

## 地球外気圏 (II)

松浦 延夫\*

## 5. 放射線帯

地球磁気圏内に磁場に捕捉された高エネルギー荷電粒子が存在することが 1958 年 Explorer I, Sputnik III によって初めて認められ、放射線帯 (Radiation belt) と呼ばれている。磁場に捕捉された荷電粒子の像はすでに、Alfvén, Singer 等によって描かれていたが、その実在を示す根拠は何もなかった。1958 年の発見以来、放射線帯に関する知識はかなり豊富になったにも拘らず、その生因は未解決のまま残されている。

地球磁場中での荷電粒子の運動を一般的に記述することは複雑であるけれども、放射線帯粒子の場合には断熱理論に従い近似的に次の三つの運動に分けることができる。第一は磁力線のまわりの旋回運動 (周期  $T_C$ , 回転半径  $R_C$ ) で、第二は磁力線に沿った往復運動 (周期  $T_B$ ) で、往復運動の反射点は“磁気モーメントの保存”の条件から決まる。反射点の位置は磁気赤道でのピッチ角に関係し、反射点が低い粒子は大気粒子と衝突して大気中に侵入する成分となる。第三は磁力線に直角方向のドリフト運動でこの運動は電場によるものと、磁場の強さの勾配によるものと、磁力線の曲がりによるものと三つの原因から生ずるが、電場がない場合には、この運動は地球のまわりを回転する運動 (周期  $T_R$ ) となり、磁気赤道面での軌跡は“経線に沿った不変量の保存”の条件から決まる。従って磁場が時間的に変化しない限り、地球を一周した後にはまた元の磁力線に戻ってくる。しかし磁場が時間的にゆっくりと変わる場合 ( $T_R$  に比べて)、磁気赤道面での軌跡は、一周のドリフト運動で囲まれる磁束が一定であるように変化する。先に述べた断熱的な近似が成り立つためには、三つの運動の周期  $T_C$ ,  $T_B$ ,  $T_R$  がそれぞれ充分に異なっている事が必要である。地上 2000 km の磁気赤道面での、種々のエネルギーの粒

子の周期が第 1 表に掲げられている。

三つの周期はそれぞれ充分異なっており、また旋回半径  $R_C$  は地球の半径に比して充分小さいので、上に述べた三つの運動に分けることができる。

放射線帯は内帯と外帯に分けて呼ばれており、その様子はかなり異なっている。

**内帯** 内帯でのプロトンについてはかなりよく知られるようになったが、電子については人工放射線帯を除いてはあまりよくは知られていない。

Naugle と Kniffen (1963)<sup>11)</sup> によって内帯でのプロトンのエネルギースペクトルが調べられているが、その結果によると  $L \approx 1.6$  ( $L$  はもし地球磁場が双極子磁場なら磁気赤道面から地球中心から  $L R_e$  の点を通る磁力線群を指すが、実際の磁場は双極子磁場からずれているので若干の違いはある) を境にして内側でのエネルギースペクトルは宇宙線が大気粒子と衝突して  $N, O$  の原子核を壊わし中性子を放出させその中性子が大気中を飛んでいる中にプロトンと電子に崩壊 (中性子の平均寿命は  $10^8$  sec) して磁場に捕捉されたものと考えると都合よく説明される。しかし、 $L > 1.6$  でのエネルギースペクトルには特に 50 MeV 以下の比較的エネルギーの低いプロトンが卓越していることから (第 9 図)、太陽プロトンが大気粒子と衝突して放出する中性子の崩壊の成分を考えるとかなりよく説明されそうである。つまり太陽プロトンは高緯度地方に限られて侵入するので  $L$  の大きい領域に現われる。

