

天体距離決定を模擬体験する教育用実験装置の開発

井 上 一¹

Developments of simple educational experimental-instruments simulating observational procedures to determine distances of astronomical objects

Hajime INOUE¹

I have developed some simple educational experimental-instruments to simulate observational procedures to determine distances of astronomical objects, for 1st grade students in the Project I class of the Meisei University and pupils participating in the Summer Science School prepared as one of the Project I class activities. I introduce them here.

キーワード：教育用実験装置，天体距離決定

Keywords : Educational experimental-instruments, Distance determination of astronomical objects

明星大学における、1年生を対象としたプロジェクトIの授業と、近隣の小中学生を対象とした夏休み科学体験教室に向けて、天体までの距離を決める観測的手法の原理や方法を模擬体験してもらうための装置をいくつか製作した。ここでは、それらを紹介させていただく。

1. はじめに

夜空の星々は、たいへん遠方にあるため、人間の目には大きさは識別できず、点にしか見えない。そのため、どの星も、夜空のはてにある天井（天球と呼ばれる）に貼りついているように見えてしまい、その星々が作る二次元的な形を星座と呼んで名前をつけてきた。では、それらの星々は、実際には、どれくらい遠くにあるのだろうか？

これから、星までの距離を決めるためにとられている方法を順次、解説していくことにする。そのような解説を、授業の学生や、体験教室の小中学生に聞かせる際、実際の星を観測して、自分で距離を決める作業がしてみられれば、理解も一段と進み、天文学への興味も深まることが期待される。しかしながら、観測を通じて星の距離を決める作業を実際にやろうとすると、天体望遠鏡を使った夜ごとの観測にかなりの時間をさかなければならない。そこで、実際の星の観測を行うかわりに、模擬的な装置を用意して、簡易的に、星の距離を決める実地体験をしてもらうことを考えた。以下、星の距離を決める方法を説明しながら、その距離の決め方を模擬体験できる装置の紹介をする。

2. 地球の年周運動を使った距離決定法

星の距離を、一番高い確度で決められる方法は、地球が太

陽の周りを回っていることによって生じる年周視差を用いる方法である。年周視差法と呼ばれる。

われわれ人間が、近くにあるものを手で取る時には、脳が、右目が見る方向と左目が見る方向の違い（それを視差と呼ぶ）を認識して、そのものまでの距離を判断して手を動かしている。右目が見る方向と、左目が見る方向が違うことは、鼻の近くに自分の人さし指を持ってきて、片方ずつ目をつぶってその指を見てみるとわかる。星の距離を測る場合には、地球が太陽を回る運動を利用し、地球が、距離を知りたい星と太陽を結ぶ線に直角な線の上の片側にいる時と、その反対側にいる時の視差を利用する。太陽をはさんでちょうど反対側にいる2つの時点での地球が、人間の右目と左目の役割を果たすわけである。

地球が、右目と左目の役割を果たすべき位置がどこかは、地球が太陽の周りを1周する1年の間に星を見る方向がどう変わるかを観測すればわかる。ある星の見える方向を、1年間にわたって追いかけてみると、その軌跡は、一般に楕円を描くことがわかる（図1参照）。星の方向が、地球の公転面に垂直な方向にある時は、楕円は真円となるが、垂直な方向から傾いていくにつれて、だんだんつぶれた楕円になっていき、星が、地球の公転面の上に乗ると、見える方向の軌跡は直線になる。しかし、そのどの場合でも（円も、直線も、楕円の一部と考えて）、太陽と星を結ぶ線と直角な方向に、楕円の長手方向の軸（長軸）がある。そして、地球がこの長軸の先にいる時は、星・太陽・地球が直角三角形を作っていることになる。この時、星から見て、太陽の方向と地球の方向のなす角度、 θ をその星の年周視差と呼ぶ。地球から見ると、星の見える方向が描く楕円の中心は、太陽から星

