

双子のパラドックス

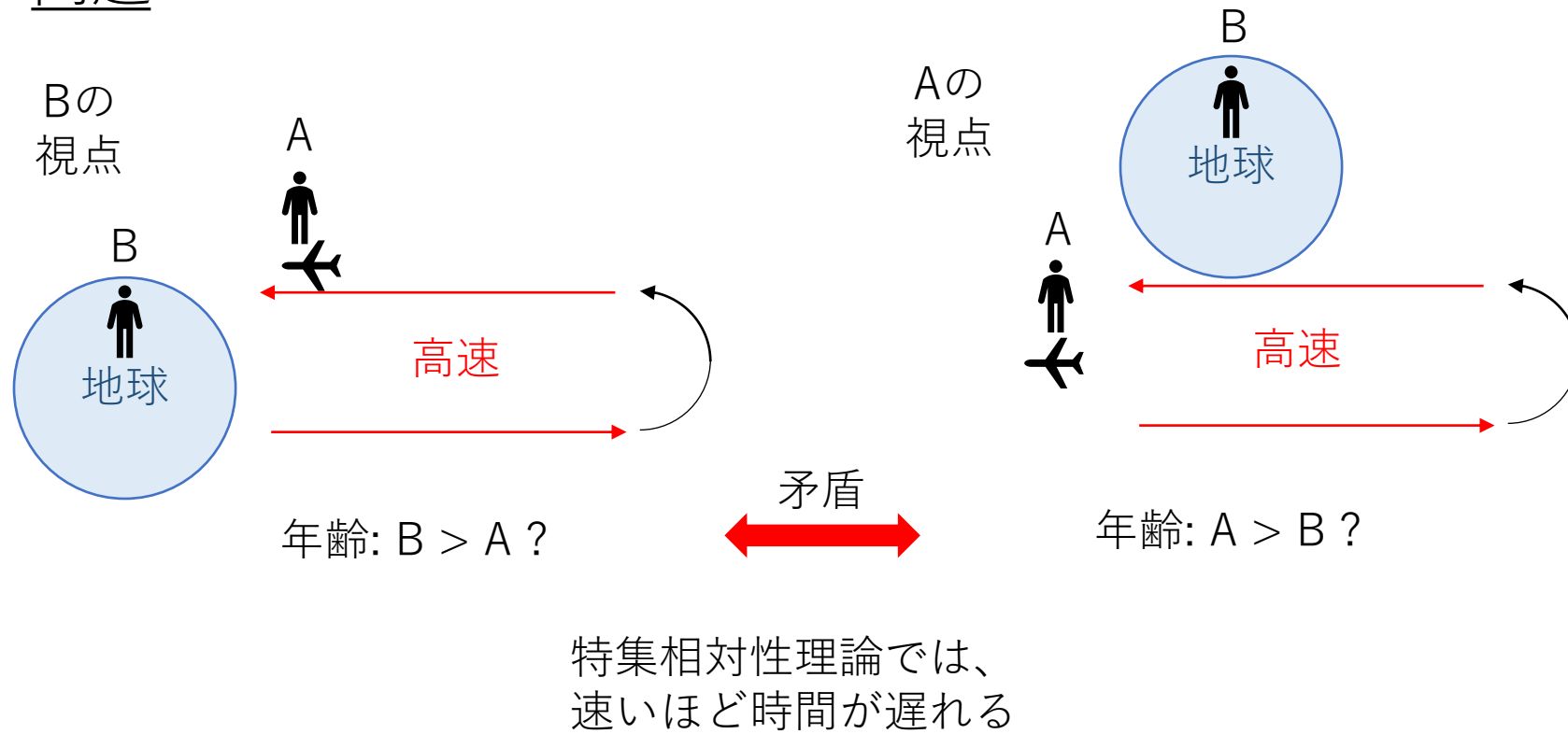
特殊相対性理論

完全解決



双子のパラドックス

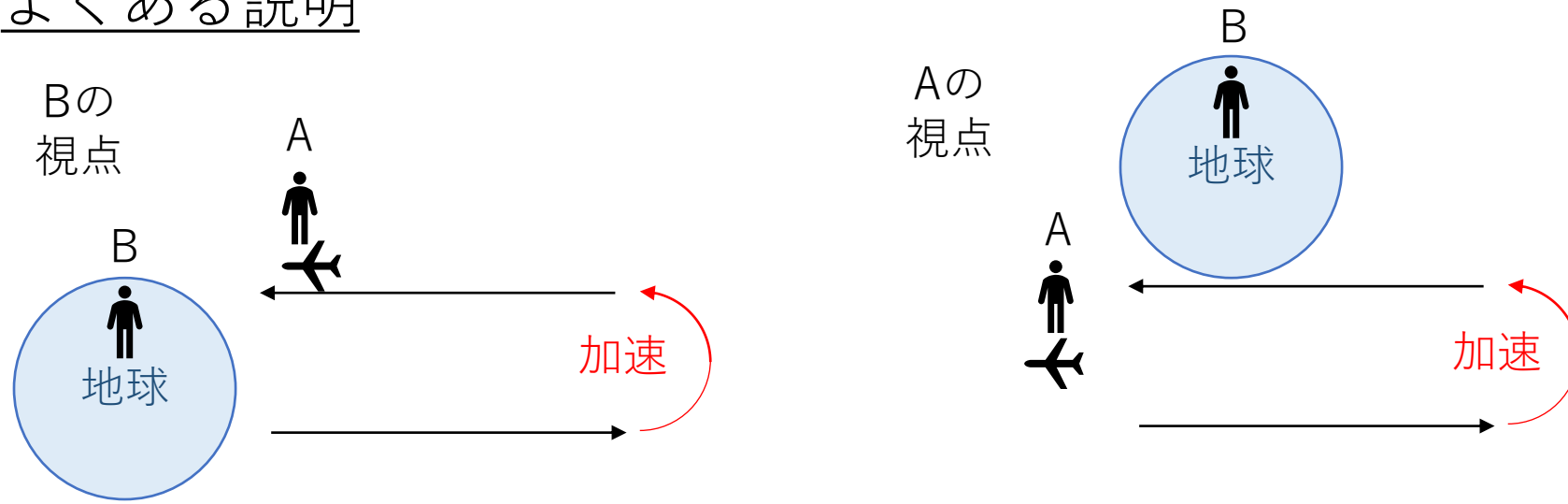
問題



名探偵が双子のパラドックスを完全解決します。
双子の片方が宇宙旅行から帰ってくると、どちらが老いているかという問題です。
特殊相対性理論では、速く動くほど、時間の流れが遅くなります。
そのため、ロケットから戻ってきた人の方が、時間が遅れ、若いはずです。
ですが、ロケットから見れば、地球の方が動いたように見えます。
そのため、地球に残った人の方が、時間が遅れ、若いはずです。
双子のどちらから見ても、相手の方が若いというのは矛盾します。
これが、双子のパラドックスです。

双子のパラドックス

