

手作り重力レンズのすすめ

横尾武夫，加藤好博

蜂屋正雄，福江純

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘4-698-1〉

e-mail: yokoo@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

透明アクリル製の円柱を削り出して，“重力”レンズを製作した。アクリル樹脂だと入手もしやすく加工も容易で，職人芸的な特殊技能がなくても，十分実用に耐えるものを製作できる。設計から製作そして活用までを簡単に紹介したい。

1. 重力レンズ

アインシュタインの一般相対論では，天体のつくる重力場の中で光線が曲がることが予言されていた。たとえば太陽の縁をかすめる光線は，最初の方向から1.75秒角曲がることが計算された。そして，第1次世界大戦直後の1919年5月29日，アフリカとブラジルで皆既日食が起こった。著名な天体物理学者アーサー・エディントン卿の率いるイギリス観測隊が現地に出かけていき，太陽のまわりに見える星の位置が，まさに一般相対論の予言通りにずれていることを確かめたのだ。この日食観測によって，アインシュタインと相対論の名は一躍世界に知らしめられた。エディントンの観測自体には，誤差などでいろいろ問題もあったようだが，現在では，実に1パーセント以下の誤差でアインシュタインの理論が実証されている。

さて「光線の軌跡は重力場中で曲げられる。」という単純な性質から“重力レンズ”までの道は，そう遠くない（図1）。光源となる遠方の天体と観測者の間に，重力をおよぼす別の天体があれば，遠方の天体から出た光は，より近くの天体の重力場で曲げられて観測者まで届くことになる。本来はあさっての方向に向かっていて観測者には届かなかったはずの光が，観測者に集まってくるために，結果として光源は明るく見える。すなわち観測者

と光源の間の天体がある種のレンズの役割を果たすと考えられるため，この現象は「重力レンズ」と呼ばれる^{1), 2)}。

アインシュタイン自身は，重力レンズ効果が実際に観測される可能性は小さいだろうと考えていたが，アインシュタイン生誕百年にあたる1979年，重力レンズ像0957+561A,Bが発見されたのである。クェーサー0957+561A,Bは，おおくま座の中，赤経9時57分，赤緯プラス5度61分に位置する17等級の天体で，赤方偏移が1.4の距離にあるクェーサーである。A，Bとついているのは，このクェーサーが，角距離で5.7秒角というきわめて近接した二つの成分からなることを表している。クェーサーまでの距離を考えると，AとBの視線方向に垂直な距離はおよそ14万光年ほどになる。

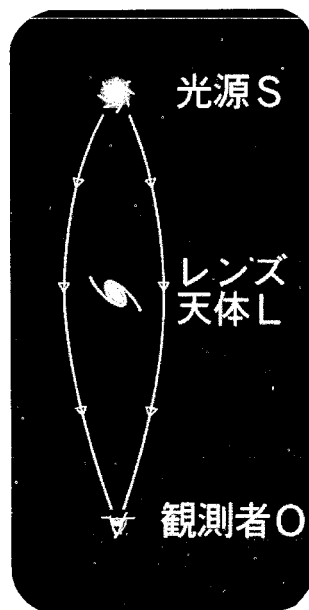


図1 重力レンズ現象



イギリスのマンチェスター大学のD・ウォルシュらは、アメリカのキットピーク国立天文台の口径2.1m望遠鏡を使って、0957+561A,Bをスペクトル観測し、AとBが分光学的にまったく同じ姿をしていることを突きとめた。すなわち、これらは別のクェーサーではなく、実は遠方のクェーサーからの光が、途中にある銀河の重力場によって曲げられた結果できた、二つの重力レンズ像だったのである。

その後は、三つ子の像や、アーチ状の像 CI2244-02、アインシュタイン・リング MG1131+0456、そして最近ではHSTで有名になったアインシュタイン・クロス QSO2237+0305 などなど、さまざまな形状をした重力レンズ像が多数（60個以上）発見されてきている。ちなみに、このようなレンズ像は大口径の望遠鏡でなければ見えないかと思ひこんでいたが、いくつかは小口径の望遠鏡でも撮像できるそうだ³⁾。

