

正しい光軸あわせ ―― 原理と方法

ビク・メナード, ティピー・ドーリア 著

初版 1987 年 10 月 22 日

第 3 版 1993 年 8 月 2 日

目次

まえがき

1. 序
2. 望遠鏡の性能を決める要因
3. ふつうの光軸あわせの手順
4. 誤解と光学的錯覚
5. 主鏡の中心に印をつける
6. サイトチューブを使って光軸あわせの精度を上げる
7. チェシャー・アイピースを使って主鏡の光軸をあわせる
8. オートコリメーター・アイピース
9. オートコリメーター・アイピースに写った像を理解する
10. オートコリメーター・アイピースで光軸の収束を調べる
11. ニュートン式反射望遠鏡の光軸あわせの手順のまとめ
12. 屈折望遠鏡の光軸あわせ
13. シュミット・カセグレイン望遠鏡の光軸あわせ
14. 天頂プリズムの光軸あわせ
15. 参考にした本と記事
16. 付録

注：本文中に出てくる説明図は、20インチ（50センチ）f/5ニュートン式反射望遠鏡の2インチ（5センチ）接眼筒を通して見たところを示しています。図1から図4までは、オートコリメータ・アイピースをのぞき口として使った場合を示しています。

第2の注：もしも時間がない場合、または、ニュートン式反射望遠鏡の光軸あわせについてじゅうぶんな知識を持っている場合には、第11章「手順のまとめ」までとばしてもけっこうです。もし、わからなくなったら、元にもどって読みなおしてください。

最後の注：光軸あわせは「空間的な」手順です。光軸あわせの技術は文章で説明するよりもやってみせるほうが簡単です。説明図は手助けにはなりますが、実際の光軸あわせのステップやそのときに起きることを、そこに見える反射像とともに思いうかべることが必要になります。調整ねじを動かすと、見えているものの全部が多次元のアニメーションのように動きます。実際に望遠鏡を使って、手や目を動かしてこの手順をためしてみるのがよいでしょう。よく考えることと、あなたの右の脳を使うことが必要です。

献呈...

夢の望遠鏡を手にいれておきながら、その望遠鏡が二流の性能だと思って、大きな石を投げつけたいと思ったことのあるアマチュア天文家にこの本を献呈します。デパートのクリスマス大売り出しのがらくたの同類だといって見捨ててしまったかもしれませんが、「それはきつとがらくたなんかではありませんよ」とこの大胆不敵なアマチュアにアドバイスしたいと思います。

まえがき

この本は望遠鏡を作る人と使う人のために書かれました。望遠鏡の性能を最大限まで引き出すために必要な方法を示すことを目的としています。特に、「ライトバケツ」と呼ばれる大型ニュートン式反射のファンのために書かれました。この人たちは、望遠鏡を分解して遠く離れた場所まで運び、そこで組み立て、光軸をあわせ、極軸をあわせなければなりません。自分の住んでいる町には暗くて澄んだ空がないし、条件のよい場所に観測所を持っていないからです。

アマチュア天文家であるわたしたちは、自分の望遠鏡の性能を最大限まで引き出したいと考えました。うまく光軸あわせをすることによって、ふつうの望遠鏡からでも第一級の性能を得ることができることをわたしたちは知りました。ほとんどの本には、光軸あわせは、多かれ少なかれ直感的で単純な手順であると書いてあります。しかし、わたしたちは少しばかりちがった結論にたどりつきました。

わたしたちは、この問題に関して手に入れられるだけの文献を調べました。テクトロン社の光軸あわせツールの発売以来、このツールの実際の使用と鉛筆と紙を使ったブレーン・ストーミングを積み重ねて、わかりにくく技術的に複雑な光軸あわせの原理について理解することができるようになりました。どうやって望遠鏡の光軸をあわせるか、この手順はどういう原理にもとづいているのか、どうなったら光軸があったといえるのかを、この本で説明します。

1. 序 —— 高性能のためのチューン・アップ

眼視用としても、写真用としても高性能の大口径屈折望遠鏡は、最近、アマチュア天文界に復興してきました。収差がよく補正され、中央遮蔽のない光学系のすばらしい性能を、屈折望遠鏡愛好家は大いに楽しんでいます。この種のアマチュアは「潔癖家」という言葉の意味を体現しています。

たいていのアマチュア天文家は、その観測歴のどこかでカセグレイン系の望遠鏡を使うことがあるでしょう。ほとんどの場合、市販されているシュミット・カセグレインがその対象となるでしょう。この種の望遠鏡は、コンパクトさと使いやすさが魅力です。

眼視用であれ写真用であれ、常に今の望遠鏡よりさらに大きな望遠鏡を渴望し続けるのがアマチュア天文界のすう勢です。プロ用の大口径望遠鏡が反射式であるのと同じ理由で、アマチュアも大口径のニュートン式望遠鏡の有利さを認めています。

どの光学系も最良の像を結ぶように調整することができます。コントラスト、焦点、像面のわん曲、特定の収差の低減を最大にすることができます。ふつうは、この最良の点に至るまえに、大気の動きや透過度によって分解能の限界に達してしまいます。最良の光学系によって得られる限界を越えるただひとつの方法は口径を大きくすることだけです。そして、口径が10インチ（25センチ）から12インチ（30センチ）を越えると、選択肢はニュートン式反射望遠鏡に限られてきます。ニュートン式反射は、高分解能を必要とする惑星観測にも、短焦点を必要とする星雲／星団写真撮影にも使えます。色収差のない全反射光学系は非常に有利で、20インチ（50センチ）を越える大口径でも持ち運び可能にできます。わたしたちの住んでいる光害のあふれる町からはなれた場所まで運ぶことを考えると、この種の望遠鏡の弱点——精密な光軸の保持の難しさ——に直面します。

望遠鏡を移動可能にしようとする、口径を増すにつれて口径比が小さくなるのがふつうです。これが二重に影響し、ニュートン式反射では中央遮蔽と収差の両方が大きくなります。分解能の向上も両刃の剣となります。望遠鏡は選択的なフィルタではないので、像の欠陥、大気の乱れや筒内気流の細部も拡大してしまいます。1秒角のシーイングの場合、口径5インチ（13センチ）から6インチ（15センチ）では、対象がじゅうぶん明るければその口径の限界まで分解できます。しかし、もっと大きな口径では、シーイングの限界までしか分解できません。エアリーディスクを見たければ小さい口径を使わなければな

りません。大口径ではエアリーディスクはなかなか見ることはできません。もっと細部まで分解したければ、良シーイングのときにもっと大きい口径を使うしかありません。大きすぎる集光力も観測者を悩ませます。像が明るすぎると惑星や月を見る際にぎらぎらします。しかし、性能を追求する観測者にも頼みの綱があります。大口径では絞ることやフィルタを使用することができます。一方、小口径の場合はすぐに限界に達してしまいます。

口径比の小さいニュートン式反射では、光路の角度が急になるため、光軸の誤差がどんどん増大します。良い設計、精度のよい光学系とよい観測場所を選ぶことによって、中央遮蔽と大部分の像の欠陥を小さくすることができます。しかし、アマチュアの多くは精密な光軸あわせの重要性を見逃しており、望遠鏡の本来の性能を引き出す機会を逸しています。この種の望遠鏡に対する「ライトバケツ」という世評は、強力な器械を使う能力のない多くのアマチュアにその原因を帰することができます。その大きすぎる口径と小さすぎる口径比に……

大きい口径と小さい口径比のおかげで、ニュートン式反射は非常に多くのアマチュア、星雲・星団愛好者と惑星観測者の両方に選ばれています。容易で効率のよい光軸あわせの方法を用いて、光軸あわせの欠陥に起因する問題を解決することが必要です。この光軸あわせの方法は再現性のあるものでなければなりません。

2. 望遠鏡の性能を決める要因

以下に示す項目は光学系の性能に直接的な影響をおよぼすものです。これらの要因は光学系の個々の要素に限定されています。筒内気流を含め、大気の影響についてはここでは議論しませんが、考慮しなければならないものです。優秀な光学系をもった5インチから6インチの望遠鏡を完全に光軸修正すると、その理論値まで分解能力を発揮するには大気の乱れは1秒角以下でなければならないことを知っておいてください。だからといってこれ以上の大口径をすててしまうわけにはいきません。鏡筒にファンをとりつけて排気すると筒内気流を激減させることができますが、高空の大気の影響はなくすことができません。

1) 光学精度

解像力の限界（ディフラクション・リミッティド）を要求するならば、光学精度はもつとも重要なものです。レイリーの基準（波面で $1/4$ 波長）の光学精度では、解像力の限界を得られる対象は、完全な空の状態の中くらいのコントラストをもつ像に制限されます。テクスローによると、惑星観測では $1/16$ 波長の欠陥でも有害です。波面で $1/24$ 波長（山と谷の差）が最良の鏡の基準と考えられます。

2) 遮光

遮光すると有害な光の侵入と内部の散乱光を減らし、像のコントラストを増します。フレイム式鏡筒は遮光のためにカバーする必要があります。また、デューキャップをつけたり、デューキャップの長さを伸ばすのは有効です。

3) 中央遮蔽の縮小

2枚以上の鏡を使った反射系では、中央遮蔽の大きさを小さくすることにより、光の干渉による散乱が減り像の明るさとコントラストが増します。

背の低い接眼筒を採用することにより、 $f/5$ ニュートン式望遠鏡の中央遮蔽は面積で3パーセントにまで小さくすることができます。これに付随するメリットは、一般的に小さい平面鏡ほど精度がよいことです。

4) 周辺減光

周辺減光は、ふつう副鏡の大きさが小さすぎる場合に起こる問題です。市販の大口径望遠鏡にしばしば見られるように、過大な伸縮量をもつ1.25インチ接眼筒を使うときにも問題となります。背の低い2インチ接眼筒を採用すればこの問題を避けることができま

す。

5) 汚れのない光学系

ほこりや指紋のついた表面，コーティングのきずは光の透過率を下げるとともに光を散乱するため，コントラストを低下させます。汚れた光学面は露がつきやすいものです。メッキ面の水分はアルミ・コーティングの劣化を早めます。

6) レンズのセルとフローティング方式の主鏡セル

レンズには精密なセルが必要です。鏡の支持方法にも注意が必要です。ガールフレンドを抱くようにやさしく，しかししっかりと鏡を支持してください。（あなたが女性でしたら，ボーイフレンドですが。）決してしめつけてはいけません。

7) 高級な接眼鏡

眼視用，写真撮影のための拡大用，口径比の小さい光学系の補正用など接眼鏡のデザインや好みはいろいろありますが，安物の接眼鏡はだめだということで経験豊かな観測者の意見が一致しています。

8) 光軸あわせ

この本の主題です。うえに述べた条件を満たした最良の望遠鏡があつたとしたら，あとやらなければならないことは，すべての光学部品を光学的な軸上に正確に配置することです。ちゃんと光軸をあわせないと，コントラストが低下するため解像度と集光力が落ちます。特に $f/6.5$ 以下の短焦点の場合，とりわけ反射系の場合に性能低下がひどくなります。

高精度の光学系を用いて適切な設計をし，光軸をあわせたならば，すばらしい像が得られます。これは接眼鏡をのぞけばすぐにわかります。

3. ふつうの光軸あわせの手順

望遠鏡の光軸あわせというのは、次のような手順のことです。すなわち、望遠鏡に入ってきた光が正確に射出瞳または写真フィルムの乳剤のうえにくるように、すべての鏡や光学部品を整列させることです。接眼筒からのぞいたとき、光学部品とその反射像が見かけ上同心円となるように調整するというのが、ほとんどの本に書いてある手順です。口径6インチ（15センチ）、 $f/8$ の反射望遠鏡が中心であった1950年代から1960年代にはこのような方法でじゅうぶんでしたが、こんにちの大口径には適切ではありません。光軸あわせは時間がかかります。忍耐と適切な道具と光軸あわせに関する理解が必要です。望遠鏡の解像力と集光力の理論値に到達するには精密な光軸あわせが必要です。

ニュートン式反射望遠鏡は放物面の主鏡と小さい平面鏡とからなる単純な構成です。こんにちのデザインでは、副鏡は楕円形の平面鏡にアルミめっきしたものとなっています。ニュートン式反射のこの小さな部品のはたらきを正しく理解している人は少数です。たいていは大きすぎたり、位置が適切ではなかったり、正しく光軸があっていなかったりしています。口径比が $f/8$ よりも大きい場合にはその大きさや位置はそれほど重要ではありません。しかし、 $f/6$ より小さい場合、特に大口径では、副鏡の大きさとオフセット量をどれだけにするかという問題に直面します。ニュートン式反射のこの重要な寸法を決める公式があるので、計算により副鏡の寸法を求め、計算値より大きい入手可能なもっとも近い寸法の副鏡を選びます。ほとんどの場合、こうして決めた副鏡の大きさで必要なオフセット量がカバーされます。オフセットは視野の片側の端の明るさに少し影響するだけなので、口径20インチ（50センチ）以下の $f/6$ より暗いニュートン式反射ではオフセットが必ずしも必要ではありません。実際には、あとで述べる光軸あわせの手順を使えば副鏡のオフセットが自動的におこなわれます（光軸が鏡筒の軸からオフセットします）。光軸を鏡筒の中心に正確に一致させるのは、光軸をオフセットさせるよりずっと困難です。光軸あわせの手順を理解すれば、この2つの方法の折衷案は実行するのが簡単であることがわかります。

