

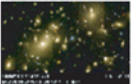
重力レンズ効果による光の曲がりシミュレーション

Astrophysics Group, OIT

入江 庄一

重力レンズ効果

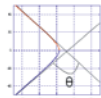
- 重力レンズとは、光が重力によって曲げられる現象である。
- 1916年にアインシュタインが一般相対性理論で予言した。
- エディントンによって1919年の日食時に初めて観測されて、その結果がアインシュタインが予言した理論とほぼ一致した。これは一般相対性理論が正しいことを示した初めての観測であった。



astro.isc.go.jp/grav-lens.htmlより

粒子の曲がる角度

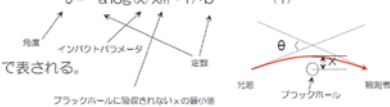
- $x=3\sim 100$ と θ の関係を図に示した。
- 図の θ_2 は $\theta = -a \log(x/x_m + 1) + b$ の定数 a 、 b と、 x_m を求めて代入した式の値。
- a は x ごとに $\theta_1 - \theta_2$ を求め、その最大値と最小値の差が最小になった時の値であり、 b はその時の $\theta_1 - \theta_2$ の平均値である。
- a 、 b は定数で、ブラックホールの特性によって決まる。
- x_m はブラックホールに吸収されない最小の x である。



重力レンズ効果

- 光源から出た光がブラックホールの重力で曲がり、観測者に向かう光の角度 θ は一般相対性理論の公式*

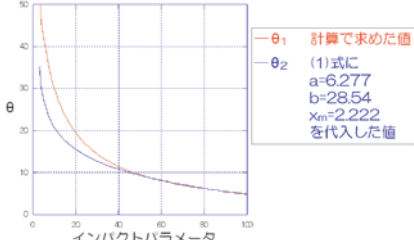
$$\theta = -a \log(x/x_m + 1) + b \quad (1)$$



この式がニュートン重力の下での計算でどの程度正しいか確かめる。

*Bozza, 2002, Phys. Rev. D, 65, 103001, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 570

粒子の曲がる角度



— θ_1 計算で求めた値
 — θ_2 (1)式に
 $a=6.277$
 $b=28.54$
 $x_m=2.222$
 を代入した値

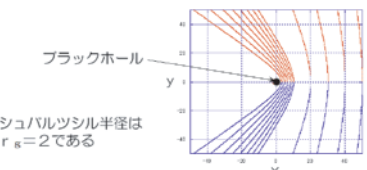
ニュートン運動方程式での粒子の運動

- ニュートン運動方程式を解いてブラックホールの近くを通る粒子の軌道を図に示した。
- 光の速度 $c=1$ 、ブラックホールの質量 $M=1$ 、万有引力定数 $G=1$ とする。
- ブラックホールに最も近づく点を x 軸上の点とするために計算の初期座標を x 軸上に設定した。
- 運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和が一定になるように初速度を設定した。
- インパクトパラメータが3~50での粒子の軌道は図のようになった。

まとめ

- 図より、 θ_1 と θ_2 がほぼ等しい曲線で表されることがわかった。
- 従って、ニュートン力学の下での計算でも、重力レンズ現象に非常に近いシミュレーションができていたことがわかった。

ニュートン運動方程式での粒子の運動



シュバルツシルト半径は $r_g=2$ である

この図からインパクトパラメータが小さくなると曲がる角度が大きくなることわかる

今後の課題

- 一般相対性理論での重力レンズ効果を計算して、ブラックホールのまわりを1周以上して出てくる軌道を実現する。
- 回転するブラックホールでの重力レンズ効果を計算し、回転しない場合とではどのように異なるかを比較する。

シュバルツシルト半径

- シュバルツシルト半径とは、光が脱出できなくなるほど曲がった時空領域の半径である。
- シュバルツシルト半径より小さく収縮した天体がブラックホールである。
- シュバルツシルト半径 r_g は、
$$r_g = 2GM/c^2$$
で表される。