

ハレアカラ T60 望遠鏡のファイバー面分光器を用いた水星 Na 外圏大気の時空間変動の観測

#高鳥 尚子¹⁾, 鍵谷 将人¹⁾, 笠羽 康正¹⁾

(¹ 東北大学)

Observation of spatio-temporal variations in Mercury's sodium exosphere using the Haleakala T60 telescope

#Naoko TAKATORI¹⁾, Masato KAGITANI¹⁾, Yasumasa KASABA¹⁾

(¹Tohoku University)

Mercury possesses an extremely tenuous exosphere that contains alkali metals. In particular, the resonance scattering emissions of neutral sodium (Na) D-lines (589.0 nm, 589.6 nm) are bright enough to be observed even with ground-based small- and medium-sized telescopes. Compared with Earth, Mercury's smaller magnetosphere is estimated to vary on the order of several minutes under the influence of the solar wind, and its neutral exosphere is also expected to vary on similar timescales. Previous ground-based observations have occasionally revealed a double-peak (DP) emission structure in the Na exosphere, with intensity maxima near both poles. The north – south intensity ratio of these peaks has been observed to vary on timescales of about one hour and about ten minutes. These timescales are consistent with the scenario in which one of the Na sources is ion sputtering induced by the magnetosphere.

Ground-based observations have conventionally been performed using slit spectroscopy to capture temporal and spatial variations. However, obtaining two-dimensional spatial distributions with this technique requires slit scanning, which takes about one hour to map the entire Mercury disk. Minute-scale variations previously detected were obtained from fixed-slit narrow field-of-view observations. Thus, a new method is required to investigate global-scale variations.

We have been developing a fiber-fed integral-field spectrograph combined with an adaptive optics (AO) system on the 60 cm telescope (T60) at Tohoku University to capture global spatial distributions of Mercury's Na exosphere with a temporal resolution of several minutes. After the BepiColombo spacecraft enters Mercury orbit in late 2026, our ground-based observations will support exospheric remote sensing by the sodium emission camera MSASI onboard the Mio spacecraft, in coordination with in-situ measurements of the solar wind and magnetosphere.

T60 is located at the summit of Haleakalā, Maui, Hawai'i (3,040 m a.s.l.), and is capable of continuous remote operation. The fiber-fed spectrograph consists of a fiber image slicer and a high-dispersion visible spectrograph (spectral resolving power: 67,000). The fiber image slicer provides a field of view (FOV) of 1.5" × 1.5" per fiber, with 120 fibers arranged in a 10 × 12 grid, covering a total FOV of 15" × 18". With an integration time of one minute, Mercury's Na exosphere can be observed with a signal-to-noise ratio (SNR) of ~15. By coupling this system with AO, we compensate for strong daytime seeing. In spring 2025, we achieved a spatial resolution of ~1" (FWHM) in morning observations.

In our ongoing remote observations, one frame corresponds to one minute, consisting of disk observations (Disk, centered on Mercury) and background sky observations (Sky). A single observation cycle comprises 24 Disk frames (1 min × 24), 1 Sky frame (1 min), and 4 white-light frames (30 s × 4), completed in about 30 minutes. This enables monitoring of Na variations with one-minute temporal resolution. Under favorable weather conditions, observations can be performed for about six hours per day (excluding the meridian), allowing up to 12 cycles (~288 Disk frames) per day.

In spectral data, we subtract the Sky from the Disk and separate the Mercury surface reflection spectrum (continuum) and Na exospheric emissions (Na D1, D2 lines) to derive their spatial distributions. For the continuum, we compare the data with a Mercury reflectance model (Hapke model) using least-squares fitting to estimate the Mercury disk position and evaluate AO-corrected seeing.

When integrating Na D1 and D2 emission lines, a reliable evaluation of the Mercury surface reflected spectrum, including solar Fraunhofer absorption (Na D1, D2 absorption lines), is essential. The most reproducible method is to estimate this spectrum from the scattered sunlight spectrum (Sky), and we are refining this approach. Applying this method to the observation on May 7, 2025, we successfully constructed a "data pipeline for Na emission retrieval" that separates and integrates Mercury's Na emission lines properly. We will apply this analysis to accumulated datasets to test its feasibility.

In future work, we will evaluate the temporal variations of Na emission spatial distributions and compare them with previous studies (Masseti et al., 2017). We aim to verify whether ~10-minute scale spatiotemporal variations in the north – south intensity ratio can also be observed, and to establish a practical scheme for Mercury Na exosphere observations and analysis.

