察することにより、その形状、大きさ、入射方向が前のと全く同一であることが確認された。このようにして現在までに 7 個の event が検出された。これらは第 6 図、第 10 図によりいずれも $Z = 41$ 以上の核電荷をもつことが推定される。このうち 2 個の貫通した飛跡の顕微鏡写真を第 11 図に示す。

4.2 検出 event の核電荷の決定

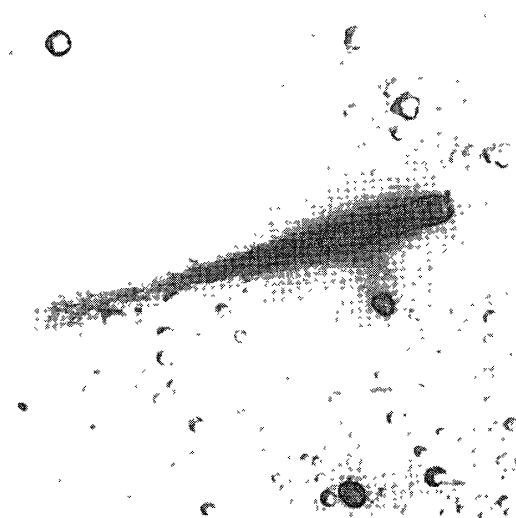
位置検出器としての cellulose nitrate で検出された粒子はいずれも相対論的速度領域にあるので(後述の effective cut-off energy 参照)プラスチックフィルム内の飛跡に沿ったエッチング速度は常に一定である。すなわち潜在飛跡の残っているプラスチックフィルムを一定条件の下で適当時間エッチングし、そのエッチピットの長さを測定すれば容易にエッチング速度が得られる。しかも、1 枚のフィルムの両側のエッチピットから 1 つの event について 2 個のデータが得られることになる。

以上のようにして、3 枚目の cellulose nitrate (No. 7) と、cellulose triacetate (No. 4) が、第 6 図、第 8 図と同一の条件でエッチングされた。各フィルム毎の coincidence における位置のずれは 1 mm 以内であるので、エッチピットは容易に光学顕微鏡で見出すことができる。第 2 表に検出された event の種々のデータを示す。番号は、event のあるスタックの番号を表わす。この表より、cellulose nitrate による核電荷の値はフィルムの両面においてよく一致してくることがわかる。ただし、13-1 と 13-2 の event は 3 枚目の cellulose nitrate では検出されなかった。この 2 つの event は入射方向の天頂角が 89° 、 82° と大きく、この角度からは、 $Z = 41$ 以上の超重核は確率的にはほとんどなく、そのためこれらの event はもっと軽い核種(例えば Fe-グループ核)が大気中で減速されたものと考えられた。すなわち、pair の cellulose nitrate を通過後、すぐ後にある cellulose triacetate 内で止まったものと予想された。その後、我々は 13-1 の event については cellulose triacetate 内で止まっていることを確認したが、13-2 の event では確認できなかった。この 13-2 の event フィルムへの入射角 α が 18° と小さく(フィルムに対してほぼ垂直)、フィルム上にある種々の穴と識別できないことが予想され、これ以上の検討は不要である。いずれにしても 2 つの event は $Z = 41$ 以上の粒子によるものではないと判断された。

番号 36 と 62 の event は cellulose triacetate では、前述したようにフィルムの両側でエッチピットの長さが大きく異なり感度の違いを示しているため、我々は、表面の値からのみ核



第11図(a) 超重核の飛跡に起因する貫通エッチ・ピットの顕微鏡写真



第11図(b) 超重核の飛跡に起因する貫通エッチ・ピットの顕微鏡写真

電荷を推定した。この値は cellulose nitrate から推定された値と一致している。他の event は cellulose triacetate では検出されなかったが、これらは核電荷が、cellulose triacetate の threshold に近いため、あるいはそれ以下であるため、エッチピットを形成しなかったものと思われる。

また、X線フィルムにおいても同時に検出 event の確認がなされたが、包装した袋の遮光

第2表 検出された event の種々の測定結果

event の番号	フィルム への 入射角 (α)	入射方向の 天頂角(θ)	cellulose nitrate		cellulose triacetate	
			エッチング速度 ($\mu\text{m/hr}$)	核電荷 (± 2)	エッチング速度 ($\mu\text{m/hr}$)	核電荷 (± 2)
13 - 1	50°	89°	—	—	フィルム内 で止まる	—
13 - 2	18°	82°	—	—	?	—
23	63°	27°	24.8	44.5	—	—
			24.6	44.5		
36	52°	50°	26.8	45	1.49	46
			29.0	46		
62	38°	54°	28.4	46	1.83	48
			30.5	47		
208	53°	57°	15.7	41	—	—
			18.1	42		
235	38°	52°	12.1	40	—	—
			12.0	40		

