

# 月のナトリウム大気の観測に挑む

渡部潤一<sup>1</sup>

## 1. プロローグ

それは筆者がまだ学生の頃であった。たまたま図書室で覗き見たサイエンスに、水星でナトリウムの大気が発見された、との報告があった[1]。水星はそれまで、マリナー10号の探査で、ヘリウムなどのガスがごくわずかに存在する事が示唆されてはいたが、このナトリウム大気は、基本的には水星の重力にバウンドされている、すなわち分子の熱運動だけでは水星の重力圏を脱出できないものであり、希薄ながらも大気の定義を満たしているといってもいいものである。さらに筆者にとって衝撃的であったのは、この大気が探査機ではなく、地上の望遠鏡による観測によって発見された事である。重量の限られた検出器を探査機で運んで、現地で調べるよりも、場合によっては地上観測の方が、このような目的では優れている事を如

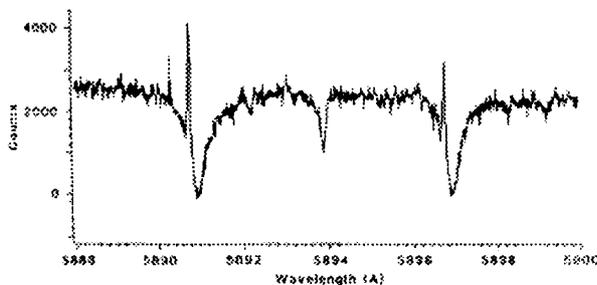


図1. 1985年に発見された水星のナトリウム大気から発する輝線 [1].

実に示した例といえるだろう。もちろん、普段から太陽のそばを離れる事の無い水星の観測には、たいへんな工夫があった。彼らはマクドナルド天文台の口径2.7m望遠鏡を、白昼堂々と太陽のそばにある水星に向けていたのである。検出されたナトリウム輝線から推定される水星表面でのナトリウムの量は1立方センチメートルあたり $1.5 \times 10^8$ 原子( $10^{16}$ パーブル)。マリナー10号で測定されたヘリウム濃度よりも2桁高い値である。

このナトリウムの起源は、おそらく水星表面からなんらかの原因で放出されたものであると考えられた。なにしろ重力的にバウンドされているとはいっても、太陽の強い紫外線によりイオン化したナトリウムは、太陽風に捕捉され、飛んでいってしまうので、常にどこからか供給されなくてはならない。その意味では、常に水星表面から供給されていると考えざるをえない。

ところで、それならば同じように固体表面を露出させている他の天体でも同様の希薄なナトリウム大気があるのではないか。そんな想いが大学院生であった筆者の脳裏をよぎった事は確かである。ここから、筆者の月のナトリウム大気への長い戦いがはじまった。

## 2. 月のナトリウム大気の見

水星にあるんだしたら月にもナトリウム大気があるかもしれない。しかしながら、一介の学生に、

<sup>1</sup>国立天文台光学赤外線天文学研究系

月のナトリウム大気を検出するという試みはあまりに野心的であり、また日本の地上望遠鏡群の貧弱さの前に断念せざるを得なかった。そのうち、圧倒的な物量を誇るアメリカの研究者は、着々と観測を行い、ついに1988年、月の周囲に希薄なナトリウム大気を発見したのである[2]。この発見を成し遂げたのは、水星でナトリウム大気を発見したポッターとモーガンであった。水星の時と同様、マクドナルド天文台の口径2.7m望遠鏡とキットピーク天文台にある太陽専用のマクマス望遠鏡を用いての観測で、ナトリウムだけでなく、カリウム大気も検出に成功した。

月の場合、もともとアポロ計画による測定では、ごく微量のアルゴンやネオン、ヘリウムなどのガスが質量分析計にかかっていたものの、とても大気と呼べるようなものではなかった。地上観測で発見された大気は、ナトリウムが表面で1立方センチメートルあたり67原子、カリウムが15原子という、水星に比較しても3桁ほど少ない値である。しかしながら、確かに月の重力に基本的には束縛されており、まさに大気と呼んでもいい性質を持っている。そのスケールハイト(大気量が1/eになる高