よくある説明



加速するときに時間が遅れる。

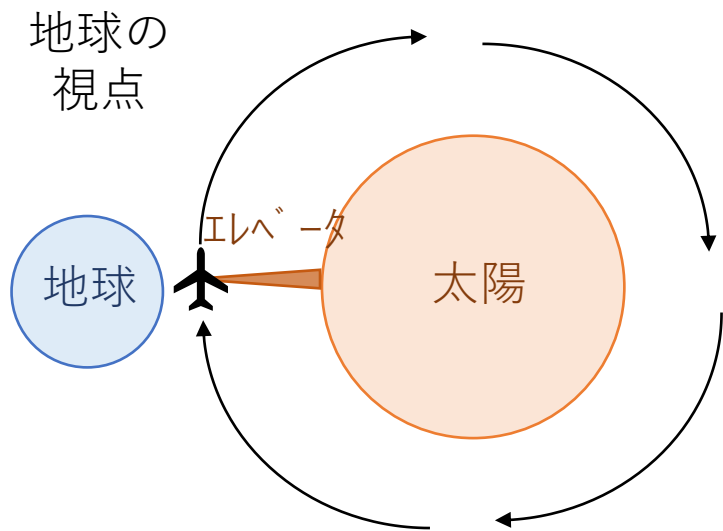
加速してるのはどっち？

よくある説明では、ロケットの方は加速しているから、対称的ではないというものです。出発と到着と折り返し地点でのUターンするときにロケットは減速と加速をします。加速するときに時間が遅れるんだと説明されます。

でも、ロケットから見れば、地球が減速と加速をしてUターンしたように見えます。そもそも、特殊相対性理論は、速度が大きいほど時間が遅れるとだけ言っているだけで、加速度は関係ありません。そこで、加速しない場合の思考実験をしてみます。

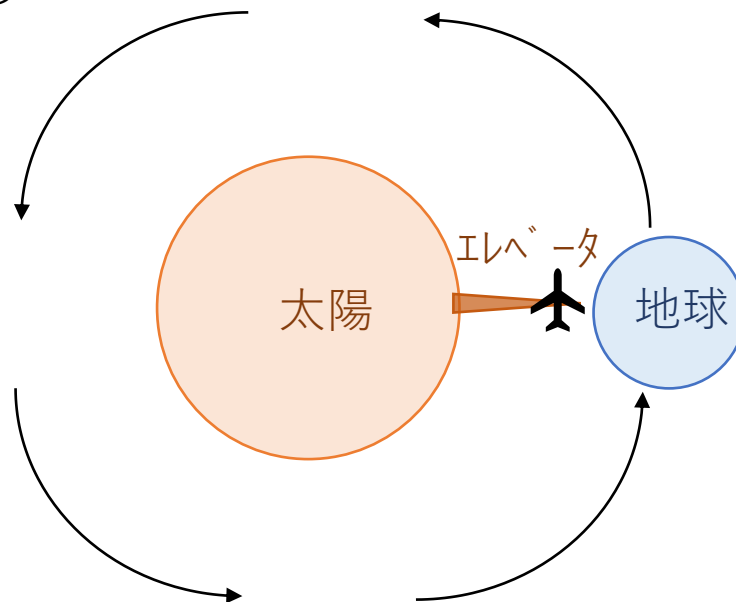
双子のパラドックス

加速のない例



年齢: 地球 > 太陽=ロケット ?

