第0章　準備

まずはこの本自体の説明をしておこう。目的は何か、何が学べるのか、どんな特徴があるのか、何に気を付けたら良いか。そして何が書かれていないか、など。そんなことを読み取って頂けたらと思う。第0章などという番号の振り方を好むのは私の本職がコンピュータ技術者だからかも知れないが、この章はまだ相対論の話に入る以前の前置きですよ、という意味を含ませてもいる。

ところで、相対論には「特殊相対論」と「一般相対論」の二通りがあるのはご存知だろうか。観測者が加速しないような特別簡単な場合だけを扱うのが「特殊」で、加速や重力の問題までも扱うような一般的な議論にまで拡張されたのが「一般」である。いや、そのように説明している入門書は多いのだが、実を言うと加速については「特殊」の範囲でも扱えたりする。しかし少し面倒なので、私は加速の話を「一般」の説明の中へ持っていくことにした。「特殊」と「一般」の本当の違いは、本書の終わり頃までに明らかにしたいと思う。

非専門家向けの入門書としては珍しいと思うのだが、この本では「特殊」と「一般」の両方の内容を数式を使ってごまかさずに説明する。しかし数式は、もし読者に余裕があったら解読してみたらいいと思うのだ。ちゃんと前後に言葉による説明を多く入れてあるので、数式からは雰囲気だけを感じ取ってもらえれば読み進めることはできるのではないかと思う。

数式を解読する為に必要となる数学知識は、第1章は高校レベルで何とかなる。第2章となると、多変数関数の微分が出てくるので高校レベルを少し越えるかも知れない。第3章では電磁気学の知識が必要になるが、これは興味がなければ軽く読み流しても大丈夫である。それ以降の章で必要となるのは、根気だけだ。難しいというより、ただただ面倒臭いのである。

相対論は天才たちだけのものだと思わない方がいい。一部の天才を除き、みんな似たような苦労を乗り越えたのだ。

　非専門家向けの入門書としては珍しいだろうと思う点はもう一つある。それは、図をあまり使っていないことだ。言葉で説明するのがどうしても難しいと感じるときだけ、図の助けを借りている。その理由を正直に言えば、私が図を描くのが苦手で、非常な手間が掛かるからだ。また、下手な図を示すことで読者を無駄に考え込ませたくないとも思っている。しかし私自身はいつも自分の頭の中に図を描いて理解しようとしており、イメージを描くことの大切さは知っているつもりである。

　そんな私であっても、4 次元まではとてもじゃないがイメージできない。それが普通だと思うし、それで大丈夫なんだということを伝えたい。イメージできなくとも論理で乗り切ることができるのだ。だからこの本は、図で理解させる本ではない。図は必要に応じて各自で頭の中に描いてほしい。そのためにできるだけ言葉でサポートしようと思う。

　ところで、頭の中に 4 次元の風景を正しく思い描いて理解している人なんているものだろうか。天才と呼ばれる人がいて自分と比べてあまりにも能力に差があるので、ひょっとして中にはそういう人もいるかも知れないと思うことがある。いたとしても、私にはその人の頭の中は想像できないのだろう。たまに「いや、4 次元のイメージなんてものは簡単だ」と言う人がいて、例えば立体図をアニメーションにすればそれで 4 次元なのだと言う。まぁ、それは確かに 4 次元的ではある。しかしこれだとある時間軸に沿って移動した場合の個人の視点になってしまう。我々は 3 次元の立体を見たときに、それをどんな方向から見たらどんな形に見えるかがおおよそ掴めてしまうわけだが、4 次元をありのままに把握するというのは、4 次元の中に存在する 4 次元的立体配置を、4 次元の中で角度を変えて見たときにどうなるかを把握できるということだ。この本の読者にそんな才能は求めない。

　以上の話し振りから、4 次元なんてものをイメージできない普通の人がこの本を書いていることを信じてもらえるだろうか。

　もう少し細かい話もしておこう。この本は物理寄りの書き方がされてい

る。数学者が好むようなやり方ではないという意味だ。相対論というのは論理的に非常に美しいので、近代的に整備された数学を使えば非常に美しく簡潔に表すことができるらしい。しかしこの本は相対論が発表された当時の伝統的なやり方で書かれている。言い換えれば古臭いということだが、大抵の入門書はみんな同じなので心配はしなくていい。

ただ古いやり方で学んでしまうと新しいやり方について行けなくなることが世の中には良くある。人というのは自分が最初に学んだものを絶対だと信じてしまう傾向があるからである。これよりさらに洗練された形式があることを予め認めるならば、古いやり方を知っておくのは新しいものを受け入れることへの妨げとはならず、むしろ良い土台として使えることだろう。どちらの形式でも自由に頭を切り替えて扱えるようになればかっこいいと思う。

趣味の提案

この本の内容を把握した後でいいから、現代数学を使った相対論がどのように表されるものなのか調べてみると良いかも知れない。微分幾何と呼ばれる数学で、多様体などという用語が出てくるやつだ。私もそのうちやりたいと思っている。

さらにこの本では、変分原理と呼ばれる数学手法を使うのをわざと避けている。変分原理は物理寄りの伝統的な手法ではあるのだけれど、初心者がつまづきやすいところでもある。その思想を納得の行くように説明してその扱いに慣れてもらおうとすれば、ちょっと手間が掛かってしまって、相対論どころではなくなってしまうだろうと思う。もしそれを使ったならばもっと簡単に説明できただろう箇所がこの本にも幾つかある。実際、他の教科書ではごく普通にそれが使われていたりするのだが、それは専門の学生向けだからだ。

なぜこんなことを書くかと言えば、学問にそのような広がりがあることを読者に知っていて欲しいと思うからである。相対論はアインシュタインのひらめきによって「突如わいて出た」理論ではなく、歴史的には電磁気学や解析力学といった分野を土台として深く繋がっている。そのため、そ

れらの分野で蓄積した技を使って論じることは本来は当然なのである。しかし工夫次第では、ある程度先の方までそれらを避けたまま説明することもできるというわけだ。もっと先を目指すつもりなら、変分原理もいずれは通らねばならぬ道である。

趣味の提案

　他の教科書に載っている変分原理を使った説明の仕方を調べてはどうだろう。変分原理が何であるかは「解析力学」を学べば詳しく説明されているはずだ。私ももっと学んで、いつかそのような続編を書きたいと思う。

　この本には他の点でもちょょっと変わった特徴があると思っているのだが、それは他の本と読み比べて自分で確かめてもらいたい。どの本にでも載っているようなことは思い切って省いてしまった。この本を読んだだけでは明らかに知識が偏るだろうことを注意しておく。ではそろそろ本編に入ろう。

第1章　特殊相対性理論

1.1　相対論はなぜ生まれたか？

相対性理論と聞けば、多くの人がアインシュタインを思い浮かべる。私もそうだ。その理論のほとんどを彼一人で完成させたためである。しかし彼が特別に天才だったからというわけではない。電磁気学の結果を調べていけば、時間はかかるだろうが大抵の人が同じ結論にたどり着く。その証拠に有名なローレンツ変換式にはアインシュタインではなくローレンツの名前がついているではないか。アインシュタインよりも前にその理論の下地はすでに出来ていたのである。