予備的な調整

ニュートン式反射の精密な光軸あわせの第一歩は、主鏡と副鏡の予備的な調整です。明るい日中に望遠鏡を組み立て、各調整ねじの動きに慣れてください。実際の観測のときと同じように、接眼部の位置は楽にのぞける位置にしておくことがたいせつです。換気のよい直射日光のあたらない場所で腰掛けておこなうと驚くほどうまくいきます。ふつうの光

軸あわせの場合でもサイトチューブを使うとずっと正確に調整することができます。接眼鏡になにもついていないほうが調整ねじの動きと鏡の動きの関係を理解しやすいので、初心者は最初はサイトチューブを使わないほうがよいでしょう。ツールを使わないで光軸をあわせる時には目を接眼鏡の中心に置くことがとてもたいせつです。オートコリメーターアイピースを持っていると、これをのぞき口として使用できます。その場合にはオートコリメーター・ミラーにうつる反射像をいまのうちは無視してください。

副鏡の支持金具と接眼鏡の位置あわせ

最初におこなうことは、スパイダー（副鏡の支持金具）を鏡筒の中心にもってくることです。鏡筒の壁から斜鏡とりつけ穴の中心までの距離をはかって、どの方向の距離も同じになるように調整します。この本で説明する方法では、副鏡を中心にもってくる方法とオフセットさせる方法の折衷案を採用しているということを再確認しておきます。オフセットする方法をとる場合には、スパイダーを中心に置くということがすでに不正確なセッティングであることになります。スパイダー・ベーンを互いに垂直に保って、スパイダーをオフセットさせるには複雑な計算と正確なとりつけが必要となります。ニュートン式反射ではほとんどの場合、このような精密なとりつけは必要ありません。オフセットさせただけであってもよいのですが、決して多すぎないようにしてください。主鏡の位置を動かす余裕もあることを忘れないでください。オフセットは光軸に対するものであって、光軸は必ずしも鏡筒の中心とは一致していないことを銘記してください。これですっかりわかりましたね。

次に、鏡筒に対して接眼鏡が直角についているかどうかを調べて、そうなるように調整してください。斜鏡とその保持金具をスパイダーからはずして調整しましょう。からの接眼鏡からのぞくと、黒くつや消し塗装をした鏡筒の反対側の壁が見えます。布の巻き尺と大工用の曲尺を使って、接眼鏡の反対側の位置を正確にけがきます。鏡筒の外側に位置をけがいたら、鏡筒の壁に小さな穴（直径1/16インチ）をあけます。この穴が接眼鏡の真向かいになるので、サイトチューブを使って接眼鏡を正しくセットします。取り付け角度を調整するには接眼鏡の取り付けねじをゆるめて台の下に薄い紙やワッシャーをはさみます。接眼鏡の調整が終わったら斜鏡と保持金具をもどしてください。この調整はそれほど精度が高いものではなく、鏡筒の軸を光軸あわせの基準軸と仮定しています（実際は接眼鏡の軸を基準軸とします）。鏡筒が真円でなく鏡筒の先端が直角でない場合には、この作業はむずかしいのですが、やるだけの価値はあります。よくできた接眼鏡をじゅうぶんに丸い筒に注意深くとりつけた場合には、たいていは幾何学的な直角度の検査に合格する

といえるでしょう。オートコリメーターを使っておこなう光学的な光軸あわせはもっと精度がきびしくなります。

見え方

まず最初に、太陽の方向に望遠鏡が向いていないことを確かめてください。あなたと望遠鏡を傷つけないようにするためです。最初は接眼筒になにも入れないでください。アイピースホルダーからのぞいてみてください。アイピースホルダーの中央に斜鏡にうつっている自分の目が見えるでしょう。斜鏡の像のまわりには主鏡からの光が見えます。望遠鏡を明るい壁か天井に向けて、じゅうぶんに明るい状態で光軸あわせをするとよいでしょう。主鏡のおさえクリップに注目します。写っている主鏡のまわりに、本物の斜鏡の端が見えます。目をアイピースホルダーに近づけすぎると、どれが本当の斜鏡の端でどれが写った主鏡かわからなくなります。1インチ（2.5センチ）か2インチ（5センチ）接眼筒からうしろにはなれると、斜鏡に写った主鏡の像が斜鏡いっぱいにはひろがり、斜鏡の端がわかるようになります。鏡筒の内部と斜鏡のホルダーが黒く塗装されていると、主鏡の像のまわりに同心円状の黒いリングがみえます。

斜鏡の調整

斜鏡は3つの調整が必要です。回転の調整と角度の調整と前後の調整です。接眼筒をいっぱいまで引き出します。サイトチューブかオートコリメーターのような光軸あわせ用のツールを使っている場合にはそれを接眼筒にセットしてください。本物の斜鏡の端と写った主鏡の像だけを見て、ほかのものは全部無視してください。図1を見てください。ひどい状態ですね。

斜鏡が主鏡から正しい距離にあるかどうか前後位置をチェックしてください。本物の斜鏡の端とそのまわりの暗いリング（接眼筒の内面に囲まれた鏡筒の内壁です）を見るとわかります。両方とも黒いとひとつにとけあってしまって区別がつかなくなります。白い紙を鏡筒の内側の接眼筒の反対側に置くとわかりやすくなります。本物の斜鏡の端のまわりの暗いリングをさがすのが大事です。この暗いリングの幅は一樣でなければなりません。図2を見てください。斜鏡の回転が必要ならば、ねじをゆるめて斜鏡金具を手でまわして、斜鏡に写った主鏡の上下方向の中心をあわせます。斜鏡金具も接眼筒の中で上下方向の中央にくるようにします。

斜鏡に写った主鏡も中心にもってくる必要があります。斜鏡の角度を調整するには、斜

鏡金具のうしろのねじ（ふつうは3本）を使います。このねじで動かすことのできる左右の傾きの量は小さいことを注意しておきましょう。斜鏡は鏡筒内のほぼ中心にあるので、斜鏡の端の遠いほうの点（主鏡に近いほうの端）を接眼筒から離したり、近づけたりする動きができるだけです。精密な調整では、接眼筒をのぞいて主鏡の像が本物の斜鏡の中で前後方向（左右）の中心にくることを確かめます。もし中央にきていなければ、鏡筒の中に手を入れて斜鏡金具をつかんで接眼筒の方向にわずかに押し引きしてみます。これでどちらの方向に調整すべきかがわかります。最終調整はねじを締めるようにしておこないます。サイトチューブを使っている場合には、接眼筒を最も引き込んだ位置で斜鏡をチェックしたのち、今度は最も引き出した位置でもチェックします。どちらの位置でも斜鏡を囲む暗い環が明るい斜鏡と同心円となるようにします。

前後方向の位置の誤差とオフセット

接眼筒をある方向にいっぱいに動かしたときに斜鏡のまわりの暗い円が同心円となっても、反対方向に動かしたときに偏心または斜めになる場合は、前後方向と角度の調整誤差があります。接眼筒を繰り入れた状態と繰り出した状態の両方で斜鏡の調整をチェックしないとこの誤差が生じます。前後方向と角度の誤差の両方がある場合には、まず前後方向の調整をおこなって、焦点の内側と外側での妥協をはかります。そのあとで角度の調整にうつります。本物の斜鏡の端のまわりの暗い円の幅は、焦点のどちらかの側で一樣となっていないでしょう。

焦点の両方の位置で、幅のせまいほうが同じ側にくるように角度を調整してください。次に、本物の斜鏡の端が一樣の幅の暗い円で囲まれるように、斜鏡の前後位置を再調整します。接眼筒を繰り出した位置と繰り入れた位置でもう一度チェックしてください。本物の斜鏡の端が一樣の幅の暗い円で囲まれていたら、斜鏡の前後方向と回転方向と角度の調整は完了したことになります。

この時点で斜鏡のシルエットを斜鏡に写った主鏡の像と比べてみると、それらが完全には一致していないことがわかります。斜鏡が正しくセットされていても、主鏡の光軸が合っていないときにこのように見えます。図3を見てください。

主鏡の光軸あわせ

主鏡を調整するときは、斜鏡に写る主鏡の像と斜鏡のシルエットだけに注目してください。そのほかの円は無視しましょう。どの円が主鏡かわからないうちは、主鏡の粗い調整

をするときにサイトチューブを使わないようにしましょう。サイトチューブのあるなしにかかわらず、斜鏡の像は端に伸びるスパイダーベーンをともなったシルエットになっています。主鏡にはクリップがついており、これで主鏡の端がわかります。たいていの主鏡の調整ねじのひとつは鏡筒の上側についており、あとの2つのねじは右と左と考えることができます。主鏡セルのばねが圧縮されているときに主鏡の光軸が保たれます。主鏡調整ねじを締めると焦点位置が低くなります。背の低い接眼筒のために焦点位置を低くできるのは都合がよいことです。しかしやりすぎないようにしましょう。

接眼筒からのぞくと、主鏡の像と斜鏡の像が見えるでしょう。斜鏡の像を主鏡の像の中央に動かすための方向は簡単にわかります。像を動かしたい方向の側の調整ねじをゆるめればよいのです。反対側のねじを締めても同じことです。どちら側の調整ねじを使うかを知るには、接眼筒をのぞきながら手を望遠鏡の前に置いて、手を斜鏡の像を動かしたい方向へ動かしてみます。回す調整ねじは、手がある側に一番近いものです。たとえば、上側に斜鏡の像を動かしたいなら、上側のねじを時計と反対方向に回します。

微調整をするときにはサイトチューブを使い、調整ねじを一度に少しだけ動かすようにして斜鏡の像が主鏡の中心にくるようにします。微調整はなるべくねじを締めておこないます。鏡筒の中に光があふれていると、接眼鏡の内面の像が斜鏡のシルエットの像の中に見えます。大口径の口径比の小さい望遠鏡では、その像は同心円にはなっていないでしょう。前後方向の調整で斜鏡が中央に置かれた場合にこのオフセットが起こります。サイトチューブの中で接眼筒の内側の像を中心にもってることが大事です。このようにすると、かろうじて感知できる程度の斜鏡の像のオフセットが生じます。これで主鏡の調整が済み、光軸あわせがほとんど完了しました。これまでに述べた手順は明るい日中におこなうのがよいでしょう。図4をごらんください。

星像テスト

最後の微調整は星像テストでおこないます。夜に暗い場所か家の庭へ出て望遠鏡をセットします。中くらいの倍率のアイピースをつけ、明るい星に望遠鏡を向けます。惑星や月は広がった天体なので役にたちません。星に焦点をあわせ、視野の中央にもってきます。次に少しだけ接眼筒を繰り出します。焦点を少しはずすと、大気が安定していればいくつかの干渉リングが見えるでしょう。干渉リングの中心には光の点を見ることができるよう。干渉リングを主鏡であると考え、中央の光点を接眼筒の内面だと考えてください。

中央の点は本当に中心になればなりません。干渉リングは中心をとりまいて一様でなければなりません。もしそのようになっていなければ、昼間におこなったように主鏡を調整してください。中心の光点が同心円になってきたら、高倍率のアイピース（たとえば、3ミリから6ミリ）に代えて同じように主鏡の微調整をします。星像テストをおこなうときには必ず干渉パターンの中央点を視野の中心に置くことが重要です。あとに残っている仕事はファインダーの十字線が高倍率の視野内の星と重なるようにファインダーの向きを調整することだけです。

