

衝突による小惑星形状形成と形状を用いた衝突史への制限

○杉浦圭祐, 小林浩, 犬塚修一郎
名古屋大学大学院理学研究科

1I/' Oumuamua は 2017 年 10 月に PanSTARRS 望遠鏡によって発見された小天体である。この天体の軌道は離心率が 1.2 程度の双曲線であり、無限遠での太陽に対する相対速度が 26km/s と太陽近傍星の相対速度に近いことから、太陽系外の惑星系から放出されて来た小天体であると考えられている (Meech et al. 2017)。1I/' Oumuamua の絶対光度は 22 等級程度であり、0.04 のアルベドを仮定すると平均半径が 100m 程度であると見積もることができる (e.g., Bannister et al. 2017)。また 1I/' Oumuamua の自転周期は 8 時間程度であるが (e.g., Bolin et al. 2018)、完全に周期的なライトカーブではないことから非慣性主軸周りの回転をしていると考えられる (Fraser et al. 2018)。

1I/' Oumuamua の特徴の中で最も興味深いのは極端に細長い形状をしている点である。Meech et al. (2017) によると 1I/' Oumuamua のライトカーブの振幅は 2.5 等級程度もあり、光度が 10 倍程度も変化する。もしこの小天体が短軸周りに自転する楕円体だとすると、短軸長さ b と長軸長さ a の比 b/a が 0.1 程度の極端に細長い形状をしていることになる。光度の誤差や観測期間の短さのため正確な形状はわかっていないが、いくつかの論文で b/a が以下のように見積もられている: $b/a < 0.19$ (Bannister et al. 2017), $0.10 < b/a < 0.29$ (Bolin et al. 2018), $b/a < 0.22$ (Drahus et al. 2018), $b/a < 0.20$ (Fraser et al. 2018), $b/a < 0.33$ (Knight et al. 2017)。したがって、1I/' Oumuamua は b/a が 0.3 程度以下の極端に細長い形状をしていると考えられる。

このような極端細長形状は小惑星同士の衝突によって作ることができる (Sugiura et al. 2018)。Sugiura et al. (2018) は半径 50km の等質量小惑星同士の衝突を SPH 法の数値計算で再現し、2 体脱出速度程度の衝突速度の衝突で b/a が 0.2 程度の極端細長形状が形成されることを示した。そこで本研究では 1I/' Oumuamua 程度の大きさを持つ極端細長形状を形成するための詳細な衝突条件を明らかにするため、半径 50m のターゲット小惑星への衝突を粉体の摩擦モデル (Jutzi 2015) 入りの SPH 法を用いて再現した。始原的な環境でのまだ溶融を経験していない小惑星を考え、固体の引っ張り強度を持たず横ずれ効力が粉体の摩擦で決まるような天体同士の衝突を考える。衝突速度 v_{imp} 、衝突角度 θ_{imp} 、衝突する 2 天体の質量比 q 、粉体の摩擦角 ϕ_d を様々に変化させて衝突計算を行い、極端細長形状を形成するようなパラメータを探した。

図 1 は $q=1.0$ 、 $\phi_d=40^\circ$ の場合の衝突計算で形成された最大集積天体の b/a を表す。図 1 より、衝突天

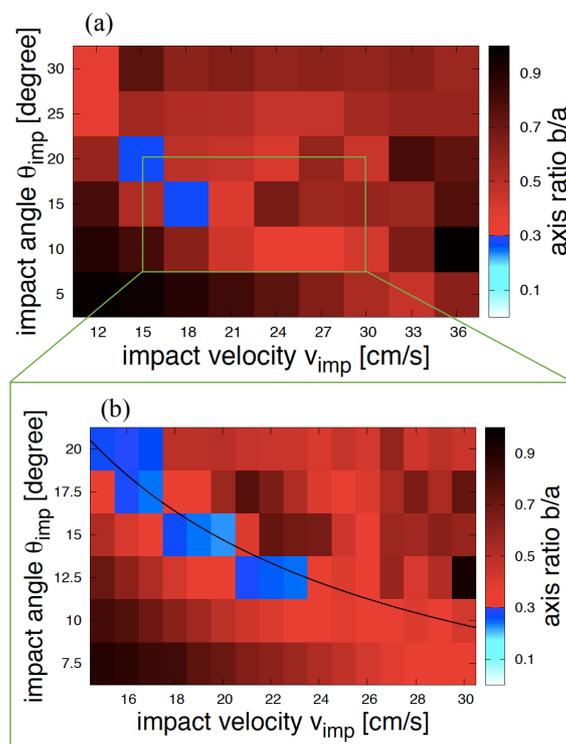


図 1: 等質量、摩擦角 $\phi_d=40^\circ$ での衝突計算で形成された最大集積天体の軸比。横軸は衝突速度、縦軸は衝突角度、色は各衝突計算で形成された最大集積天体の b/a を表す。黒の曲線は $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} = 5.1 \text{ cm/s}$ を表す。

体の脱出速度 ($\sim 6\text{cm/s}$) の数倍の衝突速度と低い衝突角度の衝突で b/a が 0.3 以下の極端細長形状ができていることがわかる. またそのような形状ができる衝突パラメータはずれ速度 $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}}$ が一定の線上に集中しており, 程よいずれ速度の衝突で極端細長形状ができることがわかる.

