

流星の発光メカニズム

超高速で地球大気に突入する塵粒が作るプラズマ

解説／春日敏測 (国立天文台 天文情報センター)

「ながれ星」とは何だろう？ ひとことでいえば、宇宙空間にあった小さい塵粒が高速で地球に飛び込んできて大気と衝突し発光する現象である。われわれが目にする光の大部分は、塵粒本体からではなく、その周辺に発生した高温ガスによるものである。高温ガス中では原子や分子が高いエネルギーを持って存在し、その多くが電離してイオンと電子に分かれている。これがプラズマとよばれる状態である。夜空にこの高温ガス（プラズマ）が生成されることにより、われわれは光を確認することができる。これが流星とよばれる天文現象である。

出発点は塵粒の運動エネルギー

流星の発光メカニズムを理解するには塵粒の運動エネルギーが出発点となる。つまり、塵粒の地球への突入速度と質量である。質量はサイズとして置き換えられることも多い。流星群の塵粒のサイズは、ダスト・トレイルの観測から、おおまかにミリメートルからセンチメートルであることがわかっている。速度は秒速数10kmと非常に速い（ペルセウス座流星群の場合、対地速度およそ秒速60km）。

そのような塵粒が地球大気と衝突すると急激に減速する。言い換えれば、塵粒の運動エネルギーが減少する。その減少分が高温ガスの

生成（アブレーション）、熱輻射、あるいは熱伝達など他のエネルギーへと変換される。つまり、塵粒のサイズが大きければ大きいほど、そして突入速度が速ければ速いほどガスは多く生成され、流星光はより明るく高温になるのである。流星の発光する高度についても同様で、運動エネルギーが大きいほど（速度が速いほど）高い高度で発光する。

「アブレーション」とは塵粒から高温ガスが生成される現象である。熱により塵粒の表面物質が少しずつ気化され、塵粒の周辺に高温のガスができる。この熱は塵粒が地球大気に突入した時に発生する。高速移動する塵粒の前方の空気が急激に圧縮されるため熱くなるのである。

高速・高温ガス体の大気中での挙動

塵粒は音速（高度約100kmで秒速およそ300m）よりも200倍ほども速い秒速50～70kmで大気に飛び込んでくるため、塵粒の周りの気体の流れは極超音速流（音速に比べて

極めて大きい速度）となる。

その状況下で圧縮された空気では、内部エネルギーが高まり、高温の衝撃波が形成される。その衝撃波からの輻射により塵粒が加熱されるのである。塵粒は気化に伴って小さくなり最後には消失してしまう。

アブレーションの物理状態はシミュレーションにより研究されている。計算モデルは塵粒本体とそれをとり囲む塵粒表面から気化した高温ガス、そして、それらの大気との相互作用を考慮している。大気は高度により密度が異なるため塵粒周りの気体流の性質が異なる。さらに塵粒のサイズ、突入速度、地上高度を考慮すると図1のように区分される。図1で紫に着色した領域では塵粒本体と大気分子の衝突の他、塵粒から気化した分子と大気分子の衝突が起こっている。この状態が一般的な流星の発光メカニズムとして考察されている。

一般的な流星の発光は、塵粒の突入速度を秒速70kmと仮定すると、ミリメートルからセンチメートルクラスの塵粒の発光点と消滅点は

それぞれ地上高度約120kmと80km程度であり図1の紫に着色された領域に含まれる。この中間流（遷移流）領域では気体分子の熱運動理論が適用される。

コンピュータによるシミュレーションから、流星の発光は非平衡と平衡状態が混在すると考えられている。「非平衡状態」とは原子や分子の分布が場所的に不均一であると同時に、その速度分布なども絶えず時間的に変化している状態を示す。一方「平衡状態」においては高

いエネルギー状態の原子や分子の分布やふるまいを温度の関数として扱うことができる（ボルツマン分布やマクスウェル速度分布など）。

流星発光の先端部では衝撃波に加え、塵表面からの高温ガスの吹き出しと大気との接触面も考慮する必要があるため、時間変化を考慮した非平衡状態が適用される。一方で「ウェイク (wake)」とよばれる後方は平衡状態ではほぼ説明でき、この部分が流星光の大部分を占めると考えられている。

この時、高温ガスの温度は塵粒の表面近くで最も低く4,000K程度、最も高いのは塵粒からやや距離をおいた領域で18,000Kぐらいと見積もられている。

輝線波長で流星物質を特定する

流星光には塵粒からの物質と地球大気成分の両方が含まれている。これらは流星を分光することにより調べることができる（図3）。流星光の大部分は輝線である。輝線は特定の波長だけで光る物質特有の光であるため、流星のスペクトルからそこに含まれる中性の原子、分子、あるいはイオンを特定できる。例をあげると、マグネシウム、鉄、ナトリウム、カルシウム、ケイ素イオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、窒素などである。

