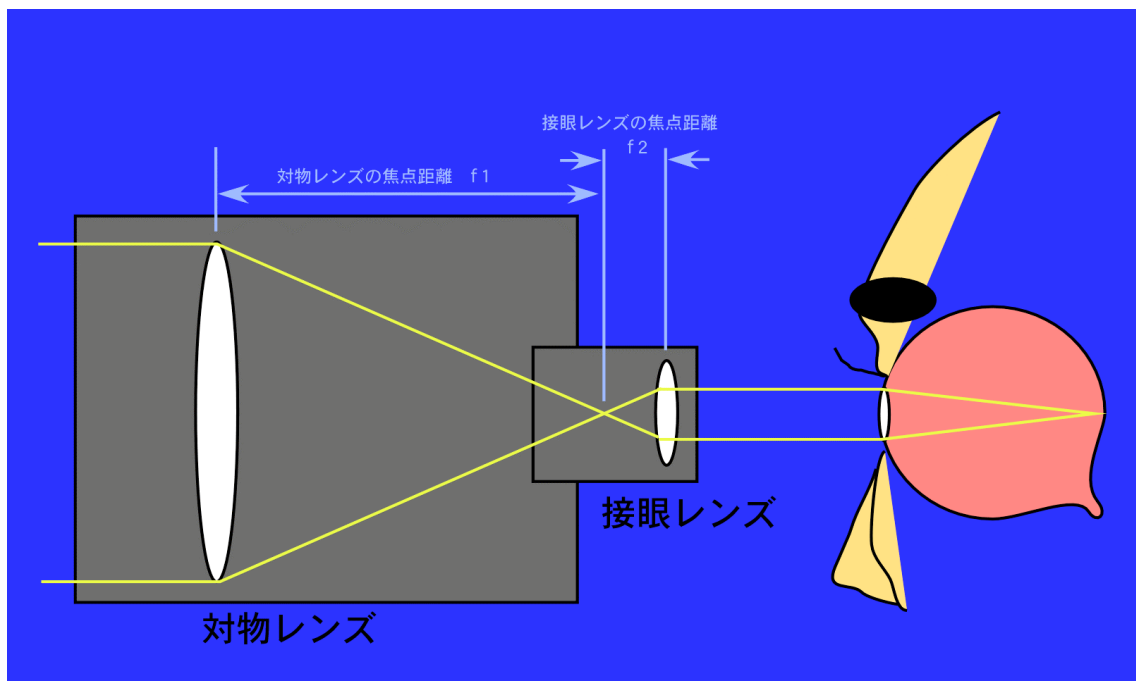


宇宙の観測と技術

第3章 天体望遠鏡の基礎

6. 天体望遠鏡の仕組み

望遠鏡を覗く時、そこには3つのレンズが作用している。第1は望遠鏡の対物レンズ。これは焦点面に物体の像（実像）をつくる役目をしている。そして第2が接眼レンズ。これは対物レンズで集めた光を平行な光の束に変化させている。第3が目のレンズ（水晶体）。接眼レンズから出て来た平行な光を一点に集めて網膜の上に像を結ばせている。