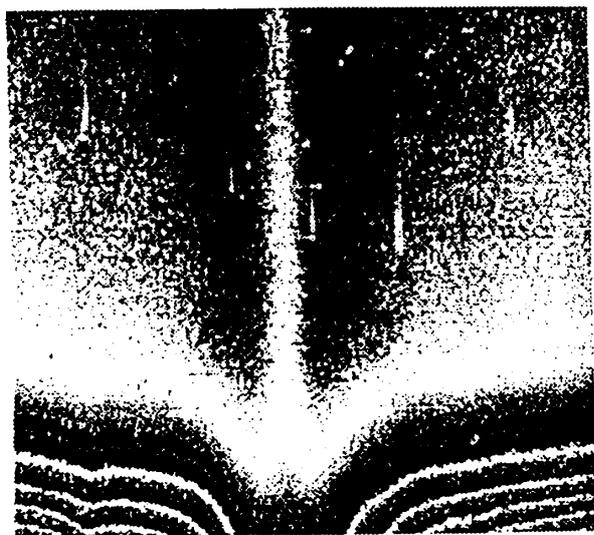


図2. 1988年に発見された月のナトリウム大気から発する輝線 [2].

さ)は、ナトリウムで120km、カリウムで90kmであった。もちろん、イオン化による太陽風捕捉で常に散逸していることから、水星同様、月そのものから何らかのメカニズムによって供給され続けているはずである。また、この観測では、カリウムの量も測定できた事から、月起源の別の証拠も示されたといえる。というのも、カリウムとナトリウムの存在比率が3~6:1となっていて、月のレゴリスの値とよく似ているという事実である。供給メカニズムとしては、太陽風による sputtering、小さな塵などが月表面に衝突しておきる vaporization、光子による表面物質からの解離などが考えられる。おそらく、これらのいくつかが複合して月表面から供給されているのだろう。もちろん、Internal release なども考えられるが、現状では実証されたとはいえない(本特集、柳沢氏の記事参照)。

ところで、水星に比べれば月の大気は薄いものの、地球に近いために大気が放つ光の強さは水星よりも強い。ナトリウムはD線と呼ばれるオレンジ色の輝線を放つ事で有名で、大気光の分野でもよく知られているが、通常の地球大気のもろさが数百レーリーなのに対して、月の場合にはキロレーリーレベルである。その意味では月の大気は水星に比べれば観測しやすいわけである。ただしひとつ大きな問題は、月本体そのものが明るすぎて、通常は十分な工夫しないと観測しにくいことである。最初の発見後、月の大気に関しては、さまざまな観測が行われるようになった。とりわけ、アメリカやヨーロッパの地上望遠鏡により、高分散観測をはじめとする種々の観測が行われるようになり、日本の出る幕はますます無くなっていくように思われた。また、この頃の筆者の状況はというと、ちょうど東京天文台に職を得て、夜天光の観測に従事し始めたばかりであった。この観測業務は、ナトリウム大気光の観測も含んでいたこともあって、少しは勉強になったものの、月の大気へ振り向け

る時間的余裕はほとんどなかった。

### 3. 変動する月の大気

ところで、いろいろな観測が進んでいくうちに、ナトリウムの大気密度がいろいろな観測によって異なる事が指摘されはじめた。観測時期によって、測定されるナトリウム大気のスケールハイトが120kmから600kmと大きくばらついていたのである。また、1993年になると、コロナグラフによって撮像観測が成功し[3]、グローバルな大気分布も明らかにされた。それによると極方向と赤道方向との差が7倍近くあり、isotropic source(大気の分布の球対称成分に寄与する供給源)が15%、solar-induced source(赤道部を中心とした大気の供給源)が85%と推定されたが、この観測でも高温のHot componentが存在し、その量変動していることが指摘されている。ちなみに、この観測は口径10cm程度の小さな望遠鏡をコロナグラフに改造し、CCDを装着しただけの簡単なシステムである。

