

月面衝突模擬実験における発光強度の、温度と衝突角による依存性について

○奥山純吾¹, 阿部新助¹, 長谷川直²

¹ 日本大学, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

はじめに：流星体が月面に衝突した際に起こる発光現象を月面衝突閃光（Lunar Impact Flash:LIF）と呼ぶ。LIFは地球に突入する流星体の有効な観測方法や月面開発におけるリスクヘッジとして、近年注目されている。定常的な観測によって衝突頻度や温度分布はわかってきた（Suggus et al., 2013. Liakos et al., 2019.）。しかし、正確な衝突体サイズを決定するには、発光メカニズムを理解することで、運動エネルギーの発光への変換効率（発光効率）を決定するためのモデルを構築する必要がある。そのため、観測では未確定となる、流星体の運動エネルギーや衝突角度、月面成分を実験条件として設定することで、モデル構築が実験的に行われてきた（J. Tandy et al., 2020. Swift et al., 2011. Schultz et al., 2005.）。

今回は二段式衝突銃を用いて、月面を模擬した標的に弾丸を衝突させた模擬実験を行う。標的には、月面に近い石英砂などの細かい砂状のものから、内部の氷、砂を氷結させたものを使用し、弾丸にはサイズや密度を変えたものを使用した。発光はわずか数 μ 秒ほどで減光することが予想されるため、高速撮影が可能な分光器を用いることで、得られたスペクトルから発光エネルギーだけでなく、プランクの放射式に近似した黒体温度の時間変化や輝線として検出される発光成分の推定を行う。この時、標的をチャンバー内に角度を変えて設置することで、衝突角度を変更し、クレーター形成によるイジェクターの拡散や発光面積、見かけの角度の違いによる発光強度変化と温度の測定も行う。

Figure 1は衝突時の発光成分ごとの閃光の進化過程である。撮像画像の明るさは実際とは異なる。しかし、衝突初期には短波長成分である青色の光が見える。これは衝突直後に励起した弾丸と標的由来の発光成分がガスやプラズマとして膨張したもの（プルーム）であると考えられる。これらは衝突点直上に現れており、その後にクレーター形成時に噴出する放射伴うイジェクターが弾丸の進行方向（左下→右上）に従うように噴出しているのが確認できる。しかし、数 μ 秒後にはイジェクター幕は衝突面に対して垂直方向に進化していることが確認できる。これは、初め衝突体によって掘削されたものが飛び出しているのに対し、その後は伝播した破壊エネルギーによる放出に遷移したためと考える。

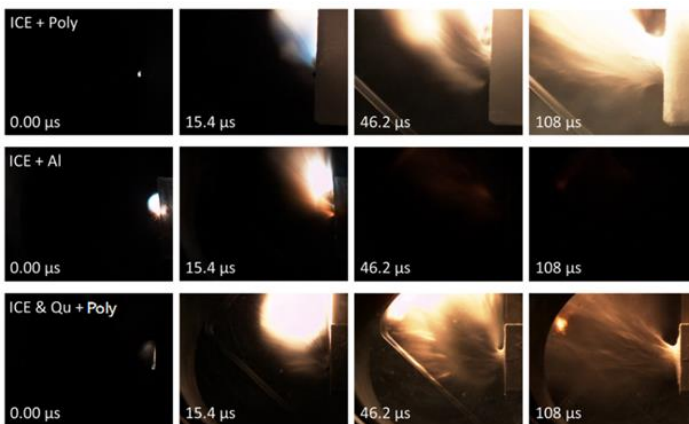


Figure 1. Evolution of Luminescence

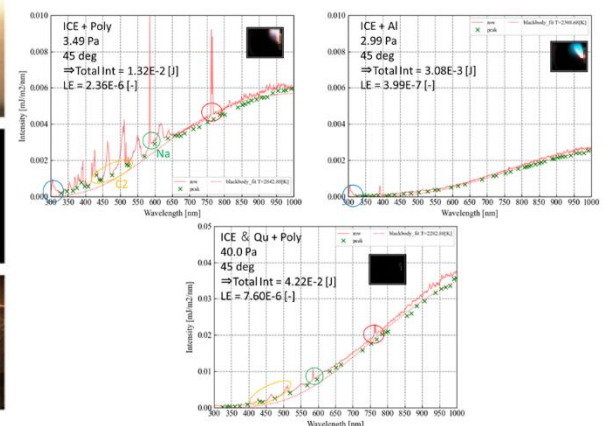


Figure 2. Spectrum of flashes (Exposure 10 ms)

