

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	高橋 卓弥
論文題目	Axion clouds around black holes in inspiraling binaries (インスパイラルする連星におけるブラックホール周りのアクシオン雲)		
(論文内容の要旨)			
<p>重力波観測の始まりにより物理学の基礎的な側面を探索する新しい手段が得られた。その中でも、アクシオンと呼ばれる超弦理論から予言される未発見の素粒子はブラックホール物理学と深く関連し、重力波を用いた探索が可能である。アクシオンがブラックホールの半径と同程度のコンプトン波長に対応する質量を持つと、超放射と呼ばれる現象により、回転するブラックホールからエネルギーと角運動量を引き抜くことができる。この機構を通じて、アクシオンはブラックホールの周りに自発的に雲を形成し、様々な観測可能な現象を引き起こす。</p> <p>本学位論文では、アクシオン探索に関して雲を持つブラックホールが他のコンパクト天体と連星系を成している状況を考える。連星系はその軌道運動から重力波を放射し、エネルギーを失いながら徐々に連星間距離が縮まるインスパイラル軌道をとる。実際に、現在検出されている重力波のイベントは、このような連星合体を波源とするもので、最も重要な重力波の源である。連星系の片方が雲を持つブラックホールである場合、伴星からの潮汐相互作用が働き、系の進化に影響する。特に、連星の軌道振動数がアクシオンの固有振動数間の差と一致した時、潮汐相互作用は共鳴的に働く。この二準位間の共鳴により、雲を構成するモードを占有していたアクシオンは別のモードに遷移される。角運動量輸送に伴う反作用として軌道進化も修正を受け、その影響は重力波信号に現れると期待される。</p> <p>連星合体からの重力波によるアクシオンの検出可能性を評価するためには、重要になる共鳴の特定や雲の最終状態の把握を含めた、インスパイラル中における系の進化の全体像を理解することが不可欠である。そこで、本論文ではまず、インスパイラル中の系の進化に影響を及ぼす潮汐効果を体系的に調べた。特に、潮汐相互作用による散逸の効果が最終状態を決めるのに重要な役割を果たすことが分かった。また、軌道運動への反作用の効果と雲自身の角運動量の減少の効果を考慮することで、系のパラメータに依存して、最初に起こる共鳴のタイプに場合分けが生じることを示した。</p> <p>これらの効果の解析から、等質量程度の連星の場合は、アクシオンは固有エネルギーの高い準位に少しずつ遷移していき、その後無限遠方への放射が働き雲は蒸発することが分かった。一方で、質量比が小さい連星においては軌道進化の時間スケールが長くなり、遷移中の散逸の効果が無視できなくなる。そこで、ブラックホールへの反作用と雲からの重力波放射も含めて系全体の時間発展を解くことができる定式化を与えた。その結果、小質量比連星の場合には、最初の共鳴でブラックホールへの吸収により雲が消えることが分かった。また、この吸収によるブラックホールパラメータへの影響は小さく、また重力波振動数の発展の変更は雲の存在を示す指標になりえる。さらに、この定式化はアクシオンが自己相互作用する場合の雲にも適用できる。この時、雲の質量は自己相互作用の強さで決まり、重力波の信号にその情報が現れることを確認した。さらに、連星系の場合には自己相互作用の引力的な効果による、雲の爆発的な崩壊が起こりえることを示した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

アクシオンと呼ばれる軽いスカラー粒子を探索する方法として、回転するブラックホールまわりに超放射現象により形成されるアクシオン雲が生み出す様々な効果を観測することが考えられている。それらの中でも連星系に含まれるブラックホールまわりのアクシオン雲に関して、本学位論文では包括的に研究を進めた。

アクシオン雲は水素原子のような離散的なエネルギー準位をもつ。超放射現象でもっとも速く成長する準位を多数のアクシオン粒子が占めた状態が最初に形成される。この状態から、単独のブラックホールの場合、重力波放射でアクシオン雲からエネルギーが奪われるのと超放射による成長が釣り合った状態でブラックホールの角運動量が徐々に引き抜かれ、やがて、超放射を起こさなくなる。このことから、アクシオンの質量に対応した質量を持つブラックホールは高速で回転する状態を保つことが難しくなる。

ブラックホールのスピンを観測する方法のひとつが、連星合体の重力波の波形解析によるものである。しかし、この場合、時間変化する伴星の潮汐力により、異なるエネルギー準位への遷移が引き起こされる。この遷移によりアクシオン雲の進化は変更を受ける。本論文では、この遷移の過程を丁寧に計算するとともに、連星の軌道進化への反作用や、アクシオン雲を持つブラックホールのスピンの進化などを取り入れた進化計算の手法を確立し、どのような現象が起こるかを網羅的に明らかにした。

これらの計算の結果、等質量に近い連星系では、アクシオン雲が高い角運動量を持った状態へ遷移した後、さらに、非束縛状態へと遷移をすることで、合体よりも十分に手前の時刻で一般に散逸してしまうことが明らかになった。一方で、質量比が大きいEMRIと呼ばれるような系においては、軌道進化や、ブラックホールスピンの進化に対する反作用が非常に強く表れるために、系の時間発展はより複雑になる。多様な時間スケールを持った物理過程が競合する状況で、系の時間発展を数値的に計算することは容易ではないが、このための計算手法の定式化をおこない、網羅的に調べることに成功した。その結果、微細構造遷移による共鳴で、雲の角運動量が軌道運動に移行し、アクシオン雲自体はブラックホールに吸収されてしまうということを明らかにした。また、以上の計算の結果として、得られるブラックホールのスピンは連星の効果を考えなかった場合と、ほとんど同じように、超放射が起きるかどうかの閾値に近い値になることが示された。それと共に、この過渡的な状況ではEMRIの軌道進化が大きく変更を受けるため、低振動数での重力波観測が進むことで、特徴的な重力波信号が検出される可能性を指摘した。

上記の研究においては、自己相互作用が無視できるアクシオン雲の場合を考えていたが、本論文では、さらに自己相互作用が無視できない場合への拡張も試みられている。それによると、単独のブラックホールでは不可能とされていたボーズノバ現象が、伴星の潮汐力の効果で可能になる場合が存在することを強く示唆する結果を得ることに成功している。

以上のように、申請論文は、連星系に含まれるブラックホールまわりのアクシオン雲に関して、新たな解析手法を提案するとともに、網羅的にパラメータ領域を調べることで、観測可能な効果の全体像を明らかにしている。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、令和6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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降