

東京学芸大学 2007 年度 公開講座

『宇宙と地球を体験する観察・実習』



(ハッブル宇宙望遠鏡で観た子持ち銀河 M 5 1)

2007年8月20日(月)～22日(水)

@東京学芸大学 自然科学系研究棟

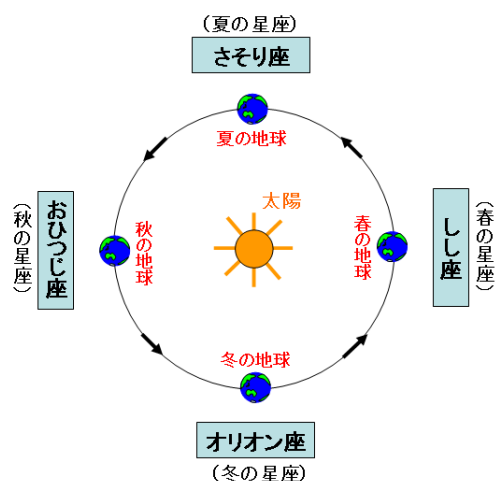
地球の公転と自転

担当：西浦慎悟(東京学芸大学・助教)

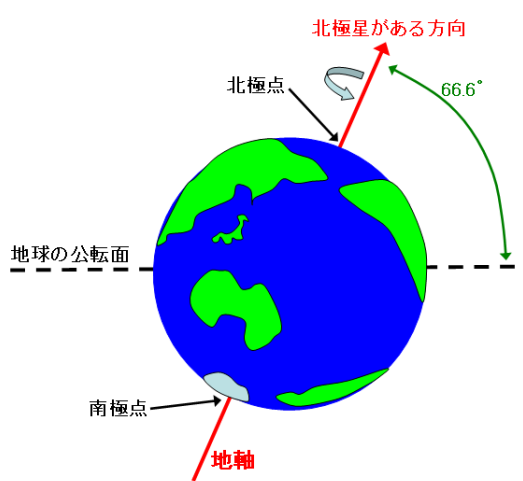
1. 地球の回転運動

私達が住む地球は、太陽の周りを約 365.24 日かけて一周します。この運動を**地球の公転**といいます。地球の公転運動のため、私たちが観察できる星の位置は、一晩ごとにほんの少しずつ西に移動して行くこととなります。そして 1 年が経つと、また同じ時刻・同じ位置に同じ星を観察することができるようになります。私たちが季節によって、異なる星座を観察できるのは、地球が太陽の周りを公転しているからなのです(図 1)。このような星の 1 年ごとに繰り返される動きを、**星の年周運動**といいます。

地球の北極から南極まで真っ直ぐに貫く直線を**地軸**といい、地球の公転面に対して約 **66.6 度**だけ傾いています。そして、地球は太陽の周りを公転するだけでなく、地球自身も地軸を中心とした回転運動をしています。これを**地球の自転**といいます(図 2)。地球の自転 1 回転にかかる時間は **23 時間 56 分 04 秒**です。地球の 1 日(=24 時間)は太陽が南中してから、次の日に南中するまでの時間ですから、地球の自転は、一日あたり 4 分だけ余分に回っていることとなります。先ほど“星の位置が一晩に少しずつ西に移動していく”という話をしましたが、これはまさしく地球が一日あたり 4 分ぶんだけ余分に自転しているためです。ただしこの星の位置のズレは、非常にわずかなため、夜空を見上げるだけの簡単な観察では、数 10 日から数週間の間をあけないと分からないでしょう。その結果として、同じ星を翌日の同じ時刻に観察すれば、前日とほぼ同じ位置にを見つけることができます。このように星の 1 日ごとに繰り返される動きを、**星の日周運動**といいます。また、**地球の自転の回転方向は西から東**に向けて、つまり地球の北極側からみて反時計回りの方向です。そのため、地球上にいる私たちには、太陽や星が東の空から昇って西の空に沈むように見えます。



(図 1: 地球の公転運動と季節の星座)



(図 2: 地軸の傾きと地球の自転運動)

2. 星の日周運動と年周運動

前節でも述べたように、天体の日周運動や年周運動は、地球の自転と公転によって生じる見かけの動きです。特に地軸の北極側の先には、明るい星、**北極星**が位置しています。そのため、北極星の位置は一年を通してほとんど変わりません。また地軸の南極側の先には、南極星となるような明るい星はありません。

