

## ナトリウムテイル

河北 秀世 < kawakita@astron.pref.gunma.jp >

### (1) ナトリウムテイルの発見

彗星の尾 (tail) といえば、イオンの尾および塵の尾が有名である。これらはそれぞれ太陽風および太陽輻射圧によって尾の形状を成すものであり (別章参照のこと) タイプ I、タイプ II の尾と呼ばれることもある。これらに加えてタイプ III の尾とも呼ばれるのが、本章で紹介するナトリウムの尾 (sodium tail) である。

彗星における中性ナトリウム輝線 (D線、波長 589nm) の観測は、1882 年の二つの大彗星 (1882I、1882II) における眼視観測にまで歴史をさかのぼることができる。そして 1910 年には、プリズムを用いた眼視観測により、中性ナトリウム輝線が C<sub>2</sub> の Swan バンド輝線よりも尾の方向に広がっていることが確認されている。そして、1957 年には Mrkos 彗星において、対物プリズムを用いて 7 度にもおよぶ直線的なナトリウムの尾を写真撮影することに成功している (以上、Levin 1964 を参照)。近年において、もっとも顕著にナトリウムの尾が観測されたのは、1997 年のヘール・ボップ彗星であろう。イタリアの G. Cremonese らは、35mm 判カメラのズームレンズ (f/3.5) と冷却 CCD カメラ、そして D 線の光のみを透過する特殊なフィルターを用いて、ヘール・ボップ彗星におけるナトリウムの尾の撮像に成功した (Cremonese et al. 1997)。D 線の波長付近には、水のイオン ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ) の輝線も多数存在していて、非常にまぎらわしい。ナトリウム起源の輝線かどうかははっきりさせるため、Cremonese らは D 線の波長だけでなく、 $\text{H}_2\text{O}^+$  が光を多く出す波長域 (D 線は含まれないように選ばれている) でもヘール・ボップ彗星の撮像を行った。その結果、 $\text{H}_2\text{O}^+$  イオンの尾よりもずっと細くシャープな尾が、ナトリウム D 線の波長でとらえられた。あきらかにイオンの尾と異なる構造であることから、これがナトリウムの尾であると確実視されるようになったのである。

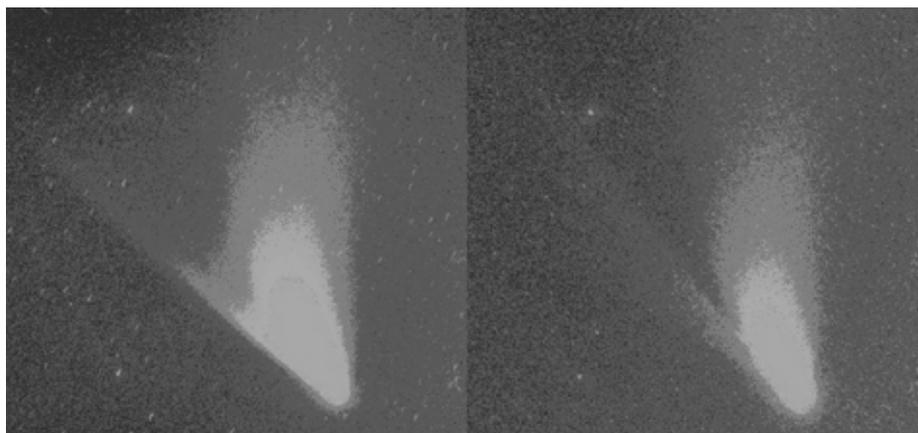


図 1 : ヘールボップ彗星におけるナトリウムの尾 (Cremonese et al. 1997)。左は D 線を通すフィルターを用いた場合の画像、右は  $\text{H}_2\text{O}^+$  イオンの出す光を通すフィルターを用いた場合の画像。共に、塵による散乱光も含まれているため、幅広い塵の尾も写っている。

