

宇宙の観測と技術

第4章 望遠鏡の大型化

8. 5m クラスまで

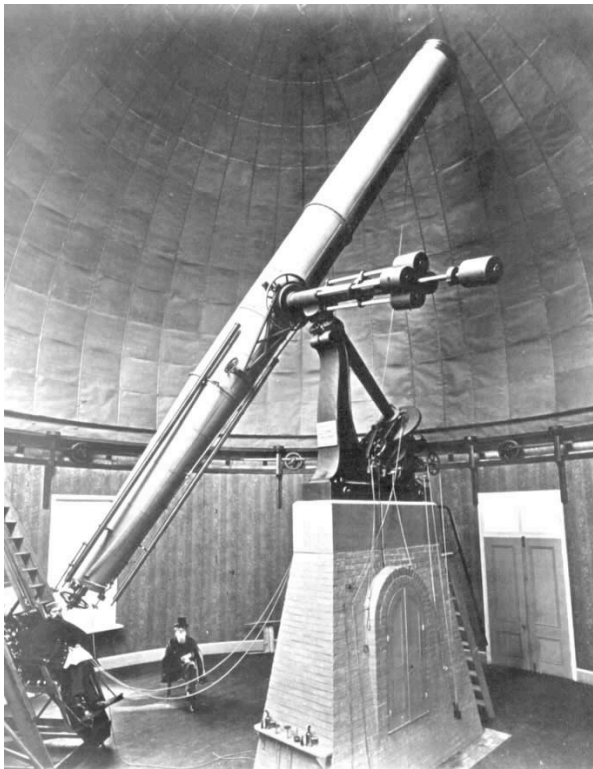
天文学者にとって望遠鏡の口径は大きい方がよい。大きな集光力は、より短時間でデータを収集でき、より暗い（小さい、または遠方の）天体まで検出できるからである。また大口径ほど分解能が高くで理論的に詳細な天体画像を取得できる。

しかし望遠鏡の大型化には自重変形の増大と精度確保という矛盾した問題がある。ここでは国内外のエポックメイキングな望遠鏡を題材に、望遠鏡の大型化に伴う技術的な発展を見ていく。

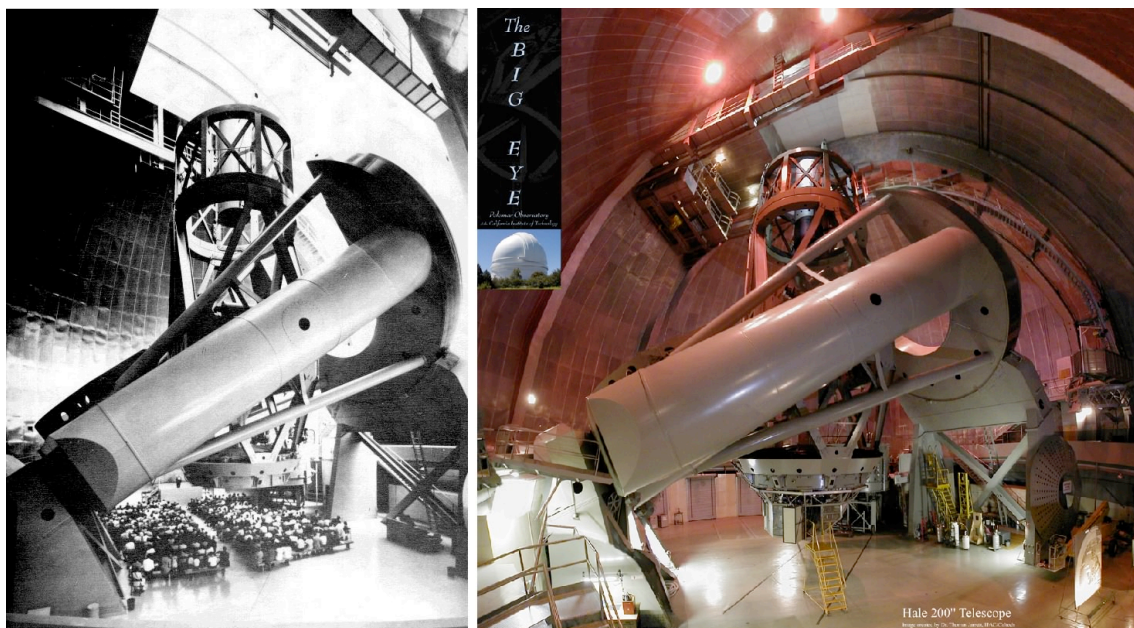
8-1. レンズか鏡か

まず望遠鏡を大型化するのにはレンズと鏡のどちらが有利か。答えから言えば、断然、鏡が有利である。まず凹面鏡を造るにはガラスを一面だけ磨けばよい（ただし磨く精度はレンズの2倍要求される）。レンズの場合は単レンズで2面。色消しレンズでは2枚以上の組み合わせなので都合4面以上（2面×構成枚数）を磨く必要がある。加えて透過や屈折に関して均質なガラス材を作るのが難しい。

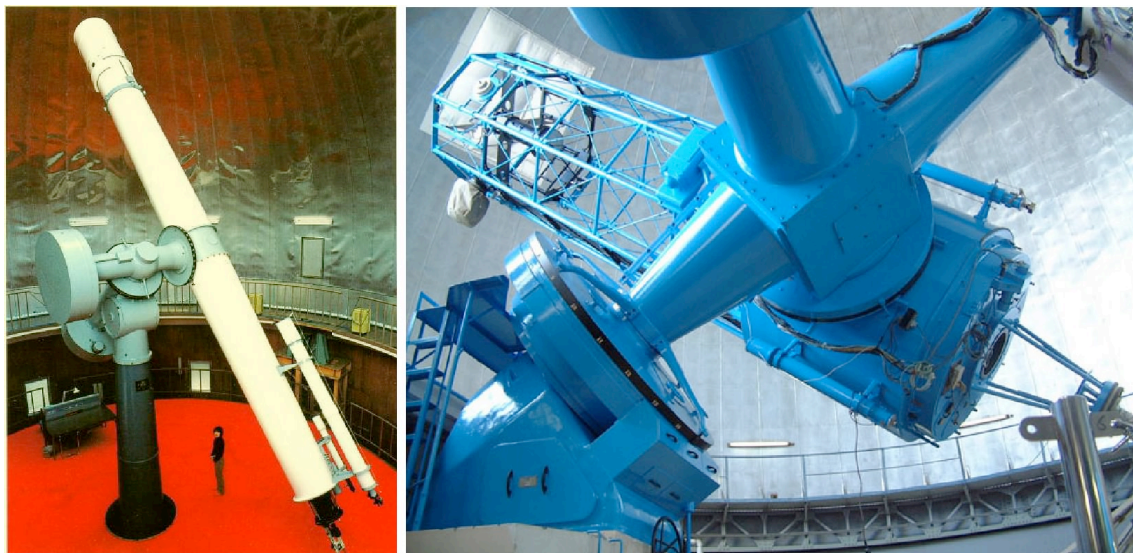
旧来の機械工学で到達した大きさの限界は、屈折式望遠鏡としてはヤーキス天文台（シカゴ大学）の口径101cmで1897年製。



