


小学生から高校生までの
相対性理論



数式を使わない解説！

必要なのは想像力！

研究者を目指した教師の本



蔭山篤司



目次

はじめに	3
慣性の法則と相対性原理	4
光速度不変の原理と相対性原理	
光速度不変の原理	7
相対性原理	9
同時刻の相対性	
同時刻の相対性	13
時間の遅れ	
時間の遅れ	19
ローレンツ収縮	
ローレンツ収縮	25
一般相対性理論	
静止質量	
結合エネルギー	31

はじめに

相対性理論は、大学で物理学科に進まない限り、ほとんどの人はその核心部分に触れることはないと思います。たまたま相対性理論に出逢い、興味を持って相対性理論の本を読む人も中にはいると思います。しかし、私はもっと多くの人が触れるべきだと思うし、高校の授業の中でも触れる機会があるべきだと思っています。例えば、高校の化学で原子量を学ぶとき相対質量が出てきますが、その相対性理論との関わりには触れることはありません。化学の教員も相対質量の本質的なところを理解しないままに教えていることが多いようです。その様な思いから、もっと広く相対性理論について触れる機会を小学生から高校生までの間で持ってもらいたいと思い、この様な本を書こうと思いました。

世の中に相対性理論の解説本はあふれていますが、難しいものは専門過ぎて途中で挫折してしまうものであったり、易しいものは結果はわかるけど、肝心なところは煙にまかれたような気がしてわかった気になれないものが多いと思います。相対性理論とはそういうものだ、と言えば確かにそうかもしれませんが、この本では、相対性理論を専門に勉強するわけではないけど、できるだけ理解したいという人に結果を伝えるだけでなく、理解してもらおうことを目指して書きました。

1905年にアインシュタインが特殊相対性理論をつくり、その10年後に一般相対性理論を作り上げました。最初に作られた特殊相対性理論は、それまでの時間と空間の概念を完全に変えてしまうものだったので、当時は理解に苦しむ人は多かったと思います。でも、それを受け入れてしまえば、数学的にはそんなに難しいことは使ってないので、高校生でも十分理解できると思いますし、数学を抜きにしても考え方は小学生でも理解できると思います。一般相対性理論は数学的にもかなり難しい内容なので、理解するには大きな壁があります。しかし、特殊相対性理論の考え方を理解していれば、一般相対性理論の考え方も、中学生、高校生であってもある程度理解できると思います。一般相対性理論を使いこなして何かを計算する、とはいかないと思いますが。特殊相対性理論にしる、一般相対性理論にしる、小学生でも想像力があれば十分わかることはたくさんあり、高校生なら、かなりの部分がわかると思います。是非、日常の常識から離れ、想像力をはたらかせて読んでいただけたらと思います。

この本を書くためのエディタは数式を使えないのでどこまで伝えられるかはやってみないとわかりませんが、できる限り理解してもらえるようにチャレンジしてみます。

慣性の法則と相対性原理

「物体が受けている力の合力が0のとき、物体の速度は変化しない」というのが慣性の法則ですが、「速度が変化しない」というのが、実は誰から見て「変化しない」のか、これだけでははっきりしていません。もし、この宇宙に絶対静止系があるのなら、絶対静止系に対して「静止」や「等速度」と言えばいいのですが、絶対静止系は存在しないと考えられています。そこで、何も力を受けていない物体が速度を変えないように見える座標系が存在すると考えて、この様な座標系を「慣性系」と名付けます。つまり、慣性の法則が成り立つ座標系を「慣性系」と言います。なので、慣性系に於いて「慣性の法則」が成り立つのは定義により明らかです。ただ、この様な「慣性系」が存在するかどうかは自然界が決めることで、存在しなければそれまでです。慣性の法則は、「慣性系」が存在するという主張でもあります。そして、この「慣性系」で見ると、ニュートンの運動の第2法則である「運動の法則」が成り立ちます。そして、全ての慣性系は対等で、絶対静止系のような特別な座標系はありません。全ての物理法則はどの慣性系に於いても同じ形で表されます。特にニュートンの運動の法則が全ての慣性系で同じ形で表されるということをガリレイの相対性原理と言います。これは物体の速度が光の速さに比べて十分小さい状況に於いては良い精度で成り立っています。しかし、物体の速度が光の速さ程度になると、ニュートンの運動の法則は成り立たなくなります。光の速さ程度の状況でも全ての慣性系が同等で、物理法則が同じ形で表されるべき、というのがアインシュタインの相対性原理です。

