

巨大氷惑星の衝突による自転軸傾斜変動

黒崎健二 (名古屋大学)

利用カテゴリ XC-B

本研究では太陽系内の巨大氷惑星である天王星について議論する．太陽系内の惑星は固有の自転周期と自転軸傾斜角を持っている．巨大惑星に注目すると，木星，土星，海王星の自転軸傾斜角は 20° であるが，天王星は 98° 傾いており，他の巨大惑星と大きく異なっている．その大きな自転軸傾斜角から，天体の巨大衝突が原因であると考えられてきた．

巨大氷惑星の衝突計算はこれまで初期の自転速度が無視できるほど小さいことを仮定していた．初期自転周期が現在と同程度あった場合，受け取られる角運動量と初期の角運動量が同程度になる．このとき，衝突後に輸送される角運動量は初期に保持している角運動量の影響を無視できなくなるが，衝突に伴って水素エンベロープが流出することも予想される．しかし，初期自転速度を持っていた場合にどのような衝突条件であれば天王星で観測されるような自転軸傾斜角を再現できるかは，まだよくわかっていない．本申請では，自転角運動量をもった天体への衝突現象と，それに伴う自転軸傾斜の変動角度を数値流体計算によって示す．衝突現象を数値流体計算によってあらわすために，Godunov 法を適用した Smoothed Particle Hydrodynamics (GSPH) を用いて計算をおこなった．本研究では，初期に自転している $13 M_\oplus$ の大気を持つ惑星に， $1 M_\oplus$ の氷天体が衝突することによって生じる角運動量輸送を計算し，衝突後の自転軸変動量を計算する．惑星は水素大気と氷成分コアから構成され，水素大気を 20 %，氷成分コアを 80 % 持ち，衝突前の初期自転角運動量は，現在の天王星の値と同じであると仮定する．また，衝突速度は脱出速度を仮定し，自転軸を z 軸方向に，衝突速度の方向は x 軸の方向にのみ持つとした．したがって，本計算では，衝突後に y 方向と z 方向の 2 成分の角運動量を持った天体が形成されることが期待され，この衝突後の角運動量ベクトルの大きさの比率が衝突後の自転軸変動を示すことになる．本計算において衝突パラメータを決定するための惑星衝突時における配置を示したものが図 1 である．このとき，衝突パラメータは $Y_{\text{imp}} = \overline{PP_{xy}}$ ， $Z_{\text{imp}} = \overline{PP_{xz}}$ に対応する．ここで注意すべき点は， $Y_{\text{imp}} > 0$ の場合は衝突前の自転速度を速める一方， $Y_{\text{imp}} < 0$ の場合は衝突速度を低下させる効果を持つ．他方， Z_{imp} は衝突前の自転と垂直な方向の角運動量を与えるため，自転軸の転倒に寄与する．

天体衝突後の角運動量変動を示したのが図 2 である．この計算では， $Y_{\text{imp}} = -0.5$ ， $Z_{\text{imp}} = 0.5$ の結果を示す．天体衝突後からインパクターから y 方向成分の角運動量を受け取り，自転軸が変動する様子を計算できた．さらに衝突時に自転と逆方向にインパクターが角運動量を与えたため，衝突後に自転速度が低下する様子も確認できた．この計算パラメータでは，一度の衝突によって 90° 自転軸を傾けることを示している．

衝突後の自転軸傾斜角度の変動について， Y_{imp} ， Z_{imp} についてパラメータを振った結果を示したものが図 3 である．一度の衝突で大幅な角運動量変動を起こすためには，自転と逆向きの方に衝突させることが重要であることがわかった．また， $1 M_\oplus$ 程度のインパクターであれば衝突後の角運動量も現在の天王星の自転角運動量によく一致することも示した．これよりも軽い天体の場合，衝突前の自転角運動量を相殺できないため，大規模な自転軸変動は困難であることが予想される．

本研究の成果は，巨大氷惑星の形成過程において，その最終状態がどのような衝突条件を経たかを理解する上で重要となる．天王星の自転軸が大きく傾いている事実から，形成前に自転していた場合，少なくとも $1 M_{\oplus}$ 程度のインパクターが必要であることを数値計算により示した．

