

吸収セルフィルタを用いた地球コロナ及び星間水素の観測

吉岡和夫⁽¹⁾, 桑原正輝⁽²⁾, 田口真⁽³⁾, 川原琢也⁽⁴⁾, 亀田真吾⁽³⁾, 吉川一朗⁽¹⁾, 中村正人⁽²⁾

⁽¹⁾東京大学, ⁽²⁾ISAS/JAXA, ⁽³⁾立教大学, ⁽⁴⁾信州大学

1. 本観測提案の目的

我々は S-520 観測ロケットによる高度 200-350km からの光学観測を通して, 太陽圏界面における水素の温度分布, および地球超高層大気における水素・重水素比の導出を目指している. 本集録では, まず観測提案の科学意義について述べる. さらに, 吸収セルと呼ばれる波長選別フィルタを用いた観測手法について紹介し, 具体的な観測提案を示す.

2. 星間空間水素

我々の太陽系は, 約 0.1 [個/cc] の星間ガス雲 (主に水素ガス) の中を突き進んでいるといわれている. これらの水素は太陽に近づくと電荷交換や紫外線照射により電離される. この星間水素と太陽風の相互作用の境界領域を太陽圏界面と呼ぶ. 太陽圏界面における相互作用 (電離やショック加熱) を経た水素は, 太陽近傍および下流に向かい, やや希薄な構造となる. 実際に 1970 年代に打ち上げられた NASA の Voyager 探査機が, 2012 年に太陽圏界面に到達したという報告があり, 実際に密度の不連続性および銀河宇宙線の増大を確認している²⁾. すなわち, 太陽系は本当に水素ガスの中を突き進んでいるということが証明された.

太陽圏と星間ガスの相互作用を調べる上で, 星間水素の温度・空間分布の情報は極めて重要である. 本提案研究では, 観測ロケットのロールスキャンを利用して水素吸収セルを用いた観測 (後述) を行い, 星間水素の空間分布及び温度分布を導出する. 探査機によるその場観測では, 到達までに 40 年近くの時間を要する規模の壮大な舞台であるが, 水素の輝線発光を用いた遠隔観測ならば, 太陽圏界面の物理を議論できる.

3. 超高層における D/H

惑星が保持する水の散逸過程を表す指標として水素・重水素の同位体比 (D/H 比) は重要である. 太陽光により H_2O が解離し宇宙空間へ散逸する過程で, 水素 (H) よりも重い重水素 (D) は相対的に多く大気中に残る. その結果, 大気中の D/H 比は時間が経つにつれて増加する. 磁場を持つ地球の大気は他の地球型惑星に比べて安定に進化してきたと考えられているため, 惑星の D/H 比の比較基準として地球の海水の D/H 比がよく用いられる^{3, 4)}. 一方で, 水が解離した結果生成される水素と重水素の散逸の現場は超高層領域である. そのため, 水の散逸過程の全体像を理解するためには超高層大気でのそれぞれの原子の振る舞いを知ることが重要である. 注意しなくてはならないのは, 惑星大気中の D/H 比は散逸結果のみを示しており, その値が散逸した水の量に直接対応しているわけではないということである. つまり, D/H 比から散逸した水の量を推定するためには, 大気の進化過程において“超高層大気”で起きる物理・化学過程を理解し, 散逸への寄与を知るこ

とが重要である。これらの過程からそれぞれの原子の散逸率を決めることで、全体としての散逸量を見積もることができ、さらに散逸の結果として得られる現在の D/H 比の値を説明できる。また、散逸過程は熱的と非熱的なものに大別される。これらを区別するために、それぞれの原子の密度・温度の分布を求め、熱的散逸過程を明らかにすることが惑星大気の進化過程の理解につながる。