さて日周運動では、見かけ上、星は地軸を中心に約 1 日(=24 時間)かけて空を一周(360°)します。すると、1 時間あたりの星の移動角度は、

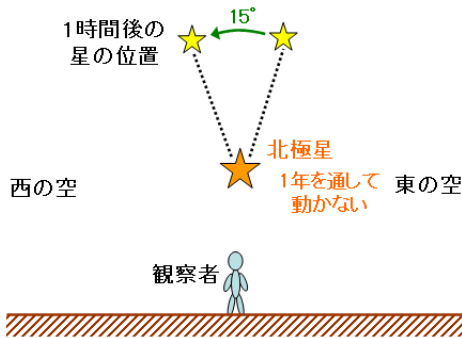
$$360^\circ \div 24 \text{ 時間} = 15^\circ / 1 \text{ 時間} \quad \text{---- (式 1)}$$

となります。つまり星は地軸を中心に1時間あたり15°だけ東から西に向けて移動することになります。地球の北半球に位置する日本では、この“地軸を中心に”という部分は“北極星を中心に”という言葉に置き換えることができます。日本で北の夜空を見上げると、星々が北極星を中心に1時間で15°だけ、反時計回りに回転しているのが観察できます(図3)。

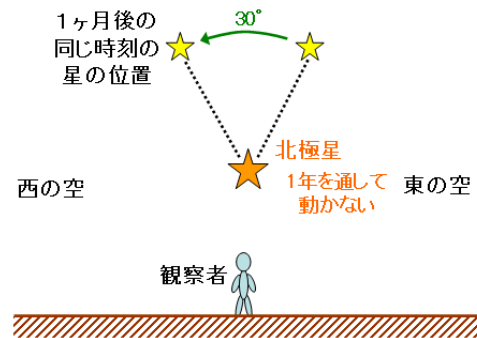
また年周運動では、見かけ上、星は北極星を中心に約1年(=12ヶ月)かけて空を一周(360°)します。すると、同じ時刻に観察するのであれば、1ヶ月あたりの星の移動角度は、

$$360^\circ \div 12 \text{ ヶ月} = 30^\circ / 1 \text{ ヶ月} \quad \text{---- (式 2)}$$

となり、同じ時刻に観察すると、星は北極星を中心に1ヶ月あたり30°だけ東から西へ向けて移動することになります。同じ時刻に北の夜空を長い間観察し続ければ、星々が北極星を中心に、1ヶ月あたり30°だけ反時計回りに回転しているのが分かります(図4)。



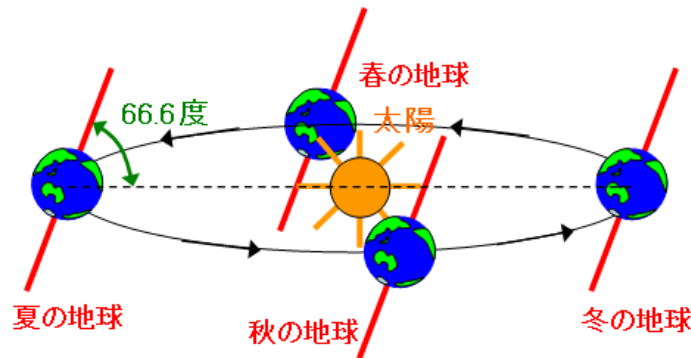
(図3:日本の北の夜空における星の日周運動)



(図4:日本の北の夜空における星の年周運動)

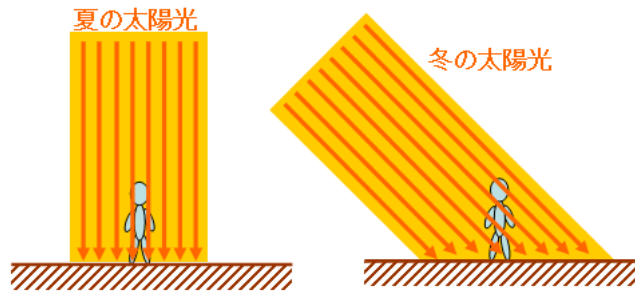
3. 地球の公転運動と四季

地球の公転運動は、地軸の傾きの角度と方向を変えずに行われます(図5)。このおかげで、日本では1年間の間に気温や湿度などが大きく変わり、多彩な四季の変化が生まれています。



(図5:地球の公転と地軸の傾き)