このような大気密度の変動原因は、ナトリウムの逃散率の変化か、あるいは供給のメカニズムの変化かどちらかであろう。理論的にはナトリウムの逃散のタイムスケールは6万秒程度であり、これは太陽の紫外線によって決まっており、それほど動くとは思えない。とすれば、供給側のメカニズムに依存しているのではないだろうか。逆に、その放出率が一定ではないなら、その変動の様子を探る事で、放出のメカニズムを特定することができるに違いない。さらに、月の岩石にはナトリウムなどの元素が欠乏していることが知られているが、大気強度の変動原因を調べることにより、こういった元素の散逸メカニズムを知ることができ、月の起源を考える上でも重要であろう。

このような大気変動が本当であれば、そして、時間変動のタイムスケールが短いならば、世界的に

は鼎(かなえ)の三脚の位置にある日本の地理的条件を生かし、ヨーロッパ、アメリカの観測を補填する意味でも独自の観測的寄与ができるはずである。

1992年頃になると、筆者の観測経験も豊富になり、次第に本業である彗星以外にも手を出すことが可能となってきた。とりわけ、1988年の国立天文台改組の余波を受け、夜天光業務が新潟大学へ引き継がれる事になり、筆者自身は1991年のハワイ大学滞在を契機に、この夜天光観測から手を引いた。ハワイから帰国後、日本ではどのような観測が可能か、の検討を始めた。もちろん、分光観測で最も適していたのは、いうまでもなく国立天文台岡山天体物理観測所の口径188cm望遠鏡であったが、これは現在日本一の望遠鏡ということもあって、月の大気といったチャレンジングな観測に使づらい状況にあった。そこで、われわれは太陽観測用に高分散の分光装置を持つ乗鞍コロナ観測所の口径25cm望遠鏡を用いての観測を試みることにした。透明度の良い高山の山頂にある乗鞍では、秋の移動性高気圧に覆われる時、ときどき素晴らしい大気状態(シーイング)に恵まれることがある。25cmと口径こそ小さいが、なんとかナトリウム大気を検出し、その定量化ができるはずだ、と考えたのである。ちょうど、コロナ観測所勤務であった福島英雄さんが一緒に観測計画の検討に加わってくれた。時に1993年の事であった。

### 4. 乗鞍コロナ観測所での初挑戦

われわれが国立天文台乗鞍コロナ観測所に赴いたのは、1993年9月末の事であった。標高3000m近い高山の山頂付近にあり、大気が透明で散乱が少ないためにコロナのような希薄な現象を観測するには適している。太陽のコロナは、太陽という強い光源のそばにあること、その光量の弱さのために、太陽を隠すコロナグラフ光学系を通して、地

上ではなかなか観測できない。このような高山でなくてはコロナの観測は難しいのであるが、月の大気も、考えてみるとコロナとほとんど同様の観測対象であり、この観測所も有効に利用することができる。しかも、太陽は昼、月は夜の観測になるので、観測そのものも本来の目的である太陽の観測を邪魔せずに遂行できるメリットがある。コロナ観測所は当時はまだ共同利用に供されていなかったが、観測所と協議の上、利用させてもらえる事になったのである。

利用する乗鞍コロナ観測所の口径25cmコロナグラフは、観測所でも最も新しい装置である。クーデ式となっており、光は望遠鏡を支える不動軸の中を通過して、隣の分光室に導かれ、回折格子を用いて分光される。太陽用なので分散はきわめて高い。分光装置の検出部分には、それまでは写真乾板が用いられていたが、ちょうど水冷式の冷却CCDがとりつけられ、その試験的な観測が行われていたので、われわれもこのCCDを使わせてもらう事にした。