¹ 明星大学理工学部総合理工学科物理学系 常勤教授 天文学

を見た時の方向に（平行に）なっており、1年の中で、その中心から星が一番ずれて見えている時の角度が θ になっている。

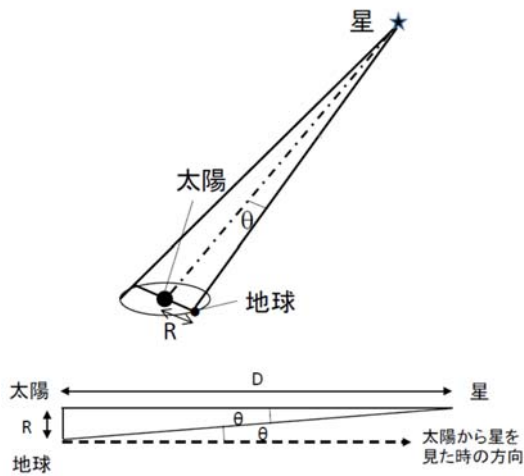


図1：年周視差の説明図

Fig 1: Figures to interpret annual parallax

地球が太陽のまわりを年周運動しているため、地球から星を見る方向は1年間で楕円を描く（上の図）。その楕円の長軸のはじめに地球がいる時は、下の図のような直角三角形ができる。この直角三角形の開き角を年周視差という。

さて、星と太陽間の距離を D とし、楕円の長軸（地球と太陽間の距離）を R とすると、それらは直角三角形の2辺なので、

$$\tan \theta = R / D$$

の関係になっている。地球と太陽の距離は知られている量なので、観測により θ を得れば、

$$D = R / \tan \theta \quad (1)$$

で、太陽から星までの距離が求まる。なお、恒星の場合、 θ は1にくらべてとても小さい量なので、 $\tan \theta$ はただの θ で近似でき、実際の天体観測では、

$$D = R / \theta$$

という式が用いられる。これが、天体の距離を決める年周視差法である。

年周視差模擬体験装置

上に述べた、地球の年周運動により星の見える方向が1年周期の楕円運動をすることを実感してもらうため、図2のような模擬体験装置を製作した。装置の中心軸の周りを回る回転腕を用意し、その腕の先に市販のモニターカメラを取り付ける。平ギアを3枚組み合わせて、モニターカメラが見る方向は、回転に関わらず一定の方向を見るようにしている。図3には、この回転腕を回した時の、1/4回転ごとのモニターカメラの見た像を示してある。カメラのとらえた模擬天体の位置が、楕円を描いていることが理解できる。



図2：年周視差模擬体験装置

Fig 2: An instrument to simulate an annual variation of a direction to a star from the earth

中心軸のまわりに回転するアルミチャンネルを用意し、その上に3枚の同じ平歯車をかみ合わせて設置した。そして、中央の平歯車は設置板に対し回転しないように固定し、一番外側の平歯車の上には、カメラを設置した。アルミチャンネルを回転しても、カメラの向きは、平行移動するようになっている。

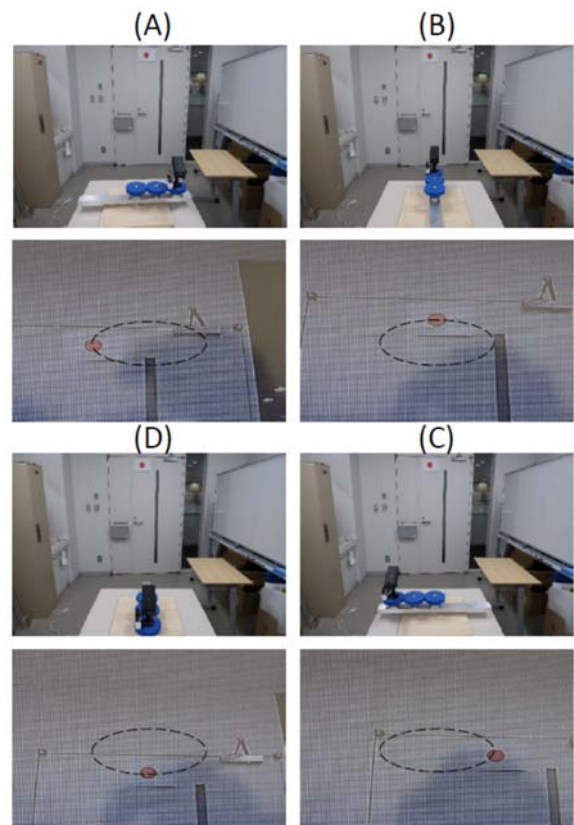


図3：年周視差模擬体験装置を回転させた時の像変化

Fig 3: Camera images

when the instrument in Fig.2 was rotated.