等質量衝突であるが摩擦角を $\phi_d=50^\circ$ に上げた計算でも同様に $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}}$ が一定の線上, かつ $v_{\text{imp}} \leq 40\text{cm/s}$, $\theta_{\text{imp}} \leq 30^\circ$ の衝突で極端細長形状が形成された. 一方で $\phi_d=30^\circ$ の場合は様々な衝突速度・角度の計算を行ってもそのような形状は形成されなかった. さらに摩擦角は $\phi_d=50^\circ$ であるが衝突 2 天体の質量比 q を変化させたところ, $q=0.5$ では極端細長形状は形成されたが, $q=0.25$ では衝突速度・角度を様々に変えてもそのような形状は形成されなかった. 以上から, 極端細長形状を形成するような衝突の条件は大雑把に $v_{\text{imp}} \leq 40\text{cm/s}$, $\theta_{\text{imp}} \leq 30^\circ$, $\phi_d \geq 40^\circ$, $q \geq 0.5$ のように書くことができる.

上記の衝突条件のうち最も実現が難しいのは衝突速度である. $v_{\text{imp}} \leq 40\text{cm/s}$ の衝突速度を実現するためには原始惑星系円盤の中のような力学的に極めて冷たい環境が必要である. そこで我々は最小質量円盤モデル (Hayashi 1981) で記述される原始惑星系円盤を考え, 半径 100m の小惑星間の相対速度が 40cm/s 以下となる条件を考察した. 相対速度を上げる要因として乱流によるかき乱しと大きな天体による重力散乱を考え, 小惑星間の相対速度が 40cm/s 以下となるために要求される条件を見積もった.

図 2 は乱流かき乱しにより誘起される相対速度 (Cuzzi et al. 2001) を表している. 図 2 より円盤の内側であっても Shakura-Sunyaev の乱流強度が 10^{-4} 程度以下であれば 40cm/s 以下の相対速度が実現されることがわかる. この乱流強度は磁気回転不安定性が成長しない領域ならば実現される (e.g., Flock et al. 2017). また HL Tau のギャップの見た目からこの円盤での乱流強度は 10^{-4} 程度だと考えられている (Pinte et al. 2016). したがってこの乱流強度は十分に実現可能である.

図 3 は半径 R の大きな天体の重力散乱で相対速度が上がる効果 (Ida&Makino 1993) とガスにより下がる効果 (Adachi et al. 1976) の釣り合いから見積もった相対速度である. 図 3 より, 円盤の外側であっても半径 7km の天体が存在すれば相対速度が 40cm/s 程度まで上がってしまうことがわかる. したがって $11/7$ Oumuamua の極端細長形状を小惑星衝突で形成するためには, 大きな天体の半径が 7km まで成長していないような始原的な環境が必要である. $11/7$ Oumuamua はそのような若い原始惑星系円盤で形成され, 巨大ガス惑星などによって放出され太陽系までやって来たのだろう.

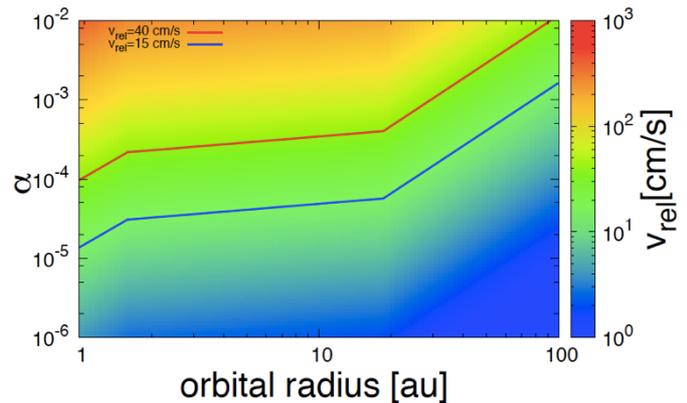


図 2: 乱流によって誘起される半径 100m の小惑星間の衝突速度. 横軸は軌道半径, 縦軸は Shakura-Sunyaev の乱流強度. 色は相対速度を表す. 赤と青の線はそれぞれ相対速度が 40cm/s と 15cm/s のコントアを表す.

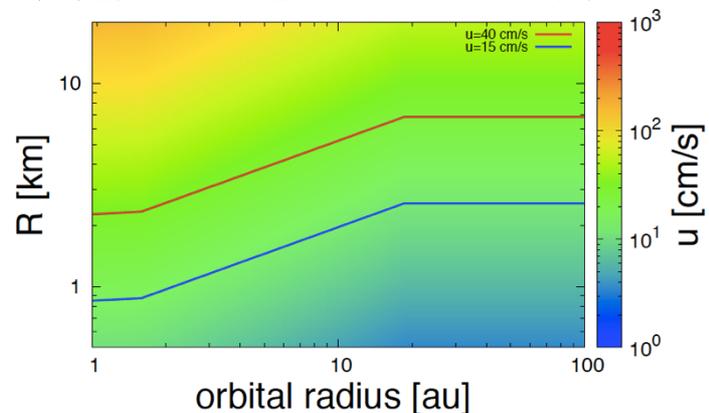


図 3: 半径 R の大きな天体に誘起される半径 100m の小惑星間の衝突速度. 横軸は軌道半径, 縦軸は大きな天体の半径 R , 色は相対速度を表す. 赤と青の線はそれぞれ相対速度が 40cm/s と 15cm/s のコントアを表す.