この3つのレンズの作用は次の二つに要約できる。

- 1) 対物レンズで拾った光を接眼レンズを通して目に残らず導く
- 2) 対物レンズがつくる像（実像）を接眼レンズで拡大して見る

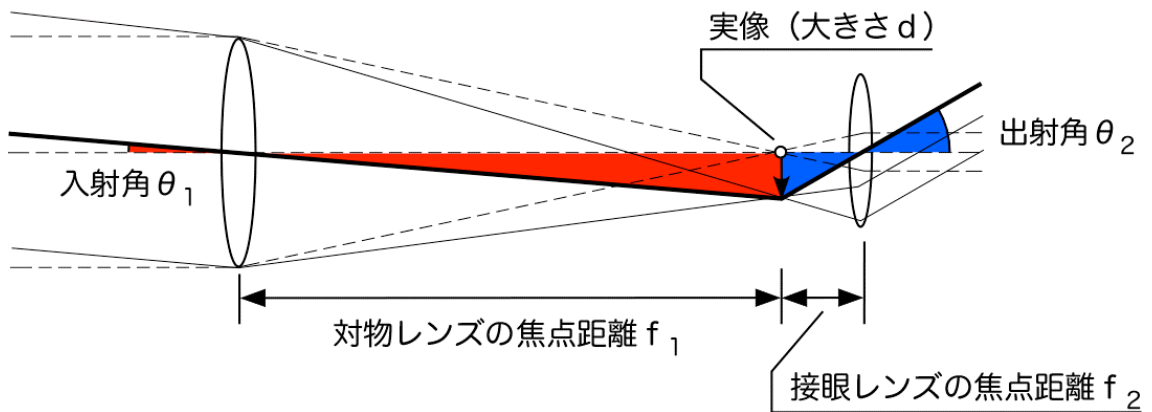
つまり

「望遠鏡は対物レンズが光を拾い集めて作った実像を接眼レンズというルーペで拡大して見る」

ということになる。

6-1. 望遠鏡の倍率

望遠鏡のカタログには倍率という数値が記載されている。実は倍率というのは“望遠鏡を目で覗く場合”にだけ関係する値である。それは接眼レンズが対物レンズの実像を拡大して見せていることによっている。



対象となる物体の見かけの大きさは対物レンズへの入射角 θ_1 、望遠鏡を覗いた時に見える物体（実像）の見かけの大きさは接眼レンズからの出射角 θ_2 である。 θ_1 , θ_2 とも小さい角度なので

$$\theta_1 \cong \tan \theta_1 = \frac{d}{f_1}$$

$$\theta_2 \cong \tan \theta_2 = \frac{d}{f_2}$$

が成り立つ。倍率は見かけの大きさが肉眼で見たときの何倍になるかである。したがって

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{(d/f_2)}{(d/f_1)} = \frac{f_1}{f_2}$$

(望遠鏡の倍率) = (対物レンズの焦点距離) \div (接眼レンズの焦点距離)

ということになる。

6-2. 天体望遠鏡の基本性能

天体望遠鏡の基本機能は目の水晶体（直径 6 mm）を対物レンズの直径にまで拡大して、「より暗い天体が見えるようにする」とことと「天体を大きくはっきり見せる」ことにある。実はこの性能に

