

光速測定 of 歴史と天文学の果たした役割

理科・物理 渡會 兼也

(要旨) 地上実験によって光速が初めて測定されたのは1849年のフィゾーの実験であるが、実は光速の値はそれよりも100年以上も前の天文学的な観測によって、おおよその見当は付いていた。特に、デンマークの天文学者オーレ・レーマーによる木星の衛星イオの食の観測結果は光速測定 of 歴史に大きな役割を果たした。本稿では、オーレ・レーマーとジェームス・ブラッドレーの発見を中心に光速測定 of 歴史の中で天文学が果たした役割について述べ、科学史を学ぶことの教育的意義について考察する。

キーワード：光速測定 天文学 科学史

1 はじめに

高校物理の教科書を見ると、光の速度は、フィゾーの実験によってはじめて計測された、という記述がある。これは歴史的な資料から事実であることがわかっている。しかし、それ以前に光の速度がわかっていたか？と言われると、その答えはNO!である。実はフィゾーの実験の100年以上前に、デンマークの天文学者オーレ・レーマーによる木星の衛星イオの食の観測やイギリスの天文学者ジェームス・ブラッドレーの光行差の発見によって光速の値がどれくらいであるかは目星がついていたのである。

手元にあった他の出版社が作っている教科書を調べたところ、5社中3社(数研出版, 東京書籍, 実教出版)では本文中にレーマーの観測が取り上げられていたが、残りの2社(啓林館, 第一学習社)は表紙裏の年表には載っていただけで、本文中の記述はなかった。地上実験により検証されるもののみが物理である、という観点から見れば、レーマーの発見はそれほど大事ではないのかもしれない。しかし、科学史としてレーマーの発見が光速測定に果たした役割は非常に大きい。

したがって、こういった科学史を題材として取り

上げることは教育的にも有効ではないだろうか。実際に英国の教科書『アドバンス物理』では光の速度から粒子性と波動性の論争の歴史に3-4ページを割いている[1]。また、HOPC物理においては歴史的な背景(当時の世論や社会的な状況を含む)が非常に重大な要素であることがわかる[2]。また、私が毎年夏休みに2年生の生徒に宿題として「物理に関する本の感想文」の提出を求めているが、その際の感想文にも科学の歴史に興味を持ち、魅力を感じる生徒も多い。

今回私は光速の測定という歴史の中で、オーレ・レーマーのイオ食の観測とジェームス・ブラッドレーの光行差の発見とその意義を紹介し、その物理教材としての有効性を議論したい。第2章では光速測定 of 歴史的な背景を簡単に述べたあと、第3章でレーマーの仕事、第4章ではブラッドレーの光行差の発見について述べ、第5章で科学史の教材としての利用法を述べたあと、第6章で結論とまとめを行う。

2 歴史的な背景

1600年代までは『光の速度は無限大である』ことが常識であった。これは日常生活では光の速度は無

無限大と考えても矛盾しないことが多く、有名な科学者もこれを信じていたためだと思われる。例えば、当時の天文業界の権力者であったケプラーやカッシーニも光速が無限大であると信じていた[2, 3]。光速を無限大と信じる理由として、暗がりでは明かりをつけると一瞬で部屋の隅々まで光が行き渡るように見えたことや、また、光は目から光線が出てそれが物体に届いた時点で見えるという考え方があった。目をつぶり、パッと目を開けた瞬間に夜空の星が見えたとしたら、光は無限大の速さで届くことになる、よって無限大である、という論理である。当時、哲学者・数学者・自然科学者として影響力が大きかったデカルトも『光は無限大の速度を持つ』と述べていた。彼ほどの有名人が光速は無限大であると言うなら、多くの人が信じてもおかしくはない。つまり、光速を測定する前に、光速が有限か、無限か、という議論からスタートしなければならなかったのである。