最近では、ダークマターの候補である MACHO 探しにも重力レンズが使われている。宇宙には、星や銀河のような目に見える物質以外にも、暗いか小さいかで目には見えないが、質量としては存在しているものがあり、ダークマター（暗黒物質）と呼ばれている。ダークマターの正体はまだわからないが、その候補の一つが、惑星や暗い星やブラックホールなど、ふつうの物質でできたもので、しばしば MACHO（有質量ハロー天体）と呼ばれている（他の候補は、ニュートリノのような素粒子で、WIMP（弱相互作用素粒子）と呼ばれる）。MACHO はふつうの望遠鏡では検出することは困難だが、もし、銀河系のハロ領域に MACHO がうじゃうじゃ存在していて、その一つが背後の星の手前を横切ることがあれば、重力レンズ効果を受けよう。星はほぼ点光源なので、重力レンズ効果による像自体を観測することはできないが、重力レンズ効果による増光は測定できる（これをマイクロ重力レンズ効果と呼んでいる）。実際、いくつかのグループが銀河系中心部や大マゼラン銀河の方向などで何百万もの星をモニター観測し、1993年、

MACHO によるマイクロ重力レンズ増光を数例検出している。

重力レンズは光源の明るさを増加させるので、宇宙の彼方の暗い天体をみることができるようになる。また重力レンズによってできた像を解析すれば、光源だけではなく、重力レンズ現象を引き起こしているレンズ天体の性質についても知ることができる。さらに光の伝わり方から、光源と観測者の間に伝わる広大な宇宙空間（そして宇宙そのもの）についての情報も得られるのだ。こうして現在では、宇宙が用意してくれた望遠鏡として重力レンズを利用する、いわば“重力レンズ天文学”とも呼ぶべき新しい学問分野が拓けつつあるのである。

2. 重力レンズの幾何光学

光線を集めるふつうの凸レンズでは、焦点と呼ばれる点があって、無限遠からやってきた平行光線は焦点に収束する。しかし重力レンズでは、たとえば重力レンズとなる天体が星のような質点のときには、天体の近傍を通る光ほど大きく曲げられるために、平行光線の軌跡は光軸に近いほど曲げられ、光軸から離ればまっすぐなものになる（図2）。このような重力レンズは焦点というものを持たない。ここでは、重力レンズの幾何光学について、簡単に整理しておこう^{2), 4)}。

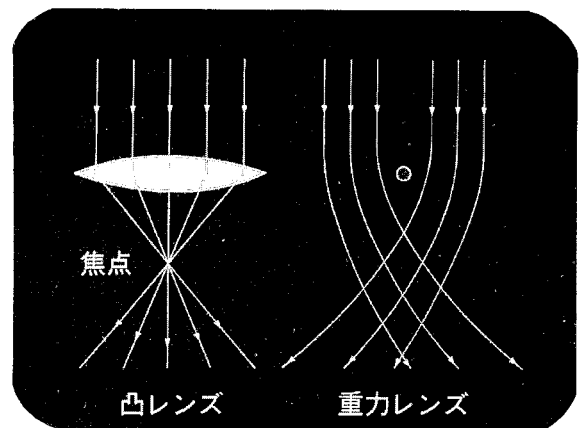


図2 凸レンズと重力レンズ

(1) 星(質点)の場合

重力場が弱い近似では、星に代表される質量 M の質点の重力場によって光線の曲げられる角度 $\Delta\theta$ は、

$$\Delta\theta = \frac{4GM}{c^2 p} \quad (1)$$

となる(図3)。ここで G は万有引力定数、 c は光速、そして p は質点から光線へ下ろした垂線の長さ(質点と光線の最接近距離; 近レンズ点距離)である。すなわち、ふれ角 $\Delta\theta$ は近レンズ点距離 p に反比例する(光軸に近い光線ほどよく曲げられる)。

