

## 論文

## 高校物理における天文研究データの教材利用

## —ブラックホールの質量導出教材を事例として—

篠原秀雄（埼玉県立草加東高校）、縣 秀彦（国立天文台）、  
三好 真（国立天文台）、松本直記（慶應義塾高校／国立天文台）

Development and Implementation of Teaching Materials for High School Physics  
Based on Astronomical Research Data

- Deriving the Mass of a Black Hole and a Change in the Students' Study Goals -

Hideo Shinohara (Soka-Higashi Senior High School),  
Hidehiko Agata (National Astronomical Observatory of Japan),  
Makoto Miyoshi (National Astronomical Observatory of Japan),  
Naoki Matsumoto (Keio Senior High School / National Astronomical Observatory of Japan)

## 概要

銀河中心の巨大質量ブラックホールの存在を観測的に示唆する論文のデータを教材化し、物理 II における円運動や万有引力の法則の授業の中で実施した。生徒は授業で学んだ知識を使い、論文における研究者の議論と同じ道筋をたどって中心天体の質量を求める。物理の題材として天文分野は生徒の関心が高く、学習への動機付けに有効であると思われる。この演習を通して、自分たちが学んでいる物理がどのように実際の研究で利用されているかを知ることと、具体的な研究データを用いることによって生徒の学習満足度を高めることが示唆された。このように天文学の論文から取り出した研究データを高校物理の教材として活用することは、学習動機を高める可能性がある。

## Abstract

We have developed teaching materials based on the data from an article which suggested the existence of a super massive black hole in the center of the galaxy through observations. Students, using the knowledge they have gained in classes, will follow the same line of reasoning as the researcher in the article to attain the mass of the central object. Using physics on a high school level, teaching materials based on authentic resources drawn from an astronomy article in this way can change the students' view of learning. These results suggest that it is possible to improve students' motivation to learn physics through the use of these teaching resources.

(Received: 10 July 2014, Accepted: 15 November 2014)

## 1. はじめに

### 1.1 研究の動機と意義

高校の物理の授業、特に演習においては、生徒は整えられた理想的な条件の下で公式を使って解答を得るといった活動がほとんどで、物理を単に演習問題を解くためのものとして捉えがちである。しかし、自然科学としての物理学は本来自然を深く理解するためのツールである。高校で物理を学ぶ際には、物理そのものを学ぶだけでなく、物理の理解が新たな知見を生み出すことを生徒は知っておくべきであろう。

それでは、生徒は理科における実習や実験をどう捉えているのだろうか。一山ら(2003)の大規模なアンケート調査によると、自然や科学に対する興味関心の高さ、および理科が好きという児童・生徒の割合は小学校の時点ではかなり高いものの、中学校、高校と課程が進むにつれ減少していく。それに対応するように「観察や実験を多くしたい」「不思議なことを見せてほしい」という児童・生徒の割合は減少し、逆に「教科書をわかりやすく説明してほしい」という割合は増加する[1]。このことから、高校生段階における理科の学習は、知的好奇心から動議付けされたものではなく、試験や受験のために「やらなくてはならない」ものとして行われていると読み取れる。実験や実習も、科学に対する興味が低い状態では科学の面白さを体験するものではなく、学習内容理解のための作業と捉えられている可能性が高い。科学・理科に対する興味関心の低下、いわゆる「理科離れ」は国際的な学力調査(TIMSS)でも指摘されており、2011年の報告によれば、小4で「理科の勉強が楽しい」と答えたのは調査国中トップの90%だったのに対し、中2段階では63%にまで減少している(なお、いわゆる「ゆとり教育」が進行しつつあった時期よりは小中ともポイントは改善している)[2]。興味がある

対象の学習であれば、能動的に楽しく取り組めるだろうが、興味も無いのに必要に駆られての学習は砂を嚙むような修行に他ならない。筆者の縣(2003)は、学習に実際の研究で用いられるような真正資源(authentic resources)を効果的に導入することで、児童・生徒の関心・意欲を高められると指摘した[3]。真正資源とは、大学や研究機関が有する最新情報、知的財産、および研究資源を指す。

そこで、実習に用いる真正資源として天文学の研究論文に載っている観測によって得られた基本的なデータ(論文の議論の基礎となるデータ、以下「研究データ」と表記する)を取り出して、その論文中で研究者が実際に展開している議論をたどりながら生徒自身が問題を解いていくという教材を作成し、実際に授業の中で使ってみることにした。これによって自分たちが学んでいる物理が、実際に研究の場でも自然を探究し理解するために使われていることが実感でき、物理学への興味が高められると考えた。

また天文分野を選んだのは、貫井ら(1976)[4]、鈴木(1992)[5]、高橋ら(2003)[6]などのアンケート調査にあるように、天文分野の学習は年代、性別を問わず興味度が高いことや、筆者(篠原)が高校で物理を教えている、万有引力など天文学に関連する分野に生徒が強い興味を示すことを感じていたからである。このことは授業内のアンケートでも直接調査をした。

### 1.2 原論文の概要と意義

本研究で利用したのは、りょうけん座の銀河NGC4258(=M106、図1)中心の巨大質量ブラックホールの存在を観測的に示唆する論文である[7]。このMiyoshiら(1995)の論文の概要と意義を以下にまとめる。