太陽の
視点



年齢: 太陽=ロケット > 地球 ?

まず、太陽の自転を止めておきます。
太陽から地球まで届く軌道エレベーターを設置します。
軌道エレベーターの先にロケットを固定します。
地球から見ると、ロケットは一定の速度で太陽の周りを回って戻ってきます。
光速ほどは速くはありませんが、ロケットの時間は僅かに遅れるはずです。
一方で太陽から見ると、地球は一定の速度で、太陽の周りを回っています。
地球の時間は、太陽より遅れるはずです。
ロケットは太陽に固定されているので、ロケットから見ても地球の時間が遅れるはずです。
地球と太陽のどちらを基準にするのかで、どちらの時間が遅れるのかが逆転してしまいます。

双子のパラドックス

三つの解決方法

双子の年齢

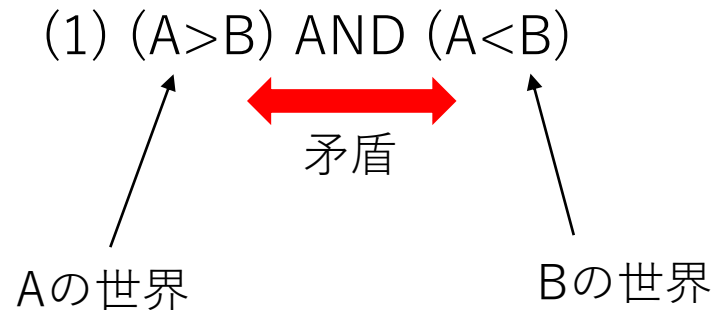
- (1) $(A > B) \text{ AND } (A < B)$
- (2) $A = B$
- (3) $(A > B) \text{ OR } (A < B)$

ロケットの方が遅れるはずだという先入観を持っていると、偏った推理をしてしまいます。
先入観を捨てて、すべての可能性を考えてみましょう。
パラドックスが解決されるとき、双子AとBの年齢は、次の三つのどれかになります。

双子のパラドックス

解決方法(1)

双子の年齢



多世界解釈すれば、矛盾しても良い

一つ目の解決方法は、どちらから見ても若く見えることを肯定します。
二人の主張は矛盾するため、同時に成り立ちません。
ですが、多世界解釈として、世界が分岐したと解釈できます。
ただ、どんな矛盾でも認めてしまうのは、説明を放棄しているのと同じです。

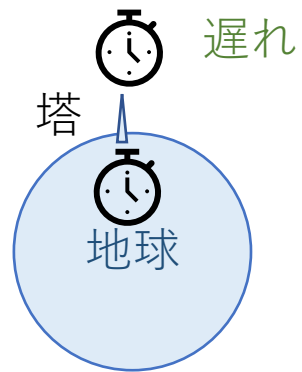
双子のパラドックス

解決方法(2)

双子の年齢

(2) $A=B$

重力による時間の遅れ



時間の
遅れ

速度による：特殊相対性理論

重力による：一般相対性理論

二つ目の解決方法は、実際には時間が遅れない場合です。
時間が遅れるという現象は、実験で調べられています。
スカイツリーの上では、地表よりも時間が遅れるのが確かめられています。
これは、速度による遅れではなく、重力による遅れです。
特殊相対性理論は、重力が無視できる場合の速度の影響を論ずるものです。
一方で、一般相対性理論というのが、重力の時空の歪みの理論です。