が不完全であったため大部分の面積が感光してしまい、確認された event は番号が36と208のもののみであった。このX線フィルム上の飛跡からの核電荷の推定は、フィルムの較正が終わり次第行なわれる予定である。

結局、現在までの84%の面積の解析においては、 $Z = 41$ 以上の超重核($Z = 40$ と決定されたものを含む)が5個検出されたことになる。

5. 解析結果に基づく flux の推定と他のデータとの比較

5.1 三陸上空の地磁気による effective cut-off energy の決定

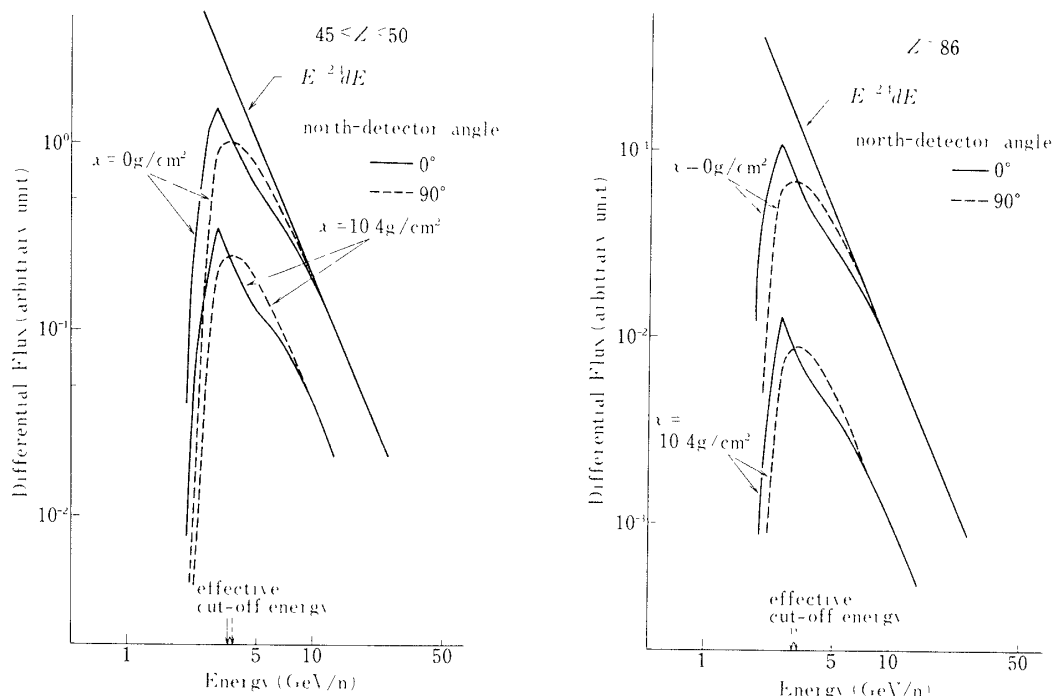
今までの結果から flux を推定する場合、何らかの方法でエネルギーに対する情報を得なければならない。前論文[3]でも示したように、日本での実験においては、粒子のエネルギーを知らなくても核電荷を決定するという利点をもっているが、粒子のエネルギーは別の方法で決めなければならない。そこで我々は、三陸上空の effective cut-off energy というものを計算し、検出される粒子はすべてこのエネルギー以上を有しているという積分 flux を推定した。

まず、三陸上空の effective cut-off energy の決定法について述べる。三陸上空の地磁気分布から粒子の入射方向による cut-off Rigidity を理化学研究所の和田雅美氏の御好意により計算して戴き、三陸上空の cut-off Rigidity 分布を作成した。この“filter”に、無限遠で等方的な、あるエネルギー分布をもった粒子を入射させると地磁気通過後のエネルギー分布が得られる。便宜上この分布を大気頂上でのエネルギー分布とした。これと無限遠でのエネルギ

