

アインシュタインの相対性理論

●アインシュタインの相対性理論は、2つの論文でなっている。

相対性理論とは、アインシュタインが1905年から作り上げた物理の理論で、相対論と略されます。その内容は「ものが縮む」「空間が曲がる」など、非常に難解なものになっています。また、アインシュタインの式と言われる $E=mc^2$ という式を見たことがある人もいないかと思いますが、これも相対性理論の一つを表しているものです。

相対性理論は大きく二つに分かれます。「特殊相対性理論」と「一般相対性理論」というものです。特殊相対性理論の方が難しそうですが、実際は一般相対性理論の方が何倍も難しいです。

①特殊相対性理論（論文名：運動している物体の電気力学）1905年

※観測者が等速直線運動をしている時だけ使える法則
重力の無い世界での理論

- ・光の速度より早く動けるものはない
- ・重力とエネルギーは同じ
- ・光の速度に近づくと、空間が縮む
- ・光の速度に近づくと、時間が遅く流れる

（時間と空間は同じ）

・光速不変の原理
・相対性原理
の2つから成り立っている。

②一般相対性理論（論文名：一般相対性理論の基礎）1916年

※観測者が加速・減速・反転する場合にも使える法則
特殊相対性理論に、重力を加味した理論

- ・重いものの周りでは、時間は遅く流れる
- ・重いものの周りでは、空間が歪む

（加速系と重力は同じ）

特殊相対性理論に
・等価原理
を加えたもの。

《コラム》

アインシュタインは、ノーベル賞1922年に受賞しているが、この相対性理論ではなく、「光量子仮説」で受賞している。

●相対性理論の三つの土台

①高速度不変の原理（特殊・一般）

真空中の光の速度は、秒速 29 万 9792. 458 キロメートル（約 30 万キロメートル）です。

この速度は、光の発生源や光の観測者が、どのようなスピードで動いていようが、つねに一定で不変です。また、光速が誰から見ても一定であるということから、光速より早く移動することはできない（光速は自然界の最高速度である）ということも導かれます。

②相対性原理（特殊・一般）

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。

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。

つまり、互いに運動する座標系においては、物理の基本法則の形が変わらないという原理。

- ・止まっている人から見ると、動いている人の時間の進みが遅く見える
- ・動いている人から見ると、空間が縮む（距離が短くなる）
また、止まっている人の時計が早く進むの見える

※自分自身とそれを外から見ている人とは、時間の進みと空間の広がり異なる

③等価原理（一般）

加速系と重力は同じ。

重力による加速と、力の作用によって生じる力学的な加速が等価である。

“重力質量”と“慣性質量”は等価である。

《コラム》

自然界で、相対性理論から導かれ、相対性理論が正しいことを証明した出来事。

- ・水星の近日点移動計算のズレの説明（100年で43秒角のズレの説明）
- ・重力レンズ効果
(1919年5月29日の日食で、太陽の近傍を通る星の光の曲がり方がニュートン力学で予想されるものの2倍であることを観測で証明)
- ・重力波の観測（2016年に、アメリカのLIGOにより直接観測された）

子どもに「相対性理論って何？」と聞かれたときのために概要を分かりやすく簡単に解説してみた

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）

結果1 光の速度よりも速く動けるものはない(特殊)：光の速度では重力が無限大になるから

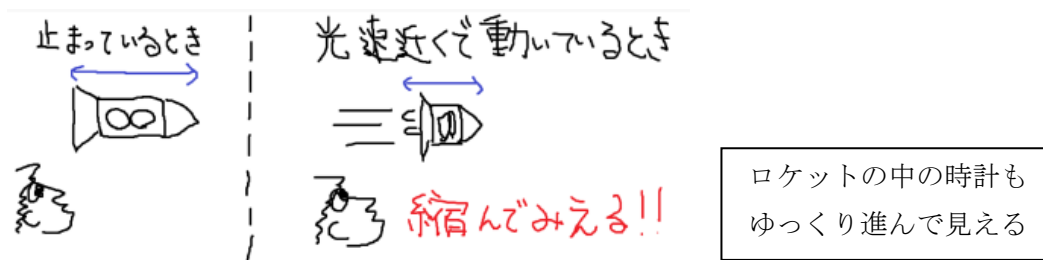
相対性理論によると、スピードがあるものは、若干重くなります。つまりあなたが止まっているときと、走っているときでは走っているときの方が体が重くなるのです。

体が重くなると走り辛くなるでしょう。つまりスピードが出し辛くなります。

それでも頑張ってもっとスピードを出したとしましょう。するともっと体は重くなります。

もしも光の速度で走ると、あなたの重さは無限大になります。そして体が重すぎてこれ以上[つまり光の速さ以上]スピードを出すことができなくなるのです。

結果2 光の速度に近い速さで動くものは、縮んで見える(特殊)



