

地球磁気圏尾部内における月面からの高エネルギー中性粒子

原田 裕己 [1]; 二穴 喜文 [2]; 浅村 和史 [3]; 齋藤 義文 [4]; 横田 勝一郎 [4]; 綱川 秀夫 [5]; 町田 忍 [6]; SARA team Stas Barabash [7]

[1] 京大・理・地球惑星; [2] IRF; [3] 宇宙研; [4] 宇宙研; [5] 東工大・理・地惑; [6] 名大・STE研; [7] -

Energetic neutral atoms from the Moon in the Earth's magnetotail

Yuki Harada [1]; Yoshifumi Futaana [2]; Kazushi Asamura [3]; Yoshifumi Saito [4]; Shoichiro Yokota [4]; Hideo Tsunakawa [5]; Shinobu Machida [6]; Stas Barabash SARA team [7]

[1] Dept. of Geophys., Kyoto Univ.; [2] IRF; [3] ISAS/JAXA; [4] ISAS; [5] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH; [6] STEL, Nagoya Univ.; [7] -

The lack of both a thick atmosphere and an intrinsic magnetic field of the Moon causes direct interactions between the lunar surface and its ambient plasma. While it has been thought that impinging charged particles are almost completely absorbed in the surface material, recent observations from Kaguya, Chandrayaan-1 and IBEX indicate that ~0.1–1% of the incident solar wind protons are scattered back as ions and ~10% as neutral atoms. The solar wind protons experience an average energy loss of ~90% when backscattered from the lunar surface as energetic neutral atoms (ENAs). Since the ENA flux emitted from the lunar surface reflects the incident ion flux there, the observed ENA flux is lower if the lunar surface is shielded from the solar wind ions by the crustal magnetic fields. Using these characteristics, ENA observations can be used as a remote sensing technique to investigate “mini-magnetospheres” formed by the lunar magnetic anomalies.

Here we report lunar ENA observations when the Moon was in the Earth's magnetotail. The Moon enters the terrestrial magnetotail for several days around full moon. In the magnetotail, the lunar surface is sometimes exposed to hot plasma of the terrestrial plasma sheet. During the time interval when MAP-PACE/LMAG onboard Kaguya as well as SWIM onboard Chandrayaan-1 observed plasma and magnetic-field signatures of the plasma sheet, CENA onboard Chandrayaan-1 detected ENA flux from the Moon. The observed ENAs were hydrogen atoms with energies slightly lower than the characteristic energies of the plasma sheet protons, suggesting that the plasma sheet protons are neutralized and backscattered from the lunar surface. We analyzed ion and ENA data obtained by SWIM and CENA over three consecutive orbits in the plasma sheet. We obtained the following results:

1) The energy spectra of backscattered ENAs are fitted by the Maxwell-Boltzmann distribution with the parameters of densities of $\sim 0.03 \text{ cm}^{-3}$ and characteristic energies of $\sim 100 \text{ eV}$.

2) The backscatter fraction, which is defined as the ratio of the backscattered ENA flux to the incident ion flux, is comparable to or slightly smaller than that in the solar wind.

3) No significant difference is found in the backscatter fractions in the northern and southern hemisphere at selenographic longitudes of $\sim 180 \text{ deg}$, where a large magnetized region exists in the southern hemisphere.

The last point shows a clear contrast with previous work on ENA imaging in the solar wind: The backscatter fraction in the southern hemisphere at longitude $\sim 180 \text{ deg}$ is reduced to half of that in the northern hemisphere because of the existence of large and strong magnetic anomalies in the southern hemisphere. The different signature of the ENA fluxes in the solar wind and the plasma sheet indicates that the lunar surface is effectively shielded from the solar wind protons by the magnetic anomalies, while many incident plasmasheet protons reach the lunar surface without being shielded. Difference between the beam-like velocity distributions of the solar wind protons and the broad velocity distributions of the plasma sheet protons may introduce different physical processes of the magnetic anomaly-plasma interactions near the Moon.

月には全球的な固有磁場や濃い大気がないため、周辺のプラズマが月面に直接入射する。月面に衝突した荷電粒子は、そのほとんど全てが表面物質内に吸収されると従来は考えられてきた。ところが、かぐや、 Chandrayaan-1 号、IBEX 衛星などの最近の観測から、月面に入射する太陽風プロトンの内、0.1~1%程度がプロトンとして、10%程度が中性の水素原子として上空に後方散乱することが明らかになった。月面に入射した太陽風プロトンは高エネルギー中性粒子 (ENA) として後方散乱する際に平均で 90%程度のエネギーを失うことがわかっている。また、月面から放出される ENA フラックスは、月面に入射するイオンのフラックスを反映する。そのため、月面が地殻磁場によって太陽風イオンからシールドされている場合、上空で観測される ENA フラックスが減少する。このように、月 ENA 観測は月磁気異常によって形成される「ミニ磁気圏」をリモートセンシングする手法として用いることができる。

今回われわれは、月が地球磁気圏尾部内に位置する時に月面上空で観測された ENA について報告する。月は満月の前後数日間、地球磁気圏尾部を通過する。月が地球磁気圏尾部内でプラズマシートに入ると、月面は高温のプラズマに曝される。かぐや衛星搭載のプラズマ・磁場観測装置 MAP-PACE/LMAG および Chandrayaan-1 号搭載のイオン観測装置 SWIM によって得られたデータから、月がプラズマシートに入っていると判断される期間に、 Chandrayaan-1 号搭載の ENA 観測装置 CENA によって月面からの ENA フラックスが検出された。観測された月面からの ENA は水素原子であり、この期間のプラズマシートイオンの特徴的なエネルギーよりもやや低いエネルギーをもっていた。このことから、検出された ENA はプラズマシートプロトンが月面で中性化し後方散乱した水素原子であると推測される。プラズマシート内で SWIM および CENA によって取得された、連続した 3 オービット分のイオンおよび ENA の同時観測データを調べたところ、以下の特徴が明らかになった。

1) 後方散乱した ENA のエネルギースペクトルをマクスウェル分布でフィッティングして得られる密度は 0.03 cm^{-3} 程度、特徴的エネルギーは 100 eV 程度である。

2) 月面に入射するイオンフラックスに対する後方散乱する ENA フラックスの比、すなわち後方散乱係数は、過去に導出された太陽風プロトンの後方散乱係数と同程度かやや小さい。

3) 南半球で大きな磁気異常が観測される月地理経度約 180 度を通る軌道について、南北半球で後方散乱係数に大きな違いはない。

3) の結果は、太陽風中の同じ経度での観測から導かれた、「大規模な磁気異常の存在する南半球では、後方散乱係数が北半球に比べて約半分になる」結果と対照的である。このことは、太陽風中では大規模な磁気異常によって月面がシールドされているのに対して、プラズマシート内では入射イオンの多くがシールドされずに月面に到達していることを示唆している。こういった違いを生み出す理由の一つとして、太陽風はイオン速度分布をビームとみなすことができる一方、プラズマシートではイオン速度分布が大きく広がっているため、太陽風中で形成される「ミニ磁気圏」とは異なる物理過程で、地球プラズマシートの高温プラズマと月面の磁気異常が相互作用している可能性が考えられる。