4. 吸収セルを用いた水素原子の遠隔観測

ここでは、本観測研究提案の要となる水素観測用「吸収セル」の原理を述べる。

原子や分子は量子状態の遷移に伴い輝線を発する。水素原子において、最も遷移確率の高い主量子数 2 から 1 への遷移に伴って発する輝線をライマンアルファ（以下： $Ly-\alpha$ ）と呼ぶ。輝線幅は水素ガス自身の温度を反映し、波長遷移は観測者と対象天体の相対速度を反映する。例えば温度 1000K のガスの輝線幅は約 3pm、相対速度 10 km/s において波長遷移は 4pm となる。また、水素と重水素の $Ly-\alpha$ は質量数の違いにより波長が異なる（水素：121.534 nm、重水素：121.567 nm、波長差=33 pm）ため、これらを分光観測できればそれぞれの密度比を間接的に導出できる。

回折格子を用いた既存の分光技術でこれらの輝線を分離し、線幅やドップラー遷移を議論するための波長分解能を達成するためには、30 kg 級の大型分光器が必要である（例 NASA/MAVEN 探査機搭載の IUVS）。しかし本研究で採用する吸収セルフィルタを用いると、観測波長が $Ly-\alpha$ に限定されるものの、装置自体は 1~2kg 以下でそれらの観測が可能になる。

吸収セルは、ガラス製の容器（セル）に封入された水素による $Ly-\alpha$ の共鳴吸収を利用した“フィルタ”である。充填するガスの種類次第で水素、重水素それぞれの $Ly-\alpha$ を選択的に吸収できる超高分解能フィルタとして機能する。原理的には充填ガスの熱幅と同程度の波長分別精度を有しており、既存の分光器と比べて桁違いに小型軽量な装置で輝線を分離できる。

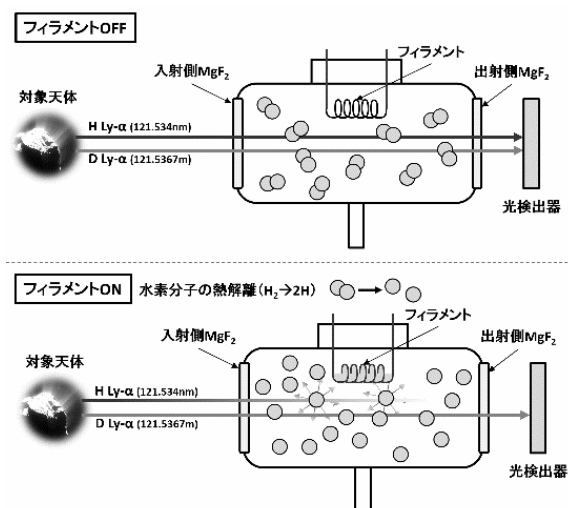


図 1. セルによる $Ly-\alpha$ の観測原理

図 1 に吸収セルの原理を示す。脱ガスの少ないガラス製のセルに水素分子を封入する。セル内のフィラメントを加熱すると、水素分子が解離・拡散され $Ly-\alpha$ を共鳴散乱できるようになる（出射

側から見ると吸収に相当)。フィラメント ON/OFF 時に検出器に到達する Ly- α の光量差から、対象の発光強度を導出できる。このとき、水素・重水素それぞれの Ly- α を選択的に吸収するため、極めて高波長分解能を実現できる。さらに、フィラメントの温度(消費電力)を段階的に変化させることで、吸収線幅を調整できるので、フィラメント温度と吸収量の関係から観測対象の温度(線幅)や速度(波長遷移)を導出できる。すなわち、フィラメントの電力が小さい(=セル内の水素原子温度が低い)ときは吸収線幅が細いため、高温な観測対象が発する Ly- α の透過率は高い。一方、フィラメントの電力が大きい(=吸収線幅が広い)ときは、低温な観測対象の光はほぼすべて吸収される。この原理を利用して、観測対象の温度を推定できる¹⁾。

