

氏 名	たか はし りゅう いち 高 橋 龍 一
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2745 号
学位授与の日付	平 成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Wave Effects in the Gravitational Lensing of Gravitational Waves from Chirping Binaries (チャープ連星からの重力波の重力レンズにおける波動効果)
論文調査委員	(主 査) 教 授 中 村 卓 史 教 授 小 玉 英 雄 教 授 佐 々 木 節

論 文 内 容 の 要 旨

一般相対論によると真空中を光速で進む重力波が存在する。近年、連星ブラックホールや中性子星が合体する時に放出される振動数が10Hzからk Hzの重力波を検出するために我が国のTAMA300をはじめとしたレーザー干渉計が世界でいくつか稼働を始めている。また、将来計画として振動数がm Hzの重力波を検出する宇宙干渉計(LISA)が2010年頃に稼働を開始する。一方、一般相対論にもとづく遠くの光源と地球の間に銀河やブラックホールが存在すると光の重力レンズ効果が存在することも知られている。実際、準恒星状天体(QSO)の2重像の発見で光で重力レンズ効果は確かめられ、それを契機として重力レンズについては多くの理論的並びに観測的な研究がなされて来た。

重力波と電磁波はともに真空中を光速で進むので、理論的には光に重力レンズ効果があるのなら、重力波にも重力レンズ効果が存在するはずである。通常、光の波長は銀河や星からなるレンズ天体のつくる重力レンズの大きさより十分短いので幾何光学近似が良い。しかし、LISAで対象となっている重力波の波長は1天文単位程度の長いものであって、幾何光学近似が妥当かどうかは問題である。

申請論文ではまず、重力波の波長が重力レンズのシュワルツシルト半径Mより大きいと幾何光学近似は妥当ではなく波動光学を考えなくてはならないことを示している。波長が1天文単位くらいの重力波の重力レンズ効果を考えると重量レンズ天体の質量が1億倍の太陽質量以下の場合、波動効果を考えなくてはならないことになる。重力波の振幅の時間変化をフーリエ変換した振動数空間での増幅率はキルヒホッフの回折積分で表されることを導いた後にこの積分を 1) 点質量レンズ 2) Singular 等温球分布 3) Navarro Frenk 分布の各質量分布の場合にそれぞれ、数値的に実行している。

次に、上の効果を定性的に理解するためにこの回折積分を波長 λ/M を微量として解析的に摂動展開している。1項目は、短波長極限($\lambda \rightarrow 0$)に対応し、幾何光学近似と一致する。2項目が幾何光学からのずれに対応し、大きさは λ/M 程度である。この2項目から、重力レンズの観測量が幾何光学での結果からずれることがわかった。特に像の増幅率(magnification) μ が $\mu(1+\delta)$ へと変化する。ここで、 δ は $(\lambda/M)^2$ 程度の大きさを持つ。非常に波長が長い場合を除いて第2項までの和と数値積分がほぼ一致することを見出している。

申請論文ではLISAで重力波の重力レンズが検出されるかどうかを検討している。具体的には、重力波源として、高赤方偏移での(10^4 – 10^7 太陽質量の)巨大ブラックホールの合体を考えると合体のイベントはS/Nが数千以上である。レンズ天体の密度分布として、質点レンズと等温球型の二つを考えて、重力波の波形からレンズ天体の質量が 10^8 太陽質量より大きいとき、質量が約0.1%の精度で決定出来ることを示している。また、重力レンズの断面積が、幾何光学近似の場合と比べて10倍以上も大きくなることも示している。この結果、レンズ確率は0.1-1%程度と推定され、重力レンズ効果を受けた重力波が年間1個程度検出されると推定できる。

論文審査の結果の要旨

重力波の重力レンズでの波動効果については、これまで最も簡単な質点レンズの場合は調べられていたが申請論文では、キルヒホッフの回折積分をより多くのレンズモデルに適用し数値積分を実行し系統的な研究を行なっている。2010年頃に宇宙干渉計LISAで実際に重力波の重力レンズ効果が検証される可能性があるので時宜を得た研究として評価できる。

申請論文では、重力レンズの準幾何光学近似の研究も行なっている。第1項は幾何光学に一致し、第2項も解析的に得られる事を示した。これと数値積分の結果を比較して、波長が非常に長い場合を除いてほぼ一致することを示した。これは、幾何光学に波長が有限である効果を摂動的に取り入れたもので、波動光学と幾何光学との違いを理解するのに今後も役に立つものとして評価できる。

光の重力レンズ効果では、電磁波の振幅の2乗のエネルギー流束を計るのに対して、重力波では振幅そのものを計る。したがって、振幅が小さくなったときに重力波の方が電磁波に比べて測定の違いがより軽度である。実際申請者は重力レンズを受けた重力波の波形から、レンズ天体の質量等の情報がどの程度の精度で引き出せるか議論した結果、源の位置が幾何光学での重力レンズの半径から数倍程度離れていても、レンズの質量が決定できることを指摘している。これは新しい知見であり評価できる。

また、上の新しい知見をもとに宇宙干渉計LISAは1年に1イベント程度重力波の重力レンズ効果を測定するであろうという推定を行っている。将来の観測計画、データ解析の指針に役立つ結果として評価できる。

参考論文は、光の重力レンズを使って、宇宙のダークマターの分布と膨張宇宙のパラメーターを決める事に関する論文2編と宇宙干渉計を使って重力波源の質量や位置を決めることに関するものが2編でどちらも主論文の基礎と関係のあるものである。

よって本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認められるものである。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。