地軸が傾いているため、特に日本では、冬の太陽に比べて、夏の太陽はかなり高い位置に上がります。すると同じ量の太陽光が暖める地面の面積は、冬より夏の方が狭くなります。その結果、日本の夏の地面は、冬に比べてずっと暑くなり、気候もそれに伴って暑い季節になる訳です(図6)。赤道直下の場所では、一年を通して太陽が高い位置にあがるため、年中暑い気候になります。また反対に極に近い場所では、一年を通して太陽が低い位置にしか上がらないため、年中寒い気候になります。



(図 6 : 夏と冬の太陽高度の違い)

4. 地球の公転運動と年周光行差

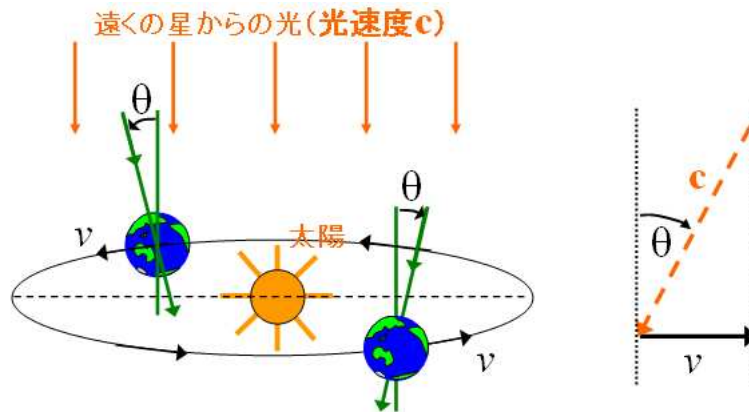
真上から雨が降っている時、車や電車に乗って速いスピードで移動していると、雨は真上からではなく、斜め前方上から降って来るように観察されます。同様のことが地球の公転運動についても起こります。つまり公転面に対して垂直方向にある星の光は、地球の公転方向にすこし傾いた方向からやって来るように観察されます。このずれを年周光行差といいます(図 7)。実際に観測される角度は、ある時点での星の観測位置と半年後の星の観測位置のずれ 2θ です。勿論この観測を行うためには精密な機器が必要となります。そして観測の結果、この角度のずれ 2θ は、 $41''$ であることが確認されています。地球の公転運動の速度を v 、光速度を c とすると、

$$\sin \theta = v / c \text{ ----- (式3)}$$

となるため、式3を変形、数値を代入して、

$$v = c \sin \theta = (2.99792458 \times 10^8 \text{ km/s}) \times \sin (41'' / 2) = 29.8 \text{ km/s} \text{ ----- (式4)}$$

となり、地球の公転速度が約 29.8 km/s であることが分かります。



(図 7 : 地球の公転と年周光行差)

さらに地球が円運動していると考えて、地球と太陽の間の距離を $a(\text{km/s})$ とします。すると、地球は 29.8 km/s の速さで、1年(= 3.15×10^7 秒)かけて、 $2\pi a \text{ km}$ の円周を一周りすることになるので、

$$2\pi a = 29.8 (\text{km/s}) \times 3.15 \times 10^7 (\text{s}) \text{ ----- (式5)}$$

となります。これを a について解くと、太陽と地球の間の距離 $1.49 \times 10^8 \text{ km}$ を得ることができます。ここではこれ以上話を進めませんが、太陽と地球の間の距離が分かれば、後は三角測量の応用で星までの距離を求めることができます。

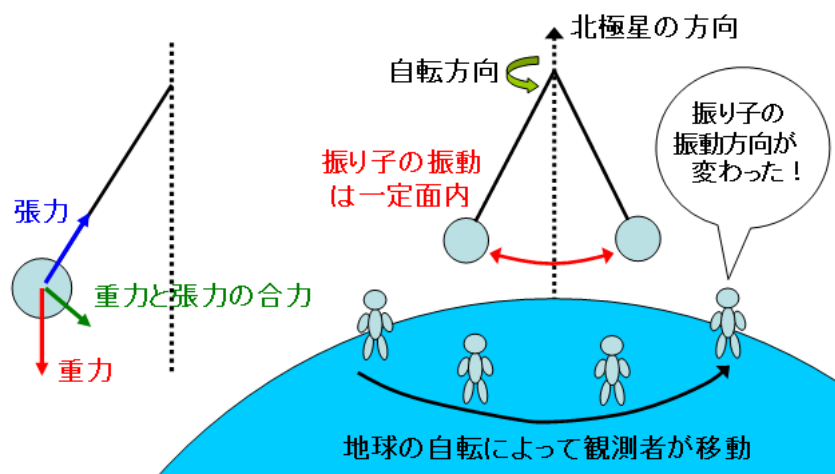
5. 地球の自転運動とフーコー振り子

地球が自転している直接的な証拠を初めて示したのは、フランスの物理学者フーコー(J.