同じく反射式望遠鏡としてはパロマー山天文台（カリフォルニア工科大学）の 5m で 1948 年製である。

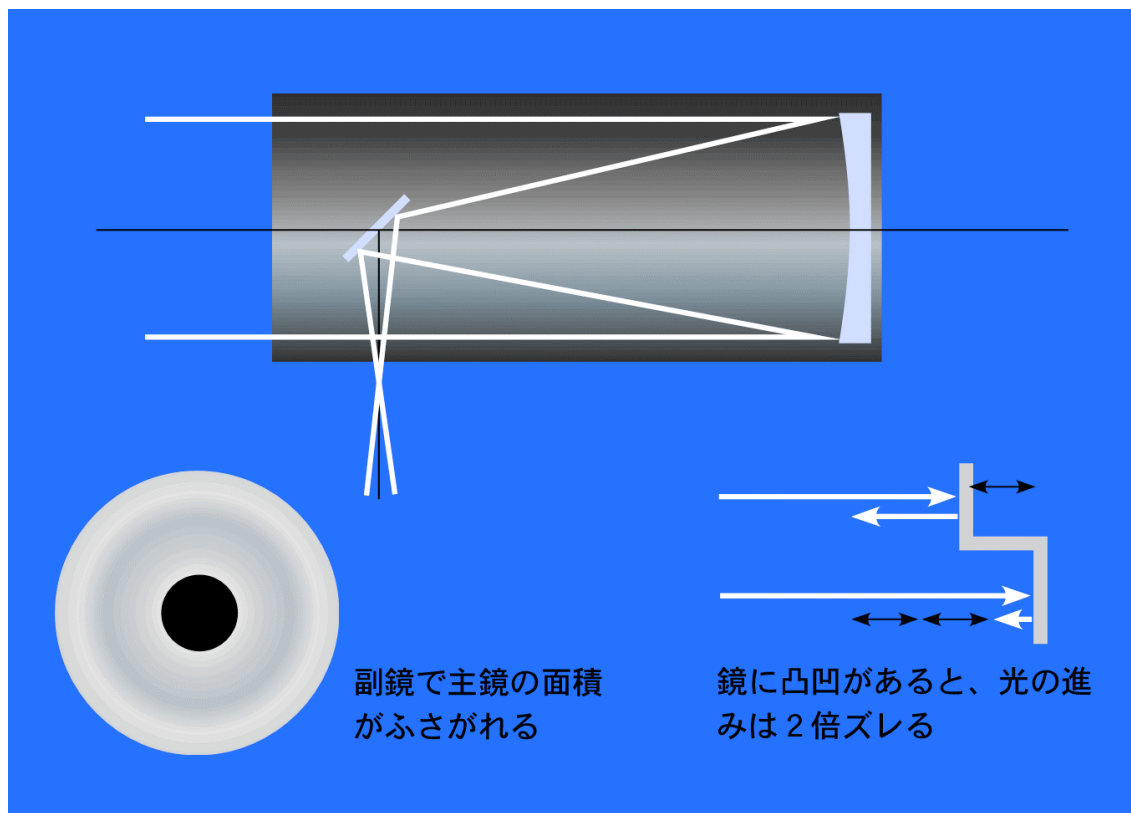


国内の望遠鏡で対応するのは、屈折望遠鏡は飛騨天文台（京都大学）の 65cm で 1972 年製。反射望遠鏡は岡山天体物理観測所の 188cm で 1960 年製。どちらも完成時は東洋一の大きさ（188cm は世界 7 位）であった。