この質点重力レンズと同じ屈折の仕方をする“等価”光学レンズの設計をしてみよう⁴⁾。

屈折率 n の透明材質でレンズを作るとすると、まず屈折率 n と入射角 ϕ と屈折角 ψ の関係は、スネルの法則より、

$$n = \frac{\sin \phi}{\sin \psi} \quad (2)$$

となる(図4; 式の整理上の都合で、図では実際の光線の経路と入射角・屈折角が逆になっている)。この式は、入射角 ϕ が十分小さい近似で、

$$n \sim \phi / \psi \quad (3)$$

と書ける。したがって、ふれ角 $\Delta\theta$ は、

$$\Delta\theta = \phi - \psi \sim \frac{n-1}{n} \phi = (n-1)\psi \quad (4)$$

と表せる。

この $\Delta\theta$ が近レンズ点距離 p (近似的には、光軸からの距離) に反比例するような、レンズの形状を求めてみよう。光学レンズの光軸からの距離を r 、レンズの厚みを z とすると、レンズの表面の勾配 dz/dr と屈折角 ψ の間には、

$$\frac{dz}{dr} = -\tan \psi \sim -\psi \quad (5)$$

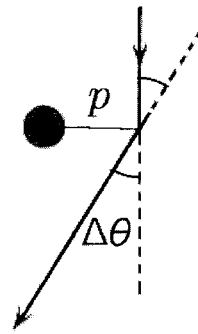


図3 重力レンズによる光線の曲がり

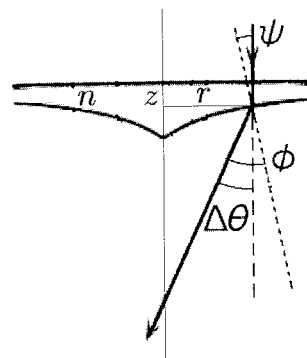


図4 等価レンズによる光線の曲がり

の関係が成り立つ。上の(4)式から、

$$\frac{dz}{dr} = -\frac{1}{n-1} \Delta\theta \quad (6)$$

となり、さらに(1)式を代入して p と r を等しいと置くと、

$$\frac{dz}{dr} = -\frac{4GM}{c^2(n-1)} \cdot \frac{1}{r} \quad (7)$$

が得られる。この式を積分すると、最終的に、レンズの形状を表す関係式として、

$$z = -\frac{4GM}{c^2} \frac{1}{(n-1)} \ln r + \text{定数} \quad (8)$$

が得られる。

すなわち、質点による重力レンズの性質を再現する光学レンズは、ワイングラスの足の部分のような、表面が対数関数となるものであればよいことが分かる。ただし、(8)式は $r=0$ で z が無限大になるので、実際の製作にあたっては、中心付近は2次曲面とした。そのため、ごく中心付近は普通の凸レンズと同じ性質のものになっている。

(2) 銀河の場合

つぎに、銀河のように、質量分布が広がりをもっている場合を考えてみよう。銀河の重力場は銀河回転によって知ることができるが、しばしば、観測されている銀河の回転曲線は、半径によらずに回転速度が一定になっている。ニュートンの万有引力の法則から、回転速度が一定になるためには、中心からの距離 r までに含まれる質量 M は距離に比例する。このような重力場が作る重力レンズでは、(1)式からわかるように、光のふれ角 $\Delta\theta$ は、

$$\Delta\theta = \frac{4GM(r)}{c^2 r} = \text{一定} \quad (9)$$

となる。したがって、先の(6)式から、このような銀河の重力レンズと同等な光学レンズの形状を決める式は、

$$\frac{dz}{dr} = \text{一定} \quad (10)$$

で与えられる。

すなわち、形状は円錐レンズとなる。

3. アクリルレンズの製作

鋼板を削って必要な形状の型刃を作り、旋盤にバイトとして取り付け、円筒型のアクリル棒からレンズを削り出すという簡単な方法で、“重力レンズ”を製作した。この方法では、通常の光学機器で想定される光学的な精度を得ることはできないが、ガラス材では困難とされる任意の非球面レン