双子のパラドックス

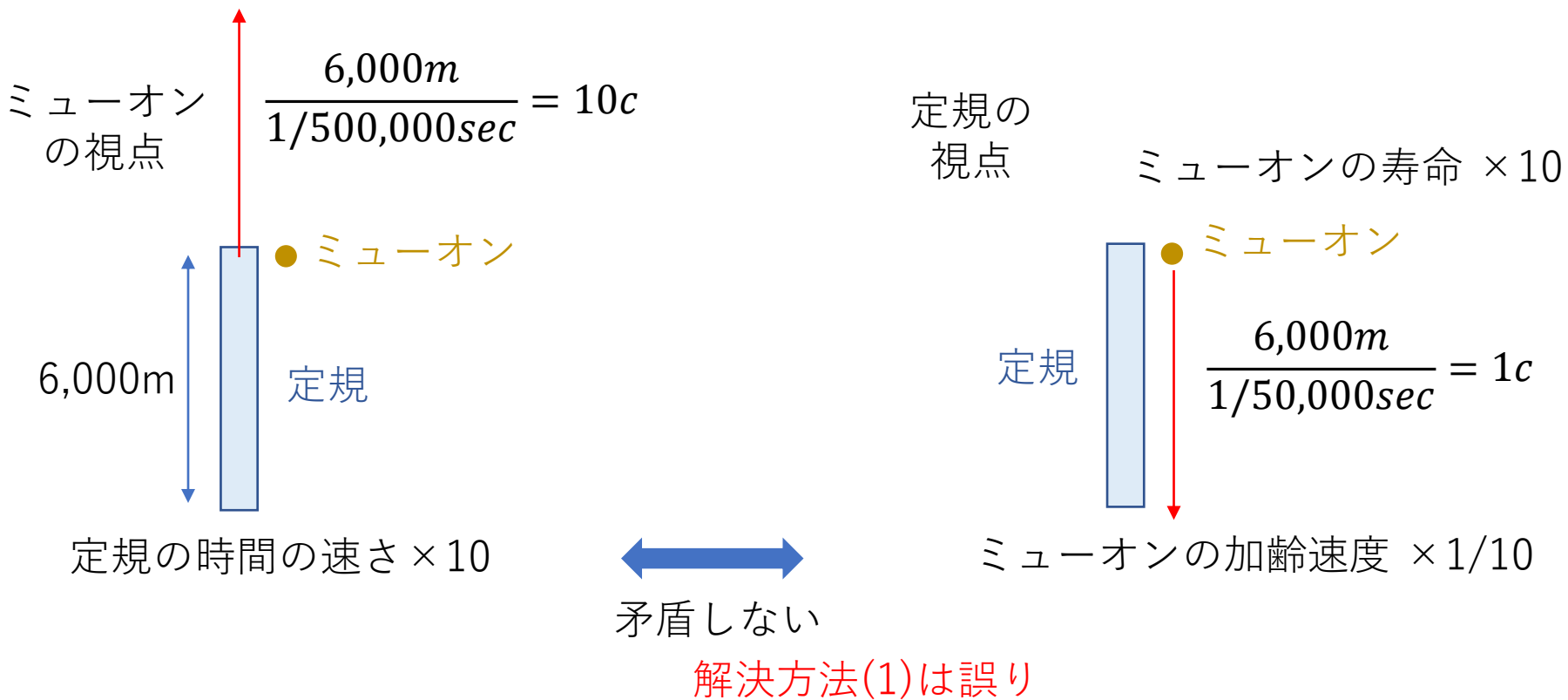
速度による時間の遅れ



速度による時間の遅れの身近な例は、宇宙から飛来するミューオンの寿命の延長です。宇宙線が大気に衝突すると、ミューオンという粒子が発生します。ミューオンの寿命は50万分の1秒で、崩壊してしまいます。50万分の1秒間に、光は約600mしか進めません。そのため、地表に届く前にミューオンは崩壊してしまい、ほとんど観測されないはずですが、ミューオンが光速に近い速さなため、時間が遅れて、寿命が約10倍になります。寿命の間に約6000m進めるので、地表に届いたミューオンが実際に観測されています。