1993年9月26日、夜にはほとんど開く事の無かった25cmコロナグラフドームのスリットが開いた。月明かりの中、白く輝くドームがまわりの山々をバックに映えていた。まず、太陽用に監視モニターに挿入されているHa輝線の干渉フィルターをはずし、月が見えるように焦点調整を行う。ついで月の光をコロナグラフに導き、ナトリウムの吸収線を探す。通常、月の表面は太陽光の反射成分が卓越しているので、太陽のスペクトルに顕著なナトリウムの吸収線が見えるが、その吸収線がちょうど検出部にあたるように回折格子の角度を調整する。1時間ほどでこまごまとした観測準備が終わり、まずは望遠鏡を天頂に向け、大気光ナトリウムが検出限界以下であることを確認、さらに月の縁へ向けて30分ほど露出を行ったが、一見しただけでは検出できていなかった。

この日の観測の経験を元に、翌27日の夜には3時間にわたる長時間露出を行った。これは辛い観測であった。月は太陽や星の動きとは異なり、相当はやいスピードで東へ動いていく。そのため、観測中は望遠鏡から月が逃げないように、ずっとガイドを続けなくてはならない。口径の小ささを補

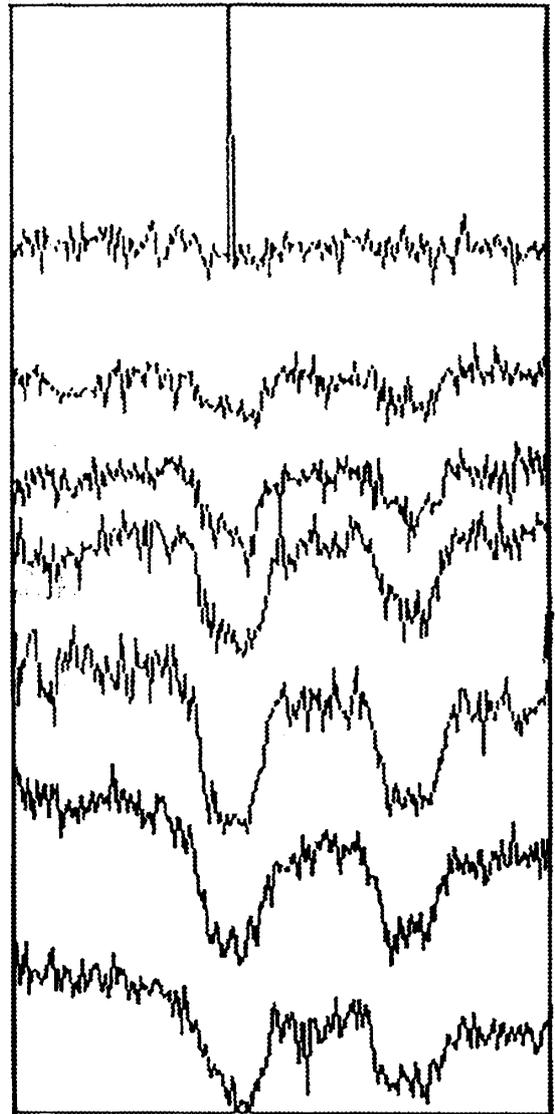


図3. 1993年9月に乗鞍コロナ観測所25cmコロナグラフで行った観測結果。小口径のために3時間という長時間露出を行ったが、適当なCCD(長時間露光に耐えるような冷却CCD)がないことなどが原因で散乱によるナトリウムD線の吸収線の上にわずかに輝線が見える程度であった。横軸波長範囲は図1と同じ。

