

A person is shown in silhouette, looking through a large, complex telescope mounted on a tripod. The telescope has a large primary mirror and a secondary mirror, with various accessories attached. The background is a clear blue sky. The text is overlaid on the image.

第11回 うちゅうのがっこう

---

# 望遠鏡について：鏡筒と光学系編

～「宇宙を見る瞳」の仕組みに迫る～

北海道大学 大学院理学院  
宇宙理学専攻 修士課程1年  
松岡 亮 / Matsuoka Ryo

# 目次

- イントロダクション（今日の目標）
- 光のおさらい
- 望遠鏡の一般論
- 望遠鏡各論
- 参考文献

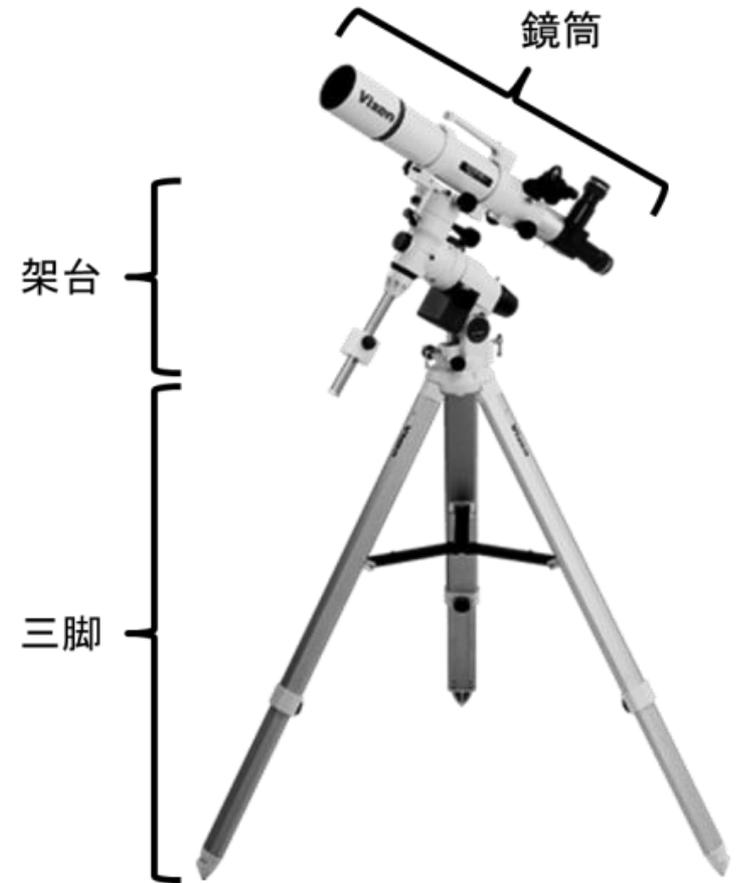


# イントロダクション

望遠鏡の3大要素  
= 鏡筒 + 架台 + 脚

- 鏡筒の構造はどうなっているか
- なぜ拡大されて見えるのか
- 鏡筒の性能を決めるものは何か

望遠鏡の話 = 幾何光学。  
宇宙のお話ではないので注意！



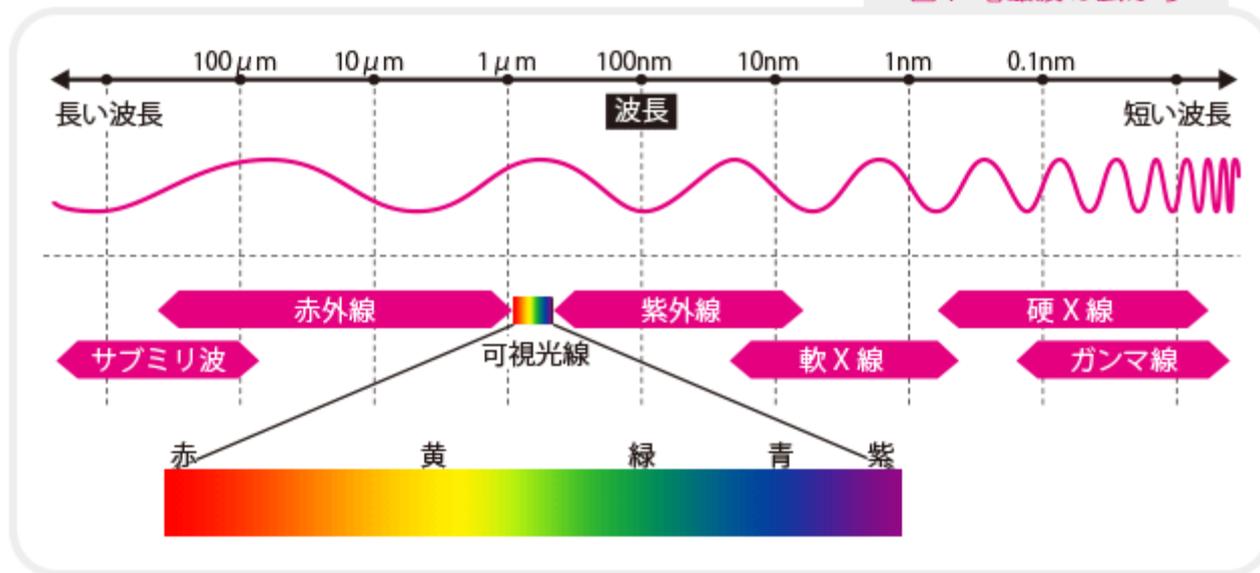
Vixen社HPより改変

A 3D rendering of a diamond prism dispersing light into a spectrum of colors. The prism is positioned in the upper right, and a beam of white light enters from the left, passing through the prism and emerging as a vibrant rainbow spectrum that curves across the lower half of the image. The background is dark, with some faint, glowing lines suggesting a geometric or optical structure.