野辺山の45m電波望遠鏡によって、

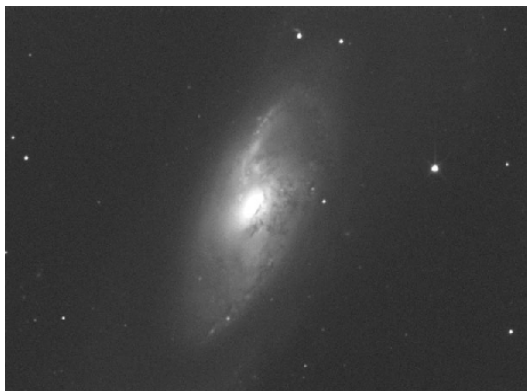


図 1 NGC4258 (M106) (国立天文台提供)

NGC4258の銀河中心核から秒速900kmの高速水メーザーが発見された。一般に水メーザーとは星間ガス分子雲に含まれる水分子から放射される強力な波長幅の狭い電波である。Miyoshiらは、NGC4258の高速水メーザーは中心核大質量ブラックホールと関連するのではないかと考え、その空間構造を明らかにするためVLBI(超長基線電波干渉法)によって、高空間分解能観測を行った。その結果、NGC4258の水メーザーは、銀河中心の大質量天体の周りにある高速回転ガス円盤からの電波であることがわかった。ガス円盤はケプラーの法則に従って回転していることが考えられ、内側ほど速く回っている。その運動から中心にある天体の質量が太陽質量の3700万倍と計算された。ガス円盤は半径1光年程度なので、その中に太陽の3700万倍の質量が詰まっていることになる。通常の星団ではこの高密度を説明できないため、中心に巨大質量ブラックホールがあることが強く示唆され、ブラックホール存在の強力な観測的証拠といえる。

解析で用いられたケプラーの法則は高校物理で学習する。巨大質量ブラックホールと考えられる天体の質量がケプラー則を用いて正確に測られた例としては、NGC4258の観測が世界で初めてであり、また現時点でも他の

観測例としては銀河系中心のSgr A\*しかない。今回の原論文は、教材として高校物理の範囲内で展開可能であり、教育的な点においても、非常に大きな意義をもっている。

この論文中のデータを利用して、円運動や万有引力の法則を使って中心天体の質量を求める教材を作成し、実際に授業を行った。授業の前後で生徒にアンケート調査を実施し、天文分野に対する生徒の興味・関心や、論文からの研究データを使って演習をすることについての評価などを調べた。

本報告では、作成した教材の内容や生徒の天文分野への関心、研究データを素材として演習問題を解くことに対する生徒からの評価等を考察し、天文学の研究データを物理の授業で使うことの意義について提案する。

## 2. 研究の方法

### 2.1 研究の概要

恒星進化の最期の姿として形成されるブラックホールは、質量がだいたい太陽の数倍程度となる。これとは別に、活動的な中心核をもつ銀河の場合、その中心に巨大質量ブラックホールをもっていることが、観測的に強く示唆されるようになってきた。例えば、我々の銀河系の中心にある巨大質量ブラックホールの質量はその周りを回る恒星の運動から推定され[8]、水メーザーを用いた手法では太陽質量の数千万倍以上のものも発見されている[7, 9, 10]。

銀河の中心天体をリング状に取り囲み回転するガス雲が発する電波(水メーザー)のドップラー効果からガス雲の回転速度がわかる。また、遠く離れた複数の電波望遠鏡を組み合わせるVLBIの観測からは、そのガス雲の位置が精度よく決められ、回転半径がわかる。これにより、ガス雲を引きつけて振りまわしている銀河中心の天体の質量を求めることができる(図2)。

私たちの銀河系から 2300 万光年の距離にある NGC4258 (M106) 銀河に対してこのような観測がなされた結果、その中心に太陽の 3700 万倍もの大質量が存在することが明らかになった。その正体は巨大質量ブラックホールであると考えられている [9, 10]。この研究の最終段階で中心天体の質量を求めるのに使われているのは、高校物理で学習する円運動と万有引力の法則の知識であり、その計算過程は、高校生でも十分に理解できるものである。

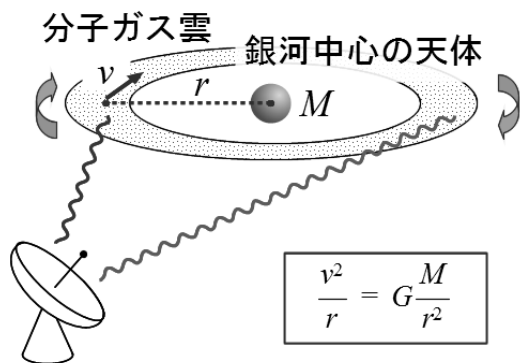


図 2 銀河中心の天体の質量を求める原理

そこで、この論文からその議論の根拠となるデータ (グラフ) を抜き出して、それを取り入れた演習プリントを作成し、研究者がたどった議論の道筋を高校生にも体験させようと考えた。実際には演習部分だけでは生徒の知識が不足しているので、それを補うための説明 (たとえば恒星の一生など) や復習の内容を入れた講義プリントを作成し、演習の前に必要な知識を与えることとした。生徒は書き込み式のプリント (資料として文末に掲載) を使って学習を進め、授業者 (筆者: 篠原) はパワーポイントのスライドを主に使用しながら授業を進めた。

