

レンズの物理：望遠鏡から重力レンズまで サイエンス・パートナーシップ・ プロジェクト活動報告



渡會兼也

渡會兼也・榎田豪利

〈金沢大学附属高等学校 〒921-8105 石川県金沢市平和町 1-1-15〉

e-mail: watarai@kfshs.kanazawa-u.ac.jp

米原厚憲・遠山裕貴

〈京都産業大学理学部 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

平成 22 年 12 月に金沢大学附属高等学校で開催されたサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト『レンズの物理：望遠鏡から重力レンズまで』の活動内容を報告する。今回の企画は宇宙に関する講義だけでなく、アクリル樹脂による重力レンズ作製と測定実験を行うことによって、重力レンズへの単なる興味・関心から一歩踏み込んだ理解へ到達しようという試みである。本稿では活動報告だけでなく、樹脂によるレンズ作りのノウハウについても紹介する。

1. はじめに

本稿は平成 22 年度サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト（以下 SPP）に採択された『レンズの物理：望遠鏡から重力レンズまで』の活動報告である。ご存じの方も多いと思うが、SPP は独立行政法人科学技術振興機構（JST）が行っている事業の一つで、『児童生徒の科学技術、理科・数学に対する興味・関心と知的探求心等を育成することを目的として、学校等と大学・科学館等との連携により、科学技術、理科・数学に関する観察、実験、実習等の体験的・問題解決的な学習活動に対して支援を行う』事業である¹⁾。実施日は平成 22 年 12 月 11 日（土）の午後と 12 日（日）の午前中で、場所は金沢大学附属高等学校の物理講義室である。タイトルはレンズの物理だが、重力レンズ現象を高校生に肌で体感してもらうことが中心の企画である。

今回、筆者（渡會）がこのような企画を催した

のには理由がある。筆者は過去の科学イベント等での経験²⁾⁻⁴⁾から、重力レンズ現象が、多くの人に対して宇宙の神秘を感じさせてくれる現象であることは認識していた、科学イベント等では、その本質まで伝えることは難しいと感じていた。例えば、アクリル製重力レンズや重力レンズシミュレーターを使えば像の歪み・変形を楽しんだり、興味をもってもらったりするかもしれないが、なぜそうなるのか？ という理解にまでは至らない。もう一歩踏み込んで重力レンズの理解を目指したい、と考えたのが今回の企画である。また、本校生徒の学力は非常に高いが、サイエンスに触れる機会が少ないことも、今回の SPP 参加の動機として挙げられる。以下に詳しい内容を報告する。

2. プログラム

プログラムは以下のとおりである。実施日が期末試験後の土日だったためか、募集人員 20 名に対して、参加者は延べ 13 人だった（本校生徒のみ）。

12月11日(土)

13:30-13:40 はじめに(渡會から講座の諸注意)

13:40-14:30 講義「宇宙におけるレンズについて」講師: 京都産業大学 米原厚憲先生(40分)

14:30-14:50 講義「望遠鏡の原理について」
講師: 京都産業大学 4回生 遠山裕貴さん(20分)

(10分休憩)

15:00-15:15 アクリル製重力レンズの説明
米原先生(10-15分)

15:15-16:30 シリコンで型を作り, アクリル樹脂で重力レンズを作製

12月12日(日)

9:00-10:00 重力レンズの加工・修正

10:00-11:30 課題

11:30-12:00 まとめ&アンケート提出

3. 重力レンズと望遠鏡の講義

まず, 講師の米原から重力レンズについて講義があった。はじめに高校生にとってなじみのない「光が曲がる」という現象について, 一般相対性理論に基づく考え方を説明した(式を使わない)。光を見る立場が変わると光が曲がる場合があり, 光が曲がるのは空間が歪んでいるときである, ということを, 例を交えて解説した。その後, われわれの実生活でどれくらいの光が曲げられているか, という具体的な評価やエディントンの観測の紹介, 重力レンズ現象が見える状況や特徴を説明した。最後に, 重力レンズを使ってわかること, 微弱な光を増光させる性質から, 銀河中の微弱な天体(星)や系外惑星の探査への応用の話があり, 銀河団の重力レンズを使って, 宇宙が誕生して間もない134億年前の原始銀河が発見された経緯について説明した。観測画像とシミュレーションが適度に入っており, 生徒は興味深く聞いていたようだった。「銀河内での重力レンズ現象と遠くで起こる重力レンズは, どうやって見分けるの



