

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	甲	第	号
------	---	---	---	---

氏 名 富 川 祥 宗

論 文 題 目

New formulation of wormhole
(ワームホールの新しい定式化)

論文審査担当者

主 査	名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 理学博士 菅 野 浩 明
委 員	名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 博士 (理学) 白 水 徹 也
委 員	名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 博士 (理学) 永 尾 太 郎
委 員	名古屋大学大学院多元数理科学研究科 准教授 博士 (理学) 栗 田 英 資

論文審査の結果の要旨

ワームホールとは、一般相対性理論に現れる非自明な時空構造の一つであり

- Throat (喉) とよばれる (2次元) “極小曲面” S が存在する.
- Event horizon (事象の地平面) は存在しない.

という特徴をもっている. このうち throat については, その存在がエネルギー条件を破る (負のエネルギー密度をもつエキゾチック物質が存在する) ことを導くと予想されている. また traversable (通過可能) なワームホールは因果律を破るなど, その性質は多くの研究者の興味を集めてきた. そのため throat をどのように定義するかについて, これまでいくつかの試みがなされてきた. 最初に throat の定義を与えたのは Morris-Thorne (1988) であり, 彼らは球対称時空を仮定して時間一定面を 4次元ユークリッド空間に埋め込むことにより throat を定義した. その定義は埋め込みの臨界点である条件と flare out 条件と呼ばれる 2次元面の極小性を保証する条件の 2つからなる. その後 Hochberg-Visser (1998) は球対称性を仮定せず, 一般の時空に対してヌル (光的) 超曲面を考え, その上の極小曲面として throat を定義した. その条件は面 S に対して外向きと内向きのヌル (光的) 測地線から定まる 2つのヌル拡張率 θ_{\pm} を用いて表される. とくに flare out 条件は θ_{\pm} のヌル方向の 1 階導関数の正值性として定式化される. さらに最近では Maeda-Harada-Carr (2009) が, ヌル (光的) 超曲面の代わりに空間的超曲面を考えることによって, 物理的に自然な throat の定義を与えている.

以上の先行研究においては, あらかじめ選ばれた (3次元) 超曲面上の極小曲面として throat を定義しており, 超曲面を最初に選ぶ必要があるため, 純粋に局所的な throat の定義となっていない点で不満があった. この問題に対して一つの解答を与えたのが, 本申請論文の主結果の一つである. 具体的には Hochberg-Visser が考えたヌル拡張率 θ_{\pm} の差 $k := \theta_+ - \theta_-$ を用いるのが着眼点である. k は 2次元曲面 S の空間的法ベクトルに関する第 2 基本形式のトレース (平均曲率) の代用量であり, 曲面 S とそれから放たれるヌル (光的) 測地線だけから判定できる throat の定義を与えている点が重要である. さらに申請論文においては新たな throat の定義に基づいて, 以下の結果が示されている.

- ヌルエネルギー条件を満たす通過可能なワームホールに対する必要条件は $\partial_+ \theta_-|_S < 0$ である. ただし ∂_+ は外向きのヌル方向微分である.
- 静的なワームホールは必ずヌルエネルギー条件を破る.

論文審査の結果の要旨

ここで通過可能なワームホールとは throat S から構成される時系列方向の接ベクトルが常に時間的であることとして定義される。また第2の結果は Hochberg-Visser の定義に基づいて得られることがすでに知られているが、新たな定義に基づく証明はより簡明なものとなっており、この定義が自然なものであることを示している。さらに申請論文では、球対称性をもつ時空の具体例について新たな定義がこれまでに知られている結果を矛盾無く再現していることを確認している。また宇宙の加速膨張を説明する5次元の宇宙論模型である DGP (Dvali-Gabadadze-Porrati) ブレイン模型の真空解が(4次元ブレイン上の)ワームホールとなることを確認する一方で、エネルギー条件を破る物質場や初期特異点を持たないことを示した。これは高次元模型におけるワームホールで始めて可能となった興味深い事実である。

本申請論文によるワームホールの新たな定義は、幅広い時空に対して適用可能であり、純粋に準局所的定義となっているという長所を持っている。さらに本論文では、新たな定義に基づいて、ワームホールの一般的性質を導出するとともに、高次元宇宙論模型におけるワームホールについて、これまでのワームホールにはなかった物理的に望ましい性質があることを明らかにした。この意味で、本申請論文の結果は当該分野の研究において意義のあるものと考えられる。なお、申請論文は2編の共著論文に基づくものである。ワームホールの新たな定義については、共著者各々の寄与を分離することは困難であるが、具体例への適用、特に DGP 模型のワームホールに関する部分は申請者の寄与が大きいことを確認している。また、本論文に関する公開審査会を2016年2月19日に行った。公開審査会では関連する先行研究との比較を含め、ワームホールの新たな定義、さらに DGP 模型のワームホールに関する結果が分かりやすく説明された。また質問に対する受け答えも特に問題はなく、申請者が博士の学位を取得するに足る高い学識を有することを確認した。以上により、学位審査委員会は、申請者には博士(数理学)の学位が授与される資格があるものと判断する。