

# 論文審査の結果の要旨

氏名 シェ ユーシン  
(薛 钰新 XUE Yuxin)

本論文は6章と9個のAppendixからなる。第1章イントロダクションとして、本論文の主題であるCoplanar High-eccentricity Migration (CHEM) によるHot Jupiter 形成の研究の背景と目的が述べられる。第2章は、これまでのHot Jupiter の形成理論研究をレビューし、第3章で本論文で扱う惑星の運動に関する基本方程式を記述している。第4章では、CHEMによる惑星軌道の変化を数値計算により系統的に研究した。第5章では第4章のCHEMによる軌道変更後の長期的な自転-軌道関係の変化を数値計算によって系統的に研究した。第6章では本学位論文全体の結論をまとめている。

1990年代の最初の惑星系の発見以来、これまでに3000個を超える系外惑星が発見されている。その中で木星程度の質量を持ちながら恒星からわずか0.1天文単位(AU)程度の距離を公転しているHot Jupiterは、系外惑星発見以前に作られた惑星形成論からは全く予想外の存在である。木星質量のガス惑星は主星からsnow lineの外側で形成されるので、Hot Jupiterはsnow lineの外側から何らかの摂動による輸送過程により主星に近くに運ばれたと考えられる。その輸送には複数の過程が関与していると考えられるが、主星の自転角運動量方向と惑星の軌道角運動量方向が逆転した逆行惑星 (counter-orbiting planets)を作ることができるのは今の所CHEMのみである。先行研究 (Li et al. 2014)は、質点近似による解析的な解の範囲でCHEMにより逆行惑星が形成されることを示したが、数値simulationでは逆光惑星は形成されなかった。これは仮定した初期パラメータが不適切であった可能性がある。そこで、本論文は、ありうる初期パラメータ空間を十分にカバーする系統的なCHEMの数値計算を行うことを第一の目的とする。さらに、migration後にspin-orbit関係を変化させる潮汐力についても検討を行った。その結果主に以下の結果が得られた。

- (1) ニュートン重力、質点近似では、解析的な予想一致して逆行が起きるが、一般相対論、主星と惑星の形状変形、潮汐力による散逸は逆行が抑える方向に働く。
- (2) hot jupiterが形成された場合、その多くは主星自転角運動量とhot jupiterの軌道角運動量のなす角 $\psi$ が90度以下であった。第二惑星質量が木星質量の30倍以上の場合には、90度以上の場合には90%以下の10%程度以下であり、第二惑星質量がそれよりも小さく木星質量程度の場合には90度以上の惑星はほとんど作られなかった。
- (3) 観測されている7つの第二惑星をもつシステムのパラメータを仮定して数値計算を行うと、第一惑星の初期離心率を振っても、最終的な軌道半径は比較的狭い範囲に分布した。4例については、第一惑星の軌道半径を説明することが可能であった。

(4) Lai (2012) により提案された星内部のコリオリ力による内部波動による散逸も考慮するとCHEMによるmigrationが起きた後、 $\Psi=0, 90^\circ, 180^\circ$ に安定な状態があるが、 $\Psi=90^\circ, 180^\circ$ は、metastableであり、最終的には $\Psi=0$ に移行する。

以上から、CHEMにより巡行するhot jupiterを作ることができるが、逆行惑星を作ることは困難であることがわかった。 $\Psi$ を視線方向に射影したものしか観測できないので、逆行が見かけのものである可能性があり、本論文の結果は、今後の観測の重要性を示している。さらに数値計算の結果から、潮汐力による軌道崩壊(tidal disruption event)の痕跡の観測可能性、hot jupiterの軌道半径分布や主星の自転速度分布により形成プロセスへの制限が得られる可能性など、今後の観測的研究に対して複数の重要な示唆を与えた。

以上、本論文はCHEMによるhot jupiterの形成について、数値計算によるこれまでにないシステマティックな研究を行い、新たな研究に向けた知見を得たと結論する。さらに、数値計算の誤差や初期値の影響を注意深く検討しており、数値計算の結果は高い信頼性を有すると判断した。

本研究は指導教官の須藤教授を始めとする研究チームとの共同研究によるものであるが、成果の創出に論文提出者の寄与は本質的であり、特に、第4章、5章の数値計算と、そこから第6章の結論の導出は論文提出者が全て独自に行なったものである。このため論文提出者の主体性と寄与は博士論文として認めるのに十分であると判断する。

したがって、本論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。