

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)
大学院学生研究
2018年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学研究科	物理学専攻
研究代表者 (2019年3月現在のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年・18RA001C		古賀泰敬 印
指導教員	所属・職名		氏名
	理学部・教授		原田知広 印
自然・人文・社会の別	自然・人文・社会	個人・共同の別	個人・共同名
研究課題	強重力場天体への降着流の振舞と時空構造の関係の理論的研究		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2019年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名
	理学研究科・物理学専攻・博士後期課程 1年		古賀泰敬
研究期間	2018 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 400,000円 / (採択金額) 400,000円		

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

これまでに自身の研究で定理として得た「輻射流体の音速点と光子球面の一致」の物理的理由を探るため、これがより一般に成り立つかどうかを調べた。

当初の計画として「輻射流体の音速点と光子球面の一致」を、一般的な定常軸対称時空のもと調べるため、この時空上での問題の定式化と解析を予定していた。定式化は完了したが、その後の解析の際、「輻射流体の音速点と光子球面の一致」について詳細に結論づけるのは期間内では難しいと判断したため、一般の平面・双曲球対称時空において定式化・解析を行なった。

結果として、一般の平面・双曲球対称時空において「輻射流体の音速点と光子球面の一致」が成り立つことが判明した。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[一般相対論] [曲がった時空上の流体力学] [宇宙物理学]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

一般相対論的な質量降着問題、またより広くは、曲がった時空中の流体力学において現れる理論的な現象「音速点と光子球面の一致(SP/PS correspondence)」が自身の過去の研究で発見された。この現象が成り立つ物理的理由とそのメカニズムを解明するため、本研究では SP/PS correspondence がより一般に成り立つかを調べた。具体的には以下のことを行なった。

- (1) 定常軸対称時空中における降着問題の定式化
- (2) 定常軸対称時空中における SP/PS correspondence の解析
- (3) 静的平面・双曲対称時空中における photon surface (PSf) の解析
- (4) 静的平面・双曲対称時空中における降着問題の定式化
- (5) 静的平面・双曲対称時空中における SP/PS correspondence の解析

具体的な成果は以下である。

(1) 定常軸対称時空中における降着問題の定式化

これまでに SP/PS correspondence の解析を行なった際にも重要となった、Chaverra & Sarbach (2015) の方法で降着問題を定式化した。

降着問題の基礎方程式は、球対称の場合と比較が容易な形で導出が完了し、SP/PS correspondence の解析に限らず全ての降着問題への応用が期待できる成果を得た。定常軸対称時空は宇宙物理学においてほとんどすべての星のモデルとしても適用可能であるため、今後の様々な研究にとっても有意義なものとなった。

(2) 定常軸対称時空中における SP/PS correspondence の解析

定式化された定常軸対称時空の降着問題において、輻射流体の状態方程式を仮定し、音速点(SP)の解析を行なった。

静的球対称時空での回転降着流のSPの半径は回転パラメータに寄らず一定であった[Koga & Harada (2018)]のに対し、定常軸対称時空ではSPの半径は常に回転パラメータに依存することがわかった。この時空の光子球面(PS)は、時空構造のみに依る、ある決まった半径にのみあるため、強い意味での SP/PS correspondence が存在しないことがわかった。つまり、「光子の円軌道と輻射流体の SP の間には、常にそれら半径の一致が成り立つような直接の関係があるわけではない」という結論に至った。

ただし降着流の回転パラメータによっては、SP と PS が一致する場合もあるため、これが一致する場合のパラメータの意味を理解することができれば、SP/PS correspondence が成り立つことの物理的理由に迫れる可能性はある。これについては、一年間で解析を完了するのが難しいため将来的な研究として、本研究では扱わなかった。

また、回転パラメータの最大値への極限では対応が成り立つことも確認した。

(3) 静的平面・双曲対称時空中における photon surface (PSf) の解析

静的平面对称時空・静的双曲対称時空中における SP/PS correspondence の解析を行うため、PS の特徴をもつ時空中の構造物である PSf について解析した。非球対称時空では PS が定義できないため、SP/PS correspondence の解析を行うにあたっては PSf の解析が必要不可欠である。

平面・双曲対称時空中における、PS の対応物として、「constant-r PSf」を定義した。PS が球対称時空中における球対称な PSf であるのに対して、constant-r PSf は平面・双曲対称時空中における平面・双曲対称な PSf であり、幾何学的に PS と類似した定義となっている。

PS には安定性という性質があり、これによって PS 上を運動する光子が安定円軌道をとるか、不安定円軌道をとるかがきまる。これまでの SP/PS correspondence は「物理的な SP は不安定な PS 上になければならない」というものであったため、ここでは constant-r PSf の安定性も新たに定義した。平面・双曲対称時空中においては円軌道という概念は存在しないが、constant-r PSf 上の光子の運動を「半径 r が変化しない軌道」として円軌道の類似のものとみなすことで、その力学的性質から「constant-r PSf の安定性」を定義した。

成果として、半径 r 一定の面が constant-r PSf であるための条件とその安定性の条件は、球対称における PS の場合のそれらの条件と全く同様の方程式として得られることがわかった。これは、数学的に constant-r PSf が PS の対応物であるとする主張の根拠にもなる結果である。

研究成果の概要 つづき

(4) 静的平面・双曲対称時空における降着問題の定式化

これまでと同様、Chaverra & Sarbach の方法で降着問題を定式化した。

平面对称時空・双曲対称時空は、球対称時空とは対称性の程度が同じであり、数学的に類似した時空である。この定式化は結果として、球対称時空の場合[Koga & Harada(2016)]と全く同様の基礎方程式を与えることがわかった。この結果は、これらの時空が数学的に類似していることに由来しているのと同時に、降着問題の基礎方程式としては、トポロジーなど時空の大域的な構造にも依らないことを示している。またさらに、SP/PS correspondence がどちらかという局所的な時空構造や流体の状態に起因するものであることも示唆している。

(5) 静的平面・双曲対称時空における SP/PS correspondence の解析

PS に対応するものを constant-r PSf であるとして、SP/PS correspondence の解析をおこなった。

(3) (4) にて、constant-r PSf の条件式と、降着問題の基礎方程式が球対称時空の場合[Koga & Harada(2016)]と全く同様に得られたことから、SP/PS correspondence が成り立つことはほぼ自明に導かれた。

この時空には円軌道も存在しないため、SP/PS correspondence が光子の円軌道に由来しているとする以前の予想は完全に覆される結果となった。

PSf は、その定義と同値な条件として「totally umbilic な時間的超曲面である」という条件を満たしている。超曲面が Totally umbilic であるとは、その面の外的曲率の歪み成分がないということであり、つまり局所的な幾何学量で決まる性質である。よって平面・双曲対称時空で SP/PS correspondence が成り立つという結果から導かれる、本研究の最大の成果として「SP/PS correspondence は時空の局所的かつ幾何学的構造に起因するもので、流体の通過する面が totally umbilic であることが重要である」という結論が得られる。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した①~④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて提出してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① Yasutaka Koga、「Photon surfaces in spherically, planar, and hyperbolically symmetric spacetimes in D dimensions: Sonic point/photon sphere correspondence」、Physical Review D、未定、2019年、未定

③ 早稲田大学におけるセミナー発表 (早稲田大学、2019年1月)

③ 日本物理学会年次大会 (九州大学、2019年3月)