## (2) ナトリウムテイルの形成理論

ナトリウムの尾は、中性ナトリウム原子の作る尾である。中性なのでイオンの尾のように太陽磁場によって運動を制限されるわけではなく、尾を作る原因としては塵の尾にむしろ近い。つまり、太陽輻射圧の影響によって尾構造をなすのである。中性ナトリウム原子に限らず、原子、分子が太陽光を受けて蛍光放射する場合には、原子や分子が太陽から飛んできた光子（フォトン）を吸収し、その運動量を受け取ることになる。受け取ったフォトンのエネルギーは再び原子・分子から放射されるが、その反作用として原子・分子は更に運動量を受け取る。ただし、放射されるフォトンの方向はランダムに決まるため、いくつもの放射過程の平均をとれば、どの方向にも運動量を受け取っていないことになる。一方、太陽からのフォトン（彗星の運動が無視できるくらいの間であれば）同じ方向からやって来るのだから、常に一方向からの運動量を受け取ることになる。こうして実効的に受け取った運動量が輻射圧として作用しているのであるが、通常の原子や分子では、その質量に対して、蛍光係数（ $g$ ファクター）が大きくないために、おおむね無視できる程度の作用しかない。とはいえ、大きな $g$ ファクターを持つCN分子などは、コマの形が球対称からかなりずれてしまう。つまり、その質量に比べて非常に大きな $g$ ファクターを持つような原子・分子については、輻射圧によって大きな影響を受けるということになる。中性ナトリウム原子は、まさに、そのような原子なのである。

中性ナトリウムのD線は、波長 589nmにある二重線（ $D_1$ と $D_2$ からなる）であり、非常に大きな $g$ ファクターをもちうる。ある輝線の $g$ ファクターは、太陽からの入射フラックスと、その輝線を引き起こす遷移の起きやすさとの掛け算で決まる。ところが、ある波長における太陽からの入射フラックスは、原子や分子が太陽に対して運動しているとドップラー効果によって若干変動する（Swings効果）。特に中性ナトリウムのD線については、太陽スペクトル中にも中性ナトリウムによる深くてシャープな吸収線が存在するために、わずかな相対速度の違いで、入射フラックスが大きく変動してしまう。太陽に対して速度ゼロの場合には、太陽からの入射フラックスは最小となる（ナトリウム原子から見れば、波長 589nmとは、太陽フラックスにおけるD線の吸収の底部分である）。しかし、ナトリウム原子が太陽に対して相対速度を持つと、ナトリウム原子から見た波長 589nmにおいては、太陽スペクトルの吸収の端が入射することになり、大きなフラックスを波長 589nmで受け取ることができるようになる（図2）。図からも分かるように、太陽に対して非常に大きな相対速度を持っている場合には、相対速度ゼロの場合に比べると 20 倍も大きな太陽フラックスを受け取ることになる。ナトリウム原子の受ける輻射圧は、まさにこの $g$ ファクターと表裏一体なので、図2は縦軸を輻射圧とみなしてもよい（もちろん値は異なるが、傾向は同じ）。輻射圧と太陽重力との比を  $\beta$  と書くことが多いが（塵の尾の章を参照のこと）、太陽に対する相対速度が大きい場合のナトリウムの  $\beta$  値は 80 にもなる。塵の尾に見られるような粒子の  $\beta$  値が 0.5~2.5 といった程度であることを考えると、ナトリウム原子がいかに太陽輻射圧に影響を受けるか分かるであろう。