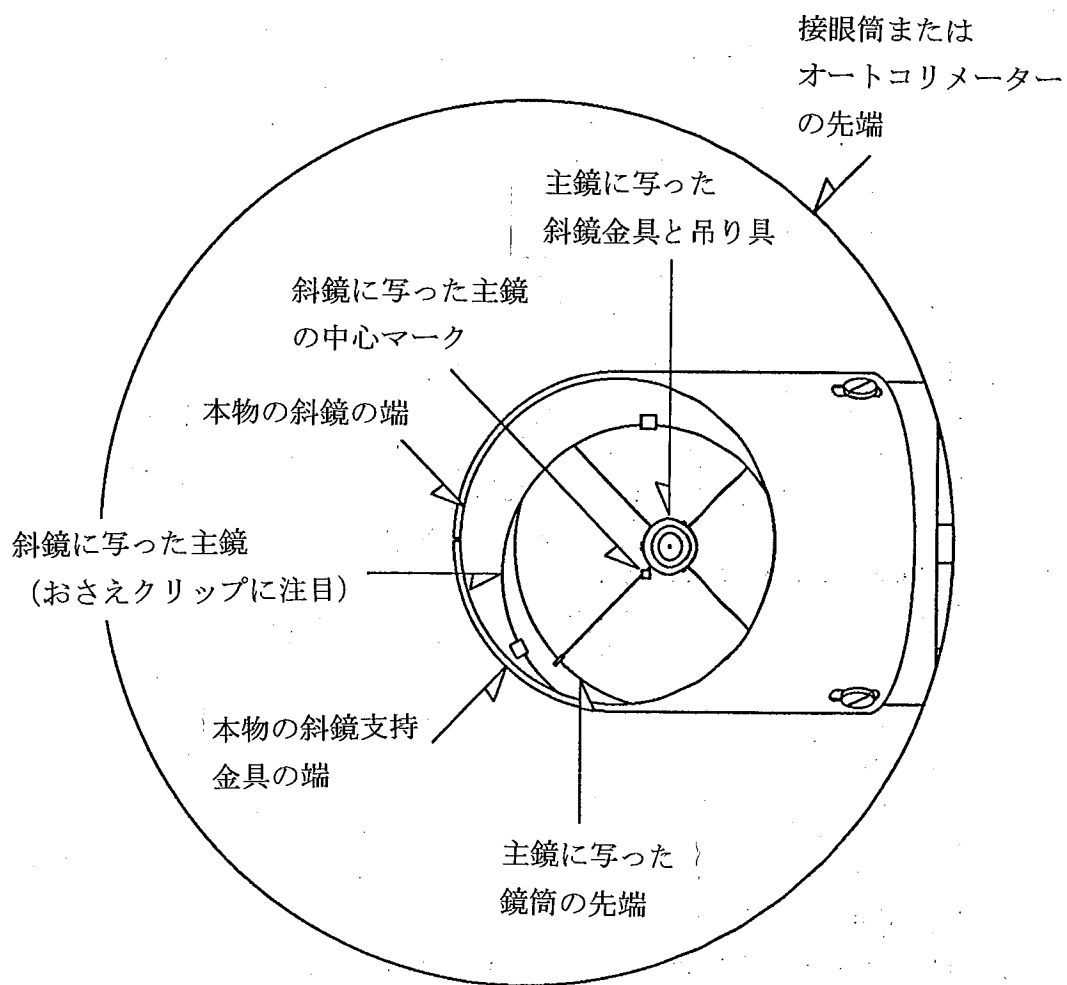


図 1

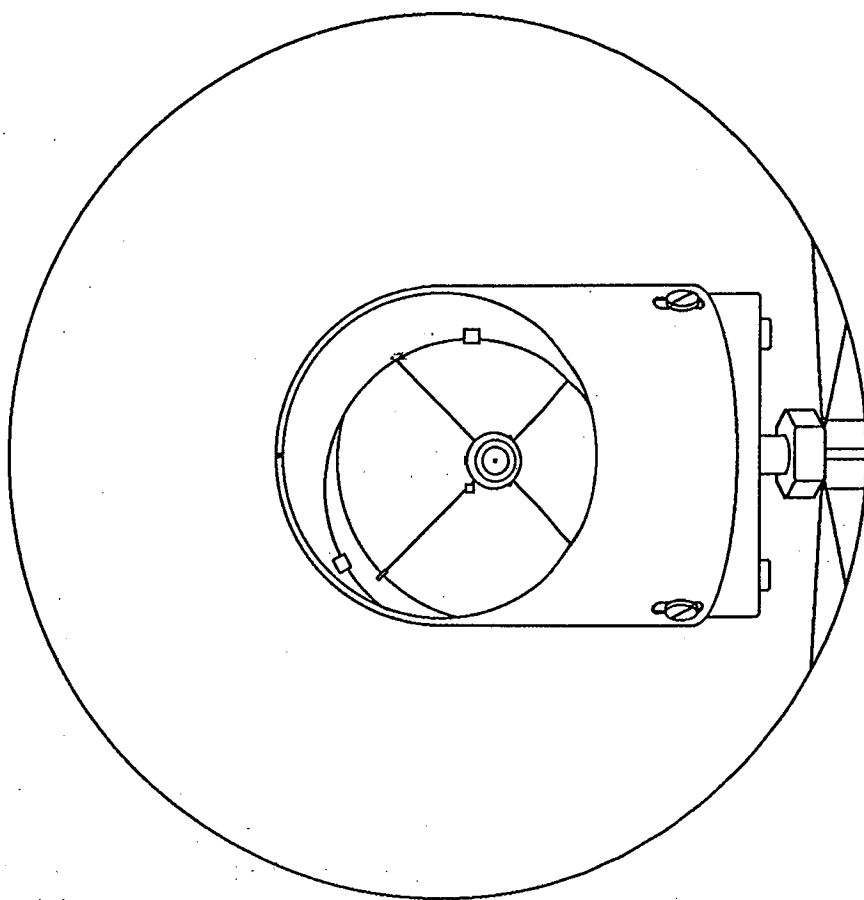


図 2

斜鏡が接眼筒の中心にきた状態

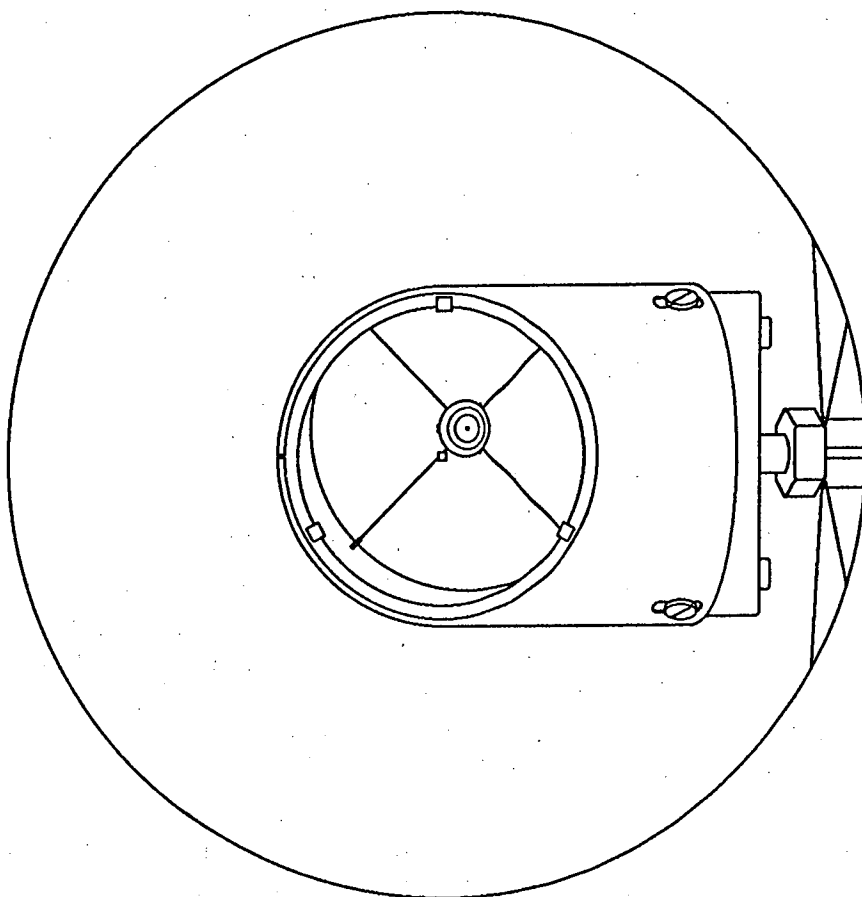


图 3

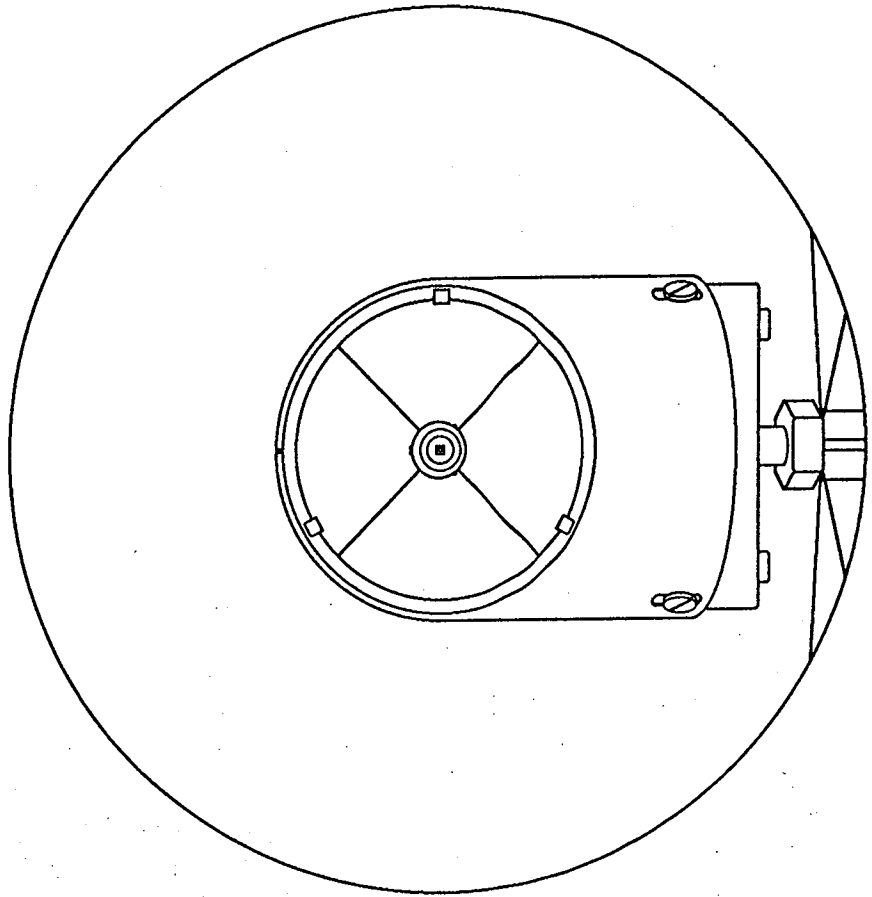


図 4

ニュートン式反射の光軸が合った状態

4. 誤解と光学的錯覚

やろうとする決意と時間さえあれば、ふつうの光軸あわせはできるようになります。調整をするまえの望遠鏡がひどい性能であったとしたら、調整後は見違えるようによくなるはずですが、しかし、わたしたちの口径16インチ（40センチ）、 $f/5$ のニュートン式反射の光軸あわせはこのようにはいきませんでした。たしかに像はよくなりましたが、惑星観測やその他の高解像度が要求される観測に使えるほどではなかったのです。からの接眼筒からのぞいた感じではちゃんと同心円状になっていましたし、焦点の内側と外側の両方で中心が一致していました。星像テストの焦点外像も問題ありませんでした。しかし、高倍率でアイピースの焦点を合わせると、主鏡の精度が悪い——たぶん非点収差がある——ように見受けられました。

何時間もかけて鏡を調整し、測れる寸法はすべて測ったので、当然のことながら光軸はよく合っていると思っていました。それでもなお、像は不満足なものでした。主鏡をはずしてテクスローの本に書いてあるフーコーテストの帯測定とロンキーテストをおこなってみました。斜鏡もはずして干渉テストで平面度を調べました。どちらの鏡も優秀でした。よい鏡を組み合わせたものから得られる像がどうしても悪くなるのでしょうか。正直に言うと、わたしたちはある疑いをもっていました。問題は光軸あわせにあるはずだと考えていました。星像テストをおこなったときは大気の安定度は最良ではありましたが、良シーイングのときに見る像は満足のいくものではありませんでした。鏡筒に鏡をもどし、調査することにしました。

斜鏡の前後方向を調整しているときに、次のことに気づきました。斜鏡の前後位置が変わっても、斜鏡の角度を少し変えれば接眼筒の中の像を同心円にできるのです。その位置があまりに違っているので、接眼筒の伸縮量をあわせるためにスパイダーを0.5インチ（13ミリ）も主鏡から遠くへ付け替える必要がありました。斜鏡を前後方向に0.5インチ（13ミリ）強も動かしてもまだ光軸を合わせることができるのです。何時間も光軸あわせと格闘したあとで、このようなありそうもないことに気づいたのですが、そのおかげで、ニュートン式反射の光軸あわせで起こりやすいとても重要な光学的錯覚があることがわかりました。円や中心を示す基準となるものがないと、人間の目は、円の正確さや境界のない広い領域の中心がどこにあるかを識別できないのです。ふつうの光軸あわせでは、見た目には同心円状のたくさんの円があるので調整はとても簡単であるように思えます。でも実際には、同心円と思われるものがそうではなく、しかも真円でもないことが多いの