当時の科学者たちは、ローレンツ変換から導かれる内容をそのまま受け入れることができずに苦し紛れにいろんな小細工を考えた。アインシュタインが天才だと言われる理由はその結果をそのまま受け入れたことによる。その際、何を根拠にそれを受け入れるか、という哲学的な指針を与えた彼の論文は芸術作品のようである。

アインシュタインの書いた相対性理論の論文の題名は「運動する物体の電気力学」であった。なぜ電気と相対論が関係しているのだろうか？ 相対性理論は、文字通り、電磁気学から生まれたのである。

電磁気学がマクスウェル方程式としてまとめられたのが 1864 年のことだ。この年が電磁気学の完成だと言えるかも知れない。しかし、その方程式から予言される電磁波という現象が本当にあることが確認され始めたのが 1888 年以降であり、意外と最近のことなのだ。さらに、今では入門的な教科書にでも載っているような「運動する電荷のポテンシャル」が計算されたのが 1900 年頃だ。それからほとんど間を空けることなく 1905 年の特殊相対論が世に出ることになる。電磁気学の完成と相対論の登場は歴史的

にも連続した話であり、相対論が電磁気学の総仕上げのようにして出てくるのは必然だったのである。

　ではどのような繋がりがあるのかを見てみよう。先ほども話に出てきたが、電磁気学の諸法則を 4 つの方程式系にまとめ上げた「マクスウェルの方程式」というものがある。この式の意味をじっくり考えていくと奇妙なことに気付いてくる。このマクスウェルの方程式は一体誰の視点で成り立つか、ということだ。

　この方程式を解けば電磁場が波を作ることが分かる。今では我々の日常となっている電磁波がそれだ。光というのは電磁波の内、ある範囲の周波数を持ったものに他ならないということも分かった。つまり、電磁場が作る波の速さというのは実は光の速さのことなのだった。しかし一体、光の何に対しての速さかということが問題なのである。マクスウェル方程式からはそれが読み取れなかった。

　光を追いかけたらどうなるだろう？ 光に追いつくことはできるだろうか？ 走っている列車の中でも電磁気学の諸法則はそのまま成り立つのだろうか？ これが当時の科学界の関心事であった。しかし光はとても速いので、列車のスピードくらいの実験では全く違いが分からない。誤差の範囲である。なぜなら、光の速さを測定するほんの一瞬の間に列車は殆ど移動していないと見なせるからである。もっと速いものに乗って実験しなければならない。そこで思いついたのが、地球である。地球は太陽の周りを凄まじい速さ（秒速 30km = それでも光速の 0.01% でしかない！）で進んでいるのでこれを乗り物に見立てて実験してみればいい。その結果がどうなったかは次の節で説明することにしよう。

　この他にもう一つ、これに関連してはいるのだが、電場や磁場は一体何なのかという問題もある。例えば、コイルに磁石を近付けると発電ができるという現象がある。この現象を二通りの視点から見てみよう。

　コイルの上に立っている人から見れば、近付いて来たのは磁石の方である。磁石が近付くとコイルの周りの磁場が変化する。するとマクスウェルの方程式にもあるように、磁場が変化するときには電場が生じる。そしてその電場の影響でコイルの中の電子が運動を始め、これが電流となる。

　ところがこれを磁石の上に立っている人の立場で見てみよう。近付いて

来たのはコイルの方であって自分は止まっていた。だから磁場は変化していない。コイルの中の電子が磁場の中に入ってきたので、電子は運動方向と直角の方向へローレンツ力を受けて移動した。これがコイルに生じる電流の原因であると説明するだろう。

同じ現象であるのに、立場によって説明の仕方が違うのである。一方は「磁場が変化したから電場が生じた」と言い、一方は「磁場は変化しなかったし、電場はなかった」と言う。そこに電場はあったのか、なかったのか？一体、どちらの肩を持ったらいいのだろう？ 本当に動いていたのはどっちなのか判断できるだろうか？

これが相対論の始まりなのである。一体、止まっていたとか動いていたというのは、何に対して言えることなのか？ 光の速さというのは何に対しての速さなのか？ どの立場にいる人が最も正しいと主張できるのだろうか？果たしてそのような立場は存在するのだろうか？

電磁場の問題の解決については第 2 章以降で説明する予定なので、まずは光の速さの問題についての歴史的な流れを見ていくことにしよう。

1.2　エーテル理論の失敗

当時の人の気持ちになって考えてほしい。波と言えば、何かが揺れている現象である。では電磁波の場合は何が揺れているのだろう。良く分からないのでとりあえず「**エーテル**」という名前で呼ぶことにした。この「エーテル」の語源は、アリストテレスが火・水・土・空気の 4 元素説に加えて、天上界にある第 5 の元素として挙げている元素の名前であって、これを使ったネーミングセンスはなかなかのものである。このエーテルは宇宙を満たしているに違いない。なぜなら遠く離れた星からの光も地球に届いているのだから、途中の宇宙空間にもエーテルがなければならない。すると地球はエーテルの海の中を突き進んでいることになる！

もしそうならば、測定器の向きを変えて測定してみて光の速さがどれくらい変化するかを調べれば、我々がエーテルの中をどれくらいの速さで突き進んでいるかが分かる筈である。これが有名なマイケルソン・モーリーの実験である。(1887 年)

ところが、どんなに精密に測定しても、光の速さは変化しなかった。季

節を変えても、場所を変えても、昼と夜を比べても。地球は自転しているので夜と昼とではエーテルの流れの方向が逆に感じられるはずだ。我々はエーテルに対して止まっているのだろうか？ 太陽の周りの公転運動だけ考えても、地球はかなりの速さで宇宙を進んでいるはずなのに。

やはり宇宙の中心で止まっているのは地球の側で、他の星が周りを回っているのか !? そうなると天動説の再来である。そんなはずはない！

そこでエーテルについて色々な説が出た。エーテルは地球と一緒に回っているに違いない、とか、エーテルは物質に引きずられるのだろう、とか言うのである。これらの説は一理ありそうだが、矛盾が出てくる。光の速さは地球上でだけ測定したわけではないのだ。木星の衛星の食を利用しても測られている。また、エーテルが回転していたら星の光が流されて観察される現象が起きるはずだがそのようなことは起きていない。今このようなエーテルが存在することを主張すると笑われてしまうが、当時は誰もが真剣にこのような可能性を探ったのである。

もちろん、我々が光の速さを直接測定したのは地球のごく近くだけであって、将来、太陽系のはるか外へ出て行って光の速さを測定したら違っていた、という可能性がないわけではないことを認める謙虚さは必要である。それでも間接的には測られており、現時点ではこのことに大きな疑いはないようである。分かっている範囲で最良の理論を作り上げるのが物理学のやり方だ。そして数理物理学者ローレンツも当時分かっていた範囲でエーテルについての一つの説を出した。

趣味の提案

今でもエーテルの存在を強く主張する人々が次々と現れる。そのほとんどが素人ばかりだが。彼らが笑われてしまう理由は、この古い時代に徹底して交わされた数々の議論を知らず、それを越えるような、注目に値する主張を何も持っていないせいであろう。当時、エーテルを認める説としてはどんなものがあって、それらがどのように否定されて行ったのかを調べてみるのも面白いのではないだろうか。

