

11 年をとらない宇宙旅行

皆さんは宇宙旅行をしてみたいと思いませんか? 夜空には、きらめく星々や、その他の美しい天体がたくさんあります。これらを身近にみるのができたら、なんと素晴らしいでしょう。

ところが、これらの天体は気が遠くなるほど遠くにあります。太陽からもっとも近い恒星(自分で光輝いている星)は、ケンタウルス座 星という名前がついた星です。そこまでの距離は、おおよそ 4.4 光年です。光年 (Lightyear) とは、時間の単位ではなく、距離の単位です。どのような距離かというと、光の速さで 1 年間進んだとしたときの距離です。光の速さが 1 秒間に 30 万キロメートル(地球 7 回半に相当する距離)であることを考えると、それは途轍もなく長い距離です。また、光でさえ、片道 4.4 年もかかる距離です。光よりも遅い速度で行ったならば、より長い時間がかかってしまいそうです。銀河(直径 10 万光年、厚み 1.5 万光年)の中心まで 3 万光年、隣の銀河であるアンドロメダ星雲までは 200 万光年ですから、こうしたことを考えると、宇宙旅行をするという夢は絶望的であるように思われます。アニメなどでは、この問題に対応するために、人工冬眠とか、ワープとか、何らかの方法を工夫しています。

しかし、最近の科学の成果は、ちょっとだけ期待を持たせてくれます。「もしかしたら宇宙旅行ができるかもしれない」そんな期待をちょっと抱かせてくれます。今回のテーマはそのような話です。

11.1 マイケルソン・モリーの実験結果

さて、宇宙旅行の前に、バス旅行をしてみましょう。

バスが高速道路を走るところを想像してみてください。高速道路には、他にも沢山の自動車走っています。バスを追い越す車も、追い越される車もあることでしょう。一つの車に注目して、時間とともにバスよりも先に行ったのか、あるいはバスよりも送れたかを観察することができます。

ところが、同じ車の動きをサービスエリアで休憩しながら見てみるとどうでしょうか。高速道路を走る車があまりに速いのでびっくりしたことはありませんか? 運転免許をとった人は、高速教習で、高速道路に入って合流するところが恐いと思ったことがあると思います。止まった立場から見ると、高速道路の自動車はとても速く見えるのに、同じ方向に進む自動車から観察すると、違って見えます。高速道路を走るバスから他の車を見ると、バス自身が移動しているために、他の車の速さが止まって見たときよりも遅く見える訳です。もちろん、対向車は、逆にものすごく速く見えることになりまして、それは実感するところです。

それでは光についてはどうでしょうか。1880 年代のことです。その当時、既に、光の速さが、1 秒間におよそ 30 万キロメートルであることは、既にわかっていました。光りについて、移動しながらその速さを測ったらどうなるだろうか、このように考えて、光の速さについて調べようと思った人々がいました。

光の速さが、毎秒 30 万キロメートルであるとは、どこを「地面」としたときの速さになるでしょうか。自動車は、明らかに、地面に対する速度です。しかし、光の場合はどうでしょうか。それは、はっきりわかっていませんでした。そして、きっと宇宙の中心があって、その宇宙の中心を「地面」として、その「地面」に対して秒速 30 万キロメートルなのだろうと考えられていました。

簡単のために、最初は地球の中心が宇宙の中心だたしとしましょう。すると、地球の自転の影響で、赤道付近に立つ人は、西から東へ進んでいます。その速さを計算すると、毎秒およそ 0.46km

(毎秒 460m、あるいは時速 1667km) で進んでいます。そこで、赤道に立つ人が西から東に向かう光の速度を計ると、毎秒 0.46km だけ遅くなり、逆に東から西に向かう光の速さを計ると、毎秒 0.46km だけ速くなるはずですが。

