

惑星 18a

# 原始惑星系円盤の電離状態

名古屋大学

理論宇宙物理学研究室

M1 藤井悠里

## 1. 導入

原始惑星系円盤は大部分が中性分子ガスからなっているが、宇宙線や中心星からの X 線照射により、部分的に弱く電離している。この電離部分が円盤全体に分布しているのか、それとも円盤の表面だけに分布しているのかは非常に重要である。なぜなら、電離していると磁気流体となるので、円盤と磁場とが結合し磁気流体に特有の乱流が生じたりするからである。この乱流により角運動量が輸送され、降着が起こる。よって、円盤の進化を理解する上で、円盤がどのような電離状態にあるかを知ることは非常に重要なのである。

中性ガスの密度は十分大きいので、一定であるとして扱う。この中性ガスが宇宙線などの電離源により電離されて、電子とイオンができ、さらに再結合や電荷交換反応をする(図1)。これらの反応がつり合って各イオンや電子の数度、つまり電離度が決まる。一般に、これらの各反応の時間スケールは桁で大きく異なっているということが知られている。

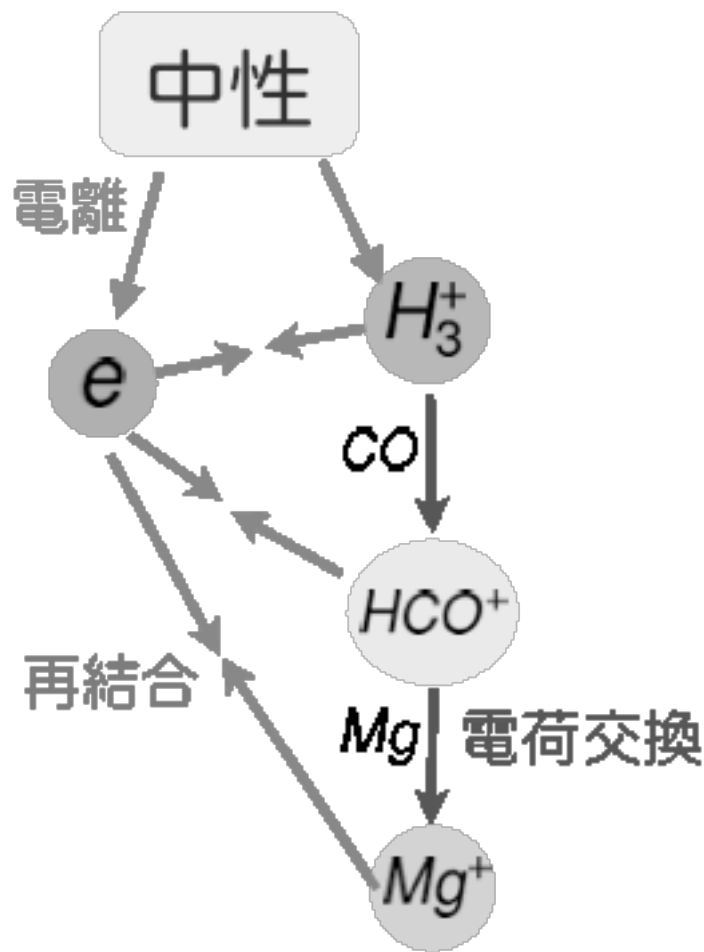


図 1

## 2. 数値計算

時間スケールの大きく異なる連立方程式は硬い方程式と呼ばれる。これをルンゲクッタ法のような陽解法で解こうとすると、長い時間発展を追うためにタイムステップを大きくすると正しく計算できず、またタイムステップを小さくして計算すると、計算に莫大な時間がかかってしまい、現実的ではない。そこで、一般的には陰解法が用いられる。陽解法とは違い、陰解法では1つ前ではなく1つ先の値を用いるので逆行列を計算しなければならない。そのため、 $N$  個の式を解くときには  $N^3$  のオーダーの計算をしなければならないといったように、式の数が増えると計算にかかる時間が多くなってしま

う。

そこで、区分厳密解法(Inoue & Inutsuka, 2008)を原始惑星系円盤の電離度の計算に応用することを考えた。この方法は陰解法のように逆行列を計算する必要がないので、早く計算することができる。また、反応によっては硬い方程式でも安定に解けることが分かっている。この方法が応用できることが分かれば、中心星のフレアがあるような短い時間スケールの問題も解くことができるかもしれない。

