

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)

個人研究費

2008年度研究成果報告書

研究代表者	所属・職名	氏名
	理学部・助教	西條 統之 印
研究課題	相対論的回転星の動力学	
研究期間	2008年度	
研究経費	500千円	

研究の概要(200~300字で記入、図・グラフは使用しないこと)

高速回転する相対論的回転星の動力学および中性子星の内部構造の理解を目指した。

1. 回転星の動的な棒状の不安定モードの非線形効果

- 棒状の不安定モードによる星の回転軸上の振動モード励起を発見。
- その特徴的な振動数は棒状の不安定モード振動数の2倍。
- 偶数次のモード間結合により、奇数次のモードは爆発的に増幅。

2. 相対論的回転星の重力崩壊および不安定性の励起の可能性

- 非軸対称の不安定性発生がない場合、軸対称の重力崩壊の描像である。
- ブラックホールとディスクが動的に形成される場合、準定常状態に到達した後、準周期的な重力波を放出する。
- 非常に高速回転するブラックホールが形成された場合、その準周期的な重力波は増幅される。

キーワード(研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[ Faraday 共鳴 ] [ 超大質量星 ] [ 重力波 ]

**研究成果の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)**1. 回転星の動的な棒状の不安定モードの非線形効果**

我々は、棒状のモードに対して動的に不安定な回転星を、ニュートン重力場中における3次元流体動力学の数値シミュレーションと簡素化された数学的なモデル両方の手法により、研究した。

我々は、棒状のモードに対して動的に不安定な回転星の、棒状の構造が破壊される直前の非線形領域において、興味深いモード間結合を発見した。また、回転星の回転軸上に主に伝播する準周期的な波が励起され、その特徴的な振動数は棒状の動的な不安定モードの振動数の2倍であった。この特徴は流体力学におけるFaraday共鳴とかなり類似している。我々の発見は、流体力学において弱非線形領域でしか支持されていないが、我々は強非線形領域においても同様の特徴であるパラメータ共鳴の特徴が現れていることも示した。

我々はまた、我々が構築した数学的に簡素化されたモデルはモード間結合の重要性を示す格好の具体例を提供していることを示した。奇数モードの振幅は不安定な奇数モードが存在することなしに増幅する。実際、それらは不安定な $m=2$ の棒状のモードによって成長する。

我々はさらに、数学的に簡素化されたモデルの結果は3次元の流体動力学の数値シミュレーションと物理的な描像が一致することを確認した。具体的には、奇数モードは棒状の不安定性が非線形領域に到達した後初めて成長することを示した。モード間結合と不安定モードの成長の時間スケールは回転則や棒状の不安定性の強さに依存すると思われる。流体力学の数値シミュレーションにおいて、平衡解の回転星に対する摂動が奇数モードのみ、あるいは偶数モードのみであることは数値誤差を含めるとほぼ不可能である。したがって、不安定な棒状のモードは長時間積分後には奇数モードと偶数モードの両方のモードを励起する。

類似するモード間結合は、ニュートン重力場中における回転星の1本腕の渦状の不安定性や楕円型の不安定性の数値シミュレーションに現れる。時間発展開始時のモデルやモードの成長のメカニズムは異なるが、長時間発展後の非線形成長時に乱流のような振る舞いが、密度を天頂角方向にFourier分解した要素に現れる。この振る舞いは、不安定モードの非線形飽和状態においても重要である。異なる不安定モード生成における類似点の起因を探究するためには、さらなる研究が必要不可欠である。しかしながら、流体力学における非線形性が、この類似性の要因であると仮定することは妥当である。

## 研究成果の概要 (つづき)

## 2. 相対論的回転星の重力崩壊および不安定性の励起の可能性

我々は、差動回転する超大質量星の重力崩壊を、特にブラックホール形成後の段階に着目して、一般相対論の元で3次元流体動力学の数値シミュレーションを用いて研究した。我々は、特に超大質量星がその自己重力の強さによって重力崩壊する重力不安定性開始点から、高速回転するブラックホールとディスク形成に着目した研究を行った。

我々は動力的なアプローチで求めた最終的に形成されたブラックホールとディスクの質量や角運動量は、回転星の平衡解から推察されるブラックホールとそのまわりに形成されるディスクとよく一致していることを発見した。この結果は、非軸対称不安定性が発生しなければ、ブラックホール質量とディスクの質量の推察は簡単な軸対称系の描像でよいことを示している。すなわち、超大質量星は単位質量あたりの局所的な角運動量を保存しながら重力崩壊してブラックホールを形成した後、まわりの流体素片をブラックホールの最内接安定軌道の半径(試験粒子をブラックホール時空においたとき、その粒子が安定に円運動できる最小の半径)まで吸い込みながら成長する。

我々はまた、この系から放出される重力波の波形を計算した。連星ブラックホール合体の数値シミュレーション等でブラックホールが形成される際、重力波の波形は準周期的で振幅が増幅する *inspiral waveform*, 合体時に発生する *burst waveform*, ブラックホールが揺らされることにより発生する *ringdown waveform* に分割できる。それに対して、ブラックホールとディスクが動的に形成される場合、星が重力崩壊によって発生する *burst waveform*, ブラックホールが揺らされることにより発生する *ringdown waveform* に加えて、ディスクが存在することによる準周期的な波形が重力波に現れることを発見した。

我々はさらに、ブラックホールが最大に回転可能な状態に非常に近く高速回転している場合、*ringdown waveform* のあとの準周期的な重力波の振幅は、時間発展とともに増大することを発見した。この準周期的な重力波波形の増幅要因は、ディスクの流体素片の運動に伴う重力波の発生、衝撃波生成に伴う重力波の生成、ディスクの不安定性(共回転共鳴)に伴う重力波の発生、等が考えられる。この発生要因を明らかにすることは今回行った数値シミュレーションでは難しく、別のアプローチ(簡素化されたモデルを用いる手法や摂動論的な手法)による解決が望まれる。これは今後の課題である。