図1 重力レンズについての講義の様子。講演者は米原。

か?」「クエーサーの正体は何なのか?」といったなかなか鋭い質問も出た。こういった機会を利用して, 直接本題には関係なくとも, 日頃からもっている疑問を専門家にぶつけることができるのも, 生徒にとっては良い経験になるだろう。

望遠鏡の原理については遠山が話をした。望遠鏡の原理や種類について一通り話をしたあと, 京都産業大学神山天文台の荒木望遠鏡(口径1.3m)での観測について説明があった。生徒たちは望遠鏡の原理だけでなく, 観測方法についても興味をもっていた。「観測はほとんどコンピュータで行うことに驚いた」という素朴な感想をもった生徒も少なからずいた。天体の撮影を趣味とする生徒は, 20秒の露出時間で, かに星雲が撮れることに驚いていた。前半はこのような講義形式で重力レンズの前提となる知識を学んでもらった。

4. アクリル樹脂による重力レンズの製作

4.1 レンズの形状

後半はアクリル樹脂による重力レンズの製作である。はじめに, 米原から重力レンズの光の曲がりを再現するために, アクリルレンズはどういった形状であるべきか, という発問から, レンズの形状の導出過程を説明した(15分程度)。具体的には, 星の場合の重力レンズの形状は対数型(対

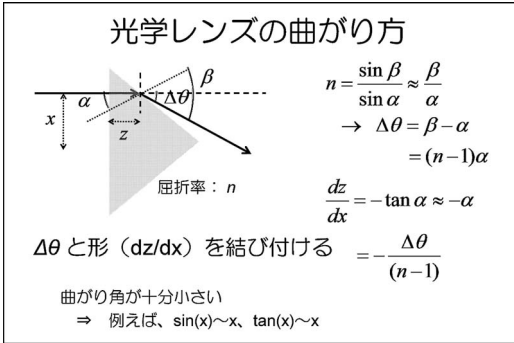


図2 講義でのスライド1.

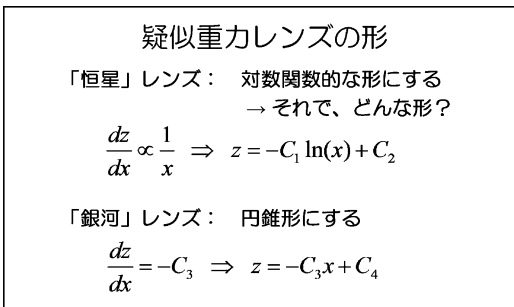


図3 講義でのスライド2.

数関数を軸周りに回転してできる立体の型) になり、銀河の場合は円錐型になる(図2, 図3, 詳細は文献4, 5参照). 通常, 形状を求める際には積分が必要であるが, 本校の2年生はまだ積分を学習していなかったため, 「微分してこういった関数になる関数は何か」という問いかけによって, 積分形を導いた. この教え方は, 積分を知らない高校生にとって有益である.

4.2 アクリル製重力レンズの製作

はじめに渡會がレンズ製作の大まかな流れを説明したあと, 注意事項を述べ, あとはテキストに沿ってレンズの製作を行うよう指示した. レンズの形状(対数型や円錐型)を短時間で削り出して作るのは難しいので, 見本となるレンズの原型を用意し, その原型を元にシリコーンゴム(以下, シリコーン)で型を作り, そこへアクリル樹脂を流し込む方法にした. 原型には事前に作ったアクリル製重力レンズ*1やプラスチックの円錐の型*2

を用いた. 必要なものは, 型を取るためのシリコーンとアクリル樹脂である.

型を取るために使用したシリコーンゴム「ブルーミックスソフト」は2種類のペースト状の基材(青色)と触媒(白色)を1:1で混合すると20分程度で硬化し, 型ができる. 混合後4分程度で硬化が始まるため, 素早く均一に混ぜ合せ, 原型の入った容器に混合したペーストを流し込み, あとは動かさないようにする. ペーストは友達と話をしている間に硬化するので時間を感じさせない.

次に, 型ができたら, アクリル樹脂を流し込む. 「クリスタルレジンII スーパークリアー」は室温で硬化する低粘度エポキシ樹脂で, 主剤(エポキシ成分)と硬化剤(変性アミン成分)を10:4で混ぜ合わせることで化学反応が起こり, 硬化する. 反応時間は周囲の温度に依存するが, 25°Cで約1日程度が必要である. 周囲を暖かくするほど, 硬化時間を早めることができる.

