

宇宙線, 放射線帯

近藤 一郎*

Cosmic Rays and Radiation Belts

By
Ichiro KONDO

Abstract: Based on the observations in the space, recent results of the research on the following problems are reviewed.

- (1) Accelerations of the charged particles on the sun, and their propagation and diffusion mechanisms through the interplanetary space.
- (2) Problems relating to the origin of galactic cosmic rays
- (3) Modulation of cosmic-ray particles by the interplanetary plasma and its magnetic field.
- (4) Structure of the radiation belts, the origin and the acceleration mechanisms of the trapped particles.

Several questions yet to be solved are also reviewed and some future experiments are proposed.

Difficulties arising from the position of the radiation belts over Japan for the study of the radiation belts by sounding rockets are shown. It is also emphasized that the study of the charged particles in the space under the inner belts can yield important informations regarding the decay and the growth of the inner belt.

Proposal for the experiments to be made on Japanese scientific satellites under planning are made.

概 要

宇宙線ならびに放射線帯についての研究は、科学観測ロケット、科学衛星の発達に伴って急速に進展した。

これらの観測手段による宇宙空間における観測成果に基づいて、(1)太陽における高速荷電粒子の加速とその惑星間空間での伝ばん拡散機構、(2)銀河系から到達する宇宙線粒子の起源に関する問題、(3)宇宙線粒子が惑星間空間磁場、プラズマ等によって受ける影響、(4)放射線帯の構造、粒子の生因、加速機構などについての研究について主として最近の成果を述べる。これらの成果に基づいて今後解決すべき問題点をいくつかあげる。

さらに日本における観測ロケットによる研究、とくに放射帯の研究について、日本の地理的位置からくるいろいろな困難について述べ、これを利用して研究すべき点について言及する。そして今後日本において計画される科学衛星による宇宙線、放射線帯の研究についてどんな項目をとりあげるべきかいくつかの提案をする。

* 名古屋大学理学部

1. は し が き

宇宙線の研究の進展に伴って大気の頂上付近ならびに大気圏外での観測の必要性は1950年頃より急激に増加した。大気中での電離によるエネルギー損失、核衝突による変換、減衰等を避けるためには大気圏外での実験は不可欠である。とくに比較的簡単な測定器によっても成果が収められることもあってロケット、人工衛星による観測が始められると第一に宇宙線の実験がとりあげられた。1950年代の始から V-2, Aerobee などのロケット、ロックーンなどを用いての大気圏外での観測では、大気中の実験結果から予想されていたようにほぼ一定の強度が高さ 100~200 km で観測された。しかしときによると予想外に大きな強度が観測されることがあり、太陽からの宇宙線発生と関連して議論されたが、その後の研究によってこれが放射線帯に関連したものであることが判明した。

1957年11月 Sputnik I が初めての人工衛星として宇宙空間を廻り始め、次いで Explorer I が軌道にのり、これらの人工衛星に搭載されたガイガー計数管は、宇宙線強度よりはるかに大きい強度を記録した。その後次々に軌道にのった人工衛星によって放射線帯の存在は確実なものとなり、その構造、Trapped particles のエネルギー分布、時間変化等が詳しく調べられた。低エネルギーの陽子を主成分とする内帯、高速電子を主体とする外帯の形態が明らかにされるとともに、その成因についても多くの理論的研究が行なわれた。さらに数年前より放射線帯の外縁である Magneto sheath, Magneto pause, Magnetic tail の研究が行なわれこのような Transition 領域での粒子の加速機構が問題とされている。

このように当初宇宙線粒子を観測するために行なわれた大気圏外での観測は一転して放射線帯の研究のための観測によって代られた。そして本来の宇宙線粒子（とくに低エネルギー粒子または重い原子核）の研究は磁気圏外での観測にまたねばならなかった。1960年代に入って磁気圏外での観測を行なう Pioneer V, X, Mariner II, III のような Space probe や IMP-I, II, III, EOGO-I のような長楕円軌道の衛星が打上げられ始めて放射線帯外での宇宙線の研究が可能となった。そして太陽で発生する低エネルギー粒子、銀河系からの宇宙線の惑星間空間での振舞いなどについて多くの貴重な情報を与えている。さらに一次宇宙線を構成する原子核の荷電分布、同位元素の存在比等についての情報もより高い精度で得られつつある。

ここでは現在までに観測ロケット、人工衛星、Space probe などによって得られた各種の観測結果を survey しそこから今後とり上げるべき問題、とくに日本で計画されている観測ロケット、科学衛星観測によって期待される成果についてのべる。

2. 宇宙線の発生、加速機構に関する問題

地球に到来する高エネルギー荷電粒子 (>数十KeV) いわゆる宇宙線の起源については、

- (a) 太陽面現象にともなって太陽面ないしコロナにおいて発生し加速されたもの。
- (b) 銀河系内 とくに超新星またはその残骸がいで発生し加速され銀河系空間（銀河コロナを含む）に捕捉されているもの。
- (c) 銀河系外 他の星雲、星雲系で発生しているもの。

の三者が考えられている。

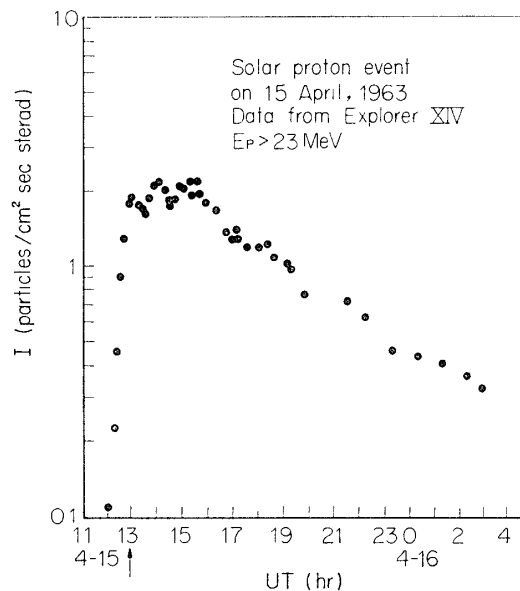
(a)の太陽面爆発にともなって加速された陽子、 α 粒子がときには 10^{10} eV ものエネルギーを得て地球に到達することはすでに地上観測等によってよく知られている。これらの粒子のエネルギー分布、陽子対 α 粒子の存在比、到来方向、強度の時間変化などは人工衛星の観測により精密になり、また低いエネルギー範囲にまで広げられた。これらの観測によって太陽での粒子加速は非常に短時間 (<数分) に行なわれ、そのエネルギー分布は指数分布であることが知られた[1]。

さらに太陽から地球までの空間で磁場による偏向、拡散を受けた粒子の振舞から惑星間磁場との相互作用について知ることができる[2][3]。磁気圏外での観測によると数十 MeV の太陽によって加速された陽子がかなり長期間惑星間空間に閉じこめられていることが明らかになった[4]。

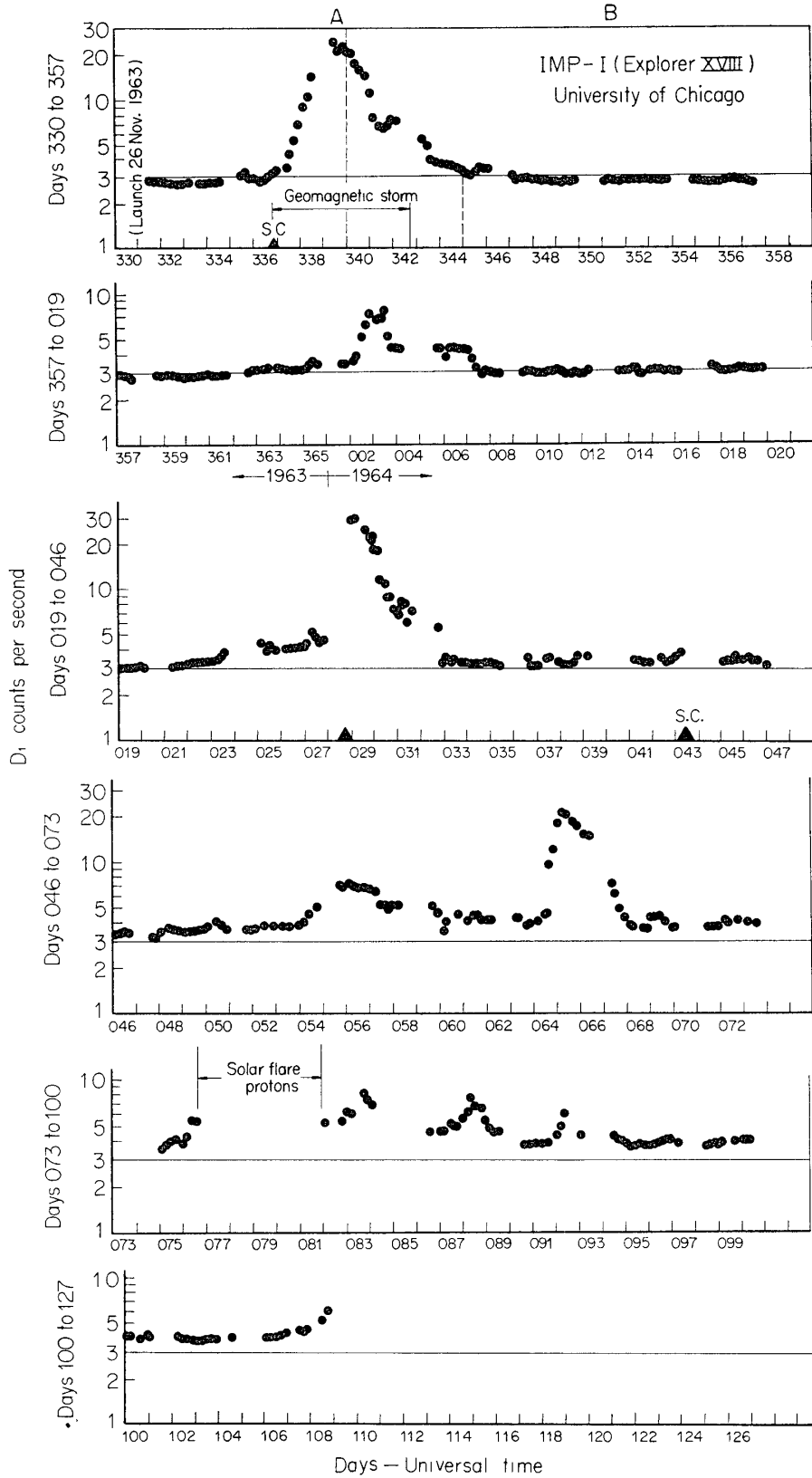
今後長楕円軌道の人工衛星などでの長期間の観測とロケット、気球などによる精密な測定との組合せでより多くの情報が得られ、これによって粒子の加速と惑星間の伝ぱんの問題についてより詳しい研究が行なわれるであろう。加速と伝ぱんの影響を分離するために太陽面で加速された陽子が光球中での水素との衝突によって生じる高速中性子の観測を行なうことが重要な役割を果たすであろう[5]。

