

相対性理論について

アインシュタインが発表した理論

1905年：特殊相対性理論（論文名：運動している物体の電気力学）←…等速直線運動

1916年：一般相対性理論（論文名：一般相対性理論の基礎）←…重力をも含めた

相対性理論とは、一言でいうと、

- ①「**光の速さ**は、見る人によって変わらない**絶対的**なものである」という学問である。
- ②そのことにより、「今まで**絶対的**だと思っていた**長さ**と**時間**というものが、見る人によって変わる**相対的**なものである」ととらえる学問である。

- 1) 止まっている人から見ると、光速に近い速さで動くものは、**縮んで見える**
止まっている人から見ると、光速に近い速さで動くものの中の**時間は、遅く流れる**
- 2) 重力の高いところでは、**物体は縮み、時間も遅れる**
逆に重力の低い（高高度を飛んでいる人工衛星などの）ところでは、**物体は伸び、時間も相対的に早く進む**
(具体的に) GPS 衛星では、全体的に見ると**地表より時間の進みが早く**、相対論に基づく補正をしないと**1日で最大約11kmのズレが生じる**。

(4km/sec の高速飛行で時間はわずかに遅れるが、高高度飛行により時間が早く進み、全体では時間が進む)

GPS 衛星での1日当たりの時間の誤差：38.6 μ s (0.0000386 秒進む)
GPS 衛星：高度 約 20,000km、速度 約 4km/sec 因みに ISS は、上空 約 400km 速度 約 8km/sec

- 3) 光速度不変の法則
止まっている人から見ても、光速に近い速度で飛んでいる宇宙船から見ても
光の速度は、およそ 30 万 km/sec (真空中) であって変わらない。
(説明) 速度は、**長さ(移動した距離) ÷ 時間** であらわされるので、
自然界では、**光速度が同じになるように、長さや時間が変化している**と解くのである

まとめると

- ① 今まで「絶対的」だと思っていた**長さ**と**時間**は、実は“**相対的**”だった。
- ② 今まで「相対的」だと思っていた**光の速さ**は、実は“**絶対的**”だった。

※時間と空間は基本的に同じもの (1 秒=Cメートル Cは光速)

アインシュタインは、「宇宙には絶対基準としての唯一の時間の流れなどなく
相対的な無数の時間の流れがある」と相対性理論で論じている。

(古典では、ニュートン[1642-1727]は、「宇宙のすべては、等しく時を刻む」と考えていた)

(応用) 簡単には、地球から光速に近い速度で飛べる宇宙船に乗って、何光年も離れた星まで飛行した場合に、宇宙船の中の人、地球にいる人より年が取らないとは、以下のように考える。

光速の80%で飛ぶ宇宙船では、10光年離れた星に行くと・・・

地球からは、当然のごとく、宇宙船は、10年で目的の星に到着するのが見える。

しかし、相対論により、宇宙船の中の人たちの時計は、地上の60%で進むので6年で目的の星に到着する。これは、宇宙船の中の人たちにとっては、光速の80%で飛ぶと相対論により10光年の距離がその60%である6光年に縮んだと考えてもよい。 (「ここで問題が」・・・つづく)

※(参考) 相対論から導かれる計算値(詳細は付録を参照)は、・・・

光速の1%で99.995%、光速の10%で99.5%、光速の60%で80%、光速の80%で60%、光速の99.9%で4.5%

(応用2) 相対論では、ある物体が動いているか、止まっているかは、それを観察する立場によって変わります。例えば、宇宙空間で、2つの宇宙船がすれちがった場合を考えたとき、それぞれの宇宙船に乗っている人が、窓から相手の宇宙船を見たとき、それぞれが、自分は止まっていて、窓から見える相手の宇宙船が動いているように見えることでしょう。

さらに、一定速度で進んでいる(等速直線運動をしている)環境であるかぎり、どんな場合でも同じ物理法則が成り立ちます。



ということは、・・・先に紹介した地球から飛び立った宇宙船と地球の間でも、お互いに自分が止まっていて相手が動いたことになり、お互いの時間の進みが相対的に同じになり、時間のズレが起こらないこととなります。しかし・・・本当は?・・・

この問題の根本には、「等速直線運動」という前提があるということです。

GPS衛星は、地球を回る運動なので、等速直線運動ではありません。

また、宇宙船が地球を飛び立って、また地球に戻ってくるのも等速直線運動ではありません。現実的には飛び立って一定速度になるまでは加速度運動があり、どこかの星をめぐるには、Uターンする必要があったり、地球に戻って着陸するには、減速運動が伴います。