筆者は事前にアクリル樹脂の代わりにウレタン樹脂でも試験を行っている. ウレタン樹脂は透明度も高く, 硬化時間が10分程度と非常に短い. しかし, 硬化時間が短いために気泡が抜けにくく, アクリル樹脂に比べると見た目もよくない. また, 硬化の際に黄色く変色する性質もある. レンズ作製の後の測定も考えると透明度の高いアクリル樹脂がお勧めである.

型にアクリル樹脂を流し込んだあと, ハロゲンヒーターの前にしばらく置いて, 作業を終了させた. これで1日目終了である.

5. 重力レンズの特性を調べる

2日目はできあがった重力レンズの特性を調べる活動である. 本来は1日目で作ったレンズを調べる予定であったが, 当日の気温が低かったため

*1 文献3で製作したアクリルレンズを利用した.
*2 円錐形プラスチックは, 100円ショップ等で子どものおもちゃとして売られているコマの下半分を利用した.



図4 実習の様子.



図6 予備実験での測定.



図5 シリコンの型にアクリル樹脂を流し込む作業.

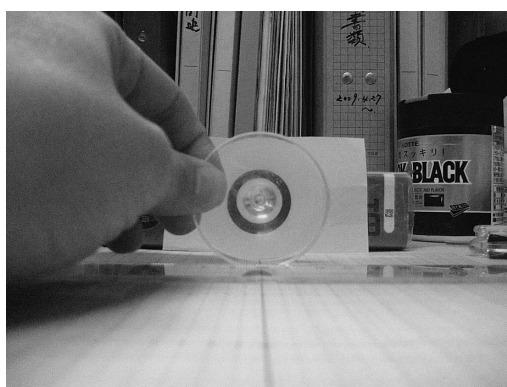


図7 携帯電話のカメラで撮影した像（円錐レンズ）.

に硬化のための反応時間が足りず、翌日9:00から活動には間に合わなかった。そこで急遽、型を取った元のレンズを使って測定を行った。本当は自分で作ったレンズを使いたかったが、仕方がない。ただ、測定実験への本質的な影響はない。予定では硬化したアクリルレンズの研磨作業が含まれていた。しかし、シリコン樹脂の型は精巧にとれるため、研磨の必要がない。また今回は行っていないが、完全硬化後にアクリル専用の研磨剤でつや出しを行えば、かなり透明度の高いものができる。

課題は2種類用意した。1番目は、天体とレンズの距離を変えて、像の大きさの変化を調べるもの。2番目は天体とレンズの間の距離は固定し、光軸からのレンズをずらすことで、像の面積変化



図8 測定時の風景。デジタルカメラをセットし、一人がレンズを移動させ、もう一人が撮影を行う。

を調べるものである。調べる方法としては、図6のように天体の代わりに直径1cmの円を用い、



図9 携帯電話カメラによる測定実験の様子。電子辞書の裏に天体の画像を貼り付けて、見え方を調べている。

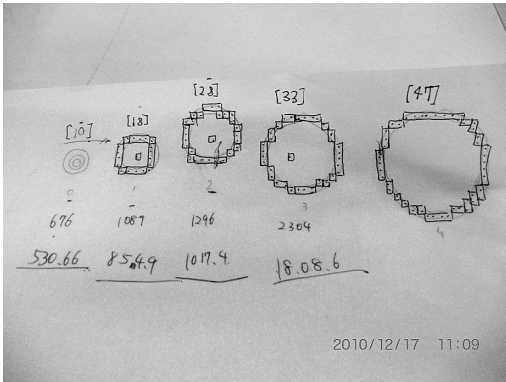


図10 トレーシングペーパーにスケッチした像の面積変化を方眼紙(2mm×2mm)の何マス分かを計算する。

観測者の代わりに携帯電話のカメラ、もしくは、デジタルカメラを用いて像を撮影する。その間にレンズを置き、見え方(大きさや面積)や位置を測定する(図7~図9)。像の大きさと面積を調べるには、まずカメラの液晶画面上にトレーシングペーパーを置き、レンズと像の輪郭を写し取る。トレーシングペーパーを方眼用紙(2mm×2mm)上に移し、像が方眼用紙の何マス分に相当するかを数えると、パソコンを使わなくても位置を変えたときの大きさや面積の変化がわかる(図10)。実験は最低限必要なものだけこちらで用意し、あとは生徒たちで創意工夫させた。生徒から要望があれば、その都度必要なものを準備した。