「慣性系」、「慣性の法則」が全ての土台となっているのです。もし、慣性系が存在しなければ、物体が力を受けていないのに速度が変化したり、加速度が力に比例しなかったりと、慣性の法則も運動の法則も成り立ちません。

光速度不変の原理と相対性原理

光速度不変の原理

相対性理論の根幹となっているのは、「光速度不変の原理」と「相対性原理」です。そこから出てくる結果は聞いたことがあるかもしれませんが、「時間の遅れ」や「長さの収縮」などです。この本では、これらのことを中心に理解してもらうことを目指して話していきます。

光速度不変の原理は、数多くの実験事実なので、これが間違っている、ということにはなりません。この実験事実からスタートしようというのが、相対性理論です。

光速度不変とは、文字通りですが、光の速さはどんな速度で動いている人が測定しても、常に同じ速さになる、ということです。単純に考えると、これは我々の常識とは違います。我々の常識では、例えば高速道路で、隣のレーンに同じ向きに走っている車があるとき、隣のレーンの車が時速 80 キロメートルで、自分の車が同じ向きに時速 60 キロメートルなら、隣のレーンの車は時速 20 キロメートルに見えます。自分の車が時速 70 キロメートルなら隣のレーンの車は時速 10 キロメートルに見えます。この様に、見る人の速度によって、他の物体の速度は違って見えるのが、我々の常識です。

この常識が、光の場合にはあてはまらず、光を放つ物体（光源）や、それを観測する人の速度がどんな速度であっても光の速度は同じ速度（秒速 30 万キロメートル）として観測される、というのが実験事実です。これが「光速度が不変である」ということです。

この「光速度が不変である」という実験事実を受け止めるには、今まで正しいと思っていたことを考え直さなければいけません。但し、光の速さ（秒速 30 万キロメートル）に比べて十分遅い、我々の日常の速度程度においては、やはり先程挙げた例のような常識が正しくなければいけません。

どんな速度で運動している人に対しても、光の速さが同じであるということは、光が「それぞれの観測者にとって、同じ時間内に同じ距離（1 秒間に 30 万キロメートル）進む」ということでなければなりません。もう少し具体的な設定で考えましょう。互いに平行な 2 つの x 軸があるとします。そして一定の違う速度で x 軸の方向に動いているとします。どちらかの x 軸と同じ速度で動いている観測者にとっては、その x 軸は静止していて、他方の x 軸が一定の速度で動いていると観測します。あなたと同じ速度で動いて、あなたが静止しているとみなしている x 軸を K 系、他方の x 軸を x' 軸として、 K' 系と呼ぶことにします。あなた（ K 系）から見て K' 系は x 軸の正の向きに速さ V （例えば 20 万キロメートル毎秒）で動いているとします。

ある瞬間、2つの x 軸の原点が一致していて、その瞬間に原点から x 軸の正の向きに光を出します。1秒後、あなたから見て、光は30万キロメートル先まで進んでいます。その時、 x' 軸はあなたから見て20万キロメートル進んでいるので、(常識から考えると) K' 系から見ると x' 軸の原点から見て10万キロメートルのところまで光が進んでいるはずですが、しかし、これでは K' 系から見た光の速さは秒速10万キロメートルになってしまいます。ここで、光速度不変を受け止めるために、何を疑わなければならないかというところ、 K 系での時間や距離が、 K' 系での時間や距離と一致しているかどうか、ということ。もし、2つの系で時間や距離が一致していたら、我々の常識のように、それぞれの系に対して光の速さは異なることになります。我々の常識では、暗黙のうちに K 系と K' 系に1つの同じ時間が流れていると考えていますが、その考えを捨てなければ、光速度不変を受け入れることはできません。

