

天体望遠鏡の歴史

～古代ギリシャの「視覚論」からヨーロッパ南天文台の「VLT」まで～



株式会社 五藤光学研究所
社長 五藤信隆

物はなぜ見えるのか



- 私たちは、昼間の明るいときは、まわりの景色が良く見えますが、夜になって暗くなると、あまり良く見えなくなります。
- しかし、暗いところでも電灯をつけると、物が良く見えるようになります。逆に、明るいところでもまわりを囲って暗室にすると、物は良く見えなくなります。
- このことから、私たちの周囲には「光」というものがある、それが物体に反射して、ものが良く見えるのだということを知っています。
- それでは、そういうことを知らない古代の人々はどう考えていたのでしょうか。



- 私たちは、昼間の明るいときは、まわりの景色が良く見えますが、夜になって暗くなると、あまり良く見えなくなります。
- しかし、暗いところでも電灯をつけると、物が良く見えるようになります。逆に、明るいところでもまわりを囲って暗室にすると、物は良く見えなくなります。
- このことから、私たちの周囲には「光」というものがあって、それが物体に反射して、ものが良く見えるのだということを知っています。
- それでは、そういうことを知らない古代の人々はどう考えていたのでしょうか。



- 光は、私たちにとって最も身近な現象ですから、古くから研究の対象とされてきました。そして、視覚や光の性質に関する研究は、最も古くから行われていることです。
- 光学に関する言葉、例えばオプティクス (Optics) の語源は、ギリシャ語のオプティカ (Optica) で、もともと「視覚論」という意味です。
- どうして物が見えるのか？ ということに関して、古代ギリシャには、大きく分けて2つの説がありました。

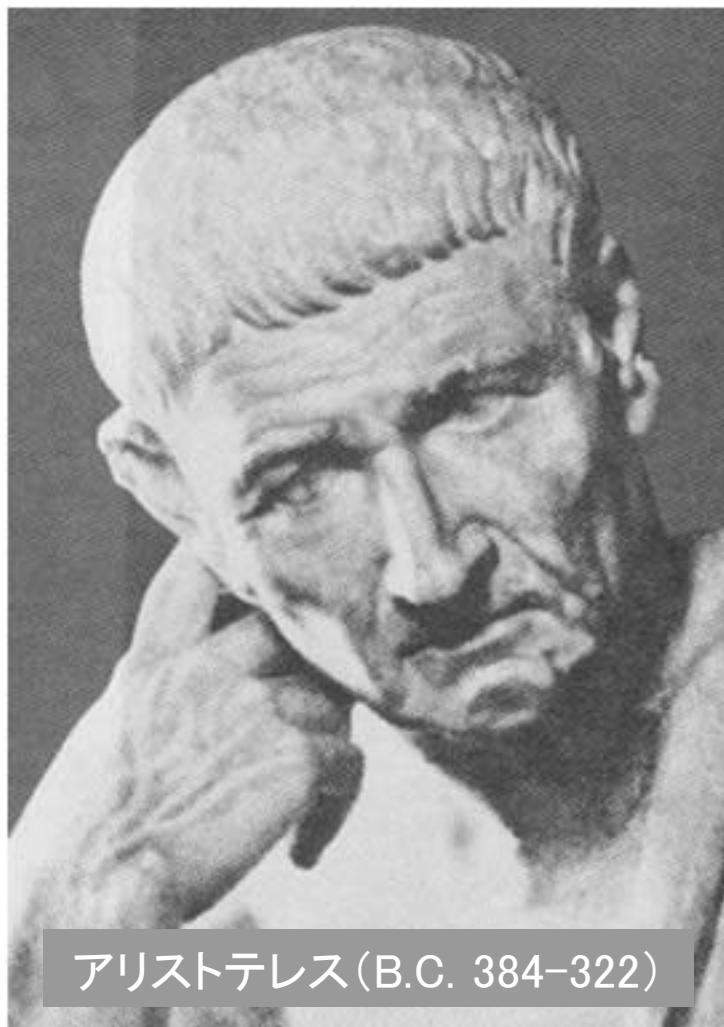


ピタゴラス(B.C. 582-493)

- ・まず一つ目は、眼から何かが出て、それが物に当たるためという説です。
- ・例えば、古代インドの医者スシュルタは、我々が物を見ている時は、我々の眼から火を出していると考えました。
- ・古代ギリシャのピタゴラス学派の人たちも、見えるというのは、眼から物体の方へ流れ出る熱気が、物体に接触して起こる現象であると考えました。
- ・このことは、現在の我々にはとても奇妙に思われますが、手を伸ばして物に触ることを考えれば、割合自然なことなのかも知れません。



- 二つ目の説は、物体から何かが出ていて、それが眼に入るために見えるのだ、という説です。
- 例えば、原子論者のデモクリトスは、物体が見えるのは、その物体から原子が流れ出ている、それによって物体の像が大気に判でも押したように出来、それが伝わって眼に入って視覚が生じるのであると説明しています。
- 更に、両者の中間的なもの、つまり、物体から来るものと、眼から出るものとが途中で、あるいは眼の近くで出会って、そのために物が見えると唱える人もいました。



アリストテレス(B.C. 384-322)

- ・また、プラトンは、視覚について3つの条件が必要として、
 - ①太陽または他の発行体からの発散、
 - ②見ている物体からの放射、
 - ③眼から射出される「神火の流れ」、を上げています。そして、「神火の流れ」が太陽の放射線と結びつき、これら2つが更に物体からの放射されるものと出会って、初めて見るという作用が生ずるのだといっています。
- ・また、アリストテレスはこれには反対で、音が空気の振動によって伝わるように、光もそれを伝える媒質があって、その媒質を通して物体から眼に伝わるものと考えました。



- ・ユークリッドは、幾何学者として有名ですが、光学についても『オプティカ』と『カトプトウリカ』という2冊の本を書いています。
 - ・①光は眼から出て一直線に物体に進むものである。
 - ②光線によって囲まれる形を頂点にして、物体の境面を底面とする錐形である。
 - ③光線の当たる物体は見え、当たらない物体は見えない。
 - ④大きい角度で見られる物体は、小さい角度で見られる物体よりも大きく映る。
- と述べています。



アルハーゼン(970頃-1038)

- ・光学において、特に優れた学者は、11世紀のスペインにおけるアラビア人のアルハーゼンです。
- ・彼は、いろいろな光学上の研究をして、『視覚論(Optics)』を著しました。
- ・彼は、この書の中で眼の構造を述べ、人間の眼を詳細に記述し、その図を描いたのは彼が最初です。
- ・アルハーゼンは、光は眼から出るものではなく、物体から出るものであることを明確に述べ、物体の1点を頂点とし、瞳孔を底面とする錐形で、光が伝達するには時間を要するものと考えました。

ガラスの発見とレンズの製作

ガラスは初め装飾品だった

GOTO



古代の難破船

- それでは、古代の人々が光学のことを考える基になった、ガラスの話を始めることになります。
- 紀元前、フェニキアの商船がシリアの浜辺に難破漂着し、積荷の硝石で竈を作り、炊事をした熱でアルカリと砂が溶け合ってガラスができたと、ローマの博物学者のプリニウスが、その著『博物誌』に書いています。
- しかし、これはあくまでも伝説で、実は B. C. 2500頃、既に古代エジプト人が、砂と曹達、貝殻を用いてガラス玉を作り、装飾品として大量に輸出していたことが分かっています。



- ・1849年、イギリス人のヘンリー・レイヤードが、旧約聖書にニムロデとして出てくる、メソポタミアのニムルードの遺丘を発掘します。
- ・そして、彼が探し当てたのはアッシリア帝国全盛期の時の王、アッシュルナシルバルや、サルゴン2世や、シャルマネセルなどの宮殿でした。
- ・そして、その遺跡から42mm×34mmの楕円形の凸レンズを発見したのです。厚さは中央で6.2mm、周縁で4.1mmで、その後の調査で、紀元前7世紀以前のものと確認されました。現在、大英博物館が所有しています。

レンズは火を造る道具

GOTO



- また、これらと同じようなレンズは、エフェソス、カイロ、カルタゴ、トロイ、ミケーネ、ローマの植民地といった、多くの古代遺跡からも発掘されています。
- また、11世紀頃、ヴァイキングが大事に秘蔵していた水晶レンズの宝庫が、バルト海のゴトランド島で発見されました。
- それらは、インドの古書『ニルクタ』に、「乾燥した糞は石あるいはガラス、あるいは金属容器を用いて、その上に太陽光線を集めると発火する」と述べており、それらのレンズは、火を造る道具として使われことが分かります。

レンズを拡大鏡として用いる

GOTO



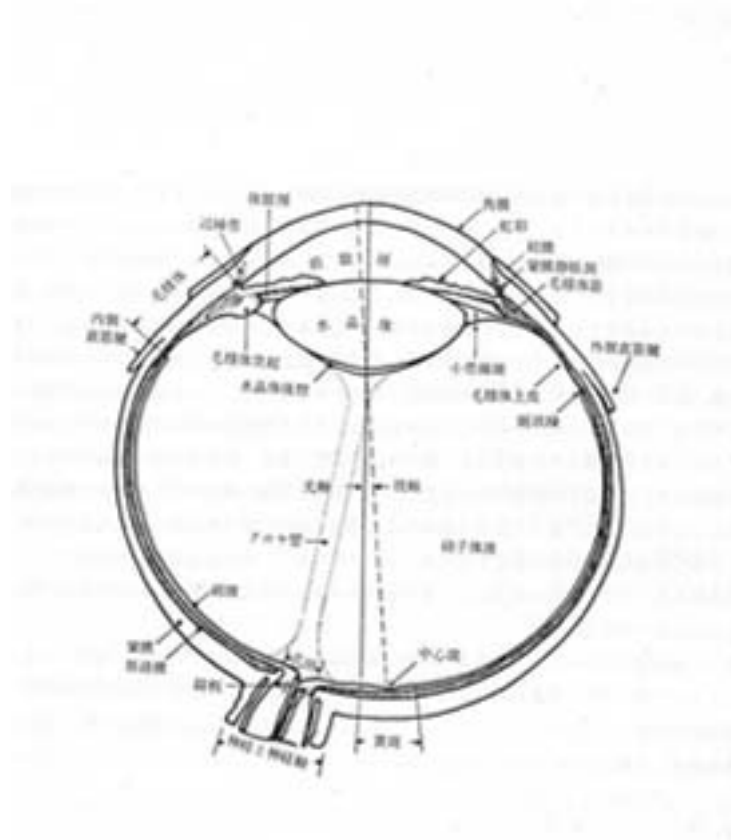
古代エジプト

- ・この透明な球体、即ちレンズが、物を拡大して見せる力を持っていることを述べたのは、ローマのセネカ(B.C. 3-A.D. 65)です。
- ・セネカは、その著『自然の探究』の中に、「どんなに小さく、不分明な文字でも、水を入れた球形のガラス容器を通して見ると、大きく且つ明瞭に見える」と述べています。
- ・なお、ガラスはエジプトの最古の時代に既に作られており、その製品(例えばガラス玉)を大量に輸出していました。エジプト人は、ガラスの材料として砂と曹達、貝殻を用いていました。

※こうして、レンズは初めて物を拡大して見せることを知ったのです。

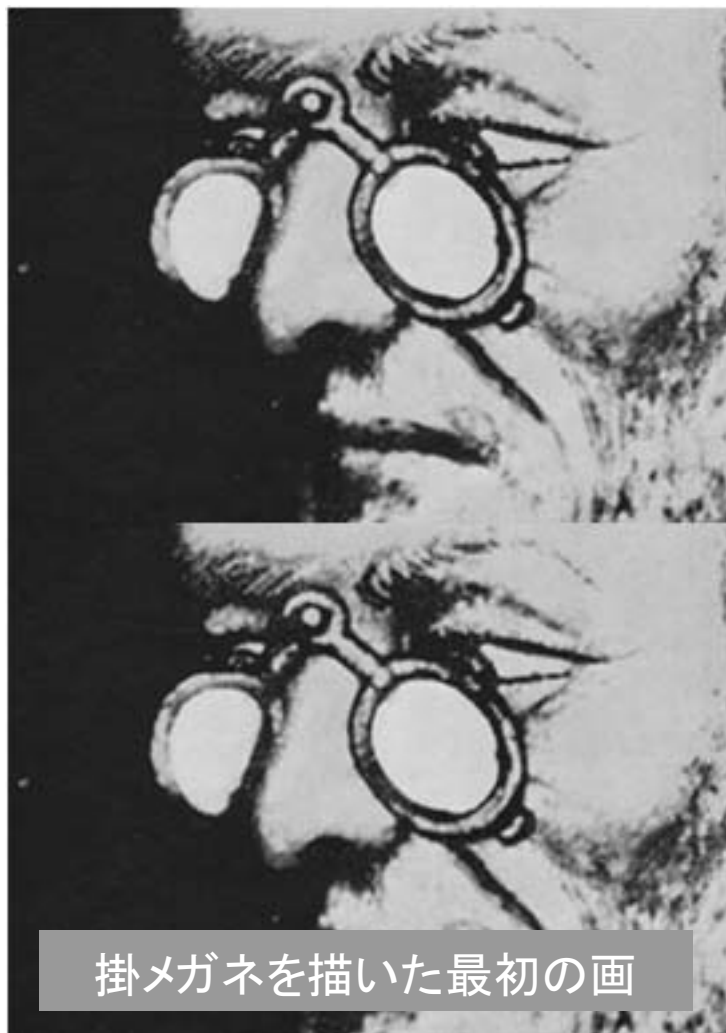


- ・光学の研究は、遠く紀元前から天文学に深い関心を持っていたバビロニア人により始まります。
- ・そして、ギリシャのアリストテレス、プラトン等の著書に現われ、クレオメタスに至って、初めて、空中の屈折率が計算されました。
- ・その具体的な研究は、プトレマイオスの5冊の著書になる、硝子、空気の屈折率から臨界角にまで及んでいます。
- ・これらの研究がギリシャからアラビアに移り、11世紀になってアルハーゼンによって『視覚論』にまとめられました。



眼の各部の名称(WALLS)

- ・つぎに、レンズについて最も良く研究したのは、英国の驚異博士と呼ばれ、宗教、哲学、物理に精通した、オックスフォード、フランチェスカ派の僧正、ロジャー・ベーコンです。
- ・ロジャー・ベーコンは、その著『大著作』に、「ガラスまたは結晶で作ったレンズは、老人および視力の弱い眼の持ち主にとって、甚だ適当な機械である。彼らはこれを用いて、小さい文字を適当な大きさにして見ることができる。」と書いています。
- ・しかし、ロジャー・ベーコンが実際にメガネを作ったわけではありません。



掛メガネを描いた最初の画

- それでは、掛メガネを最初に作ったのは、一体誰だったのでしょうか。
- 1人目は、イタリアのフィレンツェの貴族、サルヴィノ・デグリ・アルマチーという説です。
- ベネチアと海上交通のあったフランドーにメガネ製造工場があったことからの推測で、彼の墓に、「ここにフィレンツェのアルマチー家のサルヴィノ眠る。メガネの発明者、神よ彼の罪を許し給え」(1317年没)と刻まれているといえます。



バイケルシャイムの城の公園
にあるメガネをつけた石像

- ・2人目は、イタリアのピサの人で、アレキサンドロ・デ・スピーナという人です。
- ・彼がメガネの発明者であるということを証明する古文書が、彼が住んでいたピサの修道院に残されていると伝えられているからだということです。
- ・しかし、どちらも信憑性に乏しく、確かなことは分かりません。
- ・結論は、大体ベネチアでメガネの製作が始まり、それが優秀なガラス工業と結びついて、14世紀の初め頃、ベネチアの行商人によって欧州全土に広がって行ったと考えられます。



- ・メガネが広く一般に用いられるようになったのは、15世紀に入ってからです。
- ・ちょうどその頃、ドイツのゲーテンベルクによって印刷術が発明され、大量に書物が作られるようになりました。そのことがメガネの普及に拍車をかけたと思われます。
- ・メガネが普及すると、メガネ業者が増え、レンズ研磨を職業とする者も増えました。
- ・特に盛んだったのはオランダで、顕微鏡、望遠鏡は、実にオランダのメガネ業者によって発明されたんです。

望遠鏡以前の観測機器



コロンブス(1446頃-1506)

- ・ルネサンス時代の大航海による地理上の発見は、近代世界に与えた影響から見て、歴史上1、2を争う非常に重要なできごとです。
- ・1420年～1620年に至る200年の間に、人々はヨーロッパの彼方に新しい土地を発見しようとする衝動に駆りたてられ、その結果、この地球についての知識はかつてないほど増大しました。
- ・発見に続いて植民や定住が、またヨーロッパ諸国の興亡にも影響する諸活動が、海外で展開されました。発見は、新しい富、新しい物産、新しい機械、新しいものの考え方をもたらしました。

観測機械はアストロラーベと六分儀

GOTO



アストロラーベ

- 従って、当時の天文学者に課せられた役割は、航海暦を作るための天体観測でした。
- 観測には、まだ天体望遠鏡はありませんでしたから、アラビアから伝わったアストロラーベや、六分儀などが使われました。
- その過程で、コペルニクスは地動説を考え、ティコ・ブラーヘは1,000個以上の星のカタログを作り、ケプラーはティコ・ブラーヘの残した観測記録から、惑星の3法則を導き出したのです。



コペルニクス(1473-1543)

- ・コペルニクスは、当時ドイツ領だったトルンに生まれました。10歳の時父が亡くなり、母方の叔父に育てられました。
- ・クラスコ大学、イタリアのボローニャ大学、パドヴァ大学で学び、フェラーラで教会法の博士号を取りました。叔父は彼が司祭になることを望んでいましたが、著名な天文学者のノヴァーラに出会い、その弟子となりました。
- ・その後、ピタゴラスやアリストタルコス、アポロニウス、プトレマイオスなどの著書を読みあさり、フラウエンブルク修道院に観測所を設け、手稿「コメンタリオス」を書いて地動説をまとめました。



- ・また、アルマゲストに対応する物理学的考察や詳細な計算を行って、弟子のレチクスの書いた「ナラティオ・プリマ」に自説を公表しました。
- ・また、コペルニクスの著書『天体の回転について』は、彼の死と同じ年1543年に出版され、彼はそれを臨終の床で目にしたとされています。
- ・この書は、ローマ教皇庁から閲覧一時停止の措置がとられました。しかし、これは単なる「天体位置の簡易計算法」として発表したため、禁書にはならず、数年後に再び閲覧が許可されました。

ティコ・ブラーへの観測

GOTO



ティコ・ブラーへ(1546-1601)

- ・デンマークの貴族の家に生まれたティコ・ブラーへは、コペンハーゲンのルター大学に学び、在学中から天体観測に興味をもちました。
- ・1562～65年まで、ライプツィヒ大学で法律を学びますが、そのころ起こった土星と木星の会合の観測を機に、天文学への関心を深め、本格的に観測を行います。
- ・喧嘩で傷つき、無残に変形した鼻をもつことで知られるブラーへは、1576年、国王からフヴェーン島と費用を与えられ、そこにウニボルグとステルンボルグの2つの天文台作りました。

ウラニボルグ天文台

GOTO



ティコ・ブラーへの壁面四分儀

GOTO



ティコ・ブラーへの壁面四分儀

- ・彼は、そこで天体観測を行い、1,000星以上の恒星のカタログを作りましたが、その精確さは特筆すべきものでした。
- ・観測の方法と精確さは、彼によって格段に進歩しました。その精確な観測から、彗星が大気中の物体ではないこと、月の軌道が不規則なことを実証しました。
- ・1572年には超新星の観測もしています。その結果は『新星について』に述べられています。彼の壁面四分儀をはじめとする装置や器具は広く使われ、観測技術の向上に大きく寄与しました。

ティコ・ブラーへの『新天文学』

GOTO



- ・彼は、そこで天体観測を行い、1,000個の恒星の位置を示したカタログを作りましたが、その精確さは特筆すべきものでした。彼の観測の中で衝撃的だったのは彗星です。彼その説明を『エーテル世界について』で述べています。
- ・また、水星は観測から月より地球に近いということはないことを示しました。これは、アリストテレスの宇宙モデルに反します。そこから彼は彗星が水星よりはるかに遠いことを示すことができました。『新天文学』は彼の主要著作で、太陽、月、恒星を詳しく説明しています。

ケプラーの『コペルニクス天文学要約』

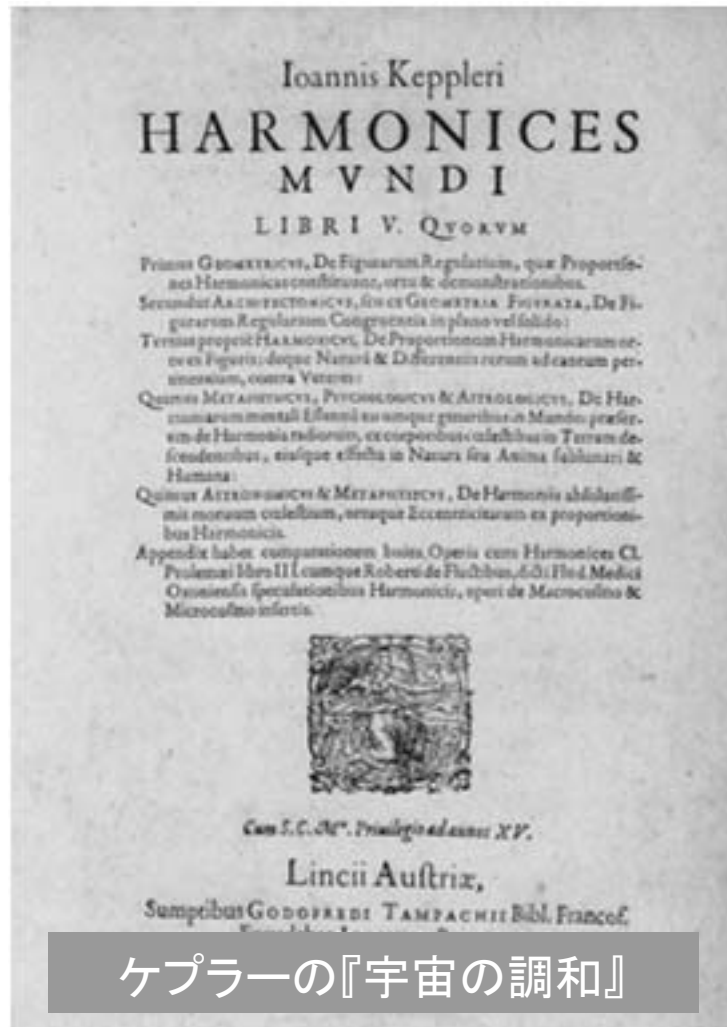
GOTO



- ・ケプラーは、ドイツ生まれの天文学者で、13歳でアーデルベルクの神学校に入学し、その後チューリンゲン大学の神学部に進みます。
- ・1594年、オーストリアのグラーツで数学教授となり、1597年プラハのティコ・ブラーへの弟子となって、彼の死後1601年に、後継者として皇帝付数学者となります。
- ・固くコペルニクス説を信じていたケプラーは、火星の軌道についてティコ・ブラーへの観測から、その軌道は円ではなく楕円であるという結論に達しました。

ケプラーの『宇宙の調和』

GOTO



・これは『新天文学』で発表され、そこにはケプラーの法則の2つが述べられています。第1法則は「惑星は太陽を1つの焦点とする楕円運動を行う」、第2法則は「惑星は、太陽と惑星を結ぶ線が等しい時間に等しい面積を描く」。