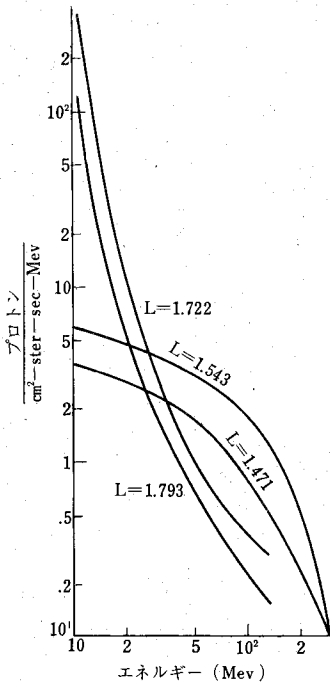
Explorer XV の観測から McIlwain (1963)<sup>12)</sup> は 40 MeV 以上のプロトンの空間分布が  $L \approx 2.2$  に第 2 の強度の山があることを見出している (第 10 図)。これを説明するためには更に別の原因が考えられなければならない。

第 1 表

	$R_C$	$T_C$	$T_B$	$T_R$
50 KeV エレクトロン	$5 \times 10^3$ cm	$2.5 \times 10^{-6}$ sec	0.25 sec	690 min
1 MeV エレクトロン	$3.2 \times 10^4$ cm	$7 \times 10^{-6}$ sec	0.10 sec	53 min
1 MeV プロトン	$1 \times 10^6$ cm	$4 \times 10^{-3}$ sec	2.2 sec	32 min
10 MeV プロトン	$3 \times 10^6$ cm	$4.2 \times 10^{-3}$ sec	0.65 sec	3.2 min
500 MeV プロトン	$2.5 \times 10^7$ cm	$6 \times 10^{-3}$ sec	0.11 sec	0.084 min

\* 郵政省電波研究所  
N. Matuura: Earth's Exosphere (II).

Injun I による観測から Freeman (1962)<sup>13)</sup> はプロトンで  $0.5 \text{ KeV} \leq E \leq 1 \text{ MeV}$  の低エネルギー粒子を観測



第9図 内帯におけるプロトンのエネルギースペクトルのLによる変化

考えられる。また  $L < 1.7$  では比較的早く減衰しており、この消滅機構についてはホイッスラーとの相互作用が挙げられているが、まだ説明は充分ではない。

**外帯** エレクトロンについては内帯と外帯との区別は明瞭ではないが、プロトンについては  $L \approx 2$  を境にして

しており、エネルギー流量にして  $100 \text{ ergs/cm}^2 \text{ sec}$  程度のものが観測されている。

なお  $100 \text{ KeV}$  以下のエレクトロンはかなりあるが、これは外帯からの延長と考えられる。

**人工放射線帯**

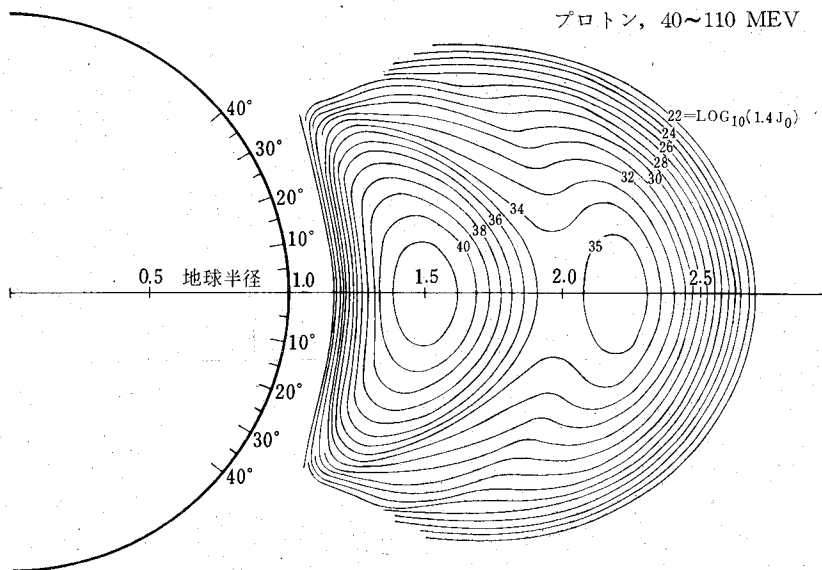
高層での核爆発でつくり出される人工放射線帯（主として数 MeV 程度のエレクトロン）の観測から、捕捉粒子の寿命が調べられており（第11図）<sup>14)</sup>、 $L < 1.5$  では年の程度の大気粒子による消滅が