# 1. 光のおさらい

# 光の正体

図1 電磁波の広がり



<http://www.kodomonokagaku.com>

低エネルギー  
長波長  
低振動数

電波 赤外線 可視光線 紫外線 X線 γ線

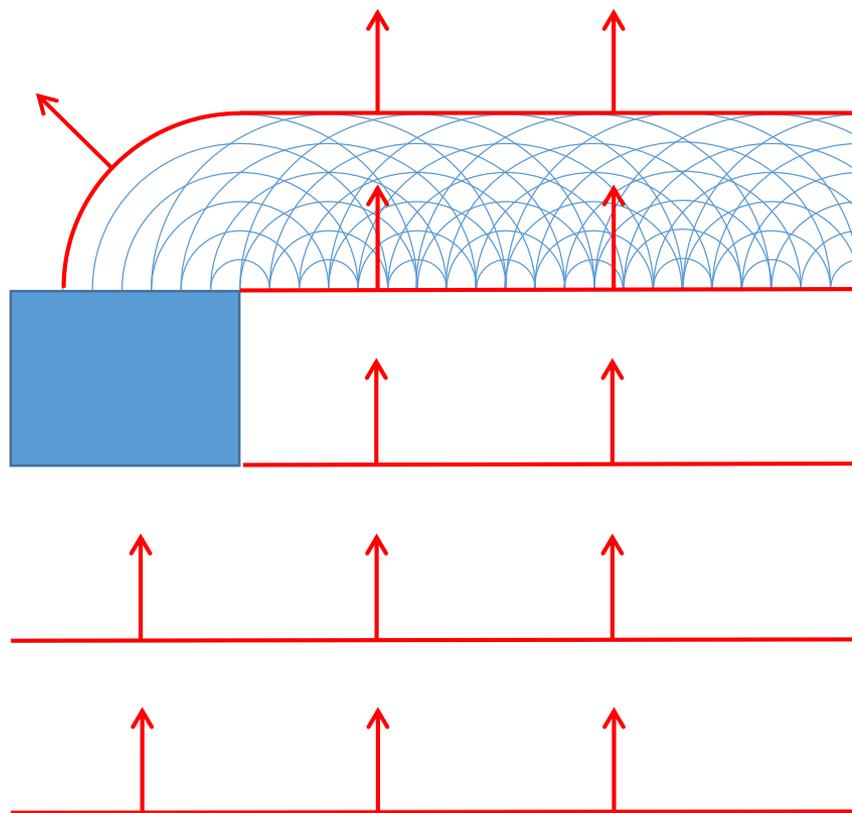
高エネルギー  
短波長  
高振動数

可視光線は**380-770 nm**( 理科年表2015 ), 数百兆 Hz  
太陽スペクトルのピークは**500 nm**

# 光線で近似できない光

回折…波が遮蔽物の後ろ側にまで回り込む現象

壁の奥にまで回り込む



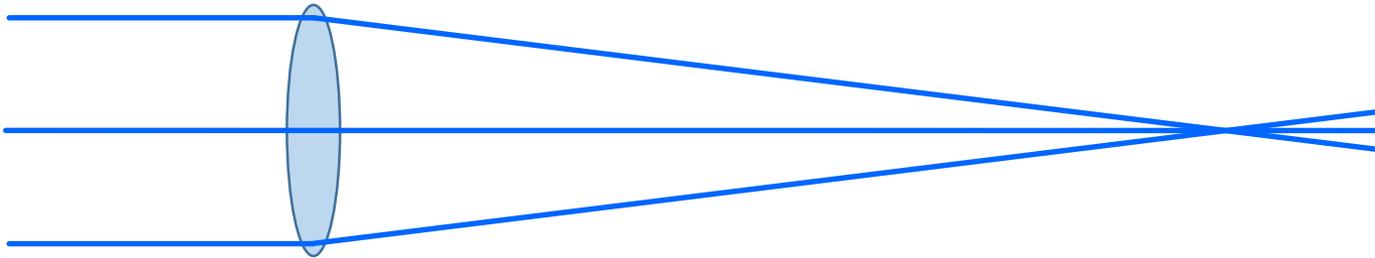
A close-up photograph of a telescope's objective lens. The lens is a large, multi-faceted glass element. A bright light source is positioned behind the lens, creating a prominent rainbow-like light flare that arcs across the lower portion of the frame. The background is dark, making the lens and the light flare stand out.