(b)の銀河系内部において発生する宇宙線については、すでに多くのことが知られているが、現在研究に着手または進行中の問題として、

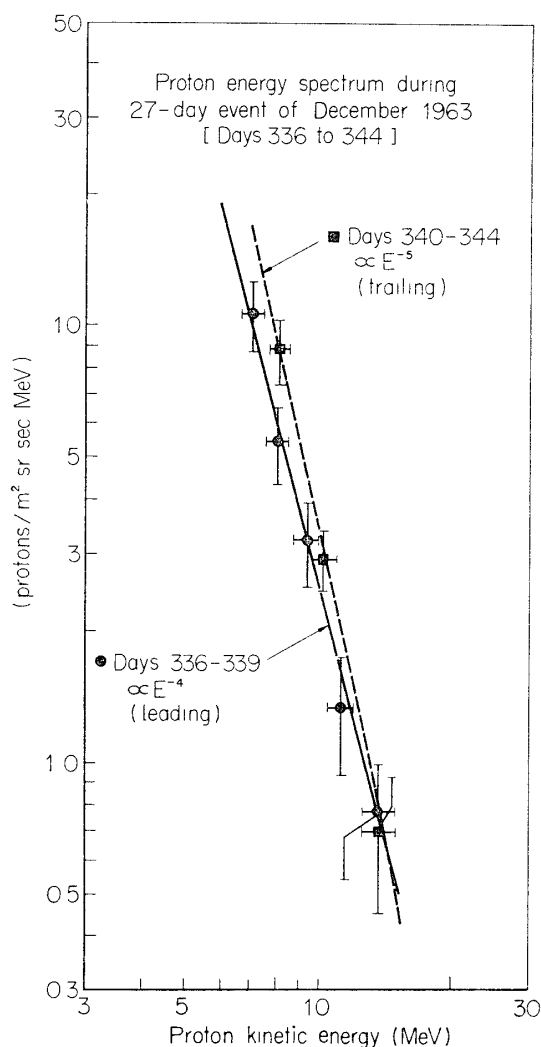
(イ) 宇宙線中の重い核の元素の存在比、宇宙線の起源が超新星およびその残がい加速されていることは宇宙線中の重い核の存在比が宇宙での平均の存在比より大きいことから推



第1図 人工衛星で観測された太陽からの陽子の時間変化(1963年4月15日)早い立上りとほぼ exponential な減衰を示し単純な拡散では説明しがたい例[3]



第2図 IMP-I によって数MeVの太陽陽子の再帰を示す
Aと示した部分は5周期に渡って再帰を示す

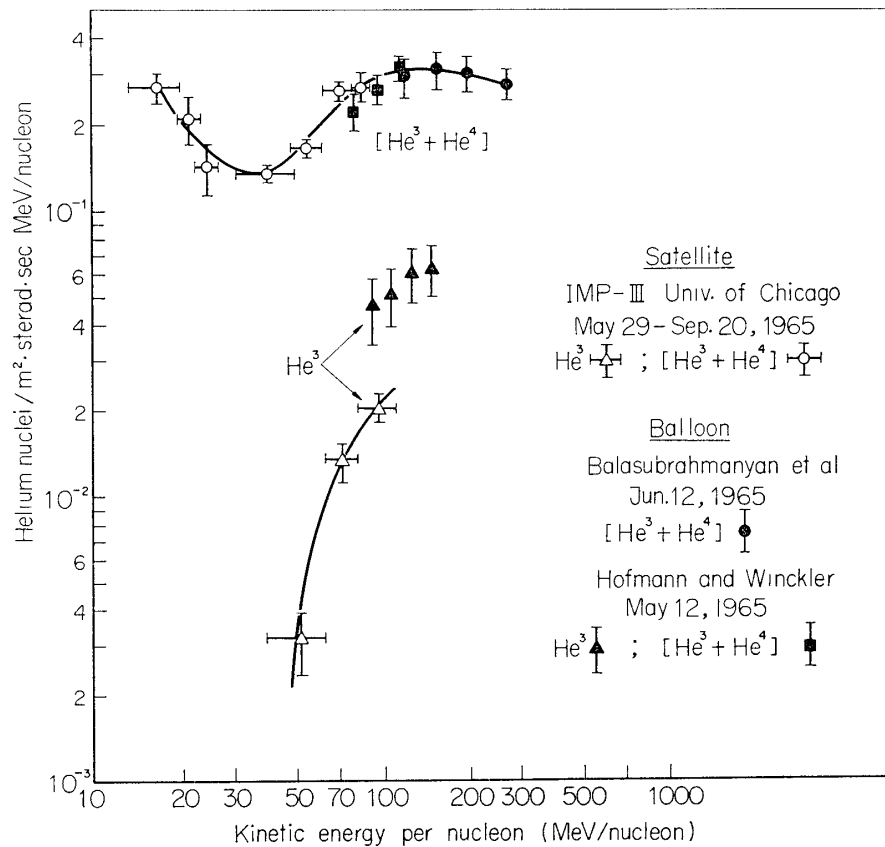


第3図 27日再帰を示す部分に Trap されている陽子のエネルギー分布. 再帰のピークの前側と後側とでのスペクトルの違いが見出される[4]

論された. さらに詳しくいえば元素の存在比に加え, 各元素の同位元素の存在比 (たとえば, He^3/He^4 , $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$) を知ることによって宇宙線の起源から太陽系に到達するまでに通った物質量についての情報を得る. さらにこれらの粒子のエネルギー分布から加速の機構についても論じられるが, 最近の OGO-I などによる観測は従来より低いエネルギー領域での結果を与え, 起源の問題について従来の結論とやや異なった結果を得ている[6].

同位元素の存在比についてはすでに IMP-I, II, III によって He^3/He^4 の比が 40~100 Mev/n で 0.02~0.07 であり, これより高いエネルギー領域での値 (0.1~0.15) と比較された[7]. この差が起源にあるのかまたは太陽系内で受ける影響はこれからの問題である.

(ロ) 宇宙線中の電子成分の観測 宇宙線中に約 1% の強度の電子成分が存在することは気球観測によって 1960 年頃より確かめられた. さらに IMP-I の観測によってさらに低い



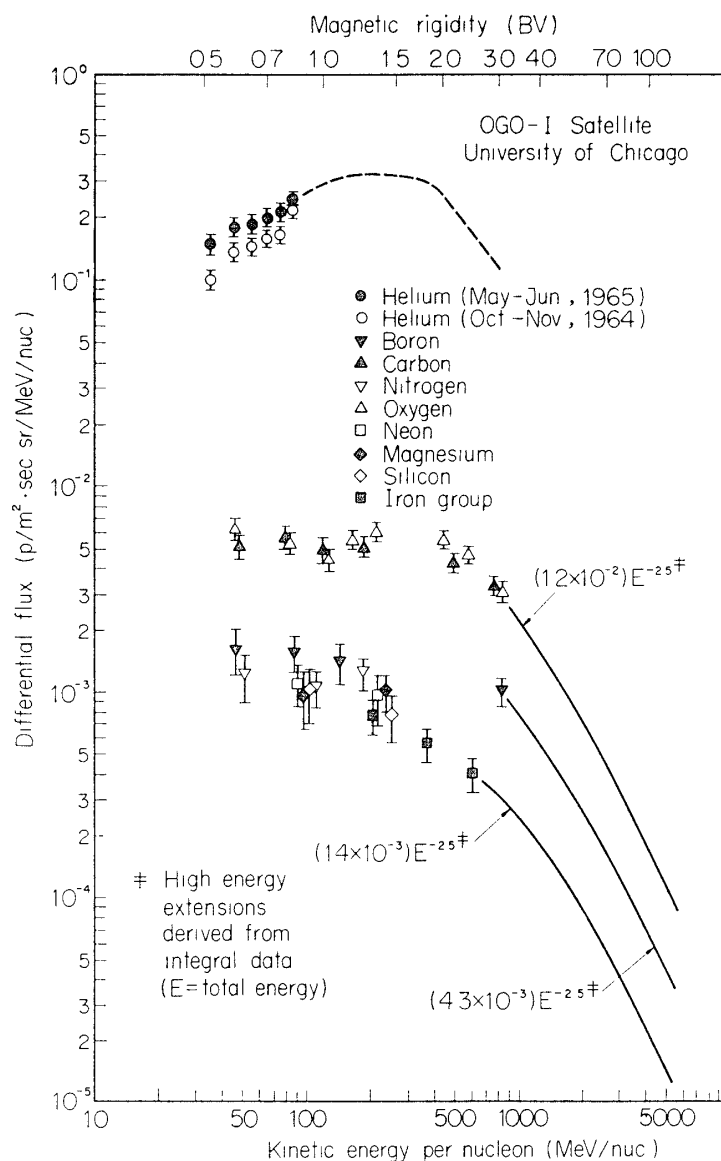
第4図 銀河宇宙線中の He^3/He^4 のエネルギーに対する変化を示す ($\text{He}^3 + \text{He}^4$) の低エネルギーでの上昇は太陽からの α 粒子によるものと考えられる[7]