です。この原因は、オフセットや望遠鏡の部品の製造公差や人間の目が識別する能力や焦点の内外でのチェックにおける思い込みにあります。大口径になればなるほど、口径比が小さくなればなるほど、このようなことが起こりやすくなります。大口径・短焦点の望遠鏡では、適切な道具がないと、光学の知識と光軸あわせの方法を熟知した専門家でさえ光軸あわせが困難になります。

口径比の小さい光学系には像の欠陥が多いという不当な評価がくだされています。しかし、光軸の上またはその近くで、対象が視野の中央にあれば、像の欠陥は最小限になるか、なくなります。像が光軸から離れるにしたがって欠陥はひどくなります。そして、大口径望遠鏡は像の欠陥を正確に拡大します。ニュートン式反射の基礎式から次のことがわかります。口径比が小さくなるにつれて光学部品の精度と位置の精度がどんどんきびしくなるのです。ライトバケツと呼ばれるドブソニアン式望遠鏡や口径比の小さい大口径望遠鏡では、小さな誤差が積み重なって最終的には悪い像しか得られないということが多くなります。どんな光学系でもある程度影響を受けやすいといえます。誤差、特に光軸あわせの誤差をなくすことにより、どんな光学系でもよりよい像を結ばせることができます。

上の文章を読んで、あなたはたぶん次のように考えるでしょう。自分の望遠鏡はそんなに悪くない。（あの夜は大気安定していなかったのだ。）ふつうの光軸あわせがよい像を得るための最善の方法でないなら、どうしてそんなことで時間を浪費するのだと。

わたしたちはもう一度本を調べてみました。光軸あわせの手順は主観的ではなく、もっと客観的であるべきです。わたしたちはだれにでも使える必要なツールを再発見し、専門家と同じ結果を得ることができる新しいテクニックを開発しました。それなのに、わたしたちがなぜふつうの光軸あわせの手順をこの本のなかに入れたのかとふしぎに思われるかもしれません。これにはいくつかの理由があります。光軸あわせの技術を身につけることは経験をとおして得られるでしょう。望遠鏡の光軸あわせをきちんと理解し、できるようになるには科学的な思考と少しのこつが必要です。この本を読まなければ望遠鏡の光軸あわせはできないでしょう。その手順はふつうの光軸あわせと似ていますが、少し異なっています。ふつうの光軸あわせを理解することが基礎となります。実際、ふつうの光軸あわせの手順は、精密な光軸あわせにかかせない基礎となります。ご存じのとおり、この本の目的は、光軸あわせの技術を身につけることと光軸あわせに役立つを理解することを助けることです。

5. 主鏡の中心に印をつける

中心に印をつけるために、主鏡の直径をはかるまえに、2つの仮定を認める必要があります。1番目に、この放物面鏡は回転面でその頂点、すなわち放物面の中心が主鏡の中心と一致していると仮定します。この仮定から2番目の仮定が出てきます。すなわち、光軸が主鏡の中心を通っているという仮定です。主鏡の中心に印をつけることには2つの理由があります。毎回の主鏡の光軸あわせのための基準として使うためと、斜鏡と接眼筒の精密な調整の基準とするためです。光軸がはかってもとめた主鏡の中心からほんの少しだけずれていたとしても、結果として生じる像では影響がほとんど目立たないでしょう。ずれが大きい場合には、非点収差が目立つようになり、鏡の製造会社へ送り返す正当な根拠となります。簡単な寸法上の目印が、精密な光学的な光軸あわせのため有効な手助けとなるひとつの実例です。主鏡の中心に印をつけることで光軸あわせの主観的判断のひとつ、主鏡の光軸または中心の判断、を取り除くことができます。

黒いエナメル、マジックマーカー、小さな四角いコンタクトペーパー、電気用のテープのどれかで印をつけます。印は直径約1/4インチ(6ミリ)または約5/16インチ(8ミリ)角にします。チェンジャー・アイピースを使う場合には5/16インチ角の印が好都合であることがわかりました。中心位置を決めるのに時間をかけて、印の位置をできるだけ正確にします。長いものさしを使って4個か5個の点をフェルトペンでつけると、かなり正確に中心を決めることができます。斜鏡の影が主鏡の中心にあたるので、この印は光の損失や干渉の原因にはなりません。(付録の「読者のことば」を参照のこと。)

ある本では斜鏡の中心にも印をつけること—オフセットさせる場合と、させない場合があります—を勧めています。わたしたちはこれは不要であると考えています。斜鏡を調整するには、サイトチューブよりオートコリメーター・アイピースのほうがずっと精度がよいのですが、オートコリメーターは基準点を必要としないからです。斜鏡の調整は厳しい精度を要求されるので、非常に正確に印をつけないかぎり、斜鏡の調整精度に効いてきます。また、斜鏡に印をつけると、光の損失と干渉の悪影響が出ます。わたしたちは斜鏡に印をつける必要がないと考えていますが、その理由はこの本を読み進むとわかるでしょう。

6. サイトチューブを使って光軸修正の精度を上げること

サイトチューブの役割は、接眼筒内部の光軸を定義し、斜鏡の位置を接眼筒の軸に正確に合わせ、主鏡の光軸をある程度まで正確に合わせることにあります。サイトチューブの視野の狭さと十字線のおかげで、斜鏡に写ったいろいろな部品の中心を決めることができます。

サイトチューブを使う最初の目的は、斜鏡の軸方向の位置、すなわち主鏡からの距離を決めることです。これは、接眼筒の軸と主鏡の軸の交点を一致させることによりおこないます。サイトチューブを接眼部に差し込み、のぞいたときにチューブの先端が作る円が斜鏡ホルダーの外形より少しだけ大きくなるようにします。斜鏡がサイトチューブの先端と同心円となるように斜鏡の前後方向（鏡筒の軸方向）の位置を調整します。図5と6を参照してください。つぎに、主鏡の中央の印がサイトチューブの十字線の中心にくるように斜鏡を調整します。すでにおおまかな調整ができている場合には、少しの角度調整だけで済みます（図7）。最後に、写っている像をできるだけ同心円となるように主鏡を調整します（図8）。

反射したサイトチューブの十字線の像（斜鏡のシルエットの中心に見える）をサイトチューブの十字線と一致させることができます。鏡筒内が明るくないと、この反射した十字線の像は見にくく、反射した十字線の像と十字線の実物に同時に焦点をあわせるのは不可能です。どうにかしてこの調整をおこなってください。サイトチューブを使ったこの最終調整が、幾何学的な光軸あわせから光学的光軸あわせへの第一歩となります。

サイトチューブを使って、焦点の内側と外側で光軸が合っているかチェックします。これにより、斜鏡がオフセットしていることがわかるでしょう。サイトチューブの十字線の反射像は本物の十字線と中心が一致していなければなりません。もし、ずれているようでしたら、接眼筒の取り付け角度を修正する必要があります。必要ならば、接眼筒の動く部品を締めつけるか、接眼筒の台座にシムを入れましょう。いろいろやっているうちに、接眼筒が精密にできていないことがわかるかもしれません。そのときには、接眼筒を取り替えるしか方法はないかもしれません。

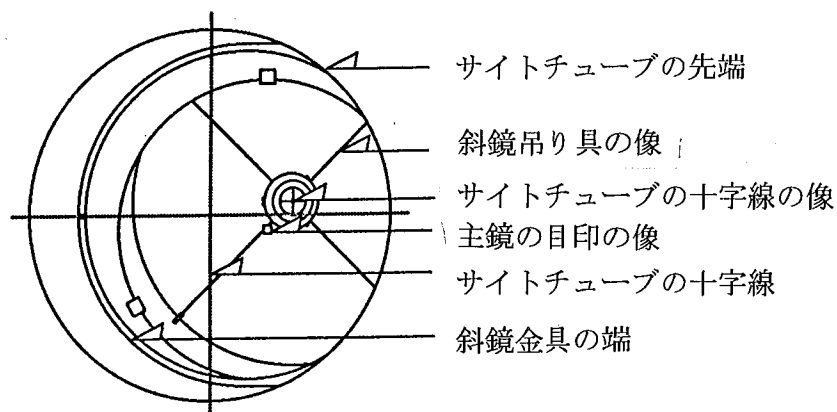


図 5

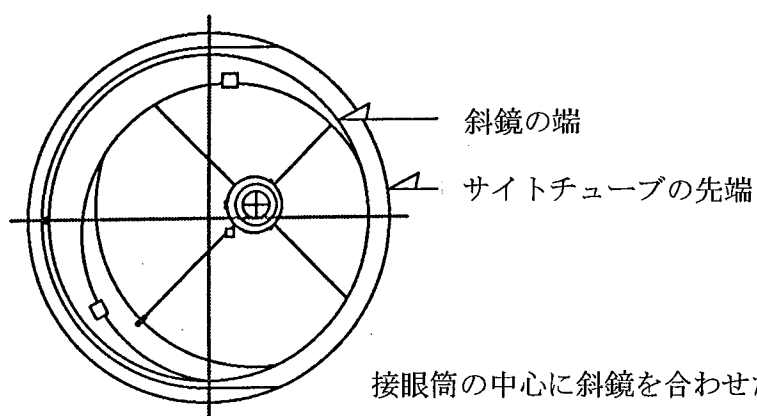


図 6

接眼筒の中心に斜鏡を合わせた状態
 —斜鏡の端とサイトチューブの先端に注目

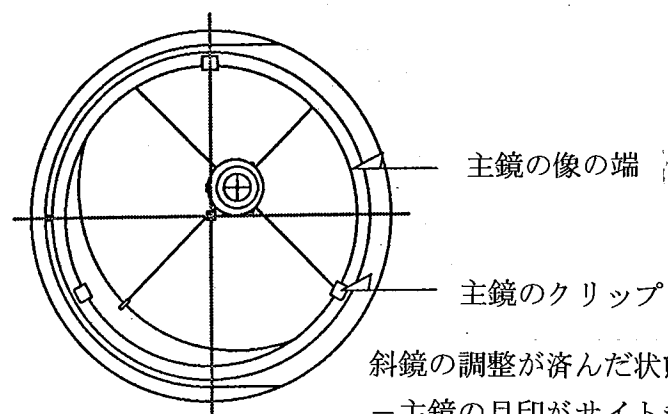


図 7

斜鏡の調整が済んだ状態
 —主鏡の目印がサイトチューブの十字線の
 交点に一致していることに注目。
 主鏡のクリップと主鏡の像の端に注目。

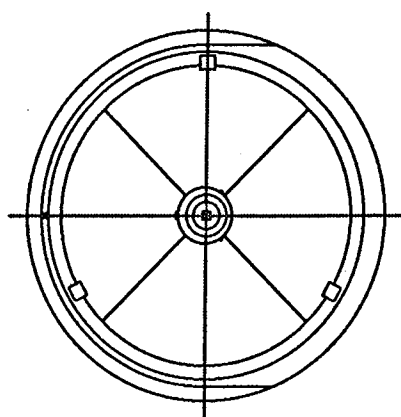


図8

光軸修正が済んだニュートン式反射を
 サイトチューブを通して見たところ
 ーサイトチューブの十字線の像は本物
 の十字線のうしろに隠れています。
 オフセットがあるために、斜鏡吊り
 具の像はサイトチューブの十字線と
 一致しません。

7. チェシャー・アイピースを使って主鏡の光軸をあわせる

星像テストを使ってニュートン式反射、特にドブソニアン望遠鏡の主鏡の光軸あわせをしたことがある人はだれでもその方法が思ったほどたよりにならないことを知っています。まず第一に、星像テストは大気の状態に大きく左右されます。さらに悪いことに、接眼鏡をのぞく人の、次のような主観的な能力に左右されます。

- (1) 星像を視野の中央に保つこと。
- (2) それと同時に、同心円状の干渉パターンの中に微妙で瞬間的なちがいを読みとること。
- (3) 認められたすべての誤差を修正すること。

複数の誤差がともなっている場合には、星像テストのエキスパートでなければ、干渉パターンの評価はむずかしいものです。経緯台式のドブソニアンで高倍率の視野の中心に星を保つことだけでもたいへんです。ましてや、望遠鏡の下端に行き、主鏡の微調整をし、また接眼部に戻って高倍率の視野から消えた星を見つけることはとてもむずかしいものです。それにもかかわらず、主鏡の微調整にはほとんどの本がこの方法を奨めています。

さらに悪いことには、ドブソニアンの主鏡は再調整が必要であることが多いのです。鏡は鏡筒についている部品のなかで最も重い光学部品（特に大口径の場合）なので、望遠鏡を天の別の方向に向けるときに、主鏡は加速されたり、減速されたりします。フローテーション・セルに載っていてスリングで吊られている主鏡は、その慣性で光軸が狂います。言い換えれば、多数の天体を観測するときには、性能を最大限にひきだすために1～2時間に一回は主鏡を再調整するべきです。