ローレンツは、エーテルの中を物体が進むときには、「エーテルの風」を受ける影響で物体が進行方向に縮むのだと考えた。(1895 年) このために観測装置は光の速さの変化を捉えることができないだけだというのである。物差しも人間も全て進行方向に対して同じように縮むので我々はその「縮み」を感じることはできないという理屈である。この理論はなかなか馬鹿にしたものではない。

計算してもらえば分かるが、彼の主張する通り、エーテルに対して速度を持つとき、観測装置や我々自身を含む全ての物体が進行方向に対して $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 倍に縮むならば、マイケルソン・モーリーの実験装置では光の速さの変化は測定できないことになる。これは相対論の結果としても出てくる「ローレンツ収縮」そのままの値である。

ではなぜ縮むのだろうか？ これについても彼は計算している。もし物体がエーテルの中を進むとき、その質量が増加するならばこのことが説明できる、と。

では、なぜ質量が増加するのだろうか？ 当時の人々には分からなかった。我々なら何と答えるだろうか？ 確か相対論から導かれる内容にそんなものがあったのではないか、と思い浮かべる人もあるだろう。ならばこう答えようか。「相対論のように光の速さが一定だと仮定すれば質量の増加を説明できる！」と。これでは堂々巡りである。しかしこれは面白い。もし、なぜ光の速さが一定なのか？ということの答えが知りたければ、この論理の堂々巡りをどこかで断ち切って、物が縮む理由か、物体の質量が増加する理由かのどちらかを解明してやればいいのではないだろうか。残念ながら、そううまくは行ってくれないのである。もしこれでうまく行くならば今ごろ主流は「エーテル理論」であって、相対性理論は受け入れられなかったであろう。ローレンツの仮説には重大な欠陥がある。

彼の仮説が成り立つのは、当時の実験装置についてだけなのである。昔は精密に光の速さを測るためには、光を鏡で反射させて位相差を測るしかなかった。光の速さを往復で測定していた時代の理論なのである。しかし現在は測定技術も進歩して片道だけで測定できるようになっている。この他にも彼の理論の欠陥はいくらでも出てくる。しかし、それらは測定技術の進んだ現代の視点で言えることであって、科学史を調べていくと、どうもこれ以外の理由でローレンツの理論は破棄されたようなのだ。まだローレンツが納得しないうちに相対論が発表されているし、当時の技術ではま

だどちらが正しいかはっきりと言えなかったと思うのである。

これは私の意見だが、おそらくローレンツ自身が自分の理論の薄っぺらさに気付いたのだと思われる。これは彼が非常に悩みぬいた末のことであっただろう。彼の理論では光の速さが一定に観測されることは説明できるのだが電磁気学の方程式の解釈が非常に複雑になってしまうのである。そこで、彼は自分の理論を変更して、マクスウェルの方程式の形を変えない変換式、すなわち現在の「ローレンツ変換式」を導き出した。(1904 年) これは相対論が発表される以前のことで、ローレンツの他にフォークト (1887 年) も独自にこの式を導き出していた。前に言ったように、アインシュタイン以前に同じことを考えた人は多くいたのである。

趣味の提案

この辺りの歴史ではフィッツジェラルドやポアンカレも有名だ。誰もが突然正解に至ったわけではない。それぞれの考え方の微妙な違いを調べてみるのも面白いだろう。

ところがこの変換式によると距離が縮むだけでなく、時間さえ変換されることが必要になってくる。そこでローレンツはさらに頭をひねり、時間の縮みを説明するために別の仮説（局所時間を導入）を作ったようであるが、これはとても難解なものになってしまった。

実は私自身も学生時代に「客観時間・主観時間」なる言葉を勝手に作って同じようなことを考えてみたことがあるがうまく行かなかった。当時は勉強不足だったためにローレンツのしたことについてはまだ知らなかった。とにかく、ローレンツの理論を生き残らせるために工夫して実際に合わせようとすると次から次へと色々な仮定が必要になってきてしまうのである。

そして物理学の歴史はそのようには進まなかった。もっと安全な道を選んだのだった。実験の結果をそのまま基礎として受け入れようという方向である。

1.3　アインシュタインの指針

アインシュタインの論文はなぜそれほど注目されたのだろうか。彼が論文の中で言いたかったことを要約すれば次のようになる。

「マクスウェルの方程式をいじって求めた結果を怪しまなくても、二つのことを原理として認めるだけで同じ結果、すなわちローレンツ変換式が導けます。だから私の言う二つのことを受け入れて、物理学を、特にガリレイ変換を見直してはいかがでしょう？ 力学の法則もローレンツ変換に従うと考えるのです。」

後半部分は分かりにくいかと思うが、それについては第 2 章で説明するので今は読み流してもらってもいい。それよりも、ここで言われている二つの原理というのを先に紹介してしまおう。

- **光速不変の原理**　光の速さは光源の速度に依らない
- **相対性原理**　どんな慣性系でも物理法則は同じ形で表せる

宇宙はそういうものだと認めてあきらめましょう、という感じだ。それに対する現在の物理学の態度は、「実際、実験結果が相対論の予言した通りになるのなら仕方がない、二つくらいなら信じてみようか」という具合である。

「信じる」という言葉が科学的でないと思うかも知れない。しかし、物理というのは「信じて試して、確認していく」という過程を取るという意味では宗教的なのだ。それが個人レベルで起きるか、グループとして起きるかの違いくらいだろうか？ 念のために言っておくと、個人の心の中でこれを行うのが宗教である。日本人は宗教に疎くて、宗教とは「信じて信じて錯覚してゆく」過程だと誤解している人が多いようだが、真の宗教というのはそういうものではないと私は思うのだ。偽の宗教に騙されないようにしよう。科学と宗教を絡めて話すと反発される方も多いと思うので、これについての私の個人的な考えはコラムとして少し後に書いておくことにする。心に余裕のある時にでも読んで欲しい。(→ 51 ページへ)

ではアインシュタインの提案した二つの原理にそれぞれどんな意味があるのかについて考えてみよう。

まず、光速不変の原理。これは光源がどんな速度で動いていようとも、そこから発せられた光の速さは光源の影響を受けない、というものだ。これは水面に生じる波を思い起こさせる。水上を移動する船が起こした波だろうが、固定した杭から出た波だろうが、波は出所に関係なしに同じ速度で周囲に伝わってゆく。これはまるで、エーテルのような存在を認めているようではないか。しかしこの原理はなぜそうなのかについては何も言わない。ある人が光を見たとき、どこから出てきた光であろうと同じ速さだと言っているだけだ。

次に、相対性原理。これはどんな慣性系にいても物理現象が同じ形式で書けるということである。

予期せず「**慣性系**」という専門用語が出てきてしまったので、ここで簡単に説明しておこう。物体が慣性の法則に従っている限り、その物体は等速で移動し続けるか、あるいは静止し続けるかのどちらかである。そのような物体が静止して見えるような立場にいる人が、自分を基準にして時間や空間に目盛りを振って座標を設定したとき、それを頼りに世界を眺める視点を慣性系と呼ぶ。座標軸の目盛りが等速運動する物体と一緒に移動して行くようなイメージだ。等速運動と言ってもその速度には色々あるから、どんな速度の物体を基準にするかの違いによって慣性系は無数にあることになる。基準にした物体の速度が異なるとき、それぞれの慣性系は「異なる慣性系」などと表現され区別される。

