

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	大宮 英俊
論文題目	Evolution of self-interacting axion around rotating black holes (回転するブラックホール周りの自己相互作用するアクシオンの進化)		
(論文内容の要旨)			
<p>アクシオンは、標準模型を超える粒子として有力なものと考えられている。アクシオンを考える動機付けの一つとして、超弦理論に基づく、我々の宇宙にたくさんのアクシオンが存在するという予言(アクシバースシナリオ)がある。超弦理論から導出されるアクシオンは、様々な範囲の質量を持つことが可能である。特に、アクシオンのコンプトン波長が回転するブラックホールの大きさと同程度になるとき、アクシオンはブラックホールからエネルギーと角運動量を引き抜き、その結果アクシオンの巨視的な凝縮体がブラックホール周囲に自発的に形成される。</p> <p>アクシオン凝縮体の存在により、重力波観測を通じてアクシオンを検出ないしは制限することが可能になる。その可能性のひとつが、凝縮体から放射される特徴的な重力波の検出である。現在、特徴的な重力波としては、2つのものが考えられている。一つは、アクシオンの引力的な自己相互作用による凝縮体の崩壊現象(ボーズノヴァ)とそれに伴うバースト的な重力波である。もう一つは、自己相互作用によるエネルギー散逸とブラックホールからのエネルギー引き抜きが釣り合った準定常的な凝縮体から放射される連続重力波である。将来の重力波観測でこれらの重力波を観測するためには、回転ブラックホール周辺の自己相互作用するアクシオンの進化を、幅広いパラメーター(アクシオンの質量とブラックホールスピン)で正確に知る必要がある。特に、実際に凝縮体がどのような状態に至るかを知らなければならず、そのためには凝縮体の進化を非常に小さい振幅から、崩壊が起こるくらい非線形性が強くなる大きな振幅まで、長時間追わなければならない。</p> <p>本学位論文では、自己相互作用するアクシオン凝縮体の進化を追跡する手法を新たに提案し、アクシオン凝縮体の進化に対する自己相互作用の影響を研究した。本学位論文で提案する手法は、凝縮体の振幅が成長する時間スケールと、凝縮体がブラックホールの回りを回転する動的な時間スケールの中に大きな隔たりがあるという、凝縮体の持つ断熱的な性質を用いることが基本的な戦略である。まず、従来用いられていた、アクシオンのコンプトン波長がブラックホールの大きさよりも十分小さい場合に適用できる摂動論を、アクシオン質量に対する制約がない手法へ拡張した。その結果、自己相互作用による散逸を含めたとしても、凝縮体は非線形性が強い領域に突入し、摂動論が破綻することを示した。</p> <p>次に、凝縮体の振幅が非常に大きいような領域で、自己相互作用に対する近似なしに長時間の時間発展を統合的に追跡する手法を提案した。この手法では、短時間(動的な時間スケール)の間は、凝縮体は与えられた振幅のもとで定常的になっていると仮定し、長時間(凝縮体が成長するタイムスケール)の時間発展は、振幅を時間に依存する変数に格上げし、その時間変化をエネルギーと角運動量保存則を満たすように求める。数値計算により、凝縮体が崩壊するための条件を見出し、また、引力相互作用により散逸が強められることで多くの場合で凝縮体が崩壊せず、準定常状態に落ち着</p>			

くことを示した。さらに、準定常状態の配位は、摂動論で予言される配位と大きくずれないことも明らかにした。したがって、重力波のシグナルとしては、連続重力波が期待され、また、本学位論文の結果を用いることで、具体的な重力波の波形を計算することが可能になる。

(論文審査の結果の要旨)

超弦理論からは様々な軽い質量を持つスカラー場が存在する可能性が示唆される。宇宙論的にはそのような軽い質量を持つスカラー場が宇宙の大域的構造形成にも寄与している可能性も議論されている。このようなスカラー場を総じてここではアクシオンと呼ぶが、標準模型の粒子とアクシオンの間の相互作用が弱いため直接検出することは難しい。しかし、アクシオンの存在は宇宙における様々な現象に痕跡を残す。その一つが、回転するブラックホール周りに形成するアクシオン雲である。ブラックホールの回転エネルギーを、場のエネルギーに転換する超放射現象により、適切な質量をもつアクシオンが存在すれば、回転するブラックホール周りに自然にアクシオン雲が形成される。このアクシオン雲はブラックホールの回転を下げる効果、ブラックホール周りの重力場を修正する効果、アクシオン雲自身から重力波を放出する効果などの様々な観測可能な痕跡を残す。観測からアクシオンの存否に対する正しい制限を得るにはアクシオン雲の進化過程を理解する必要がある。

これまでの多くの研究では、簡単のためにアクシオンの自己相互作用が無視できるモデルに限って調べており、自己相互作用の効果に着目した研究は少数であった。特に興味深い、ブラックホール半径がアクシオンのコンプトン半径と同程度になる領域の研究はほぼ未着手であった。自己相互作用を考慮してアクシオン雲の進化を解く問題は、基本的には非線形場の方程式をブラックホール時空上で解く問題である。場の方程式自体を数値的に解き時間発展を追うことは可能であるが、超放射によるアクシオン雲の進化は系の動的な時間スケールと比較すると非常に遅いため、通常の数値シミュレーションで初期のアクシオン雲からの成長を再現することは計算コスト面から極めて困難である。この困難を解決するため、本論文ではアクシオン雲のパターンの回転と同期した座標系での時間発展が非常にゆっくりであることに着目した近似法を提案した。準静的なアクシオン雲の配位の族を数値的に構築し、エネルギーバランスから雲の進化を導く数値計算手法を確立した。さらに、この手法をさらに発展させ、複数の回転速度を持つ雲の成分が共存するような状況でも、2次的な雲の成分の質量が小さいならば、数値的に構成した非摂動背景場の上の線形摂動として扱うことで、雲の時間発展を導く手法を確立した。

上記の手法を用いた解析の結果、多くのパラメータ領域において、雲の成長は非線形相互作用の効果で一旦加速されるものの、やがて2次的な雲の成分が急激に成長し、その反作用で主要な雲の成分の成長が阻害されるという現象が起こることを示し。その結果、複数の雲の成分が共存する比較的質量の小さい準定常な雲の配位が実現されることが明らかになった。さらに、アクシオンの質量パラメータの値についてサーベイすることで、様々な雲の成長シナリオが実現されることを示した。中には、ボーズノバと呼ばれるような自己相互作用による雲の爆縮が起こるパラメータ領域が存在する可能性も示唆された。

本博士論文では、研究手法を一から開拓し、最終的にアクシオン雲進化の基本的

な描像を明らかにするという重要な成果を挙げた。超弦理論が予想するアクションでは自己相互作用を無視することは一般にできないと考えられるので、アクション雲進化の標準的シナリオを大きく書き換えたといえる。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5年1月17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。

要旨公表可能日： \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日以降