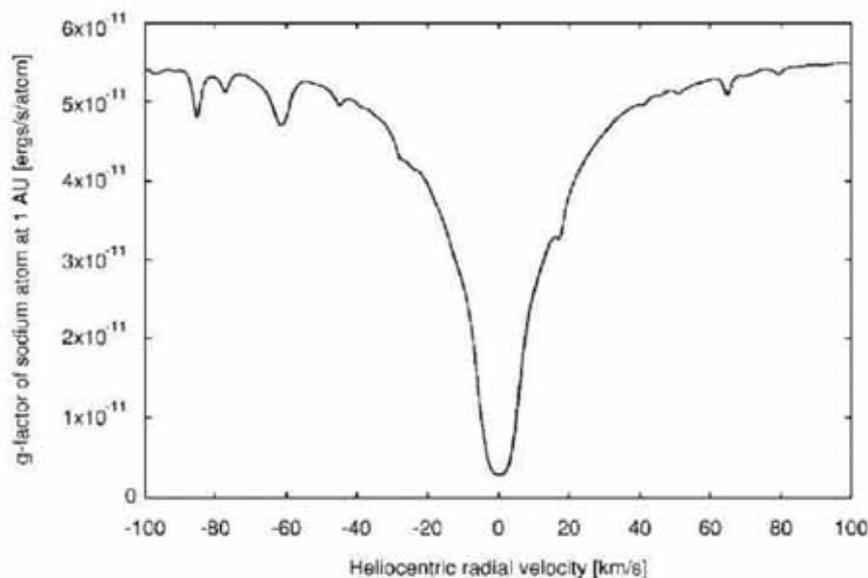


図2：gファクターと相対速度。横軸はナトリウム原子の太陽に対する相対速度で、プラスが太陽から遠ざかる方向。縦軸はgファクターで、原子一つが毎秒あたりに放射するエネルギーで表している（太陽から1天文単位にて）。

図2からは、大変興味深いことが読み取れる。近日点通過前の彗星では、彗星は太陽に対して近づいており、マイナスの相対速度を持っている。よって彗星から放出されたナトリウム原子は大きな輻射圧を受け、太陽と反対方向に押さることになる。太陽と反対方向に加速された結果、ナトリウム原子と太陽の相対速度は小さくなってゆき、輻射圧は次第に小さくなる。輻射圧が小さくなると加速が減って速度の変化は小さくなり、また、輻射圧が小さいということは、gファクターが小さいということで、あまり輝かなくなってしまふ。これでは、十分に尾を発達させることができない。一方、近日点通過後の彗星では、彗星から放出されたナトリウム原子は大きな相対速度（太陽から遠ざかる方向＝プラスの速度）をもち、よって大きな輻射圧、大きなgファクターを持つ。太陽から輻射圧をうけて加速される結果、さらに大きな相対速度を得るので、ナトリウム原子はどんどんと加速されつづける。また、加速されればされるほど輻射圧も大きく、またgファクターも大きくなって輝きを増す。こうして、長く伸びたナトリウムの尾が形成されるのである。以上の考察から、彗星が近日点を通じた後のほうが、長く伸びたナトリウムの尾が観測されやすいことが分かる。

では、近日点通過前はまったくナトリウムの尾はないのか？というところでもない。これまで、細くシャープに伸びたナトリウムの尾（narrow sodium tail）について述べてきた。この細いナトリウムの尾を作っている中性ナトリウム原子は、彗星核近傍で生成され（おそらく塵から放出されると考えられるが、ナトリウムを含む分子から光解離によって生成されるという考えもある）大きな輻射圧によって長く伸びる。最終的には太陽紫外線によってイオン化されるまでが中性ナトリウムの寿命ということになる。一方、塵の尾に含まれる塵からもナトリウム原子が放出されているらしい。こちらのほうは、塵の尾に重なるように広がった尾を形成している（diffuse

sodium tail)。このような広がったナトリウムの尾は、ヘール・ボップ彗星において近日点通過前に実際に検出されている (Wilson et al. 1997)。ただし、その検出には塵の尾を差し引く必要があり、デリケートなデータ処理が要求される。