MeV 領域でも電子成分が観測され、そのエネルギー分布が決定された[8]。これらの電子成分は宇宙線粒子の星間物質との核衝突から生ずるものと、超新星等で加速されたものから成立している。これらの分離は陰陽荷電電子の存在比から行なわれるが、後者のエネルギースペクトルの観測は銀河電波の発生機構と関連して重要な情報となる[9]。この点で日本オランダ共同と米国の人工衛星 (OGO) による観測計画が進行中でそれによる結果がまたれている。

(c) 銀河系外からの宇宙線については、それら粒子の持つエネルギーが高く、したがって強度が非常に小さいのと測定技術の困難から地上観測に依存するほかはない。しかし荷電粒子でなく、X線 γ 線などによって銀河系外における粒子加速などについての情報を得ることはロケット、人工衛星による観測によってのみ実現されることである。

3. 宇宙線が惑星間空間で受ける太陽プラズマの影響

太陽系外から入射する宇宙線粒子は太陽プラズマの電磁状態によって影響を受ける。このいわゆる modulation の状態と太陽プラズマ風の強さ、速度またその中に持つ磁場の強さ、不規則性などとの関連を調べることは惑星間空間の物理状態を知るのに重要な意義がある。そこでこの modulation を地球上の観測と共に宇宙空間で測定することによってつぎのよう

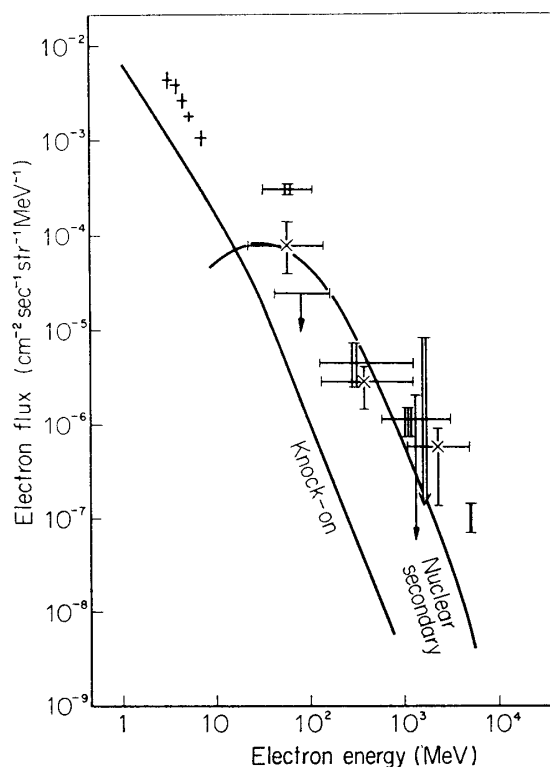


第5図 OGO-I で観測された He~Fe の粒子のエネルギー・スペクトラム, 50 MeV/nuc という低いエネルギーでも重い原子核が存在し, これと α 粒子のスペクトルと形の違うことは従来からの予想と異なる[6]

ないいくつかの問題を解決できる。

(a) 太陽系内での宇宙線密度の太陽からの距離による変化. この問題は太陽プラズマ風の影響がどのような距離の所にまで及んでいるか. また modulation の強さが太陽風の速度, 密度などによってどう変化するかを知るのに重要な意味を持つ. Mariner II, IV によってこの測定が行なわれ, 前者では $12 \pm 4\%/A.U.$ の傾度を得た[10]. これによって従来の modulation に関する理論に対しいくつかのチェックを与えることとなった.

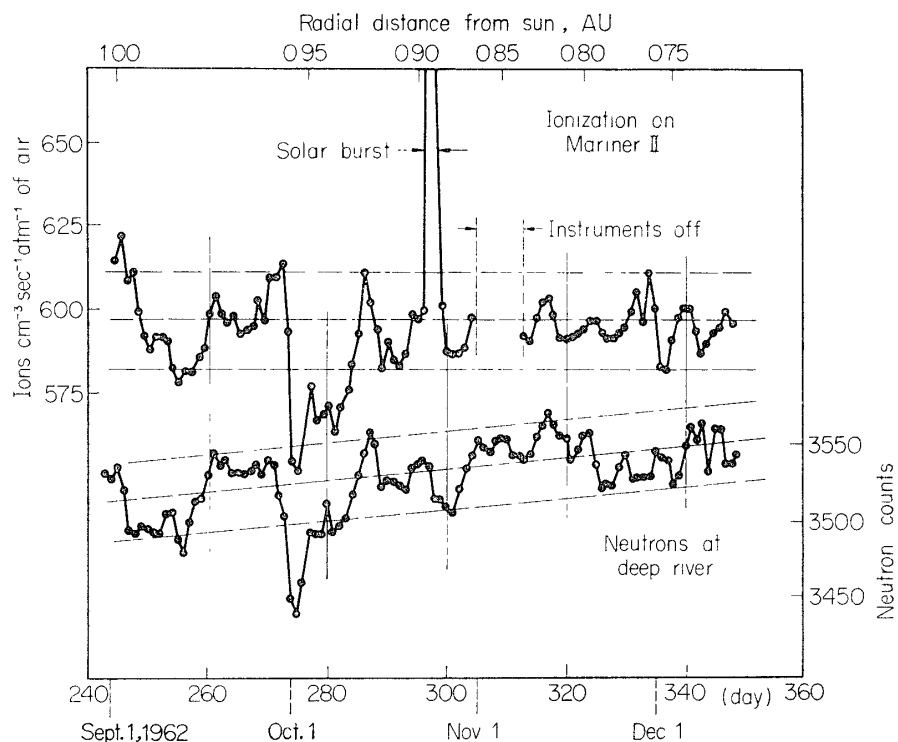
(b) 宇宙線中の電子, 陽子, 重い核の各成分に対する modulation の効果の違いについて



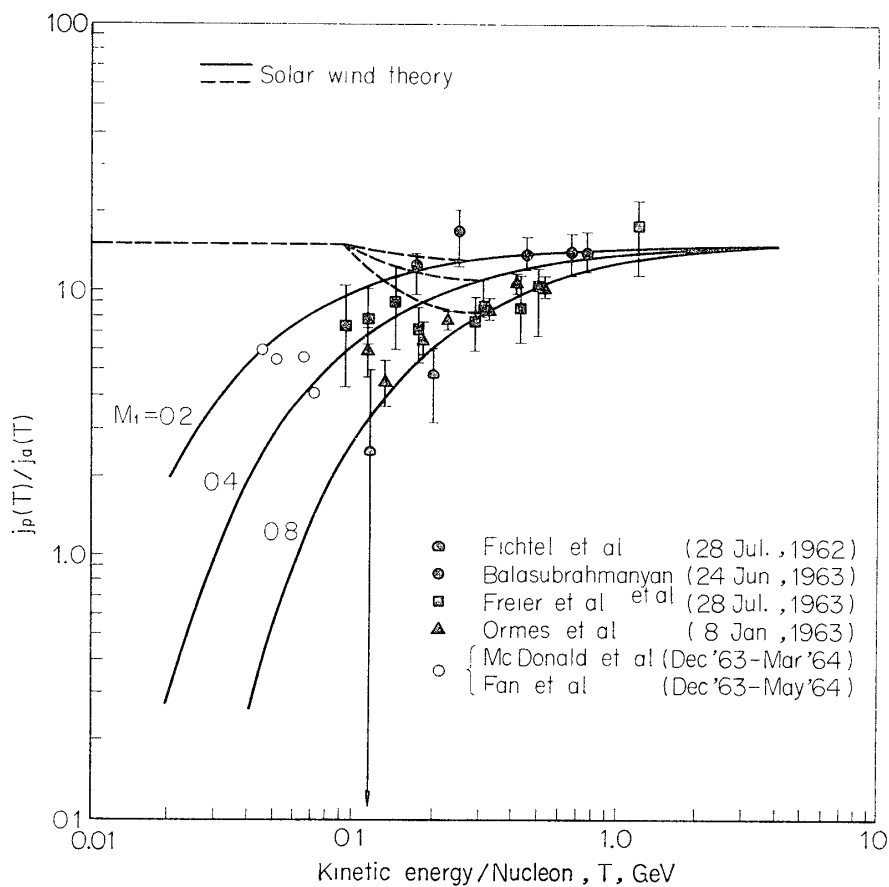
第6図 銀河系からの電子のエネルギースペクトル
 数 MeV までスペクトルに曲りが無い点が
 太陽系空間での Modulation について重要
 な点である、実行は理論から推定される電
 子の生成過程によるエネルギースペクトル
 である[9]

て、電子、陽子、重い核とでは、その静止質量を単位としたエネルギー（速度）と荷電当りの運動量（magnetic rigidity）との関係は異なる。したがって modulation が粒子の速度に比例して起るか、rigidity に比例して起るものかはいろいろなエネルギー領域でこれらの粒子の modulation の相異を調べればよい。IMP-I による低エネルギー電子（ \sim MeV）ならびに He^3 , He^4 核のエネルギースペクトルの測定は気球などの観測と総合して低いエネルギー領域（MeV \sim GeV）では modulation が速度によるものであることを示している[11, 12]、一方地上観測や人工衛星による高いエネルギー（ >10 GeV）の陽子の観測は modulation が rigidity によって変化することを示しており、この両者の modulation がどの rigidity 領域で交替するのかは今後の研究課題である[11]。このような高い rigidity 領域での研究には日本のような低緯度地方が適している。