ズを作ることができる⁵⁾。授業で学生が作る天眼鏡やカメラ模型においては、十分にその機能を発揮できることが分かっている。著者の一人、加藤は、学生向けの物理実験の授業でアクリルレンズを製作させるという実践をこれまで行っており、その技法をここでも踏襲することにした。

(0) レンズの材料

重力レンズを再現する光学レンズを製作するにあたって、材質として、われわれは透明アクリル樹脂を選んだ。ガラスで製作するのは大変だが、硬度が低いアクリルなら、鋼の刃により容易に加工が可能であり、研磨も簡単にできるからだ。しかもアクリルの屈折率は1.491でガラスとほぼ同じである。

レンズの口径は3 cmのものと5 cmのものを製作したが(図5)、アクリル円柱は教材屋で容易に入手できる。なお、3 cm径×20 cm長のもので1000円程度、5 cm径×20 cm長のもので3000円程度である。

(1) 型刃の作製

最初に鋼板を削って、必要な形状の型刃を製作する(図6)。鋼板といっても、元となる型刃は、実際には1ミリ厚程度の金工用鋸を加工したもので十分である。必要な形状のグラフをコンピュータで作図し、プリントアウトして紙型を作る。その紙型を鋼板に張り付け、最初はグラインダーと回転ヤスリで、仕上げは手によるヤスリがけで、型刃を成形した。刃の角度は90°程度が良いようである。

(2) レンズの削り出し

最初は旋盤に通常の金属用バイトを固定し、アクリル円柱からレンズ面の概形を削り出す。大まかな形ができたところで、事前に作製しておいた型刃を刃物台に固定し、本研削をゆるやかに、目的の形状に削り出す(図7)。

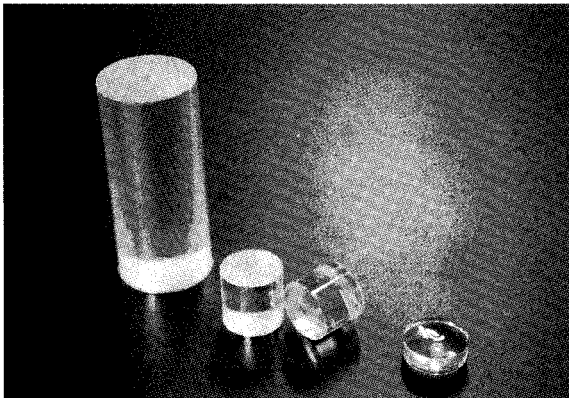


図5 アクリル円柱 (3 cm 径) と等価レンズ

(3) レンズの研磨

削り出した後のレンズ面は、かなり荒く、そのままでは使えない。そこで、歯磨き粉を塗りつけた柔らかい生地を何種類か使って、レンズ面を研磨する(図8)。はじめは、家庭用スポンジの裏側の面に歯磨き粉を塗りつけて研磨し、つぎに、レンズを旋盤で回転させながら、ガーゼに歯磨き粉を塗りつけたもので磨く。そのとき、茶碗状の器にガーゼを緩く被せて、ガーゼをレンズ面に接触させるという方法もある。最後は、ネル地に歯磨き粉を塗りつけて研磨して仕上げる。