天体と観測者の位置を固定し、天体とレンズの位置を変えると、レンズに対する像の大きさが変化する。天体からレンズの距離を遠ざけていく

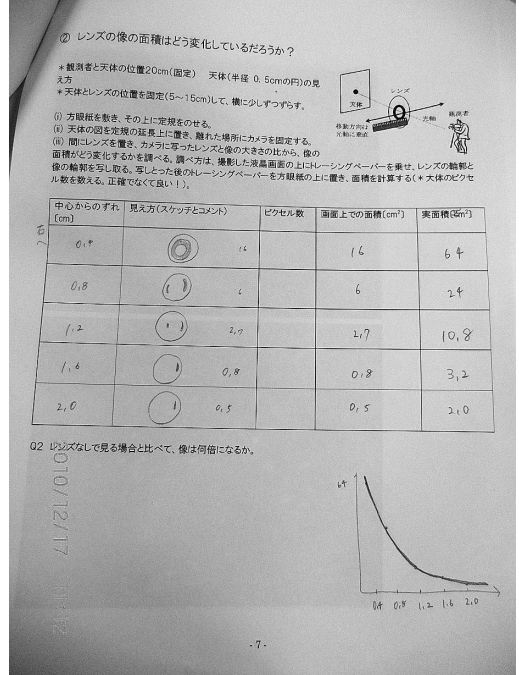


図11 まとめのプリントとグラフ。

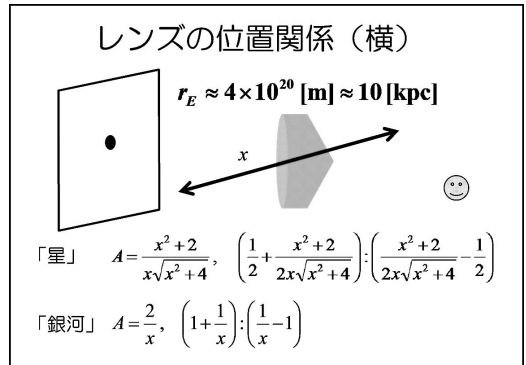


図12 測定結果のまとめ。星と銀河の場合の増光率(A)が中心からのずれxの関数になっている。

と、ちょうど天体と観測者の距離が中間になる辺りで像の大きさが最大になり、さらに遠ざける(レンズが観測者に近づく)と、像は小さくなった。レンズが天体近くにあるよりも、天体と観測者の中間程度にあるほうが増光されるという傾向は簡単な測定でも確認できた。

次に、天体とレンズの位置を固定し、天体と観

測者を結ぶ光軸から、レンズの中心をずらすと像がどう変化するか、を調べた。結果は光軸とレンズの中心が一致しているときほど、天体の面積が大きくなり、中心の位置がずれると急激に減光する（銀河のレンズの場合は、像の大きさは光軸からのずれに反比例⁹⁾）。生徒は、光軸からのずれと明るさのデータをもとにグラフを描き、ほとんどの班で同じような傾向が得られた（図 11 中の右下のグラフ）。

最後に先ほどの測定実験を受けて、米原がもう一度結果の解釈を行い、実際の重力レンズの式と同じ傾向であることを確かめた（図 12）。そして、このような傾向を利用して、観測されたレンズ像の形状から天体の増光率を求めるといった話から、どのように実際の研究で用いられているのかについて説明を行った。あとは生徒が作ったアクリルを土産に持ち帰り、発展的な課題に取り組むことを宿題にして講座は終了した。

6. 生徒の感想

今回の講座でレンズが固まらなかったのは最大の失敗であるが、生徒の感想を見ると、企画自体には満足していたようである。

講義については、「重力レンズ現象について詳しく知ることができてよかった」、「望遠鏡の種類が多くて驚いた」、「観測はパソコンで行うことを知って驚いた」という感想が多かった。レンズの製作と測定実習については、「少人数でよかった」「いつもとは違う実験ができてよかった」という感想が多く、生徒の満足度は高かったようである。講座を行う側としては少人数だと寂しいという印象があったが、生徒十数名に対して、高校教員二人、講師二人で実験のサポートができたので、目が行き届いていたのがよかったのかもしれない。