・リンツに住んでいた1619年、彼は『宇宙の調和』を出版しました。その最後の章に第3法則が述べられています。それは「惑星の公転周期の2乗は、太陽からの平均距離の3乗に比例する」ことを主張しています。

望遠鏡の発明



- ・1585年、アントワープがスペインに占領されると、市民の多くはスケルト川の河口に近いミッデルブルクに避難し、ここに商工業が繁栄するに至ります。
- ・こうして、この町に政府の支持を受けたガラス工場ができました。
- ・ここにはイタリア人が多く従事し、1605年以降は、クリスタルガラスも製造されたので、レンズの研磨師もいたようです。
- ・その研磨師の内、名の知れた人が3人いました。その1人が、ハンス・リッペルシーです。



リップルシー(? - 1619)

- ・1831年までは、望遠鏡の発明者はオランダのミッデルブルクの眼鏡師ヤンセンと考えられていました。
- ・現在は、ドイツのウェーゼル生まれのハンス・リップルシーとされています。
- ・Hans Lipperhey と綴りますが、本の著者によって呼び方が微妙に異なります。
- ・リップレイがドイツ読みで、リップルスハイがオランダ読みという人、その他、リップルシェイ、リップルハイ、リップルシイ、リップルシーなど様々です。
- ・ここでは、ハンス・リップルシーとします。

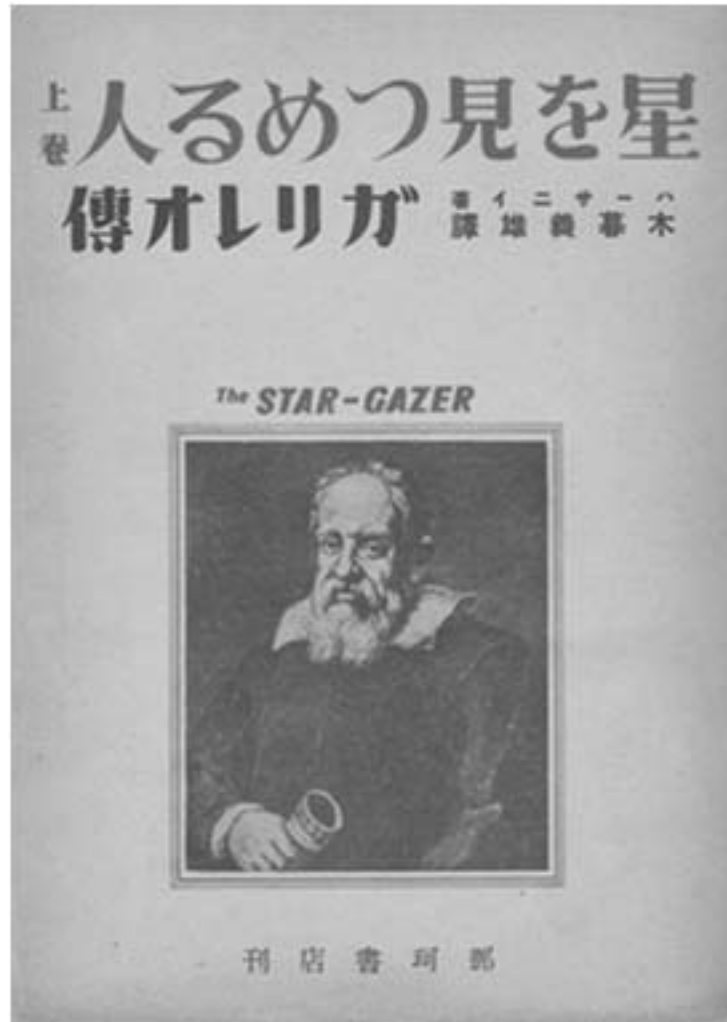


リップルシー(? - 1619)

- ・リップルシーが望遠鏡を組立したのは、1608年のことと考えられていますが、彼はガラスではなく、岩塩レンズを用いたようです。
- ・ハーグの記録保存所に、1608年10月に、リップルシーが特許の請求をした書類が残っているとのこと。
- ・ところが、その後同じようなものを作る者が多く出て、最早秘匿しておくのは困難として、特許権は拒絶されました。
- ・そのようなことで、この驚くべき発明の知らせは、たちまち全ヨーロッパに広まりました。

ガリレオ、望遠鏡を作る！

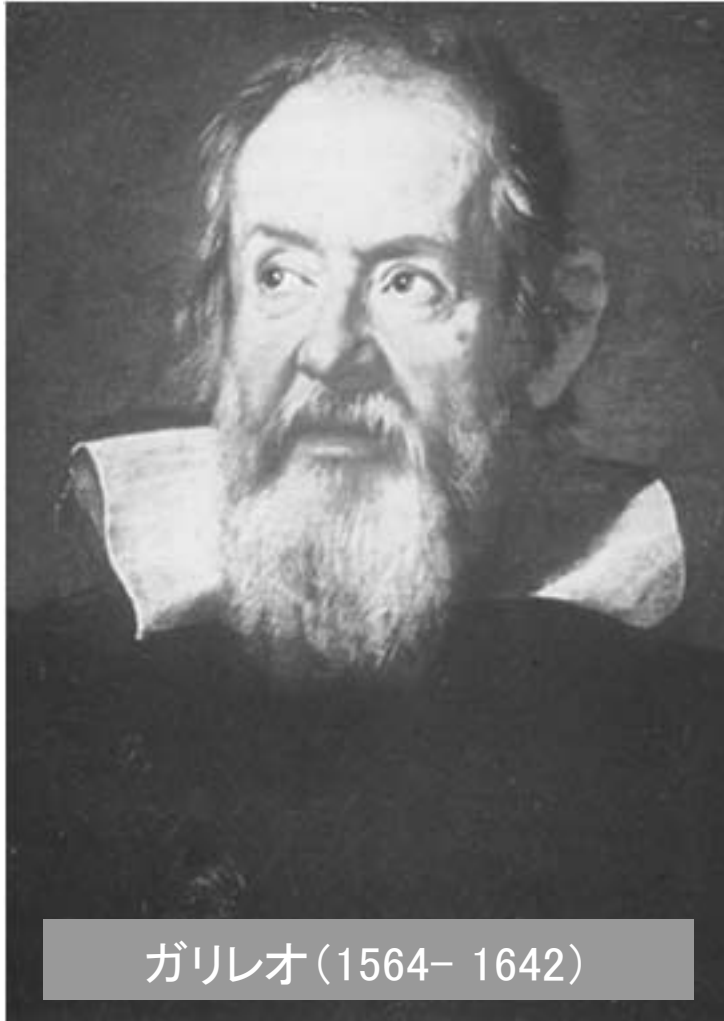
GOTO



- ・ハーサニー著、木暮義雄訳の『星を見つめる人・ガリレオ伝』昭和17年那珂書店刊に、つぎのようにあります。
- ・家には外国からの手紙がついていた。以前の教え子、フランス人のパドゥエールの手蹟は、一目で分かった。このフランス人は、フランスの噂では、一人のオランダ人が、奇怪な眼鏡現象を発見して、種々のレンズを調節することによって、あらゆるものを数倍も大きく見せる器械を発明したということを知らせてきた。ガリレオは、そうした愚かしい噂には、ただ微笑しただけであった。……………。



- ・彼にはもっと心を惹くことがあったのだ。パドゥエールの手紙を読んで考えさせられたのである。最初は彼はただ微笑しただけであった。しかし、腰かけて、くり返して読み、光の屈折についての科学の教えを思い出していた。
- ・それから彼はサグレードにたのんで、彼の友人が重役をしているムラーノのガラス工場へ案内して貰った。彼は職工長に自分の欲しいと思っているガラスのことを話した。
- ・あらゆる種類の、凸面および凹面の、形の異なったものの一切であった。

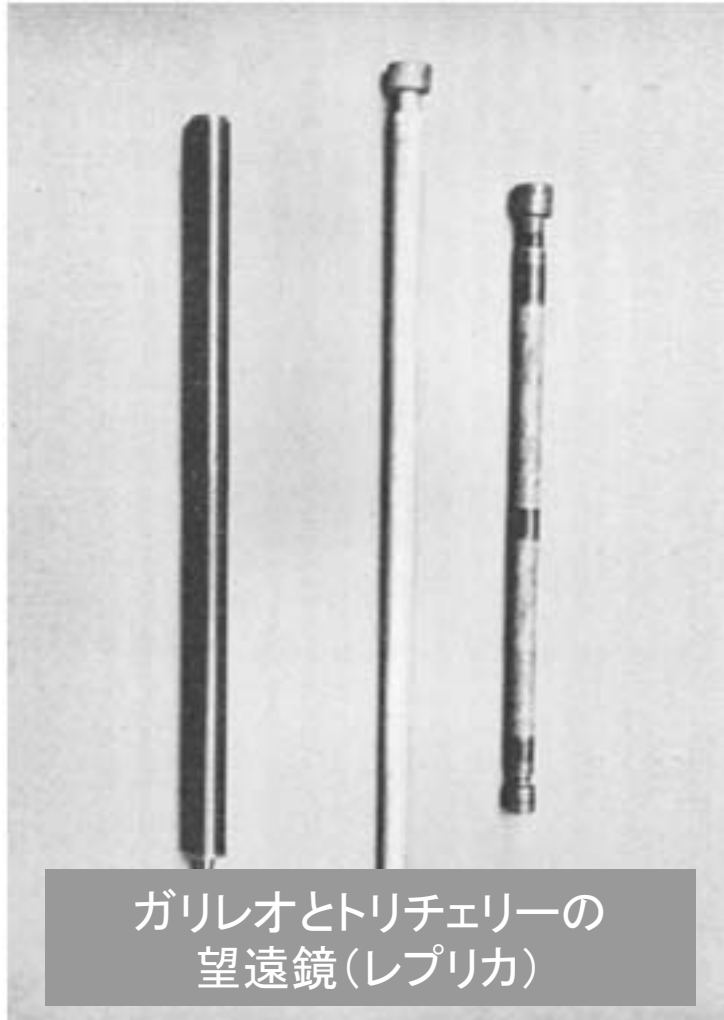


ガリレオ(1564- 1642)

- 帰宅すると、昔からの印刷屋の友人を呼んで、丈夫な紙製の円筒をつくらせた。その円筒のあるものは両端の直径の同じもの、他のものは、一方の狭いものなどであった。
- 彼はレンズの新しい実験に没頭して、いろいろの計画を書きつけた紙の中に囲まれていた。彼はレンズを何回も変えて、種々の異なった距離においてみた。彼は円筒を次々と壊して、新しいレンズや、円筒に相当の金を費やした。何百といういろいろの異なったものを作ってみた。しかし、中をのぞいてみると、あたりがただ朦朧と見えただけであった。

ガリレオ式望遠鏡

GOTO



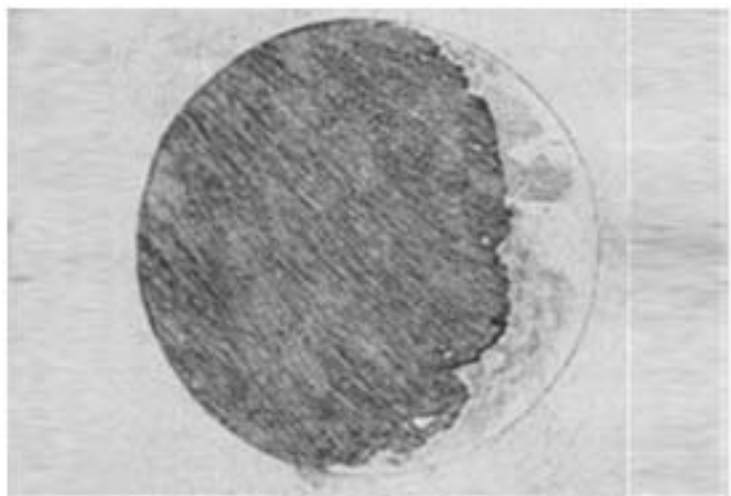
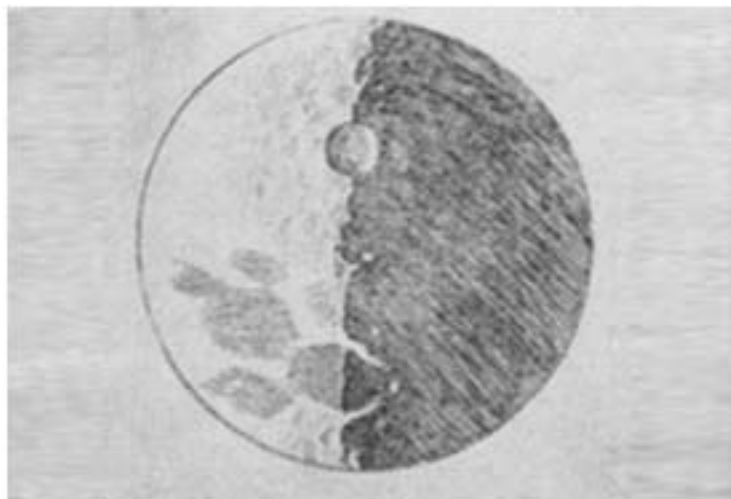
ガリレオとトリチェリーの
望遠鏡(レプリカ)

- 7月のある日、彼は更にひとつの厚紙の円筒を仕上げた。一方には平凸で、他方は平凹のレンズがつけてあった。彼はその日の仕事を終えて、最後の一のぞきして、それから散歩しようと、椅子から立上った。
- 窓は開いていた。小鳥の囀る声は庭の樹々の梢からきこえてきた。彼はすぐ円筒をおろそうとしたが、何かのはずみで、もう一度とり上げた。セント・アントニーの教会の円屋根の一つが樹の上にそびえていた。彼は円筒をそれにむけた。そしてのぞいて見た。おや！この大きなつき出たものは、何だろうか？

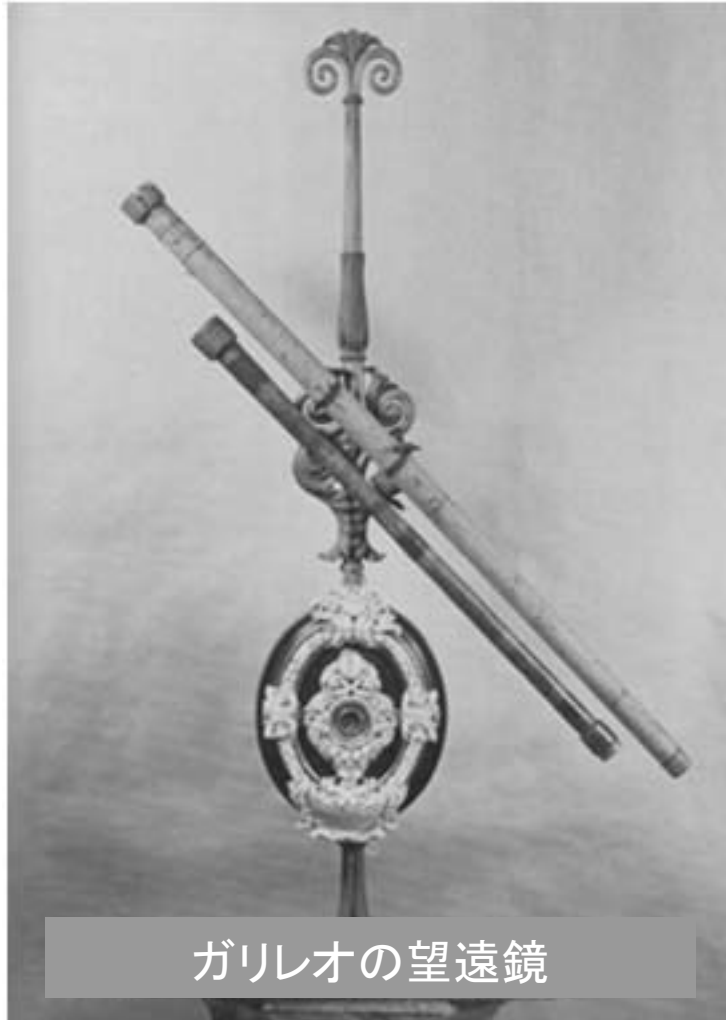


アルチェトリのガリレオの家

- ・やがて又ははじめた。彼は窓のところへ行って、庭の中のいろいろな物を見た。何か悪魔の力ででも動かされたかのように、円筒で見るとたちまち近くに見える。屋根の上にある一本一本の藁をさえ数えることができそうであった。庭の門のさびた釘さえ見ることができたのだ。急に彼はさげんだ。
- ・「誰かいるか？ シュルツ伯爵！ サルヴァーティー！ モンタルバーノ伯爵！ 急いでこい！」
- ・これが、著者のハーサニーが描いた、ガリレオ・ガリレイがはじめて望遠鏡で景色を見たときの様子です。



- 1609年7月に、望遠鏡の発明の話を聞いたガリレオは、わずか1ヶ月の後に自分で望遠鏡を作ることができました。
- ガリレオは、8月21日にサン・マルコの鐘楼の上で、総督閣下や市の高官に実験を見せて大成功を収めました。その時の望遠鏡は、口径42mm、全長2.4m、倍率は9倍でした。
- ガリレオが、その後木星の衛星や月面、金星、プレアデス星団、オリオン大星雲、プレセペ星団の観測に用いたのは、対物レンズの鏡径50mm、有効径37.5mm、焦点距離1280mm、倍率15倍と、鏡径44mm、有効径22mm、焦点距離930mm、倍率20倍の2種類です。

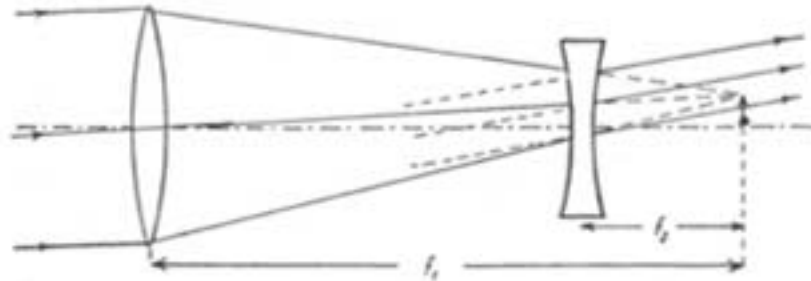


ガリレオの望遠鏡

- 当時のガラスは、器に使うガラスしかありませんので、不均質で色が着いていたり、泡が入っていたりしていたはずです。
- どのような方法で研磨したかは分かりませんが、とにかく大きなレンズを手で磨いて、その中から良い部分だけを切り取って、さらに絞って使っていたのでしょう。
- 先に紹介したガリレオの望遠鏡で、対物レンズの鏡径と、有効径が大きく違うのはそのためです。

ガリレオ式望遠鏡の欠点

GOTO



ガリレオ式望遠鏡の光学系

- ・ガリレオの作った望遠鏡は、上に示したように、凸レンズ1枚と凹レンズ1枚からなる屈折式の望遠鏡です。

最終的には32倍の望遠鏡を作って、数々の天体を観測し、その成果を発表しました。その功績により、このような形式の望遠鏡を「ガリレオ式望遠鏡」といいます。

- ・ガリレオ式望遠鏡は、像が肉眼で見たままの正立像に見えることと、像が割合に明るいこと、筒の長さが比較的短く、扱うにはとても都合がいいのが長所です。
- ・しかし、あまり倍率を高くすることができないこと、視野が狭いこと、天体を測定するときに必要な目盛が入れないことなどが欠点です。
- ・従って、ガリレオ式の光学系は、小型の双眼鏡やオペラグラスなどに用いられていますが、天体望遠鏡用にはむきません。

ケプラー式望遠鏡

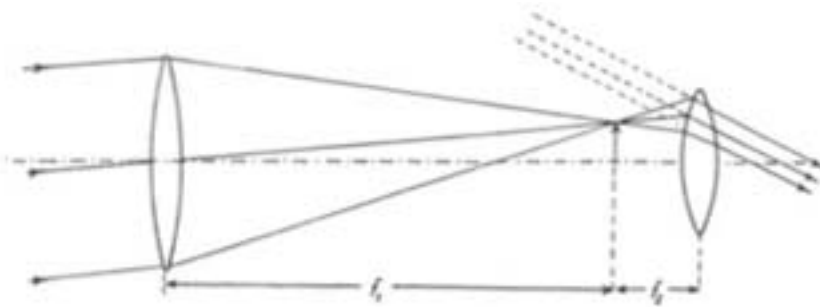
GOTO



- ・ガリレオ式望遠鏡の欠点を補う望遠鏡を考えたのはケプラーです。彼の光の屈折を論じた著書『屈折光学』に、凸レンズ2枚を組合せても望遠鏡ができることを述べています。
- ・しかし、ケプラー式望遠鏡は、ケプラー自身が作ったのではなく、数年後にシャイナーが『屈折光学』に述べられていることを基に作ったものです。
- ・ケプラー式望遠鏡は、間もなくガリレオ式望遠鏡を駆逐します。それは、ケプラー式望遠鏡は、倍率をいくらでも大きくすることができ、視野も広いことと、十字線の応用がきくためです。

シャイナーの作ったケプラー式望遠鏡

GOTO



ケプラー式望遠鏡の光学系

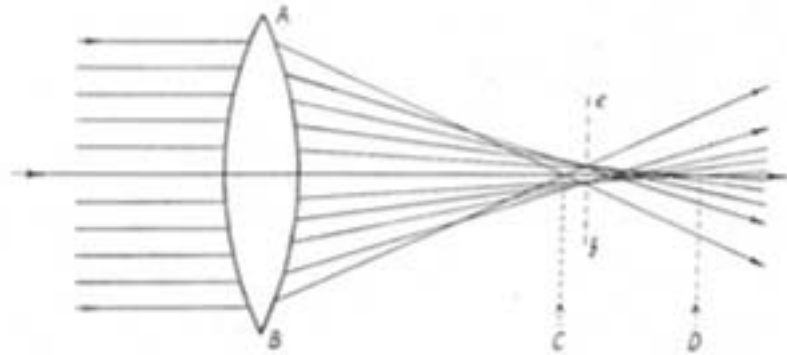
- ・シャイナーが1615年に作ったこの望遠鏡は、太陽黒点投映装置のついた木製の赤道儀です。
- ・シャイナーは、クプラーと並んで自然科学の復興時代に光学の確立と光学器械の発明と改良に大きな功績を残した人で、望遠鏡を天体観測に用いた最初の一人でもあります。



シャイナーの太陽望遠鏡

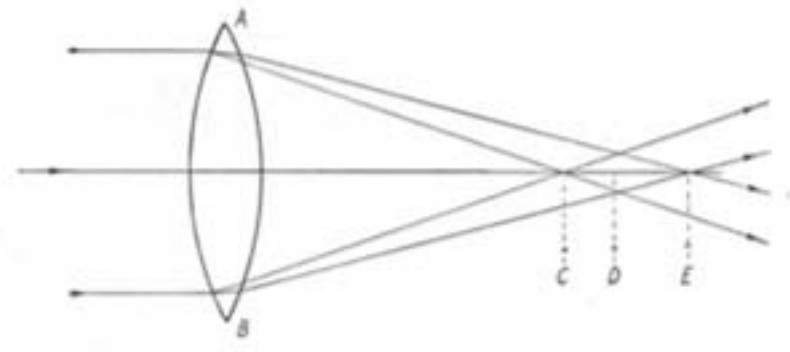
球面収差と色収差

GOTO



球面収差

- ・凸レンズが1枚の場合、レンズ面が完全な球面に研磨されていても、レンズの縁の方を通った光は手前のCに集まりますが、中心付近を通った光は後方のDに集まります。これを、球面収差といいます。