飛騨の 65cm 屈折望遠鏡はカールツアイス（ドイツ）製。岡山の 188cm 反射望遠鏡はクラブパーソンズ（イギリス）製。

ここまで書くと反射望遠鏡は良いことばかりなのかもしれない。もちろん反射式にも欠点はある。代表的な問題点を示しておく。



また反射望遠鏡では鏡筒が密閉されていないので、風や外気との温度差によって鏡筒内部に気流が発生して見え味が悪くなることもある。

簡単に言えば、

屈折望遠鏡は、最高性能よりは、いつでも一定の性能が出せる安定性の良さ
反射望遠鏡は最高性能勝負、だが引き出すには条件と事前の準備が必要

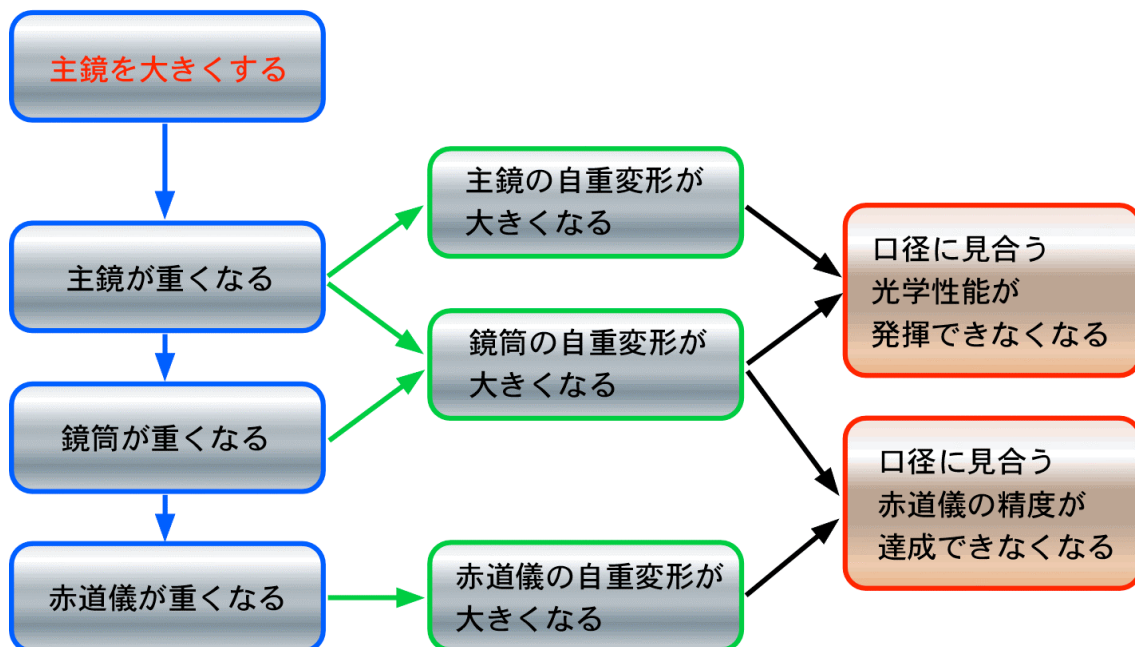
ということである。

小型の反射望遠鏡では使用する1時間前から屋外に出し、望遠鏡の温度を外気と馴染ませるのが良い。また天文台にある大型反射望遠鏡は、日頃から夜の気温にあわせて冷房するのが常識となっている。

8-2. 大型化の問題点

20世紀半ばで望遠鏡の大型化は一旦足踏みをする。大型化を阻んだ技術的な問題は機械工学上の限界と言える。性能向上を狙って鏡の直径（口径）が大型化すると鏡は重くなる。鏡が重くなるとそれを支える鏡筒も重くなる。鏡筒が重くなると、鏡筒を動かす架台も重く頑丈に造らねばならない。こうして大きくなった重量級の望遠鏡は自重変形が大きくなりすぎ、光学的にも機械的にも口径による性能向上に見合った精度が得られなくなってしまう。

大型化のジレンマ



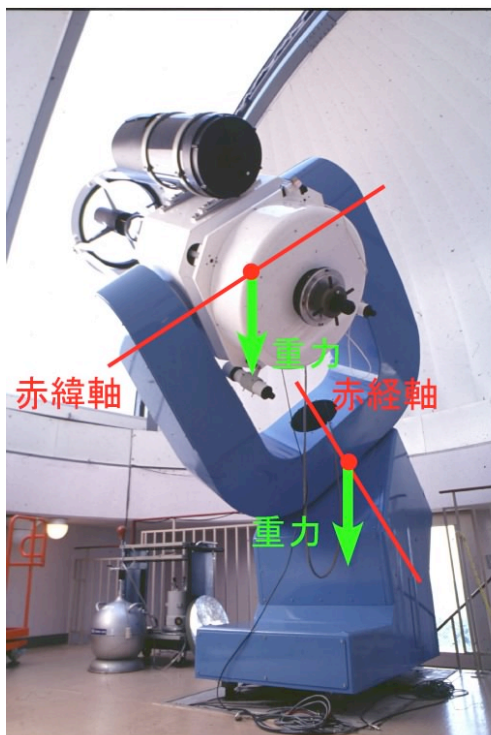
9. 5 mから8 m超クラスへ

20世紀の終盤になると5 mを超える望遠鏡大型化への技術的な活路が見出されて来た。1976年になるとロシア（旧ソ連）のゼレンチュクスカヤに口径6 mのBLT望遠鏡が登場した。それはこれまでの大型望遠鏡の常識を打ち破る経緯台の望遠鏡であった。

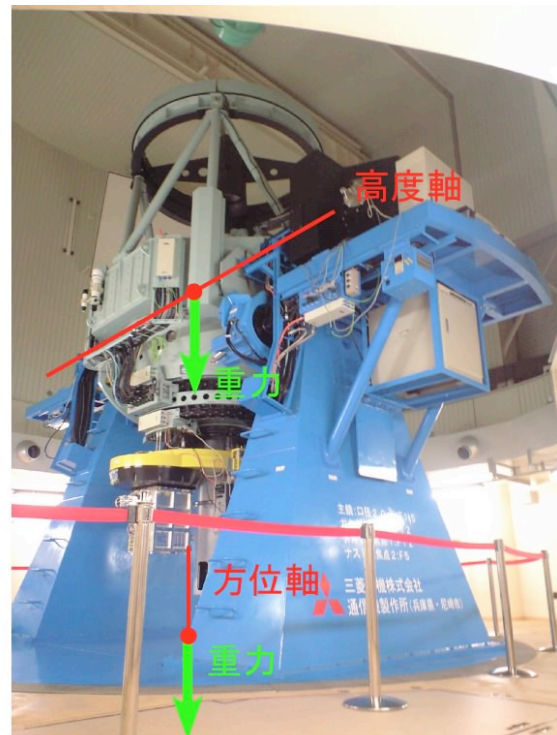


9-1. 経緯台の構造上の利点

経緯台が望遠鏡の大型化にどんな利点があるのか。重要なポイントは鏡筒を支え駆動する軸が高度軸と方位軸になることで、重力の働く方向と機械軸との関係が素直になったことである。



西はりま天文台60cm望遠鏡
(フォーク式赤道儀)

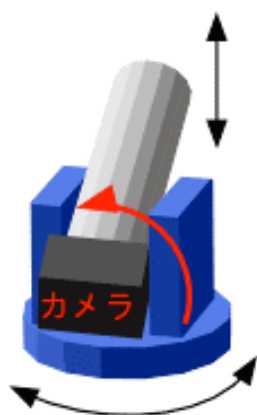
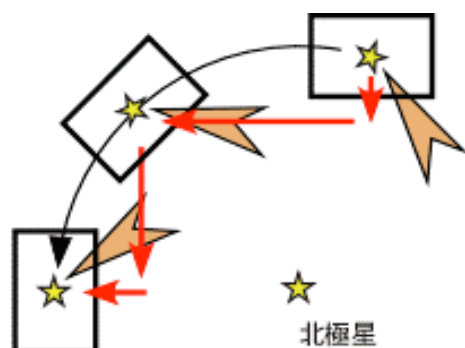


西はりま天文台2m“なゆた”望遠鏡
(経緯台)