チェシャー・アイピースを使えば、暗闇でも1分以内に主鏡を再調整することができます。チェシャー・アイピースにより光路中に環状の光が見えるので、主鏡の中心の目印を中心に持ってくるのが簡単にできます。主鏡調整ねじの1/10回転以下の精度まで調整できます。主鏡調整ねじの1/4回転でも有害なコマを生じるので、微調整が必要です。

チェシャー・アイピースを使った光軸あわせはひじょうに精密ですが、主鏡の調整はすばやく簡単にできます。望遠鏡の接眼筒に入れたチェシャー・アイピースを回転し、チェシャー・アイピースの側面の穴を外部の散乱光（夜には赤い懐中電灯で照らす）の方向に向けます。望遠鏡が太陽の方向に向いていないことを確認してください。さもないとあつ

という間に目を傷めます。（フィルターをつけていない望遠鏡を太陽に向けることは、気が狂っているしるしです。）　チェシャー・アイピースに入ってきた光はみがかれた45度の面で反射して望遠鏡の中に入っていきます。チェシャー・アイピースをのぞきながら、主鏡の中心の目印を反射した環の中心にもってきます（図9参照）。目印が小さい正方形であれば、環の中央に4つの「耳」が見えるでしょう（環の中央の暗い部分に隠されていなければ）。図10と11を見てください。

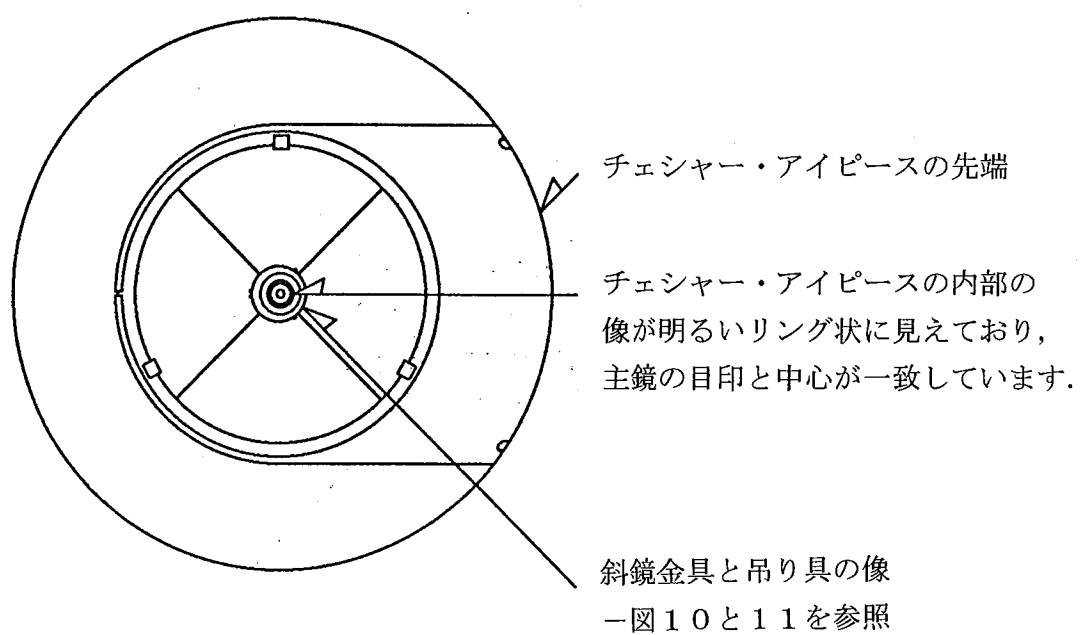


図9

チェシャー・アイピースからのぞいたときの様子

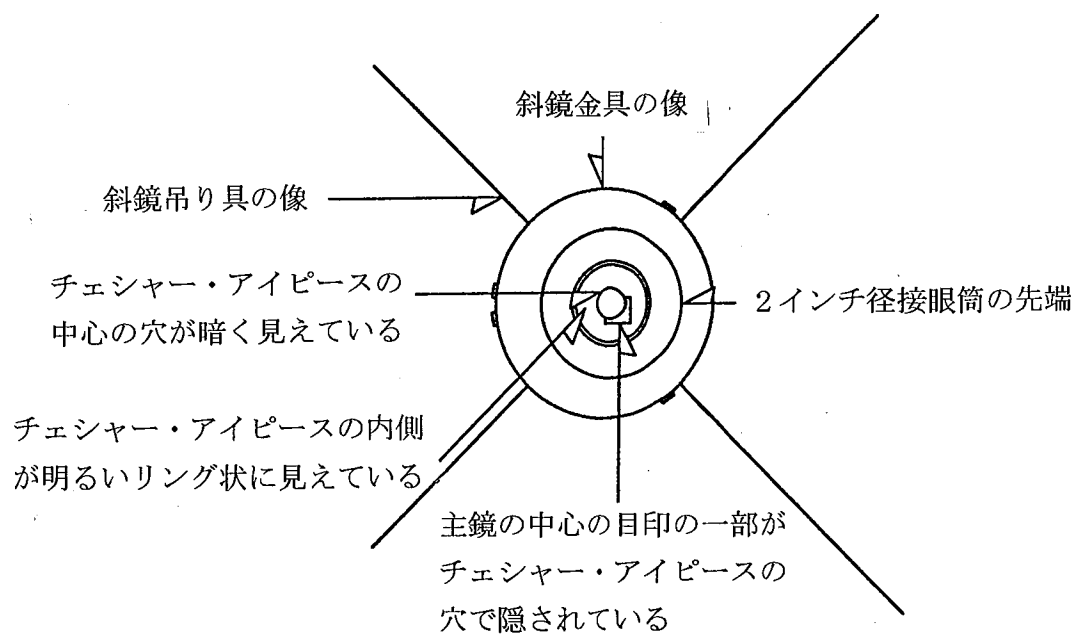


図10 — チェシャー・アイピースから見える像の解釈

主鏡を調整する前、斜鏡に写った像の詳細

- 2インチ径の接眼筒の先端が斜鏡金具の像に対してオフセットしていることに注意.

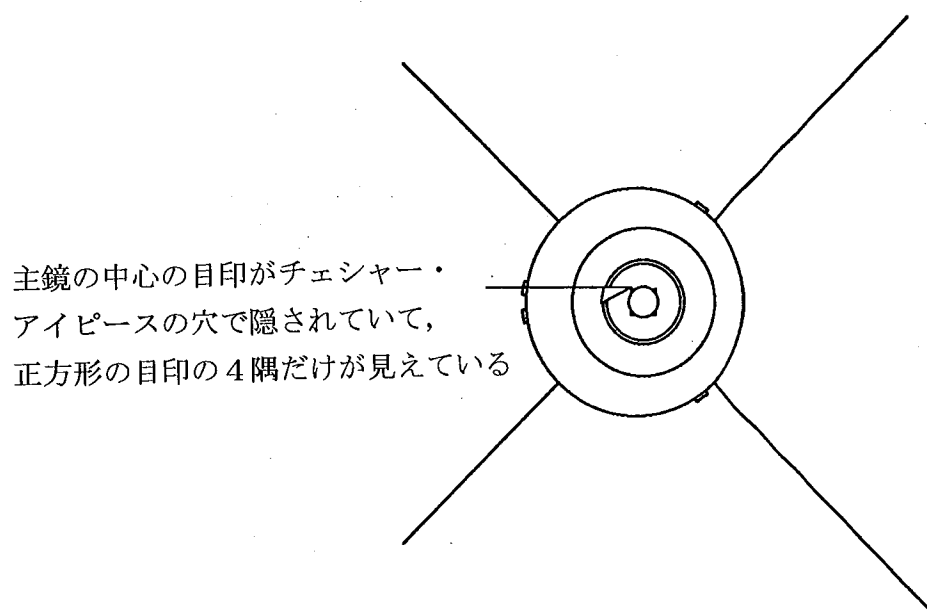


図11

主鏡の調整後、斜鏡に写った像の詳細

8. オートコリメーター・アイピース

この本を書こうと決心するまえは、オートコリメーター・アイピースのことはほとんど理解されていませんでした。わたしたちがオートコリメーターを知るきっかけとなったオリジナルの記事でさえこの道具のはたらきの説明はまちがっていました。正しく理解されず、難解な専門書のなかに埋もれてはいましたが、オートコリメーターは、斜鏡と接眼筒の精密な光軸あわせをするのためにアマチュアが入手できる唯一の「光学的」道具です。オートコリメーションで得られる光軸の精密さは、感度、正確さともほかに匹敵するものではありません。

その呼び名からわかるように、オートコリメーターは、ひとつの光学面をもうひとつの光学面とコリメートする（基準軸を合わせる）ことで自動的に他の面を効果的にコリメートするものです。ある熱心な望遠鏡の所有者に、「オートコリメーターは望遠鏡の光軸あわせを「自動的に」おこなうものではない」と教えたときは残念に思いました。そのような光軸あわせの道具を実現するにはまだだいぶ時間がかかるでしょう。

オートコリメーターを使うまえに、サイトチューブとチェシャー・アイピースで光軸をあわせておかなければなりません。オートコリメーターは感度がとても高いのでこのような準備が必要です。オートコリメーターでは誤差が拡大されて見えるので、光軸がかなりよく合っていないとこの道具は役に立ちません。したがって、あわてないでまずサイトチューブで光軸あわせをしましょう。オートコリメーターが接眼筒のスクエアリングの精度にとっても敏感であることに気づくでしょう。また、オートコリメーターにより、斜鏡の面を接眼筒と主鏡の軸に正確に合わせることができます。オートコリメーターを使うときには、接眼筒が鏡筒に直角に取り付けられていると仮定しています。したがって、斜鏡の調整のみが有効です。斜鏡には手がとどきやすいので、調整は斜鏡から始めます。これは、チェシャー・アイピース—中央の目印の調整—にもあてはまります。

オートコリメーターを接眼筒にセットしたあとで最初におこなう調整は、光軸を閉じることです。自分の前後に鏡がある床屋に行ったことがあるでしょう。この最初の調整は、うしろの鏡に写る自分が見えなくなるように—前の鏡に写った自分の像がうしろの鏡の像をかくすように—床屋の鏡の軸を合わせることにあたります。もっと正確に合わせるには、自分が鏡の軸からそとに出なければなりません。

閉じた光学系で、いくらオートコリメーターの反射が暗くても、決して太陽の方向に向けてはいけません。（もうこれ以上「太陽に向けるな」とは言いません。）鏡筒を明るい壁か散乱光源に向けて、コリメーティング・アイピースをのぞいてみましょう。接眼筒の内面の像が斜鏡吊り金具の影になった像の中に見えます。接眼筒の内面の像が外からの光によって明るく見えているなら、接眼筒の軸（オートコリメーターの鏡）、斜鏡、主鏡のどれかが斜鏡金具からはずれていることになります。接眼筒は直角に取り付けられていると仮定しており、主鏡はチェシャー・アイピースで調整済みなので、手でそっと斜鏡金具をねじるか傾けるかすれば、中心を暗くすることができます。このようにすれば、どう調整すればよいかがわかります。サイトチューブでじゅうぶん光軸を合わせておかないと、この調整段階は忍耐が必要となり、いきあたりばったりとなります。斜鏡の軸が変わったら主鏡の軸にわずかな修正が必要となります。この修正はチェシャー・アイピースを使えば簡単にできます。この手順を何回かくりかえさなければなりません。接眼筒の内面の像が暗くなったときに3つの鏡から成る光学系が閉じたことになります。

光学系が閉じたら、接眼筒の出し入れの影響をチェックします。オートコリメーター・アイピースの横を軽く押せば、どちらにずれているかを判断できます。接眼筒をとめているねじのどれかを締めるか、シムをはさむことによって調整します。

鏡筒の前方が明るいので、外からの光が鏡の表面を照らします。そのため主鏡ぼ中心の目印が接眼筒の中心に見えるでしょう。図4を参照してください。熟練した目には、もうひとつの暗くて反対向きになった目印が視野の中に入ったり出たりするのが見えるでしょう。たいていの目的に対してはこれで望遠鏡はじゅうぶんの精度で光軸が合ったといえます。そして熟練した観測者でも満足できる性能を発揮するでしょう。それでもさらに調整の余地があります。