## 2. 望遠鏡の一般論

# 思い出してね！レンズ！！

## 定義：レンズの焦点

軸に平行な光線の結像点を焦点と呼ぶ

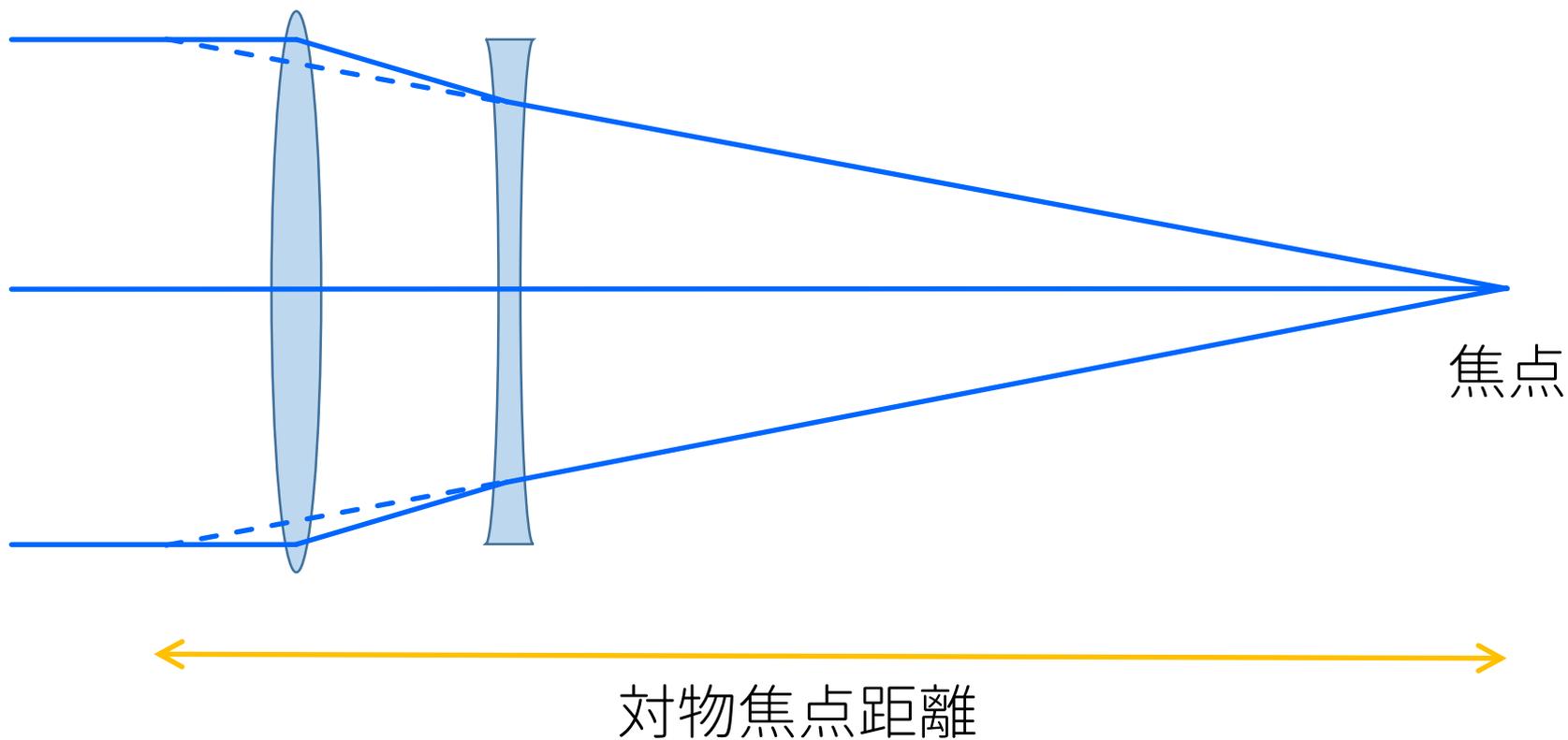


光路の可逆性より、

「焦点を通る光線群は屈折後に軸に平行な光線になる」、  