以上の説明でこの原理の表面上の意味だけでも分かってもらえるだろうか。相対速度を持って等速運動するものどうし、それぞれは違う立場にあって違う座標を使っているけれども、なぜか物理法則は全く同じ形式で書けてしまうので、誰が本当に止まっているとかは、物理法則の形の違いによっては判別しようがないのだ、ということである。

ところで、同じ一つの出来事を色んな相対速度を持つ立場から観測した場合、それぞれがその出来事から得る観測値は当然それぞれに違うだろう。しかし、それは全く構わない。この原理は、一つの出来事が誰からも全く同じように見えなければならないとまでは言っていない。ただ法則の形式

が同じになると言っているだけである。

しかしさらに疑問は募る。それぞれの得る観測値が立場によって異なっていてもいいのなら、物理定数についてはどう考えたら良いだろう？ 物理定数といえども観測値なのではないか。それぞれの立場で物理定数が違っていても構わないということになるだろうか。例えば、光の速さというのは物理定数の一つだが、それぞれの立場でこの値が違っていたって構わないと言うのであれば、話に聞いた相対論とはえらく違った話だ。一体どういうことだろうか。少しあとで説明しよう。

この相対性原理には、「全ての慣性系は同等であるべし」という強い要求が含まれている。つまり、たとえ全ての慣性系で同じ形の法則が成り立っていたとしても、その式の中に、特定の慣性系を基準にした位置や速度が含まれているようではいけないのである。互いの慣性系の関係を表すような式を書く場合には相対速度や相対位置に依存した量だけが使用を許されることになる。

このことを理解するためにちょっと例を挙げておこう。高校の物理では音のドップラー効果というものを学ぶ。この公式を丸暗記しておくとテストで点を取るのに有利であるが、この式の中には「観測者の空気に対する速度」が含まれている。この場合、空気に対して静止している系が、基準としての特別な意味を持ってしまっているのである。いや、別にドップラー効果の式に欠陥があると言いたいわけではなく、このようなタイプの式は、宇宙の根本原理を表す式としてはふさわしくないのではないか、と相対性原理は述べているのである。理由？ そんなものは無い。原理とはそんなものだ。

この要求から、もしある慣性系の中で定数と呼べるものがあり、それがどの慣性系でもやはり定数であるとするならば、その値は慣性系に依らずに同じでないといけないということが自動的に言えてしまうことになる。光の速さもその一つである。これからそれを示そう。

自分から見てあらゆる光は一定速度である。また、自分とは別の慣性系にいる人にとっても光の速さは一定である。しかし、その人が自分と同じ速さの光を見ているかどうかまでは分からない。ここまでが「光速不変の

原理」が主張できる内容である。どの人から見ても光が同じ速さだとはこの原理からは言い切れない。

しかし両者とも光速は一定だと言っているのだから、両者の観測したそれぞれの光速の値 c、c' の間に次の単純な関係式が成り立つはずだ。

$$c' = ac$$

ここで c、c' は正の値とする。また a はお互いの相対速度の絶対値によってのみ決まる正の定数である。お互いの慣性系は同等なので、a の値は相手から私を見るときにも同じになるだろう。

$$c = ac'$$

ここまでが相対性原理の主張を当てはめた結果である。二つの式を合わせれば、

$$c = a^2c$$

であり、$a = 1$ でなければならないことが分かる。つまりどの慣性系でも同じ速度の光を見ていると言える。

世間に出回っている入門的な解説書では「どの慣性系から見ても光速が一定」であることを「光速不変の原理」だと説明してしまっていることがあるが、これは誤りである。まぁ、「光速不変の原理」をこのように解釈してしまっても相対論自体の体系には影響はないので大きな問題ではないのは確かだ。しかし、これでは両方の原理に「慣性系」という言葉が出てきてしまうことになって、それぞれの原理の独自性が薄らいでしまうではないか。

「慣性系どうしの相対性」に関わる原理と「それ以外の原理」とを綺麗に分離させたところに、この二つの原理の美しさがある。また、マクスウェルの方程式というややこしいものを基礎として持ち込まなくても済むようにしたところにもこの原理の美しさがある。

特殊相対論の数式上の基礎になっているローレンツ変換式というのは、「誰から見ても光の速さが一定」であることだけから導けてしまう。だから原理がわざわざ二つに分けて用意されていることが初心者にとっては不可

解であったりする。しかし、この「相対性原理」という思想が相対論の向かうべき方向を決めているのである。そのことを詳しく話すのは第 3 章以降になるだろう。

なぜこの二つの原理で何もかもうまく行くのかと聞かれても理由は良く分からない。だから「原理」と呼ぶのである。原理という言葉は「ここを議論の基点にするからそれ以上深くは聞いてくれるな」という意味で使われることがあるわけだが、今回がまさにその例だ。そして実際、今のところ、これで何もかもうまく行っているのである。

1.4　同時であるとはどういうことか

どんな速度で運動している人から見ても光の速さが変わらないという非常識なことを認めるならば、今まで普通に使っていた「同時」という概念は大きく変更を迫られることになる。しかし「同時」という今まで我々が何となしに使ってきた概念の方が間違っていたということはないだろうか。この際、光を基準にして、同時に関する概念を見直してみてはどうだろう。アインシュタインの主張の中心はまさにこの点にある。

アインシュタインはこう考える。今この場で私が考える「今」と、遠く離れた場所にいる人が考える「今」との間に、一体何の関わりがあるというのだろう。離れた地点で起きる事と、私の腕時計の針がある数字を指すのが同時かどうかというのは、人間が何らかの方法で決めることによって初めて意味を持つことなのだ。なぜ今まで誰もそれを決めて来なかったのだ？

そこで、誰から見ても同じ速度である光を使って、次のようなやり方を提案する。A 地点で静止している自分の時計と、遠くの B 地点でやはり静止している友人の時計が合っているかどうかを確かめたい。そのためにはこうすればいい。0 時に A 地点から B 地点に向かって光を発射する。B 地点では A から来た光を受けたら A に向かってすぐに反射させる。光は 10 時に A 地点に返って来たとしよう。B 地点にいた人が、光が来たのは 5 時だった、と言えば二つの時計は合っていることになる。もしずれていたらその分だけ直してもらえばいい。

このような調子で、お互いに静止しているあらゆる地点の時計を「同時刻」に合わせることができるであろう。どんなに距離が離れていても、お互いに静止している限り、同じ時間が流れているのである。同じ時を共有できるのである。この安心感！

ところが、お互いに運動する相手とは同じ時を共有できなくなってしまう。我々が通常受け入れてきた同時という概念が崩れてしまうのだ。これからはアインシュタインの原論文とは違う解説をしようと思うので注意してほしいのだが、なるべく分かりやすくアレンジしてみたつもりである。

A 地点と C 地点のど真ん中に B 地点があり、自分は B 地点にいるとする。ここで A 地点に置いてある時計と C 地点に置いてある時計の時刻合わせをすることを考えよう。

