

論文の内容の要旨

Stability Analysis of Differentially Rotating Stars (微分回転星の安定性解析)

鴈野重之

一般に星は自己重力に束縛された流体と見なすことができるが、これらの自己重力流体は高速回転下で非軸対称摂動に対して不安定化することが知られている。回転星の不安定には二通りあり、これらは重力波や粘性などによるエネルギー散逸のタイムスケールで成長するセキュラー不安定と、系の力学的タイムスケールで成長するダイナミカル不安定の二つである。剛体回転且つ密度一様のように単純化された星モデル (Maclaurin Spheroid) における古典的な解析の結果によれば、星の回転が速くなるととき $T/|W| > 0.14$ でまずセキュラー不安定が現れ、次いで $T/|W| > 0.27$ でダイナミカル不安定が発生することがわかっている。ここで T と W は各々星の回転運動エネルギーとポテンシャルであり、本研究ではこのパラメタ $T/|W|$ を星の回転の指標として用いる。このような古典的に得られた不安定の閾値は一般の星にも通用するものと思われる。しかし、実際の天体を Maclaurin Spheroid のような単純なモデルを用いて近似することは決して現実的ではない。例えば、回転不安定の研究において最も重要なターゲットとなる原始中性子星は高速で回転していると同時に微分回転の影響も受けていると思われる。さらに実際の天体を密度一様な状態方程式で表現することも良い近似とは言い難い。それゆえ、簡略化されたモデルから得られた回転不安定の閾値を、これら実際の天体にどれほど当てはめ得るかは実は定かではない。また、1960年代に精力的に進められた tensor virial 法による一連の解析では、Maclaurin Spheroid で求められた不安定の現れる限界となる $T/|W|$ は、星の回転則に依らないとの示唆がなされていたが、現在ではこのような手法を一般の星にも適用することは正しい解をもたらさないことが証明されており、現状としては不安定の振舞いについての統一的な見

解を得るには至っていない。実際、近年盛んに行われている数値シミュレーションの結果によれば、微分回転している星では安定性限界が著しく異なる可能性も示されている。そこで本研究では線形安定性解析の手法を用いて非一様な回転則や圧縮性を伴う星の安定性を調べる。

本研究では回転星の安定性を調べるに当って線形安定性解析の手法を用いる。線形解析を行う際の非摂動状態の星としては、ニュートン重力での軸対称ポリトロープを採用する。非摂動な星の平衡形状を求め、その上での微小摂動を考える。ここでは摂動は断熱的でかつ、各摂動物理量は時間と方位角方向に対して $\delta f = \sum_m e^{-i\sigma t + im\phi} f_m(r, \theta)$ という依存性を持つと仮定して方程式を立てる。このようにして得られた摂動流体方程式を線形化し、 σ に対する固有値問題として解くことにより、モードの固有値 σ が求まる。こうして得られた固有値 σ の値によって、星の安定性を議論することができる。

本研究では一般に最も成長率が大きいと考えられている $m = 2$ の f -mode (bar-mode) による不安定性を主に考える。回転星において重力波放出に伴い bar-mode がセキュラーに不安定化する点は、固有値 σ がゼロとなる点に対応している。よって、線形解析により bar-mode の固有値を回転の関数として計算し、そのゼロ点を求めることで不安定の始まる閾値となる $T/|W|$ がわかる。実際に微分回転圧縮星におけるモード固有値の計算を行ったところ、セキュラーな安定性は微分回転の度合いに強く依存することが示された。さらに、微分回転の効果がさほど強くない場合には不安定の閾値は星の状態方程式にも強く依存する。また、非常に強い微分回転則を採用した場合には、セキュラー不安定は古典的な閾値である $T/|W| \approx 0.14$ よりもはるかに低速回転の場合でも現れ得ることがわかった。

一方、回転星でダイナミカル不安定の現れる点は、モード固有値 σ の虚数部分がゼロでない値を持つ点を探すことにより求められる。星の回転が無い極限では $\text{Im}(\sigma)$ はゼロであるので、そこから星の回転率を大きくしていく際に、ゼロでない $\text{Im}(\sigma)$ が現れる点がダイナミカル不安定の閾値と判断される。線形解析による微分回転星でのモード固有値から、旧来から知られている bar-mode のダイナミカル不安定の限界値も、微分回転の強度を上げるとともに減少することが示される。すなわち、微分回転を伴う星は $T/|W| < 0.27$ であってもダイナミカルに不安定化することがわかった。このような不安定の閾値の低下は状態方程式に依らない。微分回転の効果が強いときには不安定の閾値は $T/|W| \approx 0.2$ 程度まで下がることがわかった。このようなセキュラーおよびダイナミカル不安定の閾値の低下は、原始中性子星のような高速微分回転星では従来考えられて来たよりも不安定が現れやすい傾向にあることを示すものである。

更に、本研究では微分回転の効果が非常に強いときには、星の回転率が小さいときにでも現れる新しいダイナミカル不安定が存在することを発見した。我々の計算によれば、十分強い微分回転を仮定すれば、回転率が $T/|W| \approx 0.05$ 程度の星でもダイナミカルに不安定化することが示唆されている。このような低速回転で現れる不安定性としては従来 Papaloizou-Pringle 不安定やシア不安定などが知られているが、ここで発見した不安定はそれらのいずれとも異なる性質を持つ。このような前述の結果も含め、回転星の不安定に関するこれらの結果は、古くから妥当なものと考えられてきた不安定の閾値が、現実的な星には当てはまらないということを強く示唆するものである。

これらの回転不安定性は実際の宇宙物理のトピックの中でも重要となる。例えば、高速回転する天体はセキユラー、またはダイナミカルな不安定性の影響を受けて角運動量を失い、スピンドウンする可能性がある。このような過程は原始中性子星や、生まれたての星のコアなどのスピン進化に大きな影響を与える。また、コンパクト天体を考える際には、このような回転不安定の成長は準周期的な重力波放出の原因となり、それゆえに回転不安定の研究は重力波天文学の観点からも興味深いものとなっている。

本論文では回転星における非軸対称モードの不安定性と、線形解析によるその計算法について紹介した後、微分回転星におけるセキユラー不安定、高速回転下でのダイナミカル不安定、低速回転で発生するダイナミカル不安定についての結果を示し、得られた結果の解釈と重要性を議論する。