「軸に平行な光線は屈折後に焦点を通る光線群になる」  
の2つのステートメントが成立。

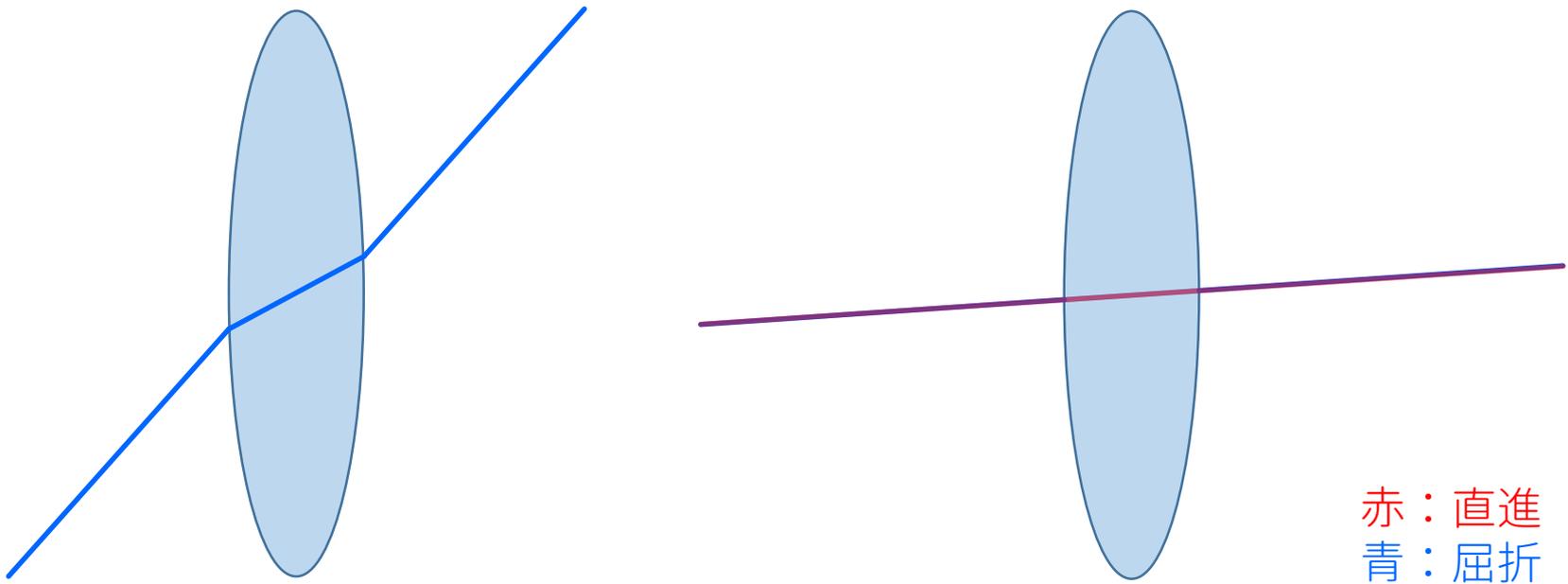
天体の光は平行光線で近似できるため、焦点が特に重要。