双子のパラドックス

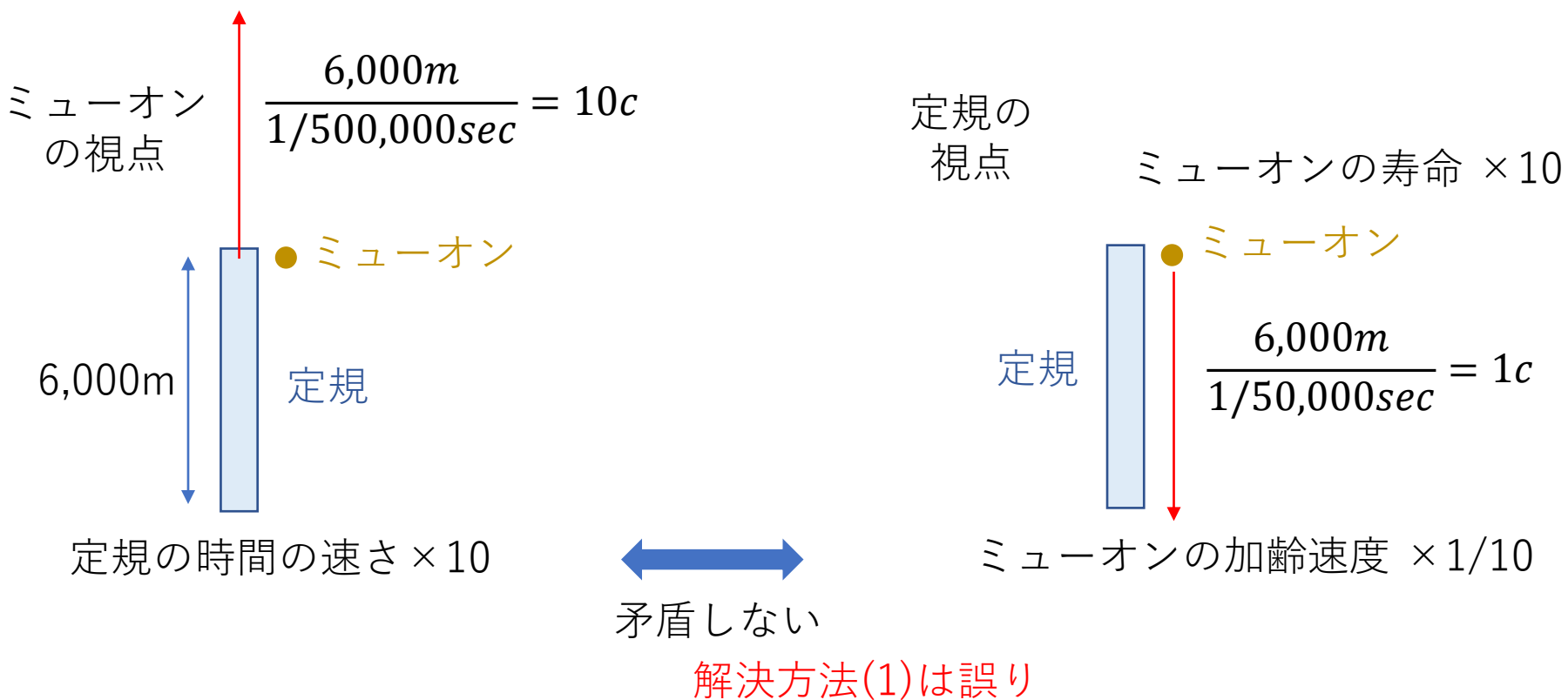
双方の視点の時間の速さ



ミューオンの視点でこの現象を見てみます。
地表に、6,000mの定規を設置しておきます。
ミューオンからは、寿命の50万分の1秒間に、定規が6,000m動いたようにみえます。
光速では、50万分の1秒間に、600mしか動かないはずですが。
すなわち、定規が、光速の10倍で動いたようにみえます。
つまり、外の時間の流れが10倍に速まって見えます。

双子のパラドックス

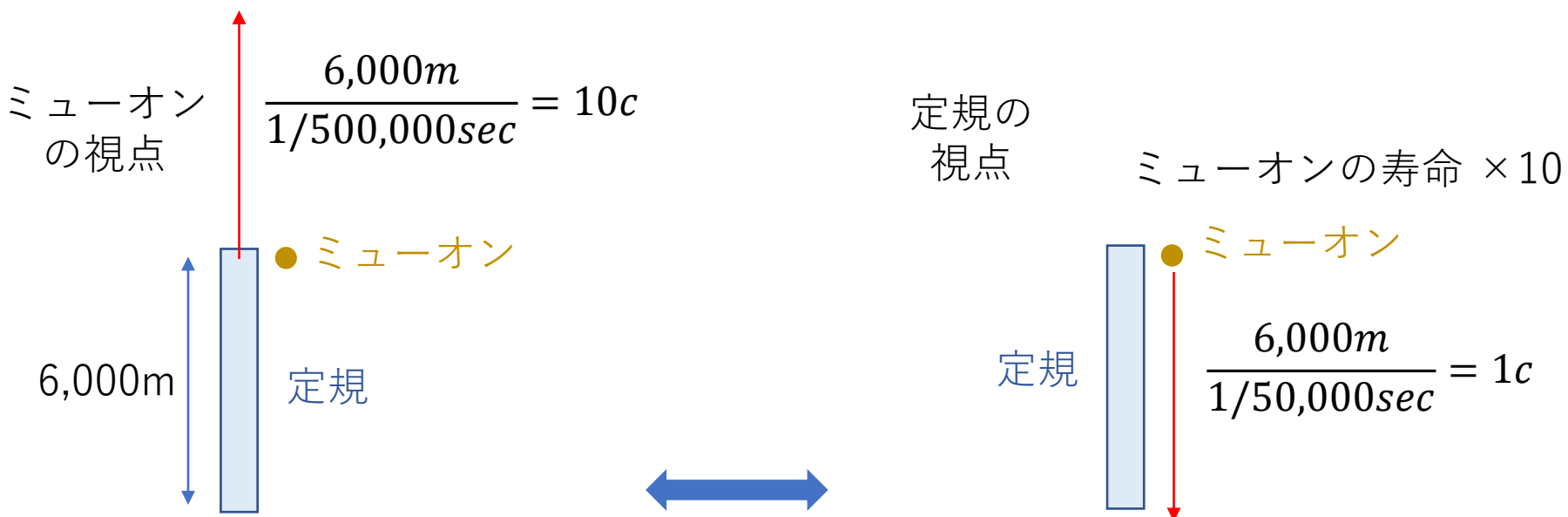
双方の視点の時間の速さ



一方で、定規から見ると、ミューオンはほぼ光速で動いているように見えます。ミューオンが6,000m進むのに、外側では、5万分の1秒かかったように見えます。寿命が、50万分の1から、10倍の5万分の1に延長したようにみえます。すなわち、ミューオンの加齢速度が1/10になりました。つまり、ミューオンの時間の流れが、10分の1に遅くなって見えます。お互いに、時間が遅れて見えるという矛盾は発生していません。矛盾を解消するために、無理やり多世界解釈する(1)の説は誤りだといえます。

