

ブラックホール

～宇宙旅行における時間の遅れ～

初等教育教員養成課程理科選修
金光研究室 260402 安藤恒太

1. はじめに

普段我々の周りを流れている時間。一昔前までは「宇宙の端から端まで一様に流れている」というニュートンの“絶対時間”が常識とされていた。地球に住む我々は、時差はあるものの、アメリカや日本でも同じ速さで時を刻んでいるため、時間の進み方は誰にとっても一様で、不変なものであると感じるかもしれない。しかし、今から 100 年ほど前にアインシュタインの相対性理論が登場したことにより、絶対的だと思われてきた時間の概念がくつがえされた。また、相対性理論によると、動いているものの時間は遅れる、ブラックホール近傍では重力によって時間の流れが遅れる、という二つの時間の遅れがある。

本研究は、この二つの時間の遅れを考慮し、光速に近い速度でブラックホール近傍まで行って帰ってきたとき、地球にいる人との時間のずれがどのように変化するのかを検証する。

2. ブラックホール

2.1 ブラックホールとは

ブラックホールとは、密度が非常に高く、強力な重力場を持つ天体である。光でさえもその重力場から出てくることできないため、ブラックホール自身は光を出さず、見た目も真っ黒な天体になる。私たちのいる太陽系が属する天の川銀河だけでも 1 億～10 億個ものブラックホールが浮遊していると理論予測がある。さらに、2016 年 10 月 13 日、NASA の発表によると、観測可能な宇宙の範囲内にある銀河の数は 2 兆個あるとされているため、実はブラックホールは数えきれないほど存在しているのである。

2.2 ブラックホールの構造

ブラックホールの周囲は非常に強い重力によって時空が著しく歪められ、ある半径より内側では脱出速度が光速を超えてしまう。この半径をシュバルツシルト半径、この半径を持つ球面を事象の地平面（シュヴァルツシルト面）と呼ぶ。この中からは光であっても外に出てくることはできない。ブラックホールは単に元の星の構成物質がシュバルツシルト半径よりも小さく圧縮されてしまった状態の天体であり、事象の地



平面の位置に何かがある訳ではなく、ブラックホールに向かって落下する物体は事象の地平面を超えて中へ落ちて行く。中心には密度、重力が無限大である重力の特異点があるとされている。

3. 特殊相対性理論

3.1 光速度不変の原理

光は誰からみても光速で進む、どんなスピードで運動している観測者が測っても、光の速さは常に光速 c になるという原理を「光速度不変の原理」という。

$$\text{光の速さ(光速度)} = 299792458(m/s) = \text{秒速約 } 30 \text{ 万 } km$$

3.2 三平方の定理による導出

速度 v で等速運動している宇宙船内の天井には鏡があり、下から真上にレーザー光線を放ち、光が往復するのを地上の観測者が見た場合を考える。それを図で表すと、以下のようなになる。

右図の三角形に着目し、三平方の定理を使うと、

$$(ct)^2 = (ct')^2 + (vt)^2$$

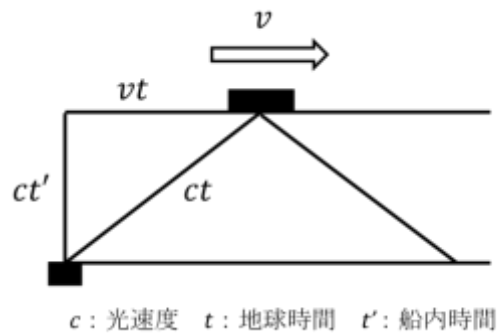
が成り立つ。これを整理すると、

$$t' = t \times \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

となる。つまり、動いているものの時間は、

$$\text{静止しているものの時間} \times \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

と表される。



3.3 高速移動による時間の遅れ

前述した式から、高速移動による時間の遅れを検討すると、以下のような結果が得られた。

$\frac{v}{c}$	$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$
0.1	0.9949874
0.2	0.9797959
0.3	0.9539392
0.4	0.9165151
0.5	0.8660254
0.6	0.8000000
0.7	0.7141428
0.8	0.6000000
0.9	0.4358899
0.99	0.1410674
0.999999	0.0014142

