

■ 地動説の授業

質問 1

太陽や月の、地球からの距離、太陽や月や地球の大きさはどうやってはかるのだろうか。これらをはかるのに何かいい方法はないだろうか。

質問 2

東の空に出る太陽と満月の大きさは、どちらが大きくみえるか？

予想 (ア) 月より太陽の方がずっと大きくみえる。

(イ) 月と太陽はほぼ同じ大きさにみえる。

(ウ) 太陽より月の方がずっと大きくみえる。

これが比較できる身近な自然現象は？

話 1 アリストタルコスの方法

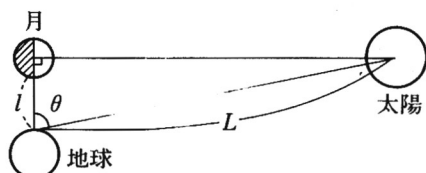
今から2千年以上も昔、アリストタルコスが考えた方法を紹介しよう。

① 右図のように、月が半月の

とき、月と太陽のなす角 θ

をはかれば、月と太陽までの

距離の比 l/L が求まる。

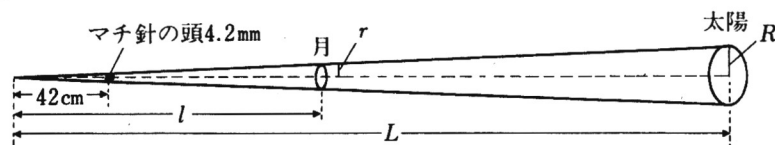


$\theta = 89^\circ 51'$ (当時は 87° と測定)

$$l/L = \cos(90^\circ - \theta) = \sin 9' \approx 1/400$$

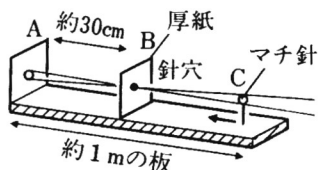
つまり、太陽までの距離は、月までの距離の約400倍もあることがわかる。

② 次の図は皆既日食のときと、マチ針で人工日食をつくったときの図である。



この図から、三角形の相似を使うと、太陽の大きさ $2R$ は、月の大きさ $2r$ の400倍もあることがわかる。つまり、距離の比が大きさの比になっているのである。

$$\frac{l}{L} = \frac{r}{R} = \frac{1}{400} \quad \dots\dots ①$$



右の図のように人工日食を作る実験をすると、太陽や月の大きさと距離の比が求まる。マチ針の頭（直径4.2mm）がちょうど太陽の像を隠す位置は針穴から約42cmの位置である。このことから

〈人工日食の実験〉図のように針穴を通して、厚紙Aに太陽像をつくる。次にマチ針の頭の影が太陽像の中に小さくできる位置をさがす。CをBに近づけていくと、Cの影がちょうど太陽像をかくす位置が求まる。

$$\frac{2R}{L} = \frac{2r}{l} = \frac{0.42}{42\text{cm}} = \frac{1}{100} \quad \dots\dots ②$$

つまり、太陽までの距離はその大きさの100倍、月までの距離もその大きさの100倍であることがわかる。

- ③ 地球の大きさは、月食のとき、月に写った地球の影の大きさを月と比べることによって求まる。月の大きさ $2r$ に比べて、月に写った地球の影の大きさ $2x'$ は2.7倍、約3倍である。

$$\frac{(\text{地球の影の大きさ})}{(\text{月の大きさ})} = \frac{x'}{r} = 3 \quad \dots\dots ③$$

このことから、月は地球の約 $1/4$ 、太陽は地球の約100倍の大きさであることをみちびくことができる。

〔研究問題〕 地球が月の4倍の大きさであることを月食の時の太陽、地球、月の位置の関係から求めてみよう。

ちょうど、運動場（半径50m）のまん中に、ビーチボールの大きさ（50cm）の太陽があるとすると、マチ針の頭（約5mm）程の地球が運動場の端を回り、その地球から約12cm程離れて、タラコの粒（約1mm）の大きさの月が回ってい

