

グラバスター・シャドウ

牧野 芳弘 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

ブラックホールを観測的に証明するにはどうしたらよいだろうか。電磁波観測では、ブラックホールを直接見ることはできず、光の届かない領域が影として観測されると予想される。これをブラックホール・シャドウと呼ぶ。これは事象の地平面ではなく、光円軌道によるものである。光円軌道とは、光がブラックホールの周りでとることができる円軌道であり、その半径は非回転ブラックホールの場合、シュバルツシルト半径の 1.5 倍である。この半径より中を通る背景光は無遠くの観測者に届かないため、ブラックホール・シャドウとして観測される。これが観測されると、ブラックホールの証明になり得る。しかしながら、もし、光円軌道を持つ天体 (表面より外側に光円軌道が存在する天体) がほかにあれば、ブラックホールと区別することは困難かもしれない。そのような天体の一例としてグラバスターについて調べた論文 [1] のレビューを行う。近い将来、ブラックホールの直接撮像が可能になったとき、このようなブラックホール擬似天体の可能性を排除することがブラックホールの証明につながる。グラバスターとは、元々 Mazur and Mottola (2004) によって星の重力崩壊の最終段階に、ブラックホール以外の可能性として提案されたものである [2]。この天体は球殻によって構成されており、ブラックホールと違い、事象の地平面を持たないが、光円軌道はもっている。球殻表面が電磁相互作用をしない場合にグラバスターの影がどのように観測されるか、レイトレーシングを行ったところ、グラバスターの内部を通ってくる光により、ブラックホールの時には観測されなかった像が見えることがわかった。これによってグラバスターとブラックホールを区別することができる。

1 Introduction

現在ブラックホール候補天体は数多く見つかったが、それらが本当にブラックホールであるという確証は未だ得られていない。それらは非常に狭い領域に大きな質量を持っているだけであり、事象の地平面を持つ天体であるかは未確認である。近い将来 VLBI によるブラックホールの直接撮像が期待されている。このような電磁波観測では光の届かない領域が影として観測されると予想され、これをブラックホール・シャドウと呼ぶ。シュバルツシルト時空をはじめとするブラックホール時空では、光円軌道と呼ばれるものが存在する。光円軌道は重力によって曲げられ光線が円軌道をとることを意味する。光源がブラックホールの背後に存在するとき、無限遠にいる観測者は光円軌道の内側を通ってくる光を観測することは出来ない。なぜなら光円軌道の内側を通ってくる光は最終的にブラックホールに落下してしまうからである。この性質を考えると次のような疑問が生じる。「もしブラックホール以外に光円軌道を持

つ天体があるとしたら、シャドウを観測できたとしてもそれがブラックホールであると断定することはできないのではないか?」ということである。ブラックホールの直接撮像が可能になったとき、このようなブラックホール擬似天体の可能性を排除することがブラックホールの証明につながる。今回レビューする論文 Sakai et al. (2014) ではブラックホール擬似天体の例として、グラバスターについて調べている。グラバスターとは、元々 Mazur and Mottola (2004) によって大質量星の重力崩壊の最終段階にブラックホール以外の可能性として提案されたものである。この天体は球殻によって構成されており、球殻の内側がド・ジッター時空、外側がシュバルツシルト時空になっている。

2 Methods

2.1 計量の設定

グラバスターのモデルとして無限に薄く硬い球殻を持つ Visser and Wiltshire (2004) の thin shell model を用いる。まず、球殻内部、外部の計量はそれぞれ次のように書ける。

$$ds^2 = -A_- dt_-^2 + \frac{dr_-^2}{A_-} + r_-^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2),$$

with $A_-(r_-) \equiv 1 - H^2 r_-^2$ ($r_- < R$) (1)

$$ds^2 = -A_+ dt_+^2 + \frac{dr_+^2}{A_+} + r_+^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2),$$

with $A_+(r_+) \equiv 1 - r_g/r_+$ ($r_+ \geq R$) (2)

ここで r_g はシュバルツシルト半径、 H はド・ジッター時空の曲率、 R はグラバスター表面の半径(球殻の半径)である。座標変数の下付き添え字は-が球殻内側、+が外側を表す。 $H = 0.4/r_g$ の場合、球殻の半径は $1.303r_g$ となる。その外側はシュバルツシルト時空であり、光円軌道半径は $1.5r_g$ なので、グラバスター表面はそれより内側にあることが分かる。

