

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	高橋 実道
論文題目	Formation and evolution of the protoplanetary disks (原始惑星系円盤の形成と進化)		
(論文内容の要旨)			
<p>太陽系を初めとする惑星系の起源については「①太陽のような主星の周りの原始惑星系円盤中で、金属がダストとして赤道面に落下した後に、質量が <math>10^{18}g</math> 程度の微惑星がまず形成された。②太陽系の内側では、微惑星は衝突・合体を繰り返し岩石・鉄等を主体とする地球型惑星を形成する。③火星より外側では、同様に出来た岩石・鉄惑星に大量の水素ガスが降着して木星型惑星を形成した。」とする京都モデル(あるいは core-accretion モデル)が 有力な説である。しかし、近年、太陽系以外の惑星系が大量に発見され、太陽に非常に近い熱い木星型惑星や主星から木星までの距離の 4 倍の遠方に木星の 10 倍の質量を持つ惑星が発見される等、その説明には京都モデルの修正や京都モデルとは異なるシナリオの可能性等が議論されている。</p> <p>申請者はこのような観点から、原始太陽系星雲の面密度分布(<math>\Sigma</math>)を求める為に、星間雲の質量分布を良く近似すると考えられている Bonnor-Ebert 球から、角運動量を持ったガスが主星方向に落下した後、軸対称な降着 disk を形成するという簡単なモデルを採用した。降着 disk の形成に重要な粘性 <math>\alpha</math> が重力トルクによって起こり、<math>\alpha = A \exp(-BQ^4)</math> (<math>A, B</math> は定数、<math>Q</math> は Toomre parameter : <math>Q = \Omega_{\kappa} C_s / \pi G \Sigma</math> : <math>\Omega_{\kappa}</math> は epicyclic 振動数、<math>C_s</math> は音速、<math>G</math> は重力定数)という形とした。その結果最終的に形成される原始太陽系星雲の表面密度分布 <math>\Sigma</math> は初期の角運動量分布の形、初期の密度分布、<math>\alpha</math> を決めるパラメーター等に強くは依存しない普遍的な形になる事を見いだした。この普遍的な表面密度分布は 3 次元数値シミュレーション結果とも良く一致していることも示している。</p> <p>申請者は、以上のようにして形成された原始太陽系星雲の、大局的な安定性を二次元数値シミュレーションで調べている。<math>Q &lt; 1</math> では自己重力 disk は局所的に不安定であるが、<math>Q &gt; 1</math> では渦状腕が形成される事が知られている。Disk の初期の密度分布としては上で得られたものに近い分布を使い、opacity <math>\kappa</math> に依存した冷却過程も考える。Disk 面での初期の <math>Q</math> は 1 より大きいので局所的には安定であるが、大局的には安定ではないとともに、冷却過程を考慮に入れているので時間発展とともに <math>Q</math> の値は変化する。初期の <math>\Sigma</math> の大きさ、初期の disk のサイズ、初期の温度、<math>\kappa</math> の違う 16 のモデルについてシミュレーションを実行した。そのうち、7 つのモデルで、形成された渦状腕で重力不安定が起こり、分裂が見られた。この分裂現象に関しては冷却時間が回転周期の 30 倍より小さいのが分裂の条件であると言う主張が以前になされたが、その後その反例が見つかり、分裂の条件が明らかではなかった。そこで、申請者は分裂する渦状腕が <math>Q &lt; 0.6</math> だと初期条件に依存せずに分裂すると言う新たな条件を得た。さらに、渦状腕を、回転しているリングと近似すると、不安定になる条件を解析的に求める事ができて、その結果と一致する事を見いだした。</p> <p>原始太陽系星雲はガスだけでなく、金属からなるダストが存在している二流体系である。そこで、申請者は二流体からなる回転 disk の安定性を次に調べている。両者の速度は一般に異なるため二流体には摩擦が働く。ダストがガスの 10% くらいある場合、主星から 100 天文単位の所で成長時間が <math>10^4</math> 年程度の不安定性があることを発見した。この不安定性は、近年、原始太陽系星雲と見なせる disk で、観測されているリング状の空隙やバナナ形状の構造の形成と関係している可能性がある。</p>			

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

惑星系形成の京都モデルが提案された時点では、太陽系以外の惑星は見つかっていなかった。そこで、原始太陽系星雲の表面密度( $\Sigma$ )の分布は現在の水星から海王星までの惑星の分布から推定する外なく、それは、 $r$ を太陽からの距離として $\Sigma \propto r^{-1.5}$ であった。申請者は、星間雲の質量分布を良く近似すると考えられているBonnor-Ebert球と言う、より根源的な初期条件から出発して、簡単な1次元モデルで $\Sigma$ が冪乗則に従い、その冪が場所によって3つの部分に分かれるものの、京都モデルを再現する部分もある事を示しているのは極めて興味深く評価できる。さらに原始惑星系星雲の3次元数値シミュレーションの結果と簡単な1次元モデルの結果が相容れると言う点とパラメーター依存性の少ない普遍的な表面密度になるという結果は新しい知見である。

形成された原始惑星系 disk は局所的には安定で、いわゆる Toomre の  $Q$  パラメーターは  $Q > 1$  であるが、 $Q > 1$  では渦状腕のできる事が知られている。申請者は opacity  $\kappa$  に依存した冷却過程も入れた2次元数値シミュレーションを種々のパラメーターに対して実行し、渦状腕が不安定で、分裂が起こり、その結果、惑星が形成される場合を見つけた。その条件として渦状腕での  $Q < 0.6$  という結果を得た。この結果は簡単な解析計算でも確かめられた。平面状の回転 disk の局所不安定性条件は  $Q < 1$  であるので、渦状腕の場合との違いはその幾何学的形状によるものである。このような形状に依存した条件が存在していると言う結果は新しい知見であり、評価出来る。

申請者は、さらに原始惑星系 disk がガスとダストの2流体になっている事に注目して、2流体系でのみ存在する軸対称な安定性を調べた。その結果、主星から100天文単位の所で成長時間が $10^4$ 年程度の新たな不安定性があることを発見した。この発見は今後もいろんな応用が考えられるので評価出来る。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成 年 月 日までの間)当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降