生徒は、観測で得られたグラフからデータを読み取り、その値と物理の授業で学んだ知識を組み合わせ NGC4258 銀河の中心にあ

る天体の質量を求め、論文の結論と自分たちの計算結果を比較・検討する。この活動を通して、高校で学ぶ物理の知識が研究の最前線で自然探求の手段として使われているということ学ばせようと考えた。

本教材についての評価のために、授業の前後で生徒にアンケート調査を実施した。授業前には物理へのイメージや天文学への興味を調べ、授業後には今回の授業に対する評価をさせるとともに再び物理へのイメージを問い、授業の前後での傾向の変化を調べた。これによって、天文分野に対して生徒は本当に高い関心を示すのか、また演習の中で実際の研究データを使うことが、物理を自然理解のためのツールであると生徒が実感することにつながるか、といった点を調べた。

## 2.2 教材の内容

本研究の教材は、物理Ⅱ [11]における円運動や万有引力の学習の後で実施する発展的内容として位置づけられる。

教材の構成と展開は表 1 のとおりである。この内容を 2 コマ (1 コマ 65 分授業) で実施できるようにまとめた。

まず、万有引力の位置エネルギーや脱出速度について、簡単な演習を含めながら復習する。その延長で天体の脱出速度が光の速度に達した天体としてのブラックホールを考える。続いてブラックホールのような極限的な天体がどのようにして生まれうるのか、ということを知るために、恒星の一生について講義する。また、恒星の最期としてのブラックホールだけでなく銀河中心に巨大質量ブラックホールが存在していることがわかってきたということも説明しておく。ここまでの約 1 時間目の内容となる。

これを踏まえて、2 時間目では実際に論文から取り出したグラフからデータを読み取り、銀河中心にある天体の質量を計算する演習を

行う。そしてまとめとして、論文の結論と自分たちの計算結果を比較・検討してみる。

表1 教材の構成と授業の展開

<1時間目>		
1	【講義】	万有引力の位置エネルギーと脱出速度
2	【演習】	地球表面からの脱出速度を求める
3	【講義】	地球と同じ質量のブラックホールの大きさを考える
4	【演習】	地球と同じ質量の天体がブラックホールになる条件を考える
5	【講義】	恒星の一生とブラックホールがつけられる過程の説明
<2時間目>		
6	【講義】	ブラックホールを観測する方法についての説明
7	【演習】	NGC4258 の観測データから中心天体の質量を求める
8	【講義】	まとめ

演習で使うグラフは、電波望遠鏡 (VLBI) によって NGC4258 の中心部の分子ガス雲を観測して得られたものであり、ガス雲の回転速度が中心からの距離に対してプロットされている (図3)。

このグラフからガスの回転速度とその点の中心からの距離を読み取り、円運動の運動方程式を用いて中心天体の質量を求める (図4)。この式を見るとわかるように、計算自体の難易度は、実はそれほど高くない。この演習の目的は、複雑な計算をすることにあるのではなく、自然理解のツールとしての物理の意義を知ってもらうということなので、この内容で十分であると考えられる。

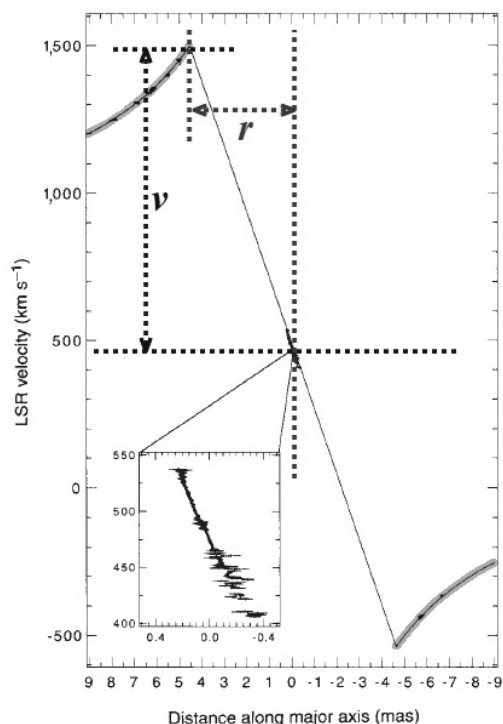


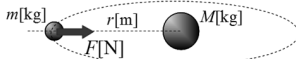
図3 論文[8]より抜き出したNGC4258中心近傍のガス雲の回転速度と中心からの距離の関係を示すグラフ

縦軸が回転速度で横軸が距離 (中央が銀河中心)。中心をはさんで両側の速度が逆になっていることが、ガス雲が回転運動をしていることを示している。ガス雲のディスクは地球から見ればほぼ真横を向いており読み取った速度がそのまま回転速度と考えて差し支えない。つまり、左端と右端の曲線部ではそれぞれガス雲のケプラー運動の速度をすべて視線速度として見える部分になる。

グラフの最大の点で、回転速度と中心から最も内側に位置するガス雲までの距離を読み取らせた。

## 運動方程式を使ってみよう

電波源であるガスは、万有引力によって円運動していると考え、円運動の運動方程式をたてて、中心天体の質量を求めよう

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$$


$$M = \frac{rv^2}{G} = \frac{(4.4 \times 10^{15}) \times (1.1 \times 10^6)^2}{6.67 \times 10^{-11}} = 8.0 \times 10^{37} \text{ kg}$$