# 合成焦点距離



# 思い出してね！レンズ！！

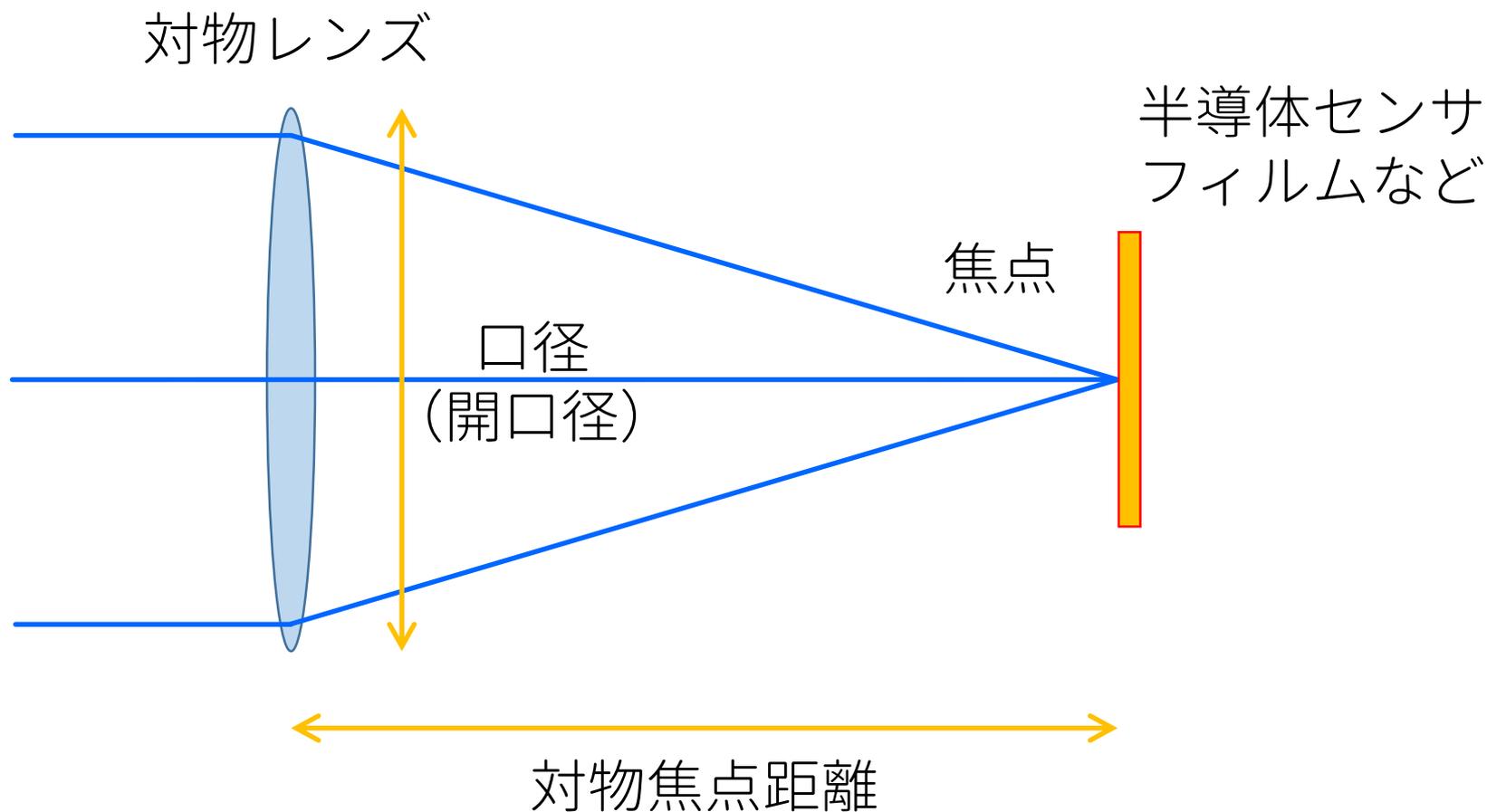
レンズの中心を通る光は，屈折前後で向きを変えない



軸に対する角度が小さいときは，  
近似的に「直進する」とみなせる。

