

## 1. はじめに

従来、高校の地学の授業での宇宙の分野、中でも宇宙論は実験や実習を行おうとすると、既にある数表やグラフから目的の事柄を導き出すといった、紙面上での活動しかできませんでした。ところが、近年のPC、インターネットの急速な普及、データアーカイブの公開等により、実際の観測データを用いた実習が可能になってきました。今年のPaofitsWGによる球状星団の年齢決定教材の開発などは、そのよい例です。本稿は、PaofitsWGで今年から取り組んでいる「距離梯子」をテーマとした教材づくりのうち、私が関わった「a型超新星による距離測定」の教材の紹介と授業での実践報告です。

## 2. 教材のねらい

a型超新星は極めて激しい現象なのでよく目立ち、また、その最大光度の絶対等級がほぼ一定になるという、わかりやすい性質があります。教材は、この最大光度の絶対等級を求める（法則発見編）ものと、その値を使って距離を測定する（法則適用編）ものを2種類を作りました。特に、距離測定には、実際の超新星の画像を使って測光をする活動を含みます。このような学習活動を通じて、「画像からのデータを得られること」、「数億光年におよぶ距離が工夫次第で実際に求められる」、また「データの扱い方やその表現の方法」を学んで欲しいと考えました。また、一連の作業を通じて、「自分で発見すること」の楽しさも感じてもらえればと思いました。

### 2つの教材

絶対等級を求める活動（法則発見編）

与えられた光度曲線から極大時のみかけの等級を読む。

距離は既知として、絶対等級を計算する。

絶対等級がほぼ一定の値になることを複数のデータから見つける。

測光して距離を求める活動（法則適用編）

画像から超新星を見つけ、測光する。

光度曲線を描いて、極大時のみかけの等級を決める。

距離を計算する。

## 3. 教材作成

教材に用いたデータは次のように選んでいます。まず、超新星の絶対等級を求める活動です。ここで用いた12個の超新星は、SNWEBに掲載されているa型の中から光度曲線を見て、最大光度がわかりやすいものを選択しました。教材に用いた光度曲線はSNWEBのデータの中からCRを選び、表計算ソフトでグラフにしました。絶対等級の計算に必要な銀河の距離はRED SHIFTカタログの後退速度を使って、ハッブル則から算出しました。ハッブル定数はサンデーらがHSTを使って決定した $61 \text{ [ km/s/Mpc ]}$ を採用しています。これらから求められる絶対等級はティーチャーズガイドに載せた値となり、その平均

値は-19.1です。これはサハがセフェイドにより距離が確定しているの銀河のI a型超新星について求めた $-19.2 \pm 0.5$ に近い結果になっています。

次に、超新星の画像データから距離を測定する活動です。これには、名寄市立木原天文台の佐野康男氏に提供していただいたSN2003duの画像を使っています。4月26日から6月29日まで、1日10枚の画像で10日分、計100枚の画像を使いました。このデータにより、実際の超新星の画像を用いて対象天体を発見したり、測光したりすることができる教材になりました。

画像データはそのままでは時間の限られた授業の中で効率よく使えませんので、国立天文台・広報普及室が開発した画像解析ソフトMakali'iを使って、次のような手順で加工をしました。

コンポジット1日10枚

(画像マッチング40PIXEL、加算平均、3 - クリッピング)

一定値減算(スカイを概ね0に)

一定値乗算(恒星によるスケール)

測光のためだけなら、の加工だけでも十分ですが、Makali'iのブリンク機能によって対象天体を発見しやすくするためにとの加工を行いました。時間的に制約のない部活動などではのコンポジットから始めても、中高生にもさほど困難はなく作業ができると思います。Makali'iはそれぐらい操作性がよく仕上がっています。

ワークシートは各活動の目的が見えやすくなることを念頭に作成しました。生徒の個性がある程度反映されるように、自由記述の部分を多くしました。

#### 4. 授業の展開

授業を受けたのは、私の勤務校の3年理系の地学選択者11名です。この生徒達は1年次に地学Bを学んでいて、星の進化については学習済みです。超新星についても、このとき話してあります。3年の2学期は、宇宙論を取り上げ、天文単位の決め方から始めて、距離の測り方とそこから見つかる構造を中心に講義形式の授業を進めてきました。絶対等級、みかけの等級と距離の関係も分光視差のところで学習済みです。セフェイドで届かないところは超新星を使う、程度の話をしてあります。また、理系の生徒ですので、計算アレルギーはありません。

