微惑星の暴走的成長

発表者:柴田　雄
所属:東京大学修士一年　国立天文台理論研究部
指導教官:小久保英一郎
紹介論文:Kokubo&Ida 1996

・イントロ
微惑星が暴走的成長をすることは、この研究(Kokubo&Ida 1996)以前から示唆されていたが、ここではそれをN体シミュレーションを用いて数値的に検証した。
・微惑星成長モード
惑星形成の一段階である微惑星の成長は、歴史的に二つのモードが考えられており、初めにこれらを紹介する。
一つは秩序的成長で、すべての微惑星が同じように成長する。
もうひとつは暴走的成長といわれ、限られた微惑星が重力の効果で周りの微惑星を吸収し、独占的に成長する。
つぎは、これらのモードを解析的に理解するため、微惑星成長の理論について考えていく。
・微惑星成長の理論
初めに、微惑星質量比の増加について考える。
微惑星の質量M_1, M_2を考えると、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{M_1}{M_2}\right)=\frac{M_1}{M_2}\left(\frac{1}{M_1}\frac{dM_1}{dt}-\frac{1}{M_2}\frac{dM_2}{dt}\right)>0 \quad (\text{for } M_1>M_2) \quad \cdots ◎$$

のように表せる。
もしこの不等号が成り立つなら、もともと大きな質量を持っていた微惑星(M_1)が独占的に成長していると考えられる。
これは暴走的成長を表す。
不等号が逆の場合、M_2がM_1に追いつくように成長していることになる。
これは秩序的成長である。
よって不等号がどちらを向くかで成長のモードが変わると考えられるが、それを知るために、右辺の括弧内の正負を調べる。
それには微惑星の成長率を知らなければならない。

それを知るために、いくつかの条件を導出しておく。
円盤の状態とそれに関する先行研究から、

$$r_H\Omega \le v_{rel} \le v_{esc} \qquad \cdots ①$$

r_H: ヒル半径
v_{rel}: 微惑星相対速度
v_{esc}: 微惑星表面からの脱出速度
Ω: ケプラー角速度

という関係が知られている。
左の不等号は、微惑星のヒル半径が円盤のスケールハイトよりも小さい(r_H<H)ことを表し、右の不等号は、接近した微惑星が飛び去ることなく、大きな微惑星表面に墜落することを表している。
ここで、微惑星円盤では、微惑星のランダム速度v_{ran}と相対速度が、

$$v_{rel} \sim v_{ran}$$

であることが知られている。
これで①を書きかえると、

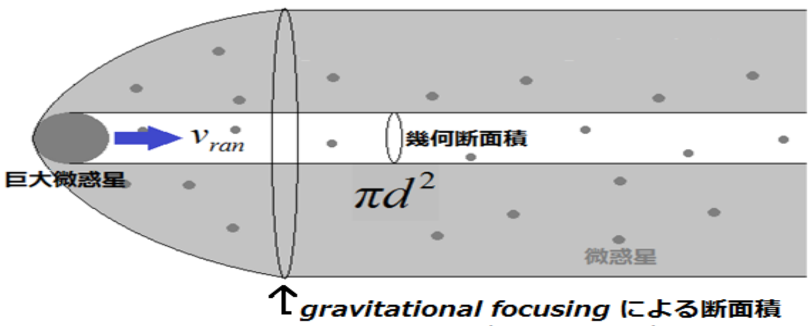
$$r_H\Omega \le v_{ran} \le v_{esc} \qquad \cdots ②$$

となる。

話を戻して、微惑星の成長率について考える。
微惑星の成長率は、他の微惑星との衝突合体によって表される。
円盤内微惑星密度をρ、成長する微惑星の半径を d とすると、

$$\frac{dM}{dt} \approx \rho\pi d^2\left(1+\frac{v_{esc}^2}{v_{ran}^2}\right)v_{ran}$$

$\frac{v_{esc}^2}{v_{ran}^2}$ は gravitational focusing による微惑星引き付けの効果を考慮したものである(下図)。



$$\pi d^2\left(1+\frac{v_{esc}^2}{v_{ran}^2}\right)$$

ここで、条件②を考慮すると、微惑星の成長率は

$$\frac{dM}{dt} \approx \rho\pi d^2\left(1+\frac{v_{esc}^2}{v_{ran}^2}\right)v_{ran} \quad \Rightarrow \quad \rho\pi d^2\frac{v_{esc}^2}{v_{ran}^2}v_{ran} \propto M^{\frac{4}{3}}$$

