

光速度不変

TOP『時間と空間の物理学』へ戻る

特殊相対性理論が二つの原理のもとに構築され、その原理の一つが『光速度不変の原理』であることはよく知られています。

しかし『光速度不変』が原理であるというのは正しくありません。なんとなれば、光速度があらゆる条件下の観測者に対して、常に決まった値を示すというのは、確認された経験的事実にすぎないからです。

原理というのは、証明された事柄か、あるいは証明を要しない自明の理（皆が無条件に納得出来る論理的内容）のことです。〈間違いない経験的事実である〉ことと、**自明である**事とは違います。〈間違いない経験的事実である〉は、どこまで行っても“我々が経験した限りにおいては”という制約がある以上、自明ではありません。

なぜそうであるかの証明が困難だから**原理（説明を要しない真実＝自明の理）**としておこうというのは感心しません。説明に成功するまでは、あくまで“仮定”扱いにしておくべきです。

以後 100 年以上もの間、主導的立場にあった物理学者の殆どが、なぜ光速度は確定不変なのかについてさほど疑問も持たず、関心も持たなかったのは、その事実を原理（説明を要しない真実）と呼んだ所為かも知れないという不満を覚えます。

かつて昔の科学者達は、万有引力の有効性や正しさについては疑いはしなかったにもかかわらず、そのメカニズムを求めて考え続けました。そういった姿勢が大事だと思います。実際に起きている事象について、そのメカニズムを解明すること、すなわち論理的に納得出来る解答を見つけて、真実を明らかにする事が、科学者に課せられた唯一の使命です。

アインシュタインは〈物差しの長さも時計の進みも基準体の運動速度に依存して変化する〉という考えを用いて、光速度不変が成り立つことを、ちゃんと説明している、と反論されるかも知れません。そういう意見に対しては、彼の次の解説文を紹介しておきましょう。

『特殊および一般相対性理論について＝金子務訳』から引用。

《……ローレンツ変換によれば、真空中の光の伝播法則は、基準体 K についても基準体 K' についても同じように満足される。このことを知るには、…… {ローレンツ変換の解説・省略} ……基準体 K' に対して相対的な伝播速度がやはり c であることがわかる。他の任意の方向に伝播する光線についても同様である。このことは、この観点からまさにローレンツ変換の方程式が導かれたのだから、当然であり、驚くにはあたらない。》

何と言っているかおわかりでしょう。光速度が色々な観測者に対して決まった値を示すという観点から、つまりそうなるように、ローレンツ変換の方程式（物差しの長さも時計の進みも基準体の運動速度に依存して変化するというアイデア）が導かれたのだから、ローレンツ変換の方程式を使って決まった値の光速度が得られるのは当然だ、と言っているのです。

1 ドップラー効果

光は*波動です。光の速度について述べる前に、まず波動の特性であるドップラー効果についてお話しします。

ドップラー効果は媒質中を伝わっていく波動全般に見られるものですが、光と他の波動とでは、ドップラー効果の現われ方が少し違います。その違いが、空間の特異な性質を含めて多くのことを教えてくれます。

*** 波動の伝播と物体の移動＝運動**は物理的には全く異なる事象です。従って**波動の伝播速度**と**物体の移動速度**も、物理的に全く異なる意義を持ちます。たとえば、運動速度は物体が担って運ぶ運動エネルギーに直接関与しますが、光の伝播速度は光が担って運ぶエネルギーの大きさには関与しません。

1.1 一般的なドップラー効果

まず、一般的なドップラー効果についておさらいをしておきます。もっともポピュラーなドップラー効果の公式は

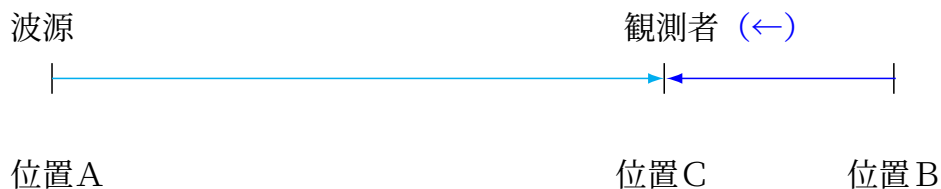
$$f = f_0 \frac{u - V_o}{u + V_s} \quad (1)$$