これだけなら光の速度 毎秒 30 万 km に対してとても小さい量です。しかし、今度は、太陽の中心が宇宙の中心だと考えましょう。そして、地球の公転による影響を考えてみましょう。地球の公転の速さを計算すると、毎秒 30 km 程度です。これは自転の速度の 100 倍近い速さです。光の速度の 1 万分の 1 程度ですから、やや大きな数字になりました。もしも太陽が宇宙の中心で、太陽を基準に光の速度が決まっているとしても、光の速度は、計る向きによって 1 万分の 1 程度は変化してもいいはずですが。更に銀河系を中心に考えると、太陽系はもっと速いスピードで移動していると考えられます。そのため、十分に高い精度で光の速度を測定することができれば、地球が宇宙の「地面」に対してどの程度の速さで移動しているかを推定できることとなります。

マイケルソンとモーリーは、このような目的で、光の速度を測りました。そして、慎重に、計測する向きを東西にしたり、南北にしたり、日中に行ったり、夜中に行ったりしました。彼らの光の速度を計測する実験は、その実験方法についてもとても興味深いものがありますが、それは物理学実験をとったときにでも勉強してもらおうとしましょう。

彼らの得た結論は何だったのでしょうか。ここでは、簡単にその結果をお知らせします。なんと、どのような向きに光の速度を計測しても、光の速度は一定でした。

この結果は、当時の物理学者の間では衝撃的な結果でした。

11.2 光速度不変の原理

この結果をどのように考えるか。物理学者はいろいろな理論を考えました。しかし、なかなか決定打と言えるものはありませんでした。そして、1905 年、若くて無名だったアインシュタインが発表した理論「相対性理論」が決定打となりました。

余談になりますが、アインシュタインはこの問題を考えただけでなく、他にも後世に残る 2 つの論文を同時に発表しています。アインシュタインがこの 3 つの論文を発表した年は、物理学における「奇跡の年」と言われ、100 年後の 2005 年には記念する行事も行われました。その後のアインシュタインの仕事も素晴らしいものが多かったのですが、若い時期の柔軟な発想が新たな世界を切り開いた例であると言えます。

さて、話を元に戻しましょう。それではアインシュタインはどのように考えたのでしょうか。アインシュタインは、どのように運動している人から見ても光の速度が一定であったとしたらどうなるだろうか、と考えてみました。そして、何故光の速度が一定になるか、と考えるのではなく、マイケルソンとモーリーの観測結果がそうであったのだから、それを「原理」として考えようと思ったのです。

これについても余談になりますが、実は、アインシュタインがこの論文を書いたとき、マイケルソンとモーリーの実験をアインシュタインは知らなかった、という話もあります。単に、光 (電磁波) についての理論を研究していて、導入する必然性を感じていたのかもしれませんが。そうすると、実験結果を解釈するためにアインシュタインは光速度不変の原理を導入したというストーリーは成り立たなくなってしまいます。私は科学史家ではないので、こうした点については詳しくありませんので、とりあえず、ここではこのまま話を進めます。

ここで、「光速不変の法則」とは言わずに、「光速不変の原理」と表現していることに気をつけて下さい。世の中にはいろいろな法則があります。例えば、「マーフィーの法則」というものを聞いたことがありますか？例えば、「機械は使おうと思ったときに限って壊れる」とか。これはやや冗談のようなものですが、法則は相互に関連しあって、互いに互いの法則を説明できるものが多いです。ここで言っている「原理」とは、他の法則とは独立していて、これを説明しようとしてもできないような性質のものです。「光速不変の原理」は、なぜかは説明できないけど、どのように運動している人が計測しても光の速度は一定である、とするものです。

11.3 電車の中と外

このような原理から出発すると、不思議なことが次々と起こることになります。当時、アインシュタイン以外の人にとっては、とても信じられないことだったことでしょう。その不思議な世界(だけど、現実の世界)を、少しだけ考えてみましょう。

1. 「同時」

まず、そのひとつめは、「同時」ということについてです。それを考えるために、一定の速さで動く電車の中央に乗っている人(ヘンリー)と、電車に乗らずに外で見ている人(アルバート)を考えましょう。電車の両端には光を測定する観測装置があります。ある瞬間に、一瞬だけヘンリーが光を光らせます。電車に乗っている人から見て、光はどちら向きにも同じ速度で進みますから、そして、電車の中央から端までの距離はどちらも同じですから、光は電車の両端の観測装置で同時に計測されます。