9. オートコリメーター・アイピースに写った像を理解する

望遠鏡を水平に向けておいて、地面にすわるなり、ひざをつくなり、立つなりして鏡筒の前端から10 cmくらいのところに目をもっていきます。主鏡のなかに自分が写っているのが見えるでしょう。主鏡の焦点の近くにいたので、写っている像は拡大されてもいませんし、縮小されてもいません。この正立像のことを焦点面像と呼びます。うしろへさがっていくと写った自分の像がどんどん大きくなります。さらにさがり続けると、主鏡全体が自分の目の像でいっぱいになります。この距離では目を角度誤差の許容範囲に留めておかなければならないので、目を光軸上に保つためにじっとしていなければなりません。あと2 cmほどうしろにさがると、自分の目の像がぼやけて主鏡がひとみの色でおおわれます。わたしの場合は目が青いので、この場所では主鏡の全表面が青くなります。曲率中心——主鏡の焦点距離の2倍の位置——でこの現象がおこります。この像のことを曲率中心像と呼びます。この点にフラッシュライトを置いて主鏡を照し、ライトの横に小さな紙片を置くと、紙のう上にフラッシュライトの像ができます。フーコーテストのような鏡のテストは曲率中心でおこなうのがふつうです。さらにうしろにさがると、像がはっきりしてきますが、今度は上下さかさの像となります。主鏡から焦点距離の3倍離れた場所では、上下さかさの像で大きさは焦点面像と同じです。この像のことを逆転像と呼びます。オートコリメーター・アイピースのなかに見えるこれらの3種類の反射像——焦点面像、曲率中心像、逆転像——を同時に調べることにより、光軸上にこれらの像が正しくのっているかを判断することができます。

10. オートコリメーター・アイピースで光軸の収束を調べる

オートコリメーター・アイピースを使ったこの調整は、ニュートン式反射の光軸あわせの最終段階となります。この調整をうまくおこなえば、干渉限界（diffraction limited）のシーイングにおける星像テストにより、正確に光学的光軸があっていることを確かめることができますでしょう。斜鏡のなかを見たとき、オートコリメーターについている小さな鏡の反射像が暗くならなければなりません。鏡に写っている像を識別するには、消しゴムつき鉛筆（10インチ以下の望遠鏡の場合にはマッチ棒）が必要です。明るい色の消しゴムかマッチの頭が役に立ちます。

鉛筆かマッチ棒を接眼筒の軸の近く、接眼筒と斜鏡の間の光路のなかに入れます。鏡筒の前方から手を入れるのがふつうです。オートコリメーター・アイピースは先に接眼筒に入れておきます。鉛筆を持っている手はすぐにわかります。手の像と鉛筆の正立像が主鏡に写っているのもわかります。さらに重要な像が影になった斜鏡の像のなかに見えるでしょう。鉛筆を接眼筒の中心のほうに近づけると斜鏡の像のなかで第2の正立像が見えてきます。これが焦点面像です。鉛筆をさらに接眼筒の軸に近づけていくと、オートコリメーターの鏡の像のなか（影になった斜鏡の像の中心）にさかさまになった鉛筆の像が見えてきます。光学系のなかを6回も通ったために暗くなっているこの像が逆転像です。図12と13を見てください。鉛筆が接眼筒の軸の上にくると、焦点像に重なります。正確に光軸が合っている望遠鏡の場合、鉛筆をゆっくり動かすと、消しゴムの焦点像と逆転像がお互にくっつくのが見えます。これが起こったときには、オートコリメーターの像が曲率中心像である消しゴムの色でおおわれます。オートコリメーターの像の中心でこれらの3つの像が収束すると、光学的光軸がひじょうに正確に合ったといえます。図14を見てください。この図は正確に光軸が合っている場合を示しています。ここに至るまでには忍耐と試行錯誤が必要です。少し経験を積むと、数分でできるようになります。ここで注意をひとつ。斜鏡を暗がり調整するのはやめましょう。どうなっているかを見極め、必要な修正をおこなうにはじゅうぶんな光が必要です。

どう調整したらよいか分かったならば、ひきつづく調整のあいだはオートコリメーターを接眼筒に固定し、回転させないようにしなければなりません。オートコリメーター自身にもわずかな誤差があり、回転させると写っている像の見え方が変わってしまいます。この誤差は接眼筒の最終調整には影響しますが、そのほかの部品の光軸あわせには影響しません。斜鏡を調整するには斜鏡金具を軽く押すかねじるかします。

オートコリメーターを暗くする前の段階の調整量よりも一段と必要な調整量が小さくなっているのです、この調整はそっとおこなわなければなりません。3つめの鏡の反射のなかのどこかに3つの像が見えるときは、たとえ収束点が中心からはずれていても、そのはずれ方から考えるよりももっと光軸は精密に合っているといえます。反射がおこるたびに入射角は2倍になります。いまは、3つの反射面（オートコリメーターを含む）からなる光学系のなかで、それぞれ2、4、6回 光が通る3つの別々の反射を取り扱っています。焦点面像と逆転像が3番目の鏡の像の端に同時に見えれば、光軸の精度は角度の2分以下であると言ってよいでしょう（もちろん、主鏡の焦点距離によりますが）。オートコリメーターの鏡の中心に収束する場合には、光軸の精度は角度の秒のオーダーであると言えます。斜鏡の調整ねじではそこまでの微調整はできませんので、手の力で調整するのです。

精密な調整をしたあとでは、光軸のチェックはオートコリメーターでできるようになります。オートコリメーターを接眼筒のなかで回すと接眼筒自身の光軸のずれがわかります。1/1000 インチか 2/1000 インチのずれでも、反射した像の予期できない動きを生じます。ずれが大きい場合には、接眼筒の角度の調整が必要になります。これは高倍率を使った星像テストで、アイピースを押すことによりチェックします。このとき、星を視野の中心に置くことが大切です。累積誤差を減らす方法については付録に示してあります。ずれがよほど大きいのか、星像テストの結果が悪くないかぎり、この調整は必要ではありません。反射光学系の数学的側面に興味のある読者と望遠鏡を製作する人のために付録を載せました。

収束がオートコリメーターの鏡の像のなかでおこれば、ほとんどの場合光軸はじゅうぶん精密に合っていると言えます。あとはよい光学系とよいシーイングさえあれば干渉限界の性能を発揮するはずです。

16インチ、 $f/5$ 鏡の光軸をちゃんと合せたときにどうなるかを多くの人に聞かれました。実際、光軸を合わせると、お気に入りのナグラ13mmアイピースの視野の端まで鮮明で平坦な像が得られました。6mm、10mmのクラベ・アイピースを使うと、すばらしい惑星像を見せてくれました。

その後、16インチを20インチ、 $f/6.2$ に替えました。最初の観測で、ガニメデの細部をうかがうことができました。いちど大口径望遠鏡の高性能の味を知ってしまうと、もうもとはもどることができません。

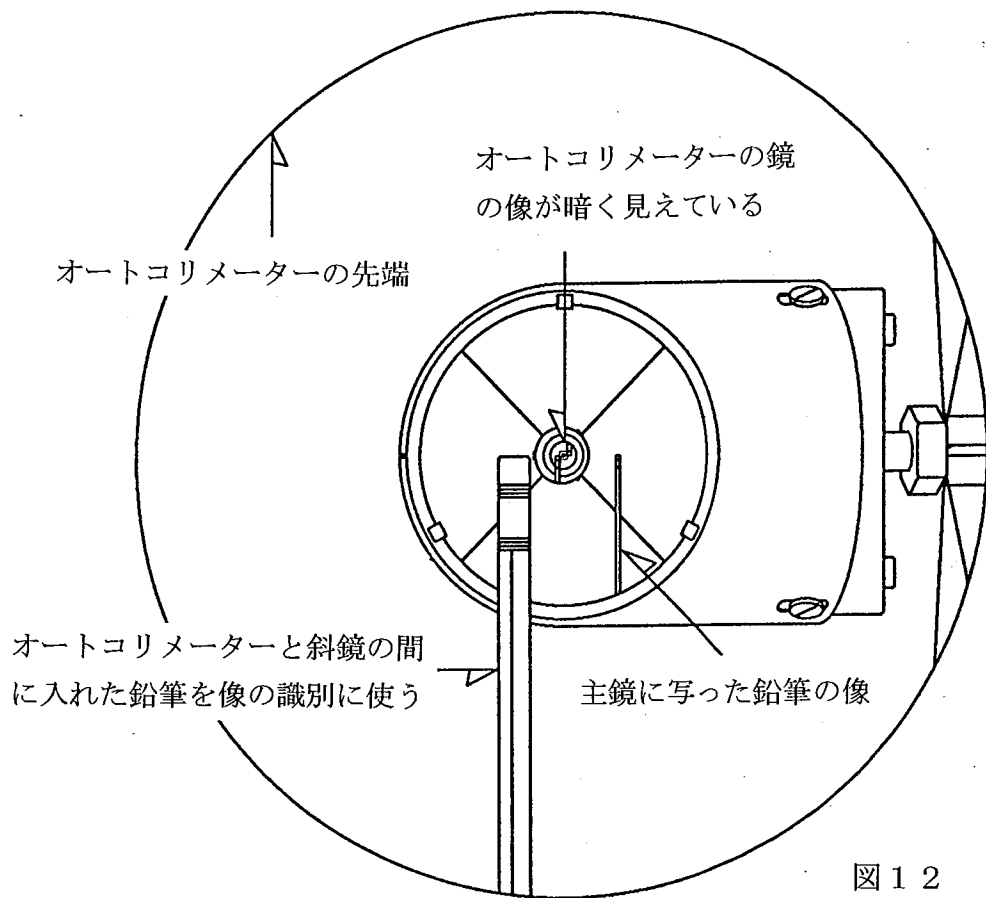


図 1 2

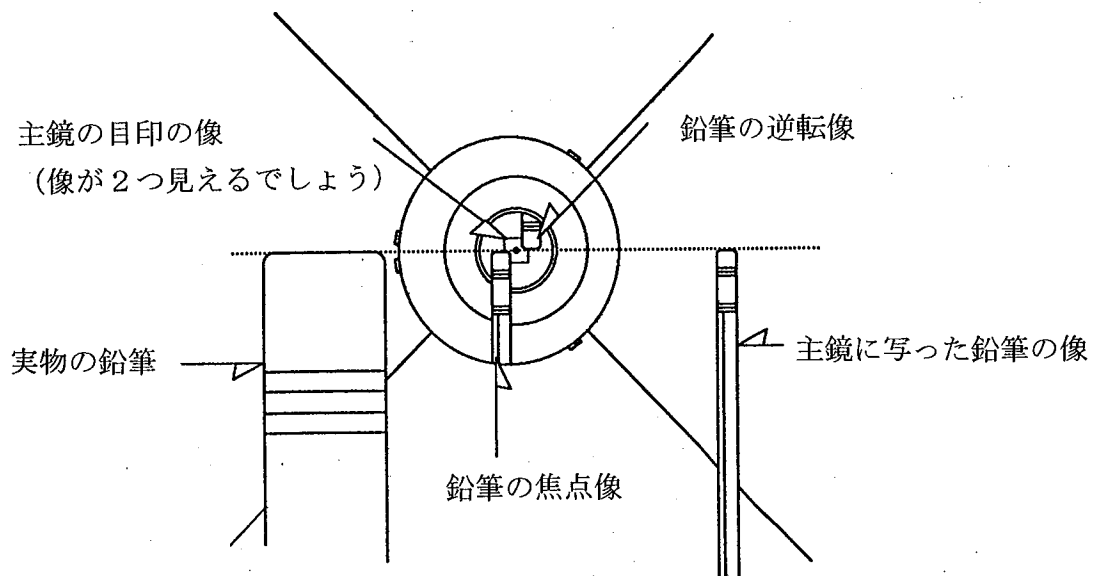


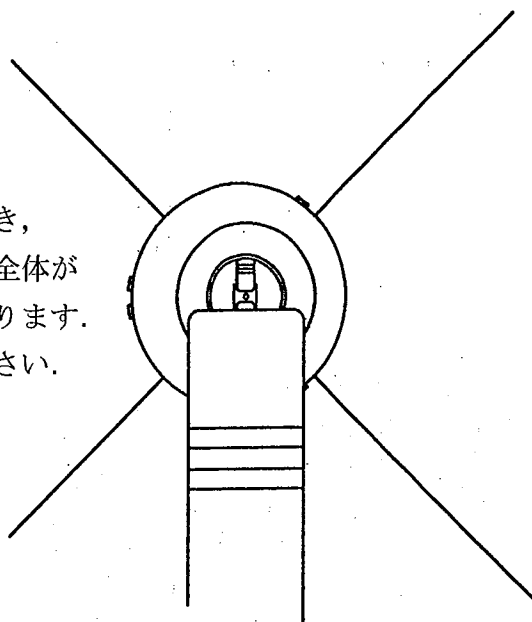
図 1 3

オートコリメーターから見える像の解釈

(オートコリメーターの鏡が暗くなったあとでの斜鏡に写った像の詳細)
 ー焦点像と逆転像とやっと見える主鏡の目印の像 (2つある) に注目

図 1 4

鉛筆が光軸をさえぎると、
逆転像と焦点像がくっつき、
オートコリメーターの鏡全体が
鉛筆の消しゴムの色になります。
—図 1 3 と比較してください。



1 1. ニュートン式反射望遠鏡の光軸あわせの手順のまとめ

注意：決して望遠鏡を太陽に向けてはいけません。

予備的な調整

1. 鏡筒と接眼筒に対して斜鏡金具が正しい位置にあることをチェックします。
2. 接眼筒が鏡筒に対して直角についていることをチェックします。
3. 主鏡の中心に目印をつけます。