と表すことが出来る。

v_{esc}^2 と d は成長する微惑星自身の質量に依存するため、最後の比例関係はそれらをまとめたものである。

以上より、微惑星成長率を、円盤の状態を考慮したことにより、微惑星自身の質量で表わすことが出来た。

これを踏まえ、改めて◎式をみると、不等号が成り立っていることが分かる。

これは暴走的成長を表している。

まとめると、微惑星系円盤の状態を考慮することで、自然に暴走的成長が起こることが示唆された。

本論文では、これをシミュレーションを用いて数値的に検証した。

この研究の内容に入る前に、シミュレーションの研究としての過去の研究の紹介をしたい。

・数値シミュレーション

過去の研究【統計的手法】

この手法では、基本方程式として「衝突合体方程式(coagulation equation)」を用い、ある粒子数の集団を統計的に扱う。

近似として、自由空間近似を用いた。

この手法の利点は、計算が簡単なことと、それによって大きな粒子数を扱うことが可能なことである。

結果としては、確かに微惑星は暴走的に成長した。

しかし、この手法には問題点がある。

一つは、成長した微惑星の粒子数が少なく、統計的に扱えないこと。

もうひとつは、粒子集団について計算してしまうため、空間構造を調べる(扱う)ことが出来ない点である。他にも、巨大化した微惑星による撹乱を表現しにくいなどがあげられる。

これらの問題点を克服できるものとして、第一原理計算の N 体シミュレーションがあげられる。

Kokubo&Ida 1996 ではこの N 体シミュレーションを用いて検証を進めている。

【N 体シミュレーション】
この手法では、基本方程式として、重力を考慮した運動方程式を用い、個々の粒子の運動を追う。

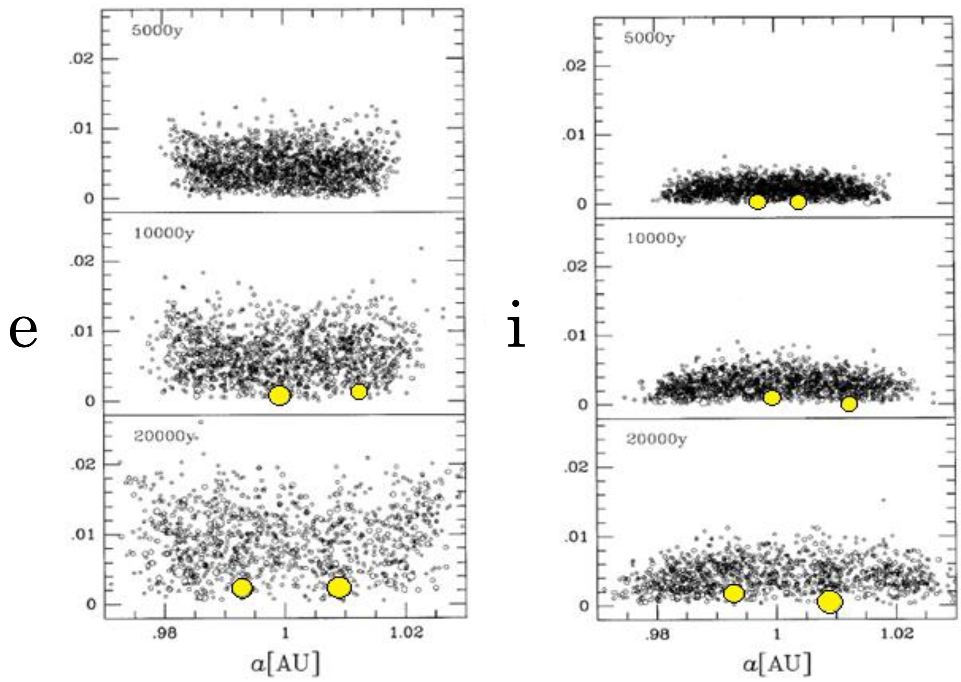
基本方程式:

$$m_i \frac{d^2\vec{x}_i}{dt^2} = -G\frac{m_j m_i}{\left|\vec{x}_i - \vec{x}_j\right|^3}\left(\vec{x}_i - \vec{x}_j\right)$$

