

落下ガス雲に基づいたブラックホール時空の新検証法

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とが知られている。このうち、質量はブラックホールから離れた伴星やガスの運動を観測すること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效果を厳密に考慮する必要があり、決定が難しい。従来のスピン測定法の中で主流なものは、降着円盤の出すX線スペクトルを用いたものやブラックホール連星で観測された高振動数の準周期振動に着目したものである (Middleton 2015)。しかし、これらの方法は、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ため (1-3章)、これらとは独立かつ相補的なスピン決定法が求められる。申請者はブラックホールスピン、そして時空構造を測定するための新しい方法論を提唱した (4-6章)。

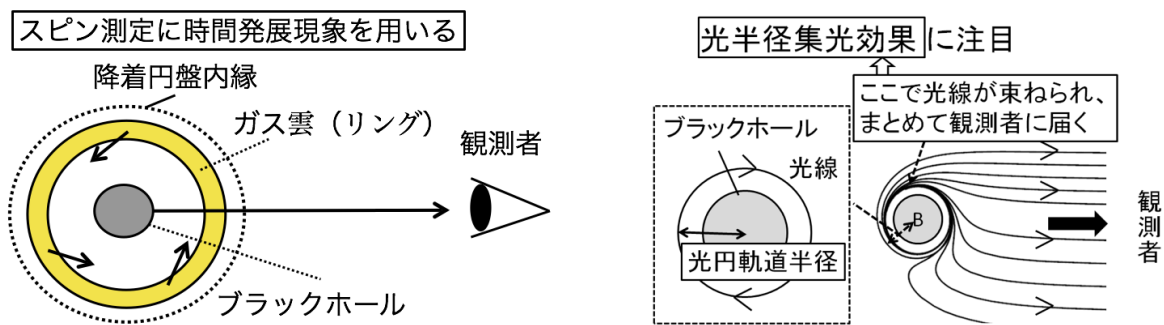


図1: ガス雲の運動の概略図。ガス雲は降着円盤内縁から、回転しながらブラックホールへ落下する。

図2: 光円軌道半径集光効果の概略図。各曲線は遠方の観測者に届く光線軌道を表す。

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する (図1)。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のガスの運動と光子の軌道を計算した。そして、ガス雲からの放射が相対論的效果を受けて遠方でどのように観測されるかを調べた。ここで、特に注目する領域はブラックホールの周りの光が回転運動できる半径 (光円軌道半径) 周辺である。光円軌道半径近傍に存在するガス雲から放射された光線はその半径において一旦束ねられ、その後観測者に向かってほぼ同時に観測されることを発見した (図2)。その結果、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 (図3)。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の依存し、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、フラックスの時間変動を観測することによって円盤傾斜角によらずにブラックホールスピンを決定することができることがわかった。この手法は非周期的な現象に着目しているため、従来の手法のような定常、または周期的な現象に基づいたスピン測定法に対して独立かつ相補的なスピン測定結果を与える。

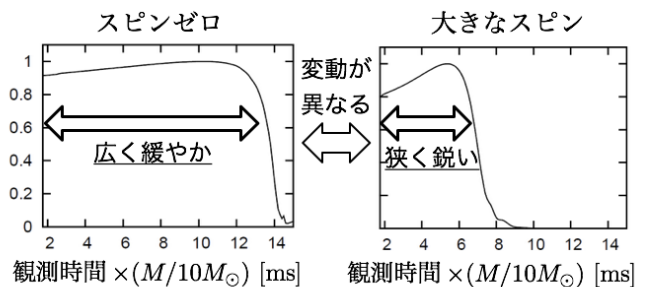


図3: ガスリングの放射ライトカーブ。左図: スピンがゼロ、右図: 大きなスピン。M: ブラックホール質量。

第5章では、落下するガス雲の撮像映像と映像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。申請者は、近未来に超大質量ブラックホールのサブミリ波電波による超長期線電波干渉計 (sub-mm VLBI) 観測によって得られると期待される、ブラックホールに落下するガス雲の撮像画像を数値計算した。その結果、撮像情報のみからも、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。ここで撮像画像と光度変動は、それぞれ回転方向と動径方向の時空構造に強く依存する。つまり、画像と光度からそれぞれ見積もられたスピンは、時空の異なる成分の情報を含んでいる。よって、もし一般相対論で予言されるブラックホールと実際の時空が異なる場合、2通りの方法で見積もられたスピンはそれぞれ異なる値を示すはずである。

以上の考察を念頭に置き、撮像と光度変動から得られた2つのスピンを比較し、一般相対論の検証できるかを数値計算によって調べた。一般相対論のブラックホールを基準に、小さなズレを加えた偽のブラックホール時空を理論的に構成し、その時空中のガス雲の画像と光度変動を計算した。そしてそれぞれの量に対して通常のブラックホールを基準にスピンを測定した結果、偽ブラックホールに対し、2つの方法から得られたスピンの値が一般相対論からのズレを反映し、互いに異なる値を持つことがわかった。こうして申請者は2つの見積もられたスピンの値を比較することでブラックホール時空を証明することができることを示した (図4)。