倍率は決定的な要素ではない

全ては対物レンズの直径（望遠鏡の口径） D で決まる。望遠鏡が集められる光の量は、対物レンズの開口面積で決まる。

望遠鏡の集光量が目の何倍あるかを集光力と言う

$$(\text{集光力}) = (D [\text{mm}] / 6 [\text{mm}])^2$$

また分解能も口径 D で決まる

$$(\text{分解能}) = 1.22 (\lambda / D) \quad [\text{ラジアン}]$$

望遠鏡の口径 D が決まっている状況で、むやみに倍率を高くしても、見える像を暗くするだけで分解能以上の細かな構造が見えてくるわけではない。



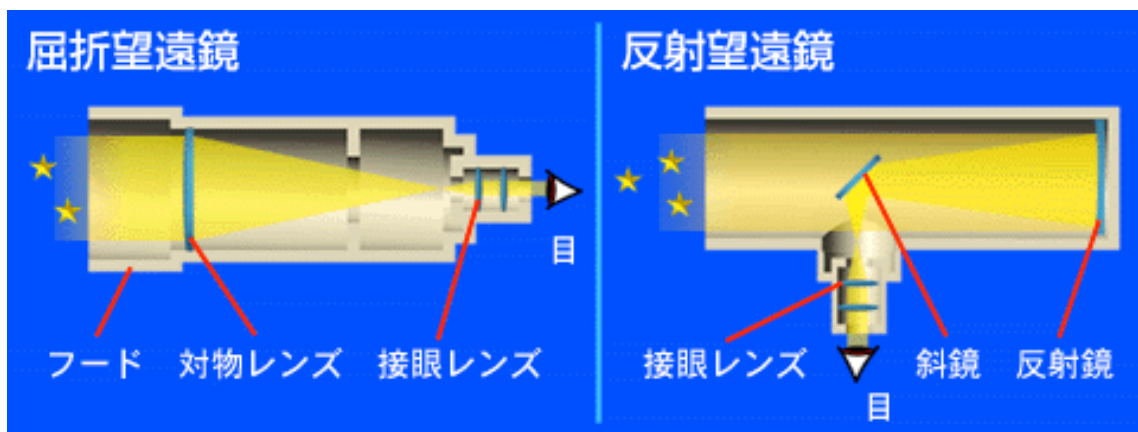
7. 天体望遠鏡の種類

これまで望遠鏡はレンズを使っているものとして説明をしてきた。しかしレンズと一口に言っても、機能・性能的に工夫された様々な種類がある。またレンズのかわりに反射鏡を使った望遠鏡も一般的である。このような望遠鏡の光学系部品（光学素子）が配置された筒のことを鏡筒という。

また特に天体望遠鏡においては高い倍率での観察で視野がブレないように望遠鏡の筒を支え、目標の天体を視野に導入し、日周運動にあわせて追尾する必要がある。これは手持ちでは不可能である。このような機能を提供する天体望遠鏡の支持・駆動機構を架台という。

7-1. 屈折式望遠鏡と反射式望遠鏡

光を集める光学素子にレンズを使っているのを屈折式望遠鏡、凹面鏡（対物レンズに対して主鏡と呼ぶ）になっているのを反射式望遠鏡という。

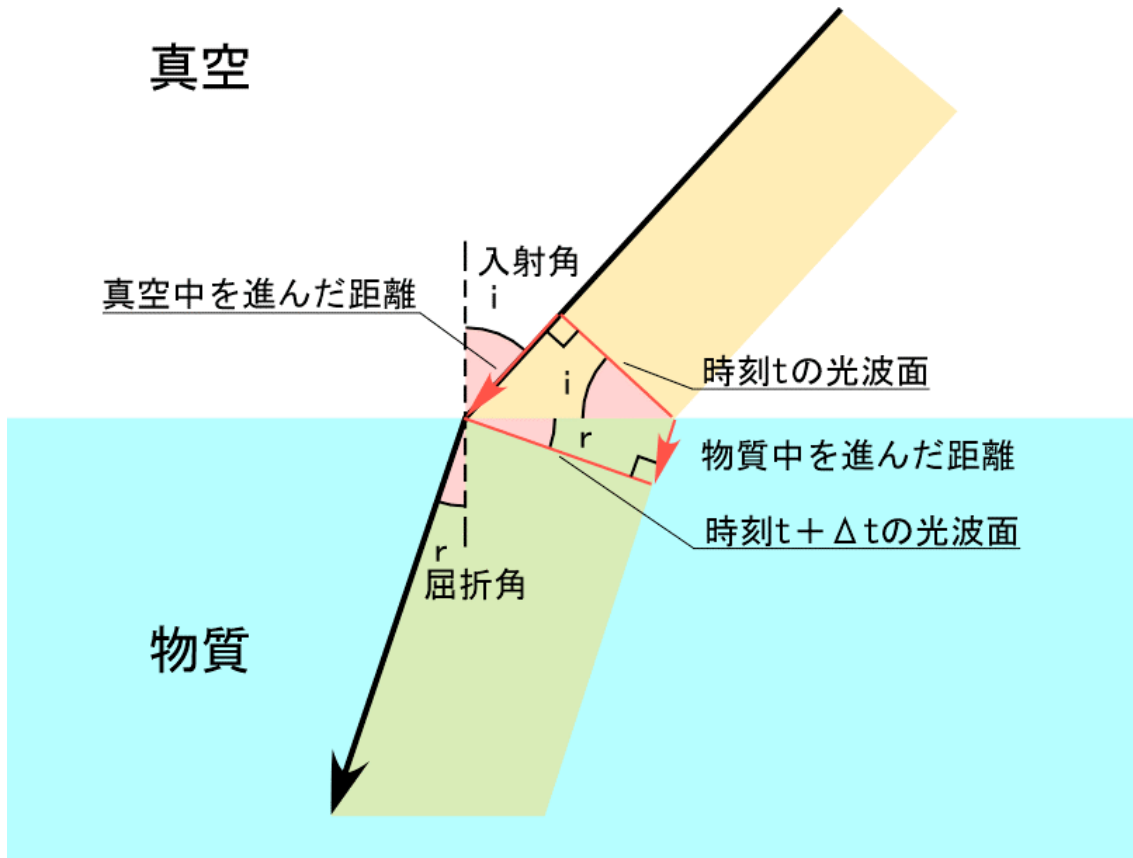


上図左（これまで説明してきたもの）のように凸レンズと凸レンズを組み合わせた望遠鏡を特に「ケプラー式」と呼ぶ。上図右のように対物レンズに替えて凹面鏡を用い平面鏡を使って鏡筒横から収束光を導きだす望遠鏡を「ニュートン式」と呼ぶ。

