

物理 I 「時間って何だ？」

理科(物理) 村 井 利 行

1. はじめに

物理 I の熱分野は内容的に軽い扱いになってるが、熱分野は多少深入りしてこそ面白みが出てくる。今回、公開研究授業という機会を使って、物理 I 熱分野の特別授業を实践した。3 回の授業 (45分×3) を通して、まずは熱力学から切り離して「時間」の話題を取り上げ、次に熱現象と密接な関連のある、いわゆる「時間の矢」について取り扱った。前半は、時間についてのパラドックス、ニュートンの「絶対時間」とアインシュタインの相対性理論が示す「時間の相対性」であり、後半は熱力学第二法則と時間の関係である。公開授業は一連の授業の「最終回」に当たった。この一連の授業は 2 年生の必修授業であり、全クラスで実施したが、公開授業では 38 名が出席した (若干名の生徒が他の授業に出席)。参観者は 6 名 (2 名は本校教員) であった。

さて、なぜ「時間」を取り上げたか。一つは、生徒達に、自然認識の根本問題というような極めて晦渋な問題について考える機会をあえて与え、知的な好奇心を引きだそうということである。テクニカルな面では、熱力学第二法則の理解と平行して、「時間」という捉えにくいモノを科学的に考察していく一つの方法を示すことである。もう一つの目的は、私自身の研修である。教師は生徒に対して「自ら学び、自ら判断する姿勢が必要」と言うことが多い。だったら教師はその見本を見せなくてはいけない。そのような発想も今回の特別授業を思い立った理由の一つである。授業の内容が完全でないことは承知の上での挑戦であった。

この特別授業のために、12 ページのオリジナルテキスト、いくつかの自作ビデオ映像を用意した。

2. 3 時間の特別授業

1 時間目: 「時間についての疑問、科学的な“時間”」

テキストより

- ・時間に始まりがあったの？ あったとして、それ以前はどうなっていたの？ 「最先端の宇宙論によると、宇宙は時間と共に生まれた」なんて聞くことがあるけれど、時間がないときはどうなったの？ 時間に終わりはあるの？？ 終わったら…？？ $m(_)m$
- ・「時間は一定の速さで過ぎていく」って感じるけれど、時間の“速さ”って何？

何に対する速さ？ 単位は何？ …m/sではなくs/s?!(><)

・時間はどのようにして“流れる”の？ 流しているのは誰？

勝手に流れてるの？ どうして逆に流れたりしないの？

このような素朴な疑問から始めて、ゼノンのパラドックスやその発展形を紹介、時間について考える面白さや、もどかしさを伝えた。

次に、科学的な「時間」として、ニュートンの「絶対時間」の概念を確認し、次いで相対論的な「時間」にも触れた。同時の相対性や時間に対する重力の効果を紹介し、実際にGPSなどで考慮されていることにも触れた。相対論の理論的な扱いは、必修授業では無理があると判断し、テキストには書いておいたが、授業では説明しなかった。もし相対論だけ扱うのなら、それなりのやり方が可能だが（高校生なら、じっくり取り組んでくれれば理解できると思う）、今回は「時間の矢」に重点を置きたかったので、相対論的效果については話題提供といった程度にとどめた。

2 時間目：「不可逆性とエントロピー」

不可逆過程の紹介・説明から始めて、不可逆性のキーワードがエントロピーであることを説明した。エントロピーについては、種々の例を示してイメージをつかんでもらうという方法を取った。具体的には「4. エントロピーのイメージを与える工夫」を参照されたい。

不可逆過程はエントロピー増加の過程であることを示し、さらに、エントロピーは部分的には減少することに注目させた——しかし、全体としてはエントロピーはつねに増加するので、熱力学第二法則を「結局、エントロピーは増加する」と表現した。このような極めて大雑把な理解でも、広く応用が可能である。

3 時間目（公開授業）：「エントロピーと時間の矢」

ビデオ映像（自作）を用いて不可逆性についての復習を行い、観点を変えると、それが時間の進む向きと関係していることを指摘。さらに、「ミクロの可逆性」と「マクロの不可逆性」についても説明した。最後に、自然界では部分的なエントロピーの減少が様々なところで生じており、それが多様な世界を作り上げていることを指摘した。