そのために B 地点から A と C に向かって同時に光を発射する。この二つの光は「同時に」それぞれの地点につくはずだ。この瞬間、二つの時計を 0 に合わせれば二つの時計は同じ時を刻み始める。

ところがこの時刻合わせの光景を、宇宙船で通り過ぎる人が見たらどう見えるだろうか。ちょうど B 地点から光を発射する瞬間、宇宙船もたまたま一緒に B 地点にいたとする。そして宇宙船は C 地点に向かってまっすぐに飛んでいるところだとする。

宇宙船に乗っている人から見ても、B 地点から両方向に発射された光は同じ速度で宇宙船から遠ざかってゆく。つまり、光の見え方については B 地点にいる人と同じなのだ。ところがロケットはぐんぐん C 地点に近付いている。ロケットから見れば C 地点がどんどん近付いてくる。逆に A 地点はどんどん遠ざかってゆく。この調子では当然、光は先に C 地点にたどり着くだろう、とロケットの人にはそう思える。

ところが地上のやつらときたら、C 地点に光がたどり着いた時刻と、A 地点に遅れて光がたどり着いた時刻を「同時だ」と言って時計を合わせたのだ！ けしからん！ ……とは言っても光はめちゃめちゃ早いから、よっぽど速いロケットでない限りほんのちょっとの差が出るだけだけれど。

このように、同時だと思える二つの出来事が立場によって変わって来てしまう。でもそれでいいのだ。ロケットの人は「けしからん！」と言うが、彼にとっては A 地点に光が着いたのも、C 地点に光が届いたのも、自分と

は遠く離れたところで起きた出来事であり、現場にいたわけではない。彼の立場での定義によれば、その二つは同時ではなかったと解釈されるというだけの話だ。B 地点で静止していた人にとっても同じだ。二つの出来事を現場で同時に見たわけではない。定義に従って、二つは同時だと「考えることにした」だけのことだ。

ある人にとって同時に起きたと思える二つの出来事が、別の人にとっては同時ではなくなるというのは何だかとても非常識なやり方に思える。ところが非常識ではあっても、誰もが時刻合わせについてのこのルールに従っていることを前提に話し合えば、矛盾はどこにも生じないのである。それは徐々に説明していこう。

ちょっとだけ速度が違ったらどうなるか

こんなことを考えていると色々心配になってくる。お互いに静止している者どうしは、同じ時を共有できるのであった。では「ほんの少しだけ」互いに運動している場合はどうであろうか？

近くで起こる現象については問題ない。しかし、遥か彼方の遠方で起こることについて話し合うと双方の意見に食い違いが出る。距離が長くなればなるほど、時間に差が出るのだ。

しかしそれは例えば、何億光年も離れたところで起きた超新星爆発が観測されたとき、それが何億年前に起きたことなのか、それともそれプラス 1 時間だったかどうか程度の食い違いである。それくらいならほとんど問題にはならないだろう。まあ、それでも気になるのなら動いている人とのすれ違いざまにはあまり遠くの話をしない方がいい。

1.5　ローレンツ変換の求め方

さあ、いよいよ数式を含めた話に入っていこう。まずはローレンツ変換式だ。ローレンツ変換を求めるには大きく分けて二通りの方法がある。ローレンツ流の「マクスウェル方程式を不変に保つ変換」を導く方法と、アインシュタイン流の「光の速さが慣性系によらず一定」であることから導く

簡単な方法である。

ベクトルを使ったり演算子を使ったり行列を使ったりと教科書による独自性はあるものの、大抵の教科書に載っているのはアインシュタイン流の方法である。中には電磁場の波動方程式を不変に保つような、どっちつかずの方法もたまに見かける。

ここでは私の今までの経験の中で一番分かりやすいと思う簡単な方法を紹介することにする。計算が楽で見た目簡単なものより、計算が面倒でも直観的に理解しやすい方がいいと思い、この方法を選んだ。これはアインシュタイン流の方法である。ローレンツ流のやり方は、第 2 章の 2.9 節（73 ページ）で紹介する予定である。

趣味の提案

ローレンツ変換の導き方には色んな方法がある。それらをコレクションするだけでも楽しめそうだ。光速一定を前提としない方法もあるらしい。

静止系 $K(x, y, z, t)$ とそれに対して x 軸方向へ速度 v で運動している系 $K'(x', y', z', t')$ の間の関係式を求めるのが目的である。

$t = 0$ の瞬間、両者の原点は一致していたとする。この同じ $t = 0$ の瞬間、K 系の原点から光が放たれたとするとこの光は全方向に飛び去って、t 秒後には原点から半径 ct だけ離れた球面上の点に分布するはずである。これを式で表せば、

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2 \tag{1}$$

となる。高校で習う球面の方程式である。

一方、K' 系の原点にいる観測者も光が自分を中心に同心円状に広がるように見えるというのが相対性理論の要求する基本原理である。この状況は同じように、

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = (ct')^2 \tag{2}$$

と書ける。

さて、K 系から K' 系への変換を求めるというのは、

$$\begin{aligned} x' &= a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 t \\ y' &= a_5 x + a_6 y + a_7 z + a_8 t \\ z' &= a_9 x + a_{10} y + a_{11} z + a_{12} t \\ t' &= a_{13} x + a_{14} y + a_{15} z + a_{16} t \end{aligned} \tag{3}$$

と書いたときの各係数 $a_1 \sim a_{16}$ を決める作業に他ならない。

これらの式を (2) 式に代入してやったときに (1) 式の条件が満たされている必要があるので、つまり (1) 式と同じ形にならなければいけないので、このことをヒントに各係数を決めてやればよい。

ところで、この変換式 (3) が x, y, z, t についての 1 次式になっていて、なぜ x^2 とか x^3 などに比例する項が含まれていないのか分かるだろうか？ これは簡単なことなのではあるが多くの教科書では「当然」と書いてあるだけで、分からない人には分からないと思うのである。もし (3) の変換式の中に x^2 の項があったとしたら、これを (2) 式に代入したときに、x^4 の項が出来てしまうだろう。しかし (1) 式と比較してやれば x^4 の項の係数は 0 でなければならないはずだ。というわけで 2 次以上の項は初めから (3) 式から省いてあるというわけである。

さて、これからこの 16 個の係数の全てを決めてやる作業をするわけだが、とてもじゃないが面倒くさい。本格的な計算に入る前にいくらか簡単にならないだろうか？ 考えてみよう。

まず一番初めの式だが、K' 系は x 軸方向へ速度 v で移動しているので、K' 系の原点である $x' = 0$ の地点は K 系から見れば t 秒後には $x = vt$ の位置にある。よって、$x' = a(x - vt)$ という形でなければならない。$t = 0, x = 0$ のときには y や z の位置に関わらず $x' = 0$ であるので、a_2 や a_3 も 0 でなければおかしい。

次の 2 つの式は劇的に簡単になる。もし t に比例する項があれば y' や z' は刻々と変化することになる。K 系の原点が K' 系からは y 軸や z 軸方向に移動して見えるわけだ。これでは K' 系が x 方向に移動しているという仮定に反するだろう。それで a_8 と a_{12} は 0 である。しかしまだおかしい点が残っている。例えば $y' = a_5 x + a_6 y + a_7 z$ という形だと y 軸が傾いている