最初に望遠鏡を発明したのはオランダのリッペルスハイで1608年に特許申請したものとされている。その時の接眼レンズは凹レンズであった。1609年にはガリレオが同様の望遠鏡を作成し初めて天体観測を行った。以来、この方式はガリレオ式と呼ばれている。

7-2. 屈折率

光を透過する物質（例えばガラス）には表面に入射した光線の角度を変化させる性質がある。この物質固有の角度を変化させる（実際は光速を変化させる）性質を割合として表したのが屈折率である。



真空から物質へと入射する光束の様子を示したのが上図である。時刻 t で光波面の右端が物質と真空との境界（界面）に達した光は、 Δt 秒後に光束の波面全体が物質内に侵入したことになる。

この時、波面の左端が真空中を進んだ距離は“ $\sin(i)$ ”に比例する。
また、波面の右端が物質中を進んだ距離は“ $\sin(r)$ ”に比例する。

これより「真空中を進んだ距離」と「物質中を進んだ距離」の比は真空中の光速を「 c 」、物質中の光速を「 v 」とすると

$$\frac{c \cdot \Delta t}{v \cdot \Delta t} = \frac{\sin(i)}{\sin(r)}$$

と書ける。真空に対して決めたこの比を（絶対）屈折率 n という。

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sin(i)}{\sin(r)}$$