質問 3

- (1) 太陽のまわりを地球がまわるのと、地球のまわりを太陽がまわるのとは、どちらが合理的と思うか。
- (2) 太陽を0.5mの大きさとする、地球は() cm、月は() cmの大きさに相当する。地球から太陽までの距離は() m、地球から月までの距離は() cmになる。

この結果をもとに、これらの間のおよその立体的イメージを描いてみよう。

ることになる。

さらに、火、木、土、天、海王星は、50mの約1.5倍、5倍、10倍、20倍、30倍のところを回っていることになり、学校の回りの地図に軌道を書き込むとよい。一番近い恒星までは13000km（地球直径）以上もあることになる。

質問 4

- (1) 地球が1日1回自転しているとすると、赤道ににいる人の速さは何 km/h となるか。地球半径は6400km。
- (2) 地球が1年に1回公転しているとすると、地表にいる人の速さは何 km/h、何 km/s となるか。太陽・地球間の距離は 1.5×10^8 km。
- (3) 地球が静止していて、太陽やすべての惑星・恒星が1日1回公転するとすると、地球に一番近い恒星ケンタウルス座の α 星の速さは何 km/s になるか。これは、地球が公転している速さの何倍か。ケンタウルス座 α 星までの距離は4.3光年。1光年 $=9.5 \times 10^{12}$ km

- (1) 1670km/h (2) 10万 km/h, 30km/s (3) 30億 km/s

天動説では遠くの星ほど速いことになる。

太陽を中心に地球、火星の軌道を書くと、地球に最も近い（最も明るい）火星の位置は太陽と反対側に見えるとき（太陽が西に沈むと東の空に見える火星）、地球に最も遠い（暗い）時は太陽と同じ方向に見えるときである。これ

質問 5

火星の明るさは50倍ほど変化する。これだけの明るさの変化が生じるためには、火星・地球間の距離が7倍ほど変化しなくてはならない。（明るさは距離の2乗に反比例する）この距離の変化は天動説と地動説ではどう説明ができるか。

（話2の図A、図B参照）

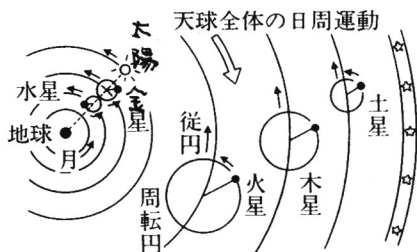
地動説によれば、最も明るい時の火星は地球からみて太陽のどちら側に見えるか。実際の観測結果はどうなっているか。

は観測と一致し、天動説ではこの距離の違いを説明することは全く不可能である。

話2 天動説と地動説

アリストアルコスが地動説を唱えたのは、太陽、地球、月の大きさや距離をはかることによって、天体構造の立体的イメージを描くことができたからであった。ところが、アリストテレスはいくらアリストアルコスの考えが魅力的であっても、敢えてそれを認めようとしなかった。なぜなら地球が本当に動いているならばそれを感じるはずだというのである。それに彼の力学によれば「静止がものの本性」だから、動く以上強制力が働くはずだ、そのため地球はこなごなになってしまうだろうというのである。

プトレマイオスはアリストテレスの天動説を完成した人である。彼は惑星の複雑な動きを周転円を使って説明した（図A）。彼の理論は、観測にあわせて次々と周転円をつけ加えていくというもので、大変正確であった。観測と合うように好きなか



図A プトレマイオスの宇宙体系

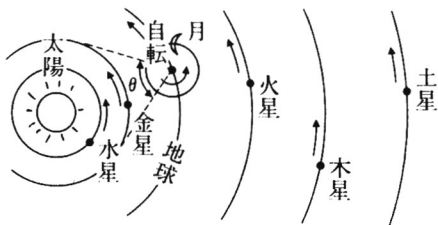
け周転円をつけ加えればよいから、正確なはずである。そのかわり、天体がどんなしくみになっているかは全く問題とされなかった。

