

ふたご座月面衝突閃光の低分散スペクトル

柳澤 正久¹、内田 有紀¹、栗原 誠弥¹、阿部 新助²、布施 綾太²、田中 智³、
小野寺 圭祐^{3,4}、吉田 二美⁵、Hsin-Chang Chi⁶、Zhong-Yi Lin⁷、Jim Lee⁸、
川村 太一⁹、山田 竜平¹⁰

¹電気通信大学、²日本大学理工学部、
³宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構、⁴総合研究大学院大学、⁵千葉工業大学、
⁶National Dong Hwa Univ.、⁷National Central Univ.、⁸Taipei Astronomical Museum、
⁹Univ. Paris Diderot、¹⁰会津大学コンピュータ理工学部

月面衝突閃光の明るさから衝突エネルギー(メテオロイドの運動エネルギー)を知るには、衝突時の運動エネルギーから可視光域での発光エネルギーへの変換効率 η (以下 発光効率と呼ぶ)が必要だが、その信頼性の高い値を知るには衝突閃光のメカニズム解明が不可欠である。スペクトル観測はその一助となるであろうというわけで、本発表では、タイトルの内容について、Yanagisawa et al. (2021) [1]の結果を紹介した。

発光効率は、最初 Bellot Rubio et al. (2000a, 2000b) [2, 3]によって、その後 Moser et al. (2010) [4]によって、地球で観測された流星数と月面閃光の数を比較することによって求められた。これらの結果をもとに Swift et al. (2010) [5]は発光効率の速度依存性を次式で表すモデルを提唱した。

$$\eta(V_m) = C \cdot \exp\left(-V_c^2/V_m^2\right) \quad (1)$$

ここで、 V_m は衝突速度、 C と V_c は室内衝突実験と Moser et al. (2010) [4]などの観測から決めるフリーパラメータで、

$C = 1.5 \times 10^{-3}$ 、 $V_c = 9.3 \text{ km/s}$ である。ちょっと怪しげなモデルなのであるが、実験、観測の結果によく合う(図1)。もしかすると衝突閃光のメカニズムの本質を突いているのかも知れない。以下、分かる範囲で、また、自分なりの解釈をしながら解説する。

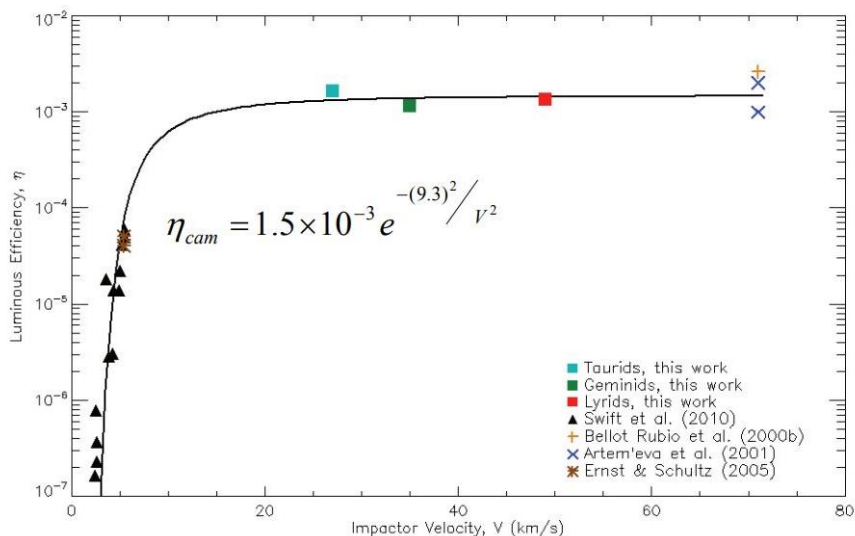


図1. 横軸は衝突速度[km/s]、縦軸は発光効率. (Moser et al. 2010)