Foucault)です。

長いひもの先に重いおもりを付けた振り子をつくります。この時、おもりに働く力は空気抵抗などを無視すれば、鉛直下向きに**重力**、そしてひもが張られた方向に働く**張力**の二つだけです。重力と張力の合力は、つねに振り子の運動の中心を向いており、これが振り子の往復運動を生み出します(図 8)。

振り子にはこれ以外の力は働いていません。ですから太陽から見た振り子の振動運動は、つねに同じ方向を行ったり来たりしているだけなのです。ところが地球は一日に 360° の自転をしています。今、振り子を北極点に置き、観測者がその振り子をずっと観察し続けることにすると、観測者は地球と一緒に一日で 360° 地軸の周りを西から東の方向へ一周します。しかし、太陽に対する振り子の振動方向は変わらないので、観測者から見れば、振り子の振動方向(正確には振動面)が一日で東から西に向かって一回転したように観察されます。この場合、観測者には、振り子を時計回りに回転運動させるような力が働いているように見えます。この見かけの力を**コリオリの力**といいます。



(図 8:振り子の原理とフーコー振り子)

コリオリの力の大きさは、地球上の緯度 ϕ によって変わります。そのために、振り子の振動面の回転角速度 ω も緯度によって変わり、

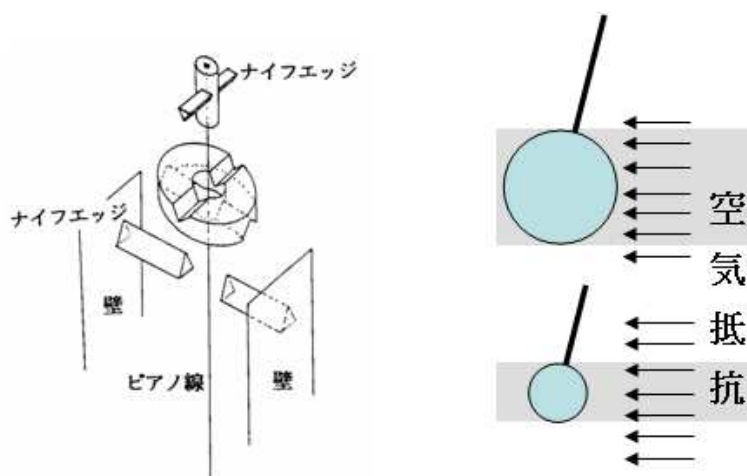
$$\omega = \omega_0 \sin \phi \text{ (}^\circ \text{/s)} \text{ ---- (式6)}$$

と表わせます。ここで ω_0 は地球の回転角速度($360^\circ / 23$ 時間 56 分 04 秒)を表わします。東京学芸大学の位置は、北緯 $35^\circ 42' 07''$ なので、フーコー振り子の振動面の回転角速度は、1 時間あたり 8.78° になります。

1851 年、フーコーは、パリのパンテオン寺院の天井から、重さ 28kg 重のおもりを 67m のひもでつるして巨大な振り子をつくり、これを振ることで地球の自転を直接的に証明してみせました。

注) 台風の巨大な渦巻もコリオリの力で発生します。また振り子を南極点に置くことで、コリオリの力の働く方向が、北半球と南半球で反対向きになることが分かります。特に赤道上では振り子の振動面は全く回転しません。さらにコリオリの力によって、風呂や流し台の吸い込み口にできる渦の回転方向が北半球と南半球で異なる、という話があります。が、このように小さなサイズでは吸い込み口の形や水を流し始めた位置の影響の方が大きく、観察される渦の回転方向は五分五分になります。この話は既に科学的な都市伝説となっているので気をつけましょう。

フーコー振り子の構造は一見単純ですが、実際には、長い時間安定した往復運動を継続させるための様々な工夫が施されています。まず上部の固定部には、**ダブルナイフエッジ**と呼ばれる構造が採用されています。これは二つのナイフエッジが直角になるように組み合わせられたもので、摩擦による振幅の減衰を極力抑えつつ、任意の方向に振り子を振動させることができます(図9)。またダブルエッジナイフ部の摩擦を小さくするためには、おもりに働く空気抵抗を減らさねばなりません。そのためには、おもりの断面積を小さくし、かつ往復運動のスピードを下げる必要があります。そこで、振り子のおもりにはなるべく比重の大きな材質を使用し、また振り子の長さをできるだけ長くして時間あたりの振動回数を減らすようにしてあります。さらにおもりの重さ自身は大きくしなければならないため、おもりを吊るすひもには、それ自身の空気抵抗を減らすことも含めて、細くて丈夫な材質が求められます。



