

氏 名	観 山 正 見 み やま しょう けん
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 674 号
学位授与の日付	昭 和 56 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 二 専 攻
学位論文題目	Time Evolution of Pure Gravitational Waves (純粋重力波の時間発展)

論文調査委員 (主査) 教授 林 忠四郎 教授 田 中 正 教授 佐藤文隆

論 文 内 容 の 要 旨

近い将来には重力波による急激な天体現象の観測も可能になると思われるので、星の重力崩壊や超新星爆発の際に放出される重力波エネルギーや振動数スペクトルを理論的に予測しておくことは重要である。このためには、Einstein 方程式を時間発展の形式で解くことが必要であるが、実際に Einstein 方程式を初期値方程式と運動方程式の二つに分離した $(3+1)$ 次元形式の ADM 方程式を数值的に解くことが最近多くの人によって試みられている。しかし、これらの計算例では、放出重力波のエネルギーが系全体のエネルギーに比べて非常に小さいこと、またエネルギー放出量を正確に計算することが困難なこともあって、重力波に関する多くの問題は未解決のままに残されている。

主論文は、重力波に関する理論的に重要な問題を解く第一段階として、物質はなく重力波だけが存在するような時空の時間発展を数值的に追跡したものである。すなわち、軸対称かつ赤道面对称の系において、初期に空間的な歪みを与えたとき、この歪みが重力波として伝播または凝縮する様子を明らかにしたものである。申請者は、この数値計算に際して、時空の計量・曲率テンサーの時間変化を十分良い精度をもって追跡できる手法を開発するとともに、重力波のエネルギー流の算定については、空間の歪みが大きい場合にも数值的に信頼度の高い算定法があることを見出している。

申請者はまず、楕円型微分方程式で記述される初期値方程式を数值的に解いて、重力波の初期データを求め、その重力エネルギーを計算した。次に、このデータを初期値として、計量・曲率テンサーに対する運動方程式を数値積分することに成功している。この際申請者は、運動方程式を安定して数値積分できるような新しい計算の手法があることを見出している。

上の数値積分の結果として申請者は、初期の重力波の振幅が十分小さい場合には、重力波は無限遠に向けて伝播するだけであることを明らかにしている。一般に重力場のエネルギー密度の定義が一意的でないことを反映して、弱い重力波のエネルギー流についても、これまで種々の異なった表式が提出されている。そこで申請者は、ある球面を通過する重力波のエネルギー流出量を5種の異なった表式に従って計算し、

これを初期の重力波のエネルギーと比較することによって、どの表式が数値計算に適しているかを検討した。その結果として、(1) Landau-Lifshitz の表式と Bondi-Sachs の表式は、座標条件への依存が強く、見かけの波の寄与を算入する可能性があるため適当でない、(2) Bel-Robinson の表式は、重力波が単色波の場合には正確な結果を与えるが、一般の場合には不適当である。(3) Newman-Penrose の表式と Gibbon-Hawking の表式はともに、良い精度のエネルギー流出量を与え、単色でない波の場合にも使用できるので、星の重力崩壊などの数値計算には適した表式であるという結論を得ている。

さらに申請者は、初期の重力波の振幅が十分大きい場合には、場の方程式の非線型性のために、重力波自身が重力崩壊してブラックホールを形成することを見出している。また、このような重力波の時間発展の特徴は、初期の重力波の拡がりとそのエネルギーに対応する Schwarzschild 半径との比 C によって決定されることを見出している。すなわち、(1) $C > 300$ であるような弱い重力波は無遠くに向って拡がるだけである。(2) $300 > C > 2.2$ の場合、重力波の一部は無遠くへ伝播するが、残りの部分は重力崩壊してブラックホールを形成する。(3) $C < 2.2$ の場合、初期の空間の歪みは最初からブラックホールを形成している。

参考論文 1 は、宇宙に自由なクォークが存在するとしても、この存在は Big Bang 宇宙論と必ずしも矛盾しないことを示したものである。参考論文 2 は、宇宙初期における重水素やヘリウムの核合成と矛盾しないためには、その以前に存在した小ブラックホールの数はある限度以下でなければならないことを示したものである。参考論文 3 は、同様に核合成と矛盾しないためには、質量を持った中性微子の質量と寿命はある条件を満たさねばならないことを示したものである。

参考論文 4～8 は、いずれも主論文に関連した相対論的な星の重力崩壊に関するものである。参考論文 4 は、軸対称で回転している場合、回転の効果は電磁場の効果と同じように取り扱うことができることを示したものである。参考論文 5 は、重力崩壊の数値計算にとって基本となる定式化と初期値方程式の解法を示したものである。参考論文 6 は、一様密度・微小回転のダスト球について、初期値方程式の解を解析的に求めたものである。参考論文 7 は、参考論文 4 の結果を用いて、みかけの地平線の位置を求める新しい手法を見出したものである。参考論文 8 は、非球対称の重力崩壊の数値計算の例を示したものである。

論文審査の結果の要旨

一般相対論における重力波の生成や伝播については、重力場が非常に弱い場合を別にすると、場の非線型性による未解決の問題が多く残されている。これらの問題を解決するためには、Einstein 方程式を初期値方程式と運動方程式の和に書き直した、いわゆる ADM 方程式を数値計算によって積分するという方式をとらざるを得ない。

主論文は、物質が存在しない場合について、まず初期値方程式を数値的に解いて、初期の重力波の分布を定め、ついで運動方程式を十分な精度をもって数値積分することによって、重力波の時間発展の様子を明らかにすることに成功したものである。ただし、簡単のため空間は軸対称、赤道面対称であって非回転の場合を取扱っている。

申請者は、重力波の初期分布については、時空が共形的平坦な場合と、時間対称の場合の二つの典型的

な場合を考え、さらにこの重力波はある空間領域に局在していて、その振幅は一般に任意の値をもつ場合を取扱っている。

この重力波の時間発展を数値的に追跡した結果として、申請者は時間発展の特徴が次のように初期の振幅に強く依存するという興味ある結論を得ている。小振幅の場合、重力波は外方に伝播して拡がって行くだけである。この際、重力波の運ぶエネルギー流の表式については、これまで種々の異なった表式が提出されているが、数値計算の結果を用いてこれらの表式を比較検討すると、ある2種の表式が数値計算の場合には最適であることを申請者は見出している。ついで申請者は、初期重力波が大振幅の場合には、重力波の大部分は自己の重力によって凝縮崩壊してブラックホールになるという興味ある結果を得ている。

以上の主論文は、物質が存在しない場合の重力波の時間発展の基本的な特徴をはじめ明らかなにしたものとして、一般相対論的な星の進化や重力波の理論の発展に寄与するところが少なくない。なお、参考論文はいずれも、申請者が天体核物理学、一般相対論、素粒子物理学などの広い分野にわたって豊富な知識と優れた研究能力をもっていることを示している。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値があるものと認める。