この図で、左側ではロケットは止まっています。右側ではロケットが光の速度に近いスピードで飛んでいます。[結果1]で説明したように、光の速さより速く飛ぶことはできません。

すると右のロケットは止まっているときよりも縮んで見えます。このロケットは横に動いているので、縮むのは横方向のみです。縦方向には縮んでいるように見えません。

結果には“光の速度に近い速さで動くものは”と書きましたが、実際には光の速度に近くなくてもかまいません。そのへんを走る車も、歩く人も、実は縮んでいるのです。ただ、縮む量があまりにも小さすぎて、僕たちの目には識別できないのです。目に見えるぐらい縮んで見えるには、光の速度に近い速さで動く必要があります。

発展 逆にロケットから地球を見ると…☆

ロケットから見ても、地球は縮んで見える。

“地球から見ると動いているのはロケットだが、ロケットから見ると動いているのは地球だから”です。

結果3 光の速度に近い速さで動くものは、時間が遅く流れる(特殊)



図の左側では、ロケットが止まっています。このときロケットの時間と地上の時間は同じですが、右の図を見ると、ロケットの時間の方が遅れています。こういったことが起こるのです。

結果には“光の速度に近い速さで動くものは”と書きましたが、実際は光の速度でなくともかまいません。結果2と同じですが、そのへんを走る車も、歩く人も、飛ぶ飛行機も、実は時間は遅く流れているのです。ただ、遅くなる時間の量があまりにも小さすぎて、僕たちの間隔では捉えることができないのです。頭で分かるくらい遅れるには、光の速度に近い速さで動く必要があります

発展 逆にロケットから地球を見ると…☆

ロケットから見ると、地球にある時計が遅れて見える。

これに関しては本当に混乱しそうだが、理由は結果2と同じ。つまり地球から見ると動いているのはロケットだが、ロケットの中から見ると動いているのは地球なのだ。

地球の時間と、宇宙船の時間は同じでなく、別々に流れていて、遅れているかどうかは「見る人がどちらか」というのに深く関わってくる。神のような存在により時間が「絶対的」に決まっている訳ではない。まさに「相対性」理論という訳だ。

それじゃ宇宙船の人が地球に帰ってきたとき、時間はどっちに合わせるの?という疑問は・・・

※アインシュタインの双子のパラドックス と呼ばれている

結果6 重さとエネルギーは同じ(特殊)

今までエネルギーとは、力がかかっていたり、熱をもっていたり、電気が流れていたり、ものが動いていたりしているものだけが持っているものだと考えられていました。つまり、静止しているものには、エネルギーがないと考えられていました。

しかし相対性理論を解いていくと、止まっているものにもエネルギーがあることが分かりました。そしてそのエネルギーは重さに比例するのです。それを表した式が有名なアインシュタインの

$E=mc^2$ です。ここで E はエネルギー、 m が重さ、 c は光の速度を表します。

1916年：一般相対性理論（論文名：一般相対性理論の基礎）

結果4 重いものの周りでは、時間は遅く流れる(一般)

重いものの周りでは、時間が遅く流れます。

繰り返しになりますが、僕たちがこの効果を感じるのは宇宙の巨大な星やブラックホールなど“めちゃくちゃ重いものの周り”に限られます。

またこの文章を裏返すと「**重いものから離れると、時間は早く流れる**」となります。僕たちは地球という重い星の上にはいますので、「海の底」と「エベレストの頂上」とでは、地球中心から離れている「エベレストの頂上」の方がちよっぴり時間が早く進んでいることとなります。

結果5 重いものの周りでは、空間が歪む(一般)

これも大変難しいことです。どのように歪んでいるのかは分かりませんが、とにかく歪んでいるのだそうです。天体級に重いものになると、空間を極端に曲げ、そこを通る光さえも曲げてしまうのです。

※ 1年:31,536,000秒 1日:86,400秒

GPS と相対性理論

僕たちが使っているカーナビなどに、GPSが使われています。これのおかげで僕たちは道に迷わずにすむわけですが、正確な情報を得られるのはGPS衛星の中の時計が正確に動いているのおかげです。

GPS衛星ですが、地球の周りをもものすごいスピードで毎日グルグルとまわっています。ものすごいスピードでまわるので、**[結果3 光の速度に近い速さで動くものは、時間が遅く流れる]**により、GPS内の時計は遅れてしまいます。