# 直焦撮影時の望遠鏡の構造図

直焦撮影…望遠鏡を望遠レンズのように使う撮影法



# 眼視観察時の望遠鏡の構造図

「ピントが合った」状態…両レンズの焦点が一致

対物レンズ

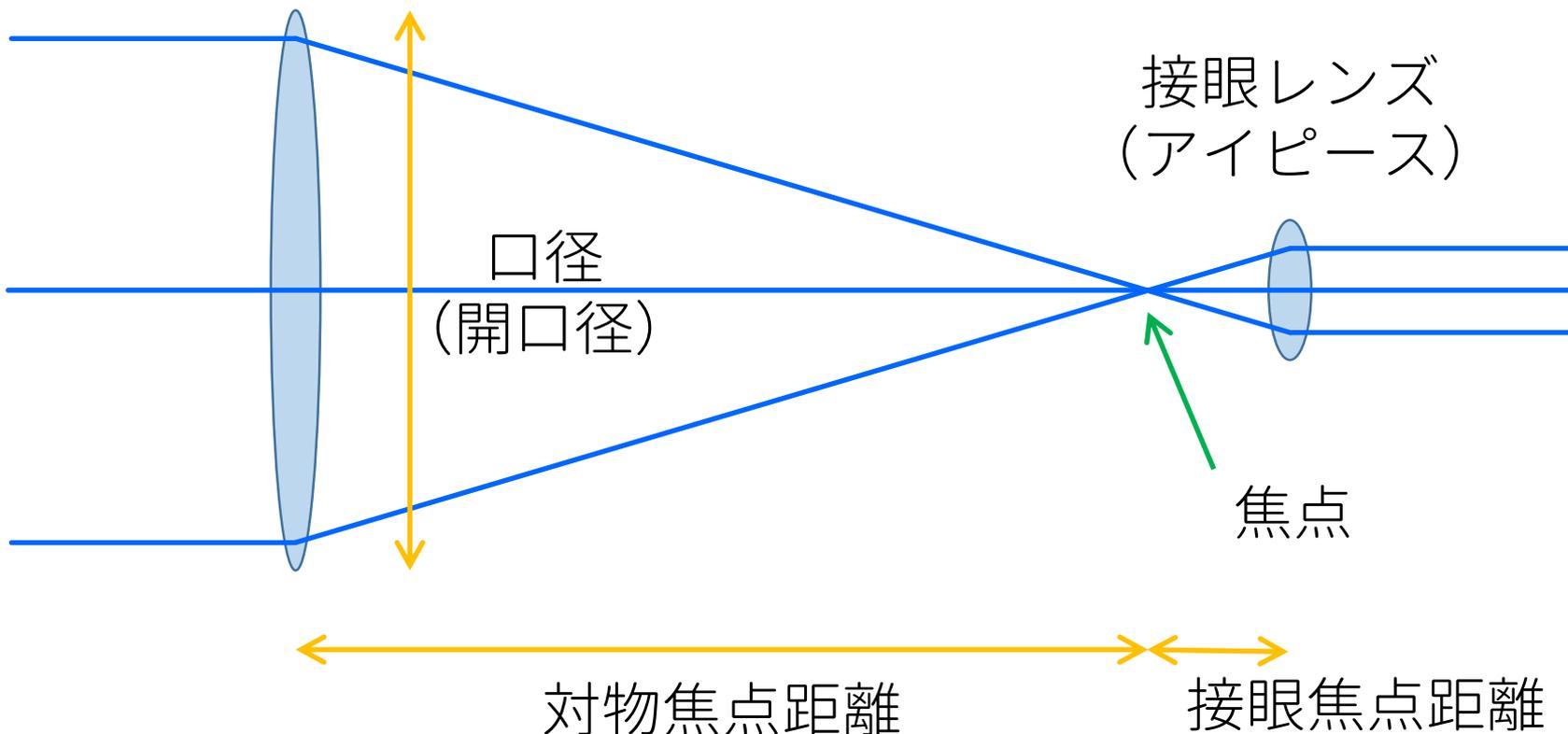
接眼レンズ  
(アイピース)