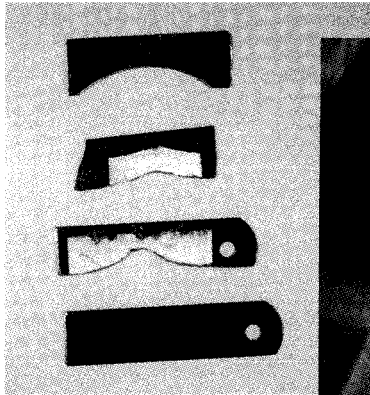


図6 型刃の作製

(4) 仕上げ

アクリル樹脂の棒の先にレンズ面ができあがったら、棒を鋸で切断して適当な厚みのレンズを切り出す。切り出し面はかなり荒いので、はじめに紙ヤスリで荒く研磨し、つぎにプレパラートの薄片をつくる砥石で磨き、最後に歯磨き粉などで研磨して、滑らかな平面に仕上げる。

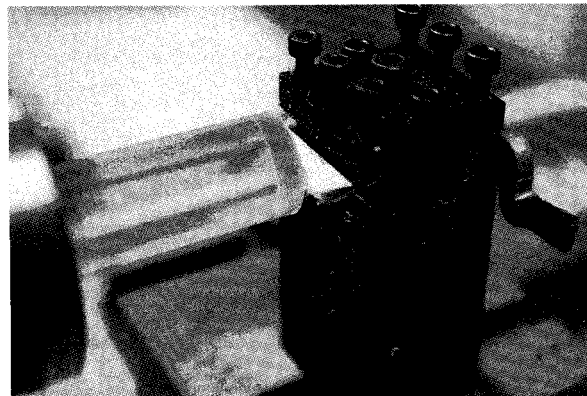


図7 レンズの削り出し

なお、銀河用の円錐レンズは、特別に加工した刃はらない。直線の刃型を刃物台に斜めに取付けて、(2)の要領で削り出せばよい。

4. レンズによる実験

まず、黒い丸いマーク(背後の光源を表す)を紙に描き、虫眼鏡の要領でレンズを通して見てみよう(図9)。光軸からずらしてみると、マークは二つの像になる(図9左)。一方が中心より離れて大きく、他方が近くにあって小さく見える。これは、宇宙論的な重力レンズの存在を最初に知らしめた、キューサー 0957+561の二重像を見事に再

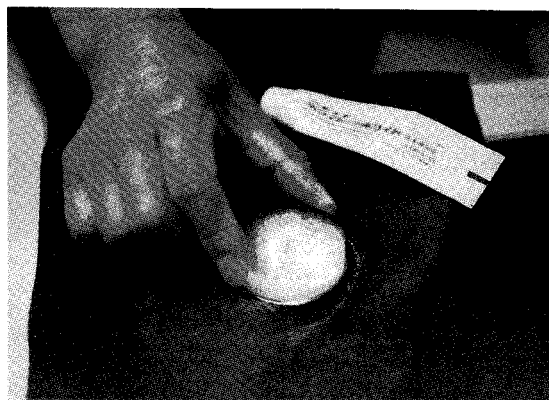


図8 レンズの研磨

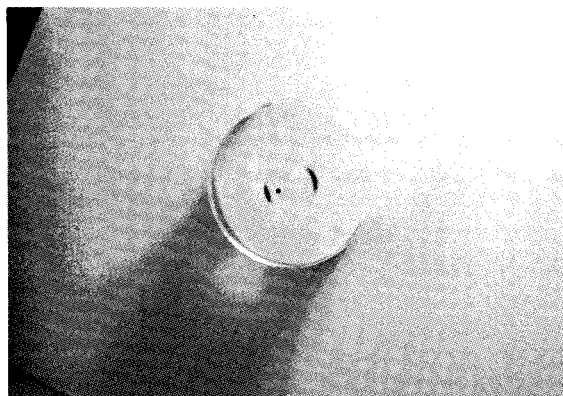


図9 等価レンズ (5 cm 径) による“重力レンズ像”