確かにこの常識を捨てるのは難しいですが、あなたが K 系にいるとき、そこでは単に、光の速さを測定すると秒速30万キロメートルであることを受け入れ、 K' 系にあなたがいても K 系と同様に光の速さが秒速30万キロメートルであることを受け入れればいいのです。どちらかが特別なのではなく全く対等であることを受け入れればいいのです。どんな速度で運動している系にいたとしても、光の速さは秒速30万キロメートルと観測し、何一つ差のない対等な系です。それを受け入れれば、相対性理論の入口に入ったと言ってもいいでしょう。ただ、少し難しいのは、自分の系から相手の系を見たときに時間や距離がどう見えるか、ということで、具体的な(定量的な)話をするには数式を使わざるを得ませんが、中学校程度の数学の知識でかなりの範囲を理解できると思います。

相対性原理

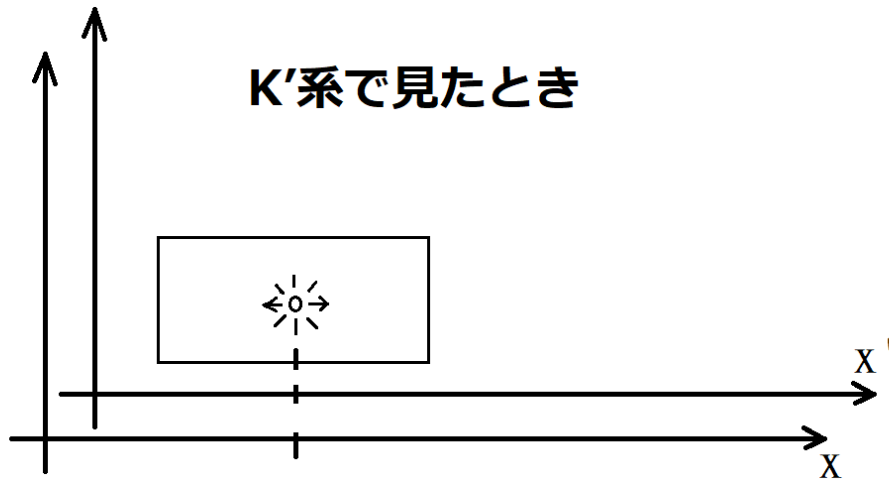
相対性原理は、全ての物理法則はどの慣性系においても同じ形で表される、というものです。ニュートンの運動の法則は全ての慣性系で同じ形で表されていました。これは「ガリレイの相対性原理」の表れでした。しかし、光に関する法則についてはガリレイの相対性原理は成り立っていませんでした。これを光に関する法則にまで含めて相対性原理があてはまるべし、と考えたのが、「アインシュタインの相対性原理」です。アインシュタインの相対性原理の出発点となるのが、「光速度不変の原理」です。「光速度不変」の事実と「相対性原理」から相対性理論が組み立てられていきます。

同時刻の相対性

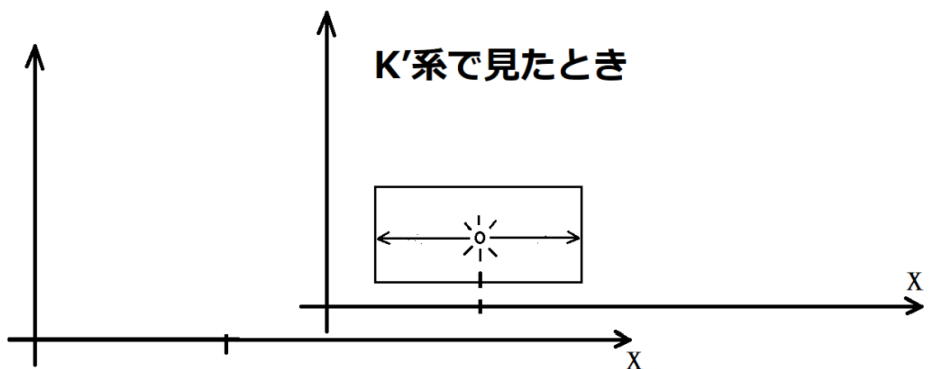
同時刻の相対性

まず光速不変から出てくる、「同時刻の相対性」の話から始めます。

ある速度で走っている電車の中央から、光を出します。電車の中の観測者が見ても、電車の外で静止している観測者が見ても光は電車の前方と後方に同じ速さで進んでいきます。まず、電車の中の観測者（とりあえず電車の中央にいるとします）、は電車の先頭と後尾に光が同時に到達するのを観測します。この観測者にとって、「光が電車の先頭と後尾に到達」という事象は同時刻です。