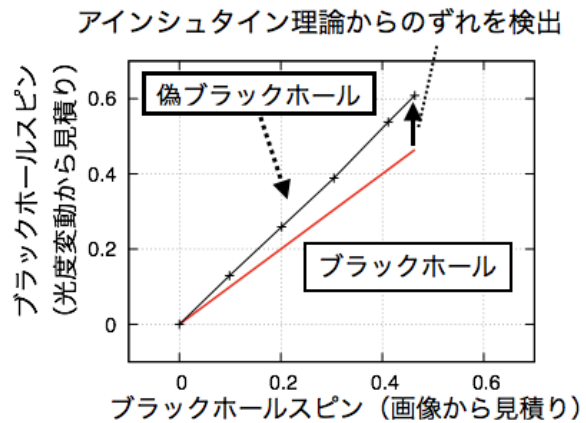


図4: 画像と光度変動から得られたスピンの関係。ブラックホール解からのズレが、2つのスピンの違いとして現れる。

この2つの方法論の中で、用いたガス雲モデルは落下とともにその構造、放射率が変化しないと仮定している。しかし、より現実的なガス雲では流体効果、磁場、放射圧による時間変化が起こると考えられる。そのため、これらの効果を3次元の一般相対論的放射磁気流体 (3D-GRRMHD) シミュレーションにより取り入れ、より現実的なガス雲のふるまいを調べる必要がある。

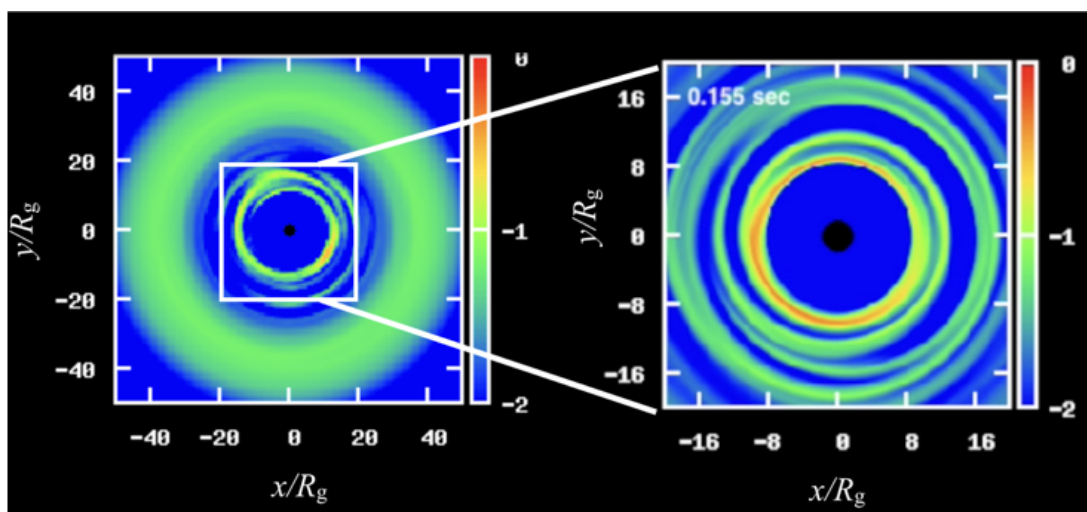


図5: GRRMHDシミュレーションに基づいたブラックホールへの落下ガス雲のスナップショット (ここで、 $R_g=GM/c^2$)。

第6章で申請者は恒星質量ブラックホールに落下するガス雲の運動と放射の性質を3D-GRRMHDシミュレーションデータを用いて調べた。ガス雲は主にfree-free emissionかつ/または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, 図5)。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。

回転していないブラックホール、円盤傾斜角度=60°

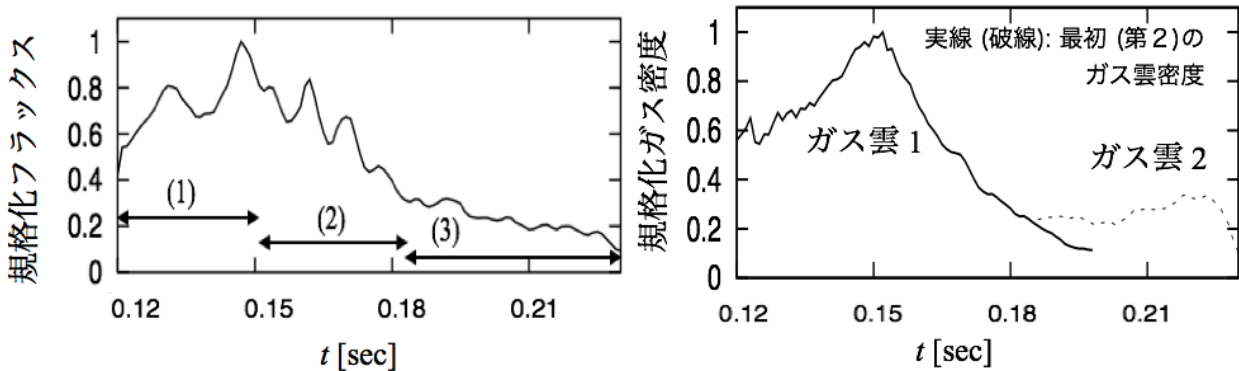


図6: 落下ガス雲の放射(左図)とガス密度(右図)の時間発展。フラックスはガス密度変動による長いタイムスケールの変動(0.08-0.10 sec)とガス雲のビーミング効果による短いタイムスケールの変動(0.01 sec)をもつ。

最後に、GRRMHDシミュレーションにおいてブラックホール近傍のアーク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(図6)。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 sec)と、非軸対称なアーク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 sec)があることがわかった。このような短いタイムスケールでの落下ガス雲による相対論的光度変動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。