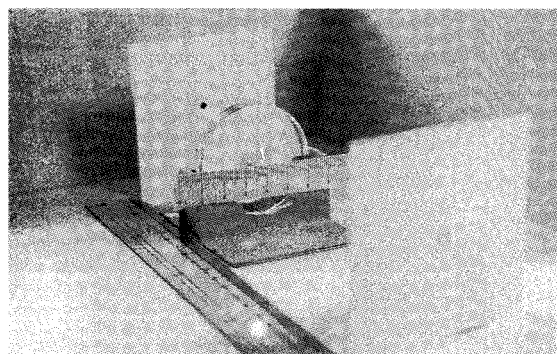


図10 重力レンズ実験“装置”

現している。

光軸上にマークと眼を置くと、黒い丸がリング状に見える (図9右)。これがアインシュタインリングである。レンズをマークに近づけると、黒い円盤に見える。

さらに、黒い丸 (背後の星に対応) と眼を結ぶ線に垂直方向にレンズ (MACHOに対応) を動かすと、黒い部分 (レンズによってできた像) の面積が次第に大きくなり、黒い丸がレンズの光軸に再接近したときに面積が最大になって、その後は次第に小さくなることわかる。面積の変化はそのまま光源の明るさの変化であり、MACHOのマイクロ重力レンズによる (背後の) 恒星の増光を

再現している。

円錐レンズは銀河の質量分布による重力レンズを再現するものであるが、対数レンズと比べて、上記のような観察実験をしている限り、顕著な違いは認められない。

もう少し、定量的な実験をして見たい場合、次のような実験を試みればよい(図10)。マーク(光源)と眼の位置を固定し、その間にレンズを置く。その距離を変化させ、アインシュタインリングの直径を測定する。リングの直径が、マーク-レンズとレンズ-視点の距離の比とどのような関係にあるだろうか？

同様の実験で、マークの代わりに何かの図を置いて、正立像が倒立像に変化する位置を探してみよう。また円錐レンズの場合はどうなるだろうか。さらにレンズを複数枚使うとどうなるだろうか(たとえば、レンズを2枚重ねて“質量”を大きくすると、アインシュタインリングのサイズは大きくなる)*。

5. おわりに

学校や大学で天文学を教えるとき、宇宙現象を理解するため、視覚や感覚に訴える何らかの方法や道具があれば、従来の数式や図形による方法と併せて、教育効果が格段に上がるだろう。現在では、コンピュータ・シミュレーションによる動画が活躍しているが、手作りの教具モデルを用いると、生徒学生にはかえって新鮮な感動を与えるものである。われわれは今までに、見て美しく、楽しい手

触りがあるような天文学用の実験装置が欲しいものだと、市販の製品を探したり、自分で手作りするようなことを試みてきた。ここで述べたアクリルの非球面レンズは、その中で見出したものである。大学や学校以外に、科学博物館などでも活用する道があると考えている。読者の皆さんにも手作り重力レンズをお勧めしたい。

参考文献

- 1) 福江 純・山田竜也, 1997, 重力レンズでさぐる宇宙(岩波書店)
- 2) 福江 純, 1990, ブラックホールの世界(恒星社厚生閣)
- 3) 村林史郎, 1998, 天文月報, 7号, 309
- 4) Refsdal S., Surdej J. 1994, Rep Prog Phys 56, 117.
- 5) 小林 寛・福沢輝雄, 1996, 大学の物理教育, 96年3号, 44

Gravitational Lens on Your Hands

Takeo YOKOO, Yoshihiro KATO, Masao HACHIYA, Jun FUKUE

Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University, Kashiwara, Osaka 582-8582

e-mail:yokoo@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

Abstract: The gravitational lens is one of the major topics in the current astrophysics. Using an acryl bar, we make a "gravitational lens", which is optically equivalent with a gravitational lens in the universe. We here show the design of and how to make the gravitational lens. Such a hand-made gravitational lens is quite useful in your classrooms, scientific museums, and public observatories.

*マークと視点の距離を1とし、マーク-レンズをx、レンズ-視点を1-xとすると、リングの直径 R_E は、 $R_E = \sqrt{[(4GM/c^2) \times (1-x)]}$ となる、はず。