水星はアルカリ金属を含む非常に希薄な外圏大気を有している。特に中性 Na の D 線 (589.0nm, 589.6nm) による共鳴散乱発光は明るく、地上の中小口径望遠鏡でも観測可能である。地球と比較して小さい水星磁気圏は、太陽風の影響により数分のオーダーで変動していると推定され、中性の外圏大気も同様の時間スケールで変動すると予想される。これまでの地上観測では、水星 Na 外圏大気に南北の両極にピークを示すダブルピーク (DP) 発光が見られることがあり、その南北輝度比は 1 時間程度のスケールと 10 分程度のスケールで変化する。この時間スケールは、Na 生成要因の 1 つが

磁気圏由来のイオンスパッタリングによるとする場合のそれと一致しうる。

従来の地上望遠鏡観測では、スリット分光によって空間・時間変動が捉えられてきた。この手法で2次元空間分布を捉えるにはスリットスキャンが必要で、水星全球の分光撮像観測には約1時間を要する。従来観測で検出されてきた数分オーダーの変動はスリット位置を固定した狭視野観測で得られたもので、全球分布の変動観測には新たな手段が必要となる。

私たちは、東北大学 60cm 望遠鏡 (T60) にファイバー面分光器と補償光学 (Adaptive Optics) システムを結合させ、水星 Na 外圏大気の全球空間分布の変動を数分スケールで捉えることを目指した開発を進めてきた。2026 年末の BepiColombo 探査機の水星周回軌道投入後には、Mio 探査機に搭載された Na 発光観測カメラ MSASI による外圏大気リモート観測を支援、同探査機による太陽風・磁気圏 in-situ 観測と協調した観測を行う予定である。

T60 はハワイ・マウイ島ハレアカラ山頂 (海拔 3,040m) に位置し、遠隔操作で継続的観測が可能である。この望遠鏡に装着したファイバー面分光器は、ファイバー視野集積器と結合した可視高分散分光器 (波長分解能: 67,000) からなる。ファイバー視野集積器は 1 ファイバーあたり $1.5'' \times 1.5''$ の視野を持ち、120 本のファイバーを 2 次元 (10×12) に配列して $15'' \times 18''$ の視野を面分光する。1 分の積分で水星の Na 外圏大気を信号雑音比 (SNR) 15 程度で観測することが可能である。本装置に AO システムを結合させ、昼間の荒れたシーイングを補正している。2025 年春には朝方の観測で FWHM $1''$ 程度の空間分解能を達成した。

現在遂行中の一連の遠隔観測では、視野中心に水星を捉える観測 (Disk) と周辺背景光を捉える観測 (Sky)、それぞれ 1 分を 1 フレームとしている。観測の 1 サイクルは、Disk: 24 フレーム (1 分 $\times$ 24) $\rightarrow$ Sky: 1 フレーム (1 分) $\rightarrow$ 白色光: 4 フレーム (30 秒 $\times$ 4) で構成されており、約 30 分で完成する。これにより 1 分の時間分解能で水星 Na の変動が観測可能である。天候が適せば南中を除き昼間で累計 6 時間程度の観測が可能で、1 日に最大 12 サイクル (24 $\times$ 12 フレーム) 程度の水星観測が可能となる。

これらの分光データでは、Disk から Sky を除去した上で、水星表面の反射スペクトル (連続光) と水星外圏大気の Na 発光 (NaD1, D2 輝線) を分離し、それぞれの面分布を導出する。連続光データに対しては、水星反射光モデル (Hapke モデル) と最小二乗法を用いて比較することで、観測時の水星ディスク位置と AO 補正後のシーイング評価を行う。

NaD1, D2 輝線の発光の積分の際には、太陽フラウンホーファー吸収 (Na D1, D2 吸収線) を含む水星表面反射光のスペクトルの確実な評価が必要となる。これには、地球大気の散乱光スペクトル (Sky) から見積もる方法が最も再現性があり、手段の模索を進めている。今回、2025 年 5 月 7 日の観測データに対してこの方法を適用し、水星 Na 輝線を分離し適切に積分を行える「Na 発光導出のデータパイプライン」構築に成功した。これまで蓄積されてきた観測データにこの解析処理を適用し、実用可能か検討を進めていく。

今後は、Na 発光面分布の時系列変動を評価し、先行研究 (Masseti et al., 2017) との比較を行う予定である。先行研究と同様に南北輝度比に 10 分スケール程度の時空間変動が見られるかを検証し、水星観測・解析スキームの実用化を進めていく。