2.2 光の測地線

この節で境界条件を満たす測地線方程式を導く。アフィンパラメーターを λ 、波数ベクトルを $k_\mu = dx_\mu/d\lambda$ とすると測地線方程式は次のように書き表される。

$$\frac{dk^\mu}{d\lambda} + \Gamma_{\nu\rho}^\mu k^\nu k^\rho = 0,$$

with $k_\mu k^\mu = 0.$ (3)

球対称なので今後 $\theta = \pi/2$ の平面で考える。軌道の式に直すと次のように表される。

$$\frac{dr_\pm}{d\varphi} = \pm r_\pm \sqrt{\left(\frac{E_\pm r_\pm}{L_\pm}\right)^2 A_\pm}. \quad (4)$$

ここで

$$A_\pm k_\pm^t = \text{const} \equiv E_\pm, \quad (5)$$

$$r_\pm^2 k_\pm^\varphi = \text{const} \equiv L_\pm. \quad (6)$$

である。グラバスター表面での境界条件を考えると次の関係式が得られる。

$$\sqrt{A_+} k_+^t = \sqrt{A_-} k_-^t, \quad (7)$$

$$k_+^\varphi = k_-^\varphi. \quad (8)$$

また $k^\mu k_\mu = 0$ より

$$\frac{k_+^r}{\sqrt{A_+}} = \frac{k_-^r}{\sqrt{A_-}}. \quad (9)$$

である。

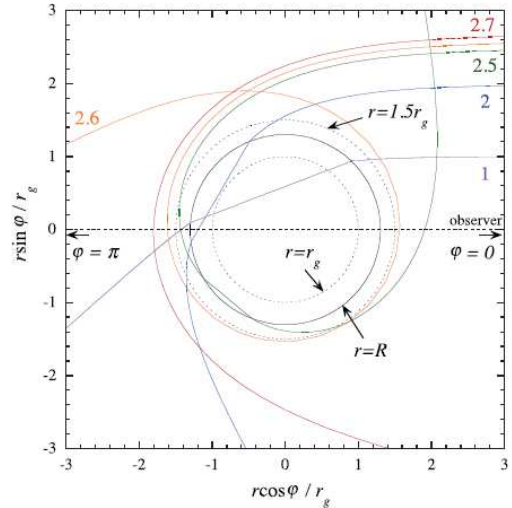


図 1: $H = 0.4/r_g$ の場合に観測者に届く光線の軌道。観測者は $r = 1000r_g, \varphi = 0$ の点に存在する。 $r = r_g$ の点線はシュバルツシルト半径、 $r = 1.5r_g$ の点線は光円軌道を表す。光線はそれぞれ $L/Er_g = 1, 2, 2.5, 2.6, 2.7$ に対応する。

2.3 光線の軌道

2.2 で得られた測地線方程式を解いて光線の軌道を求める。グラバスターを座標原点に置き、観測者

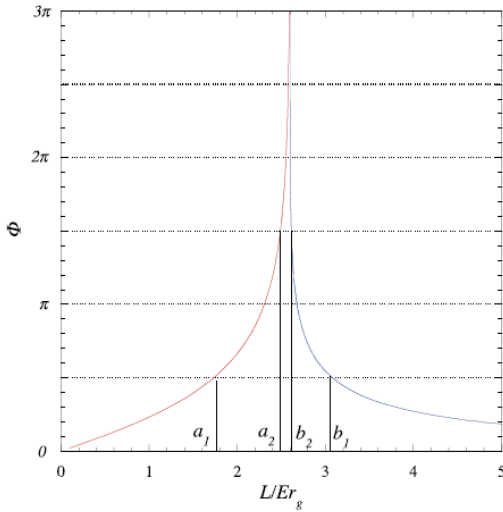


図 2: $H = 0.4/r_g$ の場合の衝突パラメーター L/Er_g と散乱角 Φ の関係。観測者は $r = 1000r_g, \varphi = 0$ の点に存在。