赤道儀は斜めに傾いた回転軸で鏡筒を支持する構造である。しかも鏡筒の向きが変わると赤道軸に作用する鏡筒重量の負荷方向が変化するため、自重変形が複雑になり機械的誤差を見積もることが難しい。これに対して経緯台では鏡筒重量負荷と軸との関係は高度・方位の両軸とも一定である。このため経緯台は赤道儀に比べて重量物を支持する構造としてはシンプルであり、頑丈さと精度を両立することができた。

9-2. 電子計算機の進歩

B L T 望遠鏡では天体の追尾に、長足の進歩を遂げはじめたコンピュータが活用された。経緯台では天体の高度・方位の変化に合わせ、望遠鏡の高度軸・方位軸の回転速度を刻々と変化させながら駆動する。また視野回転を相殺するためにカメラを視野回転に同期させるか、カメラは固定し鏡を使って像を逆回転させる必要がある。この追尾の複雑さはコンピュータの高速演算によって克服された（実際のところB L Tでは時期尚早で冒険的なところがあり、しばらくはトラブルが続いたようである）。



経緯台の天体追尾は3軸制御

天体の高度・方位の変化

→ 高度軸・方位軸を制御（2軸）

視野の回転

→ カメラを回す（1軸）

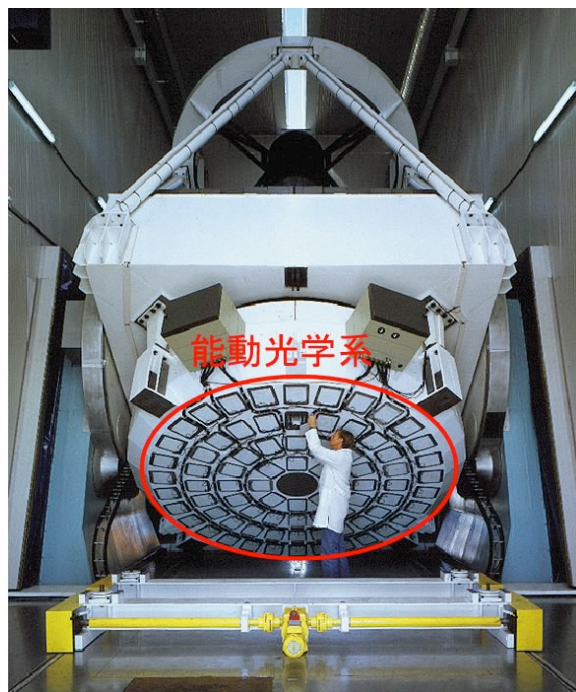
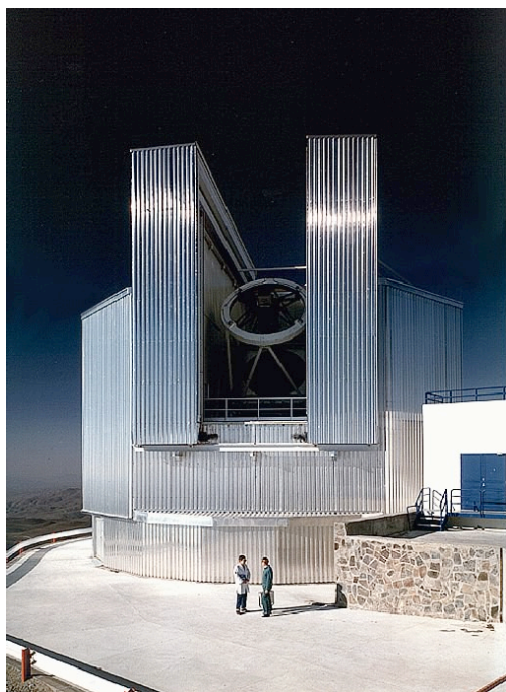
コンピュータの進歩は既存の大型望遠鏡にも恩恵をもたらした。経緯台、赤道儀を問わず望遠鏡には自重変形や機械工作精度による固有の誤差が発生する。コンピュータによって望遠鏡の指向方向ごとに誤差の出方を測定しておき、それをもとに望遠鏡の駆動に補正をかけるという方法が確立した。既存の望遠鏡も計算機更新により誤差の補正を導入することで、もれなく製作当時の精度以上にアップグレードされることができた。これを器差補正という。

9-3. 鏡の軽量化 ～80年代の先駆的実験望遠鏡～

主鏡の軽量化の試みはいくつかあった。1979年にアリゾナ大学はホプキンス山にMMT（マルチミラー望遠鏡）を建設した。この望遠鏡は口径1.8mの鏡をセグメントとして6枚並べ、一つに焦点を結ばせる仕組みである。6枚の鏡の焦点が一致するようにコンピュータ制御によって各セグメントの姿勢が制御されている。鏡1枚は20cm程度の厚さで形状が保てるので軽量化になる。