これを、太陽質量  $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$  で割ってみると、 $4.0 \times 10^7$  となり、中心天体の質量は、太陽の4000万倍もあることがわかる。

➡ 銀河中心の巨大質量ブラックホール

図4 円運動の運動方程式から中心天体の質量を求める計算の説明部分（講義プリントより）

### 2.3 本教材による授業の実施について

本教材を使った授業を、S県立W高等学校の第3学年、物理Ⅱの2講座、計47名（男子39名、女子8名）に対して実施した。実施校は生徒の約9割が大学に進学する進学校であり、対象の生徒全員が四年制大学への進学を希望し、更にその多数が理工系への進学を希望している。つまり、物理を用いて受験をする理系の高校生を対象に授業を実践した。

授業は、2009年8月31日から9月3日までの計4日間、2講座それぞれ2コマずつ合計4コマを実施した。

前述したように、本教材の内容は2コマで完結するように構成したが、1コマ65分（1コマ1.3単位）を前提にまとめたため、他の多くの高校がとっている1コマ50分授業の場合には、3コマ分が必要になるだろう。

### 2.4 目的達成の評価手段

本実践による授業の前後でアンケートを実施し、生徒の評価を得ることとした。

アンケートで調べたいと考えたのは、主に次の2点である。

(1) 生徒は高校理科のどの分野に興味を持っているか。また、天文分野への興味・関心は

どうか。

(2) 研究データを使うことについて、生徒はどう評価するか。また、この実践をとおして、物理が自然理解のツールであることを感じてもらえるか。

(1)については、授業前に高校理科4科目の教科書の目次に掲載される大項目を選択肢として用意し、単純に興味のある分野を自由選択させた。また、授業後には天文分野の素材を用いた物理の授業について、5段階で評価させた。

(2)については、物理に対するイメージとして「受験のために必要なもの」か「自然を理解するために必要なもの」かを択一で選ばせ、授業の前と後でその傾向に変化がどうかを調べた。ここで、「受験のために必要なもの」とは自己の興味に関係なく受験という外的要因によって行う学習を意味し、「自然を理解するために必要なもの」は自然の探求のために必要な学習と捉えて、科学への興味が高まった状態を意味していると考えた。物理を用いた受験をする生徒なので、当然ながら受験のための学習の一環と捉えがちであると予想されるが、前後の変化を明瞭に捉えるため、ここではあえて二つの選択肢から択一で選ばせた。

また、授業前には物理の演習に対して望んでいることを回答させ、授業後には研究データを利用した演習に対する評価を5段階で評価させた。実際のアンケートの質問内容は、次節でその結果とともに示す。

## 3. 結果と考察

### 3.1 物理の授業における天文素材の有効性について

生徒が理科のどの分野に興味をもっているかを調べるため、次の質問を授業前のアンケートで実施した。その質問と集計結果を表2に示す。

物理選択者へのアンケートであるから、物理分野への興味が高いのは当然であるが、その物理分野を抑えて天文分野がトップに立った。生徒が天文分野への高い興味もっていることがわかる。

表 2 理科の各分野に対する興味の傾向  
(授業前のアンケート調査より)

<質問> 次の項目の中で興味があるもの、あるいは好きなものは？(複数回答可) a)運動とエネルギー b)波動 c)電気 d)物質と原子 e)原子と原子核 f)物質の構成 g)物質の種類と性質 h)物質の変化 i)物質の構造と化学平衡 j)生活と物質 k)生命と物質 l)細胞 m)生殖と発生 n)遺伝 o)環境と動物の反応 p)環境と植物の反応 q)地球の概観 r)地球の内部 s)地球の歴史 t)大気と海洋 u)宇宙の構成		
<集計結果> (回答人数：45名、以下同じ)		
1位	「宇宙の構成」	26人
2位	「運動とエネルギー」	22人
3位	「電気」	13人

授業後には、天文素材を教材として利用したことについての評価をさせた。その質問と集計結果を表3に示す。やはり天文の素材を使ったことへの生徒の評価は非常に高い。

前述の通り、天文分野への関心、興味は高い。殊にブラックホールについてはその傾向が顕著である。加藤ら(2004)の大学1年生を対象にした調査で示されるようにブラックホールは、文系理系問わず、様々な科学用語の中でもトップクラスの認知率や興味の高さが報告されている[12]。

対象が物理選択者に限定された中での調査ではあるが、多くの生徒も同様にともと宇宙や天文、ブラックホールに興味が高いと考えられる。本研究の授業で、その素材を使って学習できたという事が、生徒からの高い評

価につながったと考えられる。このことは、「天文分野の素材は物理の教材として有効である」ことを示しているのではないだろうか。

表 3 天文素材を物理の教材としたことについての評価(授業後のアンケート調査より)

<質問> 今回の授業・演習の中心に置いたのは、実際の天文学の研究論文から抜き出した内容でした。天文学の素材であったことについて、意見を聞かせてください。		
<選択肢と集計結果>		
a	とてもよかった	30人
b	まあよかった	13人
c	どちらともいえない	1人
d	あまりよくなかった	0人
e	とてもよくなかった	1人
※自由記述欄の意見から ・選択肢 a, b の欄より： 宇宙・天文に興味があるのでよかった(多数)/教科書よりリアルだった/授業でやらない内容でよかった/将来やることがわかった ・選択肢 c, d, e の欄より： わからなかった/難しかった		

