

地球磁場に伴う電子で励起される月の X 線

早 川 幸 男*

Possible Lunar X-Rays Excited by Terrestrial Electrons

By

Sachio HAYAKAWA

Abstract: Energetic electrons found in the tail of the magnetosphere are able to excite X-rays on the lunar surface, when they hit the moon. The flux of such electrons with energies of several KeV is observed as high as $10^8 \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$, and the bremsstrahlung X-rays of energy k in Δk excited thereby is as strong as $4 \times 10^3 (\Delta k/k) \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ at the lunar surface. The intensity of K X-rays, for example, of silicon is about $5 \text{KeV}/\Delta k$ times the bremsstrahlung intensity at the same energy. It is, therefore, suggested that the observation of such lunar X-rays provides information on the electrons in the magnetosphere as well as on the chemical composition of the moon.

前の論文[1]において、地球磁場の尾部で観測された高速電子[2][3][4]が月面で X 線を励起する可能性を指摘した。この議論の基礎にした実験データは、地球半径の 30 倍程度の遠方で、40KeV 以上のエネルギーの電子強度が時おり短時間ながら非常に強くなる、という事実であった。最近の実験[5][6]によれば、そのような電子の強度はエネルギーが減ると共に増す。 $\geq 40 \text{KeV}$ の電子の強度が時と共に激しく変化するのに対して、0.35—20KeV の比較的低いエネルギーの電子は定常的で、地球半径の 17 倍程度の距離でその強度は $(1-8) \times 10^8 \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ であった。

地球磁場の尾がもう少し延びて月まで達するならば、このような電子は月面に衝突して強い X 線を発生する。数 KeV の電子では、制動ふく射による X 線よりも特性 X 線の方が強い。特性 X 線を観測すると、KeV 領域における X 線のエネルギー分布と月面の化学組成がわかる[7]。このような月の X 線が観測可能であるかどうかをみるために、この X 線の発生率を推定してみよう。

40KeV 以上の電子による X 線発生は、前論文で取り扱ったので、今回は 20KeV 以下の電子によるものを考える。この領域でエネルギー分布は平らに近く、平均エネルギー数 KeV の指数関数形で表わされる。平均エネルギーは時によっていくらか変るが、数 KeV の電子で代表して差しつかえない。

これらの電子が月面に衝突すると、主として電離損失でエネルギーを失い、多重散乱で進路が曲る。そのため貫入する深度は高々 10^{-3}gcm^{-2} である。他方 Mg の KX 線 ($E_K=1.3 \text{KeV}$) の平均吸収距離は 10^{-3}gcm^{-2} だから、1KeV 以上の X 線を考えている限り、電子の

* 名古屋大学理学部

貫入深度は X 線の平均吸収距離より小さいと考えてよい。さらに月面はミクロン以下のスケールではざらざらしているから、発生した X 線の 1/4 はそとの空間に出るとしてよい。

電子の全方向強度を J とすると、月面に入射する強度はその半分である。入射した電子のエネルギーの f 倍が X 線に転化し、その 1/4 がそとに出る。それゆえ制動ふく射によるエネルギー k で幅 Δk 内に放出される X 線の強度は

$$I_b \approx \frac{1}{4} f \frac{1}{2} J \frac{\Delta k}{k} \quad (1)$$

転化因子 f の値は、月の物質中を通る数 KeV の電子に対して 3×10^{-4} 程度と推定される。 $J = 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ とすれば、(1) の値は

$$I_b \approx 4 \times 10^3 (\Delta k/k) \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \quad (2)$$

40KeV 以上の電子では $I_b \approx 10 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ であったのに比べて $[I]$, これははるかに強い。これだけの強度があれば、適当な角分解能の検出器をロケットに載せて月の X 線を観測することができる。

制動ふく射の X 線に比べて、K X 線の強度 I_k をそのエネルギー E_k で比べてみよう。原子番号 Z の元素の相対存在量を g_z とすれば、エネルギー E の電子に対して

$$\frac{I_k}{I_b} \approx \frac{3\pi}{8} \frac{1}{\alpha Z^2} \left(\frac{E}{E - E_k} \right)^{1/2} \omega_k(Z) g_z \frac{mc^2}{\Delta k} \quad (3)$$

ここで $\alpha = 1/137$, $Z^2 \approx 170$, ω_k は KX 線放出確率, $mc^2 = 510 \text{ KeV}$ は電子の静止エネルギーである。 S_i に対して $E_k = 2.75 \text{ KeV}$, $\omega_k(14) \approx 0.05$, $g_z \approx 0.2$ であるから、

$$I_k(S_i)/I_b \approx 5 \text{ KeV}/\Delta R \quad (4)$$

それゆえ S_i の KX 線は普通のエネルギー分解能をもつ比例計数管で観測できる。

他の KX 線の観測可能性は月面の化学組成による。もしそれが花崗岩に似ていれば、 S_i と O 以外の元素は少なく、1KeV 以上では Al の線が辛うじて観測にかかる程度である。しかしもしコンドライトの組成に似ていれば、Mg と Fe の KX 線が S_i のそれと同程度に強い。それゆえに X 線のスペクトル分析を行えば、月面の組成について重要な知識を得られるはずである。

もし酸素の KX 線 ($E_k \approx 0.5 \text{ KeV}$) が観測できれば、電子のスペクトルについての知識が増す。O は最も多い元素であるが、 ω_k の値が小さい上、もし電子のスペクトルが 1KeV 以下で平らなら、その KX 線は平均吸収距離も小さいので、 S_i の KX 線よりは強くない。しかしスペクトルが低エネルギーに向って強く増すなら、O の KX 線は強い。電子のスペクトルがこのような形である徴候は、月面における可視部のルミネセンスから予想される[8]。ルミネセンス光の強度を説明するには、約 $10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ のエネルギー流量が必要である。これに比べて測られている電子のエネルギー流量は高々 $10^2 \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ である。KeV 以下で電子のスペクトルがどうなっているかについて、O の KX 線は一つの手がかりを与える。もちろん月面で透明な可視線もこの目的のために使える。

前論文でも述べたように、月の X 線観測は地球磁場の尾の構造、それに伴う電子の強度とスペクトル、月面の構造を知るために重要である。この X 線は観測可能な強度なので満月の際に観測の行なわれることが望ましい。

1966 年 5 月 30 日

参 考 文 献

- [1] S. Hayakawa, : Rep. Ionos. Space Res. Japan, **19**, 375 (1965)
- [2] M. D. Montgomery, : S. Singer, J. P. Conner, and E. E. Stogsdill, phys. Rev. Letters, **14**, 209 (1965)
- [3] K. A. Anderson, : phys. Rev. Letters, **14**, 888 (1965)
- [4] K. A. Anderson, H. K. Harris, and R. J. Paoli, : J. Geophys. Res. **70**, 1039 (1965)
- [5] S. J. Bame, J. R. Asbridge, H. E. Felthausen, R. A. Olson, and I. B. Strong, : Phys. Rev. Letters, **16**, 138 (1966)
- [6] A. Konradi, : Goddard Space Flight Center, X-611-65-465 (1965)
- [7] S. Hayakawa and M. Matsuoka, : Rep. Ionos. Space Res. Japan, **16**, 341 (1962)
- [8] Z. Kopal, : Scientific American, **28**, No. 537 (1965)