屈折率とは物質中を進む光の速さ（位相速度）と光速との比とすることができる。この光の減速によって光線は屈折する。

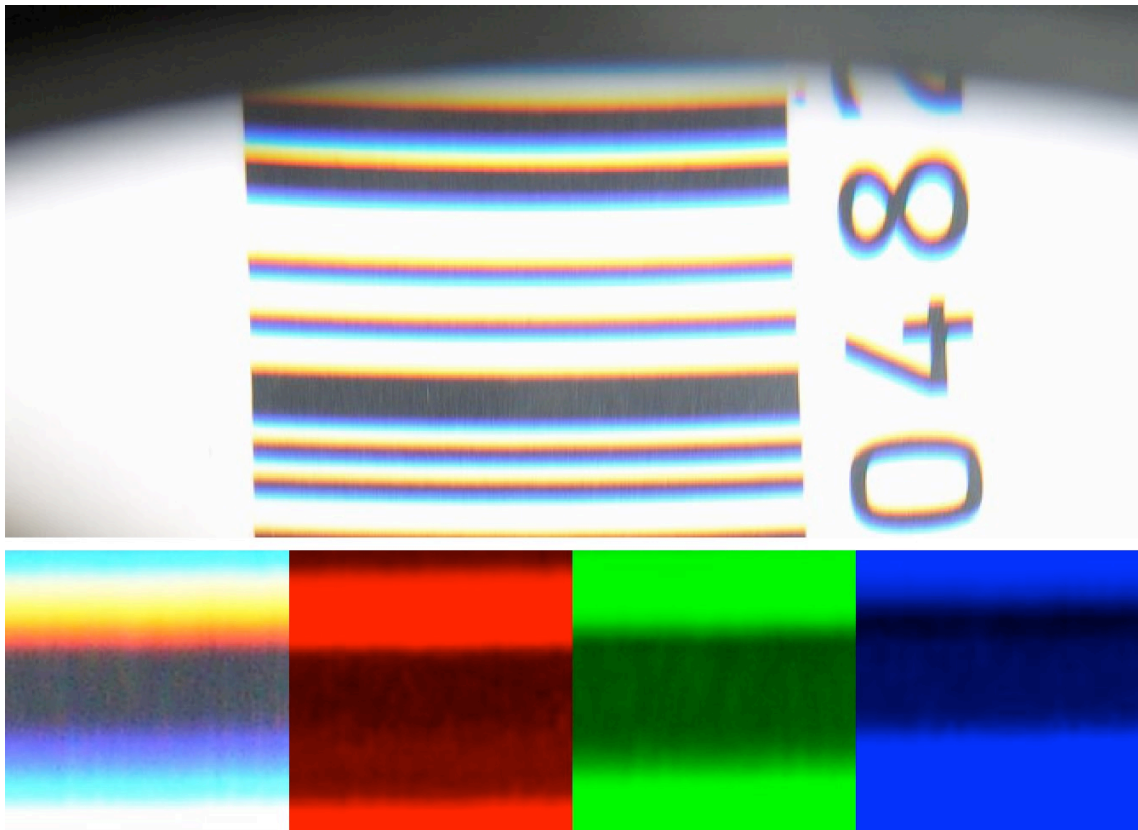
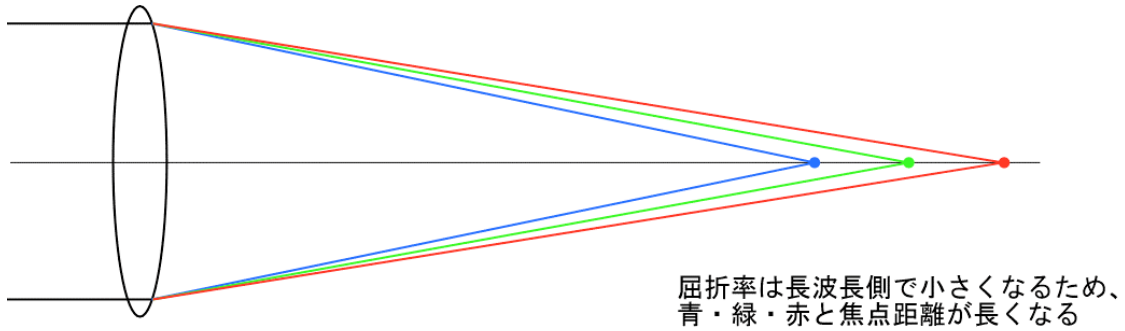
屈折率は物質によって決まるが波長に対して一定の値にはならない。可視光域での変化はわずかであるが一般に短波長側（紫や青）で屈折率は大きく長波長側（赤）では小さい。この屈折率の波長依存性を利用した光学素子がプリズムである。プリズムから射出される光は色によって進行方向が違う。それによって入射光の波長成分を調べることができる。



写真は Wikipedia より引用

7-3. レンズの欠点と対物レンズの工夫

物質の屈折率に波長依存性があるために1枚ガラスのレンズを使った望遠鏡には致命的な欠点がある。レンズで屈折される光の焦点距離が波長によって違ってしてしまうのである。これを色収差という。

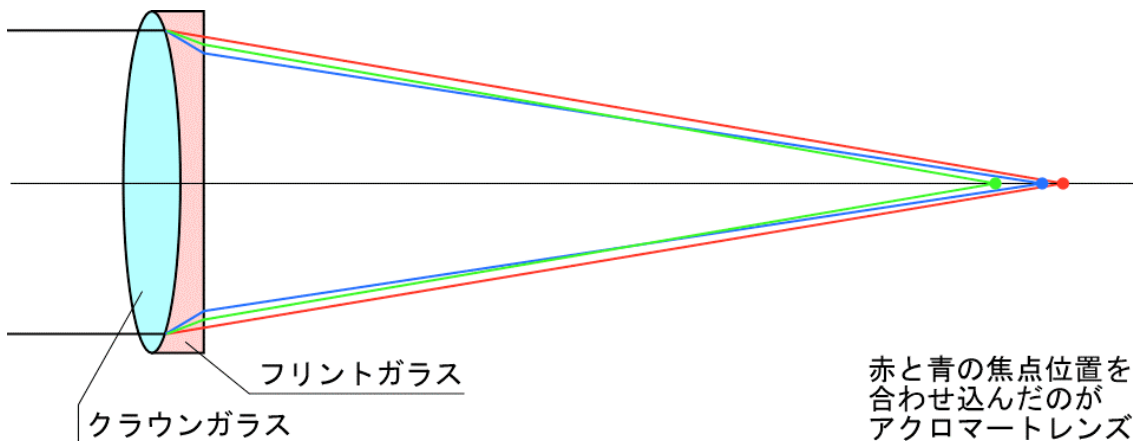


バーコードの帯に色のついた滲みが見られる。この画像を3色に分解してみると、色ごとに帯の太さ（ピント）と位置（倍率）が異なることがわかる。画像は上下とも福岡教育大学 福原準教授のページより引用。