コペルニクス時代には何と79個もこの周転円がついていたという。コペル

ニクスは、こうした天のしくみを問題にせず、現象しか見ない天文学に強い疑問を抱いていた。現象はともかく本当はどうかと。コペルニクスは、確かに地球が動くと感じないのは不思議

だが、途方もなく大きな天が1日に1回まわるということの方がよほど不合理ではないか、それに、天動説では全く偶然的なできごとが、太陽

中心のしくみ(図B)をもとにして



図B コペルニクスの宇宙体系図

考えると必然的に説明できてしまうというのである。

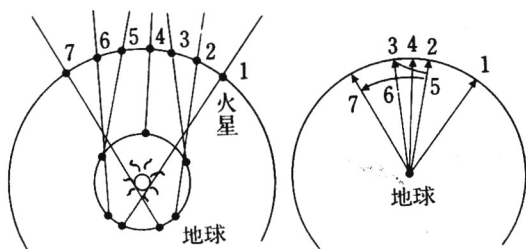
たとえば、

(ア) 火星の明るさの変化は天動説では説明不可能である。〔質問5〕

(イ) 水星・金星がいつも太陽の近くにある理由。地動説では図Bより、内惑星は太陽からある角度 θ 以上は離れないことが合理的に説明できる。ところが天動説では図Aのように地球・太陽を結ぶ線上に周転円の中心がきているのだが、それがどうしてなのかは全く説明がつかない。

(ウ) 地動説では、天動説のように複雑な周転円を考えなくても、地球や他の惑星が太陽のまわりを円運動すると考えるだけで逆行が説明できる(図C)。しかも、逆行を

おこすときはどういうときかという、地球が外惑星を追い抜くとき、つまり、太陽と反対側に外惑星が見え、最も明るいときであると、正確に予言でき



図C 地動説による火星の逆行の説明

る。内惑星は、地球を追い抜くときに逆行をおこす。天動説ではこのような明解な説明は全くできなかった。しかも、地動説では逆行の大きさが火>木>土の順に小さくなっていく理由も説明できるのである。

コペルニクスの地動説は、天文学に限らず自然観、世界観、あらゆるものの見方考え方の根本的変革をせまるもので、当時の人びとに強烈な衝撃を与えた。人間の生活の場、大地に縛られた自己中心の見方が根本からひっくり返され、不動の地球は一つのさまよえる星になってしまった。人間のよって立つべき足場を取り去ってしまったのだから、猛烈な反対の声が上がって当然である。とうとう彼の書いた『天球の回転について』という本は禁書とされてしまった。

ブルーノはコペルニクスの地動説を擁護するだけでなく、太陽系は広大無辺な宇宙のなかの一つの天体にすぎないことを説いて歩いた。『閉じた世界から無限宇宙へ』。しかし、彼は捕らえられ、火あぶりの刑に処せられてしまった。こういう中でも、人間の理性を信頼すべきだと考える人たちは、いたのである。

質問 6

- (1) ガリレオは木星の衛星を 4 つ発見した。これらの衛星の周期は、木星から遠ざかるにつれてどうなると思うか。

予想 (ア) 長くなる (イ) 短くなる (ウ) 相関関係はない

- (2) それでは惑星の周期は太陽から遠ざかるにつれてどうなるだろう。このことから、最も遠くにある恒星が 1 日 1 回まわると考えた方が合理的か、静止していると考えた方が合理的か考えてみよう。