はっきり区別される。外帯でのプロトンのエネルギーは内帯に比べてずっと低く（大部分のプロトンが  $100 \text{ KeV}$  付近にある）、また流量も遙かに大きい（最大  $3.7 \times 10^7$  プロトン/ $\text{cm}^2 \text{ sec ster}$ ）。従って中性子崩壊で説明することはまず不可能である。外帯でのプロトンの特徴は、その強度が非常に安定していることで、変化の激しいエレクトロンの場合とは異なっている。

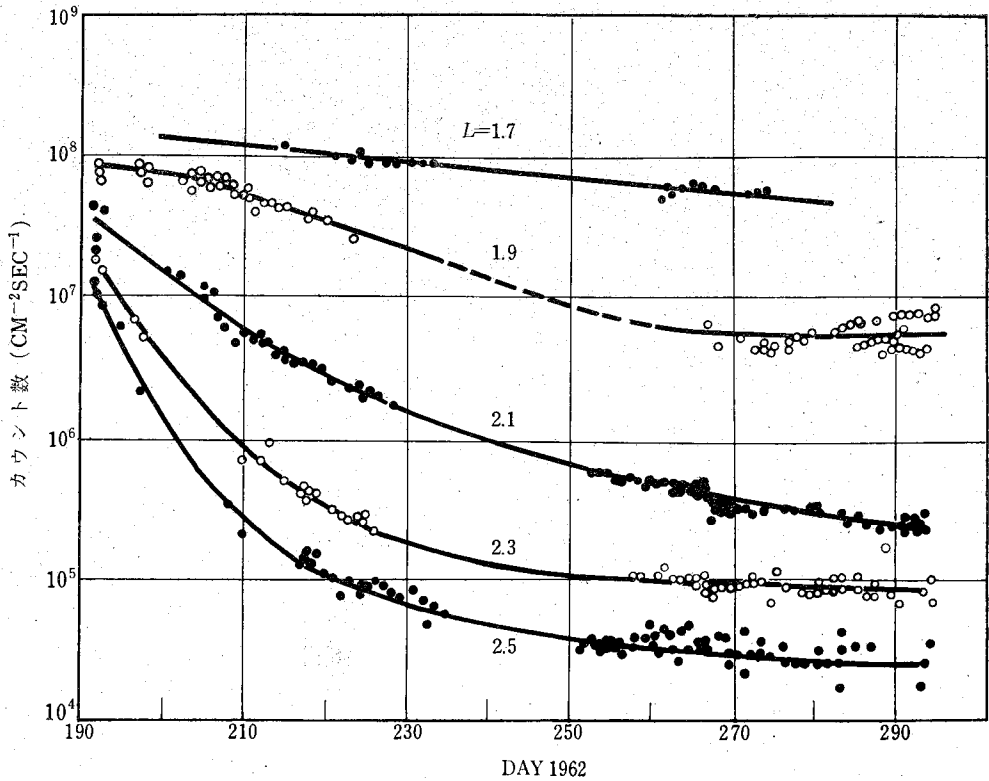
プロトンのエネルギースペクトルはL値に対して単調に変化し、エネルギーの高いプロトンが地球に近い方にある（第12図）<sup>15)</sup>。このエネルギースペクトルの変化は、磁気モーメントおよび経度沿いの不変量を保持したまま、磁束不変量だけが乱されて、プロトンが磁気圏の外縁から内部に向かって侵入して来たものと仮定した場合と非常によく一致している。もちろん磁気モーメントを保存するためには粒子の加速が必要である。