一分布の比較によって effective cut-off energy が求まる。すなわち、無限遠でこの effective cut-off energy 以上の粒子の個数は、大気頂上での全エネルギーにわたる粒子の個数と等しい。我々は、無限遠でのエネルギー分布をすべての核種に対して巾指数（微分型）を 2.4 (Fe 核と同じ) と仮定し (effective cut-off energy はこの値に大きく影響されない)、計算を行なった。第12図に $45 \leq Z \leq 50, Z \geq 86$ の核種に対しての計算結果を示す。この図の分布から入射粒子はすべて相対論的速度領域にあることがわかる。核種の Rigidity 効果の違いや検出器の向きによって、effective cut-off energy は多少異なり、また太平洋上、日本海上では Rigidity 分布も多少異なるが、計算上の誤差を含めて我々の結果では effective cut-off energy は 3.5 ± 0.5 GeV/n であった。

5.2 原子核乾板による Fe 核の flux の測定

ここで述べる Fe の flux は、X線フィルム校正用に用いられた 25 cm^2 の $400 \mu\text{m}$ 厚の原子核乾板 (Fuji, ET-7B) から求めたものである。我々は、超重核の核種決定用の X線フィルムの校正を、同時に飛翔した原子核乾板と X線フィルムとからなるスタックで検出した Fe 以下の核種を用いて行った。この過程で、原子核乾板中に飛跡を形成した核種の核電荷の、その飛跡に沿った δ 線の密度との対応をつけておかねばならない。このために、原子核乾板からとり出した飛跡の δ 線の密度の頻度分布と、現在まで知られている一次宇宙線の特徴ある核種分布とを、 δ 線の密度が核電荷の 2 乗に比例するものとして対応づけを行った。



第12図 地磁気効果による一次宇宙線のエネルギー分布の変化。χは大気の深さを示す。
(a) $45 \leq Z \leq 50$ (b) $Z \geq 86$

このために用いられたのが、この項のはじめに述べた 25 cm^2 であり、そこからとり出した飛跡の総数は266本であった。これらの飛跡の δ 線を計数し、上述の方法で較正された。一次宇宙線の核種分布を第13図に示す。図は入射粒子の天頂角で分類してある。Feのfluxは、この核種分布で核電荷が25~26と示されたものから求めた。

大気頂上での値は、Feの大気中の原子核との衝突における自由行程を 14 g/cm^2 とし、より重い核種からの寄与はないものとして計算した。その際、入射天頂角 70° までのを用いたが、得られた結果は、天頂角が $40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ までのものはそれぞれ同じ値を示した。こうして得られたFeのfluxは、 $(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-1} / \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$ であった(第16図)。この値は今までに知られている値とよく一致している。このことは我々が超重核のfluxを求める際に使用した、観測時間の推定値が適当であることを示している。

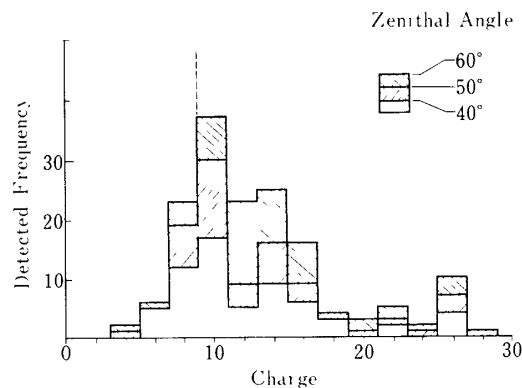
5.3 三陸上空での積分fluxの推定と他のデータとの比較

検出された粒子の個数から大気頂上におけるfluxを求める場合、気球上層大気における一次宇宙線の衝突によるfluxの変化や、それによる核電荷分布の変化を考慮しなければならない。我々は、計算を簡単にするため、まず、一次宇宙線の核電荷分布としてBlanfordらの 1 GeV/n における積分fluxの値[2]を巾指数1.4で 3.5 GeV/n の積分flux $I_1(0)$ として外挿し、それが検出高度でいかなるfluxになるかを推定し、予想される検出event数を計算した。その際のfragmentation parameter P_j としてBlanfordらが採用したTurnerの値[2]をそのまま使用した。これらを用いて予想される核種 i の検出event数 N_i は次式で計算される。

$$I_1(x) = I_1(0) \exp(-x/\lambda_1) + \sum_{j \geq 1} (P_j/\lambda_j) \times I_j(0) \int_0^x \exp(-t/\lambda_j) \times \exp(-(x-t)/\lambda_1) dt$$

$$N_i = 4 \times S \cdot T \int_0^{\pi/2} \int_0^\alpha \cos \alpha \cdot \sin \alpha \times I_1(x/\cos \theta) d\alpha d\beta$$