サイトチューブ

1. サイトチューブを接眼筒に差し込み、のぞいたときにチューブの先端が作る円が斜鏡ホルダーの外形より少しだけ大きくなるようにします。
2. 斜鏡がサイトチューブの先端と同心円となるように、斜鏡の前後位置と回転位置を調整します。
3. 主鏡の中央の目印がサイトチューブの十字線の中心にくるように斜鏡の傾きを調整します。
4. 斜鏡に写った主鏡の外形を見て、斜鏡の傾きと斜鏡のカバーする範囲をチェックします。主鏡の像が実物の斜鏡の縁と同心円になっており、主鏡のクリップが見えなければなりません。
5. 主鏡の傾きを調整することにより、接眼筒の内側の像（影になった斜鏡の像の中に見えます）とサイトチューブの十字線の交点を合せます。

チェシャー・アイピース

1. チェシャー・アイピースを使って主鏡の傾きを微調整することにより、主鏡の目印の像をチェシャー・アイピースの像の中心に合せます。
(2. 観測中には、チェシャー・アイピースを赤いライトで照らして主鏡の微調整をします。上で述べた手順にしたがいます。)

オートコリメーター

1. サイトチューブを使ってできるだけ精密に光軸を合せます。チェシャー・アイピースがあるなら、これを使って主鏡の微調整をします。
2. 明るい室内か屋外で望遠鏡をセットします。望遠鏡を太陽に向けないでください。
3. 接眼筒にオートコリメーターを入れ、オートコリメーターの鏡の像が影になった斜鏡の像の中心に見えることを確かめます。
4. オートコリメーターの鏡が明るく見えるときは、それが暗くなるまで斜鏡金具の傾きを手の力で調整します。
5. 斜鏡を動かしたなら、主鏡もサイトチューブかチェシャー・アイピースで再調整しなければなりません。さらにオートコリメーターによる調整を繰り返す必要があります。
6. 接眼筒を繰り出したときと繰り入れたときの両方でオートコリメーターによるチェックをおこない、必要ならば接眼筒の取り付け部にシムを入れて調整します。
- 7 a. 鉛筆等を光路のなかに入れて、焦点面像、曲率中心像、逆転像の収束をチェックします。接眼筒の軸上で収束が起きるように斜鏡金具を調整します。

または、

- 7 b. 主鏡の目印の像（焦点像）を観察します。かすかな主鏡の目印の逆転像が見えるまで斜鏡を調整します。さらに斜鏡を調整するには、焦点像と逆転像が接眼筒の軸に一致するようにします。

1 2. 屈折望遠鏡の光軸あわせ

チェシャー・アイピースを利用すれば、屈折望遠鏡の光軸を簡単にあわせることができます。光軸をあわせるのに対物レンズの光学面からの反射を利用するので、とても精密に光軸あわせができます。屈折望遠鏡には、対物レンズのセルに光軸調整ねじがついているものもありますが、光軸修正ねじがなく、鏡筒にセルを固定した後には光軸の調整ができないものもあります。光軸修正ねじがない場合には、対物レンズのセルを取り付けるための鏡筒側の穴の径を大きくしてあるのがふつうです。このため、取り付けねじを締めつけるまえには、光軸の調整に必要なガタがあります。以下に示す説明は、このタイプのセルの望遠鏡を想定しています。

まず、鏡筒に対物レンズのセルを取り付け、取り付けねじを締めます。このとき、がたがある程度残っている状態にします。対物レンズから光が入らないようにします。必要ならばデューキャップをセルに付け、デューキャップにふたをかぶせます。しっかりしたテーブルかベンチの上に鏡筒を置き、鏡筒がころがらないように本などで支えます。チェシャー・アイピースを鏡筒につけます。チェシャー・アイピースの側面のあなが隠れてしまわないように、あまり深く差し込まないようにしましょう。側面のあなからが上に向くようにチェシャー・アイピースを回転し、取付ねじを締めます。光軸をあわせる間は天頂プリズムを付けないようにします。天頂プリズムは光軸に影響をおよぼすので、天頂プリズムを付けて光軸あわせをすると、光軸を正しく合わせるできません。チェシャー・アイピースをのぞくと、たぶん暗く見えるでしょう。明るい空の光か蛍光灯の光がチェシャー・アイピースの側面のあなから入るようにすると、視野の中心近くに2つか3つの環が写って見えます。接眼筒を半分くらい繰り入れたところで、対物レンズのセルを押したり引いたりして、写った環が同心円状となるようにします。わたしは、対物レンズのセルを前方に引き出しておいて、デューキャップの先端を軽くたたいてセルを動かすようにしています。環が同心円になったら、今度は接眼筒を最大限まで繰り入れた場合と繰り出した場合の両方で同心円になっているかどうかをチェックします。もしこのとき同心円状になっていないのであれば、接眼筒の取り付けの調整が必要です。接眼筒部の取り付け方法が対物レンズのセルと同じならば、調整手順は対物レンズのセルの場合とほとんど同じです。接眼筒を半分繰り出した位置、最大限まで繰り入れた位置および最大限まで繰り出した位置で光軸をチェックします。この調整が終われば光軸はよく合ったことになります。両極端の繰り出し位置で環が同心円にならないのは、対物セルまたは接眼筒の調整をしたときに誤差があったからです。どちらの場合でも、調整を繰り返す必要があります。一度

光軸あわせの手順を覚えれば、野外でもうまくできるようになります。屈折望遠鏡をいつも持ち運んで使う人は、性能を最大限に発揮できるように、光軸をチェックすることを習慣づけましょう。

あなたの屈折望遠鏡の対物セルに光軸修正ねじがついている場合には、光軸あわせはともやりやすくなります。手順は上で述べたのと同じです。セルには押しねじと引きねじがあるのがふつうです。両方のねじを締めたり、ゆるめたりして調整できます。天頂プリズムを使わないで調整することをわすれないでください。

屈折望遠鏡は光軸が狂いにくいので、メーカーで調整済みで、対物セルと接眼筒の調整ができないものも多くあります。対物セルと接眼筒が鏡筒にねじ込みされている場合は、光軸は固定されていることになります。このような望遠鏡で光軸あわせが必要になったときには、メーカーに望遠鏡を送り返さなければならないでしょう。

1 3. シュミット・カセグレンの光軸あわせ

光軸あわせの道具もこの本も必要ありません。メーカーのいうとおりにすれば問題ありません。屈折望遠鏡に光軸調整用のねじがないのも困りますが、シュミット・カセグレンの副鏡についている3本の調整ねじはやっかいものです。メーカーは、 $f/10$ とか $f/11$ という大きな口径比のおかげで、主鏡のずれと機械加工部品の公差の集積による誤差が許容されるとみなしています。わたしたちは、星像テストで光軸をあわせた口径8インチのシュミット・カセグレンを、オートコリメーター・アイピースでチェックしました。写った像は同心円状ではなかったのですが、それでも望遠鏡はじゅうぶんな性能を発揮しました。メーカーが推奨する星像テストによる光軸あわせをおこなえば、接眼筒を光軸に一致させることはできなくても、平行にすることはできます。この状態にしたときに、オートコリメーターの像で副鏡を調整すると、コマを生じさせてしまうことになります。

主鏡を調整することができないので、副鏡を接眼筒にあわせると軸がはずれた状態になってしまいます。わたしたちの経験では、量産されたシュミット・カセグレンのほとんどがこの問題をかかえていました。したがって、シュミット・カセグレンの光軸あわせに使える方法は星像テストだけだと言えます。口径比が大きいおかげで有効な視野が広いので、この問題はある程度軽減されます。しかし、性能は光軸上で最良であることを考えると、この言葉を正当化するのはむずかしいでしょう。この問題がないシュミット・カセグレンを所有している人は幸運です。この場合には、チェシャー・アイピース（屈折望遠鏡と同じ方法）かオートコリメータ・アイピースを使って光軸を合わせることができます。前に述べたように、やっかいではありますが・・・

2つの鏡を持つ普通のカセグレン（カセグレン方式の望遠鏡には多くの種類があります）ではもっと単純です。主鏡と副鏡の軸が接眼筒の軸と一致しているので、写った像を同心円状にすればよいのです。明るい部屋で鏡筒にサイト・チューブをつけます。決して鏡筒を太陽に向けてはいけません。さもないと目を傷めます。最終的にはオートコリメーターで調整します。手順はニュートン式反射と同じですが、オフセットがないだけ、もっと簡単です。バッフル・チューブをとりはずすと副鏡支持金具全体が見えるので、調整がやりやすくなります。まず、副鏡を調整します。光軸があっている場合には、副鏡の端は主鏡の像を囲む暗くてせまい環として見わけられます。

次に、主鏡の穴の像を、副鏡の暗い像——これも容易に見分けられる環です——の中心に持ってくるようにして主鏡を調整します。オートコリメーター・アイピースで、像が同心

円状になっていることを確認します。接眼筒の調整が必要な場合は、バッフル・チューブを取り付けるとどのような調整が必要かすぐにわかります。星像テストをおこなうときには、主鏡の傾きだけで調整します。（量産されているシュミット・カセグレンのメーカーが推奨している手順と比較してください。）

1 4. スター・ダイアゴナルの光軸あわせ

2インチ径のアイピースがアマチュアの標準的なアクセサリーになってきました。2インチ・アイピースを屈折やカセグレン望遠鏡で使うときには、2インチ反射鏡型のダイアゴナルが必要です。スター・ダイアゴナルの機能はニュートン式反射の斜鏡と同じです。したがって、光軸の狂いが性能に影響を与えます。2インチ反射鏡型スター・ダイアゴナルのほとんどは光軸が固定されています。調整ねじがついているものはほとんどありません。光軸が合っているかどうかは以下に示すように簡単にチェックできます。

屈折望遠鏡またはカセグレン望遠鏡の光軸を合せたあとで、スター・ダイアゴナルを接眼部に取り付け、チェシャー・アイピースで簡単に光軸をチェックできます。光軸あわせが必要で、スター・ダイアゴナルに調整ねじがある場合には、調整手順は簡単です。カセグレン系では、反射像が同心円状になるように調整します。スター・ダイアゴナルの裏面にある3つのねじの微調整で像が同心円状になるようにできます。屈折望遠鏡の場合は、対物レンズまたはデューキャップにカバーをつけて鏡筒の内部を暗くします。スター・ダイアゴナルを取り付けてのぞいたときに2つか3つの環が見えるならば鏡の傾きの修正が必要です。像が同心円状になっていれば光軸があっています。ただし、望遠鏡本体の光軸が正確にあっていなければ、上に示したスター・ダイアゴナルの調整手順は無意味であることを忘れないでください。

反射型スター・ダイアゴナルに調整ねじがついていないときには、メーカーで調整済みで、それ以上調整することは考慮されていません。

15. 参考書と記事

HOW TO MAKE A TELESCOPE

Jean Texereau 著

鏡と架台の調整, 斜鏡の大きさとオフセット (Dakin の式), 大気の乱れ, Rayleigh の条件

AMATEUR TELESCOPE MAKING - BOOK ONE

Albert Ingalls 編集

ロンキー・テスト, 干渉リング・テスト, 光軸あわせ

AMATEUR ASTRONOMERS HANDBOOK

J. B. Sidgwick 著

収差, 露, 筒内気流, ニュートン式反射とカセグレン式反射の調整, 望遠鏡の選び方, 視力, 個人差, 大気とシーイング

TELESCOPES

Page and Page 著

光軸あわせ, 斜鏡

NEWTONIAN NOTES

Peter Francis 著

性能, 斜鏡の大きさとオフセット

SKY AND TELESCOPE MAGAZINE

December, 1962 - Placing and Aligning the Newtonian Diagonal by Ralph K. Dakin, ニュートン式反射の斜鏡の大きさとオフセット量を決める式を含む.

May, 1968 - Notes on Telescope Making from Here and There, conducted by Robert E. Cox, 光軸あわせの方法.

March, 1977 - The Size of the Newtonian Diagonal, by William T. Peters and Robert Pike, 斜鏡の大きさを最適にする式を含む.