当時の常識に反して光速が有限であると主張したのはガリレイであった。ガリレイ著書『新科学対話』の中で、光速を測定する方法について述べている[3, 4]。彼はある場所でランプを持った人から約2 km離れたところで待ち、ある時刻が来たらランプで信号を送り、離れた観測者はランプの信号がわかった時点で時間を計り光速を計算することを提案した。この方法は原理的には正しいが、時間を計るのが人間だったために失敗した。しかし、ガリレイは光速が音速と同じように測れるものだと信じ、それを科学的に検証しようと思ったところに意義がある。ちなみに、この実験を実際に実施したのはガリレイ本人ではなく、アカデミア・デル・チメント（イタリアの科学アカデミー）と言われている[2]。

3 レーマーによるイオ食の観測

光速が有限か無限か、という議論に光をもたらしたのがデンマークの天文学者オーレ・レーマー(1644

-1710)であった(図1)。レーマーはパリ天文台のカッシーニの下でガリレイの発見した木星の衛星イオを観測していて、木星によるイオの食が起こる時間が1年を通じてずれる現象を発見した(1676年)。この食の起こる時間は地球が木星から離れるにつれて長くなり(最大22分)、地球が木星に近づくとつれて短くなった。この現象を解釈するために彼は図2のような描像を考えた。もし、光が無限大の速さを持つならば食の起こる時間に時間差が生じないはずである。食の時間のズレは、木星と地球の間の距離が一年を通じて変化するため、その距離の差を光が通過するのにかかる時間だとすると、うまく説明できると主張した。つまり、この時間差は『光速が有限である』とすれば現象をうまく説明できると考えたのである。



図1 : オーレ・レーマー (1644-1710)
出典 : http://en.wikipedia.org/wiki/Ole_R%C3%B8mer

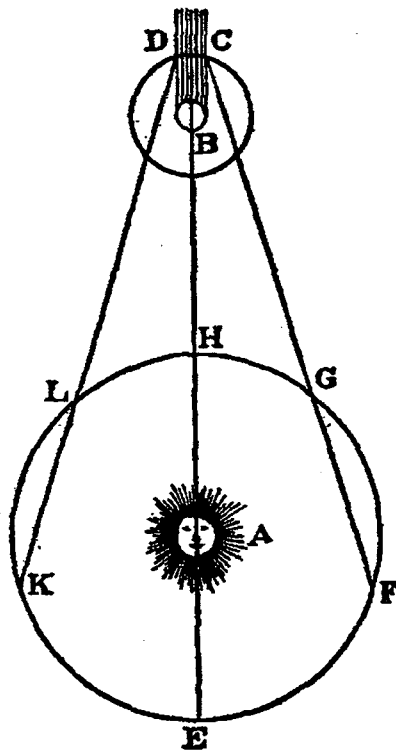


FIG. 70.

図2：レーマーの論文に載っているイラスト。Aは太陽，Bは木星，太陽の周りの円は地球の公転軌道，木星の周りの円はイオの公転軌道を表わしている。

レーマーは光速の測定が目的でイオを観測していたわけではない。実際に、地球の軌道の直系のよい値が知られていなかったため、光速の見積もりもしていないと言う話もある[1, 8]。しかし、少なくとも彼は光速が無限大だったらイオの食のずれが説明できないことを示したことになる。

残念ながら、彼の主張は当時の業界には受け入れられなかった。当時の有力な天文学者でもあるカッシーニは、レーマーがカッシーニの観測データを使ったにも関わらず、誤差の大きさを理由にレーマーの主張を否定した[3]。科学者でさえも、当時の常識を覆すような発見を認めることができなかったのである。この辺りの科学者の人間臭さを知ることができる点は科学史ならではの面白さでもある。