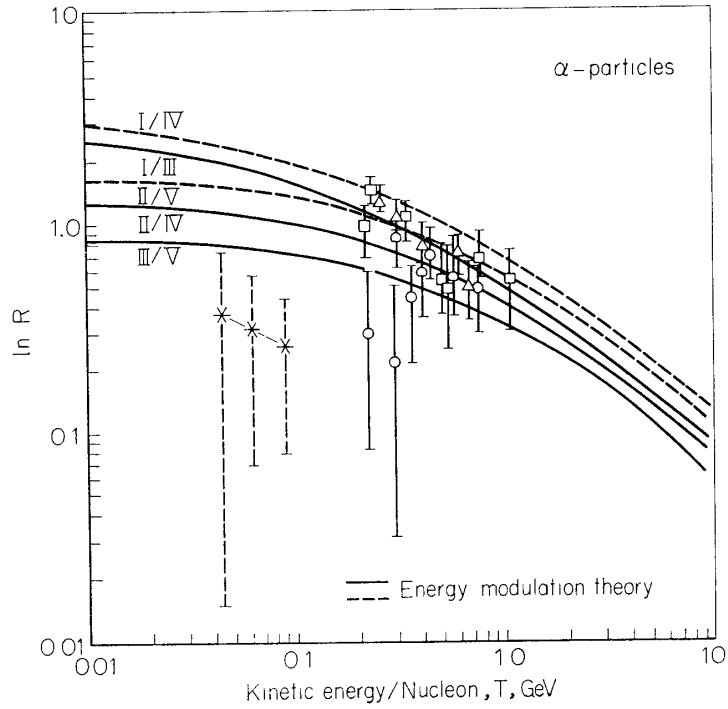
(c) 2 でのべた太陽から発生した粒子の観測によって太陽系内の磁場中での粒子の拡散の様子が明らかになった[13]。最近の人工衛星による観測によると太陽からの粒子がかなり短周期でその到来方向を変えていることを示している[14]。このような低エネルギー粒子の振舞いとさらに高いエネルギー粒子の変化とを比較することによって、太陽プラズマ中での磁場の irregularity の大きさの分布などについての情報が得られる。これは磁場やプラズマ



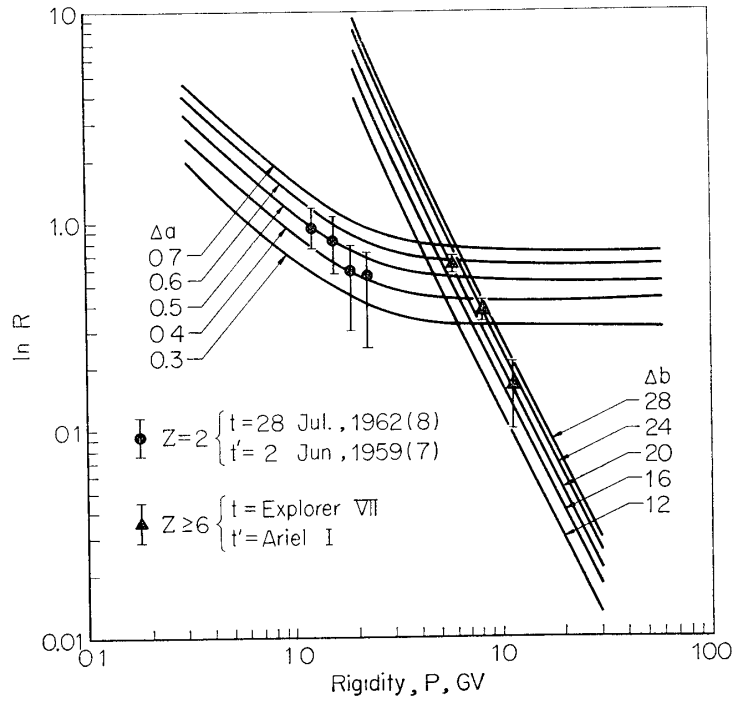
第 7 図 Mariner II によって観測された宇宙線強度の地球—金星間の変化と地球上での宇宙線強度の時間変化. 時間変化を補正すると $12 \pm 4\%/A.U.$ の強度傾度を得る[10]



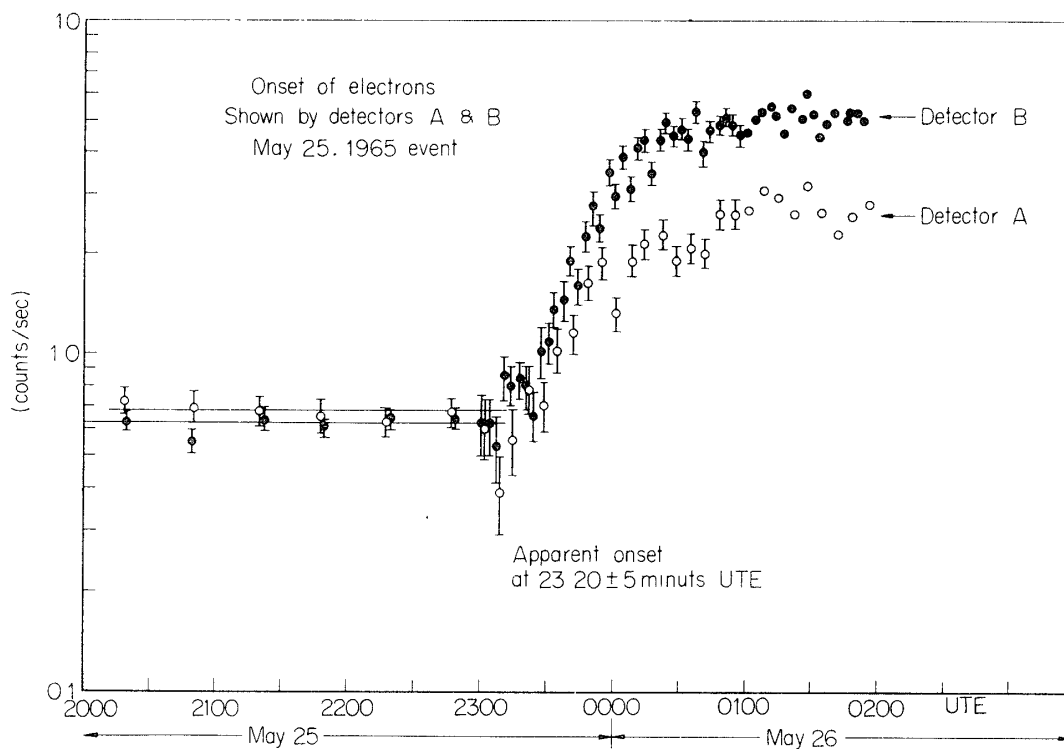
第 8 図 太陽プラズマ風によって生じる Modulation の陽子と α 粒子に対する影響の違いの理論値と実験値の比較[11]



第 9 図 Modulation が Energy Modulation であると仮定した理論値と実験値との比較 (R は各エネルギーでの微分強度の比)低エネルギー領域で合わないようである[11]



第 10 図 高いエネルギー領域での Modulation のようす。5 GV以下では速度に、以上ではエネルギー逆自乗に比例していると考えられる[11]



第 11 図 Mariner IV によって火星付近で観測された太陽からの電子 (>40KeV) の到来, これらの粒子の惑星間空間の拡散の様子は有限速度の拡散の問題の適用が必要である[15]

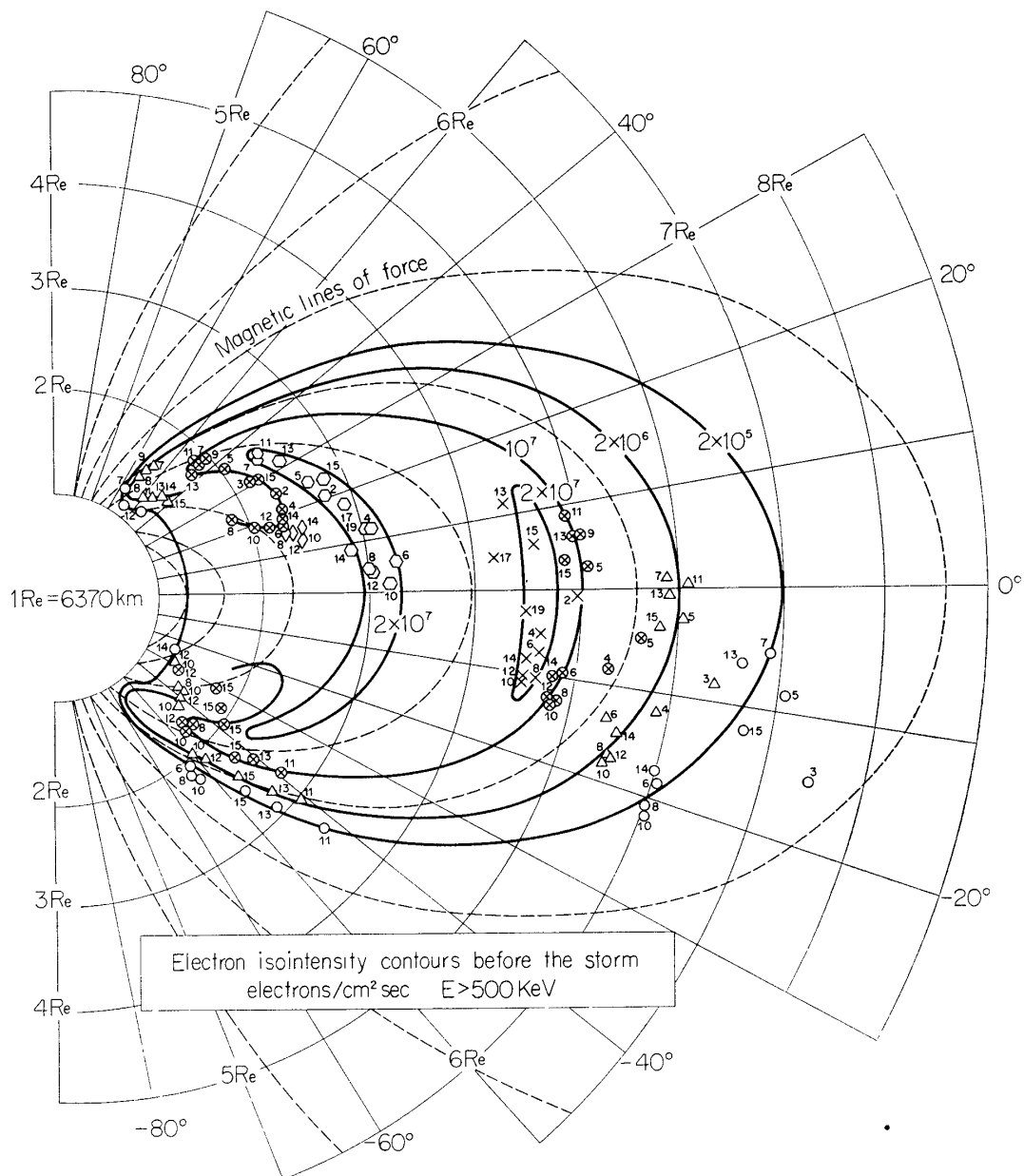
密度, 速度の直接測定と相まって惑星間空間の物理的状態についてその空間分布, 時間変化を知るのに有用である。

