

L-3 ロケットによる粒子線の測定

中 川 重 雄*

Observation of Particle Fluxes by L-3 Rockets

By

Shigeo NAKAGAWA

Abstract: Using rocket-borne solid state detectors, the intensity distribution of proton and electron fluxes up to nearly 100km was obtained. The proton flux in the energy range 20 to 60 MeV is very weak and its altitude variation was not accurately measured. The average intensity obtained was 0.007 ± 0.0025 ($\text{cm}^2 \text{ sec str}^{-1}$). The electron flux above 470 keV energy increased with the rocket height and it seems to indicate the precipitation of electrons from the radiation belt.

The presence of deuterons, tritons and α -particles in the inner radiation belt according to the disintegration of oxygen nuclei by trapped protons and the relation of these secondary particles emitted from the belt with the low energy deuteron flux at the top of the atmosphere which was observed in the nuclear emulsion stack exposed to cosmic rays by the balloon, are discussed.

われわれ**の観測は半導体検出器を L-3 ロケットに搭載して、電子、陽子、重陽子、 α 粒子などの粒子線を放射線帯の周辺およびその内部で測定し、放射線帯の静的な状態や動的な状態について調べようとするものである。

(1) 放射線帯下辺の粒子線

第1表 陽子強度 (アルベド陽子)

場 所	検 出 器	高 度 (km)	陽子強度 ($\text{cm}^2 \text{ sec str}^{-1}$)	エネルギー範囲 (MeV)
Sioux Falls[1] (53.5°N)	エマルジョン スタック	~40	0.004 \pm 0.0004	82~305
			0.001 \pm 0.0002	82~105
赤 道[2]	半導体検出器	241~484	~0.004	27~60
鹿児島内之浦	半導体検出器	155~1000	0.007~0.0025	30~60

[1] H. Hasegawa, S. Nakagawa and E. Tamai: Nuovo Cimento, 36, 18 (1965)

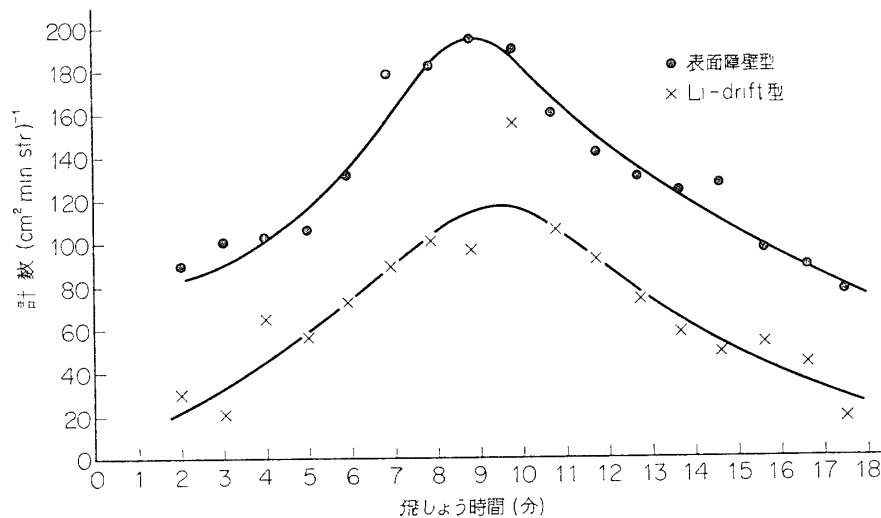
[2] E. C. Stone: J. G. R., 69, 3939 (1964) 還等して掲載

* 立教大学理学部

** 立大理 佃 正晃, 佐々木 確, 永田勝明, 東大核研 道家忠義共同観測

(a) 陽子線 検出器には表面障壁型を用い、1 MeV 以上のエネルギーを持つ陽子が検出できるようにした。観測結果は強度が弱く、高度変化についてははっきりと言えないので平均値を第 1 表に示した。表の値は検出器前面に吸収体を置いた場合のものである。われわれの分析した第 1 行の観測結果は東大理学部の小柴昌俊博士の米国 Sioux Falls において気球実験された原子核乾板を借用して分析したもので、乾板の下端より入射して乾板内で止まったエネルギー範囲の陽子線である。これらの陽子は宇宙線による大気からの二次陽子で上空に向けて放出されたアルベド粒子である。アルベド粒子は強度が弱く観測の精度は統計的にはよく無いが、この程度の値は各矛盾が無いことを示しているようである。しかしながら後に述べるように放射線帯から放出される陽子はこれと同じ程度の強度をもつと思われるのでわれわれのロケットによる観測はアルベド陽子のみとは限らないであろう。このような考慮からこの種の観測をさらに続行してより精密な分析を行なう予定である。