年周視差模擬体験装置を、A-B-C-Dの順に、90度ずつ回転した時の装置の配置と、カメラの得た像が上と下に示されている。下の図から、A-B-C-Dのそれぞれの配置で、壁に貼られた赤丸の見える位置がほぼ楕円（点線を加筆）にそって動いていることがわかる。

三角測量模擬体験装置

(1)で与えられる、直角三角形の関係式を使った距離決定は、三角測量として、われわれの身近でも使われているものである。三角測量を模擬してみる簡単な装置も作ってみた。一方向にモニターカメラをスライドできるようにし、カメラの見る方向の角度を測れるようにしただけのものである(図4参照)。はじめに、距離を測りたい対象物をカメラの中心にいれ、カメラの向きが直角になるようにスライドバーの向きを決める。そこから、一定の距離(たとえば、1メートル。式(1)でのRに対応。)カメラをスライドさせ、そこで、カメラの中心に対象物が入るようにカメラの向きを動かし、直角方向からの回転角(式(1)の θ に対応。)を測る。そして、式(1)を使って対象物までの距離、Dを求める。なお、小中学生は、まだ三角関数をなっていないので、式(1)を直接使う代わりに、グラフ用紙に相似な三角形を書かせるとか、事前に、いくつかの距離においた対象物の視差角 θ を測っておいて、式(1)に相当するグラフを作らせ、ある距離においた対象物の測定値を、式(1)のグラフの上に乗せて、距離を推定させるとか、するのがいいと思われる。



図4：三角測量模擬体験装置

Fig 4: An instrument to simulate triangulation
対象物に向けたカメラの軸がスライド方向に垂直になるようにした時の配置写真(上)と、カメラを1メートルスライドさせて、カメラ軸を対象物に向けた時の配置写真(下)

3. 絶対的な明るさのわかった天体の見かけの明るさから距離を知る方法

近くでは明るく見える電球でも、遠ざかるとその電球からの光は弱くなってしまいます。逆に考えると、ある既知の距離での電球の明るさがわかり、距離とともにどう暗くなっていくかがわかれば、距離を知りたい場所での電球の明るさを測ることで、電球からの距離を推定することができる。

距離とともに、光の強さがどう弱まっていくかは、発光体までの距離が、その大きさに比べて十分大きい時は簡単に計算することができる。発光体が点に見なせるときは、光は、その点から放射状に広がっていくと考えられるので、発光点からある方向に出た光の広がり、その進んだ距離の二乗で増えていくことになる。たとえば、全方向に球状に光が出たとすると、距離 r の位置での光の進んでいる全表面は半径 r の球の表面と考えられ、その表面積は $4\pi r^2$ になる。したがって、光源が、単位時間に放射する放射エネルギーの量(これを光度と呼んでいる)を L とすると、距離 r の位置で単位時間当たり、単位面積あたりに受ける放射エネルギーの量(これを放射強度と呼んでいる)、 F は、

$$F = L / (4\pi r^2) \tag{2}$$

となる。光度 L の同じ星から受ける放射強度は、距離の二乗に逆比例して弱まっていくわけである。

ある星からの放射強度 F (しばしば、見かけの明るさとも呼ばれる)は、望遠鏡で測定すればわかる。その星の光度 L がわかれば、その星までの距離 D は、式(2)で $r = D$ において、