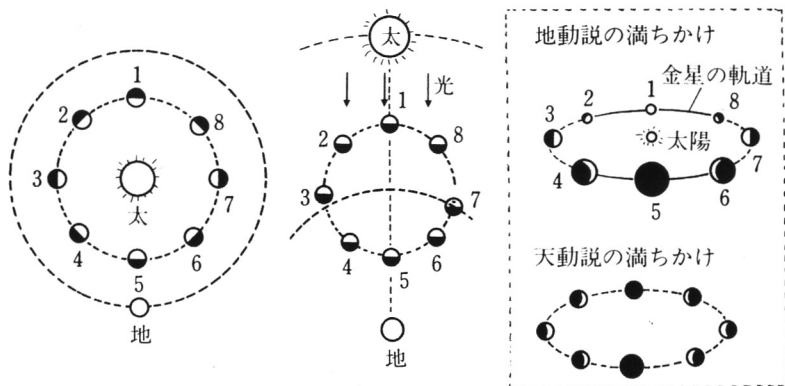
木星の衛星の周期 I_o 1.8 日, Europa 3.6 日, Ganymede 7.2 日, Callisto 16.7 日

惑星の周期 水 0.24 年, 金 0.62 年, 地球 1.0 年, 火 1.9 年, 木 12 年, 土 30 年。

質問 7

コペルニクスに反対する人たちはこういった。「あなたの説が本当なら、金星は月のように満ちかけするはずだ」と。金星が満ちかけするかどうかは肉眼ではわからない。どちらが本当であるかはガリレオをまたねばならなかった。

では、金星は天動説、地動説の場合どのように満ちかけするのだろうか。それぞれの場合について、金星の満ちかけの様子を図の1～8の場所ごとに大きさにも注意して、書いてみよう。

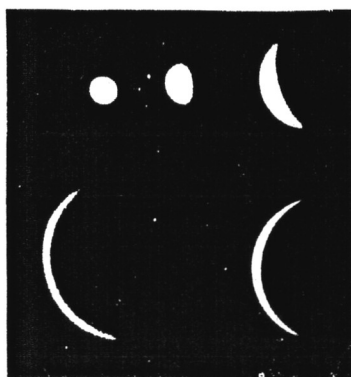


どちらの説が実際の望遠鏡の観測と一致するか写真によって確かめよう。興味のある人は、実際に望遠鏡で調べてみてもよい。

話3 ガリレオと望遠鏡

ガリレオは自分で作った望遠鏡を世界で初めて星空に向けた。そこには、今まで肉眼では全く見られなかった驚くべき世界が広がっていた。これらの新発見のすべては、二千年以上にわたって信じられていたアリストテレスの自然観をことごとくくつがえし、コペル

ニクスの地動説の正しさを確信させるものばかりであった。彼はこれらの大発見をただちに『星界の報告』として出版した。1609年、ガリレオが45才のときであった。実際、自分の目で確かめた強烈な体験は、ガリレオの生涯に決定的影響を及ぼした。彼の発見の主なものは次のようなものである。



金星のみちかけ（ローエリ天文台）
『天文・宇宙の辞典』p.150
（恒星社厚生閣）

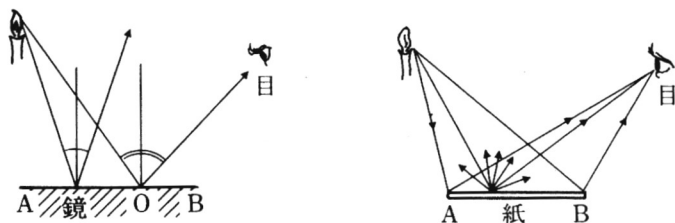
(1) 月の表面は凸凹で、地上とそっくりである

ガリレオの見た月の表面は「なめらかで一様な完全な球」というアリストテレスの天とは全く逆であった。山あり、谷あり、地上の凸凹と少しも変わらない光景であった。ガリレオは月の山の高さまではかつてのけたのである。

(2) 地球も星のように輝いている

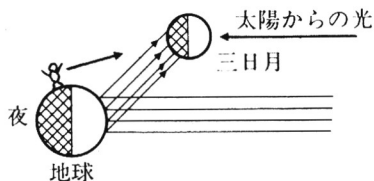
我々は、地球の動きを感じる事ができない。それと同様、地球が星のように光っているなんてとても思えない。アリストテレスは、地球は動かず、光るはずもないと考えた。運動と光は星だけに与えられ、天と地は全く別世界であった。なにしろ、動いたり、光ったりすると感じないものを否定せよという方が無茶に思える。だからアリストテレスの言い分は全くデタラメであったと決めつけるわけにはいかない。

