

氏 名	佐々木 節 ささき みさお
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 692 号
学位授与の日付	昭 和 56 年 5 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	The Radiation Reaction Effects in the Solutions of the Perturbed Einstein Equations (摂動されたアインシュタイン方程式の解における輻射の 反作用効果)
論文調査委員	(主 査) 教 授 佐 藤 文 隆 教 授 林 忠 四 郎 教 授 田 中 正

論 文 内 容 の 要 旨

近年パルサーを含む連星系からの重力波放出の発見や地上における重力波検出の試みの進展などにより、天体系の運動に伴う重力波放射過程に新たな関心が高まっている。天体系が重力波を放出するとそれによって運動は反作用を受ける。この問題は一般相対論における比較的古くからある問題で多くの研究があるがいくつかの不明確な点が残されている。例えば時空計量テンソルについての線型近似に基づく重力波放射の議論でも、重力波のエネルギーは必然的に二次になるため、アインシュタイン方程式の非線型性を考慮すると、輻射反作用効果は線型近似では十分記述されていないのかどうかといった問題が不明確のままである。

こうした問題点をふまえて、本申請論文では輻射反作用のあらわれかたを次に述べる二つの場合について精細に検討し、線型近似が輻射反作用を記述できる条件について議論した。二つの場合とはアインシュタイン方程式の与えられた解に摂動を行う場合の差であり、(A) では新たな外部源を加えずに摂動を行う、(B) では新たな外部源を加えたことによる摂動を行う、である。(A) の場合の例は球対称静止星を非摂動解としてそれに脈動等を与えることであり、(B) の例は真空非摂動解の中で物体の運動を考えるといったものである。本論文ではこれらの例を念頭におきつつも出来るだけ一般論として議論を展開する。

(A) の場合、計量テンソル $g_{\mu\nu}$ と物質場 ψ_A を非摂動解 $\overset{\circ}{g}_{\mu\nu}, \overset{\circ}{\psi}_A$ のまわりに微小量 ε に関して展開する。そして ε について一次の解が作るエネルギー運動量テンソルは ε^2 の量の源としてのアインシュタイン方程式中のエネルギー運動量テンソルに寄与する。ただし一般にはこのテンソルは保存則を満足しない。しかし、もし $\overset{\circ}{g}_{\mu\nu}, \overset{\circ}{\psi}_A$ がある対称性をもてば、すなわち Killing ベクトルが存在するならば、その方向に写影したエネルギー運動量の流れは保存則を満たすことを新たに証明し、その保存カレントの表式を具体的に与えた。このことは非摂動解が Killing ベクトルを持てば、線型近似において輻射反作用は正しく記述されていることの証明にもなっている。これは新しい知見である。

また (B) の場合においては、真空非摂動解の変化する長さのスケール L 、摂動で導入する物体の質量に対応した重力長さを m としたとき $\varepsilon \equiv m/L$ が十分に小さい量となるような摂動を考える。これに類似の問題は古典荷電粒子の輻射反作用項を含む運動方程式、すなわちローレンツ・ディラック方程式の導出問題であり、それと類似の議論を重力波放射の反作用項導出に適用しようとしたものである。しかし、重力波の場合は電磁波の場合と異なっている点も多い。例えばローレンツ・ディラック方程式では反作用力は局所量で書き表わせたが、この場合は必ず非局所的となることを明らかにした。そしてこの非局所性のため運動物体のエネルギー保存則を積分形に書いてみると、運動エネルギーと輻射エネルギーの和の保存を乱す、新たな項の存在を見出した。しかし、この項は運動が準周期的な場合には無視することができるようになり、線型近似の範囲内でも斉合的な取扱いとなっていることを示した。この結論は近年問題となっていた重力波放射率についてのいわゆる Landau-Lifshitz の公式の適用限界を明確にしたものといえる。

申請者は以上の考察を通じて線型近似の範囲でも正しく反作用が考慮されている場合があり得ることを正確な議論で明らかにしたといえる。

参考論文 1 は重力波と電磁場の作用を考慮し、相対論的荷電粒子による重力波の電磁波への変換を論じたものである。参考論文 2, 3, 4, 5 は一般相対論的重力崩壊を時空構造の発展方程式として解くいわゆる ADM 形式の理論を軸対称性を仮定した場合に、数値計算に適した形式に定式化するための研究であり、参考論文 6 はそれを用いて計算を行った例を示している。参考論文 7 は膨張宇宙による真空の一次相転換に伴うブラックホール、ワームホールの形成の可能性を論じたものである。

論文審査の結果の要旨

平坦でない時空中における重力波の発生・伝播の問題はコンパクト天体系や膨張宇宙での重力波のふるまいの問題として新たな関心を集めている。十年程前に R. A. Isaacson が平坦でない時空中での摂動として重力波のエネルギー運動テンソルの存在を論じたことがあったが、それは高エネルギー近似という極限に着目したものであった。また 5 年程前よりパルサー連星系の発見に刺激されて輻射反作用項を含む運動方程式の研究がいくつかなされ周期運動と散乱運動とでの異なる結果が注目を集めていた。

申請者の論文はこれらの状況をふまえて、二つのタイプの摂動の観点から統一的にこれらの問題を分析しようと試みたものである。摂動のタイプの差として二つの問題を統一的に定式化する試みは十分成功しているとはいいがたいが、各々のタイプの場合についていくつかの新しい知見が得られているのは成果として評価できる。

まず (A) の外部源をつけ加えない摂動の場合における非摂動場を背景とする場上でのエネルギー・運動量テンソルが非摂動場の対称性と関連して保存量となることを示した。これは新しい知見であり、評価できる。これはこれで一般に知られていた Isaacson の考えとは違う意味で保存量となることを示したもので、実現の問題では非摂動解が Killing ベクトルをもつのが通常であるからこの結果は多くの応用例を見出すであろう。非摂動解の対称性と関連させて線型摂動を考えている点が新しい結果を見出す要因となっている。

次に (B) の外部源をつけ加える摂動の場合は一般論は展開できず、微小粒子を加えてその運動方程式を導出し、それに含まれる輻射反作用項を研究するという最も関心を集めている特殊な問題に局限している。輻射反作用項が必然的に非局所的となり、積分形の保存則に新たな項があらわれることを見出し、その項が準周期運動の場合にのみ無視してよいことを示したのは興味ある議論であり、これまでも指摘されていた問題を明瞭にしたといえる。しかし、(B) の場合には (A) の場合のように明確な保存量は得られなかった。

そこで次に (A) と (B) との差をシュバルツシルド時空を摂動解とする例で論じ、アインシュタイン方程式は $G^{\mu\nu} = 8\pi k T^{\mu\nu}$ と縮約ビアンキ式 $G^{\mu\nu};_{\nu} = 0$ の摂動の両立性が (A) と (B) の摂動の仕方で異なる点に注意している。また (A) と (B) の差は初期値問題の観点からみた場合も異なることを注意している。このように統一的議論が出来なかった理由についてもある程度考察を加えており、今後の発展の発展の芽となりえるものである。

参考論文はいずれも一般相対論の研究での申請者の能力を示すものである。

以上より申請論文は理学博士の学位に値するものと認められる。