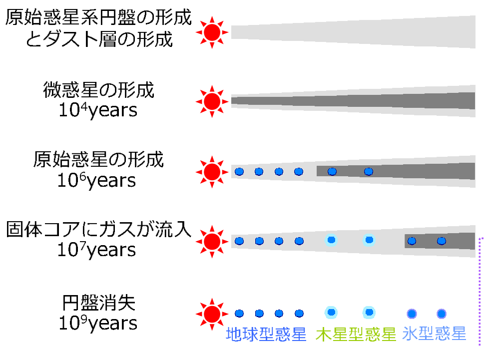
2次元乱流での惑星形成モデル

お茶の水女子大学　宇宙物理研究室
M1　皆川紘恵

林モデル(1981)

太陽系形成の標準モデル



《コア形成時間》

- 木星　7×10^7years
- 土星　4×10^8years
- 天王星　3×10^9years
- 海王星　1×10^{10}years

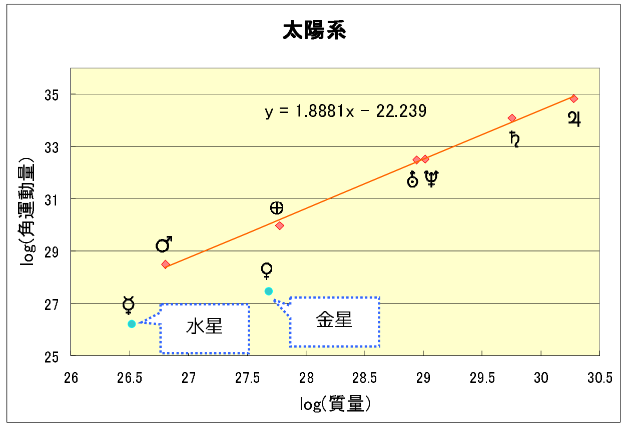
さまざまな問題点

- 海王星問題　…　暴走成長・寡占成長を入れても太陽系年齢(5×10^9years)を超えてしまう
- 惑星落下問題　…　微粒子；ガス抵抗
  ⇒mサイズで100～1000年程度で落下
  原始惑星；円盤ガスからのトルク
  外側円盤トルク　＞　内側円盤トルク
  ⇒10^6年程度で落下
- 星雲ガス散逸問題　…　現在の太陽系にガスはほとんどない
  etc…

⇨　まとめて解決できるモデルはないだろうか？

現在の太陽系

角運動量と質量の両対数プロット



※水星の公転と自転とは太陽と、金星の公転と自転とは地球と共鳴しているためベキ則の関係には入れなかった。

⇨　$J\propto M^{1.9}$というきれいな関係が見られている！！

最終的にこの関係を満たすモデルを考えよう！！

林モデルにおける問題点の解決策

ダスト粒子の落下問題を解決するには、一気に微惑星程度の大きさが出来上がることが必要。kmサイズまで大きくなればガス抵抗が無視できるので中心へ落ちずにすむ。つまり、まず安定な軌道を確保した上で惑星が形成されることになる。また、それが出来れば同時に形成時間の問題も解決できるはずだ。

質量と角運動量の関係

原始惑星系円盤で質量が**ダスト：ガス＝1：99**で、ほとんどガスが占めている。つまり角運動量のほとんどをガスが保有していることになる。しかし現在の太陽系には地球型惑星と木星型のガス惑星とが存在し、ガスの量から言えば不平等な配分になっている。
が、このモデルではガスもダストも分けることなく一気に渦でまとまるのでガスの角運動量をダストに平等に受け渡せるので $J\propto M^{1.9}$ の関係を満たすことが出来るだろう。

2次元乱流ディスクモデル

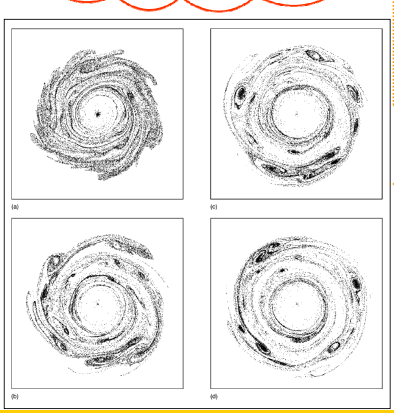
**円盤の厚さに対して半径がかなり大きいので厚さが無視できるので、もし原始惑星系円盤が乱流であるとすると2次元乱流で考えられる。
2次元乱流の特徴として特に知られているのが逆カスケードである。
3次元乱流の場合、出来上がった渦はどんどん小さくなるのに対して2次元乱流の場合は逆に大きくなるという結果がいくつも出されている。
これを使うと、原始惑星系円盤の初期のうちにダストを渦で取り込み、そこから自己重力によりまとまって惑星が出来上がるであろう。**

"Particle aggregation in a turbulent Keplerian flow"

A. Bracco, P. H. Chavanis, and A. Provenzale, Physics of Fluids **11** (1999) 2280

シミュレーションの仮定

- 磁場なし
- 2次元乱流
- 非圧縮性
- 粘性 $\nu=5\times10^{-5}$
- 初期条件に乱流が含まれている



基本方程式

$$\omega\equiv\omega_K+\zeta$$

Keplerian flow　Disturbance to the basic flow

Background velocity

$$v_K(r)=\frac{K}{\sqrt{r}}\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^{3/2}\right]\right\}$$

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}+J(\varphi,\zeta)=\nu\triangle\zeta+F$$

$$\begin{cases} F\equiv-J(\psi_K,\zeta)-J(\varphi,\omega_K) \\ J(\psi,\omega)=\partial_x\psi\partial_y\omega-\partial_x\omega\partial_y\psi \end{cases}$$

$$r_0=0.123$$
$$K=2.07$$
$$\nu=5\times10^{-5}$$

ダスト粒子の運動方程式

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}=-2\Omega\times\frac{d\mathbf{r}}{dt}-\gamma\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}-\mathbf{u}(\mathbf{r},t)\right)+\left(\Omega^2-\frac{GM}{r^3}\right)\mathbf{r}$$

条件

- **粒子の大きさ　＜　ガスの平均自由行程**
- **粒子の質量密度　≫　ガスの質量密度**

結果を現在の太陽系との対応

1番大きな渦　；　太陽系の5ＡＵに　⇒　現在の木星に相当

1番小さな渦　；　太陽系の1ＡＵに　⇒　現在の地球に対応

より太陽系に近いモデルになっているかもしれない。

今後の方針

左の論文では非圧縮性でシミュレーションを行っていた。が、実際の原始惑星系円盤は圧縮性であると思う。そうなってくると式が複雑化してくる。
例えば非圧縮性では連続の式が

と書けるので渦度方程式等が左のようにかなり簡単に書ける。
それに対して圧縮性の場合はナヴィエ・ストークス方程式をフルに解かなくてはならない。
そこで2次元の場合の渦糸の運動方程式がきれいに書けることを利用して今後は渦の成長を考えてみようと思う。
また、それと平行して、大前提となっている『乱流が本当に生じるのか』という問題も考えていく。