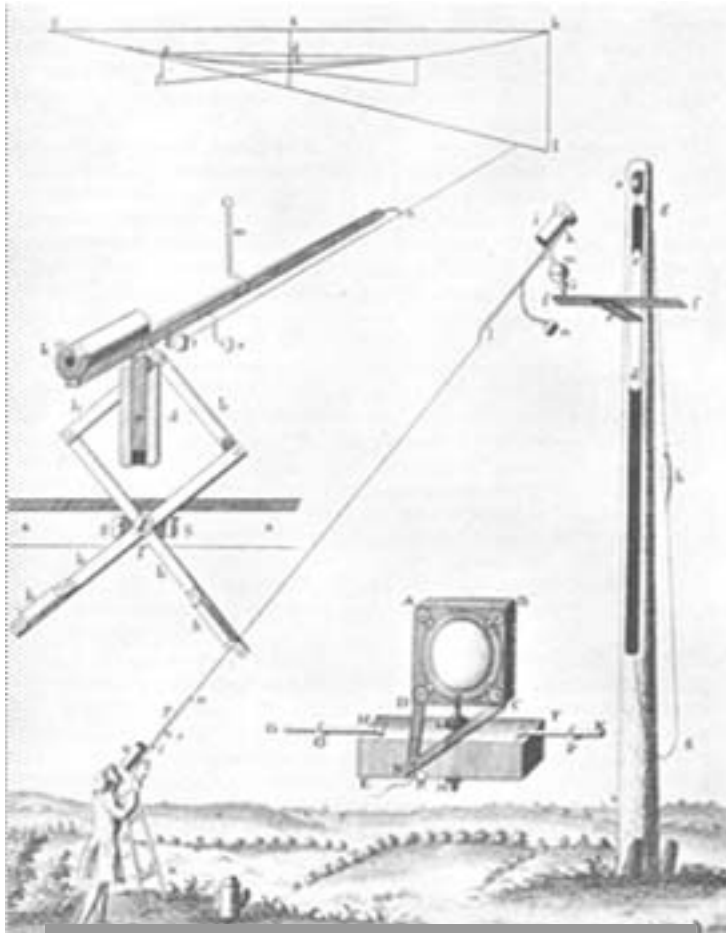


色収差

- ・凸レンズが1枚のレンズの場合、最も有害なのは色収差です。光は、波長の短い光線ほど屈折が激しいので、波長の短い紫の光は手前のCに集まり、波長の長い赤い光は後方のEに集まります。従って、像を見ると色の滲みが見えます。これが色収差です。

長焦点の空中望遠鏡の流行

GOTO



ハイゲンスの空中望遠鏡

- ・この色収差の影響を最小限にとどめるためには、ミリで表した焦点距離 f は、ミリで表した対物レンズの有効径 D に対して、

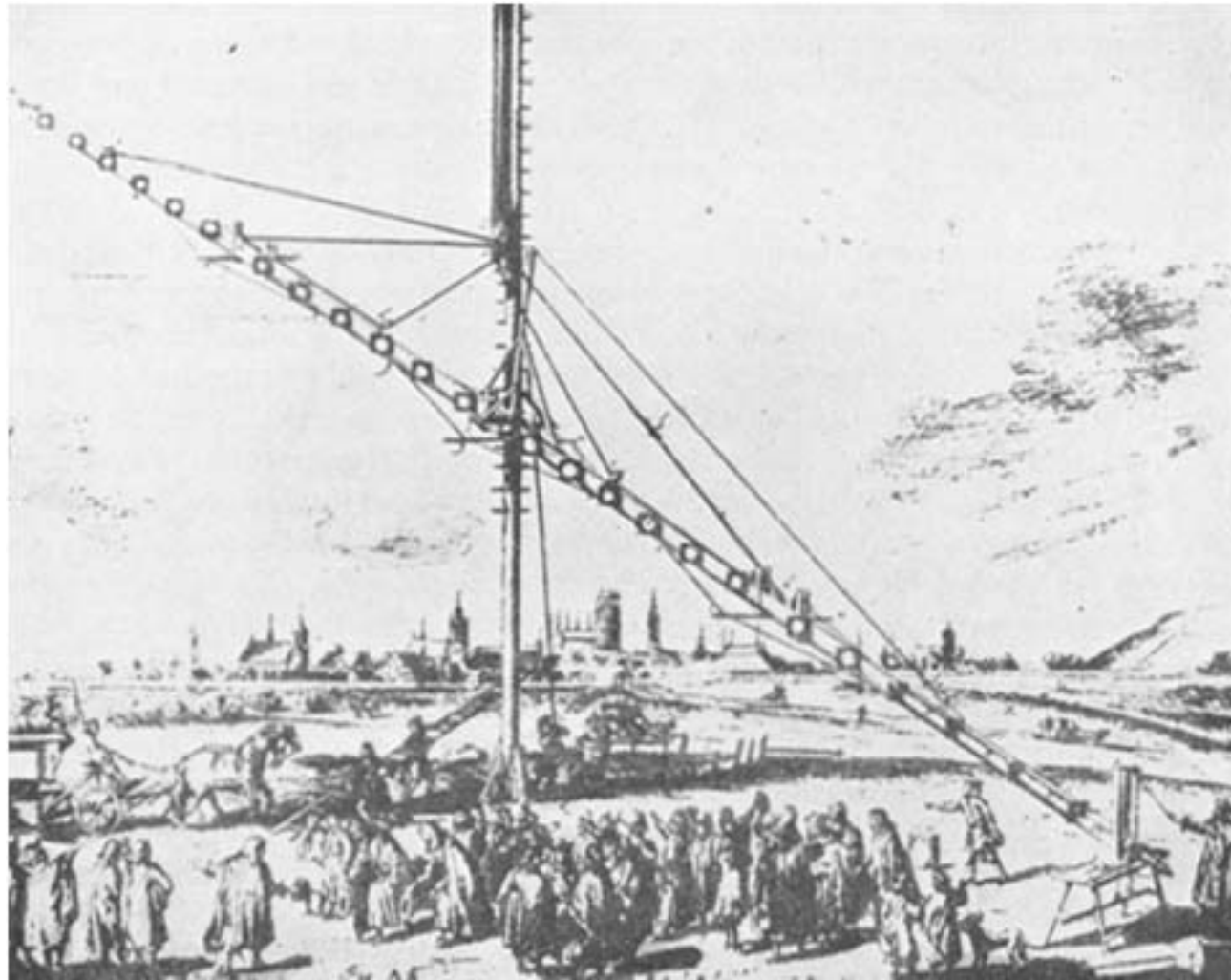
$$f = 3.90D^2 \dots \dots \dots (1)$$

であることが必要だといえます。
いま仮りに、有効径が50mmとすると、
焦点距離は約10mとなります。

- ・左図の、ハイゲンスの空中望遠鏡の対物レンズの有効径は不明ですが、焦点距離は123フィートということですから、37m以上あるということです。当時、このような望遠鏡がいろいろ作られました。

ヘベリウスの46m空中望遠鏡

GOTO





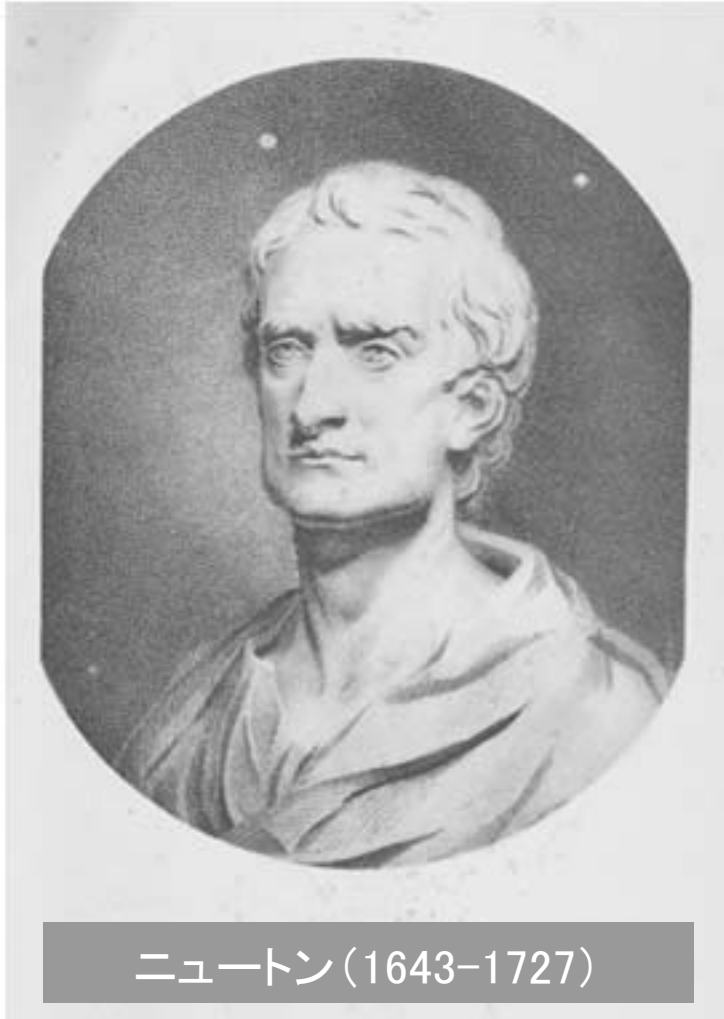
ヘベリウス(1611-1687)

- ・前頁の空中望遠鏡は、ヘベリウスが、1673年にポーランドのグダニスク(ダンチツヒ)に作った150フィート(46m)の長大な望遠鏡です。
- ・これらの望遠鏡は、対物レンズと接眼レンズの間の距離を一定に保つための棒か針金があるだけで、筒はありません。
- ・対物レンズを高い塔の上に置いて、観測者は接眼レンズを持って軌道の上を動き回り、数人の助手を使って巨大な装置を動かして星を追尾しなければなりません。これは、大変な作業です。

反射望遠鏡の発明

ニュートン式反射望遠鏡

GOTO



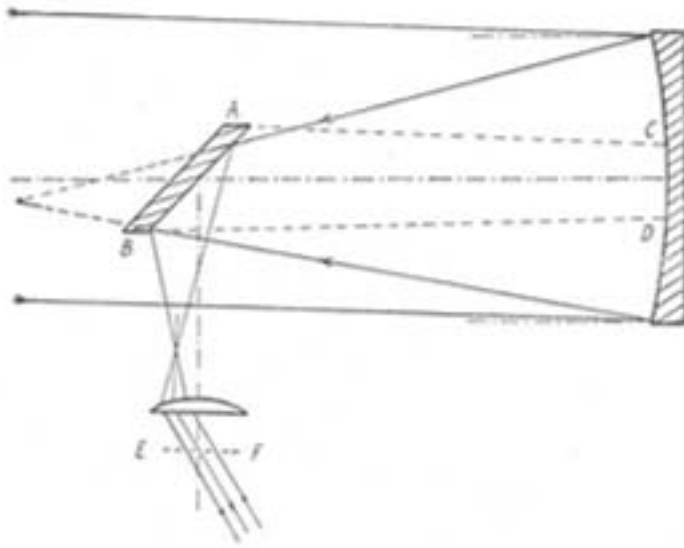
- これまで述べてきたガリレオ式や、ケプラー式の望遠鏡は、レンズを組合わせて作った屈折望遠鏡です。
- ところが、天体を観測するために次第に大きな望遠鏡を作るようになり、その結果、屈折望遠鏡に行き詰まりをきたしたのです。
- それは、対物や接眼レンズに単レンズを用いたため、球面収差や色収差が起こって、映像を悪くしたからです。
- しかも、色収差を除くのは不可能なことから、ニュートンは早々に屈折望遠鏡に見切りをつけて、反射望遠鏡に活路を求めようとしたのです。



・ニュートンが1668年、26歳の時に初めて作った反射望遠鏡は、全長6インチ、口径1インチ、倍率が30～40倍のものでした。形は小さいが、当時の2～4フィートの屈折望遠鏡と同じ程度の性能を持ち、木星の衛星や金星の満ち欠けも観測できたといえます。

・ニュートンは、更に前よりも大きな反射望遠鏡を作りました。これは1672年に王立協会で展覧し、その後同協会で保管され、次の銘が記されています。

“The first reflecting telescope, invented by Sir Isac Newton and made with his own hands, 1671”



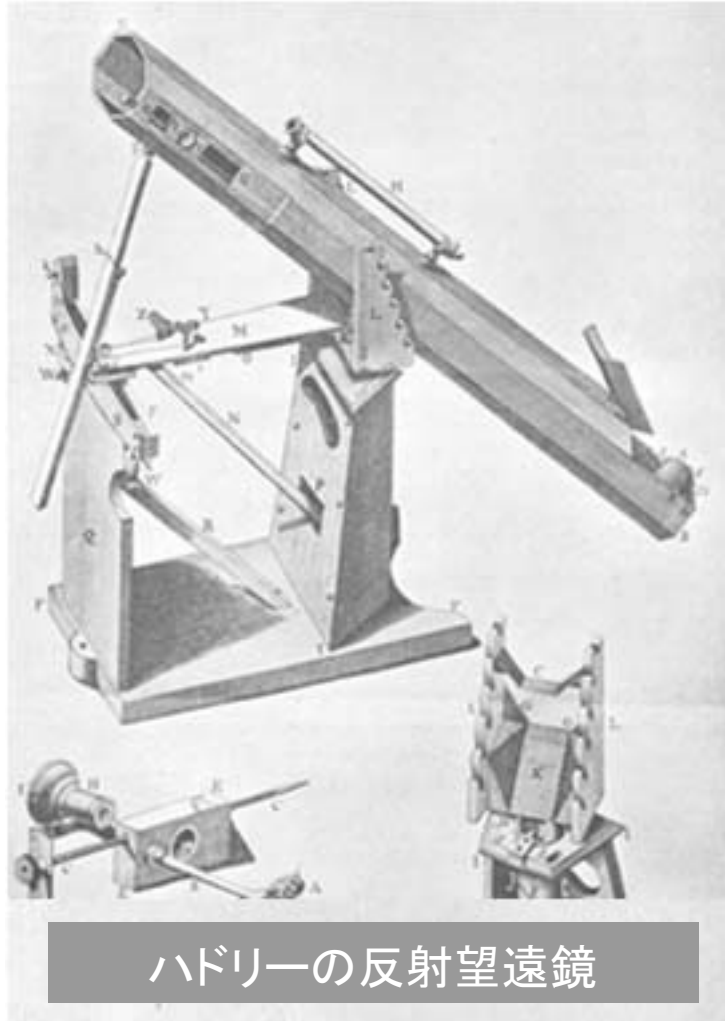
ニュートン式反射望遠鏡の
光学系

- ・ニュートンの反射望遠鏡の鏡材は、銅に亜鉛とヒ素を混ぜた合金で、混合の比率はよく分かっておりません。

- ・銅と亜鉛の合金は真鍮（黄銅）ですが、これにヒ素を混ぜると白く硬くなって、反射率もよくなることが知られています。
- ・また、ピッチを使って鏡面を研磨する方法を考案したのもニュートンです。
- ・研磨剤は、酸化スズ（パテ粉）で、現在でも軟らかい物質の研磨に使われています。
- ・ニュートンの本業は造幣局長ですから、その経験がこんなところに活かされたのかも知れません。

ハドリーの反射望遠鏡

GOTO



ハドリーの反射望遠鏡

- ・1722年、ハドリーが口径15cm、焦点距離1,500mmの良質なニュートン式反射望遠鏡を製作しました。
- ・木製の経緯台で、ファインダーも付き、ネジ棒で高度を微調整するようになっていて、現在の反射望遠鏡の原型のような望遠鏡です。
- ・平面鏡と接眼鏡を一緒に動かしてピントを調整することだけが、現在のものと違ってきます。
- ・この反射望遠鏡で天体を観測した結果は、当時使われていた口径15cm、焦点距離44mの空中望遠鏡と同等の性能だったといわれています。

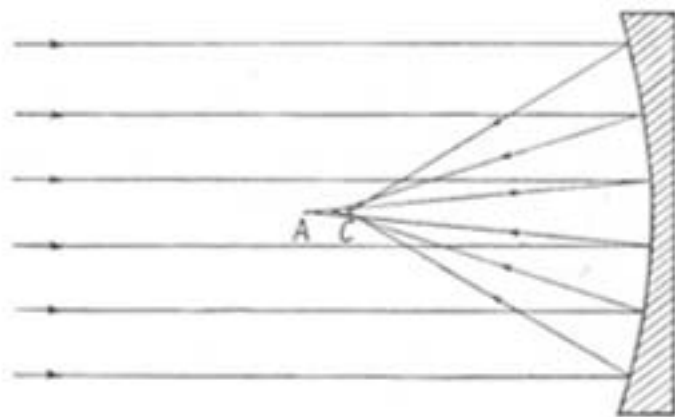
ショートのグレゴリー式反射望遠鏡

GOTO



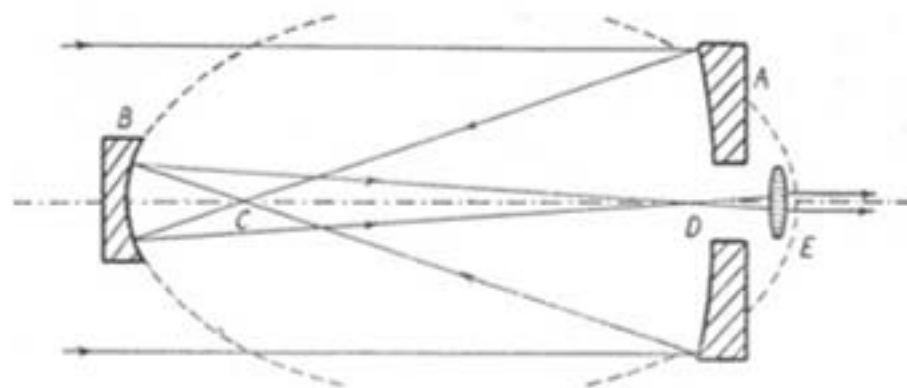
グレゴリー(1638-1675)

- ・1732年～1768年にかけて、イギリスのJ. ショートは、およそ1,400台のグレゴリー式の反射望遠鏡を作って、多くの観測者を満足させました。
- ・定価は、全長73cmのものが11ポンド4シリングだったといえます。
- ・グレゴリー式は、主鏡が放物面で、副鏡が楕円面で、どちらも凹面ですから、それぞれ光を当てて像を作らせ、鏡面のでき具合をテストすることができます。
- ・ショートの鏡の大部分は金属鏡ですが、ガラスの鏡も16枚作りました。しかし、ガラス材の欠陥のため失敗しました。



反射鏡の球面収差

- ・反射望遠鏡において、光を屈折させるのではなく、反射させることによって、色収差を除去することができましたが、相変わらず球面収差は残ります。



グレゴリー式反射望遠鏡の光学系

- ・球面収差は、球面鏡を放物面にすることによって除去することができます。ショート・グレゴリー式の反射望遠鏡は放物面にしてありました。

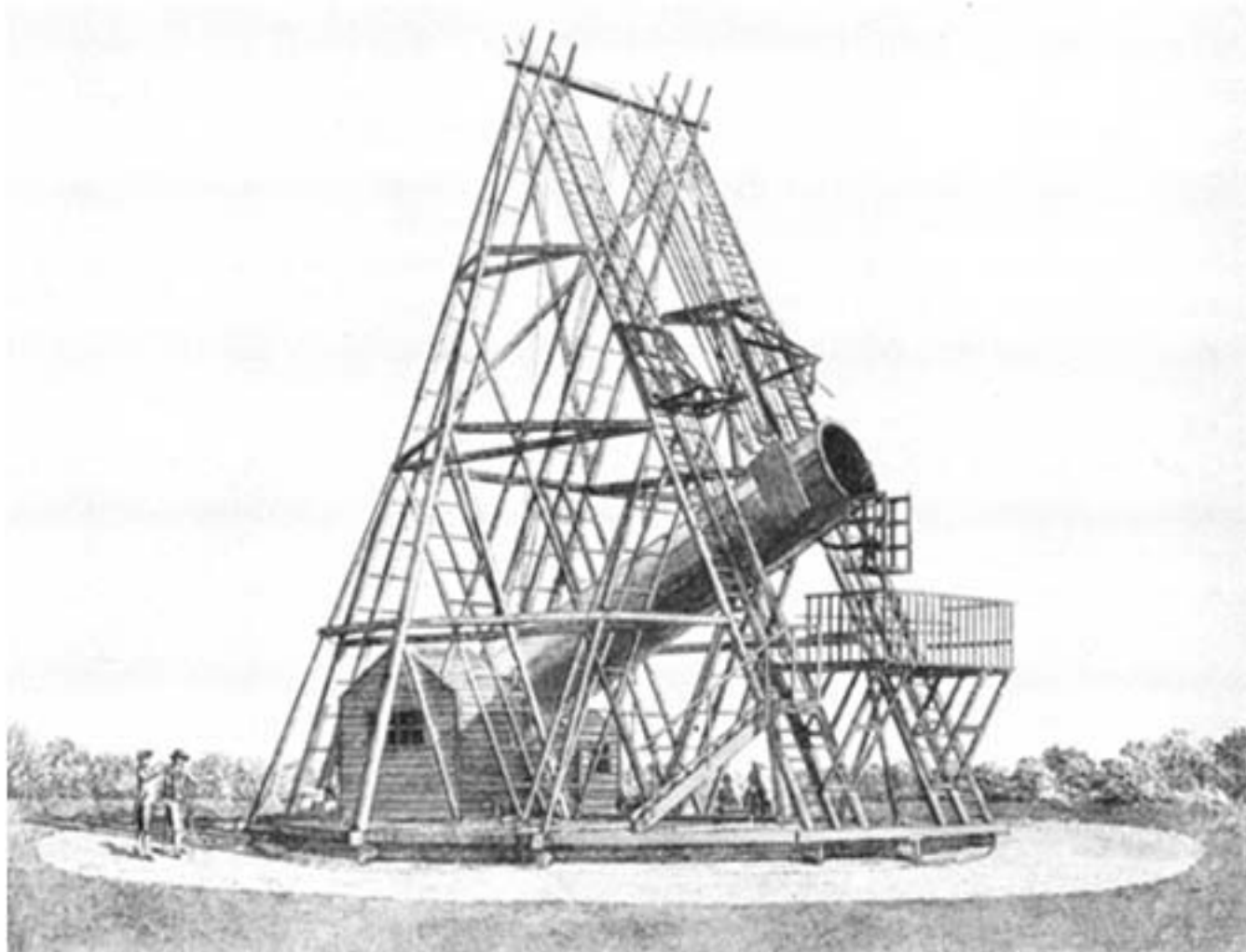


W. ハーシェル(1738-1822)

- ・ウィリアム・ハーシェルが初めて鏡を磨いたのは1773年ですが、彼自身の記録にいと、1795年までに430枚の鏡を製作しました。
- ・鏡430枚は、望遠鏡を430台作ったということではありません。金属鏡は錆びるので、望遠鏡1台につき数枚の予備の鏡を用意するのが普通です。430枚の中には、122cmの鏡が2枚もありました。
- ・ハーシェルの反射鏡の材料は、銅32、錫13、アンチモン1の割合に混ぜて鋳造したものです。白くて硬い合金で、一種のブロンズ(青銅)です。