双子のパラドックス

解決方法(2) 時間は遅れない



実際に光速を超えていたなら、時間の遅れなしで説明可能。

光速を超える宇宙線は観測されていない。

解決方法(2)は誤り

ただし、この実験事実だけでは、ミューオンの時間が遅れたというには不十分です。

実際に、ミューオンが光速の10倍で飛行した可能性があります。

ミューオンから見ても、外から見ても、50万分の1秒間に、6,000m進んだということです。

その仮定なら、どちらから見ても時間が遅れずに、ミューオンが地表に到達するのを説明できます。

逆説的に、時間の遅れなしで実験事実を説明するなら、光速を超えて宇宙線が飛来することが許されます。

そのような観測結果はなさそうなので、(2)の説も誤りのようです。

双子のパラドックス

解決方法(3)

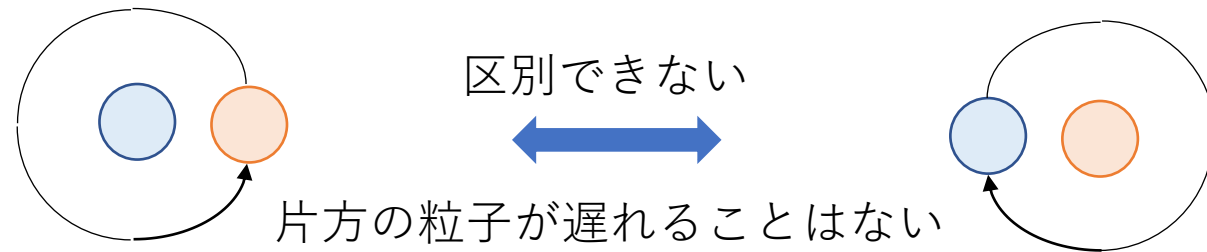
双子の年齢

(3) $(A > B)$ OR $(A < B)$

どちらが遅れるかは、**客観的**に決まる

地球とミュオンなら、ミュオンが遅れる

宇宙には、2つの同種の素粒子しかない場合



相対速度があれば、必ず時間が遅れるという考えは誤り

三つの目解決方法は、どちらの時間が遅れるのか、客観的に決まっているというものです。
地球とミュオンの場合は、ミュオンの方の時間が遅れるのは実験事実です。
ですが、2つのものが完全に対称なら、時間は遅れないはずですが。
宇宙には、2つの同種の素粒子しかない場合を考えます。
Aの周りをBが回っているのか、Bの周りをAが回っているのか、区別できません。
区別できないのに、片方の時間が遅れることは考えられません。
相対速度があれば、必ず時間が遅れるという考えは誤りです。
特殊相対性理論は、重力が無いような特殊な状況下で、近似的に成り立つものに過ぎません。

双子のパラドックス

一般相対性理論

重力によって、時空が歪む。

重力の強さは、どんな視点から見ても同じ。

重力による時間の遅れは、**客観的**に決まる。

$$\left(\begin{array}{c} \text{時空の曲率} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{エネルギー} \\ \text{(質量)と} \\ \text{運動量} \end{array} \right)$$

運動量という客観的な量で時間の遅れが決まる。

どちらが運動しているのかは、視点によって変わる。

ミューオンの時間が遅れるのは事実なので、どちらが遅れるのか客観的に決める方法があるはずです。
一方で、速度ではなく重力による時間の遅れは、分かり易く客観的です。
重力が強いところは、どんな視点から見ても、重力が強いからです。
一般相対性理論は、エネルギーと運動量が保存し、それらによって時空が歪むと解釈されます。
ゆえに、運動量という客観的な量によって時間の遅れが決まるといえます。
ですが、運動しているのはどちらかという、視点によって変わります。

双子のパラドックス

運動量

$$\text{運動量} = \text{質量} \times \text{速度}$$

$$\text{ミューオンの質量} \ll \text{地球の質量}$$

運動量が一定のとき

$$\text{ミューオンの速度} \gg \text{地球の速度}$$

速い

ほぼ停止



質量が小さい方の時間が遅れる。

質量が同じなら、時間は遅れない。

ミューオンは、一定の運動量を持って飛来します。
ミューオンから見ると、地球の方が運動しています。
運動量とは、質量かける速度です。
そのため、運動量が一定のとき、質量が大きければ、速度は小さくなります。
ミューオンから見ると、地球はほんの僅かな速度でしか運動していないように見えるのです。
地球とミューオンのように質量差が大きければ、軽い方の時間が遅れると客観的にいえそうです。
質量比が小さいほど遅れは小さくなり、質量が同じなら時間は遅れないと推測します。
ただし、それだけでは客観的に決まりません。