4 ブラッドレーによる光行差の発見

レーマーの発見から60年後、イギリスの天文学者

ジェームス・ブラッドレー（1693-1762）が光行差の議論から光速の測定に成功し、レーマーとほぼ同程度の値を算出した（1725）。

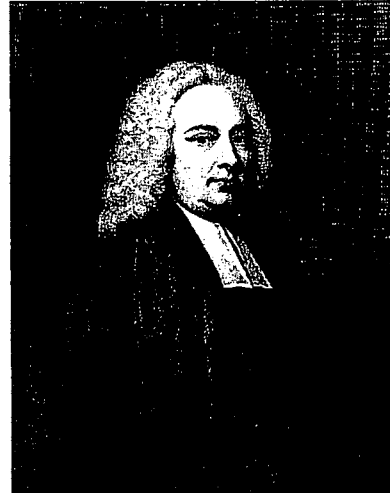


図3：ジェームス・ブラッドレー（1693-1762）。イギリスの天文学者。グリニッジ天文台長も務めた。
出典：http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/James_Bradley.jpg

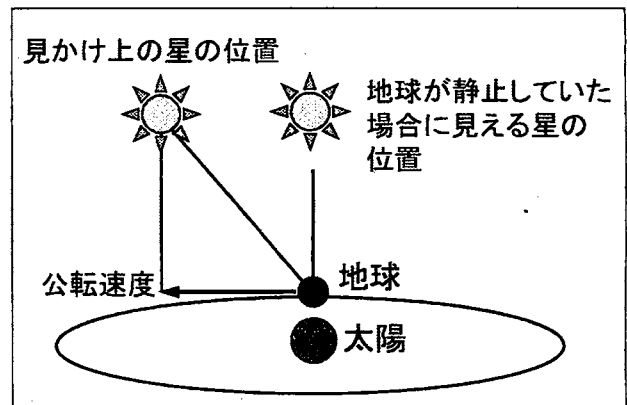


図4：光行差の模式図。地球が公転運動するために天体の見かけの位置は地球が静止していた場合と異なる。

まず、観測者の移動方向に対して垂直な方向にある天体を考える。天体の光が垂直に降る中を、観測者が走り抜けるので、天体の光は斜め前方の空から来たように（すなわち天体が斜め前方にあるように）見えるのだが、実際は真上の空に天体がある。これが光行差である（図4）。

彼は地球の公転移動のために、地球が静止している場合に見える位置と比べて、実際に見える星の位置がずれること、いわゆる、光行差を利用して光速

を求めた。

$$c = 299042\text{km/s}$$

独立な2つの方法で求めた値が一致したことで、レーマーの観測も受け入れられるようになった[3]。ちなみに、ブラッドレーの観測はレーマーの時代の太陽-地球間距離の不定性が改善され、公転速度が精度よく決まっていたために、現在の値に近いものが出ていると思われる。

あとは、地上実験での光速測定の歴史を簡単にまとめておく。

*フィゾーの実験 (1849年)

フィゾーは歯車を使った実験によって地上で初めて光速を測定することに成功した。

ちなみに、高校物理の教科書でフィゾーの実験は光の単元を学ぶ際の導入部分で必ずといっていいほど出てくる。彼が求めた値は、以下の通りである。

$$c = 315300 \pm 500\text{km/s}$$

これは物理の実験であるから結果にはエラーバーがつく。プラスマイナス500km/sの精度で求まるまでに100年以上かかっている。

しかし、彼の実験は歯車を通り抜けてくる光の明暗の識別が正確でなかったため、あまり信用されていなかった。

また、彼はドップラー効果から星の視線速度が決定できることを指摘したと言われている[8]。

*フーコーの実験 (1862年)

フィゾーの実験から13年後、フランスのフーコー(1819-1868)は回転鏡を使うことで、フィゾーの実験でネックだった基線長を大幅に短くし、且つ、精度良く光速を測定した。