それなので、地球と宇宙船の間では、必ず時間のズレが生じます。宇宙船の中の方が時間の進みが遅くなり、宇宙船の中の人の方が年を取りません。つまり、言い換えるとタイムマシン効果で地球の未来に着くことができます。

(応用3) 双子のパラドックス

特殊相対性理論(1905年)による運動系の時間の遅れに関して提案されたパラドックスである。初めは、相対性理論に内部矛盾があるかどうかについて、アインシュタイン本人が時計のパラドックスとして出した問題であるが、1911年にポール・ランジュバンが双子をモデルしたパラドックスに仕立てたため、「双子のパラドックス」として有名になった。

この問題は、双子の兄弟がいて、弟は地球に残り、兄は光速に近い速度で飛ぶことができる宇宙船に乗って、宇宙の遠くまで旅行したのちに地球に戻ってくるものとする。

このとき、弟から見れば兄の方が動いているため、特殊相対性理論が示すように兄の時間が遅れるはずである。すなわち、宇宙船が地球に戻ってきたときは、兄の方が弟よりも加齢が進んでいない。

一方、運動が相対的であると考えれば、兄から見れば弟の方が動いているため、特殊相対性理論が示すように弟の時間が遅れるはずである。すなわち、宇宙船が地球に戻ってきたときは、弟の方が兄よりも加齢が進んでいない。

このように、お互いの結果が逆になり、矛盾「パラドックス」が生じる。 (次頁につづく)

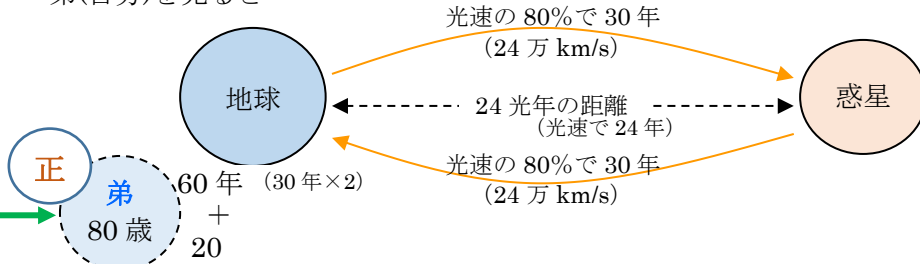
宇宙旅行と双子のパラドックスの考え方

兄は宇宙へ旅立ち、弟は地球で待つ。先に年をとるのはどっち？

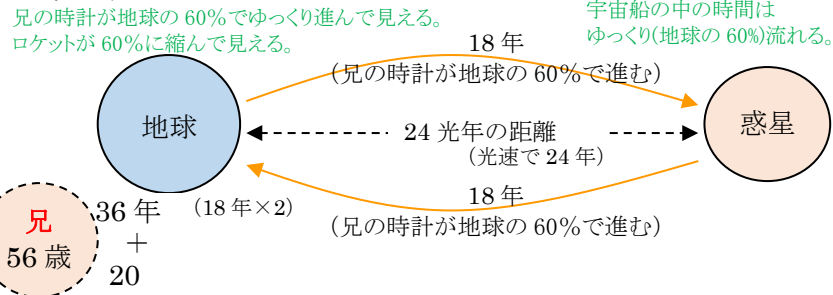
20歳の双子の兄は、光速の80%(24万 km/s)で進むことができる宇宙船に乗り、地球から24光年の彼方にある目的地の惑星をめざします。宇宙船は惑星に到着したら、すぐに帰路につきます。双子の弟は、地球で兄に帰りを待っています。

地球の弟の視点 で考えると、弟(自分)は止まっていて、兄が光速の80%で動いている。

・弟(自分)を見ると



・弟から兄を見ると



宇宙船の中の兄は、自分の時計の進みが地球の 60% でゆっくりなっていることを感じることはできないが、距離が 60% に縮んで見え、その分早く到着できる

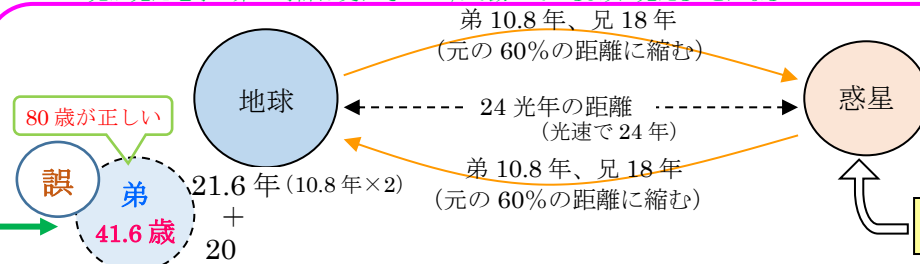
※光速の 80% で動くと、進行方向に対して距離が 60%(14.4 光年)に縮む (30 年の 60% の 18 年で惑星に行ける)