画像データの解析は1人1台PCが使える教室で行いました。マシンはPentium800Hz、メモリ256MB、OSはwin2000です。ネットワークで各PCはつながっています。

Makali'iと画像は生徒が利用するフォルダにセットしておきます。

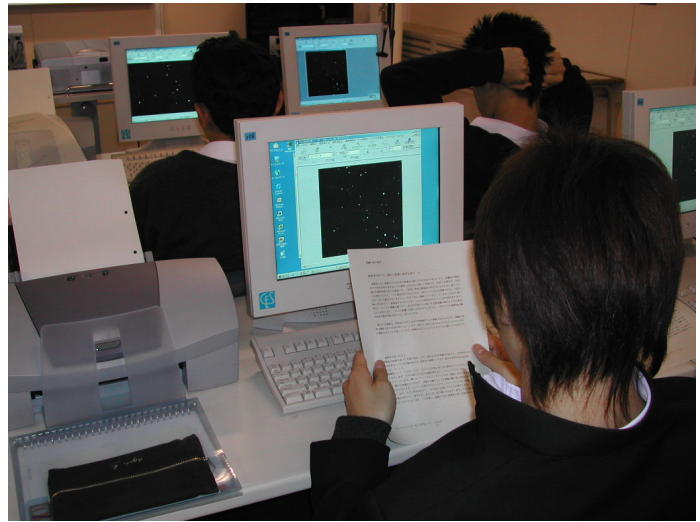
絶対等級を求める活動 [普通教室での1時間]

- SN2002boを例として計算して見せます。
- 残りを2 - 3人1組で分担させました。
- 対数表を使っての計算でしたが、絶対等級の平均値まで時間内に全員出せました。
- 最後にある距離計算の設問は画像でやってみる予定だったので省略しました。

測光して距離を求める活動 [PC教室での連続2時間]

- SN2003duの画像を2枚選んでブリンクし超新星を探します。絶対等級を求める活動でたくさんの光度曲線を渡してあるので、参考にするように指示しました。日付を見て、明るさの違う画像に見当を付けてもらうためです。生徒達が画像を重ねる要領をつかむまで、ちょっと時間がかかりました。

- ・見つけた超新星と光度を比較する星の測光をします。Makali'iの測光ウィンドウはちょっと複雑なので、どこを読むべきか注意が必要です。
- ・測光値からみかけの等級を計算します。前はさんざん計算していますし、また手計算というのもかわいそうなので計算式を設定したエクセルファイルを用意しました。
- ・光度曲線を描き、最大光度を読みとります。プロットの最大値を読む生徒が多いですが、前回に配布済みの光度曲線を見ながらそれらしく描く生徒もいました。
- ・読みとった最大光度のみかけの等級と前回求めた絶対等級を使って距離を計算します。



## 5. 結果

### 絶対等級を求める活動（法則発見編）

生徒が求めた結果は右のとおりです。標準偏差の大きなものは、いずれも極大付近のデータのばらつきが大きく、光度曲線の記入に迷いそうなものです。平均が小さく出ているSN2003cgはCRのデータのみでは最大光度付近がへこんでいるように見えて、読み取りが小さくなる傾向のあるようです。平均が大きく出ているSN2001ehは極大付近のばらつきが大きく、生徒はそれらの中点を採らず、一番上の値を読む傾向があり、そのせいで明るく出たものと思われる。

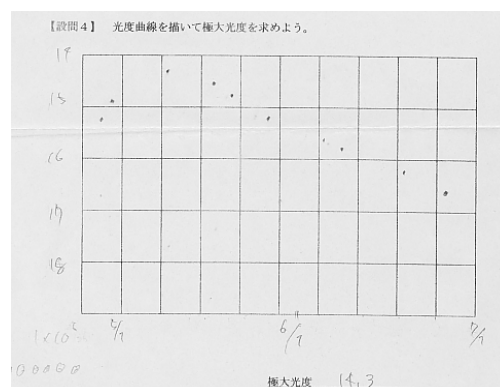
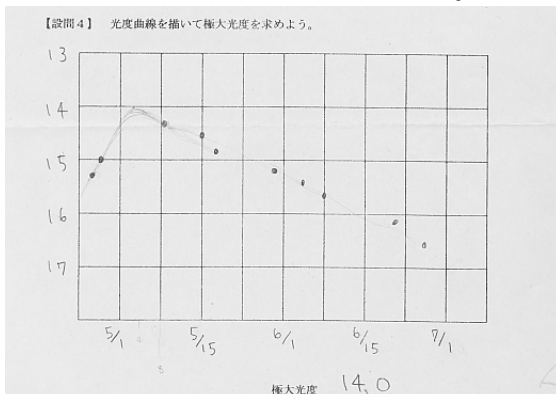
生徒が求めた値の平均値は-19.0、標準偏差0.7になりました。各自の値には多少のばらつきがありますが、データ数が多いことに救われて、良い値が出せたと思います。