また地球より外側での Mariner IV の観測から太陽で加速された 40 KeV 程度の電子の到来状況が観測され, このような低速な粒子の拡散の問題について資料を提供した[15]. 従来太陽宇宙線の拡散については速度が十分早い場合についてのみ考察されていたが, 速度の著しく異なる粒子の拡散を比較するには有限な速度のものの拡散が研究されねばならない. これはともあれ従来地球付近のみでの惑星間空間の状態によって推定された太陽プラズマ風がさらに遠く火星までも広がっていることが確かめられたわけである。

4. 放射線帯に関する問題

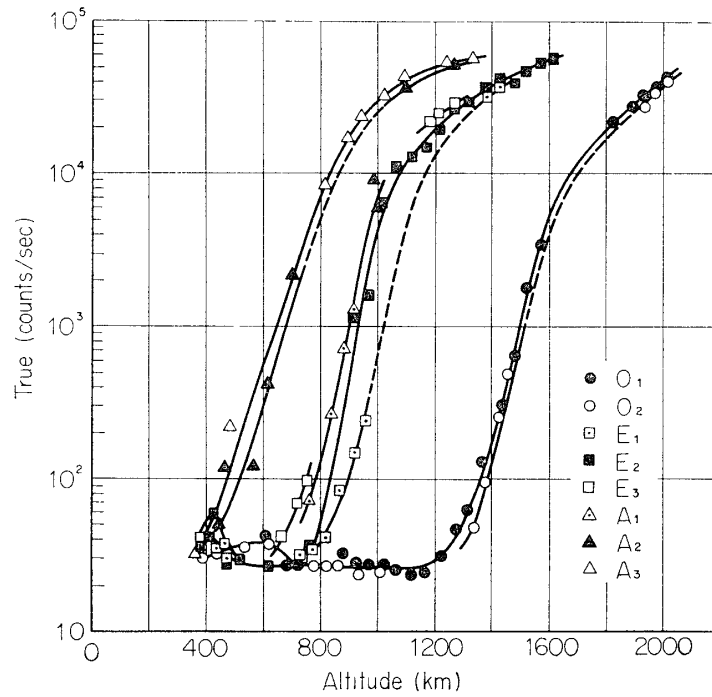
放射線帯の発見 (1957) 以来放射線帯についての知識は急速に発展してきた. 陽子 (>数+MeV) を主体とする内帯と電子 (>数+KeV) を主体とする外帯についてその形状, 粒子のエネルギースペクトル, 分布などについて多くの研究が急速に行なわれた[16]. それに対して理論的な計算も数多く行なわれ放射線帯の成因, その中の粒子の寿命など実験結果の説明がされた. 最近数年はとくに磁気圏の外縁, いわゆる Magnetopause, Magnetosheath での collisionless shock の生成と, そこで生じる磁場の irregularity による粒子の加速が問題として取上げられている。

(a) 放射線帯の構造

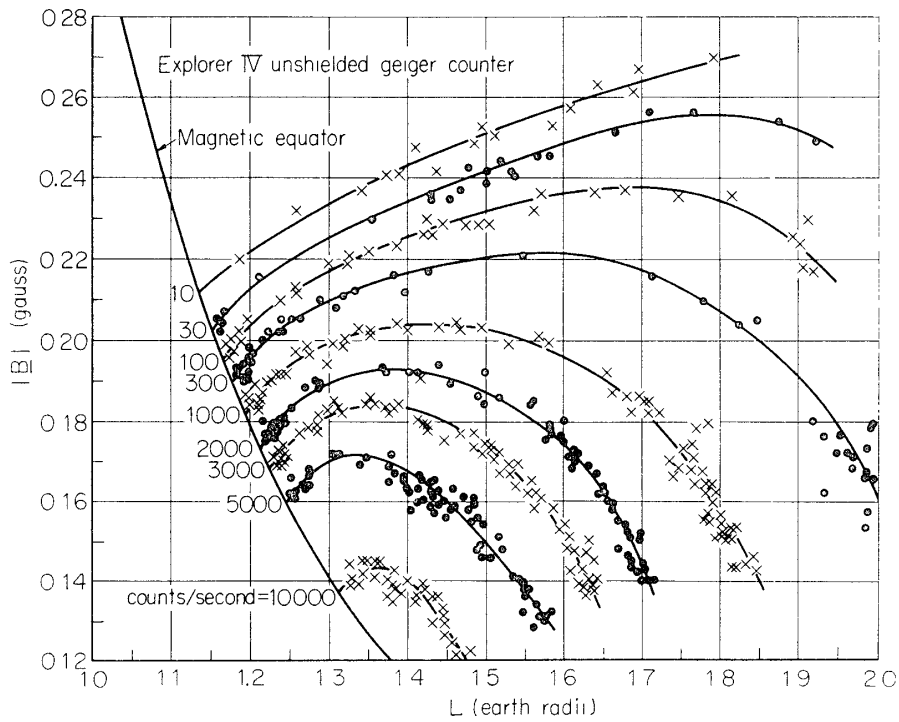


第 12 図 Explorer VI によって観測された高速電子の放射帯内での強度分布[16]

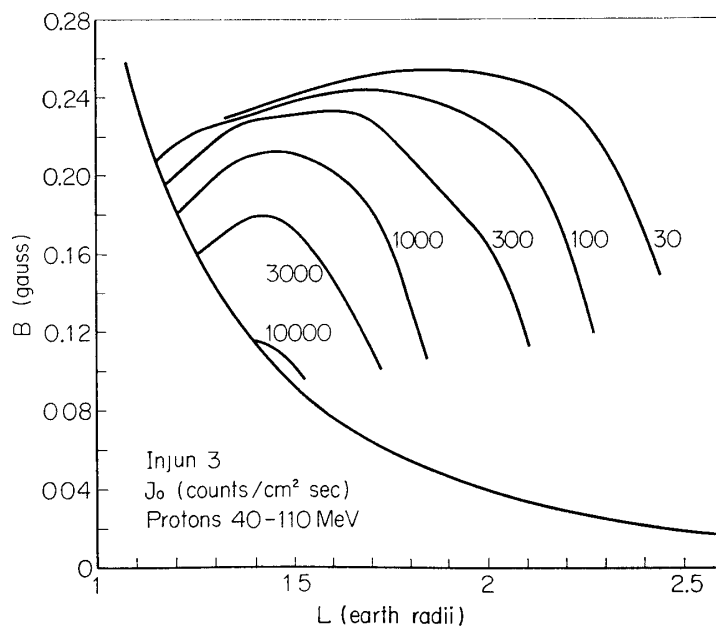
放射線帯が陽子を主成分とする内帯と、電子を主成分とする外帯とによって特徴づけられることはよく知られている。これらの放射線帯の構造を現わす方法として、地球磁場内で荷電粒子のもつ longitudinal invariant を現わすパラメータである L と、その L の殻の上の各点の磁場の値 B とを座標にとり、その上に粒子の等強度線を描くことが行なわれている[17]。このような方法をとれば地球磁場の高次の項の影響を補正して粒子強度の分布を二次元の図で描くことができる。放射線帯の発見当時の全方向積分強度の測定から粒子のエネルギー分布、磁力線に対するピッチ角の分布などを放射線帯のパラメータの関数としてくわしく測定



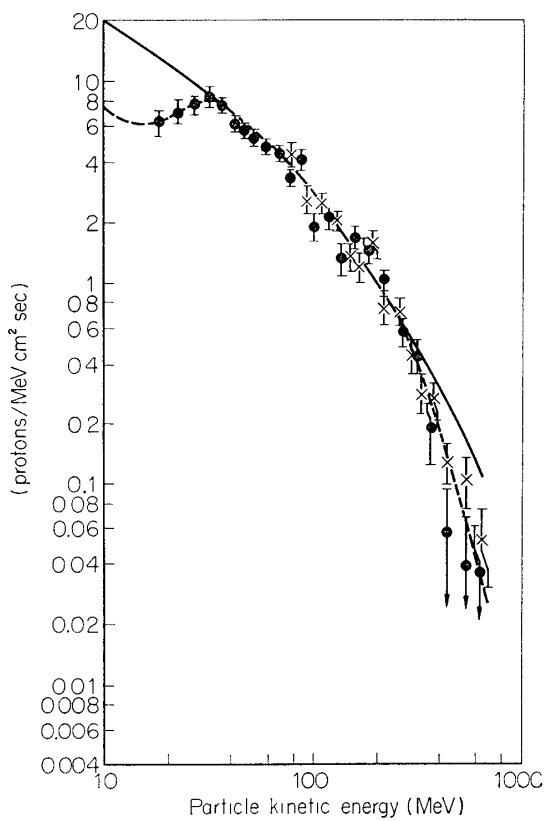
第 13 図 放射線帯内帯下縁の境界が経度によって著しく違うことを示す, これは地球磁場の非双極子成分による[18]