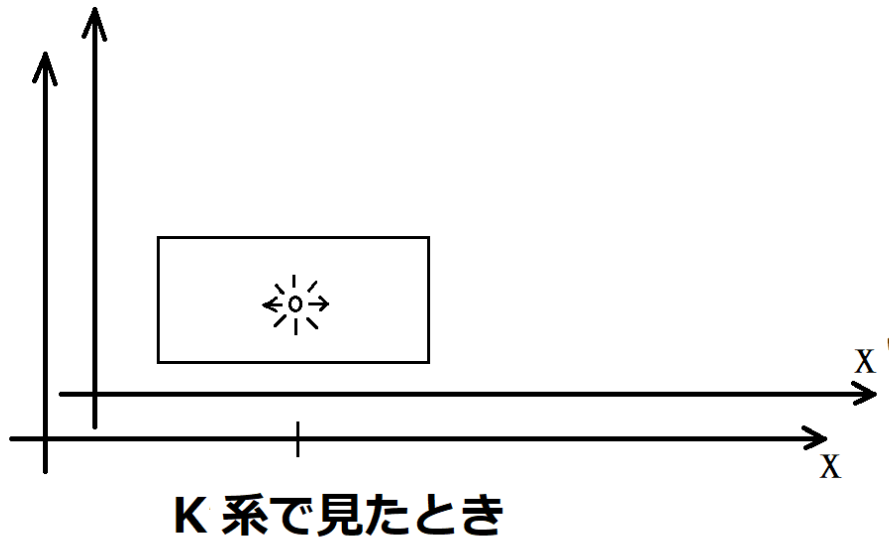
同時刻の相対性 A ①.png



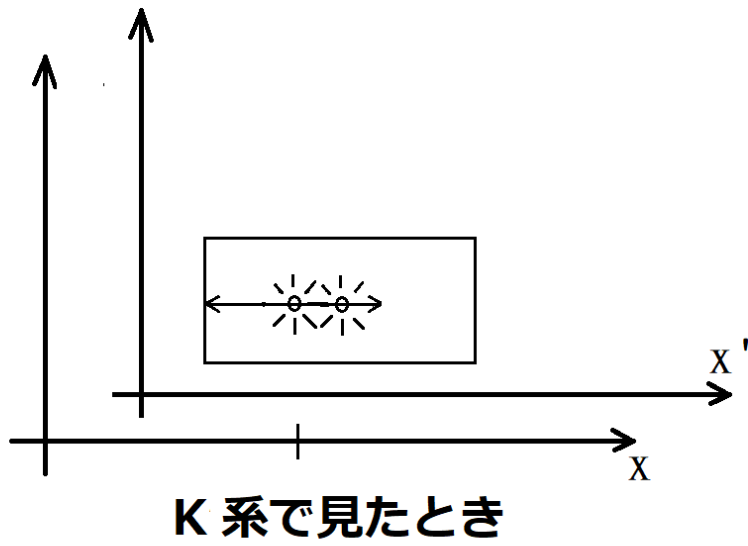
同時刻の相対性 A ②.png

しかし、これを電車の外で静止している観測者が見るとどう見えるでしょうか？ この観測者にとっても光は電車の前方と後方に同じ速さで進んで行くことから、想像してみてください。電車の先頭は光から遠ざかる向きに動き、後方は光に向かって進んでいきます。すると、光は電車の後尾に先に到達し、その後電車の先頭に到達します。電車の先頭と後尾に光が到達する時刻は同時ではないのです。