5. 観測提案

我々が提案する装置の光路図を図 2 に示す。直径 25mm の開口部に、視野角 10 度の範囲で光を入射させる。初めに、透過波長幅 20nm 程度の干渉型フィルター(厚さ 2mm)を通して可視光等を遮蔽する。さらに、入射部のみ凸レンズの重水素セル、および出射部のみ凸レンズの水素セルを通し、検出器面上に集光させる。光学素子の数を極力減らすことで、短時間での観測でも高い S/N を実現する工夫を施す。なお、本光学設計では、0.1 mm 程度の現実的な設置誤差を許容しても、0.5 度の空間分解能は達成できるため、本申請提案の科学目標を達成するには十分である。

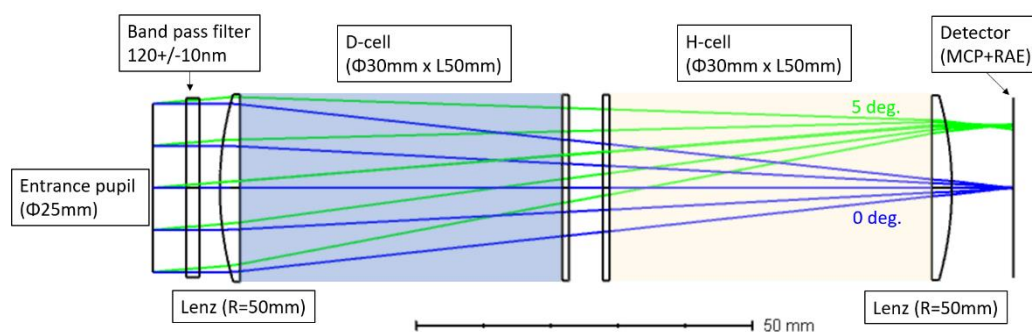


図 2. 吸収セル観測装置の光路図

ロケットの打ち上げ後、一定時間(約 60 秒を想定)が経過したのちに、精度 1 度程度のポイントングモードによる天頂観測を実施する。この観測の意図は、超高層大気の D/H の高精度測定である。夜面の任意の位置を継続的に指向し、その間に H セル、D セルを交互に ON/OFF することで、超高層における D/H を測定する。表 1 に、想定しているセル運用シーケンスを示す。3 秒毎に H セルと D セルの電力供給レベルを変更する(D セルは 1 段階のみ)。なお、画像(32KB/Image)は 1 秒毎にダウンリンクするが、セルの電力を変更してから吸収特性が安定するまで 0.5 秒ほど必要なため、各 3 秒のスロットのうち、中央の 1 秒間のみを解析に用いる。さらにその後、ロールスキャンモードを実施し、同様のセル運用シーケンスのもとスカイサーベイを実施する。後者の観測では、おもに星間水素の H 温度測定が目的である。

表 1. フィラメントの運用シーケンス

時間[s]	0	3	6	9	12	15	18	21	...
Hセル	OFF	Lv.1	Lv.2	Lv.3	Lv.3	OFF	Lv.1	Lv.2	...
Dセル	OFF	OFF	OFF	OFF	Lv.1	OFF	OFF	OFF	...

6. まとめ

我々は、小型ながら極めて高い波長選別特性をもつ吸収セル技術を駆使した光学観測装置を開発し、S-520 ロケットを用いた星間水素および超高層大気 D/H の測定を提案している。ここでは詳細を記載しないが、我々の吸収セル観測装置は、包絡域が 2U を下回り、質量は 2kg 以下である。吸収セルの技術は、小型軽量という特徴を活かして超小型探査機を用いた彗星マルチフライバイ観測など様々な用途が考えられる。本ロケット実験を通して、宇宙機搭載に向けて生じる不具合を徹底的に洗い出し、必要な諸条件を決定する。今後の幅広いミッションへの応用に向けた試金石になる。

7. 引用文献

- 1) Kuwabara et al. 2017, RSI
- 2) https://voyager.jpl.nasa.gov/news/details.php?article_id=112
- 3) Alexander et al. 2012, Science
- 4) Altwegg et al. 2015, Science