ことになる。z 軸も同様だ。各係数 a_i は相対速度の関数なので、相対速度に応じて yz 面が傾くという意味になるわけだ。x 軸を中心に yz 面内でねじれるという傾き方なら、ひょっとしてそんなこともあるかも知れないが、x 軸の方へ傾くとなればいよいよおかしい。空間はどの方向でも同じ性質を持つと考えられるので、yz 面がどれかの方向を勝手に選んで傾いて行く理由は見出せない。それで結局、$y' = a_6 y,\ z' = a_{11} z$ という形でなければならない。また、今は x 軸方向を特別な方向として扱っているが、それに対して y 軸や z 軸をどちらにするかは人間の都合で自由に決めることができる。つまりこれらの軸には物理上、性質の差がない。よって $a_6 = a_{11}$ だと言えるだろう。ところが少し考えればこれらの係数はともに 1 でなければならないことが分かる。今から説明しよう。

$y' = a_6 y,\ z' = a_{11} z$ という式は x 方向に進んだときに y 方向や z 方向に縮んだり伸びたりする可能性があるということである。奇妙ではあっても常識で否定せずに可能性として残しておくべきであろう。ところがこれは論理的に否定されるのだ。今は K 系から K' 系への変換式を求める作業をしているが、当然のことながら、K' 系から K 系を見たときにも同様の変換式が成り立つはずである。違うのは速度 v が逆方向であるということくらいである。しかしお互いは全く対等であるので速度が逆だというくらいで係数が変わってはいけない。なぜって x 軸のプラス方向とマイナス方向に空間的にどんな性質の違いがあるというのか。これは便宜上決めた方向に過ぎないのだ。こういうわけで、K 系から K' 系に変換をして、さらに K' 系から K 系に変換したとき、ちゃんと元に戻らなくてはならないことから、${a_6}^2 = 1$ であるはずである。$a_6 = -1$ とすると初めから上下左右がひっくり返ってしまっているので $a_6 = 1$ を取るべきである。

これで文句なしに $y' = y,\ z' = z$ ということで決まりである。良く教科書に見られる「今我々は x 方向についてだけを考えているので……」などという簡潔過ぎる説明は、今やったくらいの思考の過程は当然読者が踏むべきものだとして省いてしまっているのである。専門家を目指す学生に対してはこれくらい厳しくていいだろう。しかし元から相対論に懐疑的な素人が不純な目的でこのような教科書を読むとき、「やっぱり物理学者ってのはあまり考えてないんじゃないか」などと高慢な思いを募らせ始めることになる。そういった学者への不信感に対しては、これはとことんまで考え抜いた抜け道の無い議論の結果なのだということを叩きつけなくてはなら

ないと思うのだ。……ちょっと熱くなってしまったな。

さあ、残る最後の式についてであるが、これには前もって省略できる項はない。しかしこの後の計算で係数比較をするときのことを考えれば、係数 a_{14} と a_{15} は結局 0 になることが分かる。ここでは計算をなるべく簡単にするためにあらかじめこれを省略しておくことにする。信じられない人はこの式の全ての項を残したまま計算してみるとよい。複雑な計算に入る前に今書いたことの意味が分かるだろう。

以上の結果を分かりやすく書き直しておこう。ついでに係数もアルファベットの大文字で付け直すことにする。

$$
\begin{aligned}
x' &= A(x - vt) \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= Bx + Dt
\end{aligned}
$$

未知の係数は A, B, D の 3 つだけになり非常に簡単になった。こいつらを (2) 式に放り込めば、

$$A^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2 = c^2(Bx + Dt)^2$$

となり、展開してまとめれば、

$$
\begin{aligned}
&(A^2 - c^2B^2)\ x^2 + y^2 + z^2 \\
&\qquad\qquad = (c^2D^2 - v^2A^2)t^2 + (2vA^2 + 2c^2BD)xt
\end{aligned}
$$

となる。この式が (1) 式と同じになるというのだから、比較してやれば、

$$
\begin{aligned}
A^2 - c^2B^2 &= 1 \\
c^2D^2 - v^2A^2 &= c^2 \\
2vA^2 + 2c^2BD &= 0
\end{aligned}
$$

という 3 つの式を得る。後はこれを連立方程式として解いてやればいいだけだ。ここでわざわざ解いてみせる必要はないであろう。

とは言っても 2 乗が出てきてちょっと解きにくいのは確かだ。次のことだけ注意しておこう。各係数はプラスとマイナスの 2 つの解が出てくることになるが、$v \to 0$ の場合には K 系と K' 系とは一致するのだから係数 A と D はプラスの方を選ぶ必要がある。そうしなければ x 軸や時間軸が初めから逆を向いてしまっていることになるではないか。A と D をプラスにした結果として B はマイナスを取らなければならなくなるだろう。次のようになれば正解だ。

$$
\begin{aligned}
A \ = \ D \ &= \ \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\
B \ &= \ -\frac{v/c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}
\end{aligned}
$$

つまりローレンツ変換は次のようになる。(y、z 成分は簡単すぎるのでわざわざ書かないことにする。)

$$
\begin{aligned}
t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\
x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}
\end{aligned}
$$

いろいろ書いて長くなってしまったが、やっていることは単純だ。(2) 式に (3) 式を入れて (1) 式になるように係数を決めただけである。

1.6　時空回転と不変量

前節で求めたローレンツ変換式だが、これを見ていても美しいなぁ、とは感じないかも知れない。二つの式の対称性が分かりにくくなっているからだ。しかし、ちょっとした変形をしてやるだけでこの二つの式は非常に似た形になる。相対論では時間と空間に同等の地位を与えて扱うことになるのだが、その理由がここにあるのだ。

ところで、時間を秒などという単位で数えているのは人間が勝手に決めたことであって、物理的にはそんなに意味のあることではない。地球が自転するのにかかる時間を $24 \times 60 \times 60$ という、生活に都合のいい数字で分割しただけのものだ。

それよりは、光の速さを基準にして時間の単位を決めてやれば、先ほど求めた式はもっと綺麗な形になるのではないだろうか。そこで新しい記号 w を使って $w = ct$ であると定義し、時間を距離の単位「光秒」で表すことにする。1 秒で光が 30 万 km 進むので、あたかも時間に長さがあるかのように考えて、1 秒は 30 万 km に相当すると考えるのである。この記号に良く w を使うのは、空間座標を表す x, y, z の一つ前のアルファベットだからだろうと思う。

こうすれば時間も空間も、同じ「長さの単位」で論じることができるようになる。SF 的な話をするならば、もし人が時間軸の方向へ旅ができるようになったとして、……つまりタイムトラベルが可能になったとしてということだが、1 秒だけ過去へ遡ろうとすれば 30 万 km の道のりを進まなければならない、ということだ。逆に言えば、我々は常に 1 秒につき、時間軸の方向へ 30 万 km の道のりを進んでいることになる。なんという凄まじい速さ！ 我々は時間軸の方向へ光速で旅をしているのだ！

しかし、この例えは視覚的に理解しやすいので面白いだけであって、実際に 4 次元空間が存在すると思い込んではいけない。少なくとも私はこのような時間軸の方向などというものが現実にあるとは信じていない。これはただの概念である。