$$D = (L / (4\pi F))^{1/2} \tag{3}$$

で求めることができる。しかし、光度 L を推定することができるのは、次のような、いくつかの場合に限られる。

3・1 星の H-R 図上の位置がわかる場合

恒星の光度 L は、そのスペクトルを測ることで推定できる。スペクトルとは、星からの光を分光することによって得られるもので、波長ごとの光の強さの分布を表す。そして、そのスペクトルの特徴の違いから、恒星は、主には、O-B-A-F-G-K-M の型に分類される。夜空の星々は、星の光度とスペクトル型の関係でいくつかの種族に分類される。そして、それらの星々のスペクトル型と光度の関係を図示したものを H-R 図(ヘルツシュプルング-ラッセル図の略)と呼ぶ。たとえば、中心で水素の核融合を起している主系列星と呼ばれる星々の種族がある(多くの星がこの種族に属し、太陽はその典型的なものである。)が、主系列星の場合の H-R 図は、図5のようなものである。星が主系列星であれば、そのスペクトル型を観測することで、図5を使って、星の光度を推定することができる。

なお、天文学の世界では、歴史的に、H-R 図の縦軸として、光度 L を使う代わりに、ある決まった距離で測った時の絶対的な放射強度を用い、さらにそれを絶対等級という量に直して、図を作っている。そして、地球上で測定した放

射強度も、見かけの等級として、等級に直し、絶対等級と比べることで距離を決めることが行われる。ここでは、等級の定義は省略させていただくが、次の模擬体験装置の説明上、ある決まった距離 r_0 で測った星の絶対的放射強度（しばしば、絶対的明るさとも呼ばれる）を導入した距離決定の式だけ付け加えておく。絶対的放射強度を F_0 とした時、式(2)より、

$$L = 4\pi r_0^2 F_0 \quad (4)$$

と書け、式(4)を式(3)に代入することで、(3)式は、

$$D = r_0 (F/F_0)^{-1/2} \quad (5)$$

と書ける。絶対等級と見かけの等級を使った距離決定は、この式をもとにしているものである。

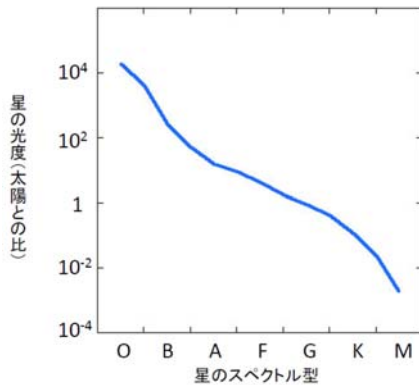


図5 主系列星の H-R 図

Fig 5. H-R diagram of main sequence stars

また、星のスペクトル型の決定は、簡易的には、光の波長域を可視光の中心波長付近に限定する V バンドフィルターと、それより少し波長の短い青い波長域に限定する B バンドフィルターをつけて、それぞれの星の放射強度をはかり、その比を使う方法が使われる。

星の色と明るさを測って距離を決める方法の模擬体験装置

上に述べた、「主系列星である星の V バンドと B バンドの放射強度の比から、星のスペクトル型を決め、それから求めた絶対的放射強度と、地球上で求めた見かけの放射強度から、その星の距離を推定する方法」を模擬体験する装置を用意した。図6にセットアップした装置の様子を示す。

主系列星に対応する光源として 100V、60W の小型白熱電球を用意した。この白熱電球に印加する電圧を 100V から下げていくと、フィラメントの発熱量が減り、絶対的明るさが下がっていくとともに、フィラメントの温度も下がっていった色が赤くなっていく。白熱電球を簡易暗室の中に入れ、一定距離（具体的には 1メートル）のところに、照度計を置き、カメラ用の赤と緑のフィルターを通して、それぞれのフィルターごとに、電圧の変化に対する白熱電球の放射強度の変化を測る。そして、電圧ごとの、緑フィルターに対する赤フィルターの放射強度の比を横軸に、緑フィルターの放射強度を縦軸に図示する。図7は、用意した装置での結果である。



図6 星の明るさを測って距離を決める方法の模擬実験の様子

Fig 6 Experimental set-ups to simulate the distance determination method through stellar flux measurements