$$c = 298000 \pm 500\text{km/s}$$

また、彼は空気中と水中での両方で光速度を測定した。これは当時の論争だった、光の粒子説と波動説の検証実験でもあった。

*近代における光速測定

マイケルソンは、フーコーの回転鏡を改良した“マイケルソン干渉計”を発明し、さらに精度よく光速を測定した (1926年)。

$$c = 299796 \pm 4\text{km/s}$$

ちなみに、このマイケルソンはエーテルの検出で有名なマイケルソン・モーレーの実験を行った人物と同一である。

1973年にエベンソンがレーザーによる光速測定 ($c = f\lambda$) を行い、

$$c = 299792458 \pm 1.2\text{m/s}$$

という値を得た。ここで、やっと現在使われている桁数まで到達した。フィゾーによる光速測定の実験が始まってからこの精度まで120年もかかっている。

このように光速の測定には非常に長い歴史があったことがわかる。ガリレオの時代からレーザーによる光速測定までは約240年もかかっているのだ。普段何気なく使っていた単なる定数 c の値に長年の歲月、労力が費やされていたとわかり、あらためて感服した。

これらからわかるように、光速測定の黎明期には天文学が非常に重要な役割を果たしていた。実際に光速の値は有効数字1桁の精度で天文学が決定し、フィゾー以降の実験は精度を高める歴史であったといっても過言ではない。

5 授業教材としての光速測定

私は科学的な発見の歴史を深く掘り下げることは科学教育にとって重要であると考えている。なぜなら、初学者の科学的思考は過去にあった思考に似ていることが多いからである[3, 6]。どの時代でも人間の考え方は似たようなものである。ゆえに、歴史的な経緯を知ることで自分の考え方のどこが間違っていたのかを知ることができる。また同時に、科学的な思考の進め方も学ぶというメリットもある。

授業の中で扱うときの科学史は新しい分野を始めの際のイントロダクションとして有効である。前節でレーマーの問題の計算手順と同じ方法で見積もることで、速度測定の本質が理解できる。つまり、調べたい物体がある距離を移動するのにかかる時間を測ること、で速度測定が可能になる。

ここで私が授業で使ったスライドを紹介する。

時代の先駆者:レーマーの観測

～木星の衛星(イオ)の奇妙な運動～

レーマーはイオが木星の周りを回るときに食の時刻がわずかに変化することに気が付いた。地球が木星から遠ざかるときは6ヶ月に渡って衛星の食は予定よりも遅くなり、近づくとときは残りの半年で再び元にもどる。

光が木星から地球に届くまでに有限の時間がかかるとすると説明がつく。

図5：授業で使用したスライド1

観測結果から光速を見積もる

- ① イオが木星に隠れる時間(イオ食CDの時間)はどれくらいか。
- ② 地球がH点に居るときとE点に居るときに測った食の時間間隔の差が約20分であった。そこから光の速度を見積もりなさい。

わかっている情報:
 地球-太陽間の距離:1天文単位(1.5×10¹¹m)
 木星の衛星(イオ)の公転周期(1.761日)
 木星の半径7.1×10⁴[km], イオの軌道半径 581[km]

Fig. 70.
レーマーの論文1

図6：授業で使用したスライド2

レーマーの問題:計算手順

- ① イオが木星を横切る速度Vを考えると、

$$V = \frac{\text{軌道円周の長さ}}{\text{公転周期}} = \frac{2\pi(r+R_s)}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times (581 + 7.1 \times 10^4)}{1.8 \times 3600 \times 24} = 2.9 \times 10^3 [m/s]$$
 イオが木星を横切る時間 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{\text{木星の直径}}{\text{公転速度}} = \frac{2R_s}{V} = \frac{2R_s}{2\pi(r+R_s)} T = \frac{R_s}{\pi(r+R_s)} T = 4.8 \times 10^4 [s]$$
- ② 地球で観測:H点に居るときとE点に居るときに観測する食の時間差 Δt は20分程度⇒光が太陽-地球間の2倍を移動するのにかかる時間である。よって、光の速度cは

$$c = \frac{\text{地球-太陽の距離の2倍}}{\text{食の時間差}} = \frac{2R_{\odot}}{\Delta t} = \frac{2 \times (1.5 \times 10^{11})}{20 \times 60} = 2.5 \times 10^8 [m/s]$$