この違いが矛盾です。

宇宙船の兄の視点 で考えると、兄(自分)は止まっていて、地球の方が光速の 80% で動いている。

・兄(自分)から地球を見ると

兄(自分)の時計は相対論で地球の 60% で進んでいる。
兄が見た地球の弟の時計は更にその 60% で動いているように見えることになる

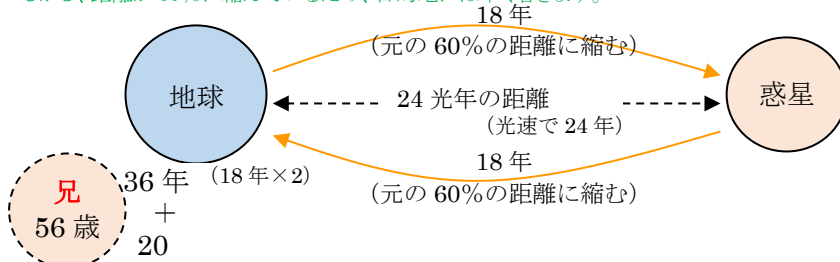


ここが、パラドックス

ここでの「折り返し」が矛盾を生む原因

・兄が宇宙船内の自分を見ると

兄は、自分の時計の進みがゆっくりになっていることを感じることはできない
しかし、距離が 60% に縮んでいるため、目的地には早く着きます。



※このパラドックスは、兄の宇宙船が方向を反転していることを無視しているからです。方向を転換しているのは、兄にとっては一瞬でも、地球ではそれ相応の時間が流れてしまいます

※そもそも相対論では、双方の時間の進みが相対的に遅くなるのは、「等速直線運動」をしている時のみ適用される法則です。

結論：正しいのは、弟の視点で見た時となります

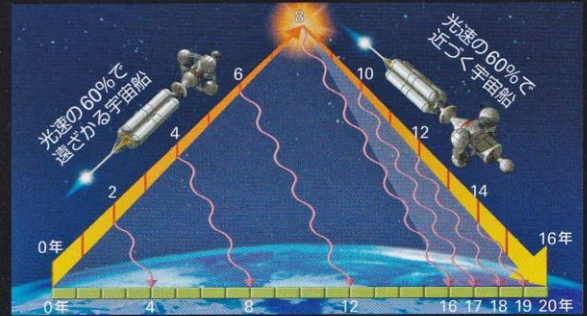
- 双子のパラドックス（ニュートン別冊「ゼロからわかる相対性理論」P.71 からの解説）
参考に掲載させていただきました。どちらの解説が分かり易いでしょうか？
分かり易い方を参照ください。
- ここでは、光速の60%で飛ぶ宇宙船で、片道6光年の星までを往復する。

A. 遠ざかる兄からの光信号の間隔

光速の60%で地球から遠ざかっている兄が、兄の時計で2年ごとに、光の信号を地球にいる弟に向けて発信していくとする。弟にとって、兄の時計の進み方は0.8倍遅くなるので、兄にとっての2年は弟にとっては2.5年（ $= 2年 \div 0.8$ ）であり、その差は0.5年である（特殊相対論による時間の遅れ）。

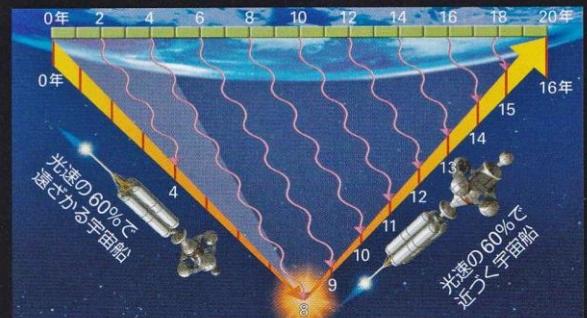
2.5年の間に、光速の60%で進む宇宙船は2.5年 \times 0.6 = 1.5光年進む。つまり、光信号が伝播する距離は、ある信号より次の信号の方が1.5光年だけ長い。このとき、光信号の伝播時間も1.5年よけいにかかる（信号が伝わる距離の変動による時間の変動）。