<http://www.fukuoka-edu.ac.jp/~fukuhara/>

このような1枚ガラスのレンズ(単レンズ)の色収差を軽減する工夫として、屈折率の違うガラス材で凸レンズと凹レンズを作り、貼り合わせて1つの凸レンズとする色消しレンズが考案された。

色消しレンズの例(アクロマートレンズ)



さらに紫と青と赤の3色に対して焦点位置を合わせ込んだレンズもあり、アポクロマートレンズという。

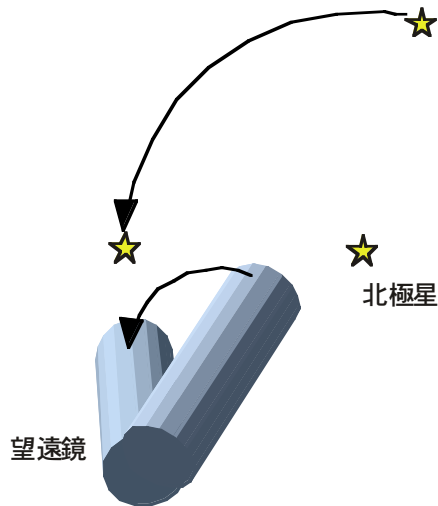
屈折によって光を集めるレンズは色消しの工夫をしても色収差を完全に無くすことはできない。鏡による反射は反射角の波長依存性が無いため原理的に色収差を生じない。反射式望遠鏡が屈折式と並んで積極的に採用される理由の一つとなっている。

目は水晶体という単レンズを使った光学系で物を見ている。果たして色収差はどのようなのだろうか。水晶体は口径6mm(虹彩によって絞られた状態)、焦点距離17mm、屈折率1.43のレンズである。色収差はレンズ表面に対して光が浅い角度で入射することによって助長されるから、丸みの少ないレンズほど色収差を減らせる。屈折率が大きく、口径に対して焦点距離の長い(F比の大きい)レンズでが有利である。水晶体のF比は3と小さく(望遠鏡ではF比10程度)、屈折率も光学ガラス(1.5)より若干小さい。水晶体はかなり膨れたレンズで色収差も酷いはずである。