### 3. 区分厳密解法

区分厳密解法を原始惑星系円盤の電離度の計算に用いるには、電離反応や再結合反応などのそれぞれの反応ごとに方程式を分割し、1つの反応しか起こっていないと見なす。そうすると、その反応の部分は厳密解を求めることができるので、その厳密解を初期条件として時間発展させる。これを各反応で順番に繰り返していく。

今回は、計算方法のチェックであるので、簡単のために一番単純なイオンが2種類の場合を考える(図2)。図の円の大きさは相対的な数密度を表している。各反応の時間スケールのオーダーは、電荷交換では0.1秒なのに対し、放射再結合では $10^7$ 秒であり、その差は8桁も異なっている。

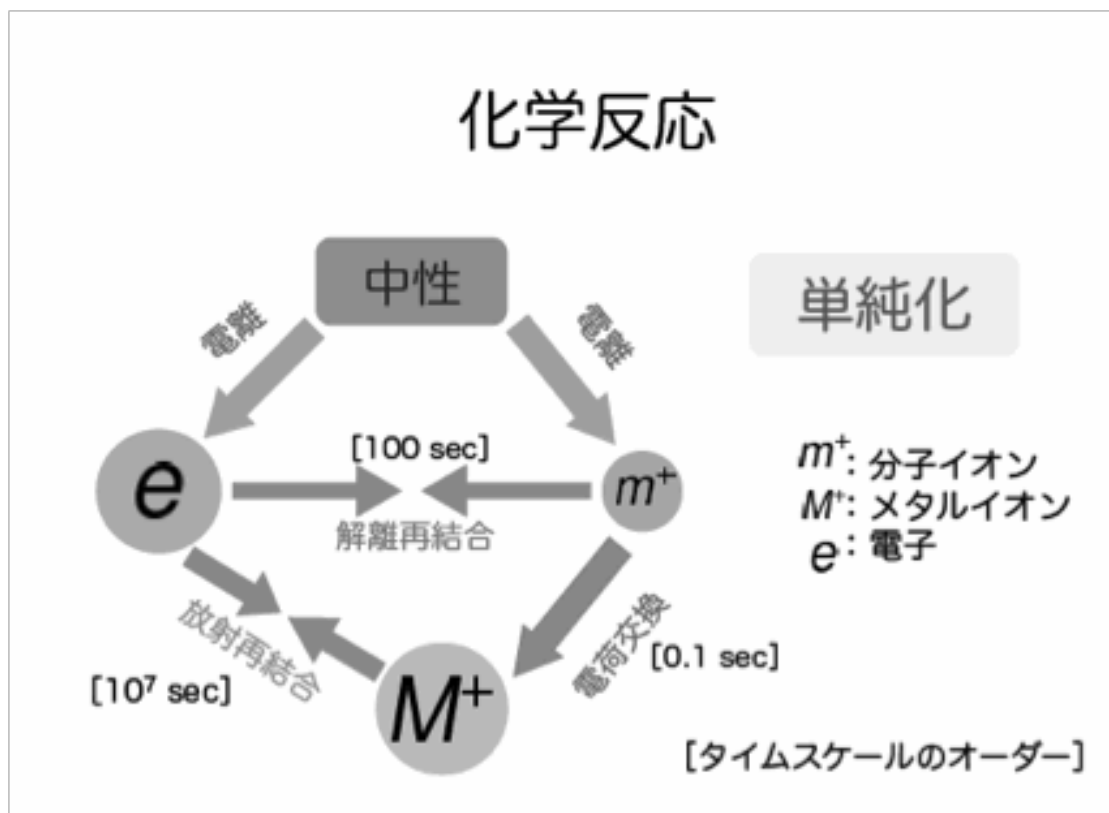


図2

図2を数式で表すと、以下のようになる。

<p>数密度の時間変化</p> $\frac{dn_{(m^+)}}{dt} = \zeta n_{(n)} - \alpha_{(m^+)} n_{(m^+)} n_{(e)} - \beta n_{(m^+)} n_{(M)}$ $\frac{dn_{(M^+)}}{dt} = \beta n_{(m^+)} n_{(M)} - \alpha_{(M^+)} n_{(M^+)} n_{(e)}$ $\frac{dn_{(e)}}{dt} = \zeta n_{(n)} - \alpha_{(m^+)} n_{(m^+)} n_{(e)} - \alpha_{(M^+)} n_{(M^+)} n_{(e)}$ <p style="text-align: center;">時間スケールの異なる硬い方程式</p>	<p>数密度</p> <p><math>n_{(m^+)}</math>: 分子イオン</p> <p><math>n_{(M^+)}</math>: メタルイオン</p> <p><math>n_{(e)}</math>: 電子</p> <p><math>n_{(n)}</math>: 中性媒質</p> <p><math>n_{(M)}</math>: メタル</p> <p style="margin-top: 20px;"><math>\zeta</math>: 電離率</p> <p><math>\alpha</math>: 再結合率</p> <p><math>\beta</math>: 電荷交換反応率</p>
--	---