(図9:フーコー振り子の構造)

注) 単振り子の振動周期 T は、振り子の長さ l と重力加速度 g を用いて、 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ で表わされます。振り子の長さ l を長くすれば、それに応じて振り子の振動周期 T を長くすることができます。またこの式からは、単振り子の周期 T は、おもりの重さに関係なく、振り子の長さだけで決まることが分かります。

6. 地球の自転運動と重力

全ての物体の間には、**万有引力**が働いています。距離 r だけ離れた二つの物体(質量を M と m とする)の間に働く万有引力 F の大きさは、二つの物体の質量(M と m)の積に 比例し、両者の間の距離 r の二乗に反比例します。つまり、

$$F = GMm/r^2 \text{ ----- (式7)}$$

となります。ここで比例定数 G は $6.67 \times 10^{-11}(\text{Nm}^2\text{kg}^{-2})$ となり、これを**万有引力定数**といいます。式7で地球の質量を M 、私たちの質量を m とすると、地球上のどこにいても、私たちと地球の間に働く万有引力の大きさは一定であることが分かります(勿論私たちの質量が同じである限りの話です)。

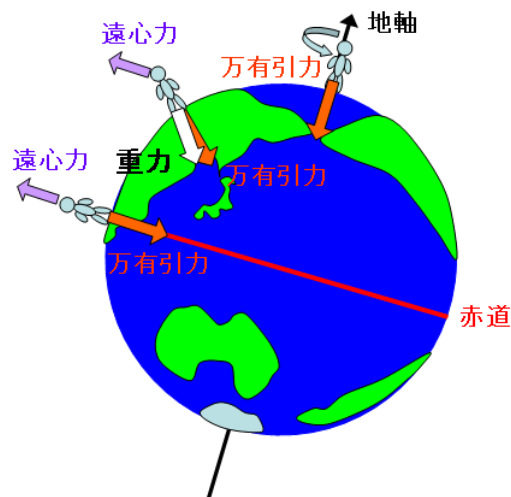
その一方で、回転運動をしている物体には、回転の中心と反対向きに**遠心力**が働きます。遠心力の大きさを f とすると、

$$f = mr\omega^2 \text{ ----- (式8)}$$

となります。ここで r は回転中心からの距離、 ω は回転角速度(一定時間の間に何度回転するかを表す量)です。地球上のどこにいても自転の回転角速度 ω は一定(1日で約 360度)ですが、極から

離れるにつれて、回転中心である地軸からの距離 r が大きくなり、赤道で最大になります。

つまり地球上にいる私たちに働く力は大きく二つあり、その一つは万有引力で、地球上のどこにいても、その大きさは一定です。ところがもう一つの力、地球の自転による遠心力は緯度によって変化し、極地でゼロ、赤道上で最大値となります。そしてこの万有引力と遠心力の合力を**重力**と呼びます(図10)。



(図10:地球の自転と重力)

一般に、重力とは、地球と私たちの間に働く万有引力と同じものと思われがちです。しかし実際には地球の自転運動による遠心力を含めたものを重力と呼びます。遠心力の効果は赤道上で最大になるため、同じ質量の人でも、極地で測った体重よりも、赤道上で測った体重のほうが小さくなります。しかし遠心力の大きさは、最大でも重力の300分の1程度しかないので、緯度による重力の違いを確認するためには、精密な実験が必要となります。単位質量あたりに働く重力の大きさと緯度の関係は以下の表のようになります。

緯度	単位質量あたりに働く重力(gal)
0°	978.032677
10°	978.188384
20°	978.636954
30°	979.324871
40°	980.169830
50°	981.070357
60°	981.917839
70°	982.609620
80°	983.061588
90°	983.218637

(理科年表 平成18年度版 [国立天文台編, 丸善]より一部抜粋)

同じく理科年表には日本各地で測定された重力の実測値が掲載されています。例えば、稚内(緯度 45° 24' 57")では 980.642 60gal、成田(緯度 35° 45' 52")で 979.857 33gal、石垣島(緯度 24° 20' 12")で 979.006 06gal となっています。これも地球が自転しているために生じる現象の一つです。