ところが、ガリレオは「地球が月以上に輝いている」ということを発見した。月は恒星と違って自分で光を出さず、太陽の光を反射して光っている。まず、ガリレオはその反射が凸凹な表面に起きる乱反射であることを証明する。アリストテレスがいうように、鏡のようなツルツルの面であつたら、とても今



の月のようには見えないという。たとえば、図のように鏡で反射する光はO点で反射した光だけが目に入る。ほかの光は目に入らない。真っ暗なかでは光源が鏡に写ってみえても、鏡ABは全く見えない。ところが表面がザラザラの半紙では、紙AB上のどの点からも乱反射の光が目入り、紙ABの形がはっきり見える。月の表面はちょうどこれと同じだというのである。

続いて彼は、地球も太陽の光を乱反射して月以上に輝いていることを明らかにする。月が三日月に見えるときは、図のような配置をしているときである。



月の2次光
三日月はこの
部分がボヤッ
と輝いている

このときは、太陽の方角に、つまり、夕方西の空に月が見えるときである。地球の反射光が三日月の影の部分の照らしていることがわかる（地球照、又は月の二次光という）。

これは、満月の夜など月が大地を照らしてずいぶん明るくなるのと同じ、いやそれ以上に地球は輝き、月を照らすというのである。この発見は、これまで特別な地位にあった地球が月と同様単なる一つのさまよえる星にすぎないという発見であった。

これは当時にしてみれば恐るべき発見であったに違いない。

(3) 恒星は無数の遠方にある

望遠鏡で見る惑星は丸くその大きさがわかる。ところが恒星は四方八方に光を放つばかりでその大きさがわからない。この観測は、恒星の大きさがわからないほど遠くにあることを示すものであった。恒星が遠くにあればあるほどコペルニクスの地動説には有利であった。なぜなら、星が遠いほど、1日1回猛スピードでまわるというのはいかにも不合理だからであった。

コペルニクスの地動説が正しければ、半年ごとに星を見る角度は変わるはずであった。残念なことに、当時、この角度の変化（年周視差）は全く観測できなかった。これは地動説には決定的に不利な材料であった。ところが、恒星が比較にならないほど遠くにあることがわかれば、当時の技術水準ではこの角度の変化を見つけられないことになるわけである。年周視差が観測できないということは地動説には不利であったが、かえってそのことが、宇宙がいかに広大無辺なものであるかを示すものであった。

(4) 銀河や星雲は無数の星の集り

広大無辺の宇宙には無数の星があった。望遠鏡でのぞくと「すでに知られている星のまわりに1～2度の範囲内に500以上の星」があった。いたるところに想像できないほど無数の星があった。銀河も、星雲も無数の星の集りであった。ガリレオは銀河について「数世紀の間、哲学者たちを悩ませてきたすべての論争に終止符を打った」といつている。

(5) 木星の衛星の発見

ガリレオの発見はさらに続く。世界中いまだかつて誰の目にもふれなかった木星の4つの衛星の発見である。彼は特にこれらの衛星の周期に着目した。すると確かに遠いものほどゆっくり回っているのであった。この発見は、天が1日に1回まわるという天動説には決定的に不利な材料であった。なぜなら遠い星ほどゆっくり動くのなら、無限遠方にある星はついに止ってしまうことになるからである。ガリレオは惑星の運動もこの木星の衛星の運動と全く同じだと考えた。するとどうみても動くのは地球で、静止しているのは無限遠方の恒星になってしまうのである。

コペルニクスの体系にたいして、すべての惑星が太陽のまわりをまわるのに、どうして月だけ地球のまわりをまわるのか、という人びとがいた。これらの人びとにガリレオは次のように答えた。「公転する木星のまわりを4つの衛星がまわっていることが感覚的経験としてある以上、どうして月が公転する地球のまわりをまわると考えていけないのか」と。