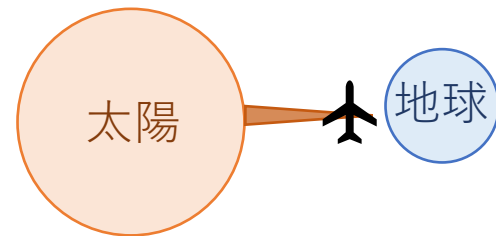
双子のパラドックス

質量

ロケット \ll 地球 \ll 太陽

太陽と比べて、
ロケットの時間が遅れる。

矛盾



ロケットは太陽に固定。
時間は遅れない。

太陽 \ll ブラックホール

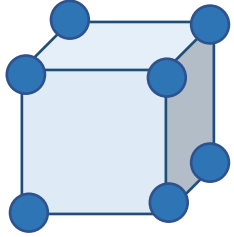
いくら質量が大きくても、十分に離れていれば影響はないはず。

ある運動量による時間の遅れを考える場合、
その運動量の影響下にある質量のみを考えれば良い。

地球と比べるとロケットの方が軽いですが、太陽と比べると地球の方が軽いです。
太陽よりも地球の時間が遅れ、地球よりもロケットの時間が遅れることになります。
従って、太陽よりもロケットの時間が遅れます。
ですが、ロケットが太陽に固定されているとすると、ロケットと太陽の時間は同じはずなので矛盾します。
また、宇宙のかなたには、太陽よりも重いブラックホールがあります。
直感的に、いくら質量が大きくても、十分に離れていれば影響はないはずです。
ある運動量による時間の遅れを考える場合、その運動量の影響下にある質量のみを考えれば良いのです。

双子のパラドックス

固体



固体は、同じ運動量の影響下にある。

固体中の原子は、相互作用によって、お互いに位置が固定されている。

相互作用によって運動量が伝達される範囲の質量のみを考えれば良い。

相互作用の強さに応じて、時間の遅れに影響する質量を決める。

固体中の原子は、まとまって運動するので、同じ運動量の影響下にあるといえます。
固体中の原子は、相互作用によって、お互いに位置が固定されています。
つまり、相互作用によって運動量が伝達される範囲の質量のみを考えればよさそうです。
相互作用の強さに応じて、影響する質量の量を決めます。

双子のパラドックス

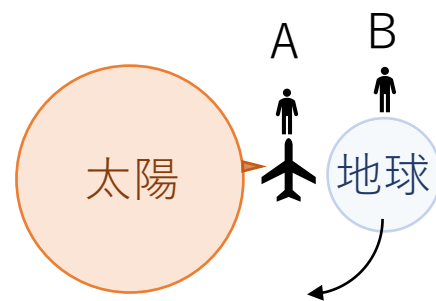
双子のパラドックスの二つの答え



ロケットが感じる重力:

太陽 < 地球

年齢: $A < B$



ロケットが感じる重力:

太陽 > 地球

年齢: $A > B$

太陽から十分に離れていて、ロケットは太陽の重力をほとんど感じていない場合を考えます。
その場合、太陽の質量は無視して、ロケットは地球の周りを運動するとみなします。
したがって、ロケットの時間は地球より遅れます。
今度は、地球と太陽の距離が近い場合を考えてみます。
その場合、地球の質量は無視して、地球が太陽の周りを運動するとみなします。
したがって、地球の時間は太陽よりも遅れます。
ロケットは太陽に固定されています。
さっきとは逆に、地球の時間はロケットより遅れます。