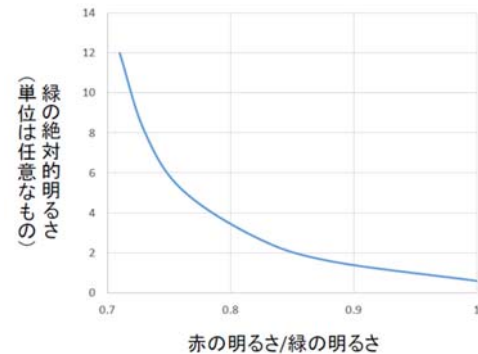


図7 赤・青フィルターを使って得た、白熱電球の模擬 H-R 図

Fig 7 Simulated H-R diagram of a white light bulb obtained with green and red filters

図7が用意できれば、白熱電球から適当な距離のところに照度計が置かれ、かつ、白熱電球の電圧を適当な値に設定された時、その場所での赤フィルターと緑フィルターの照度が測定できれば、それらの比から図7を通して、白熱電球の緑フィルターでの絶対的明るさがわかり、その場所での緑フィルターの見かけの明るさから、式(5)によって、白熱電球と照度計との距離を推定できる。

この体験実験は、小中学生に対しては、式(5)の計算をさせるのがむずかしすぎるかもしれない。電圧一定の時の、見かけの明るさの距離に対する関係を測定させ、その結果をグラフに書かせた後、同じ電圧のまま、適当な距離での見かけの明るさを読んで、そのグラフ上の位置から、白熱電球と照度計の距離を出させるのが適当かもしれない。

3・2 そのほかの、光度推定できる天体とその方法

H-R 図を使った、星の距離の決定法以外にも、いくつかの光度推定法がある。ここでは、重要な2つのものを、紹介する。

ある種の星は、その光度が周期的に変化することが知られ、変光星と呼ばれる。その中でセファイド型と呼ばれる一群の変光星は、その光度変動の周期と光度の間に一定の関係があることが知られている。セファイド型変光星であれば、地上で観測した放射強度の変動周期から、その星の光度（絶対的放射強度）が推定でき、見かけの放射強度と比べることで、距離が推定できる。セファイド型変光星の光度は、星としてはたいへん大きいものなので、われわれの銀河系の外にある銀河でも、その中にあるセファイド型変光星を見つけることができることがある。その場合には、その銀河の距離を推定できることになる。

また、別の、ある種の星は、その星の終末期に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こして突然明るくなる。超新星爆発の中で、Ia 型と呼ばれるものは、一番明るくなった時の光度が、(若干の補正をすると) どの星の爆発でも同じ一定の値になることが知られており、その値と、明るさ最大時の地球での見かけの放射強度を比べれば、超新星までの距離がわかる。超新星の最大光度は、とても明るいものなので、たいへん遠い銀河の中にも出現しても識別することができる。従って、遠方の銀河でも、Ia 型超新星が出現すれば、その距離を決めることができる。

4. 遠方の銀河の、後退速度を用いた距離決定

20 世紀に入ると、遠方の銀河の距離も少しずつ決められるようになり、それら遠方の銀河では、特定の光の波長が長い方(赤い方)にずれて観測されることがわかってきた。この波長が長い方にずれて観測されることは、銀河がわれわれから遠ざかって行っていて、その後退運動によるドップラー効果が見えていると解釈できる。そして、いくつもの銀河の後退速度が測られた結果、「遠い銀河ほど、より速く遠ざかっている」ことが発見され、ハッブルの法則と名付けられた。

ドップラー効果によると、速度 v で後退する銀河から、実験室で波長 λ に見える光が発せられると、その波長は長い方にずれて観測され、波長のずれた量 $\Delta \lambda$ ともとの波長 λ との関係は、

$$\Delta \lambda / \lambda = v / c \tag{6}$$

で与えられる。ここで、 c は光の速度である。従って、 λ がわかっている光の波長のずれ $\Delta \lambda$ が測定できれば、式(6)から後退速度 v が求まる。