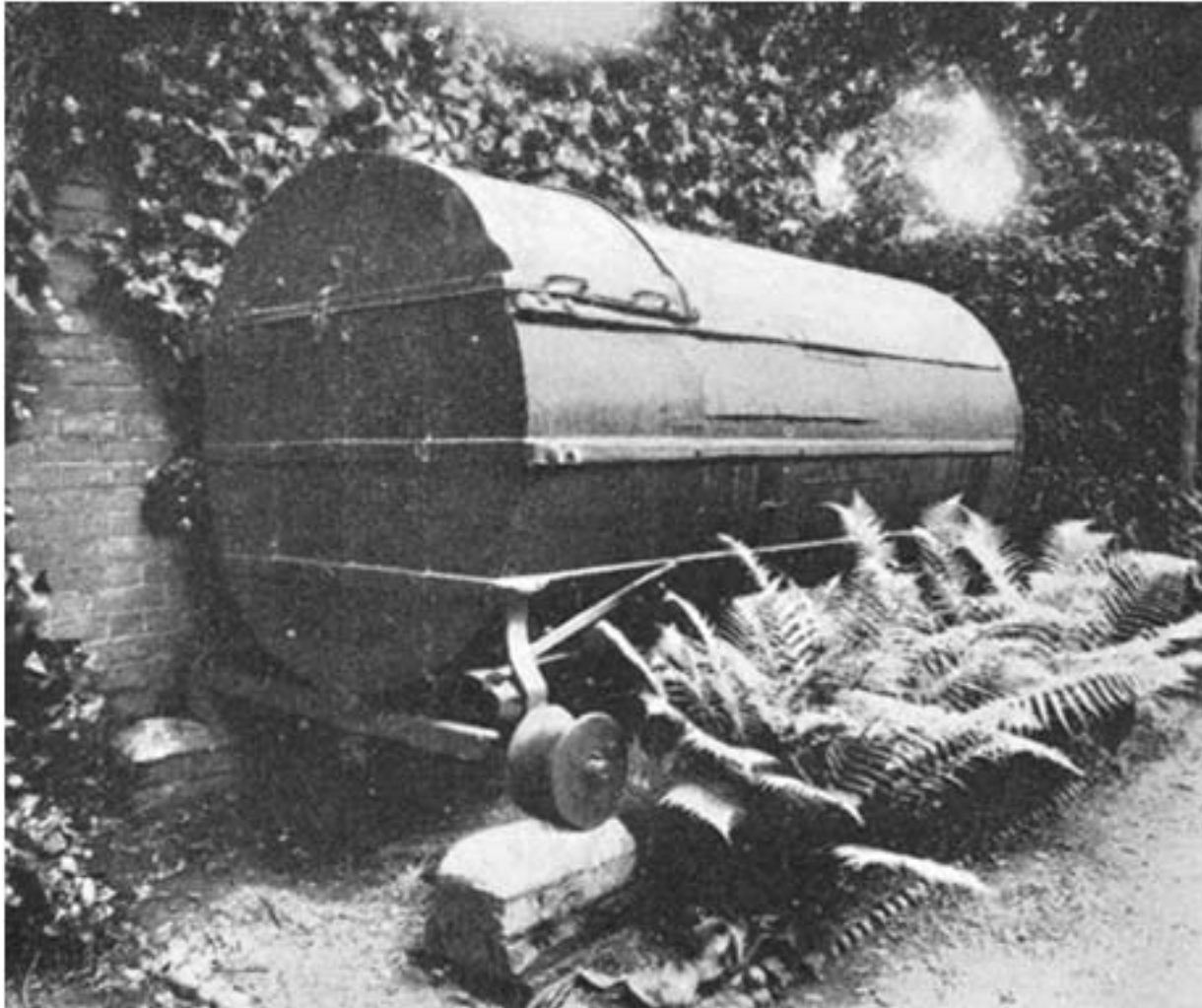
W. ハーシェルの大反射望遠鏡

GOTO



W. ハーシェルの大反射望遠鏡の残骸

GOTO



※The only surviving part of the tube resting in the garden of Observatory House, Slough

W. ハーシェル愛用の20フィート望遠鏡

GOTO



ハーシェルの20フィート反射

- ・1785年、ジョージ3世はハーシェルに口径122cm、長さ12.2mの大反射望遠鏡を注文し、4,00ポンドを与えました。
- ・この巨大な望遠鏡は、1787年2月に一応完成しましたが、鏡のテスト結果は不満足なものでした。そこで、再度磨き直しをして、完成したのは半年後の8月27日でした。
- ・ハーシェルは、1789年8月28日に初めてこの大望遠鏡で観測しましたが、その晩に土星の衛星エンケラズスを発見し、間もなくミマスも発見しました。しかし、ハーシェルは小型の20フィート望遠鏡の方を愛用しました。

ロス卿の口径182cm巨大反射望遠鏡

GOTO

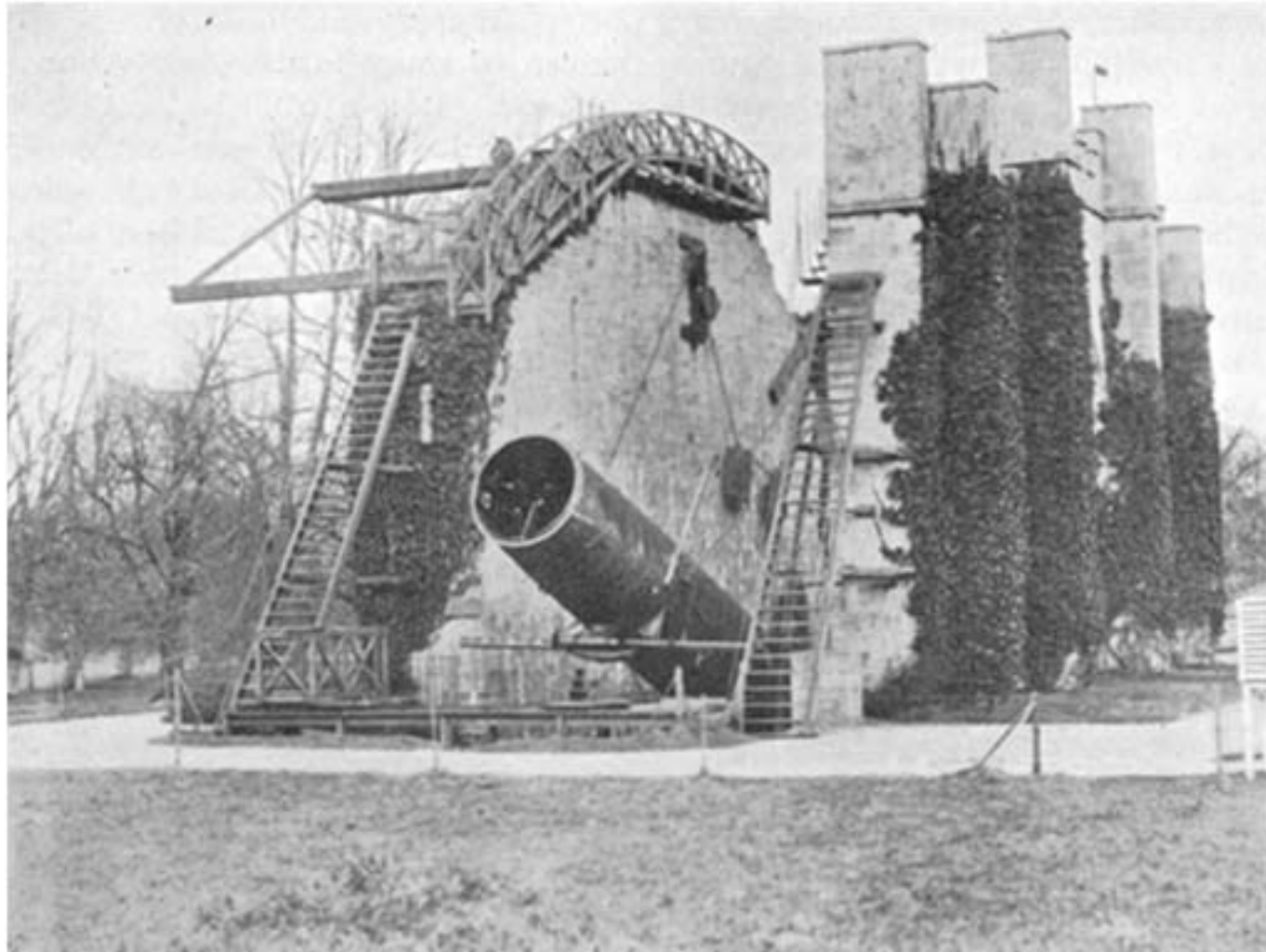


ロス卿 (1800-1867)

- ・1842年に、口径182cmの金属鏡を完成させ、1845年パーソンズタウンのレビヤタンに巨大な反射望遠鏡を建てました。
- ・この望遠鏡はニュートン式で、焦点距離は16.5m、子午線の左右1.5°の範囲だけ動かせる子午儀みたいなものです。
- ・この望遠鏡は、渦巻銀河の中の個々の星々を初めて分解し、宇宙構造論に大きな変革をもたらしました。
- ・鏡材に使われたのは、銅70%、錫30%の「ロスの合金」と呼ばれるものです。

ロス卿の口径182cm巨大反射望遠鏡

GOTO



ナスミスの望遠鏡20吋反射望遠鏡

GOTO



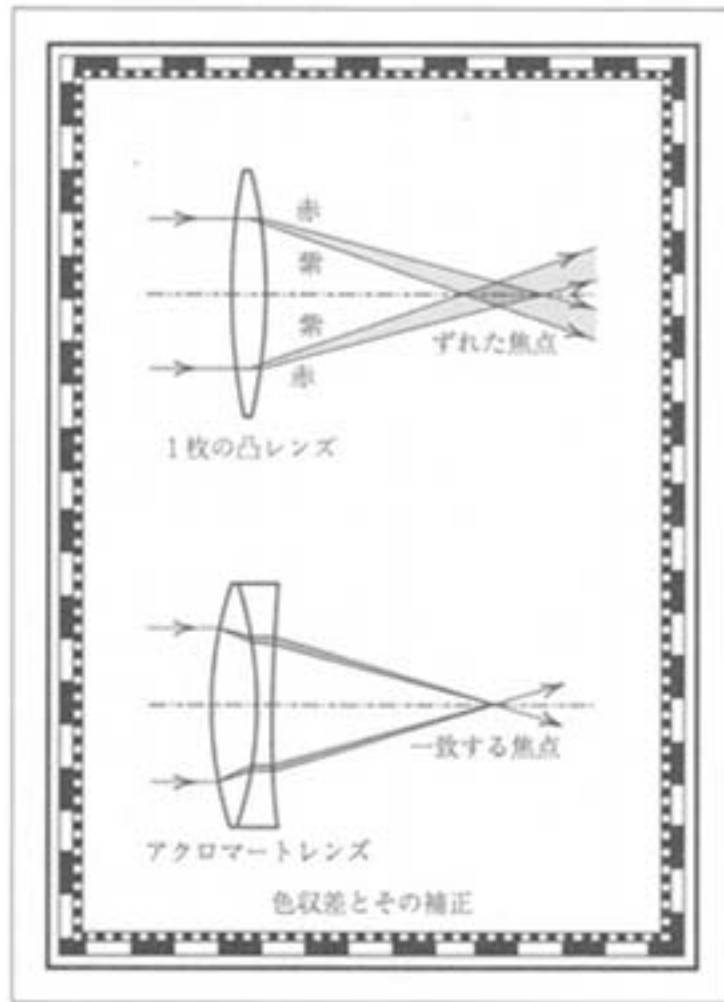
ナスミスの20吋反射望遠鏡

- ・1840年代の2人目のアマチュア望遠鏡製作者は、ジェームス・ナスミスです。1840年、41年、42年とつぎつぎに口径25cm、33cm、50cmの3台の望遠鏡を作りました。
- ・ナスミスは、既成のものに捉われない眼をもち、便利な発明を行いました。
- ・特に、20吋(50cm)は不朽の名作で、主鏡で集めた光のビームは、離れた2つの副鏡で反射され、最終焦点は赤緯軸上に結ぶように工夫されました。この結果、天体を見るとき、角度が高くなっても足場に登る必要なしに望遠鏡を使うことを可能にしました。

色消レンズの発明

色消レンズの発明

GOTO



- ・単レンズの像は、色の着いた像になるので、主に反射望遠鏡が使われるようになっていました。ところが、1729年にイギリスのチェスター・ムア・ホールが、色消レンズを発明しました。
- ・まだ、色消の原理が全く分かっていなかった時代ですから、ガラスの材料や曲率半径の組合せには苦労したようです。
- ・彼は、1733年、眼鏡師G. バストの協力を得て、口径64mm、焦点距離503mmの色消対物レンズの製作に成功して、望遠鏡を組立ました。これが、世界最初の色消レンズを使った望遠鏡です。

J. ドロンドの色消レンズ

GOTO



J. ドロンド(1706-1761)

- ・ロンドンの光学者J. ドロンドは、オイラーの研究に刺激されて、色消レンズについていろいろ実験しました。入射角と屈折角の平均の比が、クラウンガラスに対して1.53であり、フリントガラスに対して1.583であるから、フリントガラスとクラウンガラスを組合せて作れば、色消レンズを作ることが可能であると論じています。
- ・しかし、実際に実現するのは困難で、1758年にクラウンガラスの凸レンズとフリントガラスの凹レンズを、計算した曲率に磨き上げ、両者を接合して赤と青とが同じ位置に集まるレンズを完成して、ようやく専売特許権を得ました。

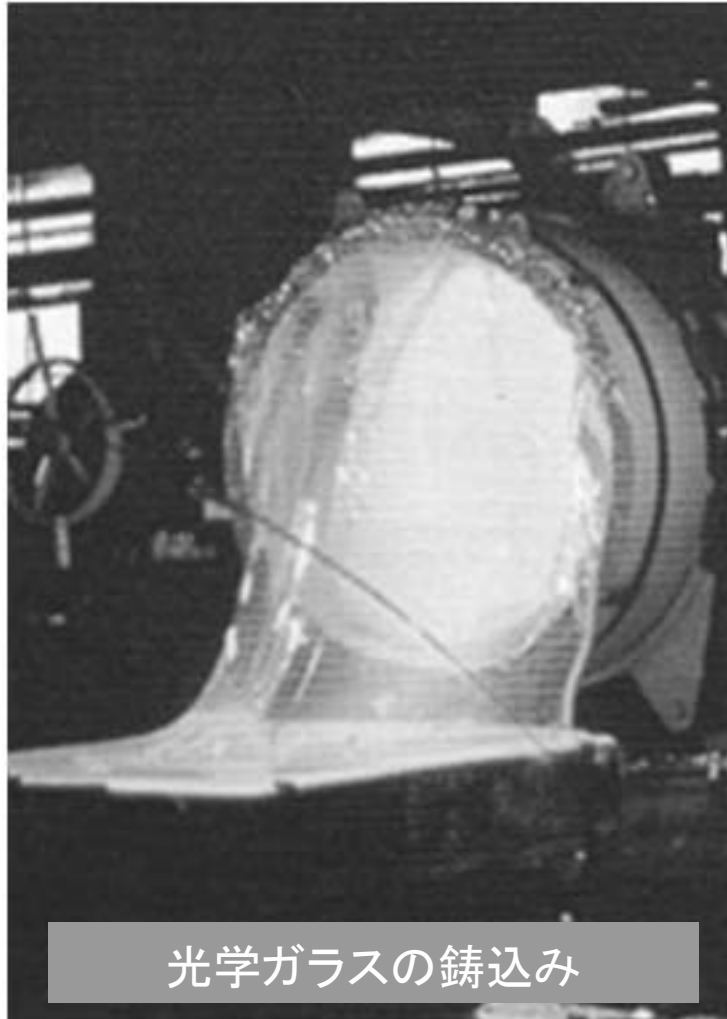
息子、P. ドロンドの色消し屈折望遠鏡

GOTO



P. ドロンド(1730-1800)

- J. ドロンドの色消レンズの計算は、理論的に立派なものでしたが、光学ガラスの均質度が計算の精密度に遥かに及ばなかったために、満足な色消レンズができなかったようです。
- J. ドロンドの死後、息子のP. ドロンドが父の業を継ぎ、1761年に機械学者のラムスデンと協同して、直径95mm、焦点距離1070mmの色消レンズの付いた150倍の、非常に立派な屈折望遠鏡を作りました。
- この望遠鏡については、反射望遠鏡メーカーのショートが、良い像だと褒めています。



光学ガラスの鑄込み

- 1790年、光学ガラスの製造に一大革命をもたらす技術が見い出されました。
- スイスの一時計師のP. L. ギナンが考えたものです。
- ギナンは、坩堝（るつぼ）で溶かしたガラスを、耐久性のある粘土の棒で攪拌して、均一で脈理の少ないガラスを作り、ガラスを坩堝のまま冷却して、その塊から脈理のない部分を選び出すという方法を考えたのです。
- このギナンの方法こそが、光学ガラスの製造技術に画期的な貢献をなしたことができます。



- ・ギナンの製造した光学ガラスは、クラウン・ガラスとフリント・ガラスの2種類です。
- ・クラウン・ガラスは、無水珪酸72%、炭酸カリ18%、炭酸カルシウム10%を粉碎して熔融したものです。
- ・このガラスは、非常に粘性が高く、炉から出して型に流すときに、熱い空気が入って王冠(クラウン)のような形にふくらむのでこの名があります。
- ・一方、フリント・ガラスは、無水珪酸45%、炭酸カリ12%、酸化鉛43%を粉碎して熔融したもので、無水珪酸の原料としてフリント用いたのでこの名があります。

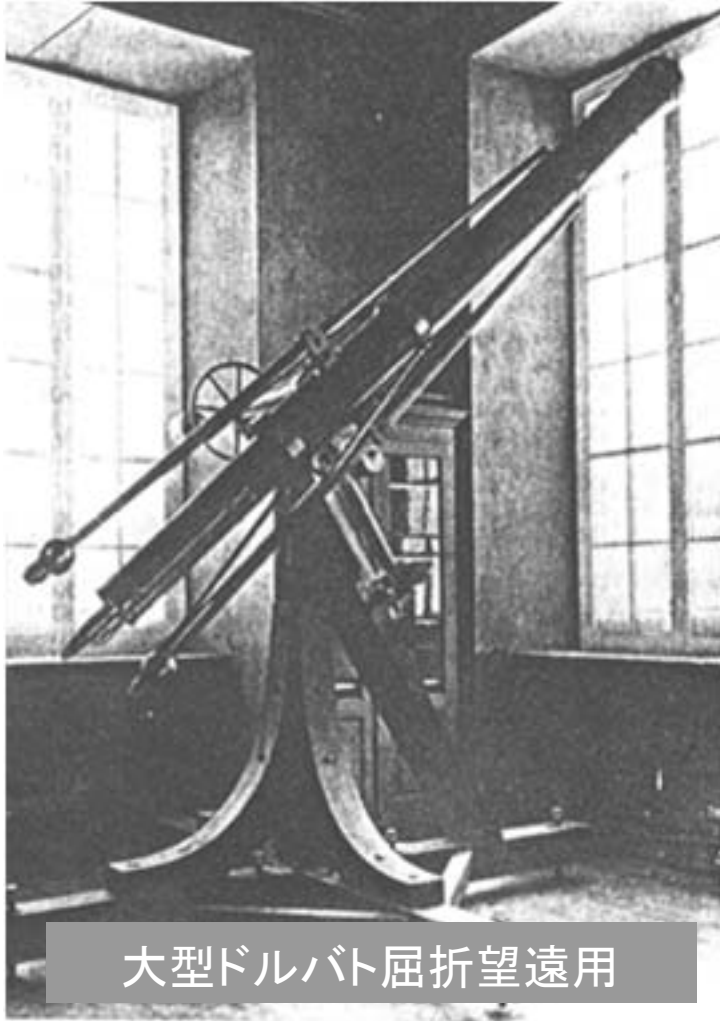


フラウンホーファー(1787-1826)

- ・フラウンホーファーは、19世紀における応用光学の大家で、今日の天体望遠鏡の対物レンズの創始者です。
- ・フラウンホーファーの対物レンズは、色収差の他に球面収差とコマ収差も除かれていました。
- ・フラウンホーファーは、1809年にスイスのギナンの工場に入って、しばらく一緒に光学ガラスの製造方法を研究しましたが、1813年からは単独で研究を続けました。
- ・彼は、フリント・ガラスの均質で大きな塊を作る技術を開発しました。

フラウンホーファーの屈折望遠鏡

GOTO



大型ドルバト屈折望遠用

- ・フラウンホーファー線というのは、光学ガラスの屈折率を正確に測定するために、彼が設定した基準波長です。
- ・フラウンホーファーは、C線、d線、e線、F線、g線などのスペクトル線に対して、光学ガラスの屈折率を測定し、光線の三角追跡法を応用して対物レンズの曲率半径を計算し、昔ながらの現品合わせではなく、レンズ面をニュートン板で検査しながら研磨するという、近代工業的な方法確立しました。
- ・1824年に製作した、対物レンズの直径が245mmの屈折望遠鏡は有名で、ソ連のドルバト天文台に置かれました。

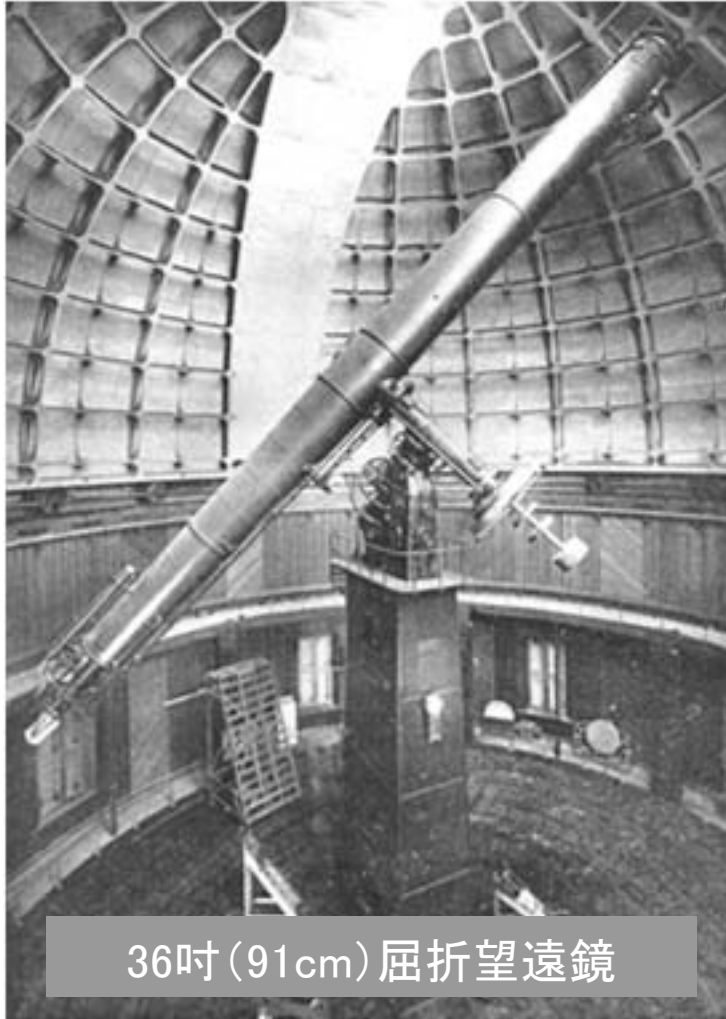


A. クラーク(1804-1887)

- ・屈折望遠鏡の需要が増えると、製造業者の数も増えました。ドイツのメルツ、フランスのゴーチェ、トーマス・クックなどです。
- ・ところが、イギリスのW. R. ドーズがアメリカのA.クラークのレンズの熱狂的なファンになると、A. クラークの評判も上がります。
- ・そして、ミシシッピ大学の47cmを製作し、1861年1月の予備テスト中にシリウスの伴星を発見するのです。
- ・その後、A.クラークは、リック天文台の91cmやヤーキス天文台の102cmを製作します。