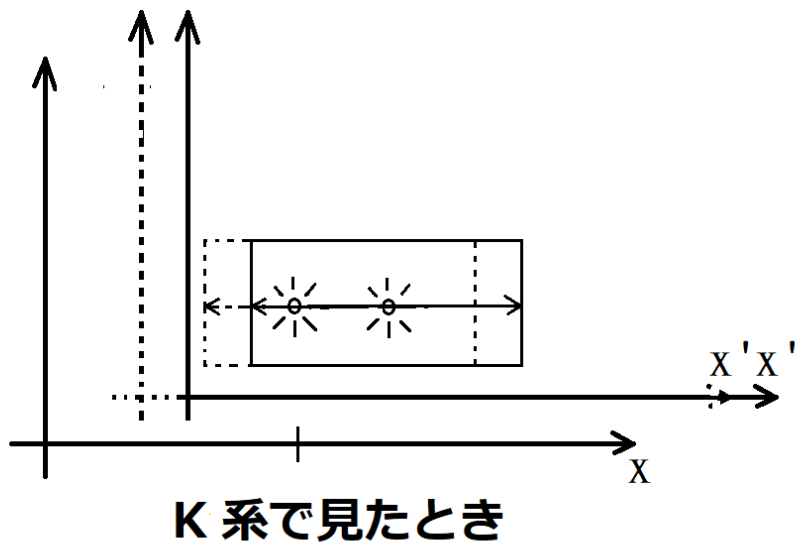
この様に、ある観測者にとって同時刻である事象が、別の速度で運動している観測者にとっては同時刻ではありません。これを「同時刻の相対性」と言います。



同時刻の相対性 B.png



同時刻の相対性 B ②.png



同時刻の相対性 B ③.png

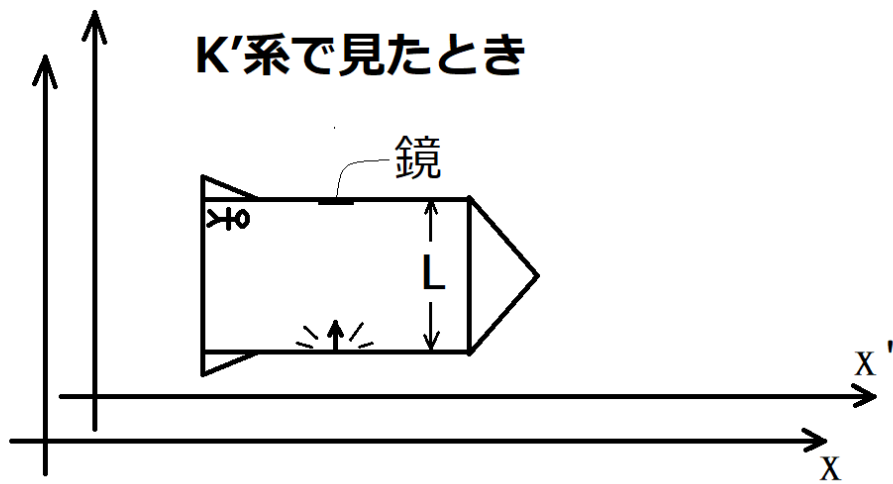
時間の遅れ

時間の遅れ

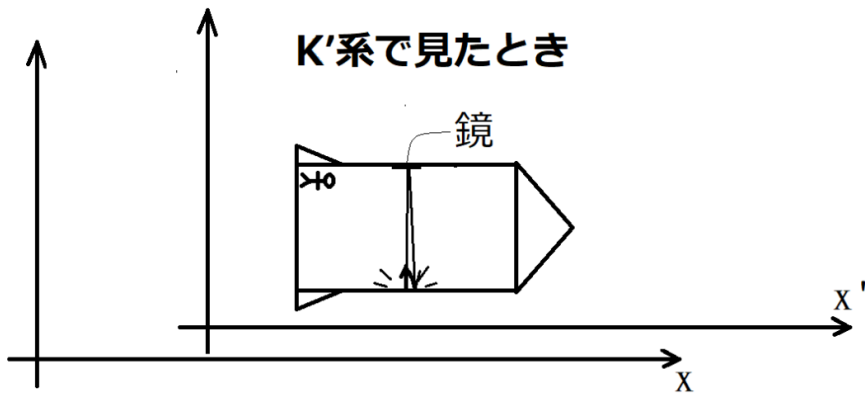
相対性理論から導かれる重要な事実の1つに、「時間がゆっくり進む」というものがあります。これは、やはり「光速不変」から自動的に導かれる事実です。

互いに一定の速度で運動している2つの慣性系があるとします。「慣性系」とは、先に述べましたが、力を受けていない物体の速度が一定であるように見える「座標系」です。あなたが、どちらかの慣性系と同じ速度で運動していれば、あなたから見て、その慣性系は静止している慣性系になります。そして、もう1つの慣性系があなたの慣性系に対して一定の速度で運動しています。あなたがいる慣性系をK系、他方の慣性系をK'系と呼びましょう。あなたのK系からもう1つのK'系を見ると、K'系の時間があなたのK系の時間よりゆっくり進む、ということです。もちろん、どちらの慣性系も対等なので、K'系からあなたのK系を見ると、あなたのK系の時間がゆっくり進んでいる、ということになります。これは全く対等です。