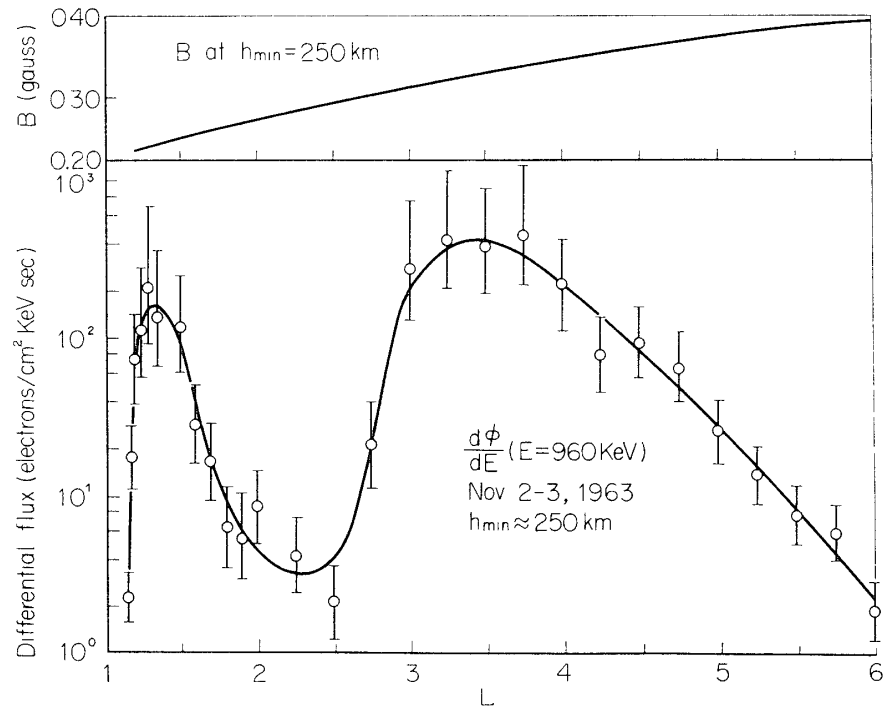
第 14 図 放射線帯強度分を統一的に表現する L-B 図によって Explorer VI の GM 計数管による測定結果を整理したもの[17]



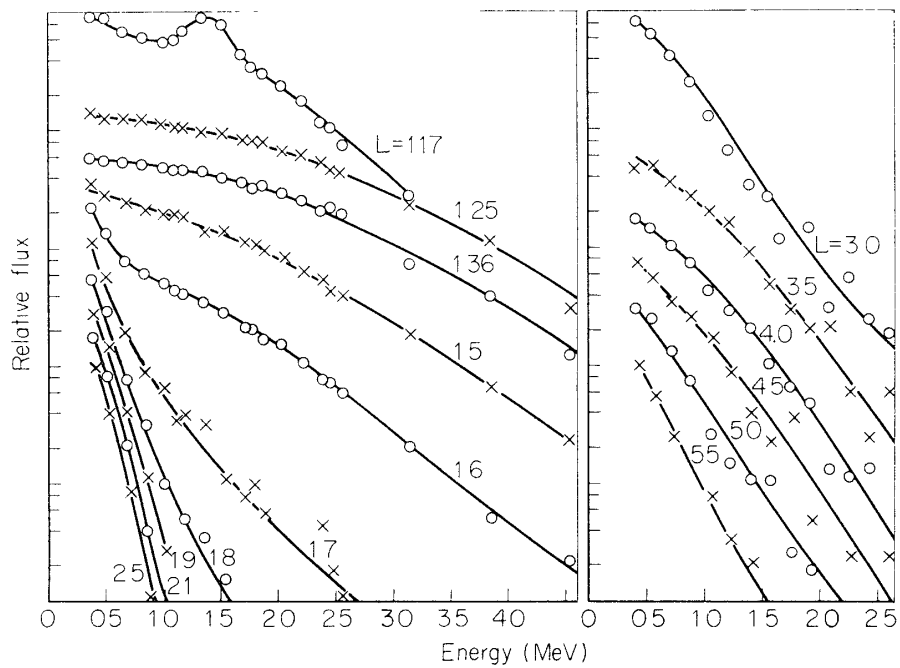
第 15 図 40~110 MeV の陽子の強度分布 (内帯を示す) [28]



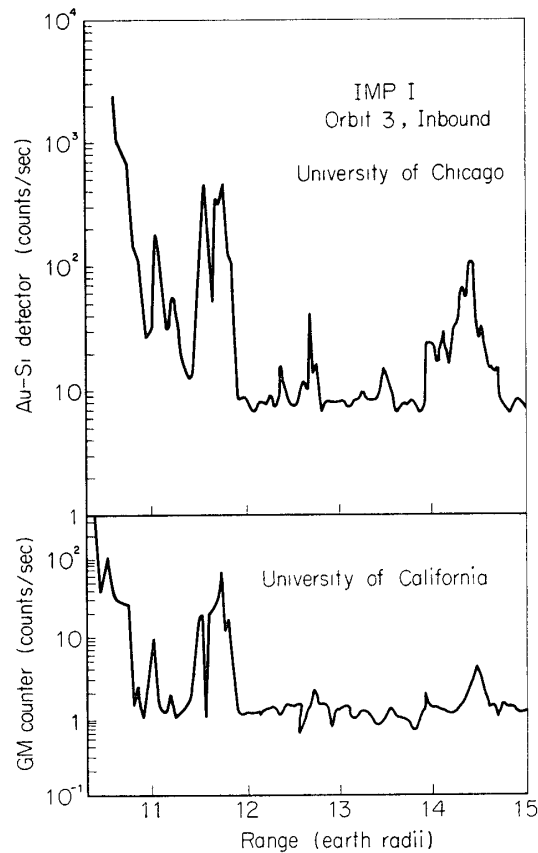
第 16 図 内帯陽子のエネルギースペクトラムとアルベド中性子から予想されるものとの比較[29]



第 17 図 約 1 MeV の電子の L に対する分布[30]



第 18 図 いろいろな値の L 殻における電子のエネルギー分布
内帯と外帯の間の谷間でエネルギー分布が急になる
のが見える[30]



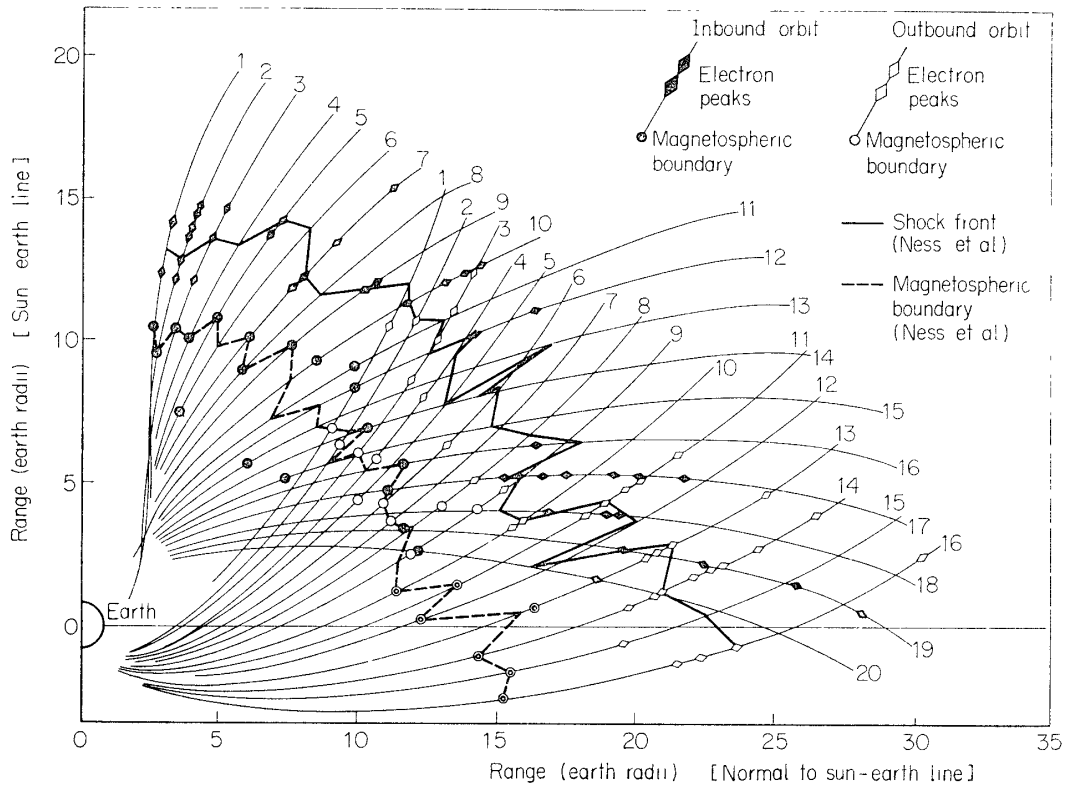
第 19 図 磁気圏の境界付近で見られる電子の局地的な増加
同時に測定した2種の測定器（半導体検出器とガイ
イガー計数管）にそれぞれ現われている[22]