### 3.2 研究データを用いた演習の有効性について

ここでは、2種類の質問を用意した。ひとつは、生徒が物理を受験のために必要なものととらえるか、それとも自然理解のツールととらえるかを問うもので、本授業の前後で調べて比較した。質問と集計結果を表4、図5に示す。

本研究の対象生徒は理系の受験生であることから、物理を「受験のために必要なもの」とする回答が絶対数として多いのは当然であろう。しかしながら本授業の前後で「自然理

解のため」と答えた生徒が 32.6%から 44.2%に上昇した。本授業を通じて、物理に対する学習感が大きく変化したとは言えないが、わずかながらも受験の先にある科学のおもしろさを垣間見てくれたのではないだろうか。

表 4 物理に対するイメージの変化  
(授業前後のアンケートを比較)

<質問> 物理に対してあなたが持っているイメージはどのようなものですか？ AかBのどちらかを選んでください。 A 受験のために必要なもの ⇔ B 自然を理解するために必要なもの		
<集計結果>		
選択肢	授業前	授業後
A 受験のために必要	29 人	24 人
B 自然理解のために必要	14 人	19 人

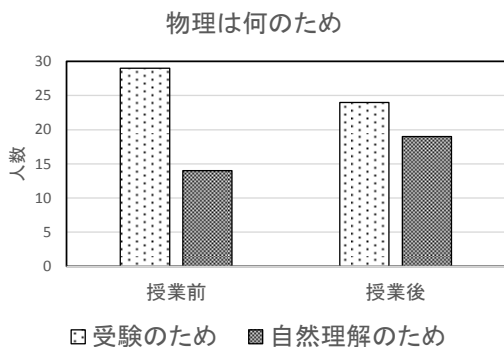


図 5 物理に対するイメージの変化

ここの項目におけるもうひとつの質問は、授業前に物理の演習に対して望むことを問い、授業後には研究データを使った本演習への評価を求めるものであった。その質問と集計結果を表 5 に示す。授業前アンケートでは、生徒が物理演習に望むものは圧倒的に「知識理解増進」「入試問題の演習」である(図 6)。複数回答可の中で「研究データの利用」と回答した生徒は 9 人で 20%に過ぎず、残る 80%

の生徒には自然科学の探究は望まれていない。つまり、多くの生徒にとって入試という外的要因が学習動機であり、自然科学の興味といった内的要因から学習が行われていないことを示している。

表 5 物理演習に望むこと、演習で研究データを使う事への評価(授業前後のアンケート調査より)

▼物理演習に望むこと	
<質問> あなたが物理の授業で問題演習に望むことは何ですか？(複数回答可)	
<選択肢と集計結果>	
知識や理解をかためる基本的な演習	28 人
入試で出題される応用的な演習	30 人
研究データを利用した現実的な演習	9 人
▼演習で研究データを使った事への評価	
<質問> 今回の授業・演習の中心に置いたのは、実際の天文学の研究論文から抜き出した内容でした。研究論文の観測データを利用したことについて、意見を聞かせてください。	
<選択肢と集計結果>	
a とてもよかった	21 人
b まあよかった	18 人
c どちらともいえない	4 人
d あまりよくなかった	1 人
e とてもよくなかった	1 人
※自由記述欄の意見から	
・選択肢 a, b の欄より： わかりやすかった／リアルだった／研究に触れられた／大学の研究で学んでいることが生かされると実感／論文に興味をもった／データから推測していくのが面白かった／実際のデータはやる気が出る	
・選択肢 c, d, e の欄より： わからなかった／理解できなかった／難しかった	



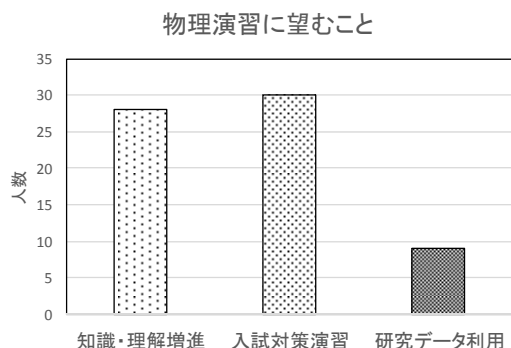


図6 物理演習に望むこと  
(授業前アンケートより)

しかし、授業前の質問からわかるように研究データの利用への期待が低く、自然科学への興味からは行動が動機付けされていない対象にも関わらず、授業後のアンケートでは研究データを用いた演習に対して「とてもよかった」「よかった」と答えた生徒の割合は87%に達し、高い評価が得られたことがわかる(図7)。

このことから、「研究データを用いた物理演習への期待はあまりなかった」が「実際にやってみると研究データを使った演習は面白い」という評価を得ていることがわかる。これまで研究データに接する機会がなかった生徒が、本研究の教材に取り組んでみて、これを高く評価したといえるのではないだろうか。