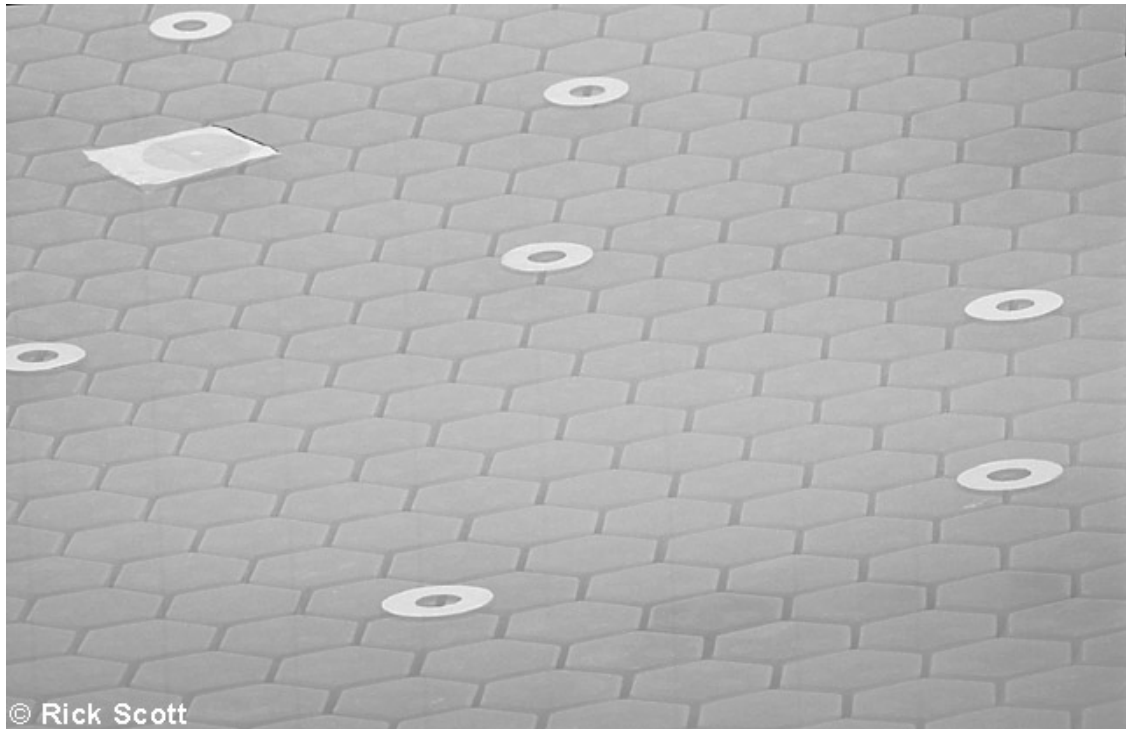


近年の大型望遠鏡で採用されている主要技術が一通り盛り込まれた最初の望遠鏡は、ラ・シヤ天文台（ヨーロッパ南天天文台）の3.5m N T T（新技術望遠鏡）である。1989年に完成したN T Tには直径3.5mに対して厚さ24cmの主鏡が採用されている。ガラスの鏡には直径に対して1/10以上の厚みが必要とされる。それは鏡の素材であるガラスが自分の重みで歪まない強度を保つための制限であるが、N T Tでは薄メニスカスという肉薄の主鏡で軽量化を試みた。そのままでは主鏡凹面の精度が保てないので、裏面からコンピュータで伸縮する棒を当てて凹面形状を制御している。この技術は能動光学と呼ばれる。この方式によって主鏡の凹面は従来よりもずっと高精度に保てるようになり、さらに鏡筒を軽くすることにも成功している。



このように80年代を通して望遠鏡の主鏡を軽量化する技術が考案され、実験的な望遠鏡が欧米で建設された。どちらもパロマーの5 m望遠鏡には及ばないが、この開発が、20世紀最後の8 m超級望遠鏡に繋がっている。

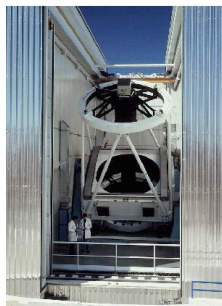
ところで、この時期、アリゾナ大学ではもう一つの軽量化技術が開発されていた。それはハニカム鏡と呼ばれる。ハニカム鏡とは主鏡のガラスの裏側を蜂の巣状に徹底的に肉抜きした鏡である。



そして現在、MMTは主鏡を6.5mハニカム鏡に交換され、生まれ変わって稼働している。



9 - 4. 8 m 超級望遠鏡の系譜



N T T 技術の系譜



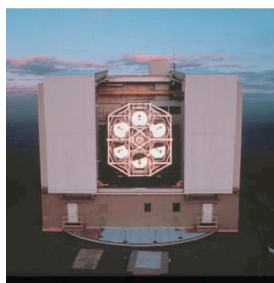
すばる望遠鏡



Gemini望遠鏡

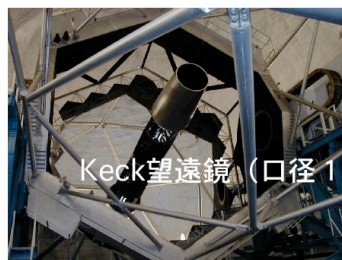


VLT (超巨大望遠鏡)

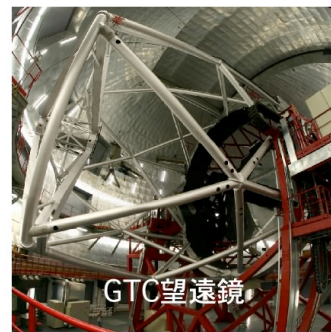
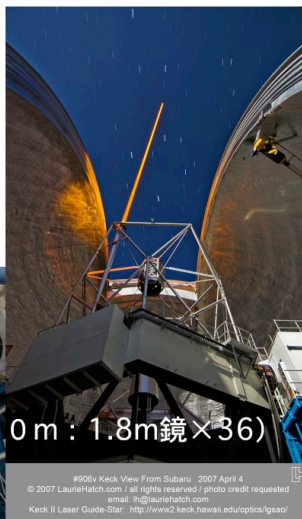


1.8m鏡×6

M M T 技術の系譜



Keck望遠鏡 (口径10m : 1.8m鏡×36)



