

## 天文学 定数最前線 (1)

### 光速度 $c$

それぞれ覆いのついたランプをもった二人が遠く離れた見通しのきく場所に立ち、一人がランプの覆いをとると、別の一人は相手のランプがみえたら直ちに自分のランプの覆いをとることにする。そうして相手にランプを示してから相手のランプの光がみえるまでの時間をはかれば光の速度を求めることができる。これはガリレイが考察した光速度測定法である。人間の視覚神経と運動神経に頼るこの方法では分解できる時間間隔はせいぜい 0.1 秒であり、その間に光は地球を一回りしてしまう。当時は光速度の下限値が求まったにすぎなかったが、後に距離と伝播時間を使うこの測定原理によって光速度がはかられた。すなわち、天体現象を用いることにより光の伝播距離をのぼすことで時間差を拡大したのがレーマーの方法であり、歯車や回転鏡による巧妙な装置で時間分解能を高めたのがフィゾーやフーコーの方法である。回転鏡によるフーコーの方法は 20 世紀はじめまでもっとも精度のよい測定法であった。

光を含む電磁波において真空中での波長  $\lambda$  と周波数  $\nu$  との積は光速度に等しい ( $c = \lambda\nu$ ) ので、同一の電磁波に対して波長と周波数を独立に測定すればその積から光速度の値がえられる。この測定原理で光速度がはかられたのはマイクロ波技術が利用できるようになった第 2 次世界大戦後のことである。マイクロ波空洞共振器やマイクロ波干渉計を用いて光速度が決定されたがその精度は波長の測定精度で制限されていた。その後発明されたレーザーは光速度の測定精度を飛躍的に向上させると同時に光速度の意味に質的変化をもたらした。ところで波長はメートルを単位としてははかられ、周波数は秒の逆数を単位としてははかられる。このメートルと秒の定義がここ四半世紀の間に大きく変わった。

長さの基本単位であるメートルは、もともと地球の大きさを基準に決められた。すなわち、地球の北極から赤道まで子午線に沿った長さの 1 千万分の 1 であった。その後これに基づいて国際メートル原器がつくられ、メートル条約加盟国に各国原器が配布されて長い間長さの基準であった。しかしこの白金とイリジウムの合金による原器を基準とする方法では、いくら環境条件に注意しても  $10^{-7}$  の精度 (1 メートルに対して 0.1 ミクロン) を保つのが限界であった。1960 年に改訂されたメートルの定義では、原器をやめて原子番号 86 のクリプトン原子の出すだいたい色の光の波長を長さの基準とすることになり、精度は  $4 \times 10^{-9}$  にまで向上した。波長の測定は光波干渉計を用いてこのクリプトンの標準波長と比較することによって行われる。

一方、時間の単位である秒の定義も、1967 年にそれまでの天文観測に基づくものから原子番号 133 のセシウ

ム原子の周波数に基づくものへ変わった。当初は長さの基準と大差なかった精度も、その後の原子時計の著しい性能向上により、現在は  $10^{-13}$  の絶対精度 (確度) がえられるようになっている。

さて、レーザーの発する可視光や赤外線を用いて光速度を測定する場合、波長についてはクリプトンの波長と比較的近いので光波干渉計で精度良くはかることができるが、周波数はセシウムの周波数 (約 9 GHz) の約  $10^9$  倍と大きくかけ離れているため直接比較することはできない。これを解決するには、目的のレーザーの周波数とセシウムの周波数との間に互いの周波数が簡単な尽数関係に近いような周波数をもつレーザーを何段も介在させて、周波数でい倍混合の方法によって相互の周波数差をモニターすれば良い。このような周波数比較測定法の鎖を赤外・可視域まで伸ばすことによってはじめてレーザーの絶対周波数が精度良くはかられるようになった。

実際にメタンやヨウ素分子の飽和吸収スペクトル線を基準にして波長と周波数が安定化されたヘリウムネオンレーザーに対する波長と周波数測定によって求められた光速度  $c$  は、 $c = 299792458 \text{ m/s}$  である。

しかし、ここで問題が出てきた。はかられるレーザー光の相対精度や再現性は非常にようになってきているのに、メートルを単位とする波長の絶対値については単位となるクリプトンの波長精度が  $\pm 4 \times 10^{-9}$  しかないために、それ以上の有効数字は決められないのである。  $c$  の値の不確かさもほとんどがメートル単位を実現するときの不確かさから生じ、繰り返し行われた  $c$  の測定値はすべてこの不確かさ以内で一致しているのである。われわれが光速度の測定を問題にするときには、長さや時間の単位は正確に決まったものという前提があるが、実はこの長さの単位があいまいなのである。だからといって、もし特定の分子スペクトル線の波長でメートルを再定義したとしても、さらに精度のよいものが現れたときに再び同じ問題が生じる。一方、相対性理論によると、時間と空間は光速度という不変量を通じて結びついているので本来独立な単位をもつことはできないのである。定義によって不変量の値自体が変わるのは好ましいことではない。

このような事情から、1983 年秋の国際度量衡総会において、メートルの定義は時間の単位である秒に関連づけるように改訂された。すなわち、光速度は上の数値で厳密に正しい (つまり、それ以下の数字は厳密に 0) として、秒の定義からメートルが定義されることになった。したがって、光速度は測定によって決められる量ではなく定義された常数になってしまったのである。

[周波数でい倍混合] 2 つの周波数  $\nu_1, \nu_2$  の波を入ると、 $m\nu_1 - n\nu_2$  ( $m, n$  は整数) の周波数の波が出力される。  $\nu_1$  と  $\nu_2$  が  $n:m$  の尽数関係に近いと、出力のビート周波数は測定可能なほどに低くなる。タングステン・ニッケル点接触ダイオードなどがその働きをする。

藤本眞克 (東京天文台)

昭和 61 年 12 月 20 日	発行 人	〒181 東京都三鷹市東京天文台内	社団法人 日本天文学会
印刷 発行	印刷 所	〒162 東京都新宿区早稲田鶴巻町 565-12	啓文堂 松本印刷
定価 450 円	発行 所	〒181 東京都三鷹市東京天文台内	社団法人 日本天文学会
		電話 (0422) 31-1359	振替口座 東京 6-13595