表1. 1995年秋に行われた月の大気キャンペーンに参加した観測グループ一覧

Sprague and Hunten group	7" telescope and coronagraph	分光
Mendillo group	10-cm telescope direct coronagraph	撮像
Flynn, Stern, and Emerson	0.25m, f/4.5 reflector Keeler Obs.	分光
Barbieri and Contarini	1.8m telescope at Asiago Obs.	分光
Potter and Morgan	McMath-Pierce Solar Telescope	分光, 撮像
Watanabe, Oshima, and Ayani	1m telescope at the Bisei Obs.	分光

うには、長時間の露出が必要ではあったが、3時間の露出中、1時間ずつの交代で望遠鏡のガイドを行うテレビモニターに張り付くという、最近では経験しないような観測を行ったのである。その成果としては、あまりにも貧弱ではあったが、なんとか深い吸収線の上にわずかにのった輝線成分を捉えることには成功した(図3)。ただ、S/Nがかせげなかったこと、それに利用させてもらっていたCCD装置が長時間露出に耐えられず、暗電流が安定していなかった(太陽観測の場合はこのような長時間観測の必要がない)ため、定量的なことは何もいえない状況であった。

## 5. 美星天文台での再挑戦

25cmという口径の小ささによる光量不足とそのとき利用したCCDの欠点により、なんとかそれらしい輝線成分の検出には成功したものの、ナトリウム大気の定量的な解析を行えるほどのデータにはならなかったのは悔しかった。この経験から、やはり口径は大きな方がいい、と再挑戦を考えた。大口径望遠鏡に分光観測装置があるのは岡山の188cm以外では、地方自治体の設立した岡山県美星町にある美星天文台の101cm望遠鏡が最適である。ここには銀河の分光観測で博士号をもらった綾仁氏が勤務しており、相談にのってもらえるメリットもある。

さらに、1995年秋には、月の大気の国際観測キャンペーンが行われる事になった。このキャンペーンはまさしく、月の大気を世界同時に観測する事で、その時間変動を追うためのものであった(表)。われわれは、まさに鼎(かなえ)の三脚のひとつとして、このキャンペーンに参加する事になったのである。そして、われわれの観測の意義を美星天文台の綾仁氏らに認めてもらい、キャンペーン期間に観測させてもらえる事になった。時に1994年9月中旬、乗鞍の観測から、ほぼ1年後のことであった。

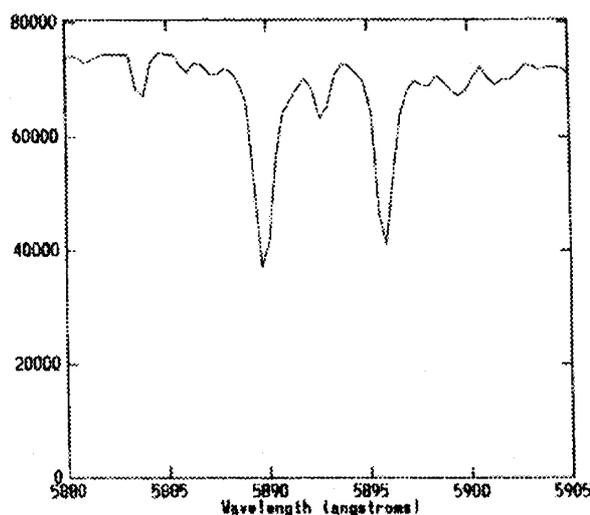


図4. 1995年9月に美星天文台101cm反射望遠鏡カセグレン分光器での観測結果。トータルな分解能が不足しており、ナトリウムD線の吸収線の上の輝線が分解されていない。

9月18日夜、美星天文台の大島氏、綾仁氏の両スタッフに手伝ってもらいながら、口径1m望遠鏡を月に向ける。その分光器にとりつけられたCCDから送り出される出力がコンピューター画面に出力される様子を、心踊らせながら眺めていた。ところが、テストで撮影した雲間からの月表面のデータは、予想に反して、分解能が足りなかったのである。これは意外であった。分光器そのものの波長分解能は目的を満たしていたのだが、残念ながら検出器のCCDのチップの粗さで決まっていた。そのために、ナトリウムの吸収線の存在そのものはわかって、その中ののりであろう輝線成分を抽出することはほとんど不可能と思われた(図4)。われわれ側の事前調査不足であった。