高速(秒速4km)で飛んでいるので時計は遅れる

1年で約0.00169秒遅れる 1日で約0.0000463秒遅れる

一方、GPS衛星というのは地表から2万キロメートル以上の高度にあります。

すると今度は、**[結果4 重いものの周りでは、時間は遅く流れる。重いものから離れると、時間は早く流れる]**が関係してきます。この効果により、GPS内の時計は進んでしまいます。

高度(2万km)が高い：重力が小さいので時計は進む

1年で約0.0157秒進む 1日で約0.0000430秒進む

まとめると**[結果3]**から時計は遅れ、**[結果4]**から時計は進みます。実際に計算をすると**[結果4]**の方が影響が大きいため、全体として時計は進んでしまうのです。

全体として重力の影響の方が大きくかかっている

全体で、1年で約0.014秒進む 1日で約0.0000384秒進む

GPS計算はこれによる補正を自動で行うため、僕たちは正しい位置情報を得ることができます。

この補正がなければ1日に約11km程度のずれが生じてしまい、使い物にならないのです。

※衛星側の内蔵時計は毎秒100億分の4.45秒だけ遅く進むように調整されている。

●相対性理論ってなぜ相対性理論って言うの？

相対性理論というと、「時間が遅れる」「空間が曲がる」などという現象を思い浮かべるのではないかと思います。実際こういった現象というのは相対性理論から導かれることなのですが、これらはあくまで相対論の「現象」であって「本質」ではありません。

こういった現象にばかり目を向けていると、その本質部分が見えなくなってしまう、アインシュタインが最も伝えたかったであろう部分が抜け落ちてしまう可能性があります。

1 相対性理論の「相対性」とは？

展開 1

本題です。*1

相対性理論というのはその名の通り、「相対的*2」である理論であります。では何が相対性というのかというと、「長さ」や「時間」のことです。

これらは通常、誰が見ても変わらない。つまり「絶対的*3」なものだと解釈されます。僕が見ても他の人が見ても「50cm ものさしは 50cm」「1秒は 1秒」と思ってしまうからです。

しかし実際は“見る人によって 50cm の長さは変わる*4”し、“見る人によって 1秒の感じ方は変わる”という「相対的」なものだった。これが相対性理論の本質なのです。

「相対性」と言うからには、何かと何かを比較する必要があります。

つまり相対性理論というものは、必ず“〇〇から見ると、〇〇は、〇〇に見える”と比べる文章になっていなければいけないのです。元のページの結果 2・3 を書きます。

結果 2 光の速度に近い速さで動くものは、縮んで見える(特殊)

結果 3 光の速度に近い速さで動くものは、時間が遅く流れる(特殊)

これらの文章は、本来相対性理論の結果を表す部分としてふさわしくありません。上に述べたことを踏まえると、本来

結果 2 地球から見ると、光の速度に近い速さで動くものは、縮んで見える(特殊)

結果 3 地球から見ると、光の速度に近い速さで動くものは、時間が遅く流れる(特殊)

と比べる文章にしなければいけないのです。*5

ここまでをまとめます。

まとめ①

相対論とは、今まで「絶対的」だと思っていた「長さ」「時間」というものを、見る人によって変わる「相対的」なものにとらえる学問である。(※時間の進むスピードは、場所によって違う。)

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。

展開 2

また、「相対的」なものの例として、「速さ」があげられます。

例えば前に歩いている人がいるとします。この人は、止まっている人から見れば、当然前に向かって歩いています。

しかし歩いている人以上のスピードを出している自動車に乗って、そこから見ると歩いている人というのはどんどん後ろに遠ざかって見えます。

つまり「速さ」という概念は、誰が見るかによって変わる「相対的」なものなのです。

しかしここに例外が生まれました。それは「光」です。実験によると光の速さというのは、誰が見ても変わらないもの、つまり「絶対的」なものだったのです*6。

これは光速度不変の原理というものです。

[以下やや発展]

再び例をあげます。止まっている人から光を見たら、当然光の速さで走っているように見えるでしょう。

一方、仮に光の速度の半分で走れる人がいたとして、この人から光を見たらどうでしょう？

光の速さを「相対的」とみるならば、走っている人から見ると光は光の速さの半分の速さで走っているのが見ることが出来ます。

しかし上に述べたように光の速さは「絶対的」なものなので、走っている人から見てもやはり光は光の速さで走っているように見えるのです。

[やや発展終わり]

まとめ②

本来「速さ」とは見る人によって変わる「相対的」なものだが、「光」は例外で「絶対的」なものだった！

- ・東京スカイツリー（450m）では、時間が約 10 億分の 4 秒／日早く進む
- ・太陽表面では、地球上より約 0.173 秒／日遅れる
- ・ブラックホール表面では、時間は止まる