ところが、同じことをアルバートが見たらどうでしょうか。アルバートは、ヘンリーが光を光らせた場所を中心として、同心円状に光が進むように見えます。そして、光が進んでいる間に電車は進むので、この図で向かって左手の観測機が光を先に観察し、その後、右手の観測機が光を観測することになります。

要約すると、「ヘンリーにとっての同時」と「アルバートにとっての同時」というものが違う、ということになります。これは、「光速不変の原理」を受け入れたからです。「光速不変の原理」をそういうものだと受け入れると、その結果、「同時」というものが見ている人によって違う、ということになってしまったのです。

2. 「時間の進み方」

今度は、光が電車の中を進むことを考えます。時計の下部から光が出て、光は上部に達するとします。光には速さがあるので、時計の上下方向の長さを光が進むのに時間がかかります。まず、電車に乗っている電車に乗っているヘンリーが観察することを考えましょう。下部から上部までの長さを L とすると、すると、かかった時間は、 $\frac{L}{c}$ ですね。「はじき」を適用してもいいかもしれません。

ところが、地上にいるアルバートから見ると、全く同じ現象が違って見えます。まず、電車の中の光は、まっすぐ上に行くのではなく、やや斜め前方に光を放つことになります。電車が少し進んでから光が上部に達するためです。

ここで、光が進んだ経路を考えてみると、アルバートが観察した光の移動距離は、ヘンリーが観察する光の経路よりも長くなります。それは図から明かです。ところが、光の速さは、それぞれの人が測ると一定です。その結果、どういうことになるのでしょうか。なんと、同じ

現象（下部から光が出て上部に達する現象）に対して、かかった時間が異なることとなります。電車に乗っている人が測定する時間よりも、電車に乗っていない人が測定する時間はより長くなります。

と、いうことは、電車に乗っている人と、外で地面に立っている人では、時間の進みかたが違ふ、と言えます。電車の中の現象を、地面に立っているアルバートから観察すると、より時間が長くかかっているように観察されるのですから、地上から電車の中の様子を観察すると、時間がゆっくり進んでいるように見えることとなります。

「光速度不変の原理」をそういうもののだとして受け入れると、その結果、時間の進み方が人によって違い、運動している物体の時間は、ゆっくり進む、ということになってしまったのです。更に奇妙なことに、全く同じ話が、ヘンリー（電車に乗った人）からアルバート（地面にたった人）を見た場合にも成り立ちます。つまり、電車に乗ったヘンリーから見ると、アルバートの時間の進み方がゆっくりであるように見える訳です。

3. ローレンツ収縮

今度は距離について考えてみましょう。高速で移動する電車を考えましょう。電車の先頭がある地点に達したときに、電車の中と地上とで時間を計り始めます。そして、電車の末尾が先ほど考えた地点に達したときにストップウォッチを止めます。こうして測った時間を地上と電車の中で比べてみましょう。まず、電車の中で考えます。すると、電車の長さを電車の速さで割っただけの時間がかかるでしょう。今度は地上で考えてみます。すると、先ほどお話ししたように、電車の中の時間はゆっくり流れているように見えますから、同じ現象を測った時間は、地上の方が短くなります。短い時間で電車の末尾が考えている点に到着したということは、電車の長さが短くなったと考えざるを得ません。つまり、走っている電車は地上から見ると短くなっているのです。このように地上から見て運動している物体の長さが短くなることをローレンツ収縮といいます。

これは逆も成り立ちます。電車に乗っている人から見ると、外の風景が進行方向に縮んで観測されます。

以上が、相対性理論の基本的な考え方です。

信じられないようなことばかりだったと思います。しかし、これらは、理論的にこうなると予想されたもので、しかも、実際に様々な実験的な証拠は、この理論を検証しています。

11.4 相対性理論で宇宙旅行

さて、このような相対性理論の性質を使って旅行をしたらどうなるのでしょうか。

太陽系から 10 光年離れたところまでロケットで旅行することを考えてみましょう。光でも 10 年かかるので、とても長い時間の旅行になるかと思うと、実はそうではありません。光の速度に近いスピードで移動すれば、移動時間を短縮できるのです。

それはなぜでしょうか。これを、地球から見た人から表現すると、ロケットに乗って移動している人の時間の進み方がゆっくりになるからです。ロケットの中での時間は、地上の時間の進みかたよりゆっくりになるので、10 光年先まで進んでも、時間はあまり進んでいないこととなります。