する方向へと進展してきた。さらに Starfish project などの人工放射線帯の減衰から放射線帯内粒子の吸収、拡散などによる損失から決る寿命についての情報が得られた。

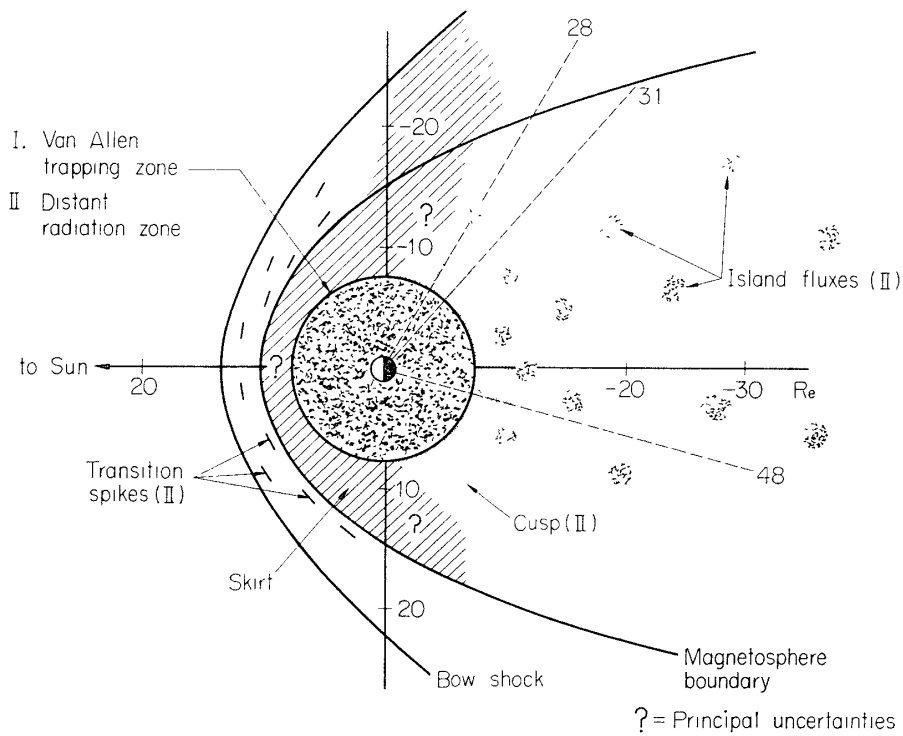
(b) 放射線帯の起源

内帯の起源については、(イ)宇宙線の大气中での核衝突から生じるアルベド中性子が崩壊してできた陽子、(ロ)太陽で生じた低エネルギー陽子の極地帯への侵入によって生成されるものの2種が考えられる。とくに(イ)の方が赤道地方においてはおもな生因であり、大气からの中性子の脱出についてのくわしい実験事実を元にして理論的にも詳しく調べられている[19]。まだ内帯での分布やエネルギー分布を完全に説明はしていないが、大部分の起源はこの過程によるものと思われる。

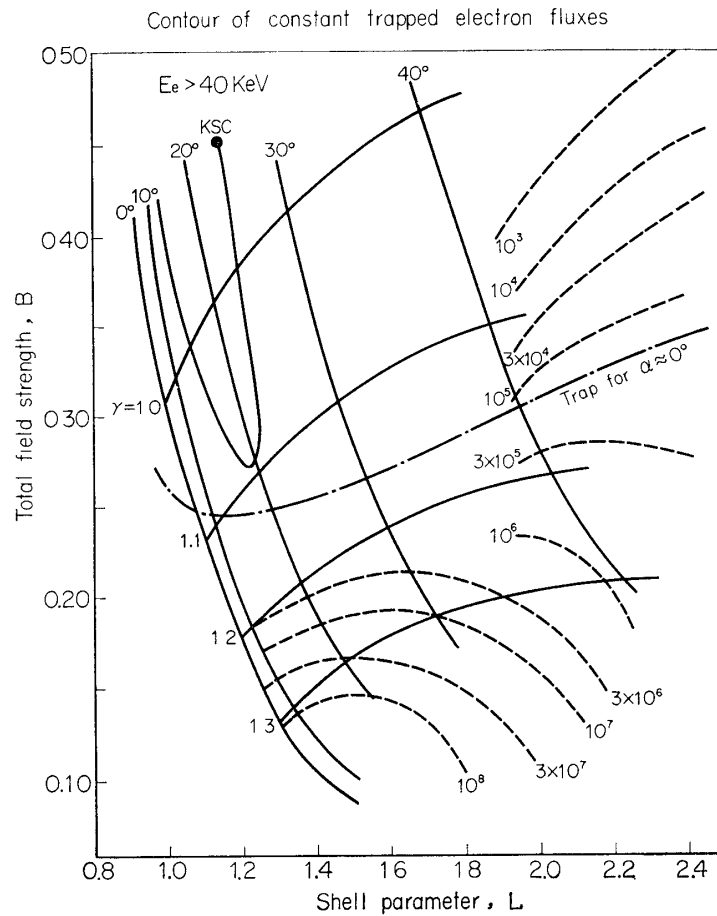
外帯については内帯と同じくアルベド中性子からの崩壊から生じた電子も考えられるが量的には十分でない。その上外帯での強度が激しい時間変化を示すことから[20]外帯の電子の起源は磁気圏外から侵入したものか、または磁気圏内で加速されたものではないかと推論されている。さらに最近外帯の中で低エネルギー(0.1~1 MeV)の陽子がかかなり高い強度で存在することが報告され[21]、この源がさらに大きなLの所に trap されたものが拡散によって侵入して来たものであるかどうか。その場合には1~2の adiabatic invariants が保存され



第 20 図 第 19 図に示した局地的増加と磁気圏境界と shock Front との関係多くはこの二つの間に見られる[22]



第 21 図 局地的増加(島)の分布, (赤道面)最近の研究ではこの島は磁気圏の尾部に近い点に多いことが見出されている[23]



第 22 図 L-B 図にプロットされた電子の等強度線と Trapped particle の限界線, KSC からの線は L-3-3 の軌道を示す

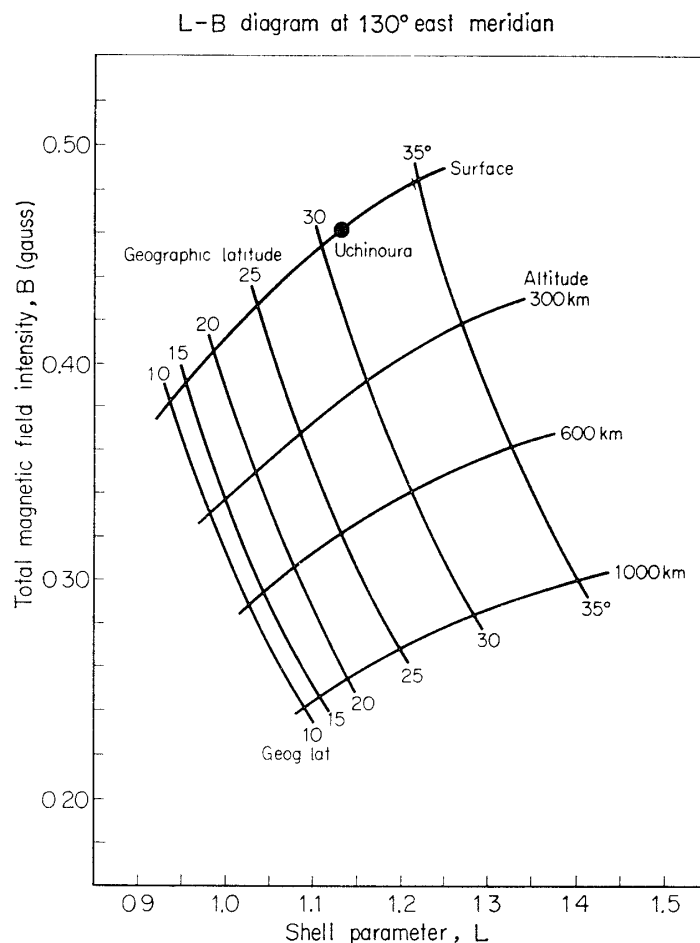
ていないのではないかが問題となっている。

また最近 IMP, OGO などによって磁気圏の境界での粒子の加速の証拠と思われる局所的な強度増加が観測された[22, 23]. この現象のさらにくわしい研究は空間における粒子の加速機構の直接の解明として新しい問題を提起するであろう。

(c) 放射線帯の消長 極地方で磁気嵐と関連して観測される高速電子は放射線帯からのもれ出しであるか, または磁気圏外からの直接の侵入であるかはまだ確証がない. しかし磁気嵐等磁気圏の外部からの力が変化した場合放射線帯内の粒子にどのような変化があるかは興味ある問題である. 最近過去 8 年間の観測結果の解析から外帯の内側の境界, 強度最大的位置が太陽活動の減衰にともなって 1 地球半径程度外側へ移っていることが結論された[24]. これに反し最大強度自身は大きな変化を示していず磁気圏内部は 1 MeV 以上の粒子に対しては飽和状態になっているのではないかと考えられている. 今後太陽活動期に向うにつれ放射線帯がどのような変化を示すかは放射線帯の研究に重要な資料を与える。

