

氏名	い だ だい すけ 井 田 大 輔
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2283 号
学位授与の日付	平 成 13 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	FOUNDATION OF MANY-SHELL SYSTEM IN GENERAL RELATIVITY (一般相対性理論における多体シェル系の基礎)
論文調査委員	(主 査) 教 授 佐 藤 文 隆 教 授 九 後 太 一 教 授 小 玉 英 雄

論 文 内 容 の 要 旨

一般相対論は一様な膨張宇宙モデルの説明に成功しているが、非一様なシステムの非線形ダイナミクスの全貌は明らかにされておらず、一般相対論の特性の理解のために色々な観点から研究されている。特に、ダスト物質による非一様宇宙モデルは数学的に扱いやすく、構造形成や重力崩壊等の現象を理解する上で有用である。

しかし、このこのダストモデルでは、一般の初期条件の下ではダスト流線が交わって殻交差特異点と呼ばれる2次元的な焦点面が発生する。この殻交差特異点ではエネルギー密度が発散するために、その後の時間発展の計算が一義的でなくなるという問題が発生する。

申請論文は球対称時空についてこの問題についての一つの処方論を論じたものである。ここではダスト物質をその成分が熱的な速度分散をもたない無衝突粒子の集合であると考え、こうした物質系は無衝突ボルツマン方程式によって記述されるべきものであるが、これを解析することは一般に非常に困難である。そこで多数の球状の殻を球対称に配列し、殻の数を増やすことにより多数自由度系の特性を理解することを目的としている。ここでは運動は微分方程式を解くことなく追跡出来る点がポイントである。

まず多体殻系運動の素過程である自己重力を持つ二つの球対称殻の交差運動の記述を考察する。この交差は二つの異なる球対称時空を等長的な時間的超曲面で接続することにより得られることが知られている。このとき超曲面の埋入公式が殻のエネルギー保存則及び運動方程式を与える。こうして交差過程の前後の物理量の関係を記述する接続公式が得られる。自由運動中の軌道は解が与えられており、交差の際の前後関係はこの接続公式で与えられるので、運動の追跡には微分方程式を解く必要がなくなる。したがってこの接続公式を用いれば原理的にはダストの時間発展を可能な限り長時間追跡することができる。申請論文はこの数値シミュレーションを行うための素過程の物理的考察と数値計算のための定式化を行ったものである。

この接続公式は光的な球対称殻の衝突に対しては Dray-'t Hooft-Redmount (DTR) 関係式として知られている。申請論文では、DTR 関係式を質量をもつ(時間的な)球対称殻の衝突の場合に一般化した。二枚の球対称殻が衝突・交差する過程を記述するためには、殻の構成物質に対する仮定をさらに与えなければならない。

ここでは殻同士の質量の交換が行われないうこと及び衝突前後で殻の四元速度が連続的であるという二つの条件を要請している。この仮定は殻が無衝突粒子から構成されているならば満足されていると考えられるものである。この条件下で一般化された DTR 関係式が一意的に導かれた。実際には、Birkhoff の定理が成立する最も一般的な場合、すなわち殻が帯電しており、背景に宇宙項が存在する場合についてこの接続公式を拡張している。

また、この接続公式を分析することにより、衝突時に常に内側の殻から外側の殻にエネルギーが受け渡されること及び両者の動径方向に対する運動量は互いに等量減少することを明らかにしている。後者の法則は強エネルギー条件を満たす物質に対する一種の Ricci 集中現象であるという解釈を与えている。これは、ニュートン重力ではない、一般相対論独自の効果

である可能性があり興味ある。

さらにここで構成された多体殻宇宙モデルを記述するのに適した大域的な座標系について議論している。これは物理的に興味ある初期条件を与え、また計算結果の解釈を行う上で、必要である。ここで与えられた処方、殻の運動を近傍の同期共動座標系を用いて記述し、各座標系間の関係を与えることにより、一つの大域的な座標系を構成するというものである。

この方法は初期条件を与える場合にも有効である。球対称ダストに対する重力場方程式の厳密解である Tolman-Bondi 時空の初期条件は初期面における密度分布及びエネルギー分布によって与えられるが、これらは上の座標系による記述のもとで、多体殻モデルの初期条件と自然に対応している。こうした考察は実際の多体殻系の数値シミュレーションを行う際に有用なものである。

論文審査の結果の要旨

一般相対論的なダスト物質の動力学は解析的な運動解を用いることが出来るので、重力崩壊、宇宙大規模構造の形成、などの非線形な非一様性を模擬する進化を理解する上で重要なモデルである。

申請論文の動機は、無数の球対称ダスト殻によって非一様宇宙をモデル化する処方を論ずることである。球対称ダストの動力学を記述する Einstein 方程式の解として、Tolman-Bondi 時空が知られているが、この解はダストの殻交差後には適用できない。

申請論文は二つの球対称ダスト殻の交差前後の量の関係を与える接続公式を導くことによりこの困難を回避し、長時間の計算法を確立したものである。得られた接続公式の分析で分かったことは、殻交差時に各々のダスト殻の特性エネルギーが内から外へ移動し、動径方向の運動量は常に失われるということである。これは一般相対論特有の効果と考えられるが、この考察は評価できる。

これはダスト殻の交差に伴う最も基本的な物理過程であると考えられる。一般に殻交差を取り扱うこと自身困難であると考えられている中、解析的な手法でこれらの結果を導いた点は高く評価できる。さらに、大域的な座標系を構成することにより、無数の球対称殻を統一的に記述する方法が展開されている。

この方法は、膨張宇宙や Tolman-Bondi 時空と多体殻模型との対応関係が明確になっており、物理的に興味ある現象に対する初期条件の設定をする際に有効であると考えられる。この様に、申請論文で論じられた球対称多体ダスト殻による宇宙模型は、非一様宇宙の動力学に対する半解析的なアプローチ法であるが、これは、殻交差特異点の問題を回避し、長時間にわたって高い精度で計算する処方を与えており、独創的で信頼性の高いものである。

参考論文はいずれも一般相対論に関するものであり、本申請論文の内容の基礎になるものの他に次のようなものを含む。非球対称ブラックホールに関してのフープ予想を荷電ブラックホールの場合に拡張した。またワームホール形成に必要な条件である負エネルギーの量を論じた。さらに、三次元重力でブラックホール解が存在するための条件をエネルギー条件との関係でしらべて、負宇宙項の必要性を証明した。これらはどれも簡明な数学的な問題に導いて証明している。このように参考論文はいずれも一般相対論の研究に対する重要な寄与であり、申請者の研究能力を示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位論文としての価値あるものと認める。

平成13年1月17日、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。