K系とK'系のx軸の向きは一致しているとします。あなたから見るとK'系はx軸の正の向きに一定の速度で運動しているとします。例えば、K'系に対して静止しているロケットを考えます。このロケットはあなたから見てx軸の正の向きに一定の速度で運動しています。K'系のロケットの1つの側面から、進行方向に垂直な方向に光を出します。そしてその向かいの側面にある鏡で反射して元の位置に光は戻ってくるとします。ロケットの中の人が見ると、光はロケットの側面と側面の間を一往復します。このときの光の経路は進行方向に垂直です。ロケットの中の人が見ると、単に止まっているロケットの中の側面と側面の間を光が一往復しただけです。光は、光が出た位置にまた戻ってきています。ロケットの幅をLとすると、ロケットの中の人が見ると光が進んだ距離は2Lです。



時間の遅れA①.png

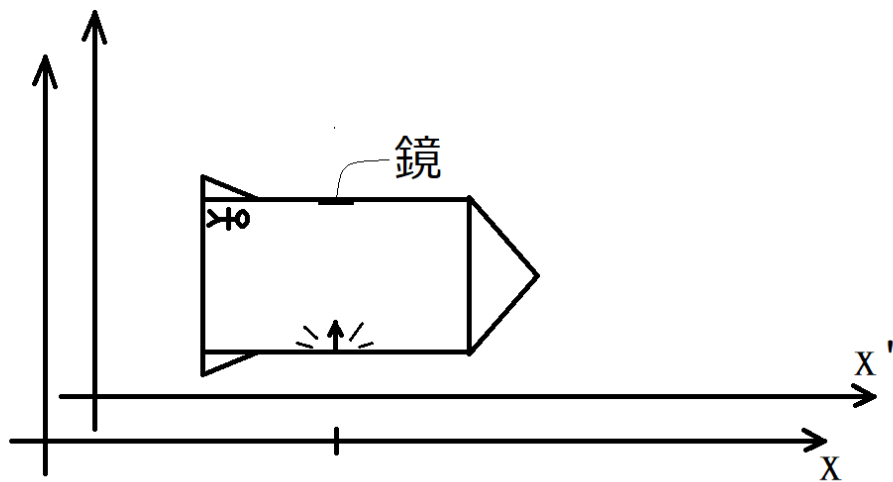


時間の遅れ A ②.png

次にこの同じ事象を K 系のあなたから見るとどう見えるか想像してみましょう。あなたから見るとロケットは x 軸の正の向きに一定の速度で進んでいます。すると、1つの側面から出た光はあなたの x 軸に対して斜めにすすみ、向かいの側面で反射され、また斜めに進んで元の側面に戻ります。あなたから見た光が進んだ経路の長さはロケットの側面と側面の間の一往復の距離 ($2L$) より長くなっているのがわかると思います。ここで重要なのは、「光速不変の原理」から、どちらの系に対しても光の速さは同じであるということです。仮に、ロケットの中の人々が測って光が一往復するのに1秒かかった

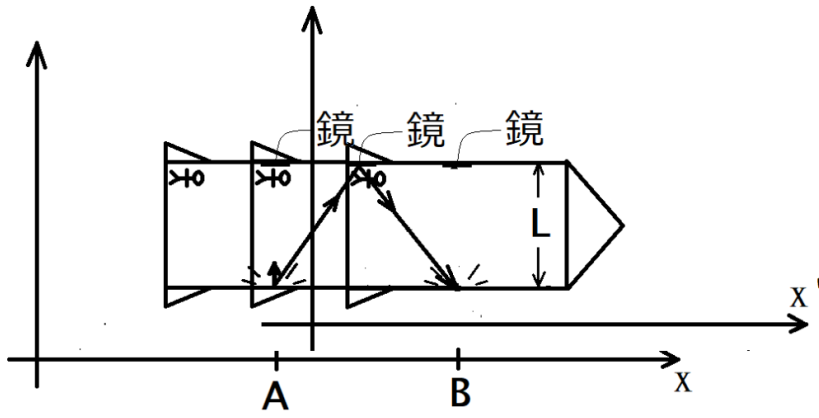
とします（つまり、光が $2L$ 進むのに 1 秒かかる）。この一往復の時間をあなたが測定すると、光が進んだ距離が $2L$ より長いので、1 秒より長くなります。これはどういうことかという、あなたにとって 1 秒経過したとき、ロケットの中ではまだ 1 秒経過していない、ということです。あなたにとって 1 秒経過しても、まだ光は一往復していないので、ロケットの中ではまだ 1 秒経っていないということです。ロケットの中の人にとっても、静止しているあなたにとっても光は全く同じ速度で進んでいるので、このような結果になります。あなたから見るとロケットの中の時間は、静止しているあなたの時間よりゆっくり進むということです。