アンケートに重力レンズが何に利用できるか？という質問には、「宇宙空間の質量分布が測定できる」、「ブラックホールの形」、という天文学的な

答えをした生徒もいれば、「地球の裏側が見えたらおもしろい」、「宇宙戦争のときにレーザー光線を曲げる」というような応用例を考えた生徒もいた。こういった応用を広げていけば大学の卒業研究やスーパーサイエンスハイスクールの課題などに使えるかもしれない。

シリコンゴムとアクリル樹脂を使った方法は重力レンズだけでなく、どんなレンズにも応用できる。一つ型ができれば、同じもの気軽に作れるのは非常に心強い。この二つの素材は危険も少なく非常に扱いやすいので、科学系のイベントなどでも利用できる。その際には、予備実験を入念に行うことが重要である。今回も繰り返し実験を行い、10月の段階でアクリル樹脂が1日で硬化することを確認していたが、12月に入って気温が急激に変化することを考慮していなかったことが悔やまれる。もし、同様な実験・活動を行うならば、夏場の気温が高いときに行うことをお勧めしたい。どうしても寒い時期に行う場合は、保温性を高める、温水浴をさせておく、あるいは、保温容器にカイロを入れ、その中にアクリルレンズを入れる、などの工夫が必要であろう。

7. 完璧な重力レンズ製作を目指して

今後のために、予備実験での筆者（渡會）の経験から得た、重力レンズを製作のための注意点をいくつか書いておく。

①型の取り方：原型のレンズを容器に入れ、そのままシリコンペーストを注入すると、浮力でレンズが浮いてしまい、型がうまく取れない場合がある。この問題を解消するには、注入作業を2段階に分けるとよい。つまり、はじめにレンズの半分程度まで入れ、ペーストが少し固まるのを待った後で、完全にレンズが埋まるまでペーストを注入する。レンズと容器が離れないようにテープなどで固定するのも一つの手だが、型を容器から外す際に、レンズと容器がくっついて離れにくくなる。2段階に分ける方法がよいと思う。

②容器の大きさ：容器が深いとシリコンゴムが固まったあと、取り外すのが難しくなるので、原型のレンズが隠れる程度の浅めの容器がよい。

③アクリルの注入：型にアクリル樹脂を注入する際は、同じ場所からゆっくり注入すると気泡が入りにくく、表面も水平になる。型を作る段階でシリコンペースト上部が水平になるように気をつける。

④アクリル樹脂の硬化：ドライヤーを使用するとよい。ドライヤーは高温になるので、硬化時間が短くなるだけでなく、気泡も抜ける。さらに、真上から風を送れば、アクリル樹脂が均一になる（レンズ上部が平らになる）。

個人的にはかなり実験を行ったつもりだったが、工夫できるところはまだあると思う。学会員のみなさまが、今後こういった活動をどこかで行う際は、渡會まで気軽に声をかけていただきたい。

8. 最後 に

今回の企画にあたり、科学技術振興機構 (JST) のサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト事業に採択・支援していただき、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 独立行政法人科学技術振興機構 (SSP) のウェブページ (<http://spp.jst.go.jp/index.html>)
- 2) 渡會兼也ほか, 2006, 「重力レンズで見たあなた」, 第6回こどものためのジオ・カーニバル活動報告, 天文教育, p. 42
- 3) 西山普史, 福江 純, 渡會兼也, 西村昌能, 2006, 天文月報 99, 381
- 4) 渡會兼也ほか, 2007, 天文月報 100, 234
- 5) 横尾武夫, 加藤好博, 蜂屋正雄, 福江 純, 1998, 天文月報 91, 543
- 6) Narayan R., Bartelmann M., 1997, astro-ph/9606001v2

Science Partnership Project in 2010 『Physics of Lens: From Telescope to Gravitational Lens』

**Ken-ya WATARAI, Hidetoshi KASHIDA,
Atsunori YONEHARA, and Hiroki TOHYAMA**
*Kanazawa University Senior High School, 1-1-15
Heiwamachi, Kanazawa 921-8105, Japan*

Abstract: We report on the activity of the “Physics of Lens: from the telescope to the gravitational lens” in the science partnership project 2010 held in the Kanazawa senior high school on December 11–12, 2010. This project was for the high school students. The content of this project consists of a lecture about lens in astronomy, the artifice of the gravitational lens of acrylic resin, and an experiment with the lens. We introduce the content of the activity in this paper.