

投稿

光速測定の歴史と天文学

渡會兼也（金沢大学人間社会学域学校教育学類附属高等学校）

光の速さを測定する方法は高校物理の波動分野で紹介されている。歴史的に見ると、レーマーのイオ食の観測（1676年）やブラッドレーの光行差の発見（1725年）による光速の見積もりは、フィゾーの実験（1849年）の100年以上前に行われており、光速測定の際に天文学が重要な役割を果たしていたことがわかる。今回、光速測定の歴史を紹介するとともに、天文学が果たした役割や高校物理の問題点についてもコメントしたい。

1. はじめに

高校物理の教科書（正確には物理Ⅰの波動分野）を見てみると「世界で最初に光速を測定したのはフィゾーである」という記述に出くわした。確かに、地上実験で初めて光速を測定したのはフィゾーであることは事実である。しかし、光速の値はフィゾーよりも大分前に天文学的な観測（後述）によって大体わかっていたはずだ。調べてみると、フィゾーの実験の100年以上前にレーマーの木星の衛星の食を使った観測やブラッドレーの観測から光速は推定されていた。

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[1]。つまり、学校が採択した教科書によって、光速測定における歴史的な認識が変わってしまう可能性がある。

学校の先生は教科書で授業をしているわけではないが、高校生にとって『教科書』の記

述は絶対的・権威的な存在である。生徒にとって光速測定の歴史的な経緯を知ることは科学的な興味を深める点でも役立つであろう。

今回、授業用に色々と光速測定の歴史を調べてみると、天文学が非常に重要な役割を果たしていることがわかった。授業ではすべてを伝えることが出来なかったので、記録代わり（備忘録という方が正しい気がする）にこの文章を書くことにした。

「光速測定」とは言っても原理は単純で、「光がある距離進むのにかかる時間」を測るだけである。しかし、いかに昔の方法と独立した方法でかつ、精度良く測ることができるか、というところに科学的なロマンが潜んでいる。

以後の節では、光速測定について天文学的な測定二つと大まかな歴史を紹介した後、高校物理と天文学の関連や先に挙げた教科書の問題、天文教育普及への方策をコメントさせていただきたい。

2. 光速測定の歴史

1600年代までは「光の速度は無限大である」というのが一般常識だったらしい。日常生活では、光の速度は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。例えば、ケプラーやデカルト、当時の天文業界の権力者であったカッシーニも光速が無限大であると信じていた[2][3]。

無限大と信じる理由として、暗がりでも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からだ。例えば、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と思うのが普通だろう。

当時、哲学者・数学者・自然科学者としての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。

しかし、当時の常識に反してガリレイは光速が有限であると主張した。つまり、光速測定黎明期の黎明期は、光速が有限か、無限か、という議論からスタートしたのである。

2.1 ガリレイの光速測定 (1638 年)

一般に、最初に光速の測定を試みたのは、ガリレイだと言われている。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。彼はある場所でランプを持った人から約 2km 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る。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って光速を計算しようとした (図 1)。この方法は当然ながら失敗した。原理的には正しい方法だが、問題は時間を計るのが人間だったという点である。

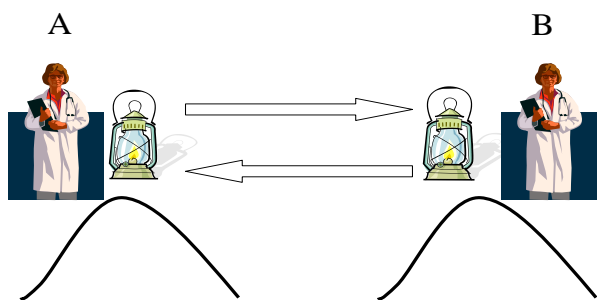


図 1 遠く離れた 2 地点で、ランプを使って光が往復する時間を測定する。まず、A がランプのカバーを外して光を送る。A のランプが暗くなったら B もランプのカバーを外す。B のランプが明るくなるまでの時間を A が計測する。

ちなみに、実際この実験を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]。

2.2 レーマーのイオ食の観測 (1676 年)

デンマークの天文学者オーレ・レーマー (1644~1710) は、ガリレイの発見した木星の衛星イオの食が起こる時刻に約 22 分の時間差があることに気が付いた。

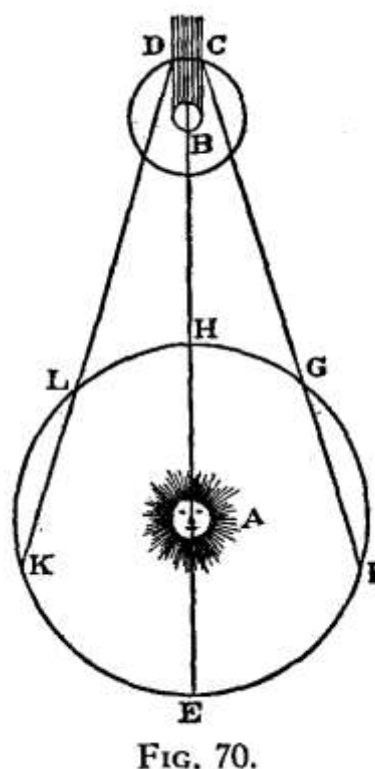


Fig. 70.