3. 公開授業

(1) ビデオ上映「時間反転」

5分程度のビデオ映像（自作）を上映した。ビデオは、不可逆過程の映像を逆進行再生したもので、「コーヒーにミルクを混ぜる」「容器にから出た多数の小粒子（エアガンの玉）が広がっていく様子」「水まき」「ボールのバウンド」「鍋に入れた氷を炎で溶かす」を映した。

この映像は、見ればすぐに「逆送り映像」と判断できるが、「もし、現実にならそれが生じたら？」と問いかけ、不可逆過程の逆進行が現実になら、おそらく「時間の進み方が逆になった」と感じる、と指摘。そのような意味で、エントロピーの増加が「時間の向き（時間の矢）」をつくり出している、と

いう考え方を説明した。

(2) エントロピーは、部分的にはしばしば減少する

輪ゴムを各生徒に配り、簡単な実験を行った。輪ゴムを唇の下に押し当てながら、急に伸ばしたり、急に縮めたりして、それに伴う温度の変化を感じ取る。輪ゴムを伸ばしたとき、分子構造のエントロピーは減少するが、温度上昇（熱発生）に伴うエントロピーの増加があり、全体としては「結局、エントロピーは増加する」と説明した。

(3) 「ミクロの可逆とマクロの不可逆」

「質量3：1衝突球」を使って、可逆な運動について説明。衝突球のビデオ映像を逆転再生するなどして、「可逆過程とは、速度反転で元に戻る過程」ということを強調した。

次に、ミクロの世界は可逆であることを説明し、それはパラドックスを生むことを提示した：不可逆過程であっても、ある時点ですべての分子の速度を反転させたと考えると、状態は元に戻る。小さな発泡スチロール球を分子に見立てたモデル実験のビデオ映像を、順方向・逆方向・コマ送りで再生させ、説明に活用した。最近の素粒子実験の成果を伝える新聞記事を示し、このパラドックスを解くことがホットな話題になっていることにも触れた。

(4) まとめ

PowerPointで編集しておいた特別授業3時間分の概略を用いて、全体のまとめを行った。「生命は、時間に逆らっている存在かもしれない」という詩的な表現で授業を終えた。

4. エントロピーのイメージを与える工夫

エントロピーのイメージを与える工夫として、テキストに次のような図解（キッテル『熱物理学』丸善を参考にした）と演習問題を用意した。

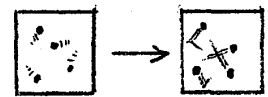
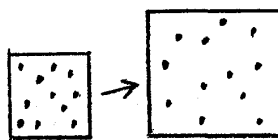
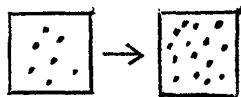
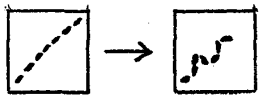


① 分布が広がる

② 形が崩れる

③ 運動の向きが散らばる

④ 分子が分解する



⑤ 長い分子が曲がる

⑥ 数が増える

⑦ 体積が増す

⑧ 温度が上がる

問 次の(1)~(8)の現象において、注目している事柄（アンダーライン）のエントロピーは増加しているか、減少しているか

(1) 身体が冷え切っていたが、風呂に入ったら全身ぽかぽかになった。

(2) 紅茶にミルクを入れて、ミルクティーにする

(3) 走っている車がブレーキをかけて止まり、熱が発生した。

(4) 水蒸気が冷え、雪の結晶ができてくる。

(5) 太陽光からの可視光が地面に吸収された後に、赤外線となって放射される。

赤外線も光の一種である（目には見えないが）。光は粒子（光子という）の性質を持っていて、赤外線の光子1個は可視光の光子1個よりエネルギーが少ない。

(6) 気体原子が重力で集まり、やがて太陽や地球になった。

(7) 水素と酸素が化合して水ができた。

(8) 輪ゴムを伸ばした（ゴムは、分子が鎖のように長くつながってできている）。

問 上問(1)~(8)中のエントロピーが減少している例においても、熱力学第2法則は成り立っているのである。エントロピーは結局増加しているのだ。どういうことか説明せよ。