といった形で書き表されます。

f は観測される波の振動数、 f_0 は発した時の（波源系における）波の振動数、 V_o は媒質に対する観測者の移動速度、 V_s は媒質に対する波源の移動速度、但し u は波動の伝播速度で V_o 、 V_s より大きいものとします。なお、分母と分子にある加減記号は、 V_o 、 V_s おのおのその速度方向をどちら向きにとるかによって決まりますが、上式では、観測者の速度 V_o は観測者が波源から逃げている向きを、波源の速度 V_s は波源が観測者から逃げている向きを、それぞれ正方向にとっています。

後の解説の都合上、ここでは通常とは少し違った見方で上式の内容を確認しますが、わかりやすく説明するために波源と観測者が接近する場合を取り上げました。

【図-1】



まず [図-1] は、媒質に対して波源が静止していて、観測者が速度 V_o で波源に近づいている場合の、《媒質系座標》における認識ですが、波源の位置をA、波が出発する瞬間の観測者の位置をBとすると、波源に接近運動する観測者が光を受け取る位置はCです。

$u \times t = \text{距離 [A-C]}$ t は波がAからCまで進んで観測者に到達するまでの時間です。したがって

$$V_o \times t = \text{距離 [C-B]}$$

観測者が位置Cで最初に波を受け取ってから、その後波源の位置に到着するまでに要する時間を T とすると、

$$V_o \times T = \text{距離 [A-C]}$$

波源が観測者と出会うまでに波を発生し続けた時間は $(t + T)$ 、観測者が発生した波のすべてを受け取るのに要した時間は T です。

さて、波動の波の数を k で表すと、振動数 f の波動が時間 t の間に送り出す波の数は $k = f \times t$ ですから、波源が送り出した波の振動数が f_0 なら、波源が観測者と出会うまでに送り出した波の総数は $k = f_0(t + T)$ ということになります。一方観測者がその波のすべてを受け取るのに要した時間は T ですから、受け取る波の振動数が f なら、受け取った波の総数は fT です。

それが等しい（波の**数**が変化することはない）わけですから $f_0(t + T) = fT$ となります。

したがって、
$$f = f_0 \frac{t + T}{T}$$

この式は、 $ut = V_0 T$ （=距離 [A－C]）ですから、 $T = \frac{ut}{V_0}$ として代入すれば、 $f = f_0 \frac{u + V_0}{u}$ と書き換えることができます。

これは前述のドップラー効果の公式（1）の V_s （波源の速度）をゼロにしたものに一致します。**分子の記号が+になっているのは、先の公式記述の場合とは逆に、観測者の運動が波源に近づく向きを+にとったためです。**

では今度は、媒質に対して観測者が静止していて、波源が観測者に近づいている場合を考えてみます。

【図-2】



よく見てください。波源から波が出発した位置がAで、観測者の位置がCなら、波は媒質中をAからCまで伝播しなければ観測者に届きません。その距離は先ほどの「図-1」の場合すなわち距離 [A－C] よりも大きいのですから、届くまでに要する時間も先ほどの t よりも大きい t' になります。

波が観測者に届くまでの時間が長くなったということは、その間に移動した波源の移動距離 [A－D] も、先ほどの観測者の移動距離 [B－C] より大きくなっています。したがって、その後（波が観測者に届いた瞬間から後）波源と観測者が出会うまでに要する時間は、残りの距離が短くなっていますから、先ほど

