

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	Priti Gupta
論文題目	Transient resonances in extreme-mass-ratio inspirals (極限質量比をもつ連星軌道進化における過渡的共鳴現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>これまでの宇宙を観測は電磁波とニュートリノのみによってきたが、近年、宇宙を観測する新しい窓が開かれた。それが重力波である。2015年に2台のLIGO重力波干渉計により重力波が初めて直接検出されて以降、100近くの恒星質量連星が同定され、今後さらに多くの連星が同定される。LIGOをはじめとする地上型検出器が高周波重力波信号の探査を続ける一方で、低周波領域 (mHz-deci Hz) での重力波を探索するLISA、Taiji、TianQin、DECIGOなどの宇宙重力波検出器の開発も進んでいる。宇宙重力波検出器の重要な重力波源の一つは、銀河中心核に存在する大質量ブラックホールによる恒星質量のコンパクト天体の捕獲イベントがある。これは「極限質量比インスパイラル (EMRI)」と呼ばれ、EMRIが観測されれば、大質量ブラックホール、および、その近傍の環境の理解が大きく進むと期待され、さらには、一般相対論を超えた重力理論の理解が大きく前進する可能性すらある。</p> <p>重力波信号検出には検出器のノイズに埋もれた微弱な信号を抽出するために重力波波形の理論予測が必要となる。すなわち、EMRIからの重力波がもたらす科学的可能性を引き出せるか否かは、我々の理論的理解度に大きく依存する。本学位論文ではEMRIからの重力波波形のモデル化の問題に取り組んでいる。最近の研究により、EMRI近傍の第3の恒星質量天体が引き起こす潮汐力の影響が、EMRIの重力波波形に考慮すべき影響を与える可能性が指摘された。この影響を調べることで銀河中心近傍の潮汐場を計測できる可能性があり、銀河中心ブラックホール近傍の環境に関する他の方法では得がたい情報をもたらす。さらに、もしこの効果を考慮しなければ、EMRIを用いた一般相対論の精密な検証も大きく精度を失う可能性がある。</p> <p>本研究は、EMRIでの潮汐効果として波形に最も大きな影響を与える潮汐共鳴について網羅的に研究を行ったものである。まず、典型的な潮汐力の大きさを見積もり、EMRI軌道発展への影響を調べることで、どのような軌道を取るEMRIにおいて潮汐共鳴を考慮しなければならないかを定量的に明らかにしている。結果として、まず、重力波放射の反作用によって形成されるEMRIの大部分が、効果の大きい共鳴状態を通過することを明らかにしている。さらに、典型的な潮汐力の大きさを仮定した場合、十分な頻度で潮汐力が無視できないEMRI事象が発生することを明らかにしている。その過程で潮汐力の大きさとEMRI軌道への影響を網羅的に調べ、広範囲なパラメータ空間に適用可能なフィッティング公式を導出することにも成功している。この公式は、実際の重力波データ解析にも応用が可能なものである。この得られた結果を基礎として、さらに共鳴を考慮した高速に計算可能な波形モデルも提示している。このモデルは区分的に共鳴を考慮しない波形モデルをつなぐという単純なものだが、重力波データ解析に用いる波形として十分な精度があること、また、誤ったバイアスを生まないことをフィッシャー解析を用いて示している。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、EMRIの軌道進化という将来の重力波観測において一つの鍵となる理論研究のテーマにおける、潮汐共鳴効果という一側面に着目し、包括的な研究を行ったものである。EMRIの軌道運動には、重力波放出の輻射反作用を無視すれば、エネルギー、角運動量、カーター定数の3つの運動の定数が存在し、3つの独立な周期をもつ振動の重ね合わせによって記述できる。重力波放出の輻射反作用を加えると、3つの運動の定数が断熱的に変化し、最終的には中心ブラックホールに合体する。3つの独立な軌道振動数の簡単な整数係数による線形結合が0になる場合を、ここでは共鳴と呼んでいる。共鳴軌道にあるとき、わずかな摂動の効果であっても、何周期にもわたり同位相で蓄積する可能性が生じ、大きな影響を軌道進化に与える。摂動が潮汐力によって引き起こされる場合、この効果を潮汐共鳴効果と呼ぶ。もっとも重要な効果は共鳴点を軌道が通過する際に、運動の定数が共鳴効果がない場合とは異なる時間発展をし、差が生み出される点にある。この差は非常に小さいが、振動の位相のずれは永年的に増加を続け、その後の軌道の時間発展に大きな影響を与える。

潮汐共鳴効果の存在は知られていたが、特定のEMRI軌道に対しての計算がなされているだけであり、その効果がどれほど一般的に重要なものであるかは明らかにされていない。本論文では、まず、共鳴を起こす軌道にどのようなパラメータ領域に広がっているのかを網羅的に調べ上げている。次に、それらの中で特に大きな効果を生む共鳴状態を同定し、共鳴通過にともなう運動の定数の変化を広いパラメータ空間に対して計算し、フィッティング公式を与えている。その際に、一見共鳴条件が満たされているように見える場合でも、共鳴効果が生まれなかった場合があることを見出し、その相殺機構についても考察を加えている。

上記の知見を用いて、どの程度の頻度で潮汐共鳴効果が無視できないかについても考察をおこない、潮汐共鳴効果が無視できないイベントが発生する確率が低いことを明らかにしている。そこで、さらに研究を発展させ、如何にして潮汐共鳴効果を重力波波形モデルに取り入れるかという問題にも取り組んでいる。区分的に潮汐共鳴効果は無視した重力波波形を階段関数的に接続するというモデルが計算コストの増加を生まない最も単純なモデルとして考えられる。このモデルと数値計算による波形との相関解析をおこない、この単純化されたモデルが十分な精度を持つことを示し、パラメータ推定などにおいてバイアスを生むことがないことを明らかにしている。

本学位論文は十分に将来の学問的発展につながる新しい内容を含んでおり、元となっている発表論文は共著ではあるが申請者本人の寄与が多大であることが認められた。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4年7月14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： 令和4年 10月 1日以降