## 6. 岡山天体物理観測所での挑戦

乗鞍では光量が不足し、美星では分解能が不足している。日本でまともに月の大気を観測できるのは、どうも岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡しかない。そう考えたわれわれは、1996年度の岡山へ観測申し込みを行う事に決めた。しかし、筆者自身は気が進まなかった。私自身がプログラム小委員会のメンバーだったこともあり、競争の厳しさをよく知っていた。岡山188cm望遠鏡の観測時間割当に対する競争率は2倍近い。その競争の中で、とりわけ月という一見古典的な天体の観測が説得力を持つであろうか。ただでさえ、太陽系天体や惑星科学への偏見があって、天文学プロパーの審査員の評点は低くなりがちなのである。

果たして、その予想は当たっていた。見事にプロポーザルは落選した。プログラム委員会でも救いようのない低得点であった。また、筆者にとっても岡山のプロポーザルの落選は初めての事であった。しかし、これで諦めるわけにはいかない。審査員の一人が示唆したように、この観測所にはも

うひとつ、65cm太陽クーデ望遠鏡がある。この望遠鏡は太陽専用であるために、分光装置の分散は高く、その点ではまったく問題はない。そして、口径25cmに比べると、約8倍の集光力がある。問題は、特別な目的のために作られたためちやくちやくに長い焦点距離を持っているため、光量ロスがかなりに上ると考えられる事である。ただ、撮像部分にはわれわれが持ち込む空冷式冷却CCDが簡単にとりつけられそうであった。そこで、岡山天体物理観測所の前原所長と相談し、真冬の時期、ちょうどヘル・ボップ彗星が観測できない時期を狙って観測を試みる事になった。

12月18日、CCDも無事に装着し、太陽を用いてのナトリウムD線の位置確認も終了し、あとは月が上ればいだけになっていた。ただ、少々難点は、スリットの部分でガイドする必要がある事だった。この望遠鏡は少々旧式で、鏡になったスリット部分を2mほどのところからガイドスコープで覗きながら、目的の部分のスリットに落とし込む必要があった。このガイドがたいへんで、腰を曲げなが

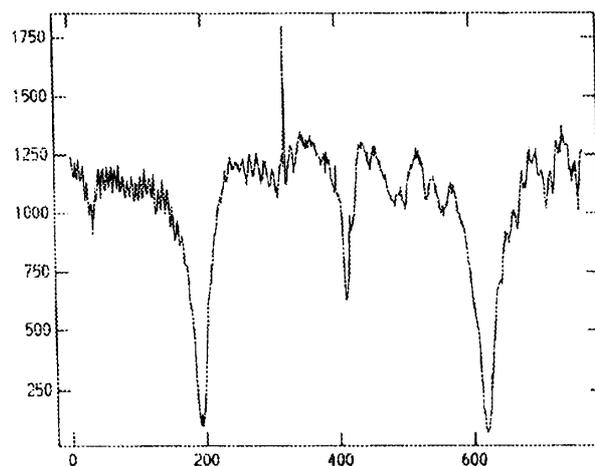


図5. 1996年12月に岡山天体物理観測所65cm太陽クーデ望遠鏡での観測結果。まだまだ光量不足であった。

ら小さな接眼部をのぞき込まなくてはならない。このような状態で、1時間から1時間30分にわたって、スリットに写った月の像をガイドスコープで覗き続けるのは、たいへんな苦勞であった。そのせいで痛めた腰はまだ直らない。

しかし、その結果は残念ながら、良好とはいえなかった。冬のシーイングの悪さも災いした上、太陽専用という光量不足に対する配慮がされていない光学系のため、結局はナトリウムの痕跡さえ捉えた、とはいいがたい結果であった(図5)。

