OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Construction of the perturbed gravitational field induced by a rotating ring around a black hole and the visualization of space-time curvature with tendex and vortex lines
Author(s)	佐野, 保道
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52320
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名	（　　佐野保道　　）
論文題名	Construction of the perturbed gravitational field induced by a rotating ring around a black hole and the visualization of space-time curvature with tendex and vortex lines （ブラックホールの周りを回転するリングによる摂動重力場の構築とテンデックス線およびボルテックス線を用いた時空曲率の視覚化）

論文内容の要旨

重力波を放出する天体として最も重要な候補のひとつが extreme mass ratio inspiral である。これは銀河中心に存在すると考えられている大質量ブラックホールと、太陽質量コンパクト天体からなる、質量比の非常に小さい連星系である。重力波天文学に必要な重力波波形予測のためには、ブラックホール周りでのコンパクト天体（伴星）の運動を知ることが重要である。伴星の運動は、伴星自身がつくる重力場の影響を受ける。従って、伴星によるブラックホール時空の摂動を計算することが問題となる。

一般相対性理論でブラックホール時空の摂動を扱う問題は長年取り組まれてきたが、非摂動のブラックホール時空がKerr時空（自転しているブラックホール）の場合、時空計量の摂動方程式は連立偏微分方程式になってしまうため、計量摂動の計算は難題である。そこで、Kerr時空の計量摂動を計算する方法として、Teukolsky方程式とHertzポテンシャルを用いる方法（Chrzanowski 1975, Cohen & Kegeles 1979）が提案された。ところがこの方法で具体的に計量摂動を計算した例は２例ほどしかない。

我々はブラックホールと回転リングからなる系を考え、この方法に残っていた問題点を解決した。彼らの方法ではTeukolsky方程式の解を利用してHertzポテンシャルを構成し、Hertzポテンシャルが得られれば計量摂動がただちに計算できる。ただし、時空の質量摂動と角運動量摂動をHertzポテンシャルに取り入れる方法は明らかになっていなかった。Teukolsky方程式ではこれらの摂動を解けないため、Hertzポテンシャルには別途取り入れる必要がある。取り入れる前の不完全なHertzポテンシャルから計量摂動を計算すると、非物理的な不連続面がリングを含む球面に生じた。我々はこの不連続面を詳細に調べ、不連続面が解消するようにHertzポテンシャルを調節すると、それと同時に質量摂動と角運動量摂動が正しく取り入れられるということを発見した。同じ手法で、静止質点による計量摂動も計算した。これらの計算は、運動する質点による計量摂動の問題への重要な準備段階である。この手法で計量摂動が計算できれば冒頭で述べたような連星の運動や重力波波形が高精度で計算できるようになることが期待される。

また我々はNichols et al. (2011)によって提案されている方法を用いて、上述の結果を視覚化した。これは、テンデックス線とボルテックス線と呼ばれる、電気力線や磁力線に似た線を描くもので、それぞれ潮汐力と慣性系の引きずりを表す。視覚化により、不完全なHertzポテンシャルから計算された重力場の特徴がより分かりやすくなった。非物理的な不連続面がリングを含む球面にあるというだけではなく、時空の質量摂動と角運動量摂動がその球面の外側において欠如しているということが見てとれる図が得られた。質量摂動と角運動量摂動を取り入れて完成したHertzポテンシャルから計算した結果の場合は、球面の内側と外側の重力場が連続的につながっていることが分かる図となり、また回転リングによって質量と角運動量が時空に加わっていることがそれぞれテンデックス線とボルテックス線の遠方での振る舞いに現れた。我々はこの視覚化の方法を別の時空、Mundim et al. (2014)によるブラックホール連星の時空にも適用した。これはasymptotic matchingの手法で構築された近似的な時空解である。この場合も、時空の基本的な特徴を直感的に示す図が多数得られ、また、近似の精度が良くない時空の領域を発見できるということも分かった。テンデックス線とボルテックス線による重力場の視覚化は、様々な方法で得られた時空に対して様々な用途のために利用できると期待される。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　佐野保道　）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	長峯健太郎
	副 査　教授	川村光
	副 査　教授	芝井広
	副 査　教授	大野木哲也
	副 査　教授	田中貴浩（京都大学）
	副 査　准教授	藤田裕

論文審査の結果の要旨

重力波を放出する天体として最も重要な候補のひとつが Extreme mass ratio inspiral である。これは銀河中心に存在すると考えられている大質量ブラックホールと、太陽質量コンパクト天体からなる質量比の非常に小さい連星系である。重力波天文学に必要な重力波波形予測のためには、ブラックホール周りでのコンパクト天体（伴星）の運動を正確に知ることが重要である。伴星の運動は、伴星自身がつくる重力場の影響を受ける。従って伴星によるブラックホール時空の摂動を計算することが重要課題となる。

一般相対性理論でブラックホール時空の摂動を扱う問題は長年取り組まれてきたが、非摂動の時空が Kerr 時空（自転しているブラックホール）の場合、時空計量の摂動方程式は連立偏微分方程式になってしまうため、計量摂動の計算は難題である。そこで、Kerr 時空の計量摂動を計算する方法として、Teukolsky 方程式と Hertz ポテンシャルを用いる方法（Chrzanowski 1975; Cohen & Kegeles 1979）が提案された。ところがこの方法で具体的に計量摂動を計算した例は、これまでに２例ほどしかない。

佐野氏は、「Construction of the perturbed gravitational field induced by a rotating ring around a black hole and the visualization of space-time curvature with tendex and vortex lines（ブラックホールの周りを回転するリングによる摂動重力場の構築とテンデックス線およびボルテックス線を用いた時空曲率の視覚化）」というタイトルの本論文で、ブラックホールと回転リングからなる系を考え、上記の計算方法に残っていた問題点を解決した。先行研究では、時空の質量摂動と角運動量摂動を Hertz ポテンシャルに取り入れる方法は明らかになっていなかった。Teukolsky 方程式ではこれらの摂動を解けないため、Hertz ポテンシャルには別途取り入れる必要がある。取り入れる前の不完全な Hertz ポテンシャルから計量摂動を計算すると、非物理的な不連続面がリングを含む球面に生じる。佐野氏はこの不連続面を詳細に調べ、不連続面が解消するように Hertz ポテンシャルを調節すると、それと同時に質量摂動と角運動量摂動が正しく取り入れられるということを発見した。同じ手法で、静止質点による計量摂動も計算した。本論文は、運動する質点による計量摂動の計算問題への重要な準備段階であり、この手法で計量摂動が計算できれば冒頭で述べたような連星の運動や重力波波形が高精度で計算できるようになることが期待されるため、非常に重要な成果である。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値のあるものと認める。