重要なのは、同様にロケットの中の人が見ると、静止しているあなたの時間はゆっくり進んでいるということです。これはどちらも全く対等です。



K系で見たとき

時間の遅れ B ①.png



K系で見たとき

時間の遅れ B ②.png

ローレンツ収縮

ローレンツ収縮

次に、相対性理論におけるもう1つの重要な

(作成中)

数式を使わない解説を作成中です。

一般相对性理論

静止質量

結合エネルギー

高校の化学で「原子量（補足）」を学びます。この原子量の概念を正しく理解するためには相対性理論からの結果を知っておくべきだと思っています。結論から言うと、「質量とエネルギーの等価性」が関わっています。 $E=mc^2$ という有名な式を見たことがある人もいると思います。これが「原子量」とどのように関わっているのかここで説明します。

原子は電子と原子核からできており、原子核は陽子と中性子からできています。この陽子や中性子の質量は陽子や中性子が単独で存在しているときと、原子核の中にあるときとで値が違います。原子核の中にあるときのほうが質量が小さくなっています。そして、どれだけ質量が小さくなっているかはどの原子核の中にあるかによって異なります。例えば、ヘリウムの原子核は陽子2つと中性子2つでできていますが（陽子と中性子をまとめて「核子」と言います）、ヘリウムの原子核全体の質量とばらばらの陽子2個と中性子2個の質量の和を比べると、ヘリウムの原子核の質量のほうが小さくなっています。この理由は、陽子や中性子はめちゃくちゃ強い力（重力に比べて何桁も大きな力）で結びついていて、これを引き離しばらばらの状態にするには非常に大きなエネルギーが必要です。原子核をばらばらの陽子や中性子にするために注ぎ込んだエネルギーの分だけ質量が大きくなるので（質量とエネルギーの等価性のため）、ばらばらの状態の陽子や中性子のほうが質量が大きいのです。「原子核をばらばらにしたときの核子の質量の和」と「原子核の質量」の差を核子の個数で割ったものを「核子1個あたりの結合エネルギー」と言います。核子1個あたりの結合エネルギーが大きい程安定な元素であり、鉄が最も核子1個あたりの結合エネルギーが大きく、安定な元素です。これより原子番号が大きくなると、少しずつ核子1個あたりの結合エネルギーが小さくなります。

（補足）

原子核の中の陽子の数で原子番号が定められています。そして、原子核の中の中性子の数は規則的に定まっているわけではなく、陽子の数が同じでも中性子の数が違う原子が多数存在します。陽子の数が同じで中性子の数が違う原子たちを「同位体」と言います。自然界において、それぞれの原子が持つ同位体がどれだけの割合で存在するかという「存在比」は決まっています。陽子と中性子の質量はほぼ等しく、電子の質量は陽子や中性子に比べて無視できるので、1つの原子全体の質量を陽子と中性子の個数の合計で表し、これを「質量数」と言います。もし、陽子や中性子があらゆる原子核の中にあ

るときも同じ質量であれば「質量数」で話は足りません。しかし、陽子や中性子の質量はどの原子の中にあるかによって違うので、陽子や中性子の質量の基準を決めて、それと比較して質量を表さなければなりません。これを「相対質量」と言います。この基準として、陽子6個、中性子6個でできている炭素原子をとります。各原子において、同位体の存在比を考慮し、相対質量の平均値を取ったものがいわゆる「原子量」です。

小学生から高校生までの相対性理論

著 藤山篤司

制作 Puboo
発行所 デザインエッグ株式会社