#### 4. 計算手法の比較

今回扱う反応は、どんな初期条件で始めても定常解に収束することが分かっており、ここでは電子や各イオンの数密度はすべて零であるという初期条件のもとで計算する。計算にかかる時間のオーダーは分かっているので、まずは、陽解法、陰解法、区分厳密解法のそれぞれについて、タイムステップを大きくとっても計算することができるかを調べる。そして次に、この連立方程式は定常解が解析的に解けるので、各計算方法で電子やイオンの数密度がその定常解に収束するかどうか調べる。

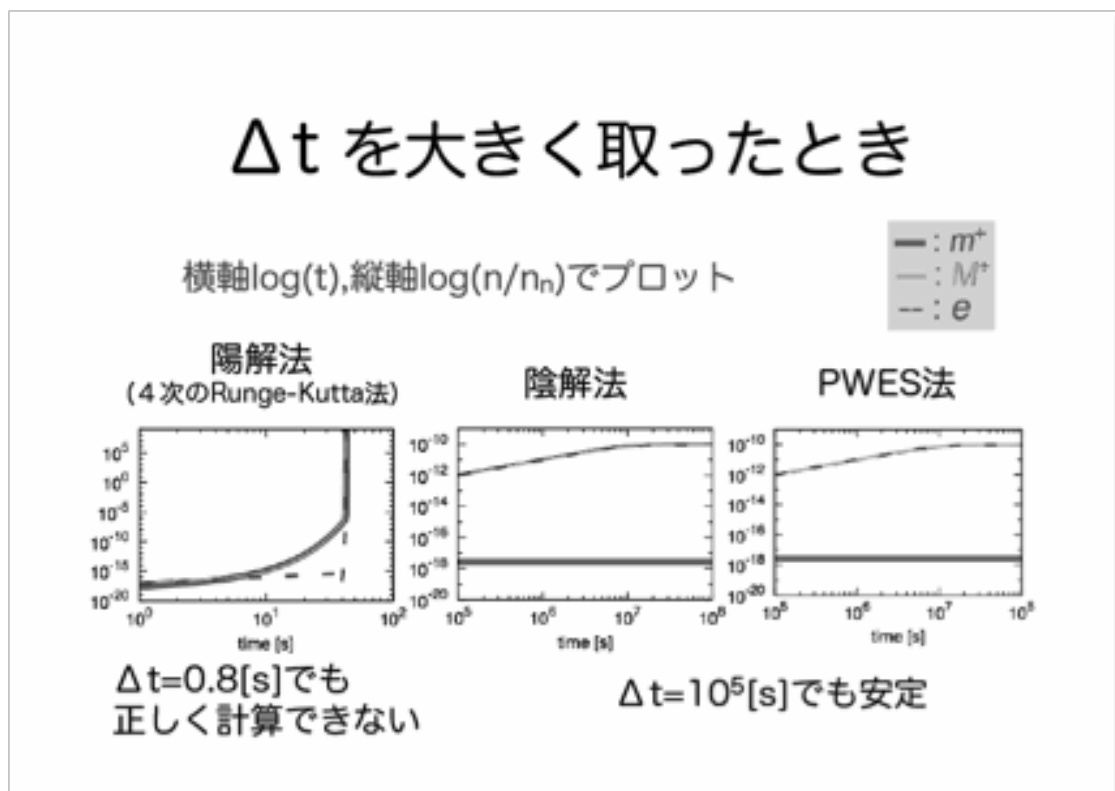


図3

図3はタイムステップを大きくして計算した時の結果である。横軸は時間、縦軸は電子・イオンのアバンドランスのそれぞれ対数でとっている。

タイムステップを $10^5$ 秒と大きくとっても、陰解法や区分厳密解法は安定であるが、陽解法ではタイムステップが0.8秒でも正しく計算できなかった。

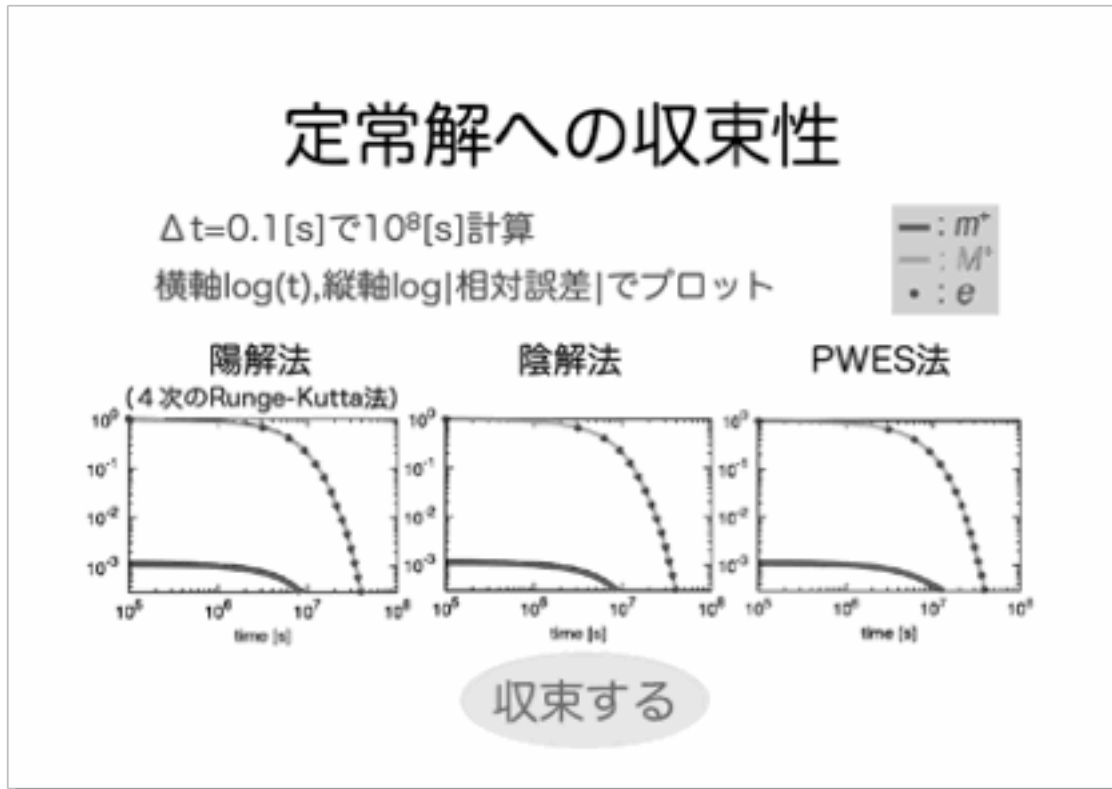


図4

次に定常解に収束するかを調べた結果を図4に示す。横軸は時間、縦軸は定常解とこの計算で求めた数密度との相対誤差の絶対値を先ほどと同じくそれぞれ対数でとっている。

陽解法でも計算できるように、タイムステップを0.1として、 $10^8$ 秒計算したところ、どの計算方法でも定常解に収束することが分かった。

## 計算法のまとめ

	陽解法	陰解法	PWES法
計算時間 (N個の式)	$O(N^2)$	$O(N^3)$	$O(N^2)$
大きな $\Delta t$	×	○	○
定常解への 収束性	○	○	○

表1

以上の結果を表1にまとめた。区分厳密解法は原始惑星系円盤の電離度の計算に応用できるということが分かった。

表1からも区分厳密解法はタイムステップを大きくとっても、早く計算できることが分かる。つまり、時間スケールの短い非定常な問題でも、長期間にわたって時間発展させることができるのである。

### 5. 非定常モデル

観測から、中心星からくるX線はフレアに伴う短時間変動により、非定常であることが分かっている。そこで、フレアがガウシアン型であると仮定して、図のように電離度を変化させた場合について区分厳密解法を用いて計算する。今回は、定常解を初期条件にとる。