ケイ素イオンやマグネシウムイオンなどの輝線は高速度の流星で検出されやすいが、これらが発光するには高いエネルギーが必要だ。プラズマ中の原子は高温になるほど高エネルギー状態になる確率も増える。そのため、これらが高い温度を生み出す高速度流星で見えやすいのは理にかなっている。流星のスペクトルからはその成分といくつかの温度領域が存在することも伺える。

以上、流星の発光メカニズムについて紹介させていただいた。ある夏の夜、流星を見かけた時に上空100kmで起こっている物理過程にも思いを巡らせてみてほしい。

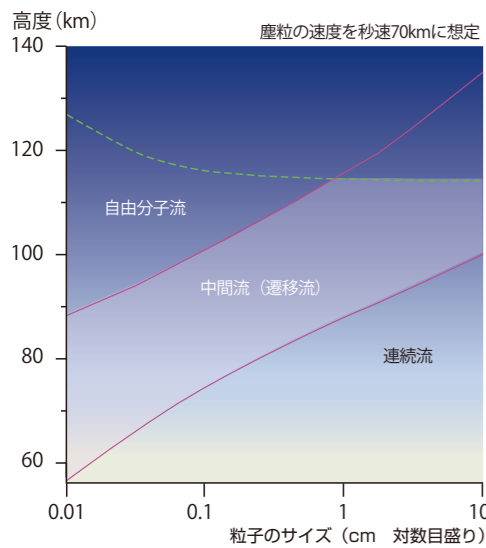
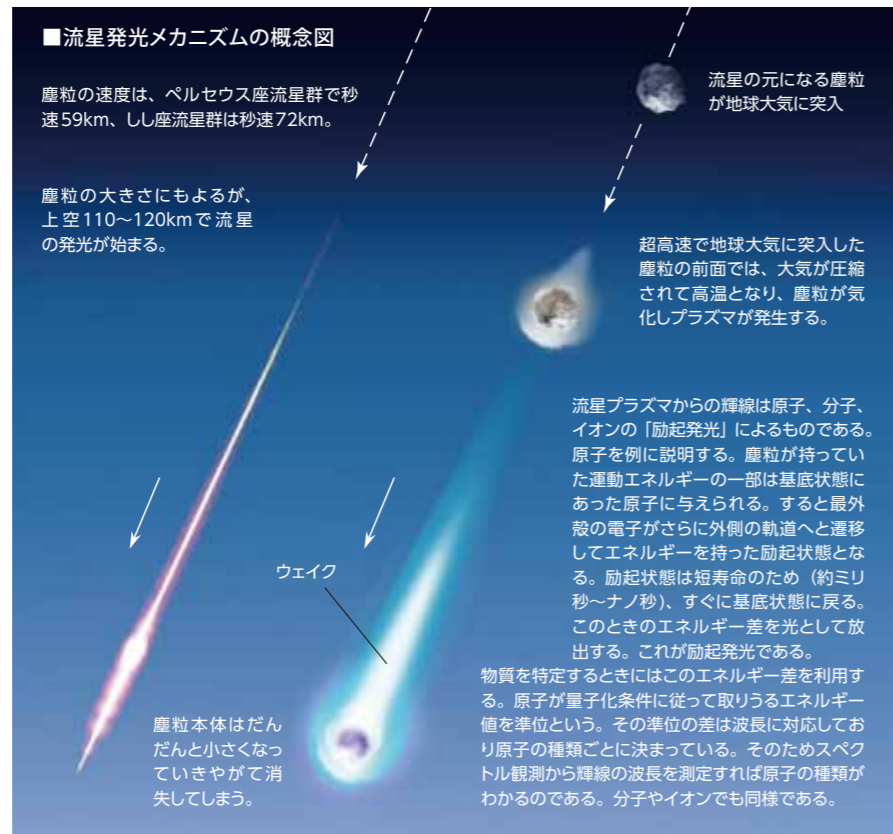


図1 気体流の性質。塵粒のサイズ、突入速度、発光高度と相関。紫色の部分は中間流(遷移流)領域で一般的な流星の発光メカニズムが考察されている (Popova 2004 による論文掲載の図をアレンジ)。



