

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	森山 小太郎
論文題目	New methods for probing black-hole space-time based on infalling gas clouds		

(論文内容の要旨)

ブラックホール時空の観測的解明は、事象の地平面の存在の有無、一般相対論検証のために不可欠な課題である。一般相対論では、ブラックホール時空は (現実の天体では無視できる電荷を除き) ブラックホール質量とスピンパラメータで一意に決定される。このうち質量は観測により、ある程度正確に見積もられている。一方、スピンはブラックホール近傍での相対論的効果を厳密に考慮する必要があり測定が難しい。また、これまで提案されている複数の間接的スピン測定法には不定性の大きいものもあり、互いに結果も一致していない。これらとは独立かつ相補的なスピン決定法が求められている。論文第1～3章には、このような研究の背景と基礎理論フォーマリズムが丁寧に解説されている。

第4章で申請者は、ブラックホールの最内縁安定円軌道半径から一定の角運動量を持って落下するガス雲に注目したスピンの新しい測定法を考案した。ガス雲が単一振動数の放射をすると仮定し、ブラックホール時空内でのガスの運動と光子の軌道を計算した。ガス雲からの放射は光円軌道半径周りの集光効果によって時間の経過とともに徐々に増加し、事象の地平面にガス雲が近づくことによって重力赤方偏移によって減少する。フラックス変動のタイムスケールはブラックホールスピンに依存し、円盤面傾斜角にほぼ依存しない、一方で時間平均された振動数偏移は両方に依存する。それゆえ、原理的に、フラックスの時間変動からスピンを決定することができることがわかった。

第5章では、落下するガス雲の撮像映像とその光度変動に注目することによって、ブラックホール時空そのものを検証する新しい方法を提唱した。近い将来、超長期線サブミリ波電波干渉計観測により超大質量ブラックホールの撮像情報が得られると期待されているが、申請者はこの撮像情報からも独立にブラックホールスピンを測定できることを示した。そして「偽カーブラックホール時空」を導入し、フラックス変動データと撮像データに基づいた2つの独立な方法でスピンを模擬測定した。その結果、偽カーブラックホールでは2方法から求められたスピン値が一致しないことがわかった。これは、これらの方法がそれぞれ時空メトリックの異なる成分に敏感なためである。こうして申請者は2つの方法で見積もられたスピン値を比較することで一般相対論の予言するブラックホール時空を検証することができることを示した。

これらの方法論では、用いたガス雲モデルは流体効果、磁場、放射圧による時間変化がないと仮定している。これらの効果が妥当なものか、流体シミュレーションにより検証する必要がある。そこで第6章で申請者は、ブラックホールに落下するガス雲の運動と放射特性を3次元一般相対論的放射磁気流体シミュレーションの手法で調べた。ガス雲は主に自由自由放射/逆コンプトン放射をすると仮定し、放射率分布が時間とともにどう変化するかを計算した。その結果、(i)降着円盤の最内縁領域でリングまたはアーク型のガス雲が間欠的に形成され、(ii) ガス雲はほぼケプラー回転速度をもち、ブラックホールに向かってゆっくり落下

することがわかった（ただし、円盤の内縁は最内縁安定円軌道よりも外側である）。これらの特徴は想定したガス雲モデルの運動をよく再現している。

最後に、一般相対論的放射磁気流体シミュレーションにおいてブラックホール近傍のアーキガス雲からの光度変動を、一般相対論的レイトレーシング法を用いて調べた。その結果、ガス雲の形成と落下による比較的長い時間スケールの変動（0.08～0.10 秒）と、非軸対称なアーキ型ガス雲からのビーミング効果による短い時間間隔を持った準周期的なフラックスピーク（0.01 秒）があることがわかった。これはブラックホール連星で観測されている高振動数の準周期振動やX線ショットを説明できる可能性がある。

(論文審査の結果の要旨)

ブラックホールとは、一般相対性理論の予言する極めて非日常的な現象であり、その性質を多波長観測データと理論を組み合わせる曖昧性なく示す研究は科学的意義が大きく、また一般市民の関心が深いテーマだと言えよう。一般相対性理論によると、ブラックホールは質量と自転(スピン)、そして電荷の3つの量で一意的に決定される。このうち電荷については、あまり天体物理学的意味は無いとされる。実際の宇宙の状況で、プラスの電荷の粒子だけ、あるいはマイナスの電荷の粒子だけブラックホールに選択的に落とすことは難しいからである。したがって、質量とスピンですべての实在ブラックホールは記述できることになる。

ブラックホール質量は、その重力場の大きさ(周りのものを引きつける強さ)を元に比較的正確に求めることができる。しかしスピン測定は、強重力場での現象を調べることが必須であり、そう簡単ではない。過去に、定常円盤連続スペクトル法や、鉄ラインスペクトル法、準周期光度変動法などが試みられており、一定の成果を出しているものも、いずれも定常ないしは周期的な現象を調べるもので、ブラックホール時空に特有な時間変動現象を検証することはできないところに難点があった。

申請者はこの点に鑑み、今までない画期的なスピン測定法を独自のアイデアで編み出した。それは、ブラックホールに落ち込むガスからの光の特性を用いてスピンを求めるユニークな方法である。この点に本論文の独創性の高さが見てとれる。

第4章は、最内縁安定円軌道半径から一定の角運動量を持ってブラックホールに落下するガス雲が出す電磁波についての考察である。本研究の独創的な点は、それまであまり注目されてこなかった、光円軌道半径における集光効果を鮮やかに示したところにある。ブラックホールの強重力場のため、光の軌道はブラックホール方向に曲げられる。そのため光子は、スピンゼロのブラックホールの場合、ブラックホール半径(シュバルツシルド半径)の1.5倍の半径をもつ円軌道をずっと周り続けることができる。換言すると、光子はこの半径に「束ねられ」観測者に一度に到達するため、観測者は一時的にガス雲が明るく光ったと観測するのである。この効果を観測すれば、スピンを測定できることを、申請者は見いだした。極めてオリジナリティの高い成果である。

第5章では、遠方の観測者によるガス雲の見かけの「画像」を計算し、ガス雲の位置情報からも、光度変動とは独立にスピン測定ができることを示したものである。一般相対性理論のカー解が正しければ、当然、この2つの方法の結果は一致する。しかし、一般相対性理論が「正しくなければ」両者は一致しないことを確認し、この一致・不一致から、一般相対論的時空の検証を示した点が新しい。これも極めて独創的な成果と言える。実際、ブラックホールを廻るガス雲の画像は、近くサブミリ波電波の超長期線電波干渉計観測によって得られると期待されており、将来の検証が待ち遠しい。

しかしながら、この2方法とも、ガス雲落下やその放射特性について理想的な仮定をしており、その仮定が妥当なものかどうか、疑問が残る。そこで申請者は第6章において、一般相対論的放射磁気流体シミュレーションを、研究協力者の協力のもと実行して、仮定そのものが現実的なものであるかどうかの検証を行った。

その結果、確かに降着円盤の最内縁領域でリングまたはアーク形状のガス雲が間欠的に落下すること、およびそのガス雲はほぼケプラー回転速度をもち、ブラックホールに向かってゆっくり落下することをシミュレーションデータで確認した。こうして第4～5章で述べたモデルの妥当性を示した。一般相対論的流体シミュレーションは過去に世界の数グループによりなされているが、非定常現象を解析した例は皆無であり、新規でユニークな成果と判断できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 2018 年 3 月 31 日以降