図 2 レーマーの論文に載っているイラスト。レーマーは地球が木星に向かって動くとき (F から G) と地球が木星から遠ざかる時 (L から K) のイオの軌道の間隔を比較し、最大 22 分のずれがあることを示した [4]。

レーマーは、この時間差を光が地球の軌道直径 (図の HE 間) を横切る時間に相当すると考え、現象がうまく説明できること論文中で指摘した (1676 年) [2][4]。これは同時に光の速度が有限であることを示していた。

レーマーは有限であることを指摘しただけで、実際に光速を見積もっていない[5]。

ゆえに、実際に当時の地球と太陽の間の距離を用いて、光速を見積もると、

$$c = 214300 \text{ km/s}$$

となる[10]。この値は、当時の地球—太陽間の距離や時間の測定に誤差があったにも関わらず、オーダーが合っているのは驚異的である。

しかし、当時の人々にとってその速さは、想像できないくらい速かった。そのため、当時の人々は光の速度が無量大である、というデカルトの主張に相当する、と解釈した人も多くいた。また、当時影響力のあった天文学者カッシーニが彼の結果を認めなかったため、当時はあまり信用されなかった。

2.3 ブラッドレーの光行差 (1725 年)

ジェームス・ブラッドレー (1693~1762) は、レーマーの方法と独立の方法で光速を測定した (1725 年)。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。

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

これは、現在の値にかなり近い値である[11]。このブラッドレーの発見によって、レーマーの観測も認められ、光速が有限であることがほぼ確定した。レーマーの観測から約半年後である。

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、観測者が走り抜けているので、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 3)。

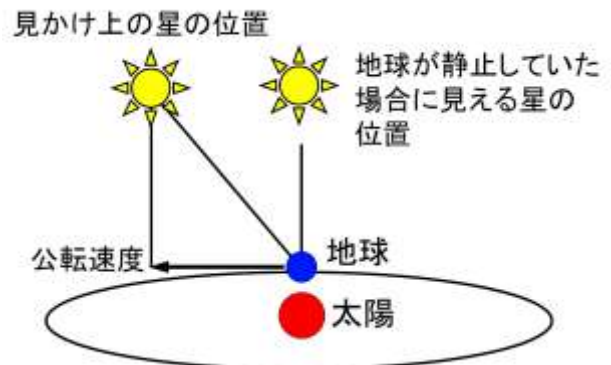


図 3 光行差の模式図。地球が公転運動するため天体の見かけの位置は地球が静止していた場合と異なる。

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。

2.4 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。±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[5]。

2.5 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、かつ、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。

2.6 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 の値に長年の歳月、労力が費やされていたとわかり、あらためて感服した。私は時々、光速の値を $3 \times 10^8 \text{ m}$ として計算するが、省略することが申し訳なく思えてきた (笑)。

この歴史的な経緯を考えれば、光速の測定値を一度ぐらい舐んでもいいのではないだろうか。

3. 光速測定の歴史と教科書

ここまで挙げた例を見ると、現在では当然のように使っている光速の測定には多くの年月が費やされていることがわかる。しかし、重要なのは、光速が有限か無限かという問題に天文学が決着をつけただけでなく、同時に桁まで決定していたことである。後の地上実験はいかに精度を上げか、という歴史である。つまり、天文学による光速の測定が歴史的にも非常に重要な役割を果たしていたことは明らかである。これは教育をする際にも、無視できない事項であると思う。

現在の高校物理の教科書は、物理法則に関する説明は盛り沢山だが、読み物としての魅力はほとんどない。本校の本棚にあった一番古い物理の教科書 (1983 年) を見ても、教科書の「魅力のなさ」は変わっていない。変わったのはカラー刷りになったことと、コラムが増えたくらいである。これは日本の物理の教科書の伝統のようだ。この「魅力のなさ」の原因は色々あると思うが、その一つは、歴史的な記述が少ないことだと個人的には思っている。

初学者は知識がないために、先人と同じ考え方をすることが少なくない。歴史を学ぶことは先人の足跡をたどり、科学的が進むべき方向を示してくれる。

例えば、イギリスの教科書『アドバンシング物理』[3]では、光の粒子説—波動説の一連の論争に加え、当時の社会的な背景にも 2~3 ページを割いて話が展開されている。また、レーマーの観測についても観測方法だけでなく、当時の歴史的な背景まで記述がある。

また、『HOSC 物理』[2]は、物理学の単元を歴史的な背景も含め、誤った概念も何がお

かしいのかと一つ一つ振り返りながら学習していく教材であるが、そこでも歴史の足跡を辿ることは重要なテーマになっている。

人類がその当時考えていたことを一つ一つ取り上げ、どこまで正しくて、どこが間違っていたかを指摘することは科学的なものの見方を養う上で大切であろう。科学の歴史的背景を学ぶことは、科学に対する畏敬の念を抱く機会を与える効果もある。