リック天文台の36吋屈折望遠鏡

GOTO

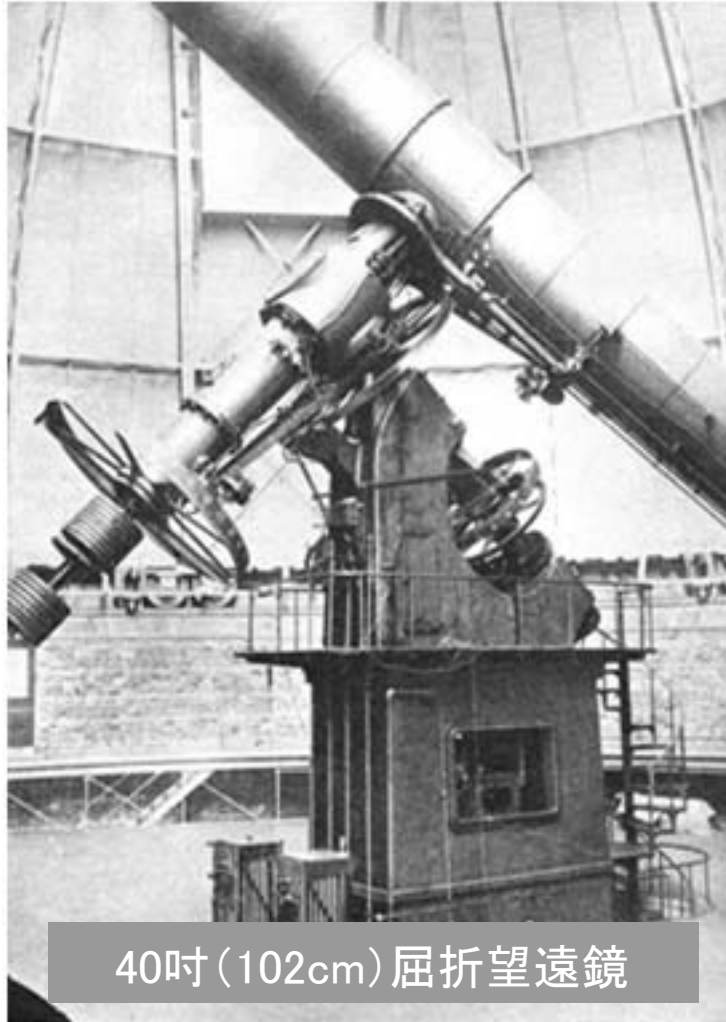


36吋(91cm)屈折望遠鏡

- ・リック天文台は、初めカリフォルニアの富豪ジェームス・リックの遺産によって91cm屈折望遠鏡を主体として、1888年にサンフランシスコの東方300kmのハミルトン山に作られました。
- ・写真乾板は、光の吸収を研究していた化学者によって改良されました。これに対して、分光学は光の放射を研究していた物理学者によって発展させられました。
- ・このリック天文台の口径91cmの屈折望遠鏡に取付けられた分光器によって、約300個の星の3万枚以上の分光写真が撮影されました。

ヤーキス天文台の40吋屈折望遠鏡

GOTO

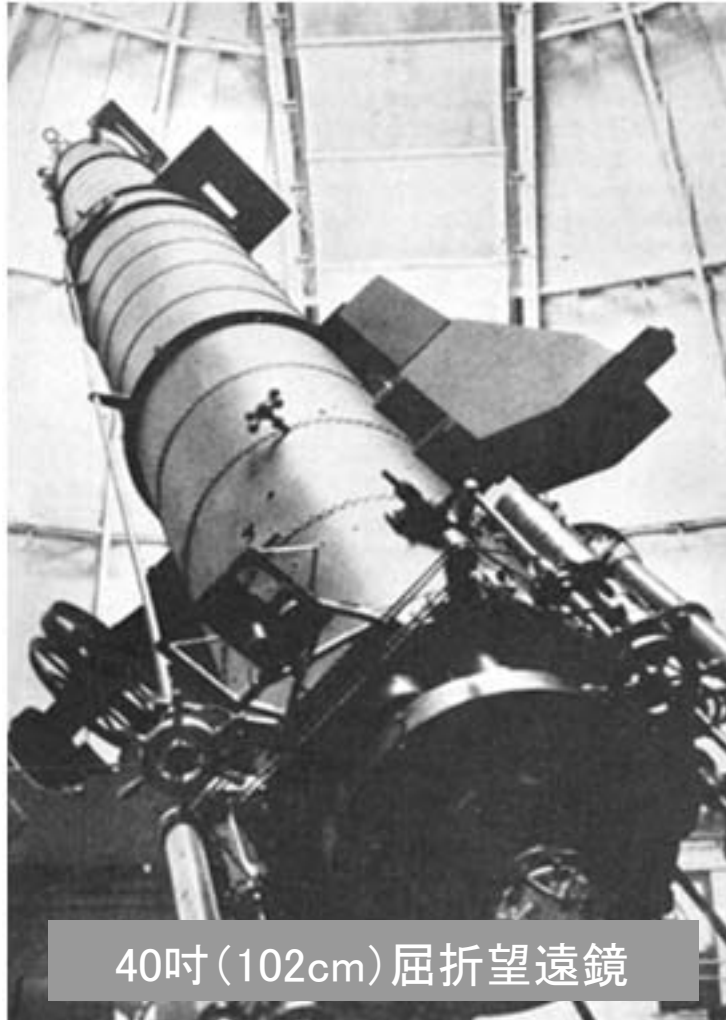


40吋(102cm)屈折望遠鏡

- ・現在、世界最大の屈折望遠鏡はヤーキス天文台の102cmです。1887年に、オルバン・クラークが研磨した対物レンズを、1897年になって、ワーナー・スワージー社が組立しました。
- ・ヤーキス天文台は、シカゴ(イリノイ州)の西北約130kmの、レーク・ジェネバという湖の北岸の、ウィリアム・ベイにあります。ここは、ウィスコンシン州です。
- ・シカゴからは、早朝と夕方にただ一往復のグレーハウンド・バスが通じているだけの、とても不便なところです。

ヤーキス天文台の40吋屈折望遠鏡

GOTO



40吋(102cm)屈折望遠鏡

- ・この望遠鏡の対物レンズの実測データを記しておきます。

$r1=+ 6886.7$

$d1= 58.0$

$r2=- 6886.7$ 有効径 1016ϕ

$d2=215.2$

$r3=- 6090.0$ 焦点距離19354

$d3= 28.0$

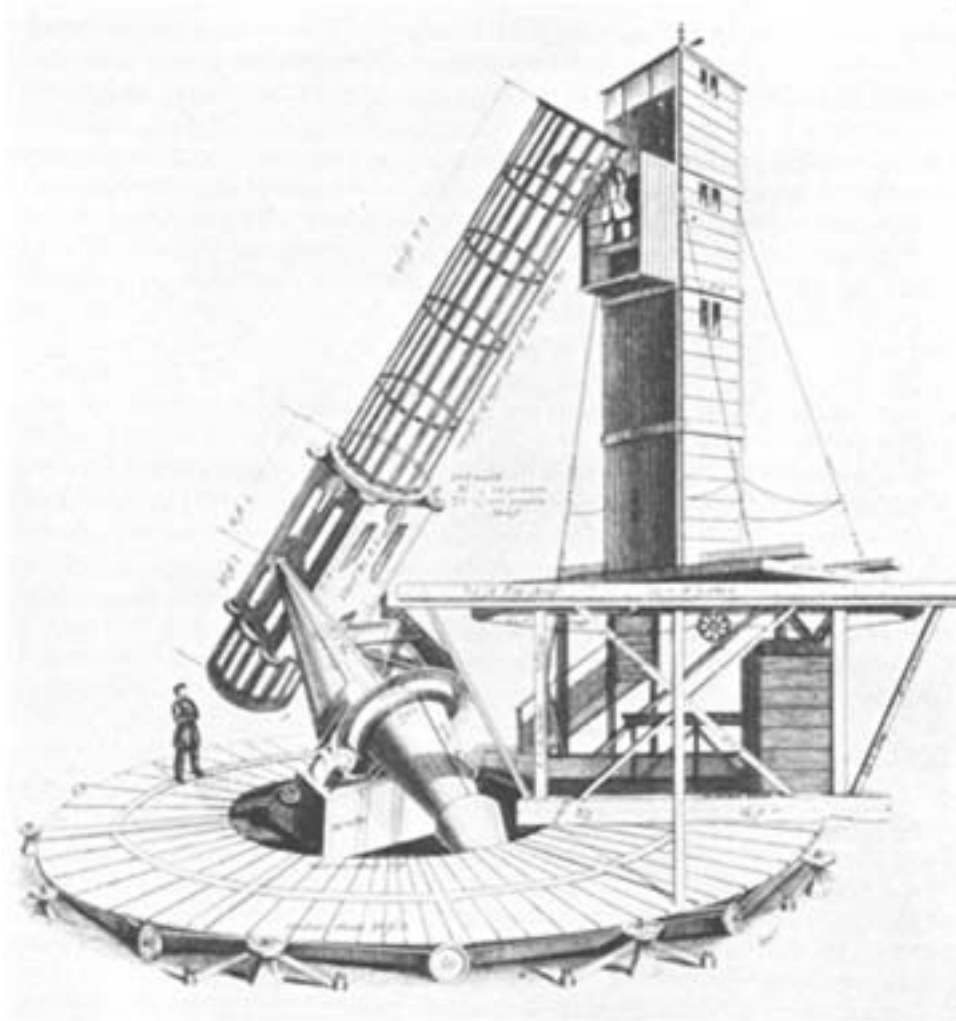
$r4=+1209290.0$

- ・単位はすべてmmで、+は物体に向かって凸、-はその反対で、 ϕ は直径です。

金属鏡の終焉

ラッセルの口径1.2m大反射望遠鏡

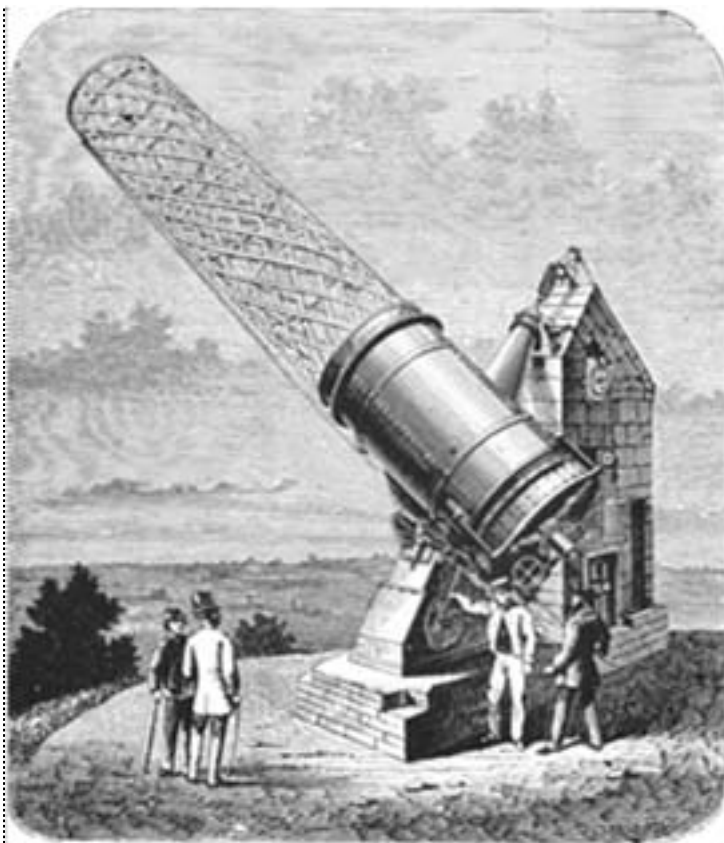
GOTO



- ・その後、1861年に W. ラッセルがマルタに作った口径1.2m、焦点距離11.3mの反射望遠鏡や、1867年にメルボルン天文台で作った口径1.22m、焦点距離9.3mの反射鏡もやはり金属鏡でした。
- ・これらは、天体観測に大きな成果を上げる前に、錆びのため解体されました。
- ・ただし、マルタの大望遠鏡は、初めてのフォーク型の赤道儀でした。

悲劇のメルボルン大反射望遠鏡

GOTO

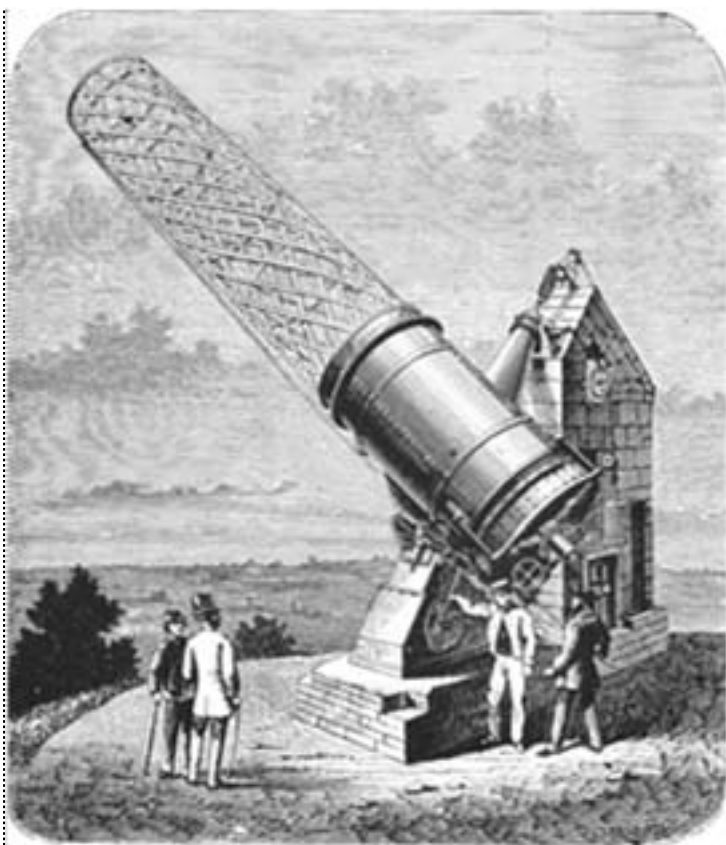


メルボルンの48吋反射望遠鏡

- ・反射鏡が、金属からガラスに代ろうとしていた頃、南半球に大望遠鏡を設置する計画が持ち上がり、委員会が作られました。しかし、イギリスは必要な資金が支出できず立切れになっていました。
- ・1862年、オーストラリアのビクトリア市民が、自分たちで望遠鏡の代価を支払う用意があるとして、委員会に助言を求めました。
- ・ガラスの鏡も考慮されましたが、実績がないと拒絶されたので、ラッセルは自分の1.2mの金属鏡を贈ろうとしましたが扱いにくいと断られました。

悲劇のメルボルン大反射望遠鏡

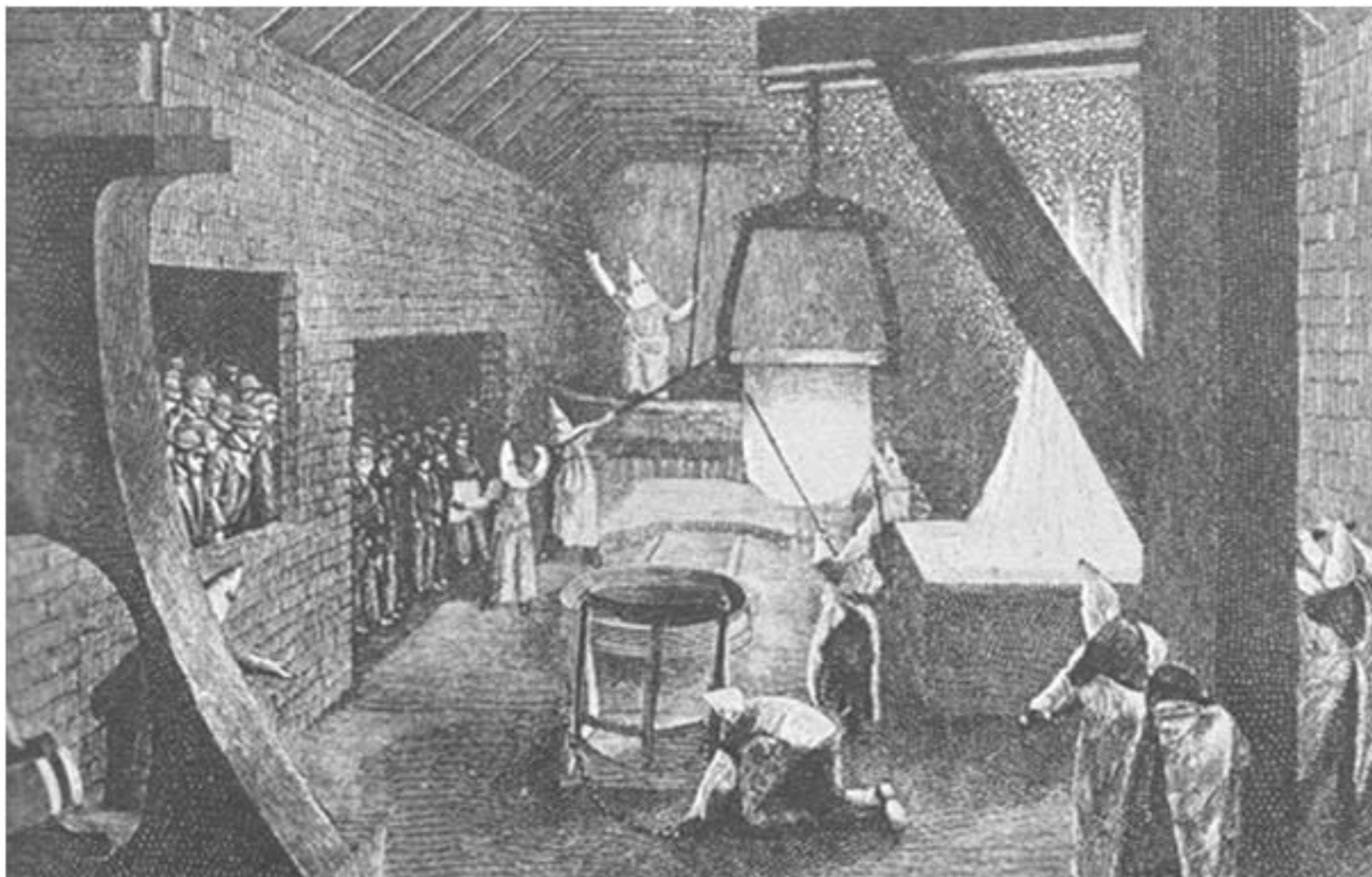
GOTO



メルボルンの48吋反射望遠鏡

- ・オーストラリア人は、グラブの望遠鏡の設置を進めました。そして、威信のある「メルボルン大反射望遠鏡」として設置されましたが、大失敗でした。
- ・グラブは、上の方を極力軽くしたカセグレン式の望遠鏡を設計しましたが、副鏡を小さくしたために振動に弱く使い物になりませんでした。
- ・さらに、ダブリンで製作された金属鏡をオーストラリアに送るとき、鏡の表面に塗った保護シェラック(天然樹脂の一種)をうまく剥がすことができず、磨き直しをしましたがうまく行きませんでした。結局、数年後に廃棄処分されました。

メルボルン大反射望遠鏡の鏡の鑄造風景 GOTO



※三度目の試みでようやく鑄造に成功しましたが、鏡金を使用した最後の大きな鏡となりました。

対物レンズからガラスの鏡へ

ウィルソン山天文台の100吋反射望遠鏡

GOTO

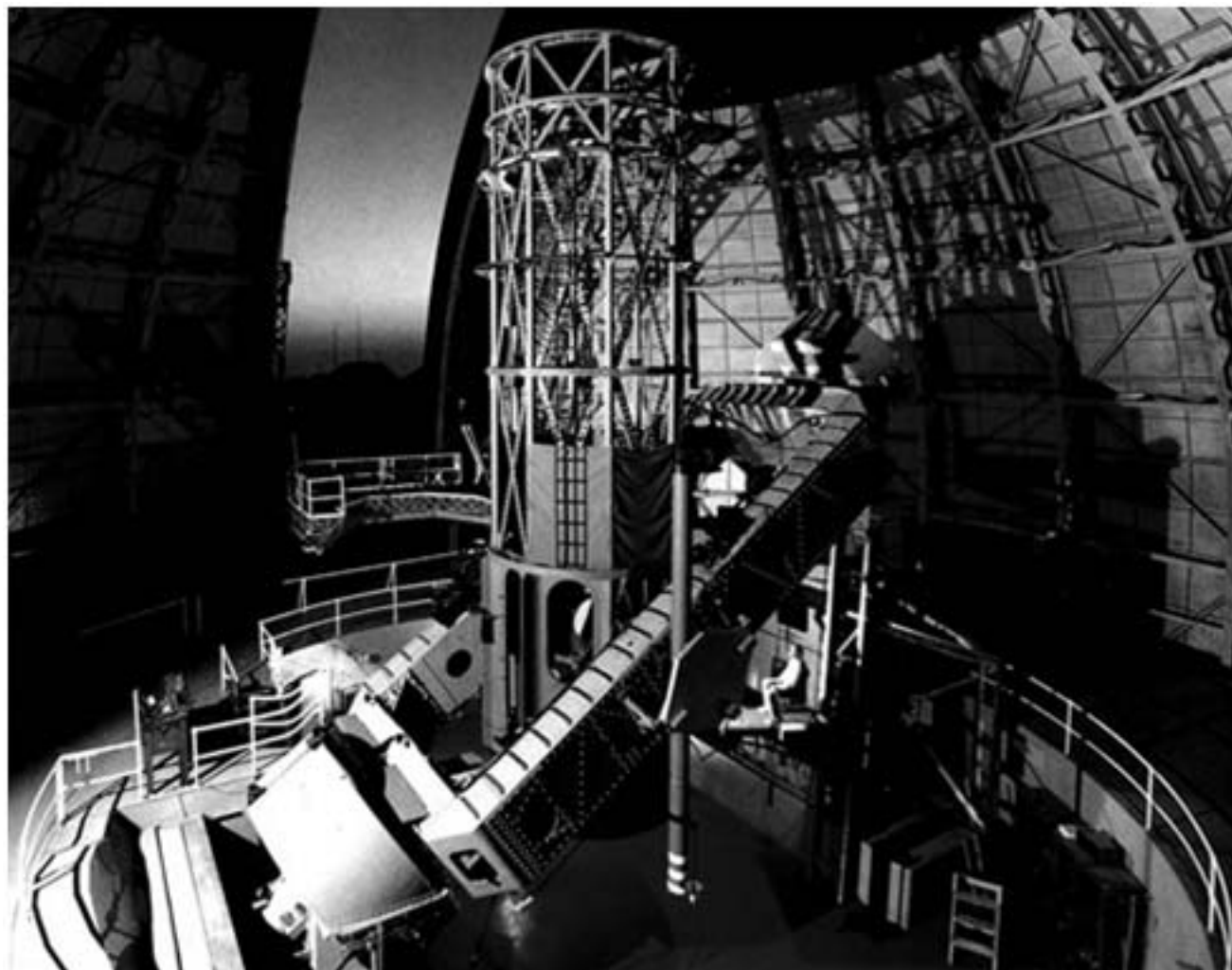


20吋(257cm) 反射望遠鏡

- ・ウィルソン山天文台は、カリフォルニア州ロサンゼルス州の東北にあり、ジョージ・ヘールがカーネギー財団の寄付を得て1904年に作ったものです。
- ・1908年に60吋(152cm) 反射望遠鏡を、1917年に100吋(257cm) 反射望遠鏡を完成、名前もウィルソン山天文台と改めました。
- ・この257cm 反射望遠鏡は、約30年間に亘って世界最大の望遠鏡として活躍しました。アダムスやピースなどの学者がこの望遠鏡を使って恒星のスペクトルの研究を、ハッブルらは星雲の研究をしました。