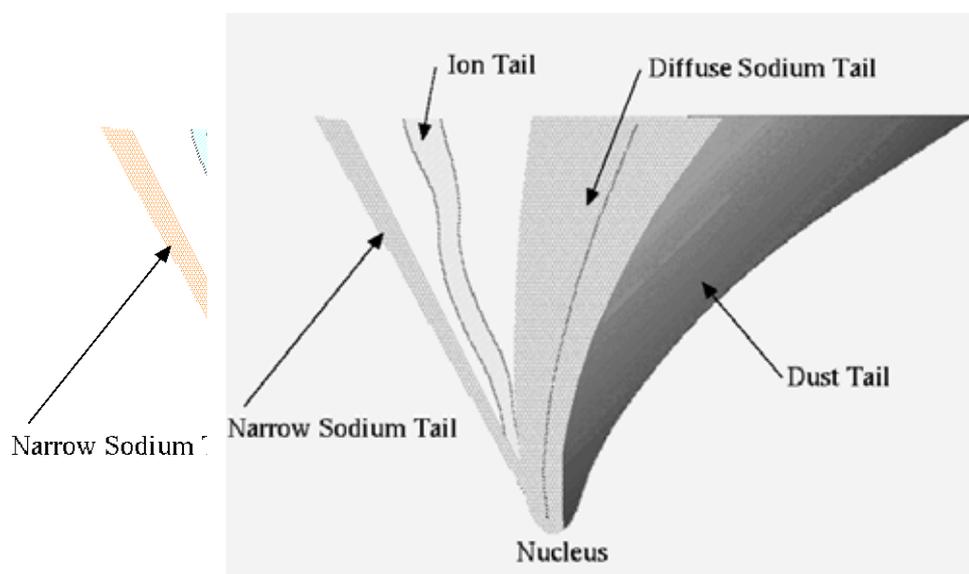


図3：2種類のナトリウムの尾 (narrow sodium tail と diffuse sodium tail)

### (3) ナトリウムテイルの起源

ナトリウム原子がどのような物質 (鉱物、分子) から放出されるかについては、Cremonese et al. (2002)が詳しい議論を行っている。また、Watanabe et al. (2003)では、ナトリウム原子と塵の関係について、ナトリウム輝線と塵による散乱光との強度比が、彗星の日心距離によってどのように変化するか調べている。ナトリウム原子と塵粒子の数の比は、彗星ごとにだいたい同程度であり、ナトリウム原子が塵から放出されていることを示唆している。また、日心距離に対する変化の傾きからは、塵が太陽光によって加熱された結果、熱的に表面からナトリウムが飛び出している可能性が高いことが分かっている。また、そうした研究のためには、細いナトリウムの尾の幅を知ることも重要である。細いナトリウムの尾の太さは、彗星核近傍でナトリウム原子が放出された際の初速度と、放出から観測された場所までたどり着くのにかった時間との積によって決まるため、観測から初速度が求められる。この初速度はナトリウム原子が何から放出されたか？を探る際の手がかりとなる。

ナトリウムの輝線は彗星ごとの観測条件によって強度が変化し、なかなか顕著なナトリウム輝線が受かることは稀である。そのような兆候を得た場合には、すぐに関連する観測者にも連絡した方がよい。現に、ヘール・ボップ彗星、池谷 張彗星という非常に顕著なナトリウム輝線を見せた彗星 (その結果、多くの成果が得られた) では、口径 28cm の望遠鏡を用いたアマチュア観測家によって最初のナトリウム輝線の報告がなされていることを述べておきたい (Fujii et al. 1997, Fujii et al. 2002)。

参考文献

- ( 1 ) Levin ( 1964 ) , Icarus 3, 497.
- ( 2 ) Cremonese et al. (1997), ApJ Lett 490, 199.
- ( 3 ) Wilson et al. (1998), Geophy. Research Lett. 25, 225.
- ( 4 ) Kawakita & Fujii (1998), ApJ Lett 502, 185.
- ( 5 ) Cremonese et al. (2002), Adv. Space Research 29, 1187.
- ( 6 ) Watanabe et al. (2003), ApJ Lett 585, 159.
- ( 7 ) Fujii et al. (1997), IAU Circ.
- ( 8 ) Fujii et al. (2002), IAU Circ. 7851.