衝突で生じた多数の高温の粒子が発光すると考える。これらの粒子は等質量で、全質量はメテオロイドと等しい。一つ一つが持つ単位質量当りの熱エネルギー(以下 比エネルギーと呼ぶ)は異なるとする。ここで、比エネルギーは速度の2乗と次元が同じなので V_r^2 と表す(添え字 r は一つ一つの粒子を表す)。発光量は、比エネルギーが V_T^2 以上の粒子の持つ熱エネルギーの総和であるとする。 V_T^2 はそれ以下では温度が低く可視光を効率的に黒体放射しない比エネルギーである。実際には高温で光っていた粒子は冷えて可視光を出さなくなるはずであるが、この過程は無視する。

様々な V_r^2 をもつ粒子が存在するがその上限は V_m^2 とする(V_m は衝突速度)。つまり、 V_T^2 から V_m^2 の比エネルギーをもった粒子のもつ熱エネルギーの総和が発光エネルギーであると考ええる。温度 T のガスで、ある分子が E_r のエネルギーをもつ確率が $\exp[-E_r/(kT)]$ に比例する(k はボルツマン定数)ということから、ある粒子が比エネルギー V_r^2 になる確率は、

$$P_r = C \cdot \exp\left(-V_r^2/V_m^2\right) \quad (2)$$

であると仮定する。 V_T^2 から V_m^2 の比エネルギーの総和を次のように計算する(V_r^2 をかけていないのが腑に落ちないが)。

$$E'_T = \sum_{r_{\text{visible}}} \left[C \cdot \exp\left(-V_r^2/V_m^2\right) \cdot \Delta\left(V_r^2\right) \right] = C \int_{V_T^2}^{V_m^2} \exp\left(-V_r^2/V_m^2\right) \cdot d\left(V_r^2\right) \quad (3)$$

r_{visible} は比エネルギーが V_T^2 から V_m^2 の粒子についての和を表す。普通に積分せずに、積分における平均値の定理を使うと、 V_T^2 と V_m^2 の間のある V_C^2 を使って、

$$E'_T = C \left(V_m^2 - V_T^2 \right) \exp\left(-V_C^2/V_m^2\right) \cong C V_m^2 \exp\left(-V_C^2/V_m^2\right) \quad (4)$$

と書ける。 $V_m^2 \gg V_T^2$ なので近似を使って最後の項が導ける。 E'_T は単位質量当りの発光のエネルギーなので、単位質量当りの運動エネルギー V_m^2 (係数1/2は無視する)で割れば、式(1)で示した発光効率が次のように導ける。

$$\eta = E'_T/V_m^2 = C \cdot \exp\left(-V_C^2/V_m^2\right) \quad (5)$$

V_C^2 は V_m^2 の変化と共に変わるはずであるが、定数であると近似している。

引用文献：[1] Yanagisawa, M., Uchida, Y., Kurihara, S., Abe, A., Fuse, F., Tanaka, S., Onodera, K., Yoshida, F., Chi, H., Lin, Z., Lee, J., Kawamura, T., Yamada, R. 2021. Low dispersion spectra of lunar impact flashes in 2018 Geminids. *Planetary and Space Science* 195, pp. 12. DOI: 10.1016/j.pss.2020.105131. [2] Bellot Rubio, L. R., Ortiz, J. L., Sada, P. V., 2000a. *Astrophysical J.* 542, L65-L68. DOI: 10.1086/312914. [3] Bellot Rubio, L. R., Ortiz, J. L., Sada, P. V., 2000b. *Earth Moon Planets* 82-83, 575-598. DOI: 10.1023/A:1017097724416. [4] Moser, D. E., Suggs, R. M., Swift, W. R., Suggs, R. J., Cooke, W. J., Diekmann, A. M., Koehler, H. M., 2010. in: *Proceedings of the Meteoroids 2010 Conference*, NASA CP-2011-216469, 142-154. [5] Swift, W. R., Moser, D. E., Suggs, R. M., Cooke, W. J., 2010. An exponential luminous efficiency model for hypervelocity impact into regolith. in: *Proceedings of the Meteoroids 2010 Conference*, NASA CP-2011-216469, 125-141.