双子のパラドックス

観測者

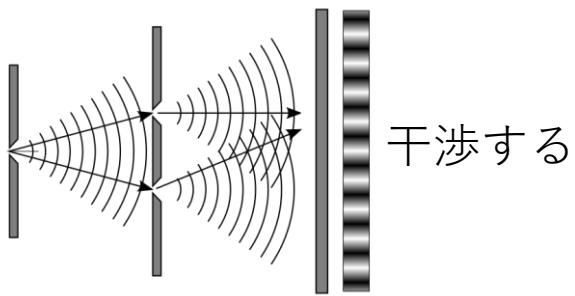
観測者によらず、時間の遅れは客観的に決まる。

観測者は主観的に決めて良いものではなく、
客観的に決まっている。

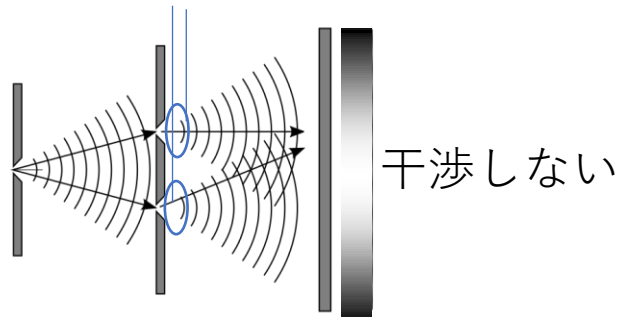
観測者が客観的に決まるのは、量子論でも同じ。

二重スリット実験

どちらの経路を通ったか区別できない



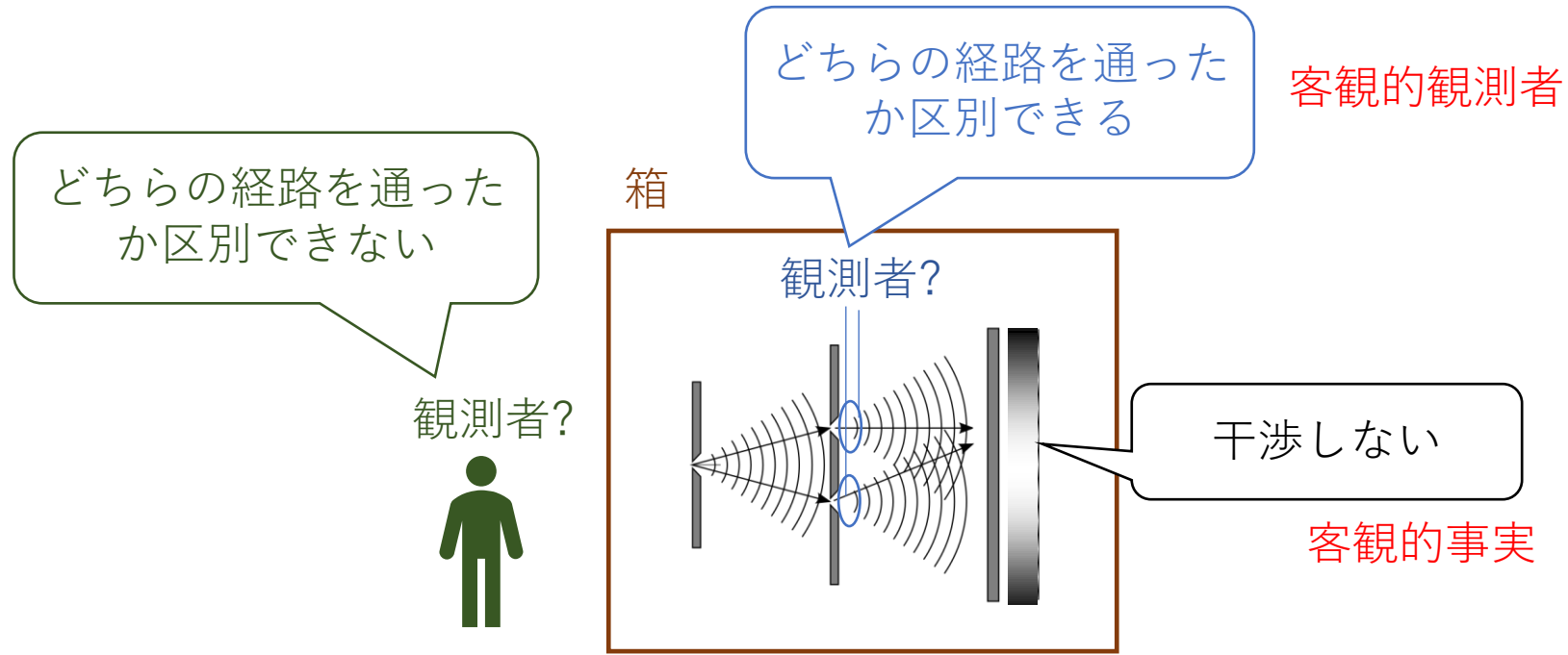
センサー(観測者)が
経路を区別する



結論としては、観測者によらず、時間の遅れは客観的に決まります。
観測者は主観的に決めて良いものではなく、客観的に決まっているといえます。
観測者が客観的に決まるのは、量子論でも同じです。
二重スリット実験では、光子がどちらの経路を通ったのか区別できないために干渉が起こります。
どちらの経路を通ったのか調べるセンサーを設置すると、干渉は起こらなくなります。

双子のパラドックス

客観的観測者



その試験装置全体を箱に入れて、中で何が起こっているのか分からなくしてみます。
外にいる観測者の人間は、光子がどちらの光子を通ったのか区別できません。
区別ができないからといって、干渉縞が復活することはありません。
実際、経路を区別するセンサーがあるのに干渉したという事例はありません。
この箱というのは普通の部屋なので、この実験は無意識に行われています。
この客観的事実は、観測者は人間ではなく、センサーであると示しています。
主観的な観測者の設定によって、客観的事実は変わりません。

双子のパラドックス

客観的観測者

客観的事実を議論するなら、客観的な観測者を設定する必要がある。

客観的観測者: 相互作用によって区別を行うもの

共通

- 特殊相対性理論: どちらの時間が遅れるか区別
- 量子論: 例えば、どちらの経路を通るか区別

双子のパラドックスの原因

特殊相対性理論には、観測者を主観的に決める自由度があった。

客観的事実を議論するなら、客観的な観測者を設定する必要があります。
相互作用によって、区別を行うものが、客観的な観測者です。
箱の中のセンサーは、光子と相互作用して、経路を区別するため、観測者です。
特殊相対性理論における観測者と、量子論における観測者は、同様のものです。
相互作用によってどちらの時間が遅れるのかを区別するものが、特殊相対性理論における観測者です。
双子のパラドックスについて理解できたでしょうか？
特殊相対性理論では、観測者を主観的に決める自由度があったのが、パラドックスの原因でした。
特殊相対性理論について客観的な議論をするなら、客観的な観測者を決める必要があることが分かりました。
以上です。

お問い合わせ先

お問い合わせは、
こちらからお願いします。

<https://ultagi.org/>