この手法の利点は、先に述べたとおり、微惑星の空間構造を調べられること、少ない粒子数も扱えること、全粒子間の重力相互作用を考えることで撹乱による微惑星ランダム速度の変化も考慮できることなどが挙げられる。
Kokubo&Ida 1996 では、こちらの手法を採用した。

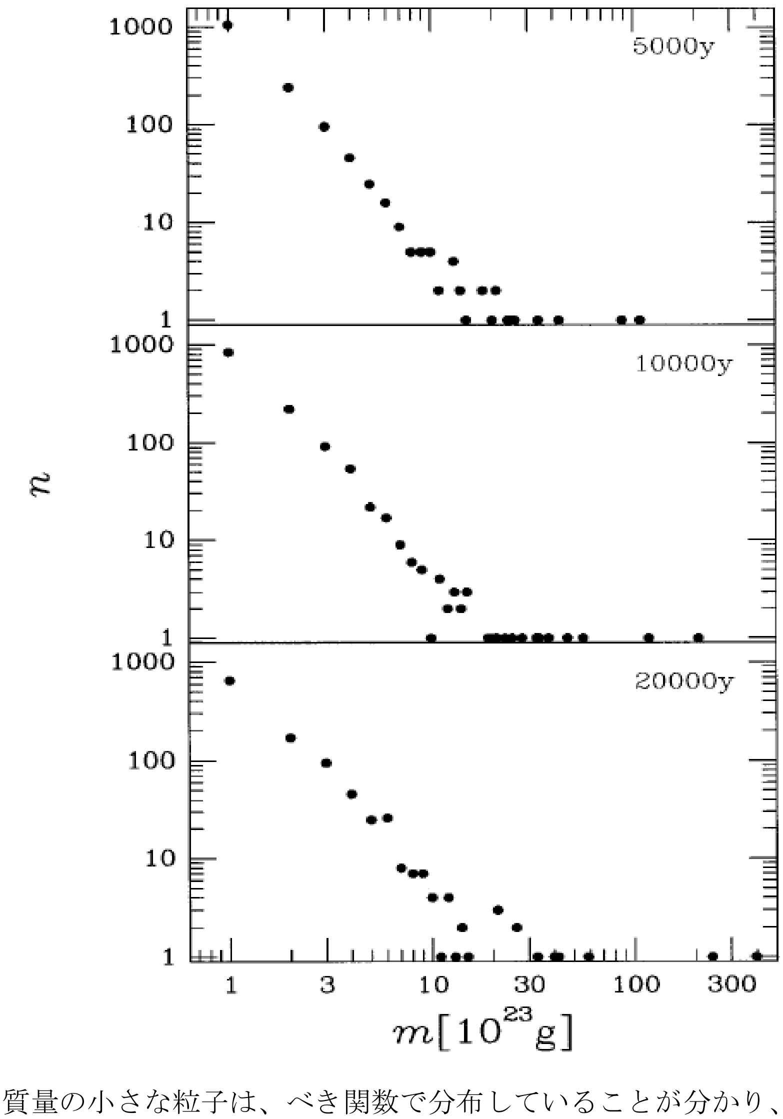
・本研究初期条件
粒子数:3000
分布:0.98~1.02AU のリング状に分布
eccentricity & inclination:レイリー分布
粒子半径:現実の五倍(計算速度を速めるため)

・本研究のシミュレーション結果
まずは、どのような計算をしたかを確認してもらうため、スナップショットを見ていただきたい(下図)。左は eccentricity 右は inclination である。



上から順に時間発展を表している。
この中に見られる黄色い丸は成長している巨大な微惑星。その他の黒いものは捕獲されていく小さな微惑星である。
小さな微惑星の e,i はそれぞれ大きくなっていくのが分かるが、巨大な微惑星のそれらの値は小さいままである。ここで力学的摩擦が効いていることが分かる。