(6) 金星の満ちかけ

天動説で起きないはずの金星の満ちかけは、コペルニクスの地動説では、月と同様な満ちかけをするはずであった。ガリレオは『星界の報告』を書いた直後(1610年)、金星に望遠鏡を向けて観測を続けた。するとどうだろう。金星はコペルニクスの予言通り、月のように満ちかけをしていくではないか。ついに見た！ 地動説の決定的証拠を！ ガリレオは興奮した。この発見はあまりにも重大な発見であったので彼は謎文字にして公表したほどであった。

金星が満ちかけするということは、金星が月と同様太陽の光を反射して輝く惑星であるという証拠でもあった。結局、地球を含めたすべての惑星は太陽の

光を反射して輝く星であり、無限遠方で自ら輝く恒星とは異なる星だったのである。

(7) 太陽黒点の発見

ひきつづく大発見に続いて、ガリレオは1613年、「太陽黒点」を発見した。この発見によって、太陽でさえ、アリストテレスのいう完全な天体でなく、自転までしているという事実をつきとめたのである。

このように、ガリレオの望遠鏡による発見はすべてアリストテレス自然観をこなごなに打ち砕いてしまうような発見ばかりで、コペルニクスの地動説の正しさを確信させるものばかりであった。その後、ガリレオは宗教裁判によって地動説を捨てるように強制されたが、一度見てしまった事実を見なかったとはどうしてもいえなかったに違いない。まさにガリレオはそういう立場に立たされたのであった。もし仮に、望遠鏡で星をのぞかなかったとしたら、ガリレオがどこまで地動説を主張できたかは疑問である。たとえ、慣性の法則を発見していたとしてもである。それほど星の観測は地動説には決定的であった。慣性の法則は地球が動いていることも認めるが、静止していることも否定しない法則である。だから、地球が動いていなければならないという理由はこの法則からは出てこないのである。けれども、慣性の法則の果たす役割がきわめて大きかった。それは、地球が動いていると感じない、この感じないがゆえに地動説を捨てる人たちがほとんどすべてであったからである。実は、動いていると感じないのが慣性の法則なのだ。その意味では地動説は慣性の法則をまっぴらごめんとしたといってもよいであろう。

質問 8

もし、みんながガリレオと同じ立場にたって望遠鏡で金星の満ちかけを見てしまったあとで、地動説を捨てなければ処刑するといわれたらどうするか。

- (ア) 弾圧を覚悟の上で公然と地動説を擁護する。
- (イ) 心のなかでは地動説を捨てないが、命が惜しいので口では地動説を捨てた

という。

(ウ) 地動説を本当に捨てる。

(エ) その他

〔質問 8〕は討論させると大多数が(イ)で(エ)が少々である。どちらが正しいかなどということはしない。歴史上では(ア)がブルーノ、(イ)がガリレオの立場であったことを紹介し〔課題〕にとりくませる。

〔課題〕

天動説・地動説について、家族や知人など誰とでもいいから討論会を開き、話し合った内容を戯曲風にまとめて報告しなさい。

1. 必ず質問すること

- (1) 地球が自転公転していることを知っているか。
- (2) 地球は本当に回っていると思うか。単なる説だと思うか。
- (3) 回っているなら、その証拠を示してほしい。
- (4) 地球が回っているとしたら、どうしてそれを感じないのか。アリストテレスは「大地が静止している確かな証拠は、真上に投げたものはもとの場所に落ちてくるからだ。もし大地が動いていたら、ものは後の方へ落ちるだろう」といったが、これに反論してほしい。

2. 討論では、授業で習ったことをもとに自分の説を積極的に展開し、相手が納得できるようにがんばる。

3. 相手の質問で、自分が困ったこと、話し合いの後、生じた自分の疑問をつけ加えること。

話し合う相手は誰でもよい。質問の順序やまとめも自分の好きなようにしてよい。グループでやってもよい。国民に地動説を科学的に理解してもらう運動として位置づけてがんばろう。