一方、その銀河までの距離を D とすると、ハッブルの法則は

$$v = H D \tag{7}$$

と表される。ここで、 H はハッブル定数と呼ばれる定数である。従って、ハッブル定数がわかっているならば、特定の光の波長のずれの測定から、式(6)を通じて銀河の後退速度がわかり、式(7)を通じて、その銀河の距離が推定できることとなった。

ドップラー効果体験装置

ドップラー効果を、光での実験を通じて体験しようとする、式(6)でわかるように、発光体を光の速度に近い速度で走らせないと有意な波長の変化が見られない。そこで、ドップラー効果の体験としては、音を使うことが現実的である。その場合、式(6)の左辺の波長としては音の波長を用いることになるが、われわれが音の波長を認識するのはむしろ音程の高さとしてであり、その場合、振動数の方がなじみやすい。音の振動数が 2 倍高くなると、音程は 1 オクターブ上がり、振動数が約 6 % 程度あがると半音音程があがる。一方、式(6)の右辺の分母は光の速度ではなくて音の速度、 c_s に置き換える必要がある。音の振動数を f で表すと式(6)は

$$\Delta f / f = v / c_s \tag{8}$$

となり、 v を発音体が近づいてくる時の速度と考えると、 Δf が正の値となる。ドップラー効果を体験する実験としては音を使うのが現実的といったが、音の場合でも、音速は秒速 340m を越えるくらいあり、時速 1200 km もの高速である。たとえ、半音の音程差を実感しようとするにしても、秒速 20 m、時速で 70 km を越える速度差を作らなければならない。(サイレンを鳴らした救急車やパトカーが近づいてきて通り過ぎる時に、ドップラー効果によって、音の高低の変化を感じることは、時々経験することである。車の速度があつてこそその現象である。)

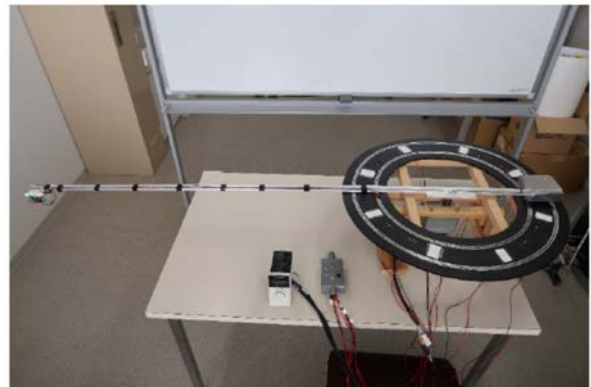


図 8 : ドップラー効果体験装置

Fig 8: An instrument to realize the Doppler effect
上は、装置の全体写真。左側に伸びたアームの先に音源がのせてある。下は、体験実験のため回転中の装置。高速回転のためアームはよく見えない。