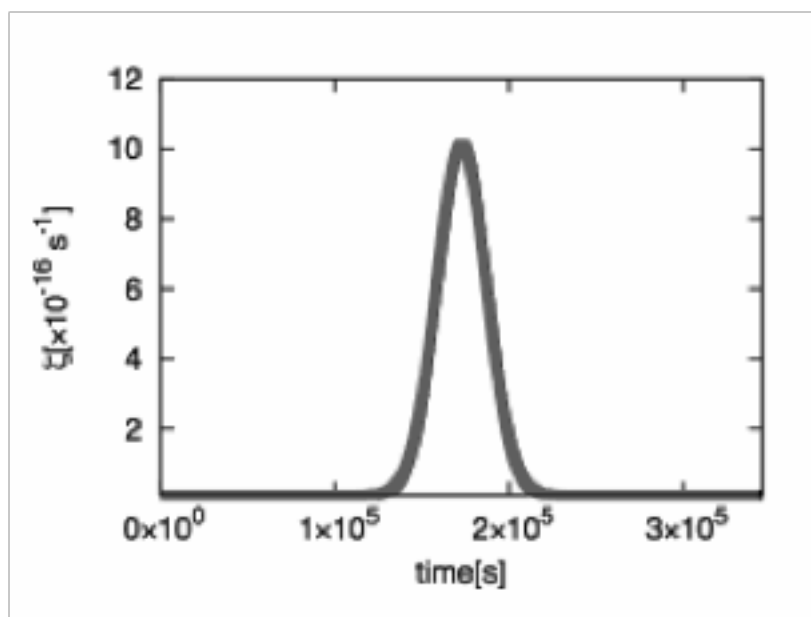


図 5

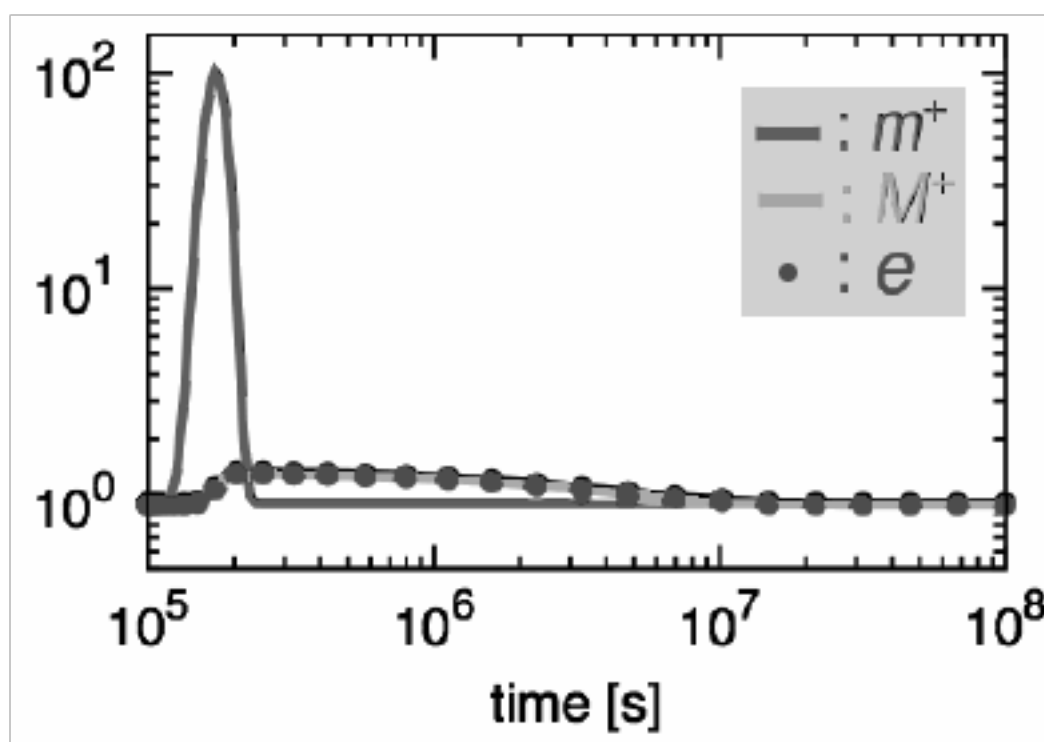


図 6



計算結果を横軸が時間、縦軸が電子・イオンのアバUNDANSのそれぞれ対数をとって図6に示した。分子イオンのアバUNDANSは電離度が上がると同時に上がり、電離度が下がると同じように下がった。一方、メタルイオンや電子は電離度が上がってしばらくしてからアバUNDANSが上がり、電離度が下がり出してしばらくしてからアバUNDANSも下がりだし、定常に戻るまでには時間がかかることが分かった。これは、図2で、電荷交換反応の時間スケールが短く、放射再結合の時間スケールが長いことに対応している。

## 6. まとめ

原始惑星系円盤においては、わずかな電離ガスがそのダイナミクスを支配するため、円盤の進化を考えるときには、電離度を定量的に決めることが重要である。この電離度を決めるのは様々な化学反応であり、各々の反応の時間スケールは大きく異なっている。そのため、電離度の計算には区分厳密解法が有用である。

今後はこの計算手法を用いて、イオンの種類を増やして化学組成を観測と比較したり、磁気流体のダイナミクスを調べたりしていきたい。