(b) 電子線 電子線の測定には表面障壁型と Li-drift 型を用い、検出の最低エネルギーを 470 keV まで下げて行なわれた。測定した強度の高度変化は第 1 図に示した。図の横軸はロケット発射後の時間を示してあるが、開頭高度は 155 km、到達最高々度は 1100 km



第 1 図 電子線強度分布

であった。電子線強度は高度と共に増加し、その源が比較的近い上方にあることを示している。Paulikas, Freden[1]は人工衛星による観測で比較的low緯度においても放射線帯からの電子のもれがあることを示し、特に $L=1.2, 2, 4\sim6$ にその強度のピークを認めている。われわれの結果もこのもれを観測したものと思われる。彼らと比較し電子エネルギーはわれわれの方が低いし、また L によるピークを観測したのでは無いようである。第 1 図には Li-drift 型検出器による方が強度が弱いことが示されている。表面障壁型よりも検出電子エネルギーがより高く、より範囲が広いところから、低エネルギーの方に強度のピークがあるとも思われる。

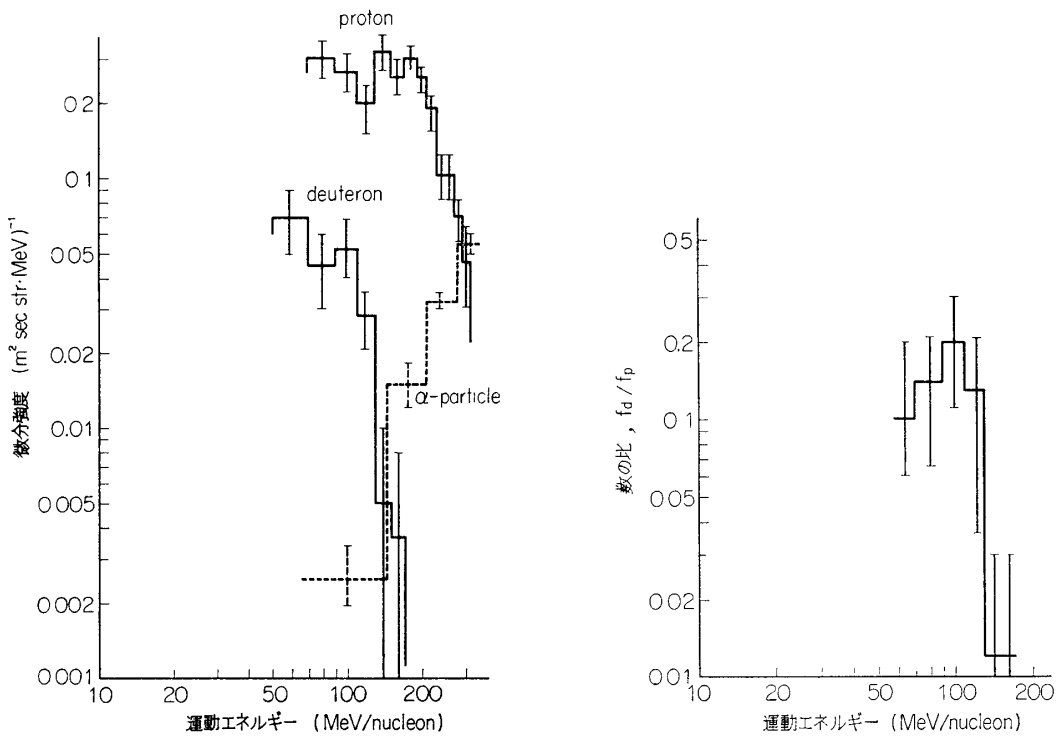
電子のこのような強いもれは、放射線帯の中の電場の乱れによる、特に低周波の電波と電子との相互作用によって起されるという説[2]が唱えられているが、そのような相互作用を

調べるにはさらにエネルギー分布, L による強度分布等の測定が今後必要である.

(2) 放射線帯内の粒子線

放射線帯内の陽子や電子については今までに多くの測定がなされ, そのエネルギー分布や空間分布はかなりよく調べられている. しかしながら重陽子, 三重陽子, α 粒子等の陽子より重い粒子についてはほとんど調べられていない. これらの粒子は原子核と陽子の衝突によって生成されやすい粒子であるから, 放射線帯の中にどれ位存在し, またどのように分布しているかを調べることは興味深い. 今までに放射線帯の中での直接測定は原子核乾板をロケットに積んで, それに写った飛跡の分布から存在比を調べたもので, 統計的に貧弱ではっきりしたものとは言えないが, 12MeV 以上の粒子で陽子の約 1% の重陽子が含まれていると言われている.