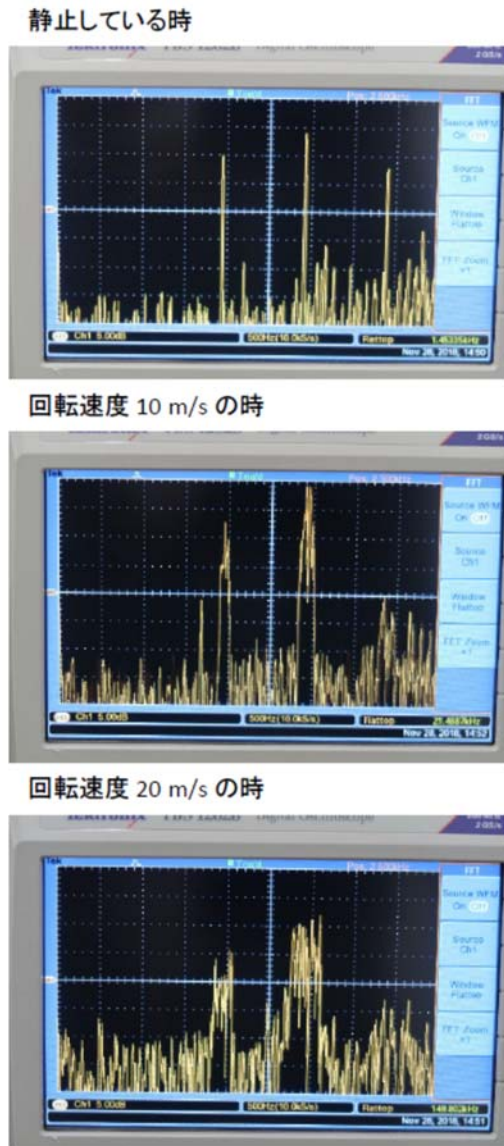


図9：ドップラー効果体験装置の発するサイレン音のオシロFFTによる周波数分布

Fig 9: Frequency distributions of a siren sound from the Doppler effect realization instrument, obtained with the FFT function of an oscilloscope

横軸は振動数で、一番左がゼロに対応し、縦軸は振動数ごとの音の強度を表している。もとの振動数の2倍波と3倍波が顕著に見えている。

そこで、最大1秒に2.2回転するモーターを用意し、長さ1.5mのアームを取り付けた。そして、アームの先に一定の振動数の音源を置き、音の音程が回転とともに変化するのを聞き取る装置を製作した(図8参照)。この装置では、最大回転時には、音源は秒速20mの速度で回ることになり、音源が近づいてくる時に、半音高く聞こえ、遠ざかる時に半音低く聞こえることになる。しかし、実際に音源を回転して音を聞いてみると、連続的に変化する音程がまざって

聞き取りにくいことがわかった。そこで、音源がこちら側に向かってくる時と、反対に遠ざかる時だけ音が出るように装置に工夫を加えたところ、ドップラー効果による音程の変化をはっきり認識できるようになった。紙面では、その効果を示すことができないのが残念である。

なお、自分の耳で認識するのではなく、マイクを通した電気信号をオシロスコープに入力し、FFT(高速フーリエ変換)の機能を使って音の周波数分布を見られるようにすると、回転の速度があがるについて、ドップラー効果による振動数のずれが大きくなっていくことを見ることができる。図9には、(音の出る回転位置を限ることをせずに)連続的に音が出る状態で得た、静止状態、10m/s、20m/sの3つの回転速度に対するオシロのFFT結果の写真を示す。音源のマイクに向かっての速度は、回転とともに、サイン的にプラス・マイナスを繰り返す。その結果、オシロには、もとの振動数 f のまわりに、両側に広がった分布が現れる。そして、片側への広がり、式(8)の右辺に回転速度をいれて得られる Δf になるはずである。図9に、回転速度 $v=0$ 、 $v=10$ m/s、20 m/sの場合のオシロのFFTの結果の写真を示す。得られた振動数分布は回転速度に対応して広がっていることが見て取れ、振動数分布の幅は、上の予想とほぼ一致する。

5. おわりに

以上、天体の距離を決める方法の説明と、小中学生や大学生がそれらの方法を模擬的に体験できるように作ってみたい模擬実験装置の紹介を行った。それらの装置は、小中学生には少しむずかしいものになっているかもしれないが、大学生にとっては、手順を踏み、内容を理解しながら実験してもらえば、天文学の観測の基礎になっている部分について理解を深めてもらえるものと思う。不十分な部分や、改善した方がいい部分も多々あるので、ここに書かれていることがきっかけとなって、もっといい教育的装置が作られることがあればたいへんうれしい。

私は、この2018年度いっぱい5年間お世話になった明星大学を定年退職することとなる。この5年間、講義や卒業研究指導等においてたいへん楽しい時間を過ごさせていただいた。そして、ここにまとめさせていただいたような、これまでやってきた研究とはちがう、天文学の普及・教育に関わるような活動も経験できたことは、たいへん貴重なことであった。ここに、この5年間にお世話になった明星大学理工学部支援室の皆さん、物理学系の教員・支援員の皆さん、そして、特に、天文学研究室の小野寺幸子准教授には、心からお礼を申し上げたい。どうも、ありがとうございました。