$$\text{ただし } \sin \alpha \cdot \cos \beta = \cos \theta$$



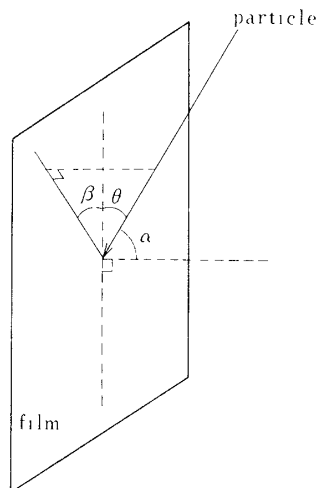
第13図 原子核乾板スタックによる $Z = 30$ 以下の核種分布

ここで λ_1, λ_2 は大気中の原子核との衝突に対する自由行程 [2], x は大気の深さ, α, β, θ は第14図に示される角度を表わす. フィルムに対する入射角 α はピンホール検出法の限界を考慮して 70° までとした. $S \cdot T$ は有効検出面積 \times 時間である.

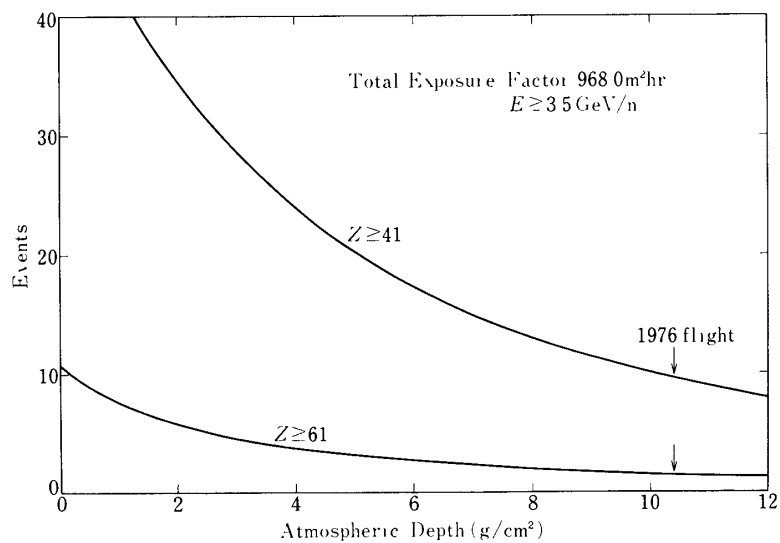
以上の計算から大気の深さの変化によって予想される検出 event 数を $Z = 41$ 以上, $Z = 61$ 以上について第15図に示す. これから今回の実験における大気の深さ 10.4 g/cm^2 での予想される検出 event 数は, $Z = 41$ 以上で 9.5 個, $Z = 45$ 以上で 8.3 個, $Z = 61$ 以上で 1.4 個であった. この値と実際に検出された event 数の比によって大気頂上での flux が求まる.

現在までの解析は約 84% が終わっていて, その有効検出面積 \times 時間の値は $812.5 \text{ m}^2 \text{ hr}$ である. この値から予想される検出 event 数は, $Z = 41$ 以上で 8.0 個, $Z = 45$ 以上で 7.0 個, $Z = 61$ 以上で 1.2 個である. 従って今回検出された 5 個の event から $Z = 41$ 以上 ($Z = 40$ と推定されたものを含む) の核種における 3.5 GeV/n での積分 flux の値は大気頂上で $3.86 \times 10^{-6} / \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$ と推定された. また $Z = 61$ 以上の核種は検出されなかったので 3.5 GeV/n での積分 flux の upper limit として $9.3 \times 10^{-7} / \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$ という値を得た.