外帯のエレクトロンはその強度が激しく変化し、殊に地磁気嵐の際には大きく変化する。 $E > 1.5 \text{ MeV}$  のエレクトロンは磁気嵐の最中には  $L = 3 \sim 4$  付近で大きく減少するのに対して、 $E > 40 \text{ KeV}$  のエレクトロンは磁気嵐の間に増えている。また  $E > 1.5 \text{ MeV}$  のエレクトロンは磁気嵐の後で著しく増加し、時には100倍程度増えることがある。

外帯のエレクトロンとプロトンの特性には類似した点もある。そのエネルギーが数 MeV にまでおよんでいること、スペクトルが類似していること、L値が大きくなるにつれて低エネルギー成分が増えていること、流量が略同程度であること等である。このことから、同様の生成機構が働いているものと思われる。

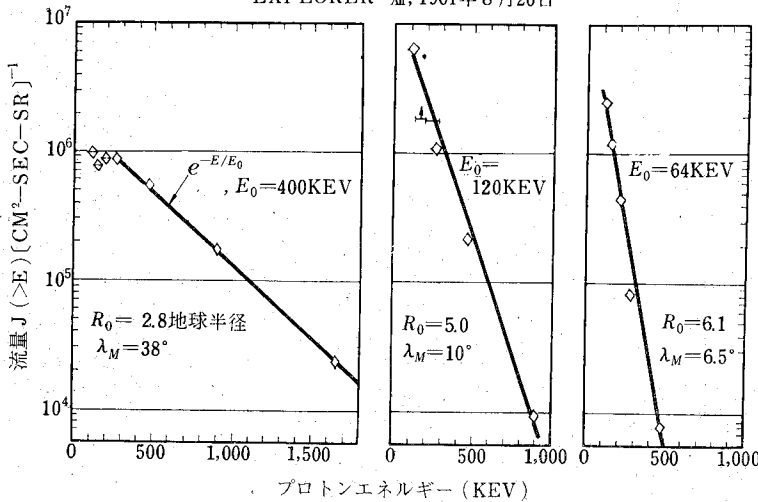


第10図 内帯プロトン ( $40 < E < 110 \text{ MeV}$ ) の分布



第11図 核爆発 (Starfish) に伴う電子強度の減衰

EXPLORER VII, 1961年8月26日



第12図 外帯のプロトン・エネルギー・スペクトルの地球中心からの距離による変化

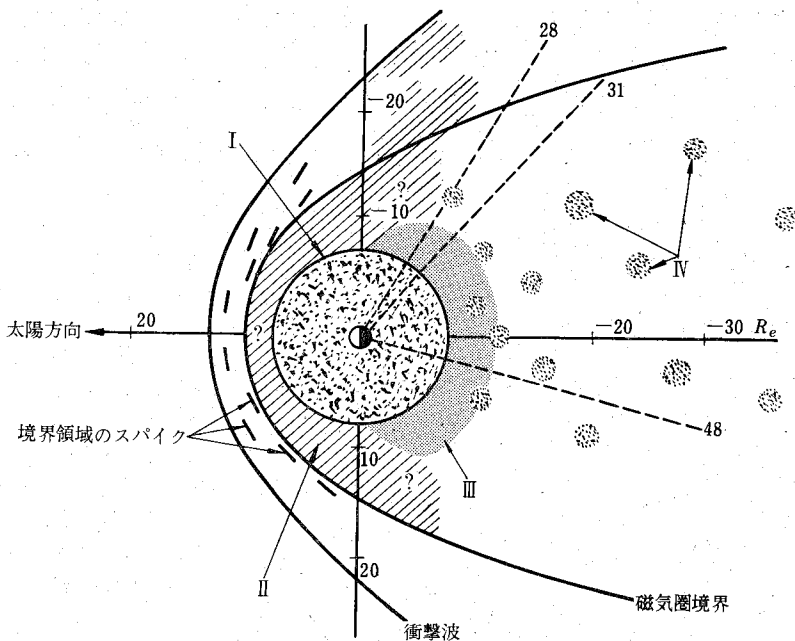
Frank 等 (1964)<sup>16)</sup> の Injun III の観測では、 $E > 40$  KeV の電子流量は磁場に捕捉されている成分、および上層大気に侵入して消滅する成分共に日変化している。捕捉粒子の等強度曲線が正午側で大きい  $L$  の方に、夜側で小さい  $L$  の方にずれているのは、太陽プラズマの地球磁場のヒズミによるものと考えられる。また