GTC望遠鏡

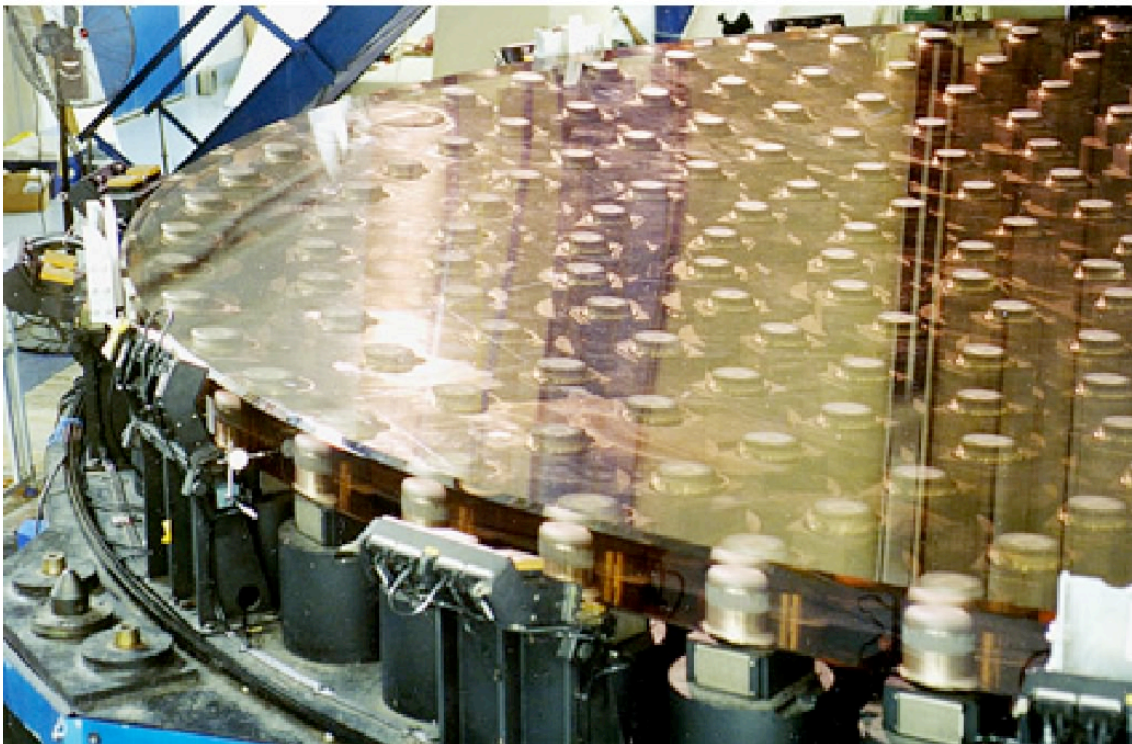
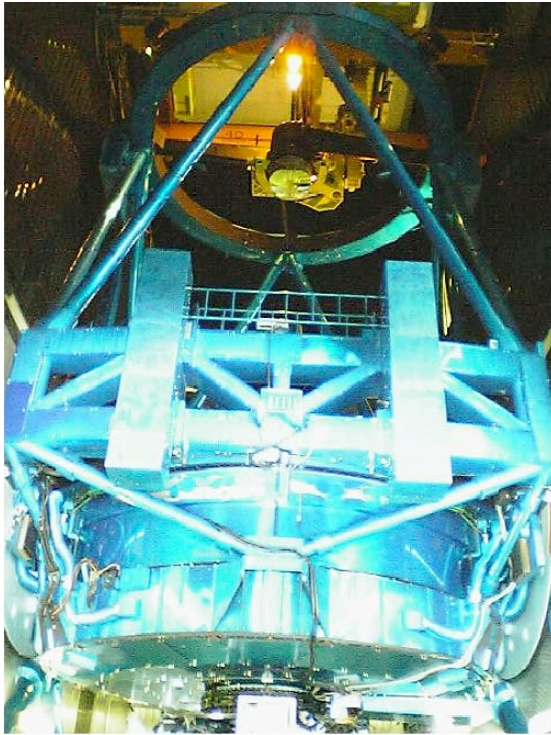


Paranal Observing Platform with AT1 and AT2

ESO PR Photo 07a/05 (14 March 2005)

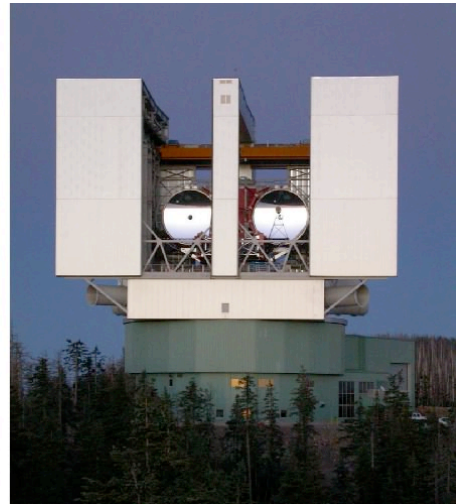
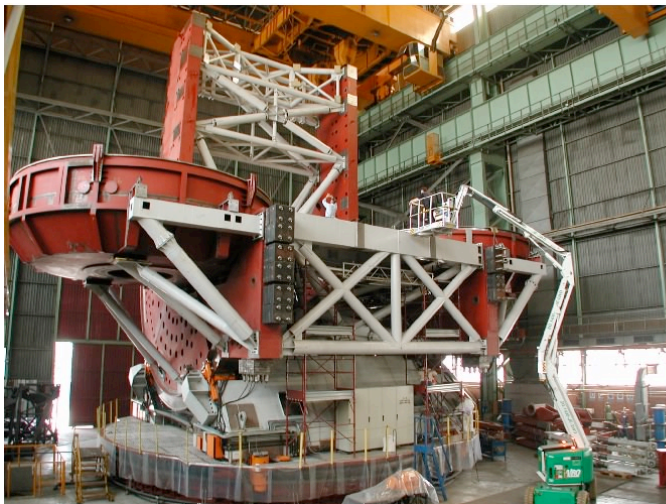
© European Southern Observatory



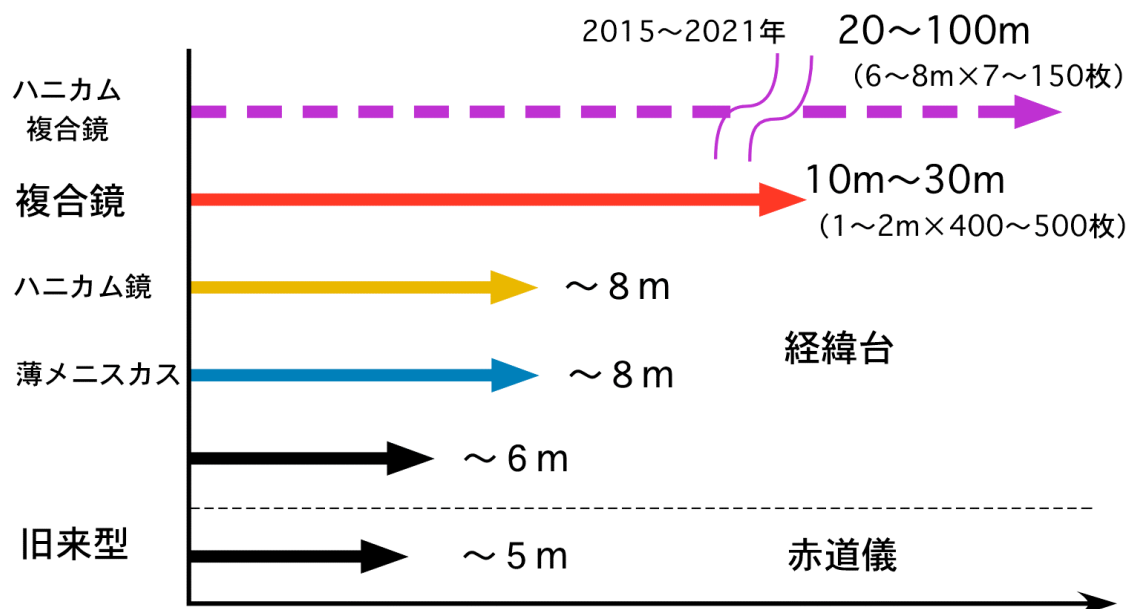


9-6. 口径10mを超えて

アリゾナ大学はさらなる実験的望遠鏡を造り続けている。LBT（大型双眼望遠鏡）は8.4mハニカム鏡を2枚使った望遠鏡である。今後、Keckタイプの1~2m鏡を使った複合鏡と7~8mハニカム鏡を使った複合鏡により20mオーバーの超巨大望遠鏡が建設されていくことになる。