ペルセウス座流星群の明るい流星は、最後に爆発したような増光を起こすことがある。また、明るい流星が飛んだ後に「流星痕 (りゅうせいこん)」が見えることがある。いくつかのタイプがあり発光メカニズムの多様性が推測されている。

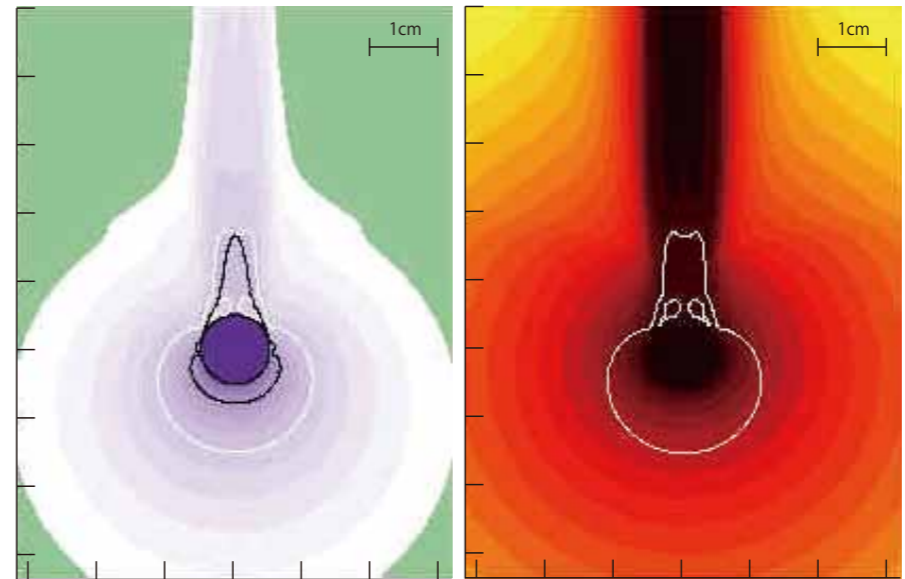


図2 流星発光のシミュレーション 塵粒のサイズ1cm、秒速70km、高度100kmにおいて発光した場合。「塵粒が気化したガスと大気の相対密度分布図 (左)」と「内部エネルギー分布図 (右)」 (Popova 2000, 2004)。

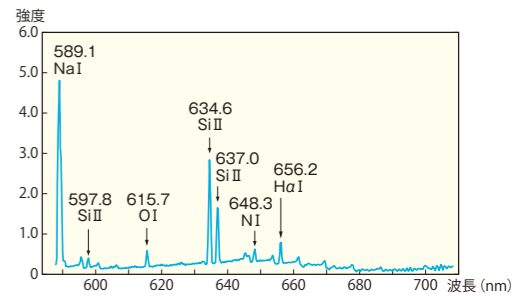
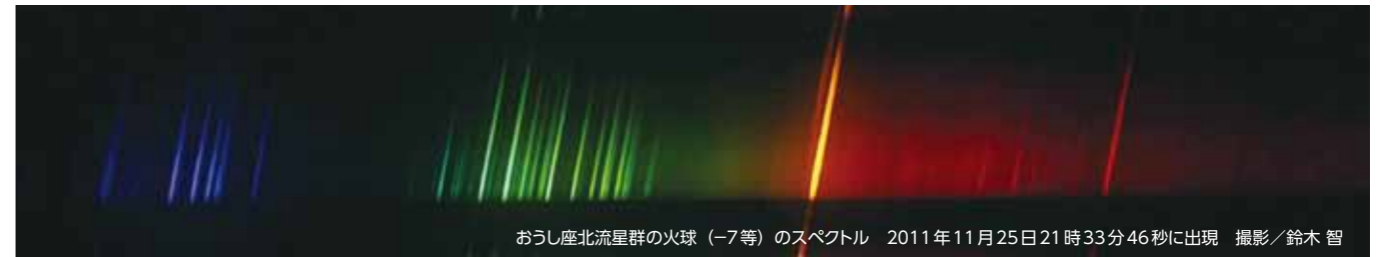


図3 イタリア・パドバ天文台の口径182cmの可視望遠鏡で偶然に観測された流星のスペクトル。ナトリウム (Na I) やケイ素イオン (Si II)、酸素原子 (O I)、窒素原子 (NI)、窒素分子 (N₂) などの輝線スペクトルが含まれている。観測された輝線と期日(2004年11月18日)から高速のしし座流星である可能性が高い。下は、流星のスペクトル画像。流星本体や大気各気体成分の輝線が写っている。



おうし座北流星群の火球 (-7等) のスペクトル 2011年11月25日21時33分46秒に出現 撮影/鈴木 智