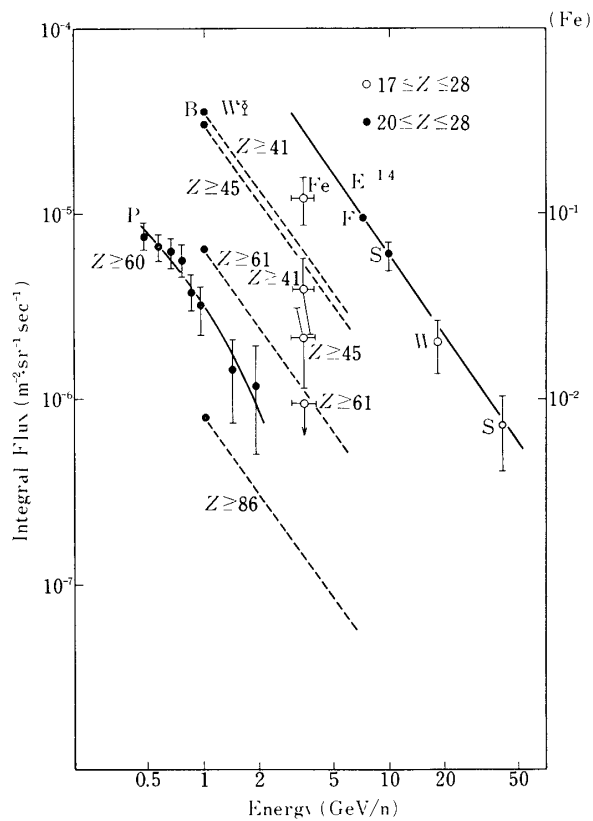
また, 1973 年度の実験ではフィルムの threshold が $Z = 45$ であり, その結果 2 個の event を検出したが [3], これと今回の $Z = 45$ 以上の 3 個 ($Z = 44.5$ と推定されたものを含む) とを合わせて, 3.5 GeV/n での積分 flux を求めると, 大気頂上での $2.1 \times 10^{-6} / \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$ と推定された. 第16図は, Blanford らの 1 GeV/n における積分 flux [2], Price らの $Z = 60$ 以上の 1 GeV/n 付近の積分エネルギー分布と今回我々が得た積分 flux の値を示す. この図で破線で示された直線は Blanford らの測定点を通る巾指数 1.4 ($20 \leq Z \leq 28$ に対する巾指数と同じ) の直線を示す. 我々の測定結果では超重核に対するエネルギー分布が Price らの指摘するように [7], エネルギーとともに急激な減少 (巾指数 3.5) を示さず,



第14図 入射粒子の検出に対する種々の角度の設定



第15図 1976年度の実験における大気の高さと予想される検出 event 数の関係



第16図 一次宇宙線中の超重核 flux のエネルギー分布。
3.5 GeV/n における測定点が我々の結果である。

むしろ Fe グループと同様中指数 1.4 の直線に接近しているように思われる。しかも、我々の解析ではスキッピング loss ということも考慮しなければならず（例えば、可能性は少ないが、位置検出用の pair の cellulose nitrate の両方においてひび割れの部分を粒子が通過している場合）、このことは我々の得た積分 flux はむしろ lower limit として考えるべきものであろう。そして我々の結果が正しいとすれば、Price らの指摘は、 $Z = 41$ 以上と $Z = 60$ 以上の核種において、その起源、加速機構、伝播、寿命等に何らかの物理的な違いが存在するというを示している。いずれにしても、さらに豊富なデータが得られれば、詳しい議論も可能であろう。

最後にこの研究にあたりいろいろ御協力戴いた東大宇宙航空研究所の西村純氏並びに同研究室の方々、理化学研究所の和田雅美氏、東京大学宇宙線研究所の斉藤威氏ならびに所員の方々、および立教大学理学部宇宙線研究室の方々に感謝の意を表します。

1977年6月10日

参 考 文 献

- [1] P.B. Price, P. H. Fowler, J. M. Kidd, E. J. Kobetich, R. L. Fleischer and G. E. Nichols : Phys. Rev. D3, 815 (1971)
- [2] G. E. Blanford, Jr., M. W. Friedlander, J. Klarmann, S. S. Pomeroy, R. M. Walker, J. P. Wefel, P. H. Fowler, J. M. Kidd, E. J. Kobetich, R. T. Mosses and R. T. Thorne : Phys. Rev D8, 1707 (1973)
G. E. Blanford, Jr., M. W. Friedlander, J. Klarmann, R. M. Walker and J. P. Wefel : Phys. Rev D8, 1722 (1973)
- [3] 道家, 岡本, 紫村, 林, 伊藤, 柳町, 小林, 永田, 宮島, 斉藤, : 宇宙航空研究所報告, 11,497 (1975)
- [4] 林, 柳町, 小林, 道家 : 応用物理, 46, 202 (1977)
- [5] 道家, 岡本, 紫村, 伊藤, 柳町, 宮島, 遠藤, 斉藤, 永田 : 宇宙航空研究所報告, 9, 273 (1973)
- [6] R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker : Nuclear Tracks in Solids (1975) University of California Press
- [7] E. K. Shirk, P. B. Price, E. J. Kobetich and R. D. Eandi : Phys. Rev. Lett. 31, 127 (1973)