図7：授業で使用したスライド3

実際の授業では計算を2つのステップに分けた。初めに、太陽-地球間の距離(1天文単位)やイオの公転周期(1.761日)、木星の半径(71,492km)、イオの木星軌道半径(5.905)などのすでにわかっている情報を与えた後に、

- ① イオが木星に隠れる時間(イオ食CDの時間)はどれくらいか。
- ② 地球がH点に居るときとE点に居るときに測った食の時間間隔の差が約20分であった。そこから光の速度を見積もりなさい。

という問いを用意し、実際に計算をさせた。

ブラッドレーの観測(1725年)

$c = \frac{v}{\tan \theta}$

$c = 299042 \text{ km/s}$

ブラッドレーの観測によって、
 光速が有限であることが世間に認められた。

図8：授業で使用したスライド。ブラッドレーの光行差による光の測定

この計算は物理Ⅱの円運動と万有引力の法則が必要であるが、それ以外は単なる計算で高校生にとっ

て何ら難しいものはない。ブラッドレーの観測についても計算に使うのは三角関数だけである。

ここで得られた値を現在の光速の値と比べてみると、有効数字1桁の精度であることがわかる。当時の地球-太陽間の距離や測定値に10%程度の誤差があったとしても、桁は変わらない。つまり、光速の値は、桁の上ではほぼ推定できたといっても過言ではない。レーマーが生きていた230年前と同じ方法で、大体の光速の値を見積もるだけでも、感心する生徒がいるかもしれない。

今回は教材に対する教育的な効果を検証できるようなデータをとらなかったので、科学史を導入することの教育的な効果については何も言えない。今後は、今回調べた科学史を教材として授業に導入し、その教育的な効果についても研究を行いたい。

6 まとめ

科学における発見の歴史から学ぶことには非常に大きな意義があることは言うまでもない。しかし、現在の教科書には年表が載っているだけで、史実から学ぼうというスタンスを取っている教科書は皆無である。高校物理の教科書では膨大な量の法則と公式をわかりやすく・正確に説明することに全力が注がれ、物理法則の魅力を伝えることには殆ど注意が払われていない。HOSC物理は科学研究と歴史的事例を取りあげて科学への適正な理解を与えようとする教材で、ハーバード大学ではじまり、その後高校の理科教師たちの手で高校の授業用に改良された。30年前の教材であるが、現在においてもその内容の新鮮さは色あせない。今後、このような科学史を利用した教材の開発が生徒の科学的な思考を養うために重要であろう。

物理の教材と言えば、実験と相場が決まっているが、今回挙げたような科学的な発見の歴史を学ぶことも教育的には十分価値があると思う。物理教員はこういった歴史を調べて教材化することも視野に入

れて研究を進めていきたいと思う。

今回調べてみてわかったが、こういった発見の歴史は文献が少ない上に、孫引き（引用文献の引用）が多いため、少しずつ事実が曲げられる恐れがある。真実を知るためには原著論文を当たる必要があるが、原著論文は様々な言語で書かれているために調査は非常に困難である。しかし、こういった地道な調査を続けていくことで隠れていた真実に陽が当たるかも知れない。

参考文献

- [1] アドバンシング物理 J.オグボーン/M.ホワイト
ハウス編 笠耐/西川恭治/覧具 博義 監訳
シュプリンガー・フェアラー東京
- [2] HOSC物理 レオ・E・クロッパー 渡辺正雄
訳 講談社
- [3] 教師のための「科学史教育入門」高橋哲郎著
新生出版
- [4] 世界科学者辞典3天文学者 デービット・アボ
ット編・伊東俊太郎訳 原書房
- [5] 天文教育普及研究会 会誌 2008年9月号P40-
45 渡會兼也
- [6] 授業づくりのための理科教育法 左巻健男編著
東京書籍
- [7] A Demonstration concerning the Motion of
Light, communicated from Paris (The 1676
paper on the speed of light, in English and
French)
- [8] Rømer and the Doppler Principle. Erling
Poulsen
<http://www.rundetaarn.dk/engelsk/observatorium/light.htm>