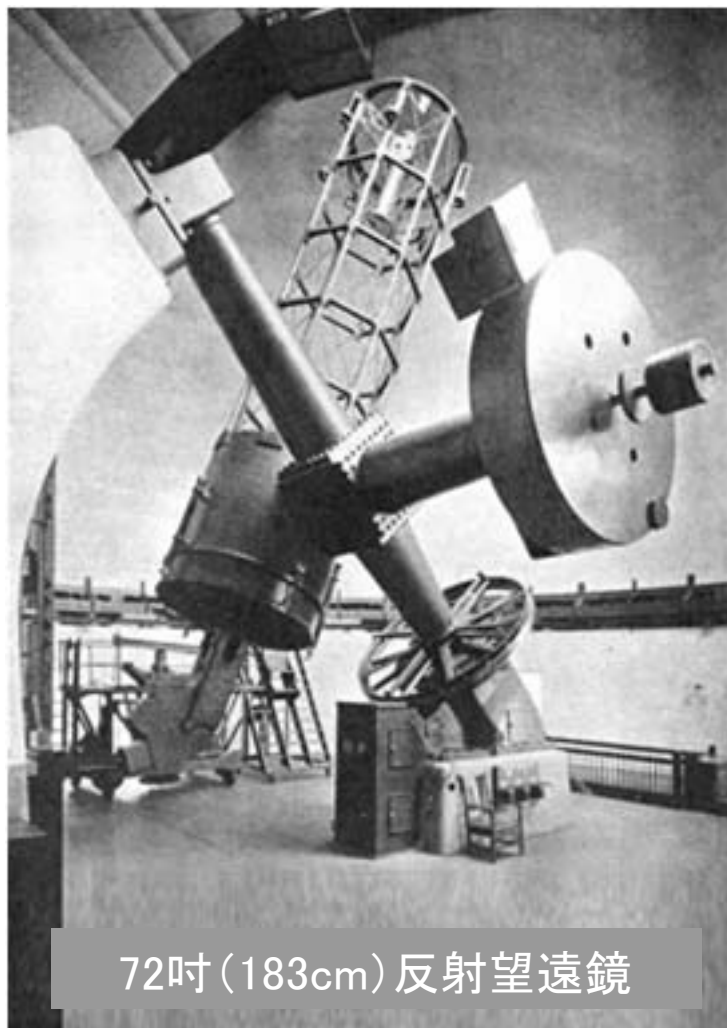
ウイルソン山天文台の100吋反射望遠鏡

GOTO



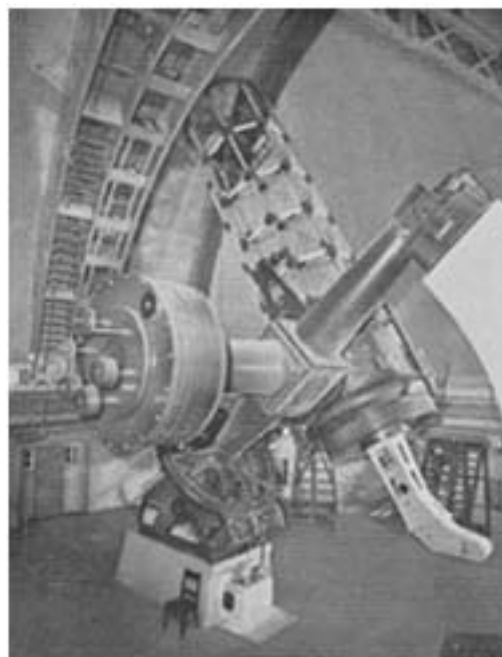
ドミニオン天文台の72吋反射望遠鏡

GOTO



72吋(183cm)反射望遠鏡

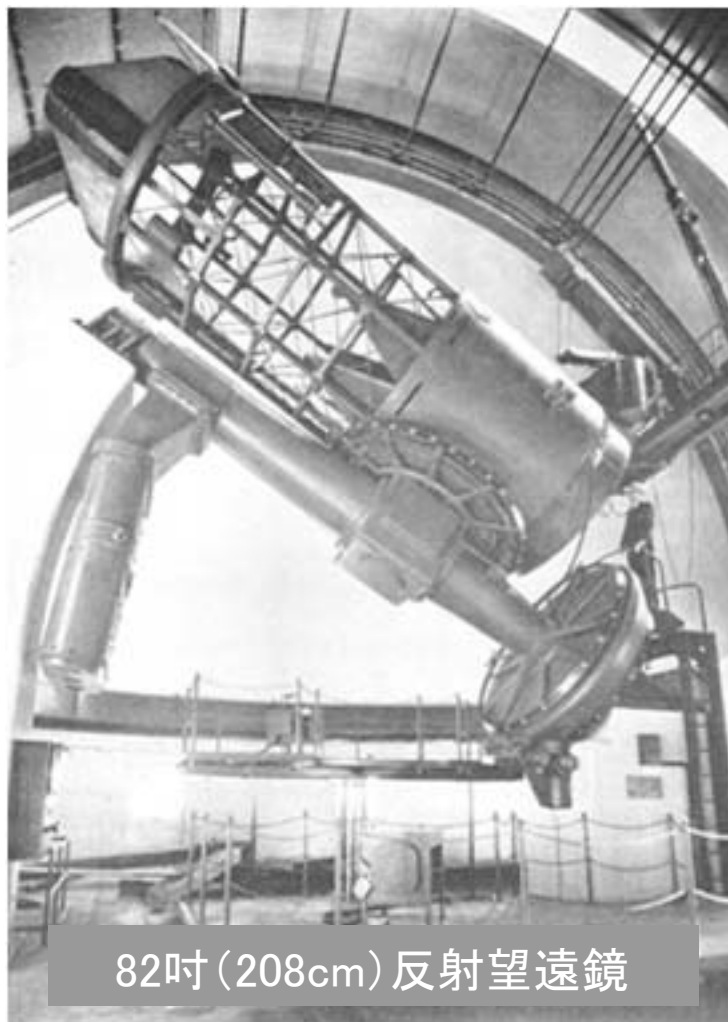
・カナダには、ビクトリアに72吋(183cm) 反射望遠鏡を持つドミニオン天文台と、トロントに74吋(188cm) 反射望遠鏡を持つデビッド・ダンラップ天文台があって、天体のスペクトル観測に励んでいます。



デビッド・ダンラップ
天文台の74吋

マクドナルド天文台の82吋反射望遠鏡

GOTO

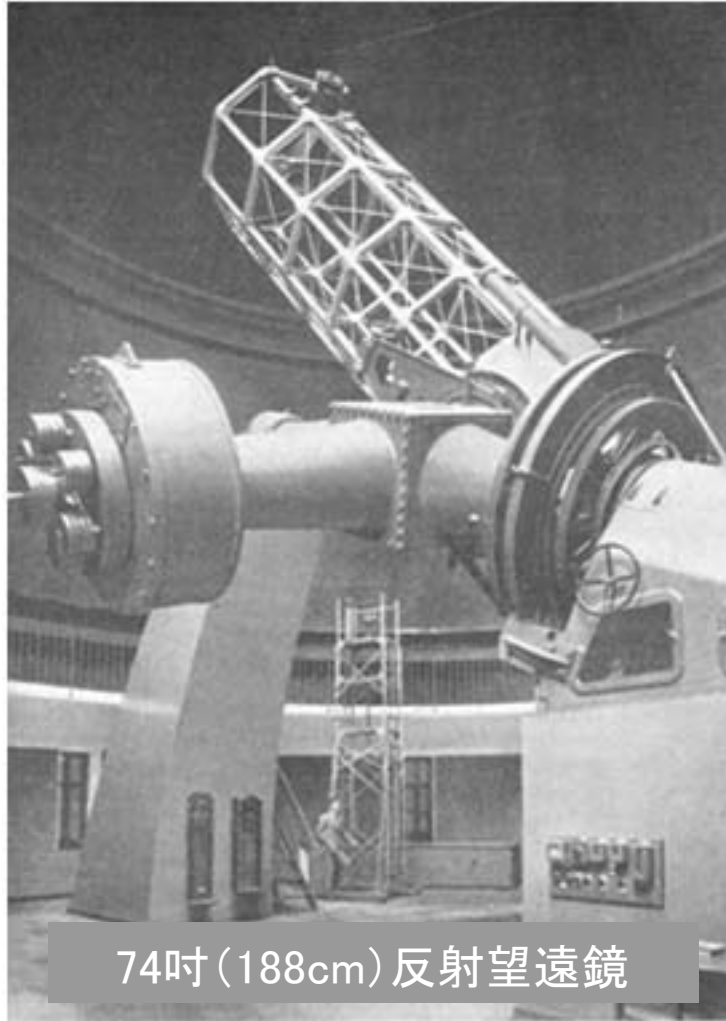


82吋(208cm)反射望遠鏡

- ・ヤーキス天文台は、アメリカの中央部のシカゴの近くにあり、世界一の大きさの屈折望遠鏡(口径102cm)を持っています。これは、ヘールがシカゴの富豪ヤーキスの援助で、1897年に作ったものです。
- ・その後は、82吋(208cm)の反射鏡を持つテキサス州のマクドナルド天文台と共同経営となりました。
- ・創立以来、バーナムやバーナード、ストルーベなどによって、二重星の観測や連星、恒星のスペクトルの研究に重要な成果をあげています。

ラドクリフ天文台の74吋反射望遠鏡

GOTO



74吋(188cm)反射望遠鏡

- ・南アフリカのケープ天文台は、歴史も古く、恒星の位置や二重星、恒星の距離の観測など、南の星の研究に重要な役目を果たしました。
- ・その後は、プレトリアのラドクリフ天文台や、ヨハネスブルグのハーバード天文台出張所が、南の空の銀河や星雲の観測に活躍しています。
- ・ラドクリフ天文台には、日本の岡山天体物理観測所の74吋(188cm)望遠鏡と同じ型の望遠鏡があります。

岡山天体物理観測所の口径188cm反射 GOTO



- パロマー天文台の5mや、リック天文台の3mのような大口径の望遠鏡では、筒の底にある主鏡に当たって反射してきた光が直接に焦点を結ぶ点に観測器具を取付け、人間が筒先のケージに入って観測することができます。
- しかし、口径74吋(188cm)では人間が中には入ってくる星の光を隠してしまうので、筒先の焦点より主鏡に近い所に、斜めに平面鏡をおいて光路を直角にまげ、筒の側面で観測します。
- ドームの鉄骨アーチには、筒先で観測するためのエレベーターがついていて、それに乗って観測します。

パロマー天文台の200吋反射望遠鏡

GOTO



200吋(5m) 反射望遠鏡

- ・パロマー天文台は、ウィルソン山天文台と同じ経営の姉妹天文台です。ウィルソン山の南東200kmの台地の上にあります。
- ・この主望遠鏡の5m反射望遠鏡は、ヘール望遠鏡とも呼ばれるようにヤーキス、ウィルソンの2つの天文台作ったヘールの考えによるものです。
- ・この望遠鏡で苦心したのは、主鏡のガラス材の製作です。ガラス材は温度によって膨らんだり縮んだりして、反射鏡の表面が歪み、天体からの光が1点に集まりません。これが長い間ガラスの表面にメッキした反射鏡の欠点でした。

パロマー天文台の200吋反射望遠鏡

GOTO



- ・そこで、パロマー天文台の5m反射鏡には、膨張や収縮の少ないパイレックスというガラスを使いました。
- ・直径5m、厚さ70cm、重さ20トンの円盤のガラス材を作るのに6年、これを鏡に磨き上げるのに、途中戦争で休んだこともあって10年以上かかりました。
- ・ヘール望遠鏡は、20年以上の年月を要し、600万ドルの費用をかけて、1948年に完成した、世界最大級の反射望遠鏡です。

ソ連の口径6m反射望遠鏡

GOTO



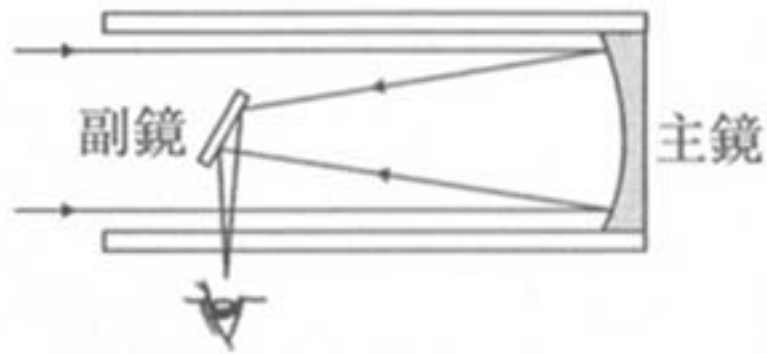
ソ連の6m反射望遠鏡

- ・米ソの冷戦時代、どちらの国も相手をすこしでも上回ることにやっきになっていました。天文学も例外ではありません。ソ連は、6mの望遠鏡を作ることで、世界一の望遠鏡の座をパロマー山天文台の5m望遠鏡から奪おうとしたのです。
- ・計画は1960年頃から始ったようです。建設場所は高度2,100mの北コーカサス山中のゼレンチュクスカヤ天文台。主鏡の直径は6m、厚さ65cm、重さ42トン。これを60ヶ所のレバー平衡錘で支える方式です。これだけの重さになると、赤道儀式では支持できないので経緯台式を採用しました。

反射望遠鏡の種類

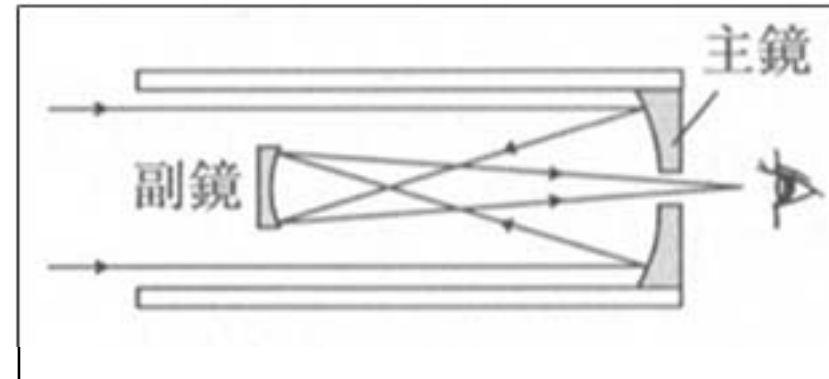
ニュートン式とグレゴリー式

GOTO



ニュートン式の光学系

- ・主鏡の放物凹面鏡と副鏡の平面鏡からなっています。主鏡によって集められた光は、焦点に集まる少し前で、光軸に45° 傾けて置かれた平面鏡により、直角に曲げられて鏡筒の外に導かれ、そこから覗いて見るようになっています。

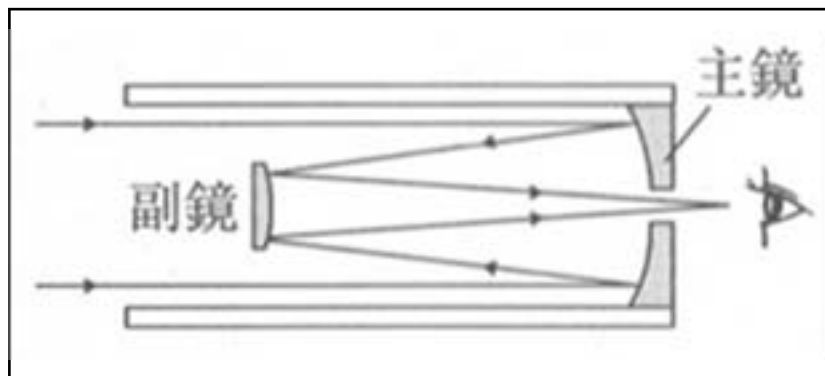


グレゴリー式の光学系

- ・中央に穴のあいた放物凹面鏡の主鏡で反射した光を、小さな楕円凹面鏡の副鏡で反射させ、その光を主鏡の後ろで鏡筒の外に導くようになっています。副鏡が正立レンズの作用をし像が正立するので、天体用よりも地上用として使われました。

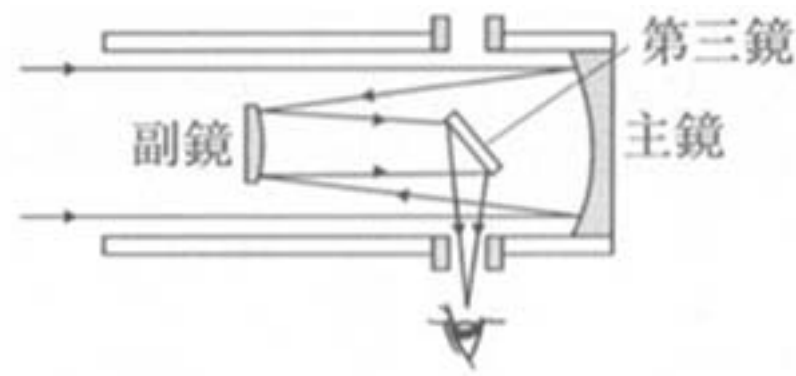
カセグレン式とナスミス式

GOTO



カセグレン式の光学系

- ・グレゴリー式の副鏡を双曲面の凸面鏡とした形式のものです。主鏡で反射した光は、副鏡で主鏡の穴を通して主鏡の後ろで像を結びます。合成焦点距離は、主鏡の焦点距離の3～5倍もありますので鏡筒が短くてすみ、倍率を高くできるのが特徴です。



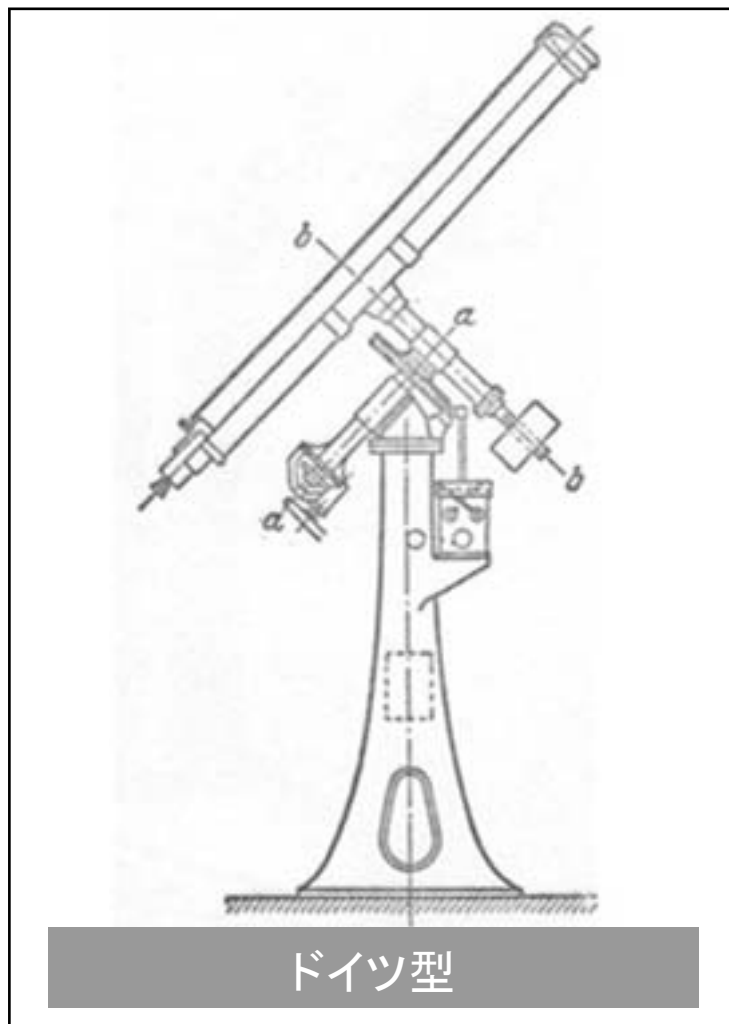
ナスミス式の光学系

- ・1851年にナスミスによって発明されたもので、カセグレン式のように主鏡に穴をあけずに、その手前で平面の3次鏡で光を鏡筒の外に導き出す方式のものです。主鏡に穴をあけないので集光力が増し、鏡面の精度も高くすることができ特徴があります。

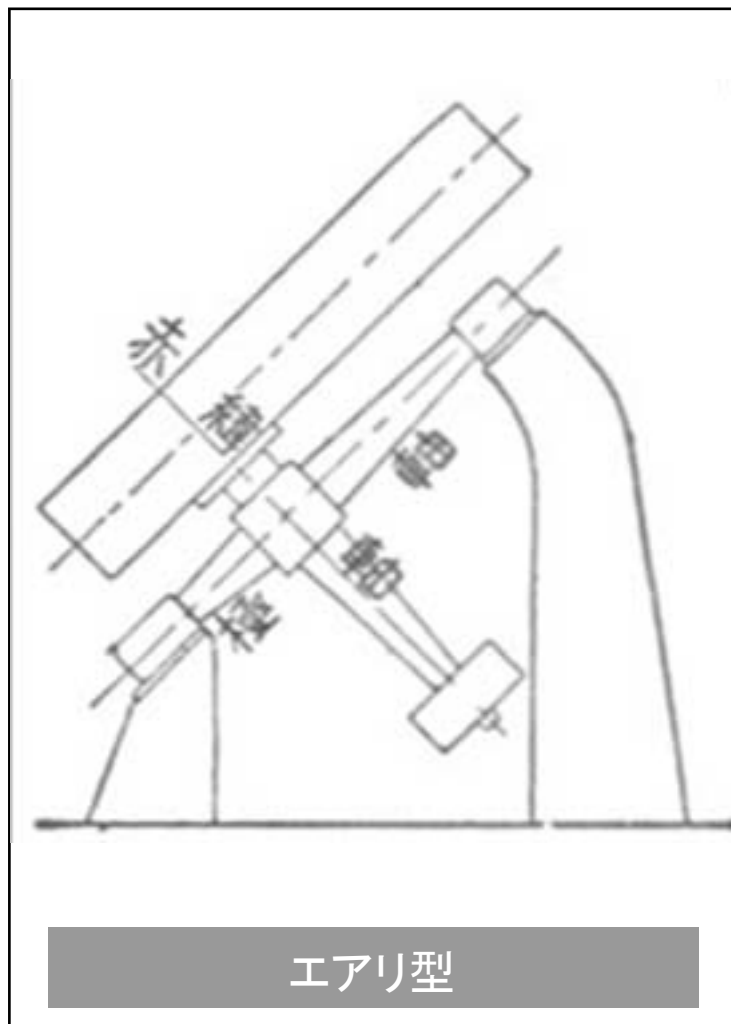
架台の種類

ドイツ型(フラウンホーファー型)