なお、この活動は文系でも実施してみた。計算力が不足しているため、理系の2倍の時間がかかったが、結果は遜色ありませんでした。

超新星	平均	標準偏差
SN2003cg	-17.5	0.277746
SN2002bo	-18.4714	0.095119
SN2002cr	-19.0571	0.09759
SN2002cs	-19.1714	0.075593
SN2002dp	-18.65	0.281069
SN2002er	-18.8857	0.106904
SN2002fk	-19.4143	0.893362
SN2001dl	-19.3286	0.495696
SN2001cp	-19.5833	0.79854
SN2001eh	-20.18	0.920326
SN2001el	-18.58	0.216795
SN2001en	-19.84	0.304959
SN2001fe	-19.32	0.130384

### 測光して距離を求める活動

下図は生徒が描いた光度曲線です。最大光度の取り方がそれぞれです。



生徒が求めた結果は下の表のようです。みかけの等級がSNWEBの結果と比較して暗くなっています。これは測光時のスカイに銀河の明るさが入っていて、測光値が小さくなってしまったことがあるようです。しかし、スカイを加味しても0.2等級しか明るくなりません。もう一つ考えられるのは、ちょうど最大光度をおさえたデータがないので、測光した値の最大値を最大光度にしている生徒が多くなっていることが考えられます。また、絶対等級も各自が求めたもので、上記のように若干暗く出ていますので、それも影響していると思います。A～Hは生徒で、中断がみかけの等級、下段が距離[pc]です。

Snweb	A	B	C	D	E	F	G	H	平均
13.8	14.3	14.3	14.3	14.2	14.0	14.0	14.3	14.3	14.2125
3.1E+07	4.00E+07	4.00E+07	4.00E+07	4.00E+07	4.76E+07	4.76E+07	5.80E+07	5.80E+07	4.64E+07

## 6. 事後アンケートと授業の評価

授業の後、生徒にアンケートを実施しました。質問は次の通りです。画像で測光して距離を求める活動に限定した質問になっています。3を中立に、数字が大きいほど肯定的意見に、逆に小さくなるほど否定的意見となるように作ってあります。

先日のパソコン実習についてお答えください。

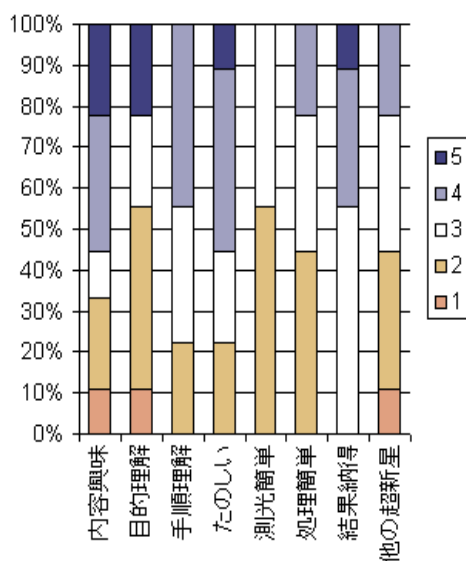
そう思わない    どちらかというと思わない    どちらでもない    どちらかというと思う    そう思う  
超新星と距離について

- 1) 講義形式の授業と比べて、内容に興味を持てた。
- 2) 講義形式の授業と比べて、目的がわかりやすかった。
- 3) 講義形式の授業と比べて、手順が理解しやすかった。
- 4) 講義形式の授業と比べて、やっていた楽しかった。
- 5) 画像から明るさのデータを測定するのは簡単だった。
- 6) グラフや計算で結果を見つけるのは簡単だった。
- 7) 自分でも納得ゆく結果が出せた。
- 8) 他にも超新星の画像があれば、自分でもやってみたい。