さて、この変形 $w = ct$ を使って、時間 t の代わりに w で表してやることにすると、ローレンツ変換は次のようになる。

$$w' = \frac{w - \frac{v}{c}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - \frac{v}{c}w}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

二つの式がかなり似た形になってきた。ここで次のような工夫を取り入れればもっとすっきりするであろう。まず、$\beta = v/c$ と置く。また分母は両

方同じなので、

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

と置いてやることにする。この γ は「**ローレンツ係数**」と呼ばれていて、今後も良く使うことになる。

$$\begin{aligned} w' &= \gamma(w - \beta x) \\ x' &= \gamma(x - \beta w) \end{aligned}$$

おお、見よ、この対称性！ 美しいとは思わないだろうか？ 時間と空間が、同じような形式で互いに入り混じるのである。これは座標を回転させたときの変換式に非常に良く似ている。3 次元の座標を z 軸の周りに θ だけ回転させたときの変換式と比べてみると良く分かる。

$$\begin{aligned} x' &= x\ \cos\theta + y\ \sin\theta \\ y' &= y\ \cos\theta - x\ \sin\theta \end{aligned}$$

どこがどの程度似ているかは自分でじっくり考えて欲しい。このようなわけで、ローレンツ変換は時空間の中での一種の回転のようなものだと考えることができる。光速に近い運動をしている人の座標系と、自分のいる座標系とを比べると、両者の時空間は回転的なずれを生じているというわけである。この 4 次元の回転的なずれは相対速度が光速に近ければ近いほど大きくなる。何度も繰り返すが、これは数学的表現の物理的な焼き直しであって、実際に世界がそのようになっていると考えるべきではない。いや、人がどのように考えようと、どのように解釈しようとそれは認識の方法なので個人の勝手だが、少なくとも私は、これは理解を助けるためだけの概念的なものだと信じている。

普通の 3 次元での回転の場合には、いくら回転しても不変に保たれるものがある。それは回転軸からの距離である。要するに半径 r のことだ。数式では次のように書かれる。

$$r^2 \quad = \quad x^2 + y^2 + z^2 \quad = \quad x'^2 + y'^2 + z'^2$$

ある座標系 $R(x,y,z)$ と、それを原点を中心にある角度だけ回転した別の座標系 $R'(x',y',z')$ があるとする。そのとき、ある一点を R 系の座標で表した回転中心からの距離も、同じ点を R' 系の座標で表すように変換して、その値で計算した回転中心からの距離も、どちらも同じ式で計算できて同じ値が得られるというわけである。

これと同じようにローレンツ変換でも変わらないものがある。それは次のように表される量だ。

$$x^2+y^2+z^2-w^2 \quad = \quad x'^2+y'^2+z'^2-w'^2$$

この関係式を導くのはとても簡単である。ローレンツ変換の式を全て 2 乗して見比べてやれば簡単に思いつくだろう。複雑な理論から導かれたものではないので安心して欲しい。この式は形式的には通常の回転の場合と非常に良く似ているのだが、時間 w の項だけにマイナスがついており、やはり時間と空間とは完全に同等というわけではなさそうだ。3 次元での通常の回転とはちょっと勝手が違う。このような性質を持つ空間については数学的に良く調べられており、「**ミンコフスキー空間**」と呼ばれている。

さて、この時間の項についてくるマイナスがどうしても気になって仕方がないという人はどうしたら良いだろう。このマイナスさえなければローレンツ変換を通常の回転と全く同じように扱うことができて理論を展開するのに非常に楽になるのだ。

そのための処方が一つだけある。私はこういう物理的イメージが伴わない数学的トリックが非常に嫌いなのだが、時間を虚数で表せばいいのである。そうすれば 2 乗したときに打ち消し合ってマイナスが取れる。これが、物理の素人を神秘の空想の世界に陥れたホーキングの著書に出てくる「**虚数時間**」の正体である。そんなものが現実にあってたまるか！ってのだ。

虚数時間や 4 次元世界は「在る」のだろうか

私はこの点について、徐々に考えを変えつつある。

かつては強くこう信じていた。本当に存在しているのは我々が見ている 3 次元の空間だけである。物体が 3 次元の中で運動することで織り成す様々な現象を見て、あたかも時間というものが「流れている」かのように錯覚しているだけなのだ。時間というものは物体の運動を効率良く表すための単なるパラメータに過ぎない。我々の世界全体が 4 次元の中を移動しているイメージは単なる空想である。4 次元世界が実際にあるわけではないのだ、と。

だから、そのことを明確に表せるような理屈を、私が独自に、相対論に矛盾しない形で考え出してやろうという、そういう下心を持って相対論を学び始めたのだった。

しかしそもそも空間だけが本当に在ると信じる根拠は何だろう？ 私から離れたところに物体が存在していて光を放つ。その光が私の眼球の中に飛び込んだとき、私はその光が、空間の隔たりをはるばる越えて来たものだと勝手に思い込むわけだ。光が空間を越えて飛んでくるその過程を見たわけではないにも関わらず。私の脳は、様々な物体からの光を分析して、脳内に映像を作り出す。目という器官の一点からの情報だけを元に、世界の広がりを見た気になる。空間というものがあるのだと解釈すると都合がいいので、その存在を作り出し、信じているだけなのだ。

その物体は本当はそこに無いのかも知れない。そう思って手を伸ばすと、確かに感触がある。しかし手が物体内部に侵入しないように、何かが信号を伝えているだけであって、「物体」なんてものは無いのかも知れない。我々すべては、情報をやり取りする信号の集まりであって、見ている通りの世界にはいないのかも知れない。

だとしたら、空間でさえ時間と同じく錯覚なのではないか。そのような辻褄の合う信号のやり取りを作り出している数式（＝この世のルール）だけが意味を持つ。その数式は何次元の中で成り立つ性質のものだろうかという数学の話になる。虚数を使おうが人間の直観に反しようが何だろうが、ルールさえあればいいのではないだろうか。

1.7 悩むのは無駄

次は何の話をしようか。時間や棒の長さが縮むように見えるとか、光の速さは越えられないとか、宇宙を旅して帰って来た双子の片割れの方が歳をとらないとか、相対論と言えば大抵いつもその話であって、この本にもそんな話を期待した人がいるかと思う。あるいは今度こそなぜそのような不思議なことが起きるのかを納得させてもらえるのではないかと期待して読んでくれている人もいるかも知れない。

しかしそのような人の期待を裏切って悪いのだが、ここにそのような面白い話についての解説を挿入するつもりはなくて、それよりも質量がエネルギーと等価であることを示す有名な公式 $E = mc^2$ がどのように導かれるかという解説に向けて急ごうと思うのである。

早いうちにはっきり言っておいた方がいいと思うのだ。特に「いつか相対論を理解できるようになりたいんです」と言い続けて先へ進まないでいる人たちに言わないといけない。いくらこのような不思議な話について真剣に考えたところで、表面上の理解にしかならないことに気付いて欲しい。いくら考えても「なぜそうなるのか？」という疑問の答えは見出せなくて、結局はローレンツ変換からそう言えるという答えしか用意されていないのである。それらの楽しい話題はローレンツ変換をいじれば自然に導かれる結果に過ぎないのだ。