この表から読み取れることは、速さが光速に近ければ近いほど時間の遅れは大きくなるということである。例えば、光速の 0.9 倍の速さで 1 年間移動したとき、地球時間の約 0.436 倍であるため、

$$365 \text{ 日} \times 0.436 \approx 159 \text{ 日}$$

しか経過していないことになる。言い換えれば、

$$365 \text{ 日} - 159 \text{ 日} = 206 \text{ 日}$$

となるので、206 日先の未来に行ける（時間が遅れている）と考えることができる。10 年間ならばその 10 倍の 2060 日、つまり、5 年 7 ヶ月先の未来に行けるのである。

4. 一般相対性理論

4.1 シュバルツシルト半径

$$r_g(\text{シュバルツシルト半径}) = \frac{2GM}{c^2} \quad (G: \text{万有引力定数} \quad M: \text{天体の質量})$$

式から分かるように、シュバルツシルト半径は質量だけで決まり、質量が大きいほど大きくなる。太陽のシュバルツシルト半径は約 3km、地球のシュバルツシルト半径は約 0.9cm である。

4.2 重力場中での時間の遅れ

一般相対性理論では重力場中では、時空が歪められ、時間の進みが遅れる。ブラックホール中心からの距離を R 、地球時間を t とすると、宇宙船内の時間 t' は次式で表すことができる。

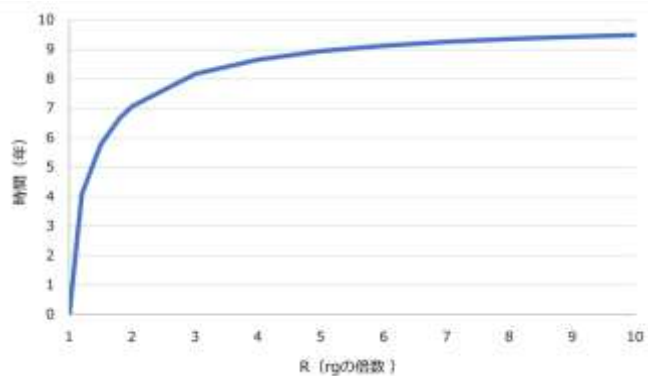
$$t' = \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}} t$$

これに前節の r_g (シュバルツシルト半径) を代入すると、

$$t' = \sqrt{1 - \frac{r_g}{R}} t$$

と表される。右のグラフの縦軸は時間、横軸はブラックホール中心からの距離を表

しており、ブラックホールから離れば離れるほど時間の遅れは小さくなるのがわかる。また、ブラックホール周辺はとても強力な重力場であるため、宇宙船でブラックホールの周りを安定して円運動するには、 $3r_g$ (シュバルツシルト半径) 以上の距離を保つことが必要である。

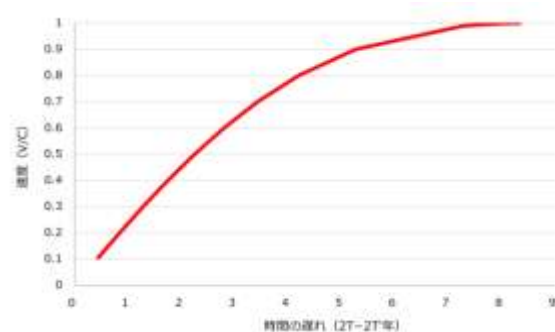
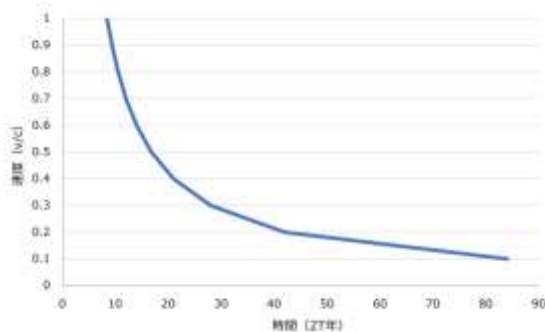