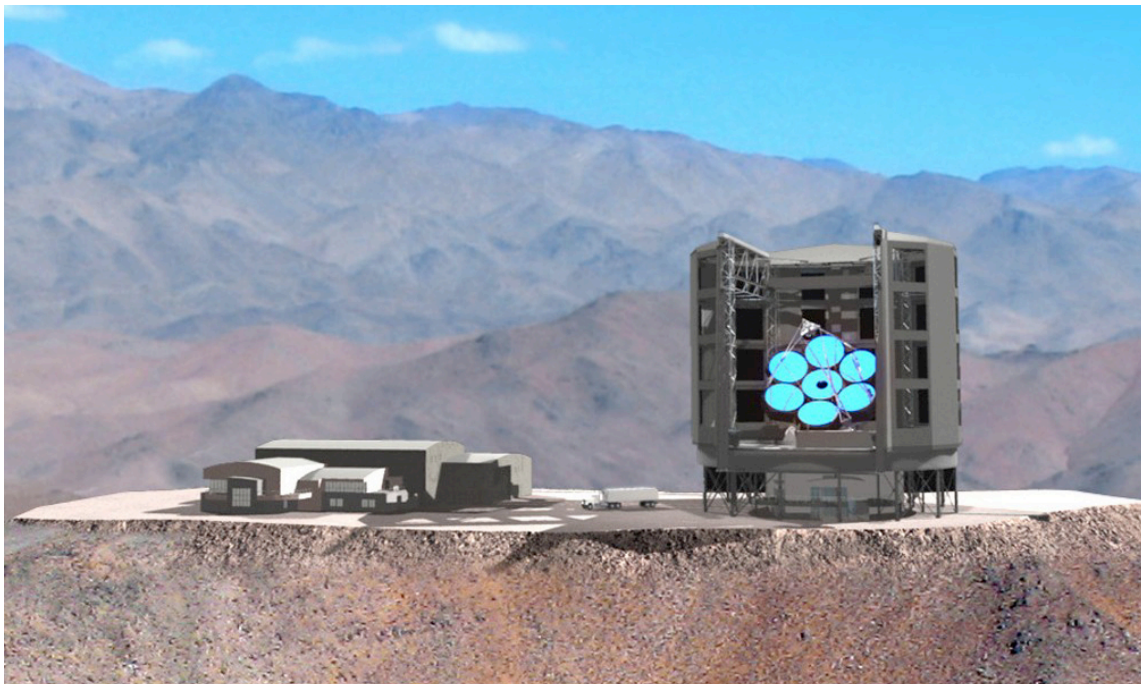


主鏡の軽量化技術と大型化





TMT (30m 望遠鏡) 想像図：米（カリフォルニア大、カリフォルニア工科大、ムーア財団）日加中印のプロジェクト。1.5m×492 枚

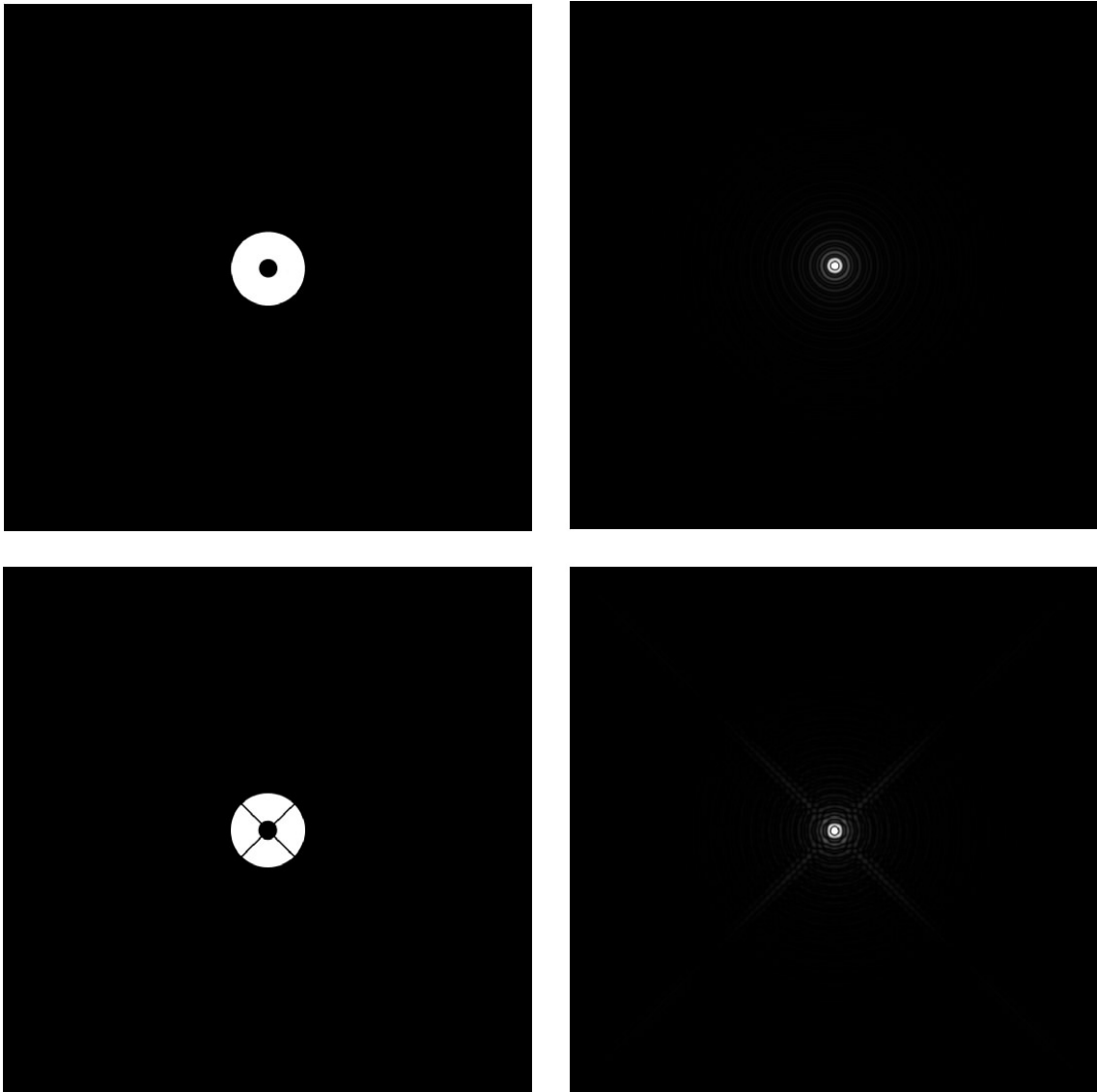


GMT (巨大マゼラン望遠鏡／24m) 想像図：米（カーネギー天文台，アリゾナ大、ハーバード大）濠韓によるプロジェクト。8.4m×7 枚

その他にヨーロッパ連合による E-ELT (42m 望遠鏡:1.5m×1000 枚) 計画がある。

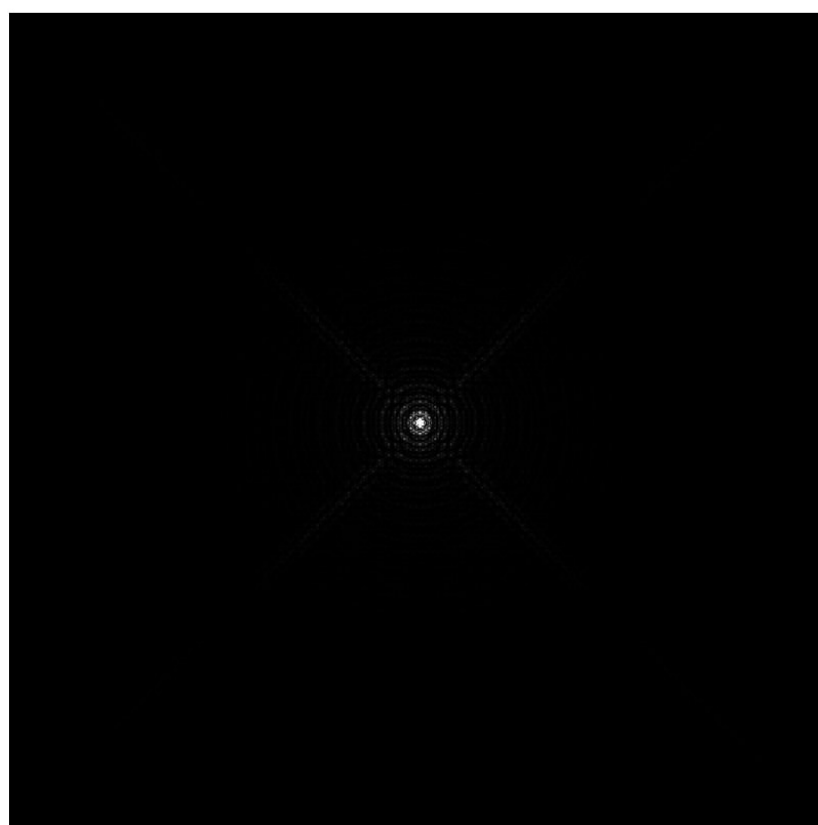
