

Title	Self-force regularization of a particle orbiting a Schwarzschild black hole
Author(s)	佐合, 紀親
Citation	
Issue Date	
Text Version	none
URL	http://hdl.handle.net/11094/45141
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

氏名	佐 合 紀 親
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学位記番号	第 1 8 4 2 5 号
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科宇宙地球科学専攻
学位論文名	Self-force regularization of a particle orbiting a Schwarzschild black hole (シュバルツシルトブラックホールを周回する粒子の自己力の正則化)
論文審査委員	(主査) 教授 高原 文郎 (副査) 教授 細谷 裕 京都大学教授 佐々木 節 助教授 横山 順一 助教授 太田 信義

論 文 内 容 の 要 旨

巨大質量ブラックホールとコンパクト天体の連星系は、重力波源の有力な候補のひとつと考えられている。このように質量比の大きな連星系を扱う方法として、質量比を展開パラメータとするブラックホール摂動法が良く知られている。我々は、連星系をブラックホール時空中を運動する質点と近似し、質点による摂動の無限遠方での振る舞いを見ることで重力波の波形を予測する。この時、質量比の最低次の議論では、質点の軌道は背景時空の測地線で表すことができる。しかし、質量比の二次の効果まで考えると、質点の軌道と測地線の間にはずれが生じる。我々は、このずれを質点の自己力によるものであると解釈する。重力波の理論波形をより高い精度で予測するためには、自己力による軌道のずれを正確に求める必要がある。本研究の目的は、自己力の効果を含めた質点の軌道を求め、そこから放出される重力波の理論波形を予言することである。

質点の軌道を正確に求めるためには自己力を含めた運動方程式を導出する必要がある。直感的には、自己力は質点が背景時空に与える摂動から求められると考えられる。しかし、質点近似の下では摂動は質点の位置で発散するため、このままでは自己力を求めることができない。そのため、正則化が必要となる。過去の研究により、場の方程式が双曲型になる調和ゲージ条件の下では、摂動を質点の運動に寄与しない部分と運動に寄与する部分に分離できることが知られている。質点近傍での局所解析により、運動に効かない部分は摂動と同じ発散を含むことが示されている。この性質を用いて、摂動からこの部分を引き去ることで正則化された摂動を得る方法が提唱されている。

しかし、この方法で正則化を行う際、いくつかの問題が生じる。そのひとつが、ゲージ問題である。摂動と発散部分は同一ゲージ上で評価されなければならない。しかし、摂動と発散部分を直接同一ゲージ上で評価することは困難であり、発散部分は調和ゲージで、摂動は Regge-Wheeler (RW) ゲージと呼ばれる特殊なゲージで求める方法がそれぞれ知られている。本研究の前半部では、この問題を解決するため、ゲージ変換を用いて RW ゲージ上の自己力を定義し、それを求める方法を定式化した。さらに、簡単な例として円軌道を運動する質点に働く自己力をポストニュートンの一次のオーダーまで評価した。

引き算による正則化の際に生じるもうひとつの問題は、フーリエ変換に起因する技術的な問題である。摂動の計算において、我々はフーリエ変換を用いることが多い。特に、解析的に取り扱う場合にはフーリエ変換なしに計算する

ことは非常に困難である。一方、引き去るべき発散部分は実空間で与えられている。そのため、正則化を行うためには振動数空間で得られた摂動を逆フーリエ変換により実空間に戻す必要がある。原理的には、質点の軌道が与えられれば逆変換は可能であるが、現実的には特殊な場合を除いてこの変換を実行するためには膨大な数値計算が必要となる。本研究の後半部では、摂動を解析的に扱うことのできる部分と数値計算が必要となる部分に分離して正則化を効率よく行うための手法を提案し、その定式化を行った。

論文審査の結果の要旨

最近、世界各国において大型レーザー干渉計を使った重力波の観測計画が進められており、近い将来、重力波の直接観測が可能になり、重力波天文学の時代が来ると期待されている。特に、宇宙干渉計計画 LISA では、銀河中心等に存在する巨大ブラックホールとそれを周回する中性子星等のコンパクト星との連星系からの重力波が観測されると期待され、そこからブラックホール時空に関する重要な物理情報が得られると考えられている。これを実行するためには、コンパクト星の軌道が重力波を放出しながらどのように進化するかを知っている必要があり、そのためにはコンパクト星自身が作る重力場による反作用力を正確に求めなければならない。しかし、一般にこの自己反作用力には運動に効かない発散部分が現れるため、それを正確に除去してやらなければならない。

この発散を取り除いた自己反作用力の導出問題は、一般相対論に特有の等価原理のために、電磁気学等の場合に比べてはるかに難しい原理的諸問題を含んでおり、信頼にたる系統的な導出法は、未だに開発されていない。佐合紀親君は、この問題に関して、ブラックホール時空中を運動する点粒子を考え、それが引き起こす時空の摂動の自分自身への影響（自己反作用力）を正しく正則化する方法を、球対称ブラックホール時空を背景とする場合に提案し、ポスト・ニュートン展開によって解析的に系統的に求める方法を定式化した。そして、ポスト・ニュートン展開の1次までではあるが、世界で初めて重力的な自己反作用力の正確な解析的公式を導出した。これは、重力波天文学の重要な理論的基礎を与えるものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。