GOTO



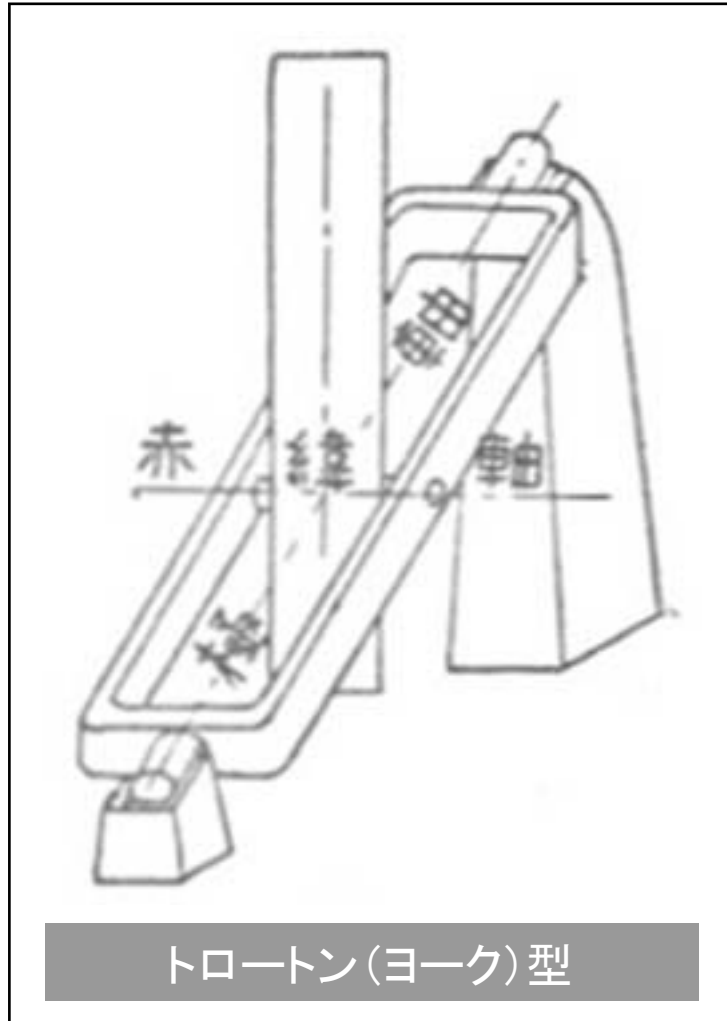
- ・中央に柱(ピラー)を立て、その上に極軸を据え、極軸の上端に赤緯軸を取り付けて、この赤緯軸の一方に望遠鏡、他方に錘(バランスウエイト)を付けた型式の架台です。
- ・この形式は、今から190年程前に、ドイツのフラウンホーファーが発明したところから、「フラウンホーファー型」とも呼ばれます。
- ・ドイツ型の欠点は、①ピラーが子午線付近の天体を観測するときに邪魔になること、②極軸が短いので狂い易く、写真撮影に不便なこと、③バランスウエイトが極軸に余分な負担をかけていることなどです。



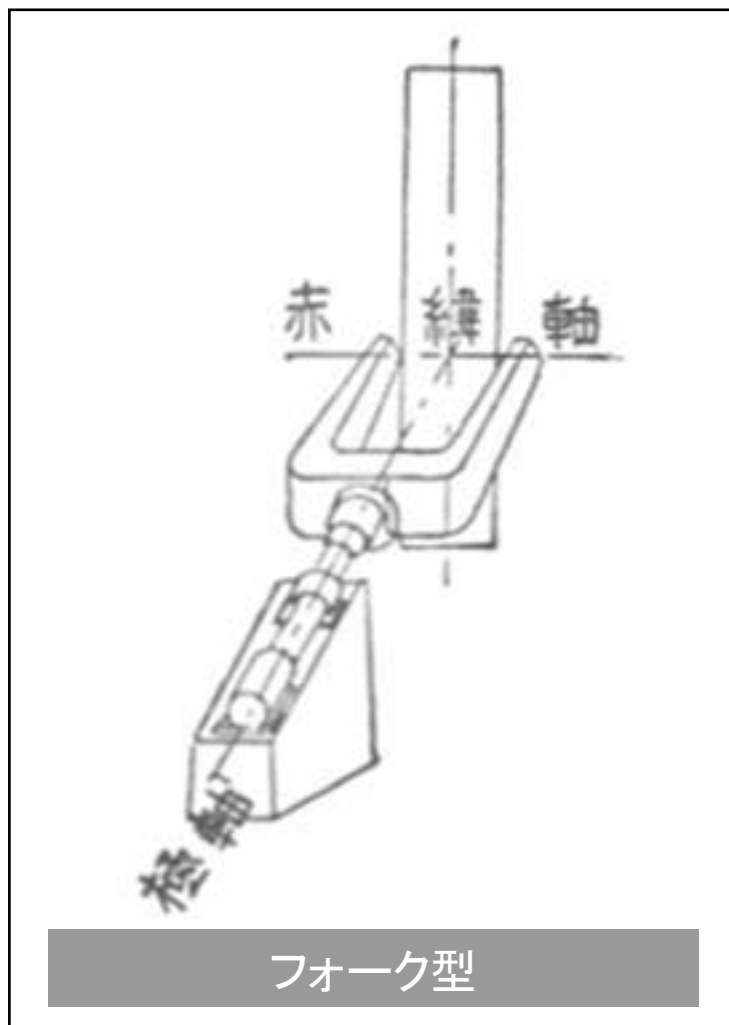
- ・英国式のものは、極軸が望遠鏡よりも長く、その両端を別々の支柱で支えるものです。従って、ドイツ型の欠点の①と②が解消されます。
- ・英国式には2種類あって、その1つが「エアリ型」です。長い極軸の中央付近で赤緯軸が直角に交わっていて、その左右にそれぞれ望遠鏡と錘(バランスウエイト)が取り付けられています。

英国式のトロートン(ヨーク)型

GOTO



- ・英国式の、もう1つが「トロートン型」です。これは、長い極軸の中央を2つのフレームに分けて枠を作り、その中に望遠鏡を入れるという方式の架台で、「ヨーク型」とも呼ばれます。
- ・これは、実に巧妙な方法で、重い錘（バランスウエイト）が必要ありません。従って、ドイツ型やエアリ型よりも優れていると言えます。
- ・このトロートン型は、1885年から写真星図作成同盟の各天文台が標準型の赤道儀として採用しました。ただし、北極付近の天体が観測できないというのがトロートン型の最大の欠点です。



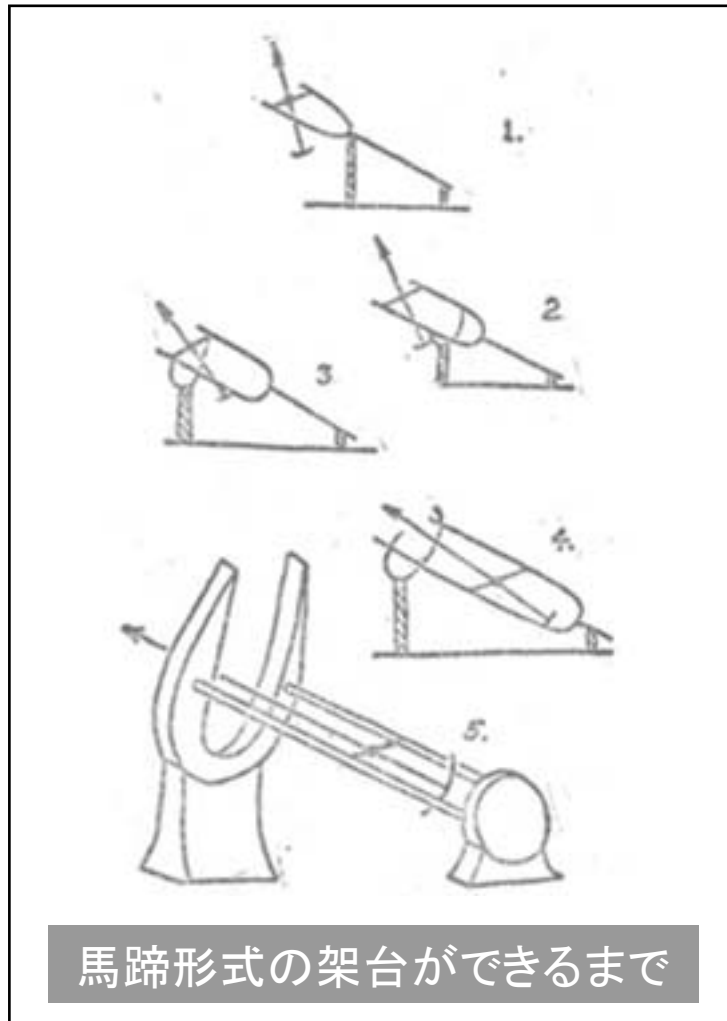
- ・フォーク型は、長い極軸の上端を叉（フォーク）型にし、そのフォークの間に望遠鏡を取付けた方式の架台です。
- ・この型も英国式で、トロートン型の欠点を解消し、全天を自由に観測できる構造です。
- ・望遠鏡の筒の短い近代的な反射望遠鏡の架台としては、理想的な形式といえます。

GOTO



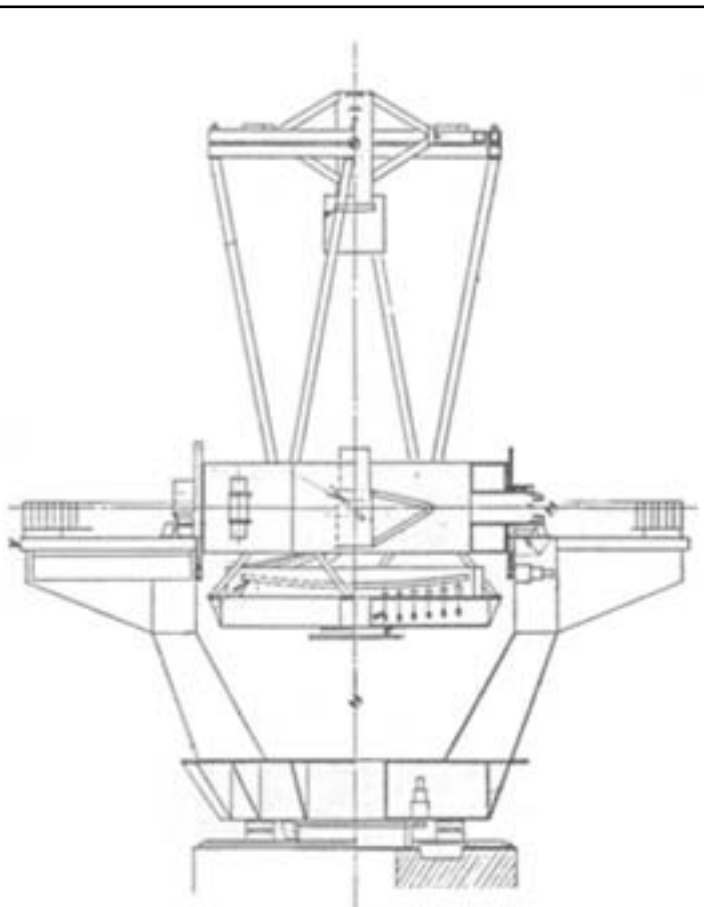
馬蹄形式の架台

GOTO



- ・パロマー天文台の200吋反射望遠鏡の架台は、これまでの経験から考案されたもので、トロートン型の極軸の上端を大きくし、馬蹄形の切り込みを入れて北極を見れるようにしたものです。





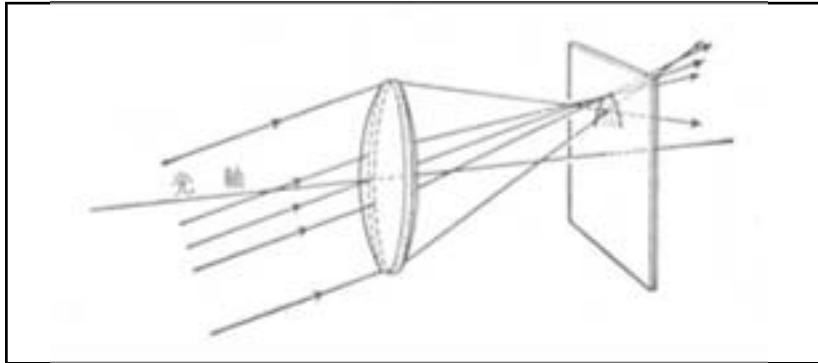
経緯台式の架台

- 架台には、重い望遠鏡の鏡筒を支えると共に、望遠鏡を目的の天体に向けて、天体の日周運動を追尾するという役割があります。
- 架台の型式には、赤道儀式と経緯台式があります。赤道儀式は、これまで説明した通りですが、一般に極軸が傾いていて、重力方向に対して対称でないため、大きな重量を支えるには不利です。
- これに対して経緯台式は、垂直軸と水平軸からできていて、重力方向に対して対称ですから、重量物を支えるのに適しています。

シュミット・カメラの登場

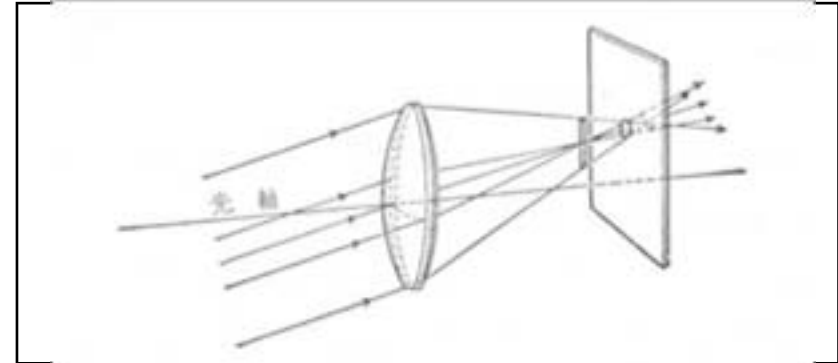
コマ収差と非点収差

GOTO



コマ収差

- ・望遠鏡で星を見ると、視野の中央の星は点像に見えるのに、視野の端の方の星がまるで彗星のように尾を引いて見えることがあります。このような収差をコマ収差といいます。



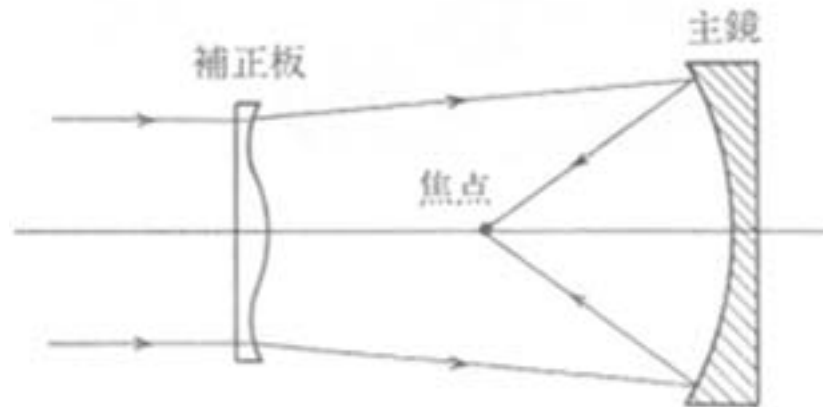
非点収差

- ・レンズの縦の断面と横の断面の形状が異なる場合、レンズの上下を通る光線が奥で交わり、レンズの左右を通る光線が手前で交わるようなことが起こります。その時、手前の方の像は縦長に、奥の方の像は横長になります。これを非点収差といいます。



B. シュミット(1879-1935)

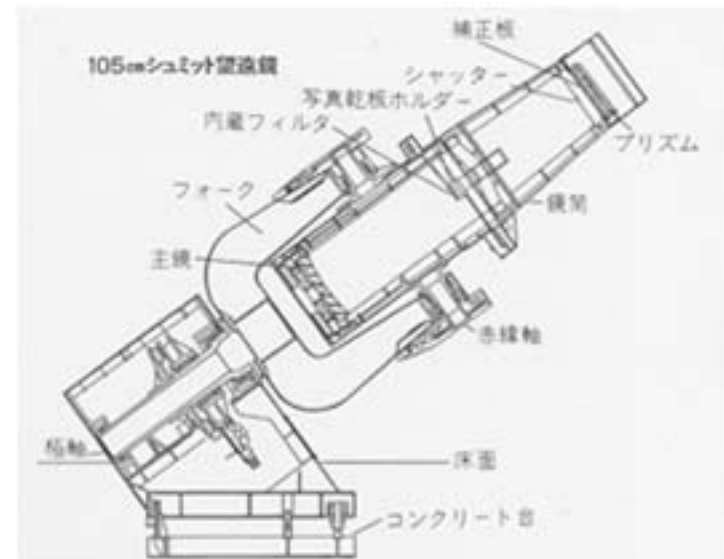
- ・反射望遠鏡の場合、主鏡を球面にすると球面収差が起こるので、放物凹面鏡にするのが普通です。しかし、そうすると球面収差は除去できるのですが、今度はコマ収差が起こってきます。実に、反射望遠鏡の最大の欠点は、このコマ収差にあると言えます。
- ・そこで、反射鏡の改良が叫ばれたのですが、この難問は1930年、ハンブルグ天文台のB. シュミットの天才的方法による補正板の導入によって見事に解決されたのです。この補正板というのは、ほとんど平衡平面のガラス板で、その一面にわずかな変形があります。



シュミット・カメラの光学系

- ・この変形のため、他の収差には影響なく球面収差だけを除去できるのです。彼は、この補正板と一枚の球面鏡(球面鏡はコマ収差を生じない)により、大口径比のものでも視野の周辺までコマ収差

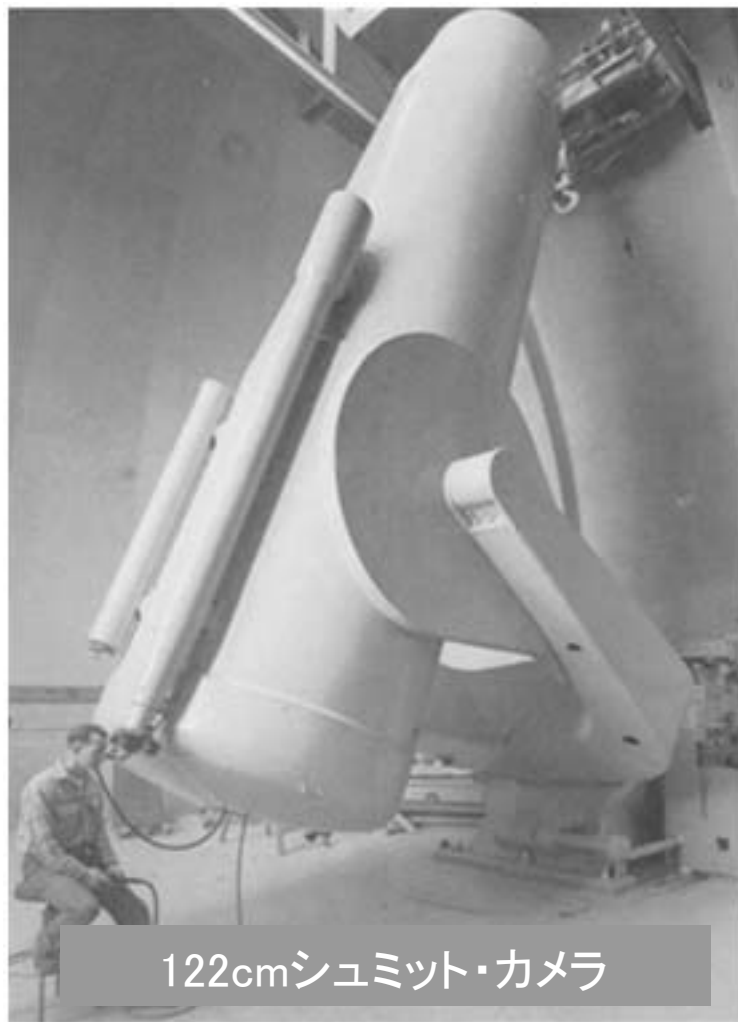
の除去された反射系の製作に成功したのです。そこで、このような補正板をつけた反射望遠鏡鏡をシュミット・カメラ、またはシュミット望遠鏡といいます。



木曾105cmシュミット望遠鏡

パロマー天文台の48吋シュミット・カメラ

GOTO



122cmシュミット・カメラ

- ・パロマー天文台には、口径が48吋（122cm）のシュミット・カメラ等を備え、星雲や恒星の研究をしています。



152cmナスミス反射望遠鏡

リッチー・クレチャン鏡の終焉

GOTO



- ・球面収差もコマ収差もない光学系をアプラナートといいます。2枚の鏡があれば反射鏡だけでこれを達成することができます。
- ・これに類するものに、シュワルツシルドの反射鏡やクーダーの2枚鏡などがあります。どちらもアプラナートで、普通の反射望遠鏡よりも良像範囲がずっと広いのですが、どちらも全長が長く、副鏡による遮光も大きいという欠点があります。
- ・ウィルソン山天文台の152cmと258cmを研磨したG. W. リッチーは、マルセイユ天文台のH. クレチャンにアプラナートのカセグレン鏡の研究を勧めました。

リッチ・クレチャン望遠鏡

GOTO



RC望遠鏡第1号機

- ・H. クレチャンは1922年に、このようなアプラナー2枚鏡系の設計に成功しました。
- ・クレチャンが計算してリッチャーが研磨した望遠鏡、即ちリッチー・クレチャン望遠鏡(RCと略します)の第1号機は、主鏡の口径102cm、全系の焦点距離680cm、F6.8で、1934年にワシントンのアメリカ海軍天文台に設置されました。