また放射線帯内の測定ではないが, (1) a において述べた Sioux Falls Stack からわれわれの研究室で伊藤謙哉氏等と重陽子と陽子の存在比を調べた結果を第 2 図 (a), (b) に示した. 気球の浮揚場所は米国テキサス Sioux Falls (53.5°N) で 2 g/cm^2 の残存大気の下で 8.8 hours 浮遊し, この間原子核乾板を宇宙線に照射したものである. 第 2 図でみると陽子



(a) Sioux Falls Stack による陽子, 重陽子分布 (b) Sioux Falls Stack による重陽子の存在比

第 2 図

は $300 \sim 80 \text{ MeV}$, 重陽子は $200 \sim 60 \text{ MeV/nucleon}$ にわたって銀河宇宙線と異なり, 低エネルギーの方に強度が増している. またこの地点での地磁気の cut off energy は重陽子で約 300 MeV/nucleon で, これらの粒子が通常の状態のもとでは地球の磁気圏外から入射したものでないことを示している. さらに α 粒子がこのエネルギー範囲に認められないことも注

意すべきである。

このようなエネルギー分布を持つ陽子線は太陽からの放出陽子か惑星空間にある期間をたくわえられたものという説を示した人もあるが、われわれはこれらの粒子は放射線帯から放出されるものと考えたい。

内部放射線帯は下端が数百軒から中心が数千軒の高度にあって、赤道から南北の地磁気緯度 40° あたりまで広がっている。その低いところにはなお残存大気が存在し、たとえば第 2 表のごとく高度によって水素と酸素の割合が異なっている。いまこれらの酸素原子と放射線

第 2 表 重な残存気体濃度 [I] (cm^{-3})

$r/R[2]$	O	O ⁺	H	H ⁺
1.10	1.2×10^7	5×10^5	10×10^3	—
1.20	2.7×10^4	2.5×10^4	6.6×10^3	9×10^3
1.30	1.7×10^2	1.7×10^3	4.4×10^3	8.6×10^3
1.40	1	1.3×10^2	3.1×10^3	5×10^3
1.50		11	2.3×10^3	3.7×10^3
1.75			1.25×10^3	2.1×10^3
2.00			8×10^3	1.3×10^3

[I] S. F. Singer and A. M. Lenchek · Progress in Elementary Particles and Cosmic Rayphysics chapter III による

[2] Rは地球半径

第 3 表 放射線帯に補捉される重陽子の計算値

(a) $1.57 R_E$

$\cos \alpha_e$	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9
$f_p(\text{cm}^3 \text{sec})^{-1}$	$2.6 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^3$	$5.8 \cdot 10^2$	32
$C_o(\text{cm}^3)^{-1}$	5	5	11	11	$1.3 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$	$1.9 \cdot 10^2$	$5.2 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^6$
$f_d(\text{cm}^3 \text{sec})^{-1}$	$8.7 \cdot 10^{-2}$	$9.7 \cdot 10^{-2}$	$3.4 \cdot 10^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-1}$	3.0	1.6	$6.1 \cdot 10^{-1}$	$8.0 \cdot 10^{-1}$	$7.3 \cdot 10^{-1}$

(b) $1.21 R_E$

$\cos \alpha_e$	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6
$f_p(\text{cm}^3 \text{sec})^{-1}$	$2.7 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^2$	$2.1 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$	50	12
$C_o(\text{cm}^3)^{-1}$	6×10^4	$1.2 \cdot 10^5$	$2.2 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^5$	$8.5 \cdot 10^6$	$5.1 \cdot 10^7$
$f_d(\text{cm}^3 \text{sec})^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-1}$	$4.2 \cdot 10^{-1}$	$4.0 \cdot 10^{-1}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$	$6.4 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$

存在比	高 度	$1.57 R_E$	$1.21 R_E$
	$\frac{f_d}{f_p}$		$\sim 4 \times 10^{-4}$

(注) α_e : 磁気赤道における pitch angle
 f_p : 放射線帯内の α_e の範囲内の陽子強度
 f_d : f_p によりつくられた重陽子の補捉線束強度
 C_o : 酸素核濃度