我々が目の光学系による色収差を認識しないで済むのは脳のおかげである。視神経から伝達された映像は脳内で画像処理され色収差が除去されている。

7-4. 望遠鏡の架台

望遠鏡は鏡筒を見たい方向に自在に動かし、天体をスムーズに追尾する駆動機能が備わった架台の上に乗せられる。



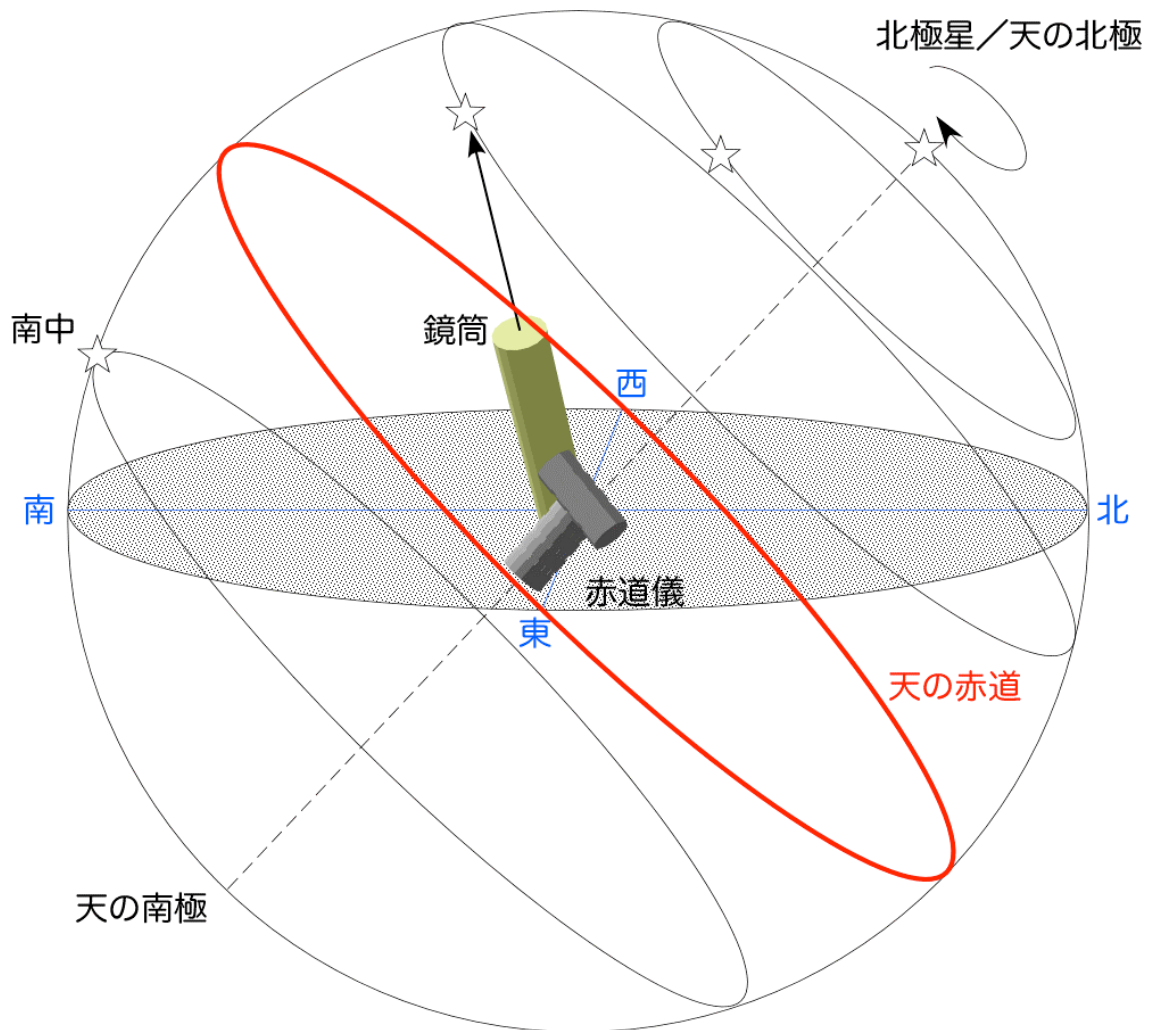
星は、北極星を中心に回る日周運動をするから望遠鏡は、その動きを追尾できなければならない。

この架台には経緯台（左）と赤道儀（右）と呼ばれる二つの方式がある。



経緯台は地平座標系に準拠した架台である。望遠鏡の方向を上下と左右に回転させて見たいものに向ける。天体を追尾する時は刻々と変化する天体の高度と方位に合わせて望遠鏡を動かす。

赤道儀は赤道座標系に準拠した架台である。望遠鏡の方向を赤経と赤緯の向きに沿って回転させ見たいものに向ける。天体を追尾する時は赤経軸を恒星時に合わせて回転させるだけでよい。経緯台は見たい天体に向けやすく、赤道儀は天体の追尾がやさしい仕組みである。



初心者が天体望遠鏡を選ぶ上で架台を赤道儀にするか経緯台にするかは、下表のような特徴を考慮しておく判断するとよい。

	設置	指向	追尾
経緯台	易しい	易しい	難しい
赤道儀	難しい	難しい	易しい

経緯台では望遠鏡は見たいときにほぼ水平になるように置くだけで良い。赤道儀では赤経軸を天の北極方向にあわせる（極軸合わせという）をしないと使うことができない。

天体写真を撮る場合には、経緯台では画角の中で天体像が回ってしまう現象が起きる。長い露出をかけた追尾撮影には向かない。