教科書の内容があまり変わらないのには、さまざまな理由があるだろう。ただ、今後本当に理科が好きな若者を育成するためには、もっと現代に即した内容や歴史的内容を積極的に盛り込んだ魅力ある教科書作りが必要だと思う。物理学の現象の多くは天文学によって検証されている。先に挙げた光速測定の話もそうであるし、万有引力の法則は、ケプラーの法則を使って導かれている。また、一般相対論の空間の歪みも天文学の観測によって検証された。ゆえに、天文学を取り入れるのは話の自然の流れである。

高校生の負担を減らす、という配慮で歴史的な背景を省くことは自然科学の理解そのものを妨げるおそれがある。

4. 高校物理で天文普及を！

一方、高校の物理で天文学の内容に触れることには、天文普及にとって非常にメリットがある。なぜなら、高校生の地学と物理の履修人数を比べると物理の方が圧倒的に多いからだ。正確な比率はわからないが、センター試験の受験者数を見ると、物理の受験者は地学のそれと比べると5~6倍いる。つまり、高校での天文普及のカギは物理にある。

もし、物理の教科書で天文関係の題材を扱うことができれば、天文学普及にも大きく貢献できる。そのためには、天文関係の偉い先生方に物理の教科書執筆に積極的に関わって

もらいたいと思う。とある教科書の執筆者に天文業界の偉い先生の名前が入っていた。教科書を見ると、なるほど、天文学やその先生の専門分野であるX線の話が比較的多く取り上げられているのではないか。教科書で取り上げることができる天体现象には限りがあるが、高校生にとっては権威ある物理のテキストである。「たかが教科書、されど教科書」である。

こういった形での普及活動もこれから重要だと考える。

5. 最後に

リチャード・ファインマンの有名な言葉にもあるように、原子や分子、量子力学の概念は重要だと思う。しかし、原子分野は大学入試では選択範囲になり、出題する大学が少ないため、高校生が本腰を入れて勉強しない、という現状がある。科学史についても同様である。高校生は科学の進歩の経緯をほとんど何も知らないまま、「科学の法則」だけを学び大学に入る。こんな状況では科学が好きな人材は育たないのではないだろうか。

今回私は一つのテーマに基づいて発見の歴史を調べる際に、科学史を学ぶこと自体に教育的な意義を再認識したが、それにもまして調べるのが楽しかった。同時に「なぜ、こんな面白い歴史的なシーンが教科書では削られているのか？」と思わずにはいられなかった。

魅力ある教科書やカリキュラムづくりのためには、天文学はもちろん、他分野とのつながりも重要である。物理・化学・生物・地学といった区分をなくし、融合・境界を無くすことも今後の教育業界は視野に入れるべきではないかと思う（矢治氏の記事[9]参照）。

追 記

本年度から金沢大学の再編とともに附属学校の名前も変わり、日本一校名が長い学校になった（金沢大学人間社会学域学校教育学類附属高等学校）。ここまで長いと書類の空欄に名前が入らなかったり、時間がかかったりと、都合が悪いことが数多く出てくる。逆に、名前が長くなったおかげで、以前よりも略称「金沢大学附属高等学校」が頻繁に使われるようになった。

謝 辞

この文章を査読していただいた金沢大学附属高等学校の西村百恵さんに感謝いたします。

文 献

- [1] 高等学校『物理 I』の教科書（啓林館，数研出版，実教出版，東京書籍，第一学習社）。
- [2] レオ・E・クロッパー『HOSC 物理』（渡辺正雄 訳），講談社。
- [3] J.オグボーン/M.ホワイトハウス編『アドバンシング物理』（笠耐・西川恭治・覧具博義 監訳），シュプリンガー・フェアラーク 東京。
- [4] A Demonstration concerning the Motion of Light, communicated from Paris (The 1676 paper on the speed of light, in English and French)

[5] Romer and the Doppler Principle. Erling Poulsen

<http://www.rundetaarn.dk/engelsk/observatorium/light.htm>

[6] 『理化学辞典 第4版』，岩波書店。

[7] 吉本市著『物理精義II』，培風館。

[8] デービット・アボット編『世界科学者事典 第3巻天文学者』，原書房。

[9] 矢治健太郎（2008）「物理学科の高校地学履修者」，天文教育，20（3）：65。

[10] この値は文献によって違いがある。例えば、『世界科学者事典』では $c=225000\text{km/s}$ 、『理化学辞典』では、 $c=225000\text{km/s}$ である。原著論文が手に入らないので確認ができず、困っている。どなたかご存知ならば教えてほしい。

[11] この値も文献によって値が違う。例えば、『世界科学者辞典』によれば $c=308300\text{km/s}$ 。

渡會兼也