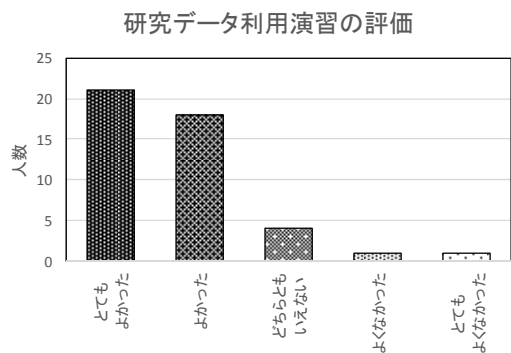


図7 演習で研究データを使った事への評価  
(授業後アンケート)

自由記述欄に書かれた回答を見ると(表5)、肯定的な方では演習の素材がリアルでよいといった評価や、自分が学んでいることが実際の研究の場で使えることがわかったことへの評価などがあつた。なお、否定的な意見は少数であつたが、いずれも内容が難しく理解できなかったというコメントであつた。この点については、教材の内容・構成や説明の方法などをさらに検討してみたい。

以上で見てきたように、高校物理の学習において天文分野の題材を導入することは、生徒の興味を喚起する上で効果的であると考えられる。また、研究データ(真正資源)を用いた教材を作成し演習を行うことで、生徒が学習内容と実際の研究の関連を体験できたり、学習した内容と具体的なデータを用いて結論を導くことができることなどから、演習に対する高い評価を得られた。一連の取り組みを通して、生徒の自然科学に対する興味を醸成することができたのではないだろうか。このような体験的で具体的な真正資源を用いた演習によって学習項目を編んでいけば、生徒自ら興味を持ち、実感しながら自然理解を目的として能動的に学習を進められる科目に昇華できると筆者らは考えている。

#### 4. おわりに

天文の研究データを教材化する試みは、すでにいくつかのグループで実践が試みられている。たとえば天文・地学分野の研究者や教育者等で構成されているPAOFITSワーキンググループ[13]では、天文学の研究用画像の標準形式であるFITS画像を用いて、宇宙膨張のハッブル則を導き出したり恒星のHR図を作成して星団までの距離を求めたりするなどいくつかの教材を作成し、その実践報告もなされている[14, 15]。また、他にも太陽観測衛星「ひので」やX線観測衛星「すざく」などの研究データを教材化する試みなども進行

中である[16, 17]。

ただし、これらはほとんどが天文分野すなわち高校地学の教材として研究・作成が進められているものである。本論文で報告したように、天文学の研究データは物理の学習においてもその利用価値が非常に高い。

また、教員自身が様々な論文や研究成果に直接アクセスして、今回のような教材として使えるデータを自分でとってこられるようになるとうれいと考えている。例えば国立天文台天文データセンターの運営する SMOKA データベースには、すばる望遠鏡や岡山天体物理観測所、木曾観測所などの撮影画像が公開されている[18]。既出の DARTS には「はやぶさ」や「すざく」などの探査機の観測画像が公開されている[19]。まさに真正資源の宝庫である。

天文学の論文を検索するのであれば、たとえばインターネット上には ADS という研究論文検索サイトがある[20]。筆者もこのサイトを利用して、論文中のグラフやその他の必要な情報を得た。他に一般的なところでは、国立情報学研究所の CiNii [21]や Google の論文検索サービスの Google Scholar [22]もあり、これらでは天文学に限らず広い分野の論文などが検索できる。以前では、自らが研究者であるか、研究者と強いつながりを持つ教員でもない限り、本研究のような実際の研究データを利用した教材を開発できなかっただろう。魅力ある教材を作るには非常に恵まれた時代になったといえる。筆者は前述の教材開発各グループにも所属して情報交換をしながら、他の天文の研究データをさらに物理教材として利用できるよう、研究活動を続けていく予定である。

※本研究は、日本天文学会 2009 年内地留学、埼玉県 2009 年度長期研修、および 2014 年度慶應義塾一貫教育校国内長期研修の研究テ-

マとして実施した。

## 文献・注釈

- [1] 一山秀樹ほか (2003), 『理科嫌い・理科離れに関する意識と理科研究のあり方に関する研究』, 兵庫県立教育研修所研究紀要, **113** : 25-34
- [2] 国立教育政策研究所 (2011), IEA 国際数学・理科教育動向調査の 2011 年調査, <http://www.nier.go.jp/timss/2011/>
- [3] 縣秀彦 (2003), 『大学・研究機関からの学校教育支援活動のあり方に関する実証的研究』, 東京学芸大学博士論文
- [4] 貫井正納ほか (1976), 『小・中・高校児童・生徒における理科学習の興味についての研究』, 千葉大学教育学部研究紀要, **25** : 21-30
- [5] 鈴木文二 (1992), 『いま, 中・高生の天文意識はどうなっているか』, 天文月報, **85(10)** : 461-463
- [6] 高橋典嗣ほか (2003), 『「総合的な学習の時間」における遠隔学習導入の有用性に関する考察』, 学際研究, **16(1)** : 1820-1830
- [7] Makoto Miyoshi et al. (1995), 'Evidence for a black hole from high rotation velocities in a sub-parsec region of NGC4258', *Nature*, **373** : 127-129
- [8] Rainer. Schödel et al. (2002), 'A star in a 15.2-year orbit around the super-massive black hole at the centre of the Milky Way', *Nature*, **419** : 694-696
- [9] Yuko Ishihara et al. (2001), 'Water-Vapor Maser Emission from the Seyfert 2 Galaxy IC 2560: Evidence for a Super-Massive Black Hole', *PASJ*, **53** : 215-225
- [10] Mamyoda Koichi, et al. (2009), 'Detection of a Sub-Keplerian Water Maser Disk at the Active Galactic