## 7. そして、これからの挑戦

われわれは、これらの観測経験から、日本国内ではおそらく、岡山188cmのクーデ分光器だけが実質的な観測を行える装置であると認識するに至っている。アメリカの観測条件は日本に比べて抜群によい。それは大気の透明度だけでなく、シーイングも影響している。これは星の像が大気の揺らぎで広がってしまう度合いであるが、日本の場合はアメリカに比べて平均数倍違う。例えば、5倍ちがえば、単位面積あたりの光の量は25倍違ってくる。面光源の時にはそれほどではないにしろ、月の大気のように、そばに明るい光源があるとその光がどうしても漏れ込み、S/Nを悪くしてしまうわけである。その点では、アメリカでも月の大気分光観測には最低1mの口径が必要といわれている観測では、岡山188cm以外には考えられないわけである。岡山188cmのクーデ焦点の分光器では、おそらく意味のある観測を行えるであろう。

これ以外にできることは、撮像観測である。ナトリウム大気は広がっているときには月表面から600kmほどのスケールハイトを持っている。それ以上に広がっている成分でも地球大気成分に比較すれば、明るい。コロナグラフと組み合わせたようなうまい広視野光学系を用いれば、そういっ

た観測は十分に可能であろう。まだまだ、われわれの挑戦は続くのである。

## 8. エピローグ

1997年4月1日、太陽に約1億4千万kmにまで接近したハール・ボップ彗星は、さまざまなメッセージを残して、再び漆黒の宇宙空間へ、2400年余りの長い長い旅に出た。しっかりとした尾をたなびかせ、マイナス1等という堂々とした輝きは、多くの一般の人の注目を集め、まさに今世紀最後を飾るグレートコメットであったといえるだろう。ところで、この彗星でもナトリウムの放出が特異な形で観測された。

もともと明るい彗星では、その頭部にナトリウムが検出されることは、かねてから知られていた。その後、ハレー彗星、百武彗星の核近傍でも観測されたため、ハール・ボップ彗星では、われわれも注目し、そのための干渉フィルターを作成して、核近傍でナトリウムの発光を追いかけていた。しかし、特に頭部に注目していたために、われわれの広角撮像チームでは、ナトリウムはまったく考えていなかった。ところが、イタリアなどの観測チームが今回新しく「ナトリウムの尾」を発見したのである[4]。

いままで彗星には2種類の尾があるといわれていた。ひとつは、青白く光るイオンの尾で、主に一酸化炭素イオンである。もうひとつは、太陽の光を反射して光る塵の尾である。さて、今回見つかったナトリウムの尾は、これらふたつの尾の範疇には入らない。光っているナトリウム原子で、イオンでもないし、塵でもないからである。伸びている場所はイオンの尾に近いものの、イオンの尾が枝分かれしたような複雑な構造を持っているのに対して、ナトリウム原子の尾は、さらに直線的である。彗星の第3の尾、中性原子の尾の発見で

ある。この尾がどうしてできるのか、太陽光を反射しないような小さな塵からの放出か、その放出メカニズムは月の大気と同じなのか。謎解きはこれからである。

## 参考文献

- [1] Potter, A. E. and Morgan, T.H., 1985: Discovery of Sodium Atmosphere of Mercury. *Science* **229**, 651-653.
- [2] Potter, A. E. and Morgan, T.H., 1988: Discovery of Sodium and Potassium Vapor in the Atmosphere of Moon. *Science* **241**, 675-680.
- [3] Flynn, B. and Mendillo M., 1993: A Picture of the Moon's Atmosphere. *Science* **261**, 184-186.
- [4] Cremonese, G., Fitzsimmons, A., and Pollaco, D., 1997: Press Release ING 4/97 European Astronomers Discover New Type of Comet Tail. [http://ing.iac.es/PR/Press\\_Release\\_ING497.html](http://ing.iac.es/PR/Press_Release_ING497.html)