2 全体のまとめ

まとめ①とまとめ②をまとめると

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*7！！

この2つが、相対性理論の本質と言え、相対性理論が相対性理論と呼ばれる所以であります。

ちょうど(距離)=(光の速さ)×(時間)という式に当てはめ(相対的)(絶対的)と色分けすると

相対論ができる前は、

$$\text{(距離)} = \text{(光の速さ)} \times \text{(時間)}$$

でしたが、相対論ができたあとは、

$$\text{(距離)} = \text{(光の速さ)} \times \text{(時間)}$$

と、常識を作り替えた理論とも言えます。

余談ですがアインシュタインは、相対性理論を

熱いストーブの上に一分間手をのせてみてください。まるで一時間ぐらいに感じられるでしょう。ところがかわいい女の子と一緒に一時間座っていても、一分間ぐらいにしか感じられない。それが相対性というものです。

と説明しています*8。

つまりアインシュタインが最も強調したいのは、「時間が遅れる」とか、「空間が曲がる」とかではなく、現象というのは見る人によって変わる「相対的」なものなんだよ？ということなのです。「時間が遅れる」などというのは枝葉にすぎません*9。

3 時間が遅れている！というのが納得いかない方へ

相対性理論というもので一番ある疑問としては、本記事の

結果3 光の速度に近い速さで動くものは、時間が遅く流れる(特殊)

への疑問です。おそらく時間の流れが遅れるというのが納得いかないのだと思いますし、僕も思いました。

前節で述べたことを使って説明をするのなら、

「時間」というのは“相対的”なものなんだ。だから見る人によって流れる時間というのは変わってしまうんだよ。

というものになります。おそらくこんな説明をしても納得できないのは分かりますが、一つ言えるのは常識の範囲で考えてはいけないということです*10。

物理学は主に数学を使って解いていきますので、「数学がそう表しているからそうなんだ」とも言えます。しかし全ての数学が正しいとは限らないので、様々な検証が行われなければいけません。

相対性理論はこうした検証に耐え、実験結果と整合性がとれる部分が見つかったので、無事理論として成り立ったと言えます。

数式を使った説明は、こちら[中学校で習う数学の範囲でアインシュタインの相対性理論を分かりやすく解説する - Yukihiy Life](#)

でやっていますので参考にして下さい。

*1: 相対論は特殊相対論から始まった理論なので、特殊相対論に重きをおきます

*2: 対義語は絶対的

*3: 対義語は相対的

*4: 錯視ではなく、実際に変わります

*5: 元ページは、なるべく文を短くするために入れませんでした。実際、少し難易度をあげた[中学校で習う数学の範囲でアインシュタインの相対性理論を分かりやすく解説する - Yukihiy Life](#)では入れています。

*6: [発展]ここでは簡潔さを優先してこのように書きましたが、マイケルソン・モーリーの実験から光速度不変が求まるという説は本来論理的に破綻しています。光速度不変とは原理であり、何かから求まるものではないのです。元記事のブコメでも曖昧な方がいたので一応

*7: [発展]何度もしつこいですが、ここでは簡潔さを優先してこのように書いていますが、光速度不変は本来導かれるものでなく要請ということになります。②を要請とすると①が結果として求まるという論理であり、最も重要なのは①であります。

*8: アインシュタインは、物理学による功績のみならず、人に説明する力が非常にあったと言われています。そういった意味でこの一連の記事よりも、アインシュタイン原著の本を読む方が良いのかもしれませんが。

*9: しかしあまりにも巨大な枝葉です

*10: 説明の逃げですね…

ここまでの知識での概略☆

相対性理論がなぜ相対性理論という名前なのかは、結果1や結果2のように、今まで「絶対的」だと思われていた「距離」や「時間」というものが人によって見え方がかわる。つまり「相対的」なものだとしたからである。

このページの頭で、相対性理論というのはほとんどがアインシュタインが独自に作り上げたと言ったが、実は相対性理論の元となる理論というのはほとんどできていたのだ。

ただその元となる理論を、他の物理学者たちは距離や時間を「絶対的」なものだと考えていたので相対性理論を作り上げることができなかった。アインシュタインはこれらの元の理論に、柔軟な解釈を加えることで新たな理論を作り上げたということだ。

・コラム どのようにして特殊相対論という理論ができたのか(未完成)

そういった意味で「アインシュタインは人の理論をパクっただけじゃないか！」と批判をする人がいるがそれはお門違いである。コロンブスの卵と同じでこういった「人と違った視点を持つ人」ということが天才であり、また一般相対論まで体系化したのはほぼアインシュタインのみの力によるものだからだ。