しかしローレンツ変換から導かれる結果について考えてみるのは全くの無駄だというわけではない。ローレンツ変換が信用に足るものかどうかは、そこから導かれる結果と現実の実験結果を比べてみるより他はない。これが科学の方法であって、ローレンツ変換から一体どんなことが言えるのかということを把握しておくことはとても大切なのである。

しかしこの本でそれらを紹介する余裕はない。この辺りについては私よりうまく説明してくれている入門書が沢山あるので、わざわざ私が説明し直す必要を感じないのである。

ローレンツ変換から導かれる結果は、少なくとも今までの実験の結果と比較して矛盾はないようである。ローレンツ変換が正しいであろうということになれば、次に考えるべきことは「ではなぜ、光の速さは一定なのか」

ということであって、私が一番関心を持っているのはその点である。しかし残念ながら、その答えは相対論の中には用意されていない。何度も言うように、相対論は「光が誰から見ても一定の速度である」ということを前提としている理論だからである。だから、光の速さが一定であることについて疑念を差し挟むような議論は相対論の枠外で行わなければならない。そうしなければ、疑似科学のレッテルを貼られても仕方ないだろう。しかし、ここでは本音を語ろうと思う。

現代物理は光の速さが一定であることの理由を追及することを完全にあきらめてしまったように見える。ある意味、それが新しい常識として定着してしまったようである。果たしてそれを受け入れるべきなのだろうか？しかし、自然をそのまま受け入れる謙遜さと同時に自然に対して不思議に思う気持ちを忘れてはいけないと思うのだ。そしてその思いが科学を発展させてきた。ただ自然を受け入れるだけなら理論なんて要らない。人間に理解し難いことをより低いレベルの事柄から説明できるのが物理の面白いところだと私は考えている。光速不変の原理はもはやこれ以上進めない、一番低い階層の知識だというのだろうか？ 人類はもう既にそこに到達してしまったというのだろうか？ そう考えるのは驕りのように思うのだ。

私は、人類はその壁を乗り越えてさらに深くこの宇宙を理解できると思う。この考えの方が驕りのように思えるだろうか？ 宇宙はそんなに浅くはなくて、我々はまだ表面上の理解に達しただけだと、謙遜な思いからそう考えるのである。

だって、ワープ航法も重力制御もまだ出来てないじゃないか。光の速さを越えられないだなんて、そんなのはいやだよー。……済まない、ボロが出てしまった。こっちが本当の本音だ。

1.8　固有時の意味

相対論の結果から、もはや、同時というものが慣性系によって変わってきてしまうということが分かると人は途端に不安を覚えるようだ。それはなぜだろうか。同じ時を過ごせないという切なさからだろうか？

大宇宙に旅に出て光速近くまで加速し、地球から遠く離れたある場所で

何か素晴らしい発見をしたとしよう。しかし「自分は今この瞬間、ここにいる！」という心の叫びが誰かに届くのはいつになることだろう。この自分にとっての「今」というのは遠く離れた他の人にとってのいつに相当するのだろう。今というのはどれほどの意味を持つことだろう。

別の人がこれとは独立して、宇宙の別の場所で同じ何かを発見したとしよう。ここで言う「独立して」というのは、互いに光速で情報をやり取りしても影響を与えられないほどの僅かな時間差しかないという意味である。例えば互いに１万光年離れていて二つの発見の時間差が１万年以下であったなら、この二つの発見は全く独立して行われたと考えていい。互いの発見に関する情報をこの時間以内では相手に伝えようがなかったのだから。超光速通信が発明されるまではこの議論は正しい。

このように二つの事件が独立している場合、結局、どちらの発見が先だったのかということでは人によって見方が違う。立場によって、同時の概念がずれているためだ。そしてどちらが先であったとしても物理的に何の問題もない。

ところがこの二つの事件が独立でなかったとしよう。A の発見の結果、B の発見があったとする。つまり二つの事件の間には光の速さで情報を伝えるための十分長い時間差があったということだ。この場合には、どんな人から見ても A が先で B が後である。どんな立場に立とうともこの長い時間差を埋めることはできない。

良く言われる「因果律が守られている」というのはこういうことだ。因果律というのは、原因があって結果があるという我々にとって当たり前に思えるルールのことである。しかし、因果律がどれほど当然に成り立たなくてはならないのかについては物理的に証明されているわけではない。キリスト教でも仏教でも「因果応報」というやつは大切な考えなので多くの人に支持されているというくらいのものである。

我々はなるべく、共通に使える時間が欲しいのだ。何とかうまいことをして全宇宙で通用するような時間の基準を決めることができないものだろうか？ 相対論ではどの慣性系も同等の立場にあると考えるのであって、地球との相対速度を 0 にあわせた慣性系が特別な意味を持つわけではない。全宇宙で共通に流れる時間を定義できればこんな切なさや気持ち悪さを感

じることはないのだが、相対論がどこまでも正しいとしたらそのような共通の時間を考えることは無意味である。

もはや共通に流れる時間がないので、時間の基準をどのように決めたらいいのかさっぱり分からない。そこで、仕方ない。こんな方法ではどうだろう。ローレンツ変換をしても変わらない量があったのに注目しよう。

$$w^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

後で都合がいいように前に紹介したときとは符号を逆にしてある。符号が丸ごと逆であっても不変量であることには変わりがない。この量は、どのような慣性系に変換しても値が変わらない。つまり、どの慣性系にも共通して使える量である。これがなぜ、時間の代わりに使えるのだろうか？

説明しやすいようにこの量の微小変化を考えて、その全体を $\mathrm{d}\tau^2$ と表現することにする。微小量を考えることにしても不変量であることには変わりない。

$$\mathrm{d}\tau^2 = \mathrm{d}w^2 - \mathrm{d}x^2 - \mathrm{d}y^2 - \mathrm{d}z^2$$

この $\mathrm{d}\tau^2$ という量は、微小時間 $\mathrm{d}w$ の間に微小距離 $\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z$ だけ移動した場合の、4 次元空間内での移動距離の 2 乗を表している。この 4 次元空間内での長さは、どんな立場の人から見ても変わらないのである。つまり、どれだけローレンツ変換しようと変化しない量である。

ここで $\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z$ が 0 となるのはどういう場合かを考えてみる。それはつまり、微小時間 $\mathrm{d}w$ の間に全く移動しなかったという場合だ。もし観測者が運動する物体と一緒に移動していたら、あたかも物体が運動していないように見えるではないか。

ということは $\mathrm{d}\tau^2$ を運動する物体と同じ慣性系 (w', x', y', z') に変換してやれば $\mathrm{d}x', \mathrm{d}y', \mathrm{d}z'$ を 0 にできるというわけだ。そのとき、$\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}w'$ となる。これは、$\mathrm{d}\tau$ は運動する物体にとっての普通の「時間」を表しているということだ。しかも $\mathrm{d}\tau$ はローレンツ変換しても値の変わらない便利な量である！

自分の基準を相手に押し付けるのはやめて、色々な速度の物体の持つ、それぞれの固有の時間で表現してやろうということになったわけである。そのようなわけで、この量を「**固有時**」と呼ぶ。