大気侵入成分の強度は正午側に最大値がきている。

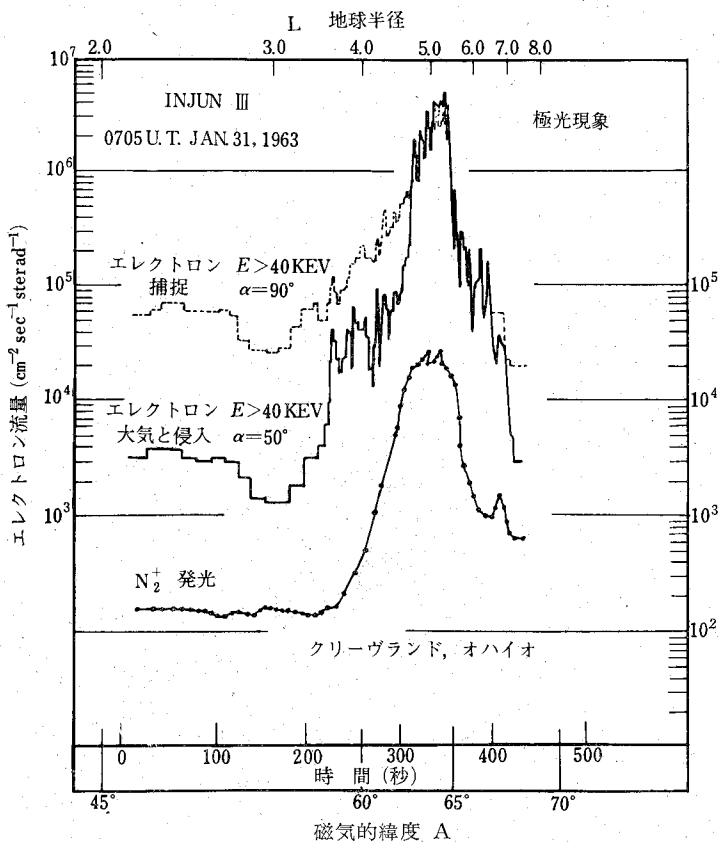
外帯電子  $E > 45$  KeV の分布のモデルが Anderson (1965)<sup>17)</sup> によって与えられている (第13図)。それによると、磁気圏内で観測される電子  $E > 45$  KeV は四種類に分類される。I は  $L \leq 8$  Re の領域にある電子で磁場に捕捉されている成分である。II はその外側の太陽側において地球のまわりを回転する完全な捕捉粒子ではない成分である。III は夜側において 12 Re 付近まで達し、磁気赤道面付近に集まっている。IV は磁場の尾の領域に間欠的に観測されるもので、電子は数分から数時間継続する孤立した幾つかの塊になって現われる。これら四つの成分がどのような機構で結びつけられているかについては、これからの問題であろう。