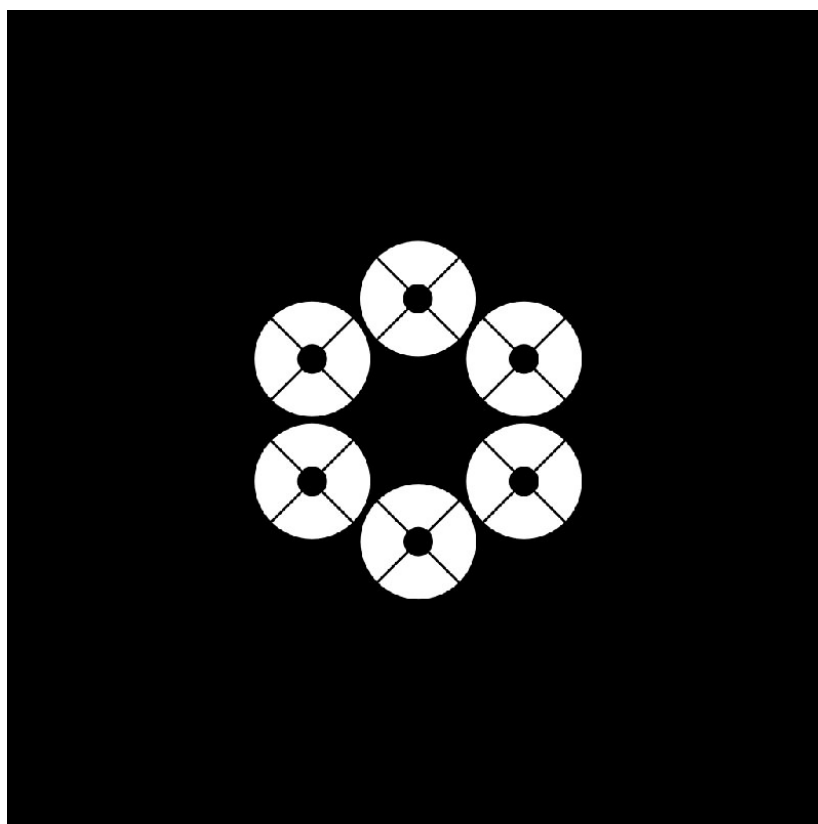
9-7. 開口の形状と回折像

円形開口（単一鏡）の回折像



反射望遠鏡の場合、主鏡の反射光を折り曲げる2枚目の鏡（副鏡／ニュートン式反射望遠鏡の場合は斜鏡）が必要になる。副鏡は鏡筒の中に浮かすことになるので、実際的には鏡を指示する支柱が必要になる。従って単一鏡とは言っても開口は分割（この場合4分割）されることになる。この支持構造の影は回折像に影響を及ぼす。基本的には支持構造の伸びている方向に放射状のとげが生えたような回折像になる。

複合鏡の回折像 1 (MMTタイプ)



複合鏡の回折像 2 (Keck タイプ)