Figure 2 は閃光から得られたスペクトルである。全体として黒体成分が発光の主成分であることがわかる。しかし、標的由来 (OH) や弾丸由来 (C2 や Na) の輝線成分も検出された。プランクの放射式で近似した黒体温度は 2000~3000 K ほどであり、これは二次的に噴出したイジェクターの末端温度だと考えられる。衝突点は衝突直後に 5000 K ほどに加熱されるからである (後述)。また、イジェクターの拡散方向の影響や発光面積の増加により斜め衝突の方が発光量は大きくなった。そして弾丸を変えた場合 (運動エネルギーはおおよそ変わらない) では、角度によって発光量の大小が異なった。これは密度が異なるための衝突点にかかる圧力差とそれに伴うクレーター形状の変化が発光量に影響していると考えられる。そのため、LIF から発光エネルギーを算出する際には流星体の突入角やサイズが及ぼす影響を考慮する必要がある。

衝突初期に発生するプルームから得られるスペクトルからも輝線が現れるため、発光成分の同定が可能であると同時にその温度変化が推定できる。Figure 3 より、閃光は衝突直後 (左上) に輝線が顕著に現れている。そのため、近似した温度は整合性に欠けるものであるため、その後温度の減少率から、見積られた衝突直後の黒体温度は 4795 K であり、260 μ s で室温 20 度まで低下することが推定できる。また、衝突直後には標的由来の H 輝線が現れているため、実際の LIF 直後には月内部の水が噴出することが計測可能であると考えられる。Na は強く表れているが試行ごとに強度が著しく異なるため、弾丸表面に付着した皮脂や不純物由来と考えられる。実際の LIF の温度は、分光データが少ないためおおよその値で 1600~6000 K であり (Yanagisawa et al., 2020. Liakos et al., 2019.), また、2007 年のふたご座流星群時に観測したものでは 4000 K から 0.1 s で 2000 K への温度低下を確認した。しかし、観測した値は実験の輝線成分と同様に衝突初期には波長域ごとに突出した要素の影響から正確な値とは言えず、LIF は cm サイズの流星体の衝突により起こる現象であるため、実験で用いた弾丸とは運動エネルギーに大きな差がある。そのため、整合性のあるモデルを作成するために、正確な LIF の分光観測データを同時に収集していく必要がある。

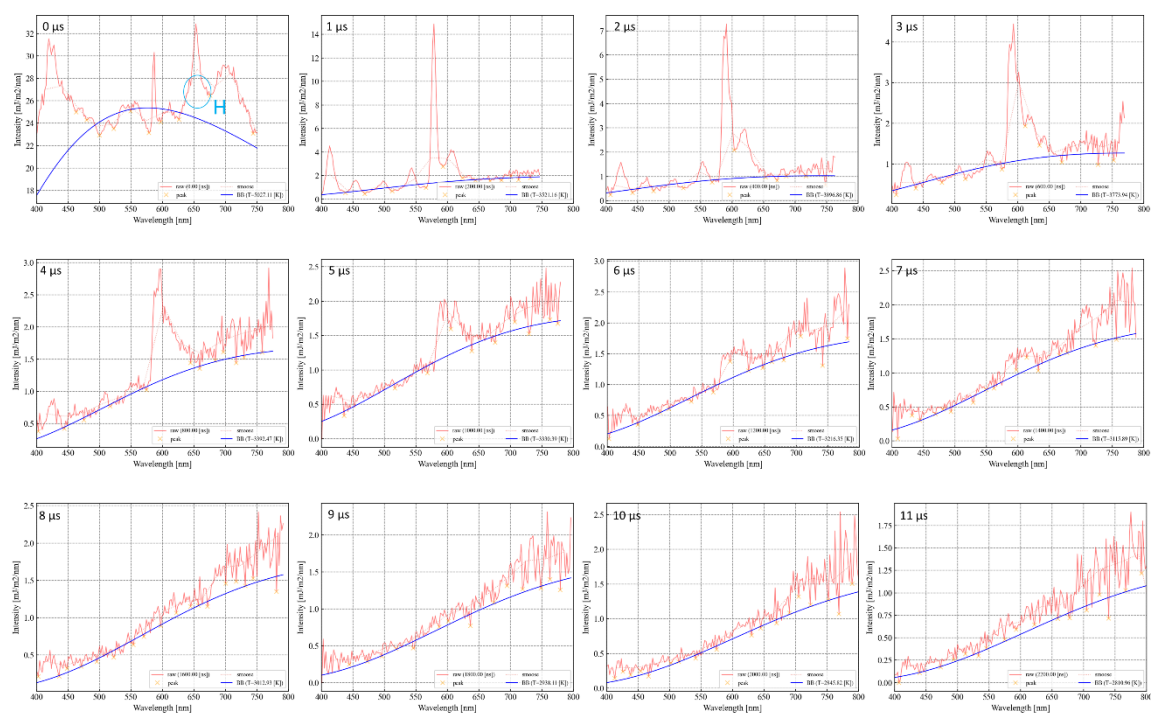


Figure 3. Time variation of the spectrum ICE + Poly (speed 1000 ns)