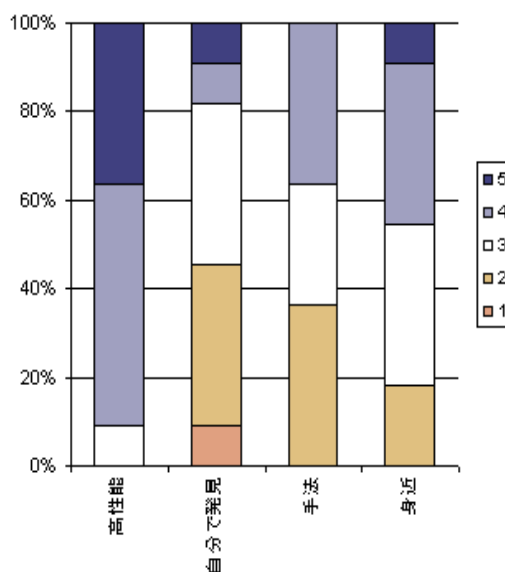
全般について

- 1) すばる望遠鏡のような、より高性能の望遠鏡の画像を使いたい
- 2) 画像を得られれば、自分でも何か発見できそうな気がする。
- 3) 天文学で使われている手法がわかった。
- 4) 宇宙のことが以前より身近に感じられる。

### 超新星と距離



### 全般



結果は、画像を使うことで興味を持つ生徒が多くなる一方、機械操作や計算の手順にとられて何をしているのか目的を見失っていることもあるようです。今回のような形の探求活動が楽しいと感じる生徒の割合が非常に多く、また、自分の出した結果に納得している生徒が多いことも特筆すべきことと思います。

より性能の良い望遠鏡の画像を望むのは、それらの画像はより解析しやすいもので、もっと多くのことを見つけられるかもしれないという一種期待感の現れでしょう。天文学の手法をこの方法で理解させることができるかどうかは、アンケートの結果からは微妙であるが、少なくとも何名かは理解できたと考えており、天文学がより身近になったと感じる生徒がそう考えないものより圧倒的に多くなることは、天文教育と言う観点からは評価すべき内容だと思えます。

アンケート中の自由記述では、「超新星は最初なかなか発見がしづらかった。」「プリンクに手間取るが、測光は面白い。」「光度曲線が描きやすい。」などの意見、感想がありました。

指導する教員の立場としては、大きな困難もなく、距離40 Mpc前後が出せたことが良かったのではないかと考えています。それぞれの生徒が「発見」をしたときのうれしそうな顔や、授業のまとめのときに、pcをlyに変換させて1億を超えることを示唆したときの感嘆の声など、授業を仕掛けた側としてはうれしい結果でした。

## 7. 今後の課題

ほかに利用できる画像があれば欲しいです。Paonetの観測可能な施設に画像データの提供を働きかけてみたいです。また、HSTアーカイブやSMOKAの中から見つけられると、教材の幅が広がりそうです。佐野さんに提供していただいたデータのように、ダーク、フラットなどの1次処理がしてあれば、Makali'iを使って生徒が画像を作るところから始められると思います。時間の制約が少ない部活動などでは、より活用の幅が広がると思います。

別の観点ですが、画像をたくさん重ねることでS/N比がよくなるのが、見た目にも明かにわかりますし、グラフからも確認できます。情報科等ではこのような使い方もおもしろいかもしれません。

## 8. 謝辞

快くSN2003duの画像データを提供して下さった、名寄市立木原天文台の佐野さん、佐野さんを紹介して下さった、さじアストロパークの宮本さん、ワークシートやティーチャーズガイドの内容や記述について細部まで検証して下さった国立科学博物館の洞口さん、データの扱いや論文検索に様々なアドバイスを下さった国立天文台の市川さん、教員の立場でともにアイデアを練って下さった五島さん、大島さん、本田さん、田邊さんはじめPaofitsのみなさん、そして、手際の悪い授業につきあってくれた生徒のみなさん、どうもありがとうございました。

## 参考にした書籍

宇宙論入門 バーバラ・ライデン 2003.8 ピアソン・エデュケーション  
21世紀の宇宙観測 家 正則 2002.12 誠文堂新光社  
観測的宇宙論 池内 了 1997.12 東大出版会  
なっとくする宇宙論 二間瀬 敏史 1998.4 講談社