Nucleus of the Galaxy IC 1481', PASJ,  
**61** : 1143-1151

[11] 旧学習指導要領における科目名。現行指導要領の「物理（4単位）」に該当する。

[12] 加藤万里子ほか（2004），『大学一年生の物理への関心度と知識度調査』，慶應義塾大学日吉紀要 自然科学，**35** : 45-61

[13] PAOFITS, <http://paofits.nao.ac.jp/>

[14] 原 正ほか（2008），地学教育，**61(4)** : 113-122

[15] 原 正ほか（2009），地学教育，**62(5)** : 151-165

[16] PAONET ひので活用ワーキンググループ, [http://hinode.nao.ac.jp/pao\\_hinode/](http://hinode.nao.ac.jp/pao_hinode/)

[17] 衛星観測データを用いた宇宙科学教材, <http://www.darts.isas.jaxa.jp/outreach/index.html>

[18] SMOKA,  
<http://smoka.nao.ac.jp/index.ja.jsp>

[19] DARTS,  
<http://www.darts.isas.jaxa.jp/index.html>

[20] ADS, <http://www.adsabs.harvard.edu/>

[21] CiNii, <http://ci.nii.ac.jp/>

[22] Google Scholar,  
<http://scholar.google.co.jp/schhp?hl=ja>



篠原 秀雄  
[hideo-s@js2.so-net.ne.jp](mailto:hideo-s@js2.so-net.ne.jp)



縣 秀彦  
[h.agata@nao.ac.jp](mailto:h.agata@nao.ac.jp)



三好 真  
[makoto.miyoshi@nao.ac.jp](mailto:makoto.miyoshi@nao.ac.jp)



松本 直記  
[matsu@hs.keio.ac.jp](mailto:matsu@hs.keio.ac.jp)

資料 生徒用ワークシート

【練習1】地球表面からの脱出速度を求めよう。  
 (地球の半径  $R =$  , 地球の質量  $M =$  )

3 脱出速度が光速に達した天体 ~ ブラックホール  
 【問い】脱出速度の式から考えて、脱出速度が大きくなるのは、どのような天体か。  
 ・表面からの脱出速度が光の速さに達してしまうと、光を含めてどんなものも、その天体の表面からは出てこられなくなる

4 地球がブラックホールになる条件  
 【練習2】地球の質量をそのままに、半径を小さくしていくケースを考えてみよう。  
 どこまで小さくすると、表面からの脱出速度が光の速さ  $c$  ( $c=3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ ) に達するだろうか。

銀河中心の巨大質量ブラックホールを探る  
 ~物理を使って宇宙を探求しよう~

1 万有引力の位置エネルギー  
 ・万有引力で引かれている物体は、位置エネルギー  $U$  をもっている。  
 ※ G:

2 脱出速度 (第2宇宙速度)  
 ・中心天体を地球 (半径  $R$  [m]) と考える  
 ・地表にある物体が、速さ  $v$  [m/s] (運動エネルギー  $K$  [J]) で斜直に飛び出す  
 ・このとき、物体が到達できる高さ  $h$  [m] は、右図のようになる。  
 ・飛び出した物体は、また地表に戻ってくる  
 ・物体が地球から完全に脱出して自由になるための条件は、  
 これを  $v$  について解くと、  
 この速さで物体が飛び出せば、地球の重力から完全に自由になる (二度と戻ってこない)

7 銀河中心の巨大質量ブラックホール

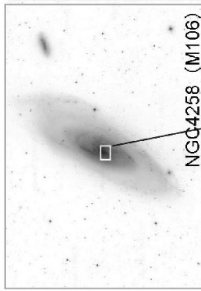
・ 恒星の最期につくられるブラックホールの他に、銀河中心にも巨大質量ブラックホールが存在することがわかってきた

※ 銀河 : 数千億個の恒星の大集団

・ 右図は NGC4258 (M106)。

私たちから、およそ 2300 万光年の距離にあるこの中心部にも、巨大質量ブラックホールがあることがわかった

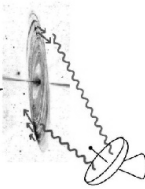
・ その、ほぼ確実な証拠についての論文が、1995 年、イギリスの科学雑誌 NATURE に発表された (NATURE, 01/1995, Miyoshi, et al.)



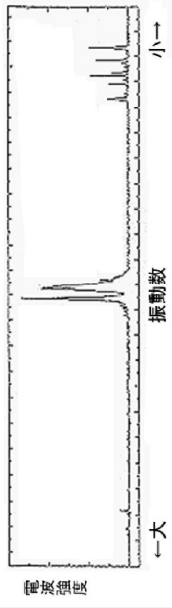
8 NGC4258 の中心にある巨大質量ブラックホールの存在を確かめよう

・ NGC4258 の中心部付近の電波観測によって、水分子が出す  $2.2 \times 10^9$  Hz の電波をとらえた

→ 中心部にある分子ガスパン酸からの電波



NGC4258の電波スペクトル



・ 中心にある大きなピークの左右に、振動数のことなる電波によるピークがいくつか見つかつた

・ など、振動数がずれたのか?

