

物理学最前線 I 第 12 回出題レポート
アインシュタインの業績について

エーテル否認から特殊相対性理論へ

19 世紀までの物理学において、光を波だとするのが一般論であった。ゆえに、波であるがゆえに光には媒質が必要とされ、その媒質としてはエーテルの存在が論拠とされた。エーテルとは空間に満ちているとされる“仮想の”物質であったが、当時の物理学者には常識として扱われていた。

エーテルが存在するならば、地球の自転によって、自転の方向に移動するエーテル中を、追い風の要領で進む光と向かい風の要領で進む光では当然速度が違うことになる。つまり、エーテルの速度を v 、光の絶対静止系での速度を c とすると、追い風の要領で進む光は $v+c$ となり、向かい風の要領で進む光は $v-c$ となる。しかし実験の結果は、両者の光の速度の差を検出することはできなかった。

その実験のひとつ、マイケルソン・モーレーの実験が 1881 年に行われた。この実験は、一つの光源から発せられた光をハーフミラーを使い二つに分け、一方の光は幾度と鏡を使い反射をさせて距離を移動させ、再び二つの光を一箇所に集め、位相差により光の干渉を検出しようとするものだった。エーテルが実在するのであれば、想定どおり、位相差により光の干渉を引き起こす。この時間差であっても、1 万分の 1mm しか進まないと言われたが、マイケルソン・モーレーの実験はこれを検出できるものであった。結果として、干渉は起こらなかった。この実験は、光速度不変の原理の根拠のひとつとされている。

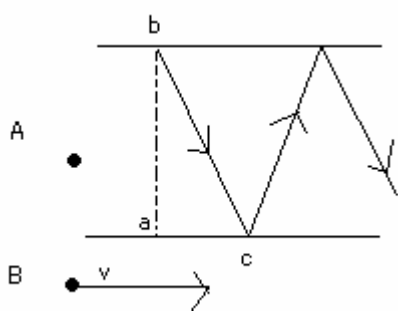
ところで、アインシュタインは子供のころから光について興味を持っていた。それは「光に乗ればどんな風景が見えるのだろう」という単純なものであったが、その思想がアインシュタインの光の探求の根源であったと本人が述べている。

もし光が絶対静止系において一定の速度を持つならば、制止している観測者と動いている観測者からでは、同じ光であっても観測される光の速度は異なるはずである。しかし、実験から光の速度の差は検出されなかった。アインシュタインは光の速度差が検出できなかったことから、当時の物理学者の中では固執していることの多かったエーテルの存在を早々と否認していた。そして、アインシュタインは 1905 年に光速度不変を確信する。そこで、アインシュタインは“時間”こそが相対的に変化すると考案した。この発想は、時間こそが不変であり万物に等しく流れると考えられていた世の中では、驚くべきものであり、これこそがアインシュタインだから持ちえたものだと考えられている。

時間が不変でないとは、つまり万物に等しく時間が流れておらず、動くものと静止する

ものでは違う時間が流れていることになる。アインシュタインは人によって流れる時間が違う事を以下の例えで説明した。二つの場所で同時に現象が起こるとする、その二つの場所の中間位置で二つの現象を見たならば、観測者にはその現象が同時に起こったと見ることができる。しかし、同じ中間位置であっても観測者が片方の場所に向かって動いていれば、その現象の映像が観測者に届くまでの時間に差が生じる、つまり近づいている方の現象は早く、遠ざかっているほうの現象は遅く観測される。ゆえに、その観測者には同時に起こったとは認識できないという。

特殊相対性理論を数式で示す



それでは、特殊相対性理論を数式で示す。まず、bから発せられた光は、上下の二つの鏡によって反射するものとする。そして観測者 B は光が斜めに移動するのではなく、ずっと上下に反射し続けているだけに見えるように移動するとする。つまり、観測者 B にはある速度 v で移動している。

光が bc 間を移動する時に、静止した観測者 A における時間を t 、観測者 B における時間を t' とする。すると、観測者 A における光が bc 間を移動する時間 t は、(当たり前であるが、「時間＝距離／速度」で有る事を確認する)

$$t = \frac{bc}{c} \quad (1)$$

と表す事が出来る。次に、時間 t' は

$$t' = \frac{ab}{c} \quad (2)$$

と表す事が出来る。この式からあきらかに、 $t > t'$ であることがわかる。

それでは、具体的に t' を求めるとする。光速度は普遍であるので、共通の速度 c を用いる事が出来る。次に、長さ ab 、 ac 、 bc について定義すると、

$$bc = tc \quad ab = t'c \quad ac = vt' \quad (3)$$

とおく事が出来る。ピタゴラスの定理、 $ab^2 + ac^2 = bc^2$ より、

$$t'^2 c^2 + t'^2 v^2 = t^2 c^2 \quad (4)$$

が成り立つ。これに (3) を代入して整理すると、

$$t'^2 (c^2 - v^2) = c^2 t^2 \quad (5)$$

$$t' = \frac{c^2 t^2}{c^2 - v^2} = \frac{t^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (6)$$

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7)$$

これより、観測者が速く動けば動くほど、観測者における時間 t' は小さくなる。この (7) 式はローレンツ変換と呼ばれる。先ほどは便宜のため静止系としての時間を用いたが、これはあくまで観測系であって、先ほどの例においても観測者 A と観測者 B が同じ観測系上にあるとすれば、さらなる静止した観測者 C により観測者 A・B の時間は進んで見えるはずである。しかし、相対性理論においては、全ては相対関係におけるものであり、どちらかが進む、遅れるなどと思考する事は絶対基準系の存在を認めている事になり、それ自体が慣性系を否認していることになる。

特殊相対性理論から……

アインシュタインは特殊相対性理論を発表してから四ヶ月後、特殊相対性理論に追加して、 $E = mc^2$ を書き足している。これは特殊相対性理論を運動量保存の法則、エネルギー保存の法則に持ち込む事によって導かれたとされる。

このように、アインシュタインは光の探求から特殊相対性理論にたどり着いた。それを一般化するために、重力の探求から一般相対性理論にたどり着いた。一般相対性理論から導かれるアインシュタイン方程式は、宇宙全体を支える法則を発見したのである。時間と空間が結びつけられ、宇宙の有限性、時間の有限性が証明された。現在はそこから生まれた新たな謎として、宇宙の根源に関する問題が研究者たちを賑わせている。

参考文献

ウィキペディア百科事典 <http://ja.wikipedia.org/>

窪田先生と愉快的仲間たち <http://www.big.or.jp/~isaacrc/superscience/kubota/>

Albert Einstein's science and life <http://homepage2.nifty.com/einstein/einstein.html>