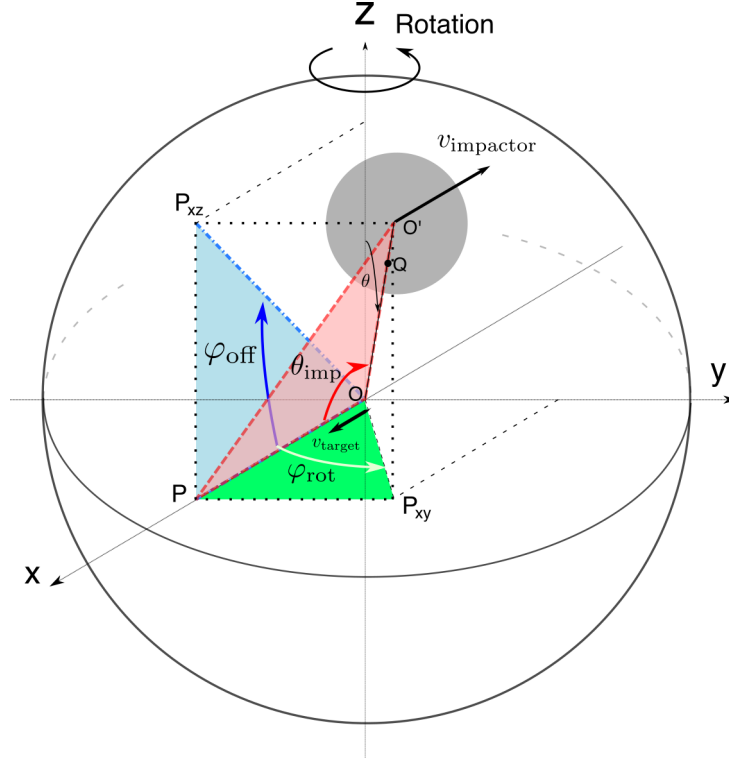


図 1: 天体衝突時におけるターゲットとインパクターの幾何配置図．大きい球は $13 M_{\oplus}$ の大気を持ったターゲットを示し，小さい球は $1 M_{\oplus}$ の氷天体のインパクターを示す．ターゲットは z 軸まわりで自転を持っており，インパクターは x 方向負の向きに衝突速度を持っている状況を想定する．このとき，衝突パラメータは $Y_{\text{imp}} = \overline{PP_{xy}}$ ， $Z_{\text{imp}} = \overline{PP_{xz}}$ に対応する，

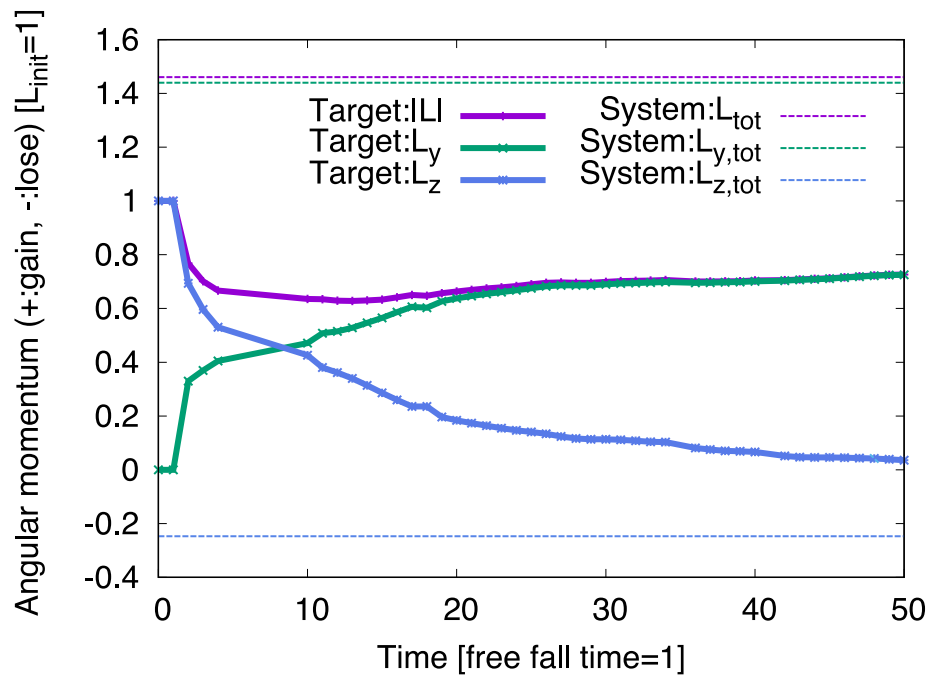


図 2: 天体衝突後の角運動量の時間変動．実線は惑星半径内に存在する粒子の全角運動量を紫， y 方向を緑， z 方向を青として示した．数値計算の精度を確認するため，各時刻における系全体の角運動量は点線で示し，全角運動量を紫， y 方向を緑， z 方向を青として示した．

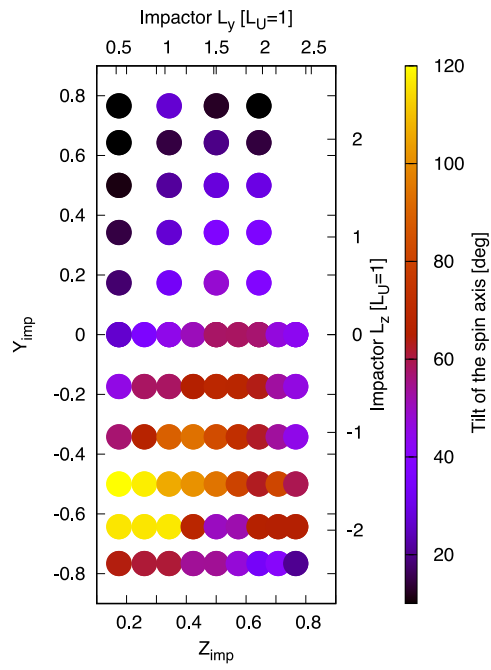


図 3: 天体衝突後の自転軸変動を示す. Y_{imp} および Z_{imp} はそれぞれ y 軸および z 軸における衝突パラメータを示す. 色は衝突後の自転軸変動量を示している.