・ 詳細な観測から、電波源の移動速度  $v$  と NGC4258 の中心からの半径  $r$  の関係がわかつた

5 ブラックホールほどのようにして作られるのか

・ 恒星の一生

分かんガス雲・・・主に水素ガスやダスト

↓  
原始星・・・ガス雲の中で、赤外線が光っている

↓  
主系列星 (恒星)・・・中心部で核融合反応がおこり、安定して輝く

↓  
太陽の場合、100 億年ほど輝き続ける

↓  
赤色巨星・超巨星・・・中心部での核融合反応が進むと、恒星全体が大きく膨張する

↓  
太陽はあと 50 億年ほどで赤色巨星になる

(このあととの結果は、恒星の質量によって異なる)

・ 太陽程度の質量の恒星 ～ 惑星状星雲 + 白色矮星

↓  
恒星の外層のガスが、まわりの空間に静かに放出し、惑星状星雲となる

↓  
中心には、主にヘリウムまでできた中心核が残される

↓  
→ 白色矮星

・ 太陽よりずっと質量の大きい巨星 ～ 超新星爆発 + 超超新星天体

↓  
中心部での核融合反応が進み、原子番号の大きい元素が次々につくられていく

↓  
鉄がつくられるとそこで反応は止まってしまふ

↓  
恒星をささえる放射の圧力がなくなるので、恒星はいきにつぶれていく

このとき、残っていた物質が一瞬で反応して大爆発を起こす

→ 超新星 (超新星爆発)

何も残らない場合もあるが、中心部が圧縮されて超高密度天体が残ることもある

→ 中性子星 または ブラックホール

6 見えないブラックホールをどうやって探すのか

・ 連星の一方がブラックホールになった場合、ブラックホールは見えないが、となりの恒星が振りまわされているのわかる。

はくちよう座 X-1 ～ 最初に発見されたブラックホール候補天体

・ X 線観測衛星によって、激しく変動する X 線を放射する天体が見つかつた

→ はくちよう座 X-1

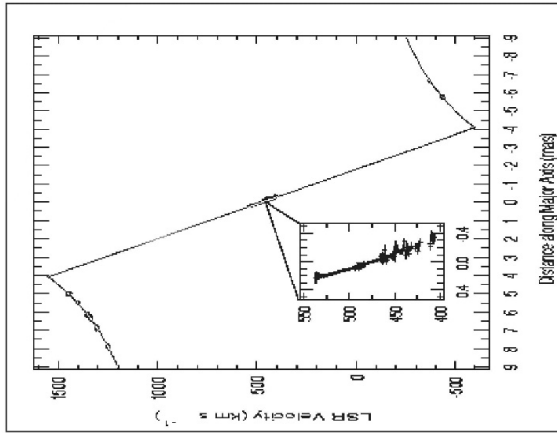
・ その位置を天文学望遠鏡で調べると、青白い恒星 (主星) が見つかつた

この恒星が、見えない天体 (伴星) に振りまわされていることが、観測からわかつた

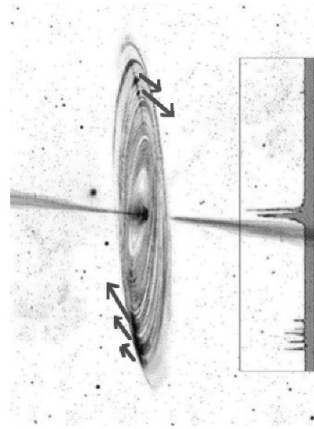
・ 主星のふらつき方から、中心天体の質量が求められた

→ はくちよう座 X-1 は、ブラックホール候補の条件を満たしていた

<NGC4258中心付近の電波源の移動速度 $v$ と、中心からの位置 $\theta$ との関係>



左図：  
分子ガス円盤のイメージと  
電波スペクトル



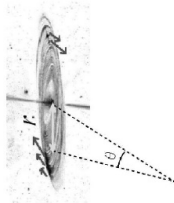
【演習 3】 NGC4258 の中心にある天体の質量を求めよう。

(1) グラフから、電波源の移動速度  $v$  ([km/s] → [m/s]) と、NGC4258 の中心から測った位置  $\theta$  [mas] (=ミリ秒：角度の単位) を読み取ろう。  
※  $1\text{mas}$  (角度のミリ秒) は、1度の 1/1000 のさざらに 1/1000 の角度

$v =$

$\theta =$

(2) 私たちから見た見かけの角度  $1\text{mas}$  (ミリ秒) は、NGC4258 (距離：約 2300 万光年) における実際の距離では  $1.1 \times 10^5 \text{ m}$  になる。(1)で求めた電波源の中心から測った位置  $\theta$  (角度で表した値) を、電波源の中心からの実際の距離 [m]に変換しよう。



(3) 向心力を万有引力にして円運動の運動方程式を立てて、中心にある天体の質量を求めよう。

(4) 私たちの太陽の質量は、 $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$  である。(2)で求めた質量は、太陽質量のどれくらい何倍になるか。

論文における結論は…  
「このような大質量の天体として仮定して存在できるのは、ブラックホールしかあり得ない」