極光粒子 多くの人工衛星による観測にも拘らずまだ極光粒子については完全に理解されていない。しかし、

極光粒子 多くの人工衛星による観測にも拘らずまだ極光粒子については完全に理解されていない。しかし、



第13図 外帯電子 ( $E > 45 \text{ KeV}$ ) の分布モデル



第14図 極光現象の時の捕捉電子の大気へ侵入する電子の強度の関係

現在では少なくとも Störmer の考え (極光粒子が磁気圏外から直接侵入する) は断念せざるを得ない。また普段にある捕捉粒子がなんらかの原因で上層大気中に侵入してくると言う考えも改めなければならない。もし極光粒子が捕捉粒子によるものであれば、強い極光の際には、数秒で外帯の電子はなくなってしまうにも拘らず、極光は数時間続いている。O'Brien (1964)<sup>18)</sup> の観測によれば、捕捉粒子の流量が増すときには同時に大気中に侵入する粒子の流量も増えていることがわかった (第14図)。従って極光粒子の生因と捕捉粒子の生因とは共通でなければならない。また、常に  $10^4 \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  程度の電子 ( $E > 40 \text{ KeV}$ ) が極光帯に侵入しており、この流量が増えたときに極光が起ることが示されている。

極光の発光に寄与する電子は数 KeV 程度であるが、極光のときにはそれと同時に 100 KeV 位までの電子が大気中に侵入しており、このようなエネルギーの高い電子が放射する X 線が観測されている。

## 6. むすび

地球外気圏についての物理的背景はあらかし以上に述べたようなものである。まだまだ未解決の問題は山積しており、これらが一日も早く解決されてゆくことを希望する。

## 参 考 文 献

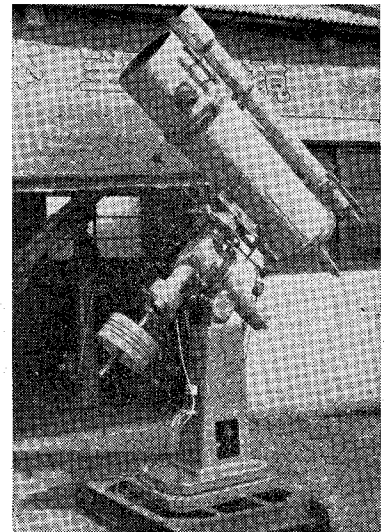
- (1) Öpik, E. J., and Singer, S. F., Phys. Fluids, 4, 221 (1961).
- (2) Jacchia, L. G., Rev. Mod. Phys., 35, 973 (1963).
- (3) Bauer, S. J., Electron Density profiles in Ionosphere and Exosphere, North-Holland Publish. Comp., p. 270 (1966).
- (4) Angerami, J. J., and Carpenter, D. L., J. Geophys. Res., 71, 711 (1966).
- (5) Thomas, J. O., and Dufour, S. W., Nature, 206, 567 (1965).
- (6) Eviatar, A., Lenchek A. M., and Singer S. F., Phys. Fluids, 7, 1775 (1964).
- (7) Serbu, G. P., Space Research V, p. 564 (1965).
- (8) Ness, S. F., J. Geophys. Res., 70, 2989 (1965).
- (9) Ness, S. F., and Williams D. J. J. Geophys. Res., 71, 322 (1966).
- (10) IG Bulletin, Transactions A. G. U., 45, 501 (1964).
- (11) Naugle, J. E., and Kniffen D. A., J. Geophys. Res., 68, 4065 (1963).
- (12) McIlwain, C. E., Science, 142, 355 (1963).
- (13) Freeman, J. W., J. Geophys. Res., 67, 921 (1962).
- (14) Brown, W. L., and J. D. Gabbe, J. Geophys. Res., 68, 607 (1963).
- (15) Davis, L. R., and Williamson J. M., Space Research III, p. 365 (1963).
- (16) Frank, L. A., Van Allen J. A., and Craven, J. D. J. Geophys. Res., 69, 3155 (1964).
- (17) Anderson, K. A., J. Geophys. Res., 70, 4741 (1965).
- (18) O'Brien, B. J., J. Geophys. Res., 69, 13 (1964).

西村製の

## 30 cm 反射望遠鏡

下記へ納入して好評を博しております

- 米 ゴッダード・スペース・フライト・センター  
ハインド J R 短期大学  
ムレ大学
- 英 オックスフォード大学
- スイス バーゼル大学



30 cm 反射望遠鏡

ニュートン・カセグレン兼用

株式会社 西村製作所

京都市左京区吉田二本松町 27  
電話 (77) 1570, (69) 9589