兄にとって2年という間隔で発信された信号を弟が受けとるとき、その間隔には特殊相対論による時間の遅れと信号が伝わる距離の変動による時間の変動が加わって、 $2 + 0.5 + 1.5 = 4$ 年間隔となる。光信号でなく映像で考えると、兄の2年分の映像を、弟は4年かけて見ることになる。遠ざかる弟からの映像を兄が見る場合も同様である。



1. 兄の画像を弟が受けとる場合

兄が遠ざかる8年間に送信した映像を、弟は16年で見る（A）。
兄が近づく8年間に送信した映像を、弟は4年で見る（B）。
つまり、兄の16年が、弟の20年間に対応している。



2. 弟の画像を兄が受けとる場合

弟の4年分の映像を、兄は地球から遠ざかる8年で見る（A）。
弟の16年分の映像を、兄は地球に近づく8年で見る（B）。
つまり、弟の20年が、兄の16年間に対応している。

B. 近づく兄からの光信号の間隔

兄は、今度は光速の60%で地球へ近づいているとする。兄が2年ごとに光信号を送信するとき、特殊相対論による時間の遅れは、Aと同じ0.5時間である。

宇宙船が近づいてくるときは、光信号が伝播する距離はある信号より次の信号の方が1.5光年だけ短くなるので、光の伝播時間はマイナス1.5年となる。

したがって、兄にとって2年という間隔で発信された信号を弟が受けとるとき、その間隔には特殊相対論による時間の遅れが加わり、信号が伝わる距離の変動による時間の変動が差し引かれて、 $2 + 0.5 - 1.5 = 1$ 年間隔となる。光信号でなく映像で考えると、兄の2年分の映像を、弟は1年で見終えることになる。近づく弟からの映像を兄が見る場合も同様である。

双子はどちらが年をとるのだろうか？

弟の立場に立つと、兄の乗った宇宙船は高速で遠ざかり、その後また高速で近づくことになる。高速で運動するものは時間の進み方が遅れるのだから、兄は弟よりゆっくり年をとる。帰ってきた兄と再会したとき、弟は兄より多く年をとっていることになる。一方、兄からすれば、高速で運動するのは弟の方である。したがって弟がゆっくり年をとり、再会時には兄の方が年をとっているはずだ。この矛盾は「双子のパラドックス」とよばれる。



(付録)

●人工衛星の高度は、速度により決まる

人工衛星の速度は、地表からの高度によって異なります。地表からH(km)の高さの所をまわっている円軌道の場合、その速度V(km/秒)はつぎの式で計算することができます。

$$V = (398600 / (6378 + H))^{1/2}$$

ここで、398600(km³/秒²)は地球の重力についての定数、6378(km)は地球の赤道半径です。

次に、地上からH(km)の高さの円軌道を飛んでいる人工衛星の周期を計算してみましょう。周期とは、人工衛星が地球を一周する時間のことです。この軌道の円周は2π(6378+H)kmになります。これを人工衛星のスピードで割れば周期T(秒)が計算できます。

$$T = 2\pi(6378 + H) / V$$

高度(km)	速度(km/秒)	周期	備考
0	7.91	1時間24分30秒	第1宇宙速度
400	7.67	1時間32分30秒	
800	7.45	1時間40分50秒	
1,000	7.35	1時間45分10秒	
5,000	5.92	3時間21分20秒	
10,000	4.93	5時間47分40秒	
20,182	3.87	11時間58分00秒	GPS衛星軌道(半日)
35,786	3.07	23時間56分04秒	静止衛星軌道(1日)
378,021	1.02	27日10時間50分	月の軌道

●相対論

運動体の速さ (v)	運動体内の時間の刻み (t ₀)	空間の縮み
光速の 1%	99.995% (地上の 1 時間が、59.997 分)	元の 99.995%
光速の 10%	99.5% (地上の 1 時間が、59.7 分)	元の 99.5%
光速の 20%	98% (地上の 1 時間が、58.79 分)	元の 98%
光速の 30%	95.4% (地上の 1 時間が、57.2 分)	元の 95.4%
光速の 40%	91.65% (地上の 1 時間が、55 分)	元の 91.65%
光速の 50%	86.6% (地上の 1 時間が、52 分)	元の 86.6%
光速の 60%	80% (地上の 1 時間が、48 分)	元の 80%
光速の 70%	71.4% (地上の 1 時間が、42.85 分)	元の 71.4%
光速の 80%	60% (地上の 1 時間が、36 分)	元の 60%
光速の 90%	43.6% (地上の 1 時間が、26.15 分)	元の 43.6%
光速の 99%	14.1% (地上の 1 時間が、8.5 分)	元の 14.1%
光速の 99.9%	4.5% (地上の 1 時間が、2.68 分)	元の 4.5%