キットピークのメイヨール望遠鏡

GOTO

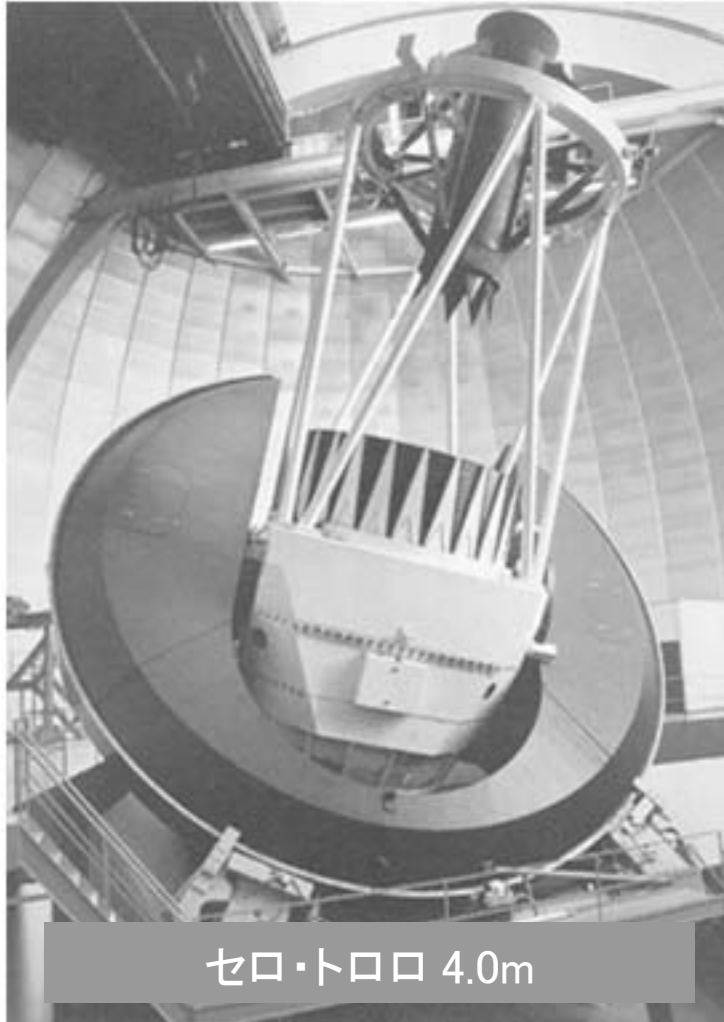


キットピーク 3.81m

- ・パロマー天文台の口径5mのヘール望遠鏡は、いろいろな意味で究極の望遠鏡でした。その後、しばらく5m以下の望遠鏡が世界中で作られました。これは、光電子増倍管などの高感度検出器の発明によって、2～3mの望遠鏡でも世界的水準の観測を行うことが可能になったからです。
- ・1960～1970年代、写真観測を意識した3～4mの望遠鏡が作られました。カセグレン焦点で広い視野のとれるリッチー・クレチャン、小型で経済的なドームに合った短焦点、セルリエ・トラスとフォーク架台、油圧軸受など共通点を多くもっていました。

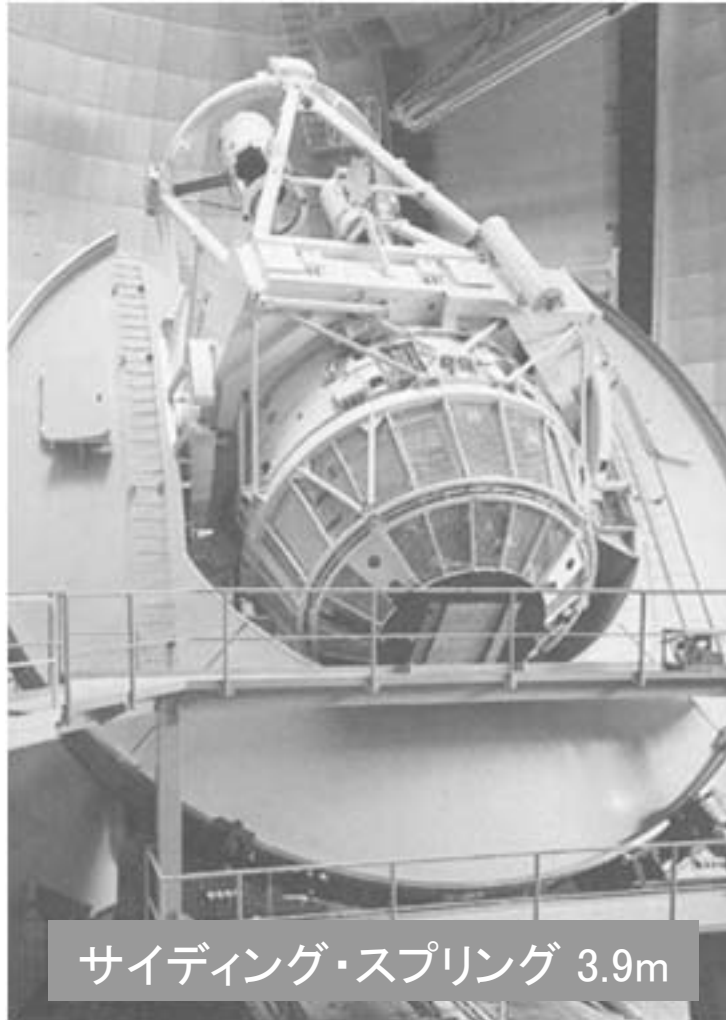
インター・アメリカン天文台の望遠鏡

GOTO



- 1960年代、光電子増倍管のような光電陰極を用いて2次元の像が記録できる装置の開発が行われ、カーネギー財団の援助でカスケード式のイメージ像倍撮像管は、写真に比べ数百倍の感度をもたらしました。しかし、これらはどれも最終検出器は写真乾板でした。
- 1970年代に、光子から生じた電子を電氣的に読み出し、直接コンピュータで引き出す装置の開発が始まりました。リック天文台ではシリコンチップを写真乾板の代わりに並べ、光子から出て加速された電子をダイオードにぶつけ、それから出る電流パルス进行数えるディジコンを開発しました。

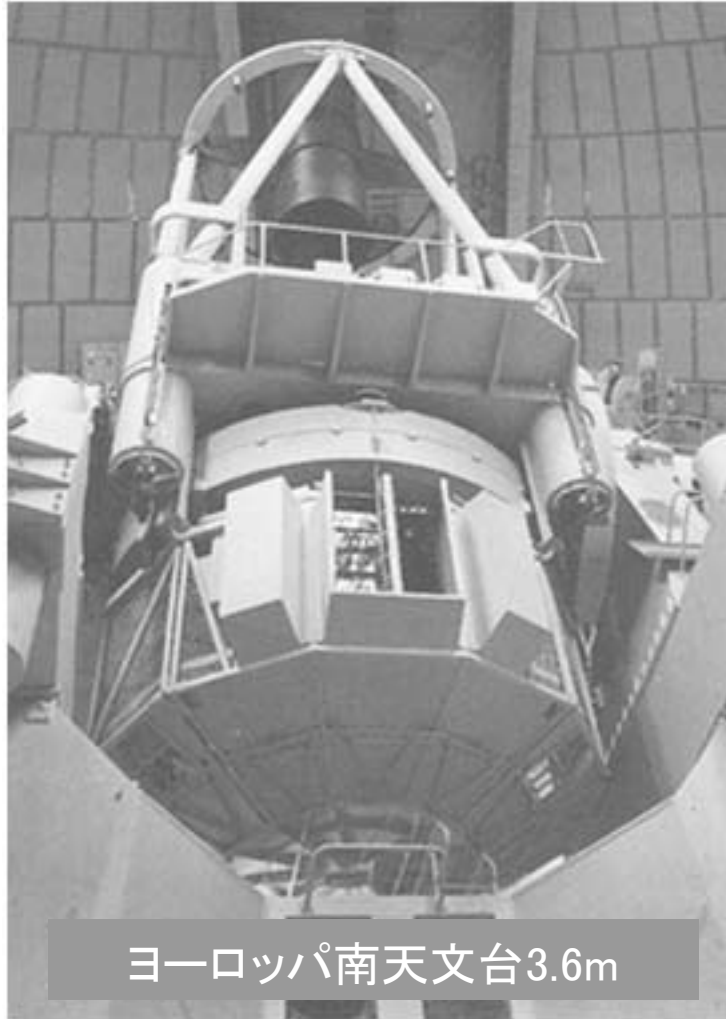
アングロ・オーストラリアン天文台の望遠鏡 GOTO



- ・また、カスケード式撮像管は、写真乾板の代わりに天文用の遅い読み出しのテレビカメラに置き換え、電子信号を読み取る装置で、イギリスのボクセンバークの開発した光子像計数検出器は、入射する光子の4分の1を計数するまでに到達しました。
- ・このような進展に合わせるように1970年代に3～4mの望遠鏡が5台あいついで作られました。3台は設計が似ており、最初がアメリカのキットピークのメイヨール望遠鏡、2台目はチリにあるインター・アメリカン天文台のもの、3台目はオーストラリアのアングロ・オーストラリアン天文台のものです。

ヨーロッパ南天文台の望遠鏡

GOTO



ヨーロッパ南天文台3.6m

- ・あとは、ヨーロッパ南天文台、ハワイのカナダ・フランス・ハワイ天文台です。
- ・ところで、リッチー・クレチャンの主鏡は、主焦点では良い像にならないので、チャールス・ワインが補正レンズを開発しました。彼は、旧式のカセグレン式望遠鏡の主焦点でも、簡単に良質な像が作れるように補正できるという指摘をしました。そのため、天体を撮影するのにリッチー・クレチャン式の焦点を使う者は、ほとんどいなくなったのです。
- ・こうして、リッチー・クレチャンの時代は終わったのです。

大口径望遠鏡の競争

口径8.2mのすばる望遠鏡

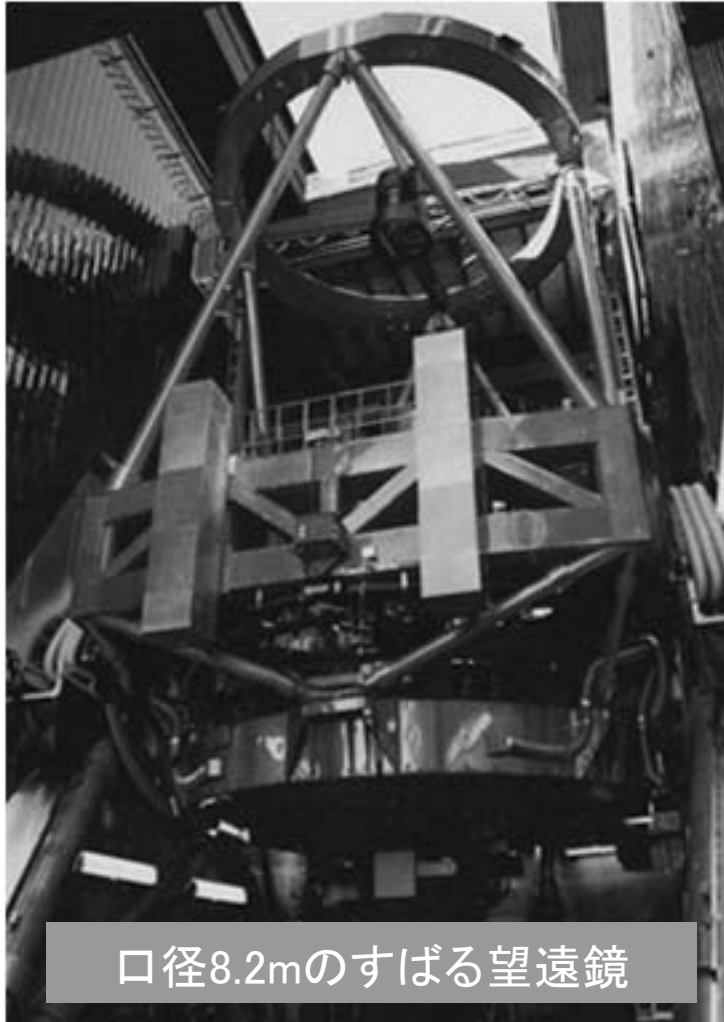
GOTO



- 第二次大戦後、赤外線検出器が天文学に登場し、アメリカのノイゲバウワーとレイトンが「2ミクロン・サーベイ」を行い、5,500個余りの赤外線星を発見しました。しかし、可視光に対応する天体はわずかでした。これが研究者の興味を引き立て、たくさんの赤外線望遠鏡が作られました。
- 赤外線は可視光と違い、望遠鏡のドーム、そして人までが赤外線を出し、さらに大気の赤外線にあけられた窓は大変狭いのです。大気の吸収の主役は水蒸気と二酸化炭素であるため、観測は航空機や気球で望遠鏡を上空に上げる必要があります。

口径8.2mのすばる望遠鏡

GOTO

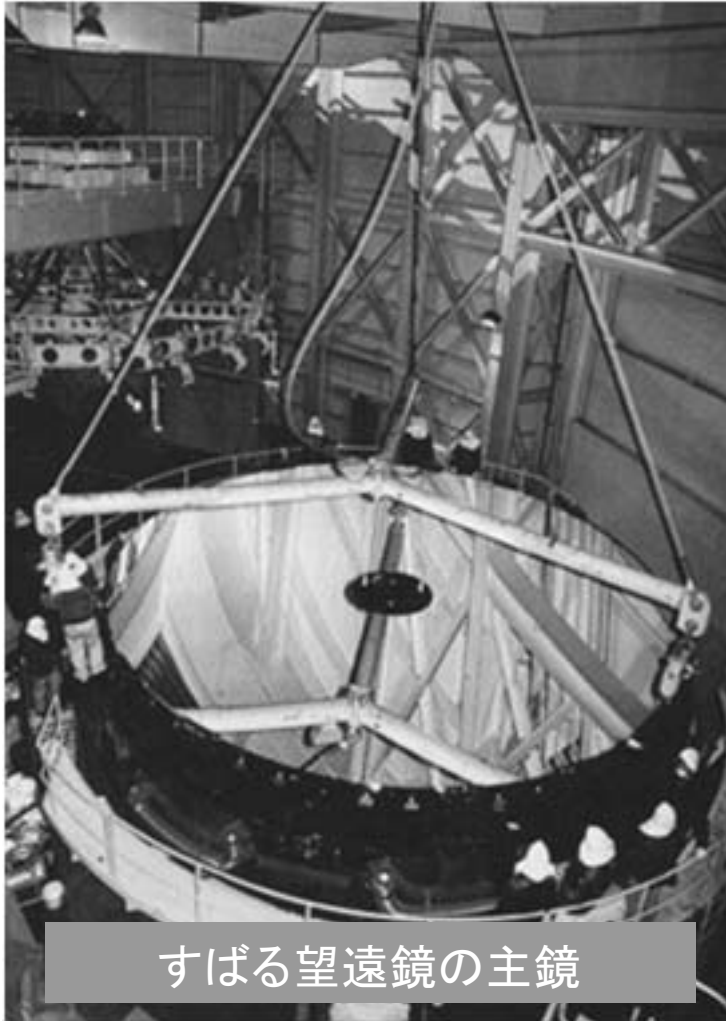


口径8.2mのすばる望遠鏡

- ・さらに困るのは、望遠鏡自身が放出する赤外線は、10ミクロン帯では観測する天体の数千倍も明るかったのです。1970年代になり赤外線の観測は、大気吸収の少ない高い山頂に望遠鏡を設置するか、大気外に出たスペースでの観測に分れて行きました。
- ・当初、赤外線検出器の感度が悪く、望遠鏡は高精度のものは必要ありませんでした。しかし、1980年代ごろから波長の短い近赤外域で、高感度の検出器が開発され、さらに可視光の「CCD」と呼ばれるシリコン検出器に対応する2次元のアレイ検出器が登場し事情が変ってしまったのです。

口径8.2mのすばる望遠鏡

GOTO



すばる望遠鏡の主鏡

- ・望遠鏡に要求される像質も可視光と変わらないものになってきました。しかし、望遠鏡からの熱放射は依然として問題で、副鏡をなるべく小さくしてそれを支える支持構造をできるだけ最小に抑える必要があります。究極は、望遠鏡全体を熱放射が効かなくなる温度まで冷却することです。
- ・一方、検出器の進展は中断なく続けられ、CCDの効率が1990年代に入り波長によっては100%近くまで向上してきました。このような限界を多くの人々が認識しはじめ、パロマー天文台のハール望遠鏡を超える大口径望遠鏡の真剣な検討へと向かわせました。

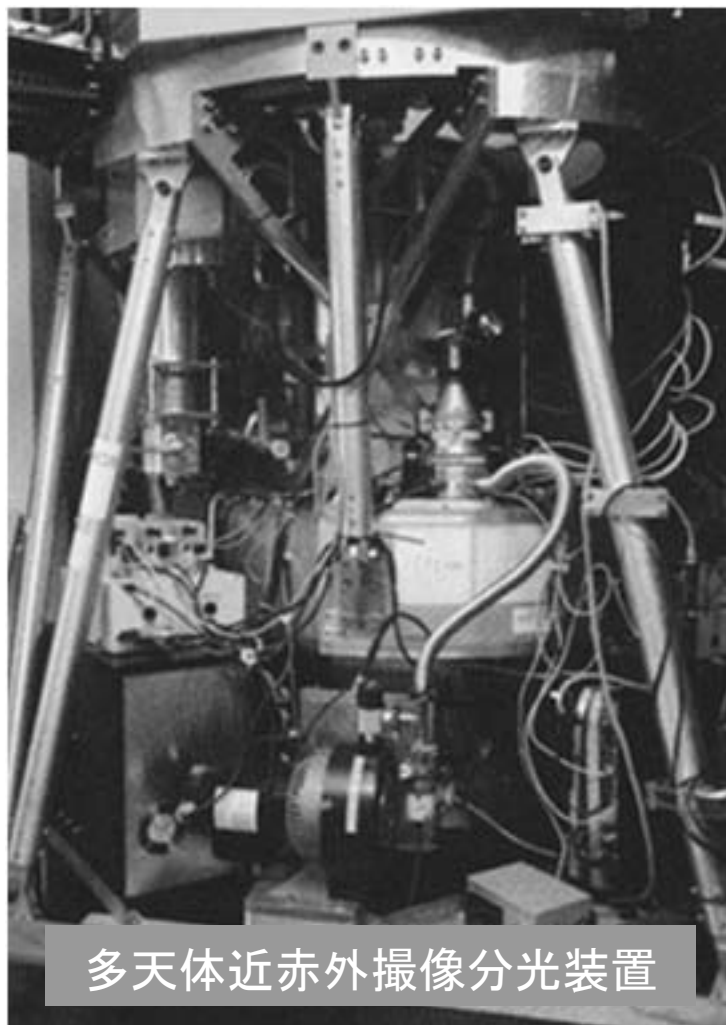
口径8.2mのすばる望遠鏡

GOTO



すばる望遠鏡の観測装置

- これまでの経験から、望遠鏡の建設コストは口径の2.6乗則に従うことが知られています。例えば、16mの望遠鏡は、4mの望遠鏡の $(16/4)^{2.6} = 36.7$ 倍、数千億円が必要とされるのです。
- 従来のような重厚な鏡、赤道儀式の架台を続ける限り、多くの国が経費を分担しても、到底説得できる額ではありません。
- 経緯台式の架台のほか、新しい技術による望遠鏡はどのようなものになるか、1977年のジュネーブでの会議、1980年のツーソンでの会議を通して、明らかになってきました。



多天体近赤外撮像分光装置

- 大きく分けて
 - ①1枚鏡(単一鏡、モザイク鏡など)の反射望遠鏡。
 - ②1つの枠に複数の鏡を収納した多重望遠鏡。
 - ③複数の望遠鏡をアレイ配置し中央実験室に情報を送るアレイ望遠鏡。
- の3つが現実案として浮かび上がってきました。口径としては、10m、16m、25mの望遠鏡が話し合われました。
- 最初に実現したのは、アリゾナ州のホプキンス山の口径4.5mの多重望遠鏡(Miltiple Mirror Telescopeの頭文字をとってMMTといいます)で、1978年の完成しました。

ホプキンス山天文台のMMT

GOTO



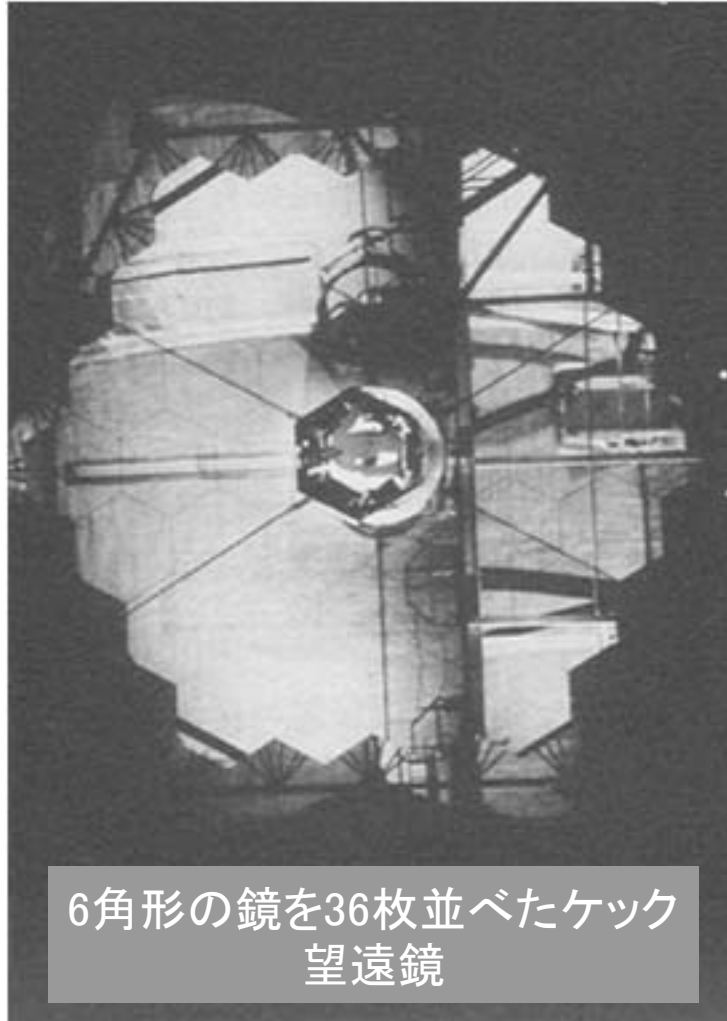
ホプキンス山天文台のMMT

- これは、1.8mの鏡6個をアクチュエーターの上に並べ、レーザーシステムによってその配列をモニターし、6つの焦点を一致させるように制御するというものです。
- また、ドームは伝統的な半球型ではなく、望遠鏡と一緒に回転する箱型で、半球型に比べると小さく、地上からの空気の乱れを入りにくくしてあり、シーリングの改善の効果は大きかったようです。
- これからの望遠鏡ドームの進むべき方向を示した点で注目されます。



星のゆりかごS106

- ・1枚鏡の反射望遠鏡の中で、テキサス大学の7m単一鏡の望遠鏡と、カリフォルニア大学の10mモザイク鏡の望遠鏡が注目を集めました。
- ・テキサス大学の7m望遠鏡は、主鏡は1枚ものとし複雑なサーボコントロールによらないで働くように設計され、コスト軽減のため短い焦点距離が考えられて、焦点距離と口径の比は2を切るものでした。



6角形の鏡を36枚並べたケック
望遠鏡

- ・カリフォルニア大学の10m望遠鏡は、1.8mのユニット鏡36枚がアクチュエーターの上に並べられ、センサーと組み合わせて1枚の放物面鏡になるようにサーボコントロールされます。
- ・モザイク1枚1枚は大きな放物面鏡の部分を構成するように研磨されなければなりません。このため、鏡に適切な力をかけて曲げておいて研磨を行い、その後、力を解放すると所望の部分鏡となる技術が開発されました。カリフォルニア大学の努力は、ハワイのマウナケア山頂に、ケック天文台の10mモザイク望遠鏡として結実しました。



8m鏡を4つ並べたVLTの模型

- ・ヨーロッパ南天天文台の8m望遠鏡4台をアレイに並べ、中央実験室に4台からの光を集め、超高分散分光器に光を入れたり、光赤外干渉計として利用することができます。
- ・この望遠鏡の特徴は、4台一緒に使うこともできるし、4台を個別の望遠鏡としても利用できることです。

GOTO

END