一方、移動するロケットの中の人はどうに観察するでしょうか。10 光年の距離がロケットに乗っている人から見ると、ローレンツ収縮によって縮まるのです。速く進と、距離が縮まるので、短い時間で到達できるという訳です。

どれくらいの速さで宇宙旅行すれば、10 光年先まで到達するのにどれくらいの時間がかかることになるのでしょうか。具体的に計算してみましょう。

速さ (光の何%か)	地球から見た時間の進み方	所要時間
44	90%	20 [年]
80	60%	7.5 [年]
90	44%	4.9 [年]
99	14%	1.4 [年]
99.9	4.5%	5.4 [ヶ月]
99.999	0.4%	16 [日]

ここで注目したいのは、10 光年を旅するのに、光よりも遅い速さで進んでも、10 年かからずに到達することです。相対性理論によれば、「年をとらない宇宙旅行」も実現できるということです。

11.5 双子のパラドクス

ここで、有名な話を紹介したいと思います。それは、双子のパラドクスです。論理的に話を進めていたはずが、おかしな (矛盾した) 結論に達してしまうものを一般にパラドクスといいます。

地上に双子がいたとしましょう。そのうちの一人は、宇宙船で宇宙旅行に行きます。すると、宇宙旅行に行った人は、地上から見ると余り年をとりません。ところが、一方、宇宙船から見ると、地球が運動しているように見えますから、地上の人の方が年をとっていないように見えます。

では、宇宙船が帰ってきて、地球で再び出会ったら、どちらが年をとっているのでしょうか。どちらも、どちらよりも年をとっているということはありません。

実は、宇宙船に乗っている人の方が若いままになります。実際、ジェット機に積んだ精密な時計 (原子時計) は、地上に置いた時計よりも遅れることが確かめられています。では、どうしてそうなるのでしょうか。今までの議論では、電車の速度は一定という特殊な状況を考えていました。このような特殊な状況ではなく、一般には速度が変化する場合では、実は、これまでの議論はそのまま当てはまりません。そこで、より一般的な議論が必要になります。そして、それを丁寧に考えると、どちらが年をとるのがわかるようになります。

ところで、これと似たような昔話を聞いたことはありませんか？ 浦島太郎は龍宮城で楽しい日々を過ごしていましたが、地上に戻ってくると、地上の時間はずっと経過していて、知り合いが誰もいなくなってしまうという話です。高速な宇宙船で旅すると、宇宙船の中での時間の進み方が遅くなって、地上で生活するよりも長生きする効果を、「浦島効果」と呼ぶこともあるようです。龍宮城は宇宙船だったのかもしれませんが (もちろん冗談です)。

11.6 まとめ

以上が今日の話です。まとめると、「光速不変の原理」を原理として採用することで、様々な現象が予想され、そして、様々な実験結果は、その検証となっている、ということです。

それが私達の直観からはほど遠いものではありません。その理由は、光の速度に近いような現象でなければ生じない現象であるためです。そのため、とても信じられないようなことのように思われます。しかし、これが事実なのです。

もっとも、アインシュタイン以前の力学が、アインシュタインの相対性理論によって修正が加わったように、将来、アインシュタインの相対性理論を修正する理論が誕生するかもしれません。

11.7 光の速度を越えた粒子？

2011年、ニュートリノと呼ばれる粒子が光の速度を越えたことが観測されたという報道がありました。実験にいくつかの問題があり、まだ確定していません。もしも光の速度を越えた粒子が存在したとすると、どんなことが起こるのでしょうか。

ある場所 A(例えば太陽) から光が出て、別の場所 B(例えば地球) に到達したとします。それを、B から A に向かって光の速さを越えた粒子から観測したとします。粒子から観測すると、A, B 共に光よりも速い速度で進みます。すると、光速度不変の原理により、A から出た光は B に到達しません。ところが、B に光が到達していることは観測事実です。

こうしたことを考えると、粒子から観測すると時間が逆転していると解釈できるのではないか、という話になります。この話題については、今後、注目する必要があるかもしれません。