帯内に捕捉されている陽子との衝突を考えてみよう。

$O^{16}(p, d)O^{15}$, $O^{16}(p, t)O^{14}$, $O^{16}(p, \alpha)N^{13}$ のような反応によって重陽子, 三重陽子, α 粒子が放射線帯の内外部に放出される. 約 100 MeV 陽子の衝突により重陽子, α 粒子はそれぞれ約 15 mb, 30 mb の断面積で放出されるとしよう. かつ放射線帯内の陽子の南北の鏡点間の運動を, 赤道を通過するときの陽子と磁力線の間 pitch angle によって第3表のように $\cos \alpha_e = 0 \sim 0.1$, $0.1 \sim 0.2$, $0.2 \sim 0.3$, $0.3 \sim 0.4$, …… , などにわけ, この区間での陽子線とその酸素と原子の衝突を考える. 各区間で放出された重陽子, α 粒子などの中で, その区間の適当な pitch angle を持つものは捕捉され, そのほかは放射線帯外に放出される. かくのごとき区分によって各区間での弥散方程式を解いて得た重陽子の線束強度 f_a が第3表に記載されている.

かく計算した f_a と放射線帯内陽子線強度 f_p の比は内部放射線帯のほぼ中心部とみられる $1.57 R_E$ (3648 km) においては $f_a/f_p \sim 4 \times 10^{-4}$ で, $1.21 R_E$ (1344 km) では $f_a/f_p \sim 1.5 \times 10^{-3}$ と計算される. α 粒子と陽子の存在比は大体この倍となる. ロケットに搭載する粒子弁別装置によって各粒子数を測定し, この存在比を得て, 計算値と比較検討しようとするのである. もし観測して得られる存在比が, このような計算値と大いに異なるときは問題を新に見なければならぬ. もしこれらの推測値と大差無ければこの過程によって捕捉されない粒子は絶えず放射線帯の外に放出され, 前に示した Sioux Falls Stack に得られた重陽子, 陽子はこれらの放出粒子の強度と一致すると思われる.

放射線帯の下端から重水素, α 粒子の放出があるとして, これらの荷電粒子が地球磁場の力線に沿って $53^\circ N$ の上空4万米に置かれた原子核乾板の上にある 2 g/cm^2 の空気層で散乱し, 下向きの粒子が原子核乾板に記録されると考える. 途中の大气によるイオン化損失などを考慮するとき, 放射線帯の陽子の中で 100 MeV 以上のものが効果的である. 概算した結果は放射線帯の下端で約 10^{20} cm^3 の容積から放出された粒子が乾板中に記録されたものの源になるとすれば大体適合し, この容積は不当に大きいものでは無いと思われる. 前に述べたごとく α 粒子が観測されなかった原因は 200 MeV の陽子によっても約 30 MeV/nucleon 以下の粒子しか放出されず, これらは途中のイオン化損失も大で, Sioux Falls に到達しても観測にはかからぬので, この事実も上の考え方を支持するものである.

このように Sioux Falls Stack の分析により得られた銀河系の粒子以外の低エネルギー粒子は放射線帯よりの粒子とみなすことは適当であり, 放射線帯の内部の重陽子, α 粒子の検出そして陽子に対する存在比の検討は放射線帯の機構を再吟味すると共に, 陽子, 重陽子, α 粒子などの絶えざる放出を証明するものである.

われわれは L-3H による観測更に L-4SV による放射線帯中心付近の観測を行ない, これらの点を明らかにしようとしている.

1966年7月23日

参 考 文 献

- [1] G. A. Paulikas and S. C. Freden: J. G. R., 69, 1239 (1964).

[2] J. M. Cornwall: J. G. R., 69, 1251 (1964).

質 疑 討 論

近藤: 日本付近で V. A. belt から漏れてくる粒子を問題にする場合は, 同じ L の Shell が西方では高度が低く, したがって大気との衝突が大きくなる. このような粒子が drift してくることを考えに入れる必要があると思われる.

早川: 等松氏の予想によると数 100km 以上では酸素よりヘリウムの方が多そうだが, もしそうとすれば重陽子はおもに陽子とヘリウムとの衝突で発生し, α/p 比の推定値もそれに応じて大きくなるだろう. 中川氏の計算された高度でのヘリウム/酸素比について一言いっていただきたい.

等松; CIRA, 1965, p. 295, refer, O-He Transition Level.

Thermopause	h[He] = {0}	
Temperature		
2500°K	1250 pm	1×10^6
1273°K	750 pm	1×10^6
700°K	700 pm	2×10^5

注 [1] Thermopause temperature は

(1) Solar activity

(2) Local time

注 [2] He^+ , O^+ についてもその相対量によっても若干のデータがあり, Solar activity で著しく変化することが知られている.

前田(坦): 数百キロ以上での O と He の Solar activity による分布の割合は, Cospar International Reference Atmosphere 1965 が参考になると思う.

平尾: L-3H-2 には Mass-Spectrometer がつんであるので O^+ , He^+ , H^+ の比がわかると思う.