の T より短い T' となります。

$$u \times t' = \text{距離} [A - C]$$

$$V_s \times t' = \text{距離} [A - D]$$

$$V_s \times T' = \text{距離} [D - C]$$

先ほどと同じように、波源が観測者と出会うまでに送り出した波の総数と、観測者が受け取る波の総数が等しいとして、振動数と時間の関係を書き表してみます。波を送り出すのに要した時間は、 $t' + T'$ であり、受け取るのに要した時間は T' です。

$$\text{したがって先ほどと同じように} \quad f = f_0 \frac{t' + T'}{T'} \quad \text{です。}$$

しかし波や波源の速度と所要時間との関係は、先ほどとは少し違ってきます。(距離の構成内容についての認識が異なるのです。) すなわち先ほどは $ut = V_0 T$ だったものが、今度は $ut' = V_s (t' + T')$ …… (A) となります。図と対比させて確認してください。

したがって、(A) の式は、

$$f = f_0 \frac{u}{u - V_s} \quad \text{となります。}$$

$$\text{※ (A) の式に} \quad T' = \frac{(u - V_s) t'}{V_s} \quad \text{を代入すれば簡単に求まります。}$$

これはドップラー効果の公式 (1) における、観測者の速度 V_o をゼロにしたもので、**分母の記号がーになっているのは、観測者の運動が波源に近づく向きを+にとったためです。**

ここまでは、一般的なドップラー効果のおさらいを兼ねて、ドップラー効果についてはこのような説明の仕方も成立するということを示したわけで、いわば前置きです。

1.2 光のドップラー効果

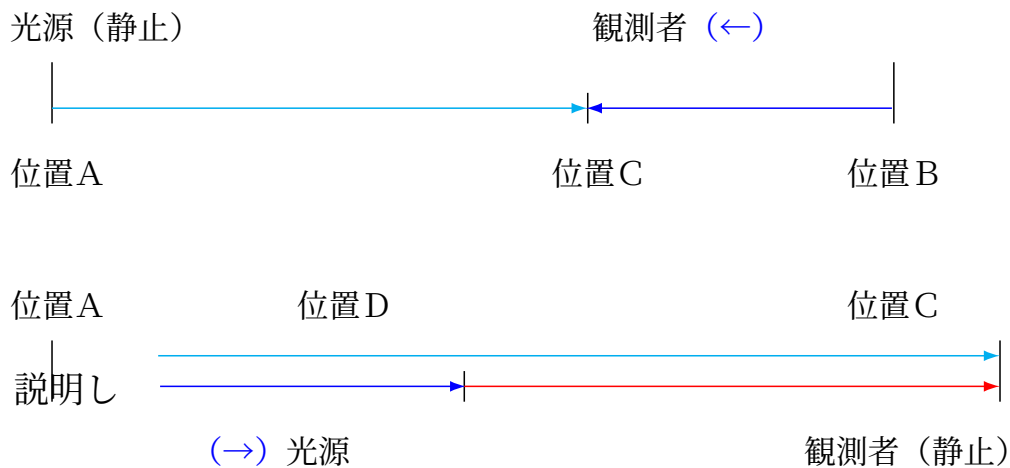
さて前置きが長くなりましたが、本題はここからです。すなわち、光の場合のドップラー効果はどのように考えるべきでしょうか。

前置きの説明では、波源が運動する場合、観測者が運動する場合のそれぞれについて、いずれも媒質を基準にして考えました。しかし光の場合はこのような方法をとれません。先ほどのように、波源の運動と観測者の運動、両方の運動に

対する共通の基準（バックグラウンド）となる媒質（エーテル）が存在しないからです。

しかし、それなら次のように考えることが出来ます。つまり光の伝播を規定するもの（媒質）が存在しないのですから、通常の個体運動と同じように、光源の運動は観測者を基準にした《観測者系》の、観測者の運動は光源を基準にした《光源系》の認識を示すものとして考えるのです。波源の運動にしろ観測者の運動にしろ、“運動”は基準に対してしか定義できないのですから当然というか、他に考えようがありません。この見地からでも、ドップラー効果を論じる事は可能です。