February, 1978 - Further Notes on Adjusting a Telescope, by B. L. Souther

April, 1978 - Star Images in the Presence of Aberrations, by Roger W. Sinnott

July, 1986 - A Daytime Test of Resolving Power, by Roger W. Sinnott, Mees の扇形

March and April, 1988 - Collimating Your Telescope, by Paul Vallesi, 光軸あわせの方法の概観とこの本の要約

May, 1991 - Focus and Collimation: How Critical?, by Roger W. Sinnott

TELESCOPE MAKING MAGAZINE

- TM 9 - Newtonian Telescope, ニュートン式反射に関係する式を含む.
- TM 13 - The Optical Performance of Eight Inch Schmidt Cassegrain Telescopes, by H. G. J. Rutten and M. A. M. van Venrooij
- TM 16 - Collimating the Kutter Tri Sciefspiegler, by A. L. Woods
- TM 18 - A Modified Cheshire Eyepiece fo Collimation, by Stephen Lindberg
- TM 18 - Vignetting - How to Determine the Size of : Diagonals, Draw Tubes abd Dew Caps, by Steve Edberg, 光学部品の寸法で決まるケラレ量を算出する式を含む.
- TM 22 - Updating Newtonian Collimation, by D. Eric Allen
- TM 23 - The Ultimate Newtonian, by Gregory Reeve
- TM 28 - Design and Construction of a Super Planetary Telescope, by Roland Christen
- TM 39 - Supertune Your Telescope for Very Best Performance, by Tom Clark

16. 付録

便利な式

斜鏡の大きさとオフセット量

Dakin の式

(Ralph K. Dakin 自身が発表した式)

$$1. \quad A = \frac{V(F-S) + C(D-V)}{2(F-S) - (D-V)} + \frac{V(F-S) + C(D-V)}{2(F-S) + (D-V)}$$

$$2. \quad d = \frac{1}{2} \left[\frac{V(F-S) + C(D-V)}{2(F-S) - (D-V)} - \frac{V(F-S) + C(D-V)}{2(F-S) + (D-V)} \right]$$

ここで、

A は、斜鏡の短径

d は、主鏡の軸上で主鏡方向へ、接眼筒の軸上で接眼部から離れる方向への斜鏡の中心のオフセット量

V は、ケラレのない視野の直径

F は、主鏡の焦点距離

D は、主鏡の直径

S は、主鏡のくぼみの量 ($D^2/16F$)

C は、斜鏡から焦点までの距離——焦点を鏡筒の外へ引き出すために必要な光軸の長さ

d' = (1.414 x d) は、斜鏡の表面ではかったオフセット量

William T. Peters と Robert Pike の斜鏡の大きさの式

(記号は Dakin の式と同じ)

$$3. \quad A = (C(D-V)/F) + V$$

または、斜鏡の最小寸法は、

$$4. A=DC/F$$

変光星の観測や測光写真のためには、視野の中のすべての星の明るさが正しくなければならぬので、式1か3を使ってください。そのほかの場合には、式4を使うとよいでしょう。式4の場合でも、低い（繰り出し量の小さい）接眼筒を使えば、視野の端での光度のロスが0.5等以下です。

分解能

ドーズ（Dawes）の限界 = 4.56 秒／口径（インチ）

レーリー（Rayleigh）の限界 = 5.5 秒／口径（インチ）

反射望遠鏡で理論分解能（Rayleigh criterion）が得られる視野の広さ

$$w = 0.0007 F^3$$

ここで、

F は、口径比

w は、視野の直径（インチ）

この式は口径の大きさにかかわらず、 $f/2$ から $f/10$ までの口径比に有効です。

（ R. Sinnott et al, *Sky & Telescope*, May, 1991 ）

オートコリメーター・テストにおける誤差の集積を軽減する方法

"REDUCING THE ACCUMULATED ERROR IN THE AUTOCOLLIMATOR TEST"

（ Robert C. Follett の技術論文からの抜粋 ）

専門的なので省略します。

増補

スカイ・アンド・テレスコープ誌の1962年12月号に掲載された斜鏡のオフセット量の計算式はまちがって印刷されていました。そして、長い間まちがったままではほかの本や記事に引用されてきました。（スカイ・アンド・テレスコープ誌は、次の号でそっとまちがいを訂正しました。）正しい式は、この本の44ページをごらんください。

Stephen Lindberg の TM 18 の記事, "A Modified Cheshire Eyepiece for Collimation" の光軸あわせの手順は不正確です。この本の第8, 9, 10章と比べてください。

最後に、著者から読者のみなさんへのお願いです。光軸あわせに関してもっとよいアイデアがあればぜひ知らせてください。わたしたちの目標は、望遠鏡の性能を最大限に発揮するための考え方と道具と方法をアマチュアに提供することです。コリメーション・ツールのもっとよい使い方や新しい光軸あわせの手順を見つけ、それをほかの読者とわかち合いたいと考えておられるなら、わたしたちに見せてください。できることならその方法やアイデアをつぎの版にあなたの名前とともに載せたいと思います。連絡は下記に直接お寄せください。

Vic Menard
2311-23rd Avenue, West
Bradenton, FL 34205

または,

Tippy D'Auria
1051 N.W. 145th Street
Miami, FL 33168

この本に関する読者の言葉

オートコリメーターの使用について

光軸あわせの方法に関して言えば、もっとも感度の高い方法をみなさんはご存じでしょうか。それは、精密な調整のときに、ニュートン式反射望遠鏡のピントあわせと光軸あわせの特徴を利用する方法です。

望遠鏡の焦点に対象物を置いたとき、その像が斜鏡で反射され、主鏡にあたり、平行光線となります。軸が一致しているときにだけ、その光は斜鏡にあたり、反射されてもとの対象物のところへかえっていきます。平行光線であるので像はできません。しかし、対象物の表面がビーム・スプリッターになっていて、光の一部を通過させるとともに、その他の光を反射させ斜鏡を経て鏡筒にかえっていくようになっているとしましょう。このかえっていく光は今度は平行光線になっており、主鏡で反射されて元の位置に像を結びます。もし、簡単な虫めがねをビーム・スプリッターと対象物のうしろに置いてピントを合わせると（もし望遠鏡の焦点の位置に対象物があれば）、かえってきた像が見えるでしょう。これはひじょうに感度の高い方法です。かえってきた像がずれている場合には光軸があっていないのです。対象物と像が一致するように調整する必要があります。

（光が再度収束するのです！ — ビク・メナード）

ロバート・E・コックス，テネシー州

テレスコープ・メーカー誌 編集部

ジョギング愛好家がシューズのうしろに貼る反射テープの小片を主鏡の中心の目印にすると、暗闇でも容易に目印が見えます。懐中電灯を鏡筒の前に固定して目印を照らすと、オートコリメーションを暗闇でおこなうことができます。（中心の目印で光軸の収束をチェックします。）上下さかさまになった反射像が「ダビデの星」を作るので、四角形の目印よりも、正三角形の目印のほうが便利です。しかし、この反射テープにより、光が散乱しないか少し心配していますが……

’93年のウインター・スター・パーティにおけるジャック・ロー
エンスタインとの会話より

光軸あわせの手順について

ふつうは最初にサイト・チューブを使って調整します。これでかなりの程度まで光軸をあわせることができます。この予備的な調整をおこなうときには、接眼筒の軸を基準にします。斜鏡をこの軸にあわせ、さらに主鏡をこの軸にあわせます。このとき、次のような

ジレンマに陥ります。斜鏡を接眼筒の中心にあわせたら、その像を主鏡の中心に一致させることができない。斜鏡の像を主鏡の中心にあわせると、斜鏡支持金具を変に曲げなければ斜鏡を接眼筒の中心に持ってくることができない・・・。

ロバート・C・フォレット
モンタナ州, インディペンデンス

クラシカル・カセグレインの光軸あわせについて

アラン・マッキントッシュの *Advanced Telescope Making Technics Volume I - Optics* のなかに A. S. レオナードの光軸あわせの許容誤差に関する記事 (107 ページに載っている表を含む) があります。この本は望遠鏡の所有者の必需品です。109 ページの最後の段落に書いてあることは正しいと思います。テクスローの本とあなたの本ではクラシカル・カセグレインの光軸あわせの問題をあまりに単純化していると思います。ひじょうに多くの要因を無視しており、チェック・ポイントについてもふれていません。わたしの望遠鏡では、主鏡の穴が 1/10 インチずれているので光学的な軸を決めるのがひじょうに困難です。光軸あわせがすむまでバッフル・チューブをつけたことがありませんし、バッフル・チューブの光軸は一致しません。さらに、良像を得ようとするなら、2つの鏡の間隔を 1/128 インチの精度まで合せる必要があることにふれておかなければなりません。両方の鏡の直径方向の位置を 1/5000 インチの精度で合わせなければなりません。片方または両方の鏡が傾くだけでこの条件を満たさなくなってしまう。光軸あわせの難しさを理解して、これを受け入れていくしかありません。

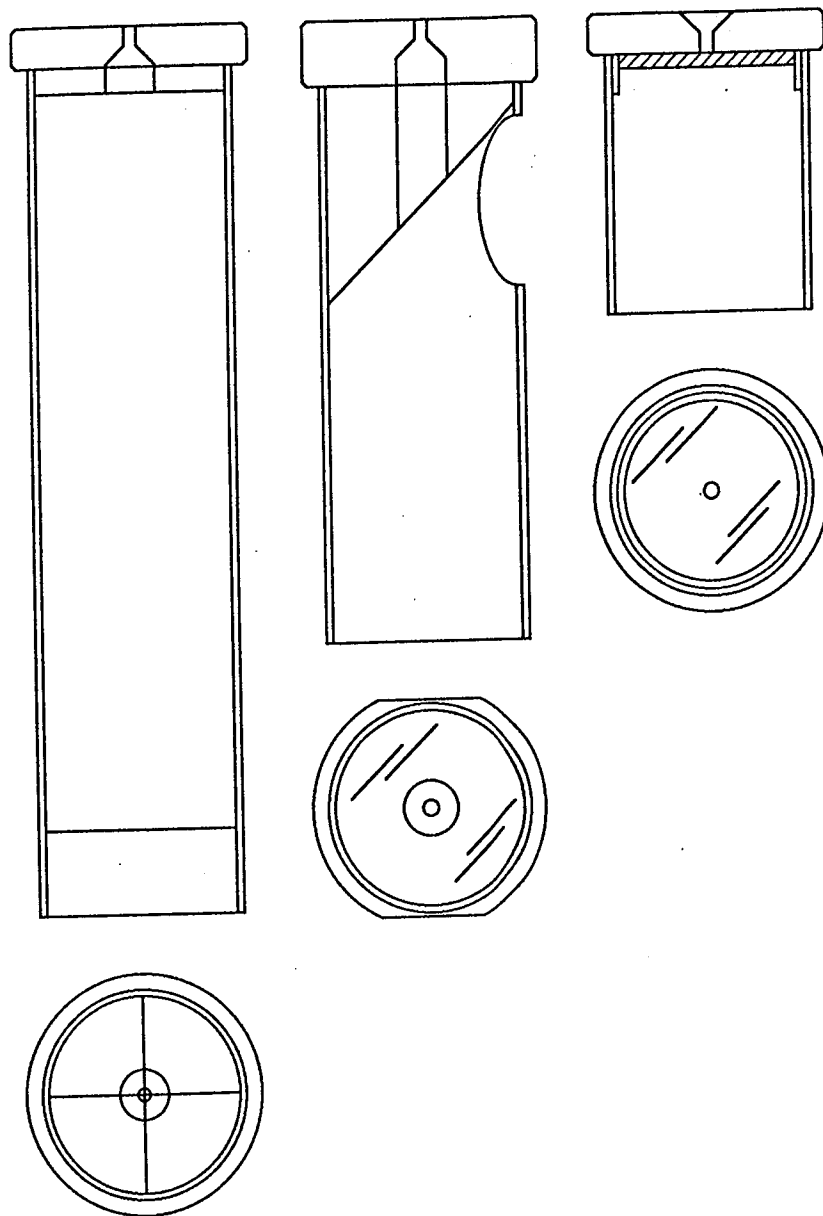
わたしは、30年以上前から、短焦点ニュートン式反射の主鏡の中央に目印をつけていました。自分でオートコリメーターを作り、使用してきました。アマチュアに販売されている道具のうちでも、オートコリメーターはもっとも利用価値の高いものです。・・・アマチュアの望遠鏡の90%が光軸が合っていません。アマチュアの多くは光学的光軸あわせと幾何学的光軸あわせの違いがわかっていません。以前、ヤーキス天文台に友人がいましたが、オプティカル・ショップの人たちが精密な光軸あわせをするのに困っていたなんて信じてもらえるでしょうか。

ヒュー・スウォボダ
アケネートン・ソーラー・オブザーバーズ
グリーン・ベイ, ワイオミング州

光軸あわせの道具類

先端から見たところと断面を示します。

左から右へ、サイトチューブ、チェシャー・アイピース、
オートコリメーター・アイピース



これらの道具は、テクトロン・テレスコープ社で販売しています。

TECTRON TELESCOPES
2111 Whitfield Park Avenue
Sarasota, Florida 34243

Pupil and image – diagonal dark