次に、暴走的成長が起きているかを確かめるため、質量分布を見ていただきたい(下図)。

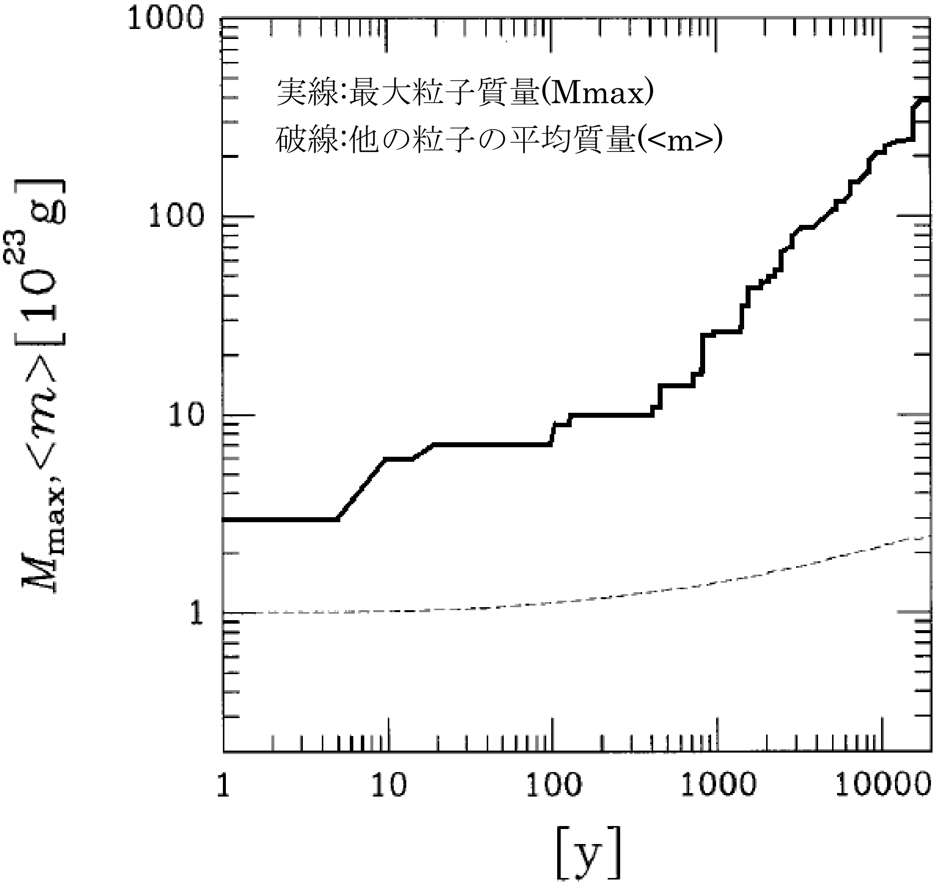


縦軸:粒子数

横軸:微惑星質量

質量の小さな粒子は、べき関数で分布していることが分かり、これは統計的手法の結果とほぼ一致した。さらに図の右下に、飛びぬけて大きな質量を持った微惑星が二つ発生しているように見える。つぎに、ここに見られる最大質量粒子とその他の粒子の質量の比の時間発展を見ることで、暴走的成長かどうかを定量的に調べる。

以下に見るのは、最大質量粒子の質量と、その他の粒子の平均質量の時間発展である(下図)



大質量粒子は急激に成長し、小質量粒子はほとんど成長していない。
この比の時間発展は明らかに、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{M_{max}}{\langle m \rangle}\right) > 0$$

となっている。
これは理論のところで見た通り、暴走的成長が起きていることを示している。

・結論(まとめ)
Kokubo＆Ida 1996 では、微惑星の成長モードを 3 次元 N 体シミュレーションを用いて検証した。
結果として、大きな微惑星は独占的に成長し、それ以前から理論的に示唆されていた暴走的成長が、N 体シミュレーションで初めて確認された。

・今後の研究

現在は、今回紹介した Kokubo&Ida 1996 で使用された 4 次のエルミート法を用いた N 体シミュレーションのコード開発を行っている。

今後は連星周りの地球型惑星の形成や、太陽系地球型惑星の形成などを調べていきたいと思っている。

紹介論文:Kokubo&Ida 1996

参考図書:系外惑星(井田茂)