問 教室掃除の必要性和熱力学第2法則（エントロピーの増加傾向）との関連について考察せよ（あくまでも「例え話」としての関連である）。

問 いわゆる「エネルギー問題」の本質は「エントロピー問題」であることを説明せよ。

5. まとめ

「時間」は誰にとっても身近であり、「時間とは何か」は、自然認識の根本問題であることは誰でも認める。同時に、誰もが「つかみ所がなく、どうせ“答え”は出ない問題」と思う——むしろこれは健全な判断だと私は思っている。しかし、結論が出そうにない問題にあえて取り組んでみるという経験も、高校生にとって有意義である。およそ創造性の原動力は、そのような活動にある、と私は考えている。私自身が、「時間」についてどこまで理解できるか。生徒の興味関心をどれだけ引き出すことができるか。この授業はそういった意味での挑戦でもあったが、まずまずの成果を上げたと思自負している。少なくとも、時間の話について生徒は興味を持っていることが分かったし、エントロピーの導入も無理でないことが分かった。

拡散や時間反転の説明には、コンピュータシミュレーションが有効だが、今回は準備できず残念で

あった。非平衡散逸系を扱うのも魅力的である。カオスについては「磁石振り子」を実際に用意したが、授業時間がなくなり割愛した。今後も機会を見て、「時間」の話題を発展させ、同時に授業の方法も改善していきたい。

研究協議では、次の事柄について活発な議論が行われた。

- ・今回の授業内容のような、教科書には決して載らない事柄を授業で扱う意義
- ・エントロピーの導入方法
- ・新教育課程の問題点

特に結論を出すことはしなかったが、様々な情報交換も兼ねて、有意義な協議会であった。

公開授業の導入部で使ったビデオ映像では、息子に“時間が逆流する世界”を演じてもらった。学校に一人残ったの準備と比べ、気持ちにゆとりができ、作業もスピーディー、面白い発想も次々に出てきた。“共同研究”の必要性を痛感した次第である。

旧教官の岩田一雄先生（私は岩田先生の後任）がわざわざ公開授業を見に来てくださったことに感激した。90歳を超えるご高齢にもかかわらず「時間については私も興味があります」とおっしゃる先生の情熱に接することができ、とてもありがたいひとときであった。この場をお借りして、感謝の意を表します。

参考書籍

- キッテル『熱物理学』丸善 1983
- アトキンス『エントロピーと秩序』日経サイエンス社 1992
- ルエール『偶然とカオス』岩波書店 1993
- コヴニー、ハイフィールド『時間の矢、生命の矢』草思社 1995
- 田崎秀一『カオスから見た時間の矢』講談社ブルーバックス 2000
- プリゴジン『存在から発展へ』みすず書房 1984
- ガードナー『新版 自然界における左と右』紀伊國屋書店 1994
- 松田卓也、二間瀬敏史『時間の逆流する世界』丸善フロンティアサイエンスシリーズ 1987
- 数理科学 2004.7『時間の矢とは』サイエンス社
- ペンローズ『皇帝の新しい心』みすず書房 1994
- デイビス『時間について』早川書房 1999
- 都築卓司『時間の不思議』講談社ブルーバックス 1991
- 伏見康治他『時間とは何か』中央公論社自然選書 1981
- 数理科学 2001.1『時間とは何か』サイエンス社
- 日経サイエンス 2002.12『時間とは何か』日経サイエンス社
- ジョーンズ『原子時計を計る』青土社 2001
- アシュビー「相対論とGPS」パリティVol.18 NO.6 2003-06 p.18

アインシュタイン、山内龍雄解説『相対性理論』岩波文庫 1988
テイラー、ホイラー『時空の物理学』現代数学社 1981
シュッツ『相対論入門 上・下』丸善 1988
ウィーラー『時間・空間・重力』東京化学同人 1993
Carroll、Ostle『Modern Astrophysics』Addison Wesley 1996
ソーン『ブラックホールと時空の歪み』白揚社 1997
ゴット『時間旅行者のための基礎知識』草思社 2003
都築卓司『新装版 タイムマシンの話』講談社ブルーバックス 2002
林 晋『パラドックス!』日本評論社 2000
パウンドストーン『パラドックス大全』青土社 2004