(b) 磁気圏境界での現象

磁気圏の境界, Magnetosheath, shock front など粒子の加速の証拠と見られるものが発



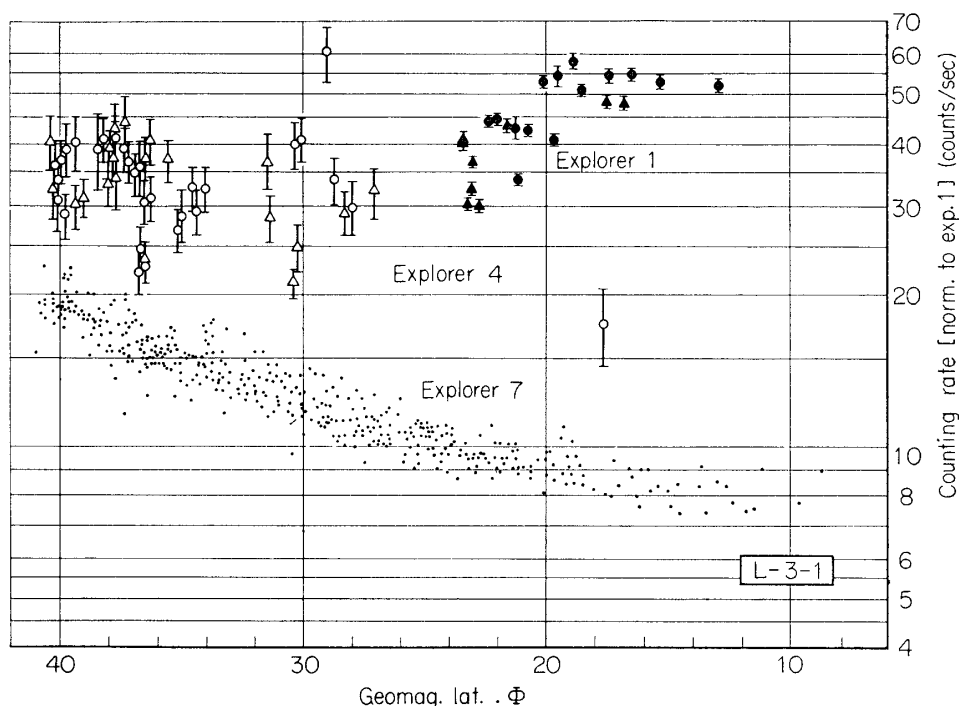
第 23 図 日本の経度での L-B 図, 第 22 図と比較すれば内帯の高さが 1,500 km であることがわかる

見されたが, さらに磁気圏の尾部が地球半径の数十倍の長さを持ち, しかもその中心に沿った磁場が見出された[25]. そして上記の加速現象がこの尾部の current sheet 近くで多く見出されているので尾部での放射線帯の状況は放射線全体の消長についても重要な役割を占めている[25]. また尾部と太陽側の半球との境界に生じる中性点とそれと密接な関係のある極地帯への粒子の侵入等を解明するために赤道面のみでなく, これと直角な平面での放射線帯の観測が遠距離まで行なわれることが必要であろう.

5. 日本での観測ロケットによる研究の現状と将来の問題

日本でのロケットによる宇宙線, 放射線帯の観測はロクーン, K ロケットの初期から数多く行なわれた.

しかしここで注意しておきたいことは, 日本の地理的条件のためにまだ放射線内帯自身の観測が行なわれていないことである. 4 でのべたように放射線帯内の粒子の分布は L-B 図によって示されるが, この上で地球大気吸収によって粒子が存在しえない領域が生じる. これはある L-shell の上をドリフトしている粒子が, 地球磁場の弱い高度でその mirror point



第 24 図 日本付近の 500~1,000 km での放射線強度, 時間変化と緯度による変化があるようである[27]

が地球大気に入り, そこで吸収されるためである. 図に示したように日本の経度, 緯度では地球磁場の双極子が地表に近い位置であるため大きな B, 小さな L の所での観測を余儀なくされる. たとえば内之浦から発射された L-3 ロケットで 1,000 km の高度に達してもまだ内帯の限界線には到達し得ない. したがって今までの観測で得られたものは放射線帯の下部からもれてくる粒子を観測したものである. 日本の上空付近を通る L-shell は南アフリカ地方では地球の表面を横切り, したがって日本上空で観測されるものは, この地方での散乱によって pitch angle をかえられたものが内帯からもれてくる様子を見ていることとなる.

これらの粒子は宇宙線粒子とはエネルギー範囲が著しく違い, 強度も大きいので互いに分離が可能である. とくに放射線帯の下での粒子強度に時間変化が認められること[27]からその性質を見極めることは内帯自身の成因, 消長についての資料を得ることとなる. 将来さらに高い高度に観測ロケットが達する場合には内帯自身を観測することも可能であり, この面での成果が期待される. 粒子の組成, エネルギー分布等多角的な観測が行なわれつつあるのでこれらを総合して統一的な姿を解析することが望まれる.

一方, 宇宙線中の各成分の測定のためには, 観測ロケットの飛しょう時間程度の観測では強度が小さいためもあって十分な精度が得られない. しかし簡単な装置で能率よく計り大気中での気球による観測と比較することによって, たとえば大気からのアルベド粒子の影響, 地球磁場や地球の影の問題についていくつかの手掛りを得ることができよう.

さらに精密な測定を要する, たとえば電子や重粒子成分の測定には, さらに長期間の観測が可能である科学衛星によるのが効果的である. とくに現在計画されている低緯度での円形

軌道をもつ科学衛星を用いれば、従来ややすれば低エネルギー粒子に重点をおかれた観測をもっと高いエネルギー領域にまで広げることが可能である。このことによって平均状態並に諸種の時間変化に対してエネルギーの異なった領域での情報が得られより幅広い研究が行なえるであろう。また2でのべた太陽からの高速中性子の観測のためにもバックグラウンドの少ない低緯度で長時間の測定ができることは有意義である。

1966年7月23日

参 考 文 献

- [1] これらの問題についての総合報告が W.R. Webber によって *Progress in Cosmic Ray Physics and Elementary Particles* Vol. 6, p. 77-99 (1962) にある。
- [2] たとえば, Da. A. Bryant, T.L. Cline, U.D. Desai and F.B. McDonald · *J. Geophys. Res.*, **67** 4983 (1962).
- [3] S.M. Krimigris *J. Geophys. Res.*, **70**, 2943 (1965).
- [4] C.Y. Fan, G. Gloeckler and J.A. Simpson *Proc. Int. Cosmic Ray Conf. London* **1**, 109 (1966).
- [5] これについては近藤一郎・宇宙航空研究所報告 **2**, 334 (1966) を見よ
- [6] S.M. Comstock, C.Y. Fan and J.A. Simpson *Abundances and Energy Spectra of Galactic Cosmic Ray Nuclei Above 20 MeV per Nucleon in the Nuclear Charge Range $2 \leq Z \leq 26$* . EFINS, Univ. Chicago Preprint *Proc. Int. Cosmic Ray Conf. London* **1**, 383 (1966).
- [7] C.Y. Fan, G. Gloeckler, K.C. Hsieh and J.A. Simpson *The Isotopic Abundances and Energy Spectra of He^3 and He^4 above 40 MeV per Nucleon from Galaxy EFINS-66-15*, Univ. Chicago Preprint.
- [8] T.L. Cline, F.B. McDonald and G.H. Ludwig *Phys. Rev. Letter*, **13**, 786 (1964).
- [9] S. Hayakawa and H. Obayashi *Proc. Int. Cosmic Ray Conf. London* (1966). **1**, 116.
- [10] H.V. Neher and H.R. Anderson *J. Geophys. Res.*, **69**, 1911 (1964).
- [11] K. Nagashima, S.P. Duggel and M.A. Pomerantz *Planet. Space. Science*, **14**, 177 (1966).
- [12] C.Y. Fan, G. Gloeckler and J.A. Simpson *Proc. Int. Cosmic Ray Conf. London* **1**, 380 (1966).
- [13] この問題について W.R. Webber *A Review of Solar Cosmic Ray Events Physics of Solar Flares* p 215-255. が詳細に論じている
- [14] W.C. Bartley, R.P. Bukata, K.G. McCracken and U.R. Rao *Anisotropic Cosmic Radiation Fluxes of Solar Origin*, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3297 (1966)
K.G. McCracken, N.F. Ness, *The Collimation of Cosmic Rays by the Interplanetary Magnetic Field*. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3315, (1966)
- [15] J.A. Van Allen and S.M. Krimigris *J. Geophys. Res.*, **70**, 5737 (1965).
- [16] たとえば J.A. Van Allen *Space Science* p 226-315 (1963) の総合報告をみよ。
- [17] C.E. McIlwain *J. Geophys.*, **66**, 3681 (1961).
- [18] S. Yoshida, G.H. Ludwig and J.A. Van Allen *J. Geophys. Res.*, **65**, 807 (1960).
- [19] S.F. Singer and A.M. Lenchek *Progress in Cosmic Ray Physics and Elementary Particles* Vol. 6, p 246-335 (1962).
- [20] F.A. Farley and A. Rosen *J. Geophys. Res.*, **65**, 3494 (1960).
- [21] J.D. Miholov and R.S. White *J. Geophys. Res.*, **71**, 2207 (1966).

- [22] C. Y. Fan, G. Gloeckler and J. A. Simpson: J. Geophys. Res., **71**, 1837 (1966).
- [23] K. A. Anderson J. Geophys. Res., **70**, 4741 (1965).
- [24] L. A. Frank and J. A. Van Allen: J. Geophys. Res., **71**, 2697 (1966).
- [25] N. F. Ness. J. Geophys. Res., **70**, 2989 (1965).
- [26] T. Murayama Spacial Distribution of High-Energy Electrons in the Geomagnetic Tail EFINS, Univ. Chicago Preprint.
- [27] 竹内 一; 科学衛星計画シンポジウム (1965) p. 16.
- [28] J. Valerio: J. Geophys. Res., **69**, 4949 (1964).
- [29] R. C. Blanchard and W. N. Hess: J. Geophys. Res., **69**, 3927 (1964).
- [30] W. L. Imhof and R. V. Smith: J. Geophys. Res., **70**, 2129 (1965).