5. ブラックホールを往復したときの時間の遅れ

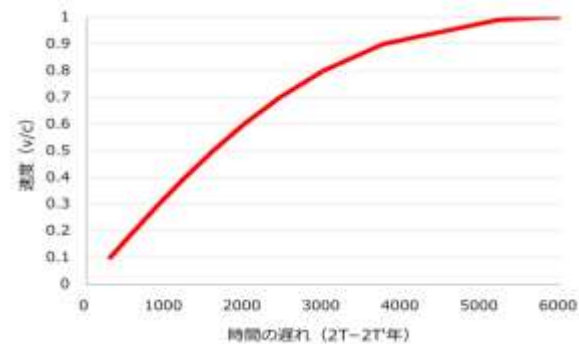
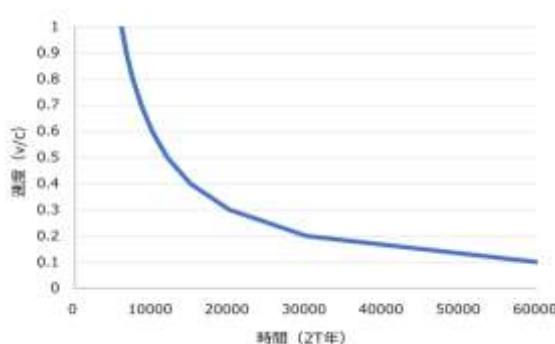
5.1 ブラックホールを高速で往復するとき

目標天体まで地球時間で T 年かかるときの宇宙船の速度を V 、宇宙船内の時間を事前に求めた T' とする。すると、時間の遅れは $T - T'$ と表される。グラフの縦軸は速度 (光速に近い)、横軸は往復にかかる時間 ($2T$) と往復したときの時間の遅れ ($2T - 2T'$) である。

① プロキシマ・ケンタウリ (4.23 光年) を往復する場合



② いっかくじゅう座 X - 1 (3000 光年) を往復する場合

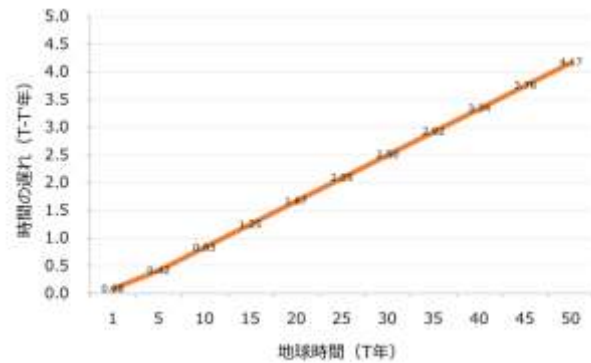


5.2 ブラックホール近傍を円運動するとき

安定円軌道上で万有引力と向心力がつり合い等速円運動をする場合、重力による影響はほとんどないため無視し、高速移動による時間の遅れのみを考える。前章で示したように、ブラックホール近傍を円運動するときは、 $3r_g$ 以上でないと安定して円運動できず、吸い込まれてしまう可能性があるため、ここでは $3r_g$ のところを等速円運動した場合を考える。このとき、宇宙船の速度は

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

で求めることができるため、M にブラックホールの質量、R に $3r_g$ を代入すると、約 $0.4c$ となる。シュバルツシルト半径は、質量のみに比例するため、どのブラックホールでも同じ値になる。このときの時間の遅れを縦軸にとり、地球時間を横軸にとったものを上図に示す。



6. 考察

図より地球からブラックホールへ光速に近い速度で往復するとき、速度が大きいほど往復にかかる時間は短く、宇宙船内の時間の遅れは大きくなることが分かる。

ブラックホール近傍では $3r_g$ の地点までしか円運動ができないため、最大でも光速の 0.4 倍の速度での時間の遅れしか稼ぐことはできない。仮に、地球時間で 10 年間円運動したとしても、約 1 年程度しか時間は遅れない。

宇宙旅行で時間が遅れるということは地球に帰り着いたとき、宇宙船内の時間に比べて地球時間は進んでいるため、未来に行けると考えることができる。

7. まとめ

現在、人類が作った最高速度の宇宙船は Helios 2 であり、その速度は $252,792(\text{km/h})$ で、秒速に直すと $70.22(\text{km/s})$ 。つまり、光速のわずか 0.023% である。現時点では太陽系を出ることすら不可能である。しかし、科学技術の進歩により、いつか宇宙旅行で未来に行けるような日々が来るかもしれない。

時間というものは、誰にとっても一様で不変なもののように思えるが、実は光によって変動する。我々は、光の速度に対して圧倒的に遅いスピードで過ごしている。そのため、地球上で生活していても時間の遅れはほとんど無視できるのだが、それはゼロではない。ほんのごくわずかなのであるのだが、今この瞬間も発生しているのである。