は原点から $D_0 = 1000r_g$ 離れた x 軸上の点 $(D_0, 0, 0)$ に置く。図 1 に $H = 0.4/r_g$ の場合に観測者に届く光線の軌道を示した。ここでグラバスター表面は光を完全に透過すると仮定する。光線の軌道をより理解するために、衝突パラメーター L/E と散乱角 Φ の関係を見る。ここで Φ は

$$\Phi = \varphi(r = 1000r_g) - \pi. \quad (10)$$

で定義され、 x 軸の負の方向から測った散乱角である。また、次式を満たす衝突パラメーターを a_n, b_n と置く。

$$\Phi = \pi(n - \frac{1}{2}), (n = 1, 2, \dots). \quad (11)$$

a_n, b_n はそれぞれグラバスター内部を通ってきた光線、外部だけを通ってきた光線に対応する。簡単のため、 $a_0 = 0$ とする。図 2 に衝突パラメーターと散乱角の関係を表したグラフを示す。発散している部分は光円軌道で何回も光線が回転していることを表している。また、赤線がグラバスター内部を通ってきた光、青線がグラバスター外部のみを通ってきた光を表す。

3 Results

3.1 無限に広がる平板が作る像

この節では光源として無限に広がる平板を考える。この場合、平板から発射されて無限遠の観測者に到達する光は前節で定義した散乱角で表すと次の範囲にある。

$$a_{2n} < \Phi < a_{2n+1} (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (12)$$

もっとも大きな特徴は L/Er_g にある明るい円と、 $a_1 < L/Er_g < a_2$ にある暗い領域である。 $[a_1, a_2]$ と $[b_1, b_2]$ の領域では平板から観測者に光が届かないため暗くなる。オレンジの領域 $[a_2, b_2]$ では無数の明るいリングと暗いリングが見える。点線の外側の領域はシュバルツシルトブラックホールの場合に見えるものと同じであり、点線の内側はグラバスターに特有のものである。光が完全に透過されるにも関わらず、暗い領域ができる理由は、重力によって曲げられ発射された方向へ U ターンするような軌道を描く光線が存在するためである。そのため、この暗い領域は“シャドウ”ではなく“ミラー”と正確には呼ぶべきものである。 a_1 は散乱角では $\pi/2$ に対応するので、グラバスター背後の全風景が中心の明るい円に像として映し出されていることになる。これはグラバスターが非常に大きな縮小率をもった凹レンズのような働きをしていると解釈できる。

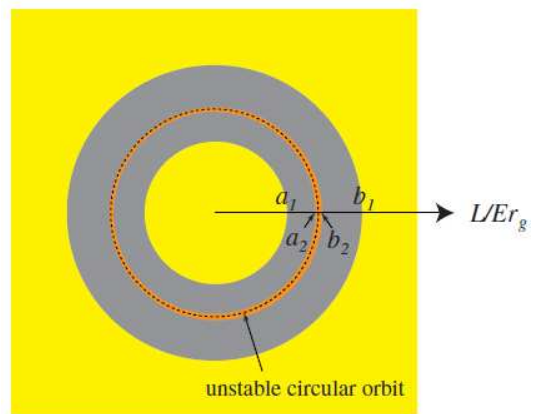


図 3: グラバスター ($H = 0.4r_g, R = 1.303r_g$) の背後にある無限大の平板から発射された光によって作られる像。この図は図 2 をもとにして描かれている。

4 Conclusion

ブラックホール擬似天体が背景光でブラックホールと区別できるか、グラバスターを例として調べた。星表面が光を完全に透過する場合について光源の像がどのように表れるかについてレイトレーシングを行った。光源が無限に広がる平板の場合、グラバスターの中心に明るい円とそれを囲む暗い領域があることが分かった。ここはブラックホールの場合だと完全に暗くなっている領域である。この違いを観測することができればブラックホールと区別することができる。今回グラバスターについて調べたが、今後、他のブラックホール擬似天体の存在する可能性や、もしそれらが存在する場合には観測的に区別できるかについて調べるのが重要である。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援、宇宙技術開発株式会社からのご協賛に感謝いたします。

Reference

- [1] Sakai, N., et al. (2014), Phys.Rev.D90, 104013
- [2] P.O.Mazur and E.Mottola (2004), Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 101, 9545
- [3] M.Visser and D.L.Wiltshire (2004), Classical Quantum Gravity 21, 1135