【図-3】



〔図-3〕は〔図-1〕と〔図-2〕を並べてみたものです。前項の〔図-1〕と〔図-2〕についての解説文の“媒質に対して”という言葉を、それぞれ“光源に対して”あるいは“観測者に対して”に置き換えたものがそのまま、この〔図-3〕に対する解説になります。したがって、上段の図からは

$$f = f_0 \frac{c + V_o}{c} \quad (2)$$

下段の図からは

$$f = f_0 \frac{c}{c - V_s} \quad (3)$$

の式が得られます。

ただし一つだけ違う所があります。それは、光のドップラー効果の場合には、* ‘光源と観測者の運動関係は相対的なもの’であるために、観測者の速

度 V_o と光源の速度 V_s は一致する（同じになる）ということです。故に以降は $V_o = V_s = V$ として話を進めます。

*例えば“媒質”といった他の基準に対するAとBの速度は、個別に任意の値をとれますから異なる場合もありますが、互いを基準にした相対速度（Aに対するBの速度とBに対するAの速度）は、常に一致します。

したがって先の二つの式はそれぞれ、

$$f = f_0 \frac{c+V}{c} \quad f = f_0 \frac{c}{c-V}$$

となります。（観測者が光源に近づく、すなわち光の進みに逆らう向きを正方向にとっています。）

光の場合は一般の波動の場合のように、どちらを基準にとるかによるドップラー効果の違いが生じたりはしないはずです。違いが生じるようなら、空間が光という波動の媒質として、バックグラウンド（絶対座標）の価値を持つことを認めなければならなくなりますが、それは他の多くの経験的事実によって否定されているのですから、当然上の二つの式は、ドップラー効果について同じ結果を出さなければなりません。そのためには、

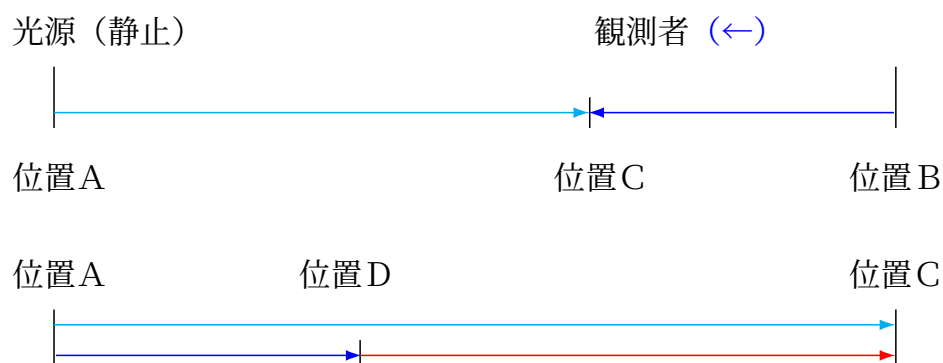
$$\frac{c+V}{c} = \frac{c}{c-V}$$

でなければならないと考えるのは当然ですが、いきなり数学的処理に走った結果“速度係数”なるものを創出することになったのは、残念ながら失敗と言うほかありません。失敗の原因は式中の c をすべて同じ値と考えて扱った事にあります。もう少し物理学的な（事象重視の）考察をしなければなりません。

要は、左辺と右辺が**比として**等しいことを証明すればよいのです。

ではもう一度 [図-3] を見ながら考えてみましょう。

【【図-3】】



上段図と下段図は、同一の物理事象が、立場によって違った形で認識される様子を図示したものです。観測者と光源の相対速度が変化しない（等速度）である場合、上段図における距離 $[A-C] : 距離 [C-B]$ の比と、下段図における距離 $[D-C] : 距離 [A-D]$ の比は同じになります。

それは、唯一同一の物理事象である以上、光が観測者に届いたときの観測者と光源間の距離すなわち上段図 $[A \sim C]$ と下段図 $[D \sim C]$ は唯一同一のはずだからです。（当然、上段図 $[C \sim B] =$ 下段図 $[A \sim D]$ です。）

以下は簡単な線分比の問題になります。

上段図（＝左辺）は、分母は（光が観測者に達した瞬間の光源と観測者間の距離である）水色線 $[A \sim C]$ で、分子は全体長（当初の光源と観測者の距離）である $[A \sim C] + [C \sim B]$ になっています。

下段図（＝右辺）では（光が観測者に達した瞬間の光源と観測者間の距離である）分母の赤色線が $[A \sim C] - [A \sim D]$ で与えられ、分子の全体長（当初の光源と観測者の距離）は、 $[A \sim C]$ となっています。

下段図においては、光は位置Aから位置Cまで走ったという認識ですが、物理的には（実際には）位置Dから位置Cまでを走っているのです。

上段図でも下段図でも、光が光速 c で走って観測者に届いた位置をCとし、水色線 $[A \sim C]$ で表しています。、観測者もしくは光源の移動速度はどちらも V （紺色線）で表していますので、

上段図に対応する左辺は

$$\frac{c + V}{c} \quad (4)$$

下段図に対応する右辺は

$$\frac{c}{c - V} \quad (5)$$

左辺（４）式中の c は**上段図中の**水色線を、右辺（５）式中の c は**下段図中の**水色線を指しています。したがって、両辺の c を等値と見なしてはいけません。左辺と右辺それぞれの認識の中で、それぞれの辺の中においてのみ有効な c であることを理解する必要があります。そうすれば、（４）式と（５）式が、数学的な細工をすることなく、そのまま等号で結び得る事も理解できるでしょう。式の形の違いは、すなわち認識の違いを反映しているに過ぎません。

結論として光のドップラー効果の公式は、一般的なドップラー効果の公式に合わせて、観測者が光源から逃げる向きを正方向にとると、次のように書けます。

$$f = f_0 \frac{c - V}{c} \quad \text{ゆえに} \quad f = f_0(1 - V/c)$$
$$\text{もしくは} \quad f = f_0 \frac{c}{c + V} \quad \text{ゆえに} \quad f(1 + V/c) = f_0$$

2 光速度不変とエネルギーの保存則

机上に置いてあったボールを手にとって投げるという行為は、力を働かせてボールに速度を与えるということです。“力を働かせる”事によって系が失ったエネルギーは、その系に対して速度を有するボールの中に、“運動エネルギー”という形で保存されます。

運動エネルギーというのは物体が持つ質量と速度とによって規定されるエネルギーですから、質量を持たない光は**運動エネルギー**というものを持ちません。というより、光はエネルギーそのものです。光のエネルギーが $E = h\nu$ で与えられ、質量要素も速度要素も含まないのは当然と言えます。

さて、ある系と別の系との間で何かのやりとりがある場合に、『エネルギーの保存則』が破れることはありません。すべての物理的事象はこの保存則を満たすべく生じます。では系Aから系Bへのエネルギーのやりとりでは〔エネルギーの保存則〕はどのような形として顕われるでしょうか。

前の項(1.1 一般的なドップラー効果)で触れましたが、光波の授受でも、系Aから送り出された光の総てを系Bが受け取った場合、送り出される光の**波の総数**と、受け取る光の**波の総数**は一致します。これは《エネルギーの保存則》の要請を満たすことになっています。

波の総数が一致するということは、振動数の高い(エネルギー値の高い)光は短時間働き、振動数の低い(エネルギー値の低い)光は長時間働くことを意味しています。

ドップラー効果のあり方から自然に導かれる帰結として、《エネルギーの保存則》と『光の伝播速度不変』が同時に証明されるというのは面白いと思います。 ν も λ も、それぞれは特定の光線に対する定点(受け取り手)の相対速度に応じて変化しますが、《エネルギーの保存則》が働く結果として、 $\nu\lambda = c$ は不変の値をとる事になるのだと言って良いでしょう。

ここで述べている“光の速度”は、言うまでもなく《定点を単位時間あたりに通過する光波の全長（距離）＝ $\nu\lambda$ 》で、つまり、私が前節『3.1 見方を変えた速度の定義』で述べた速度定義に準じます。

《光速度不変》は《エネルギーの保存則》の顯われに他なりません。

[TOP『時間と空間の物理学』へ戻る](#)