口径  
(開口径)

焦点

対物焦点距離

接眼焦点距離



# 望遠鏡の役割

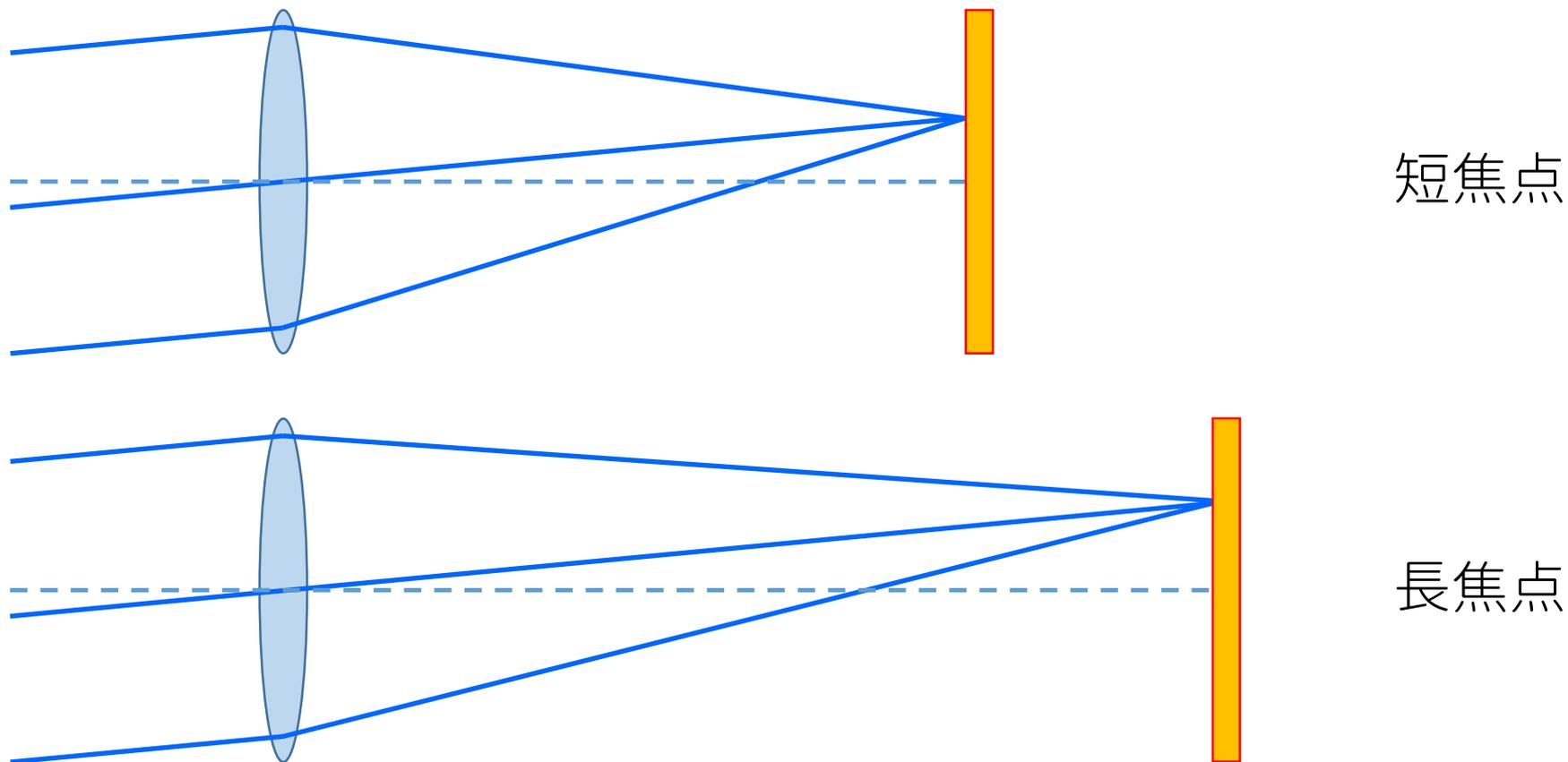
- 拡大器として  
小さな天体を大きな像で観察する。  
倍率が求められる。
- 集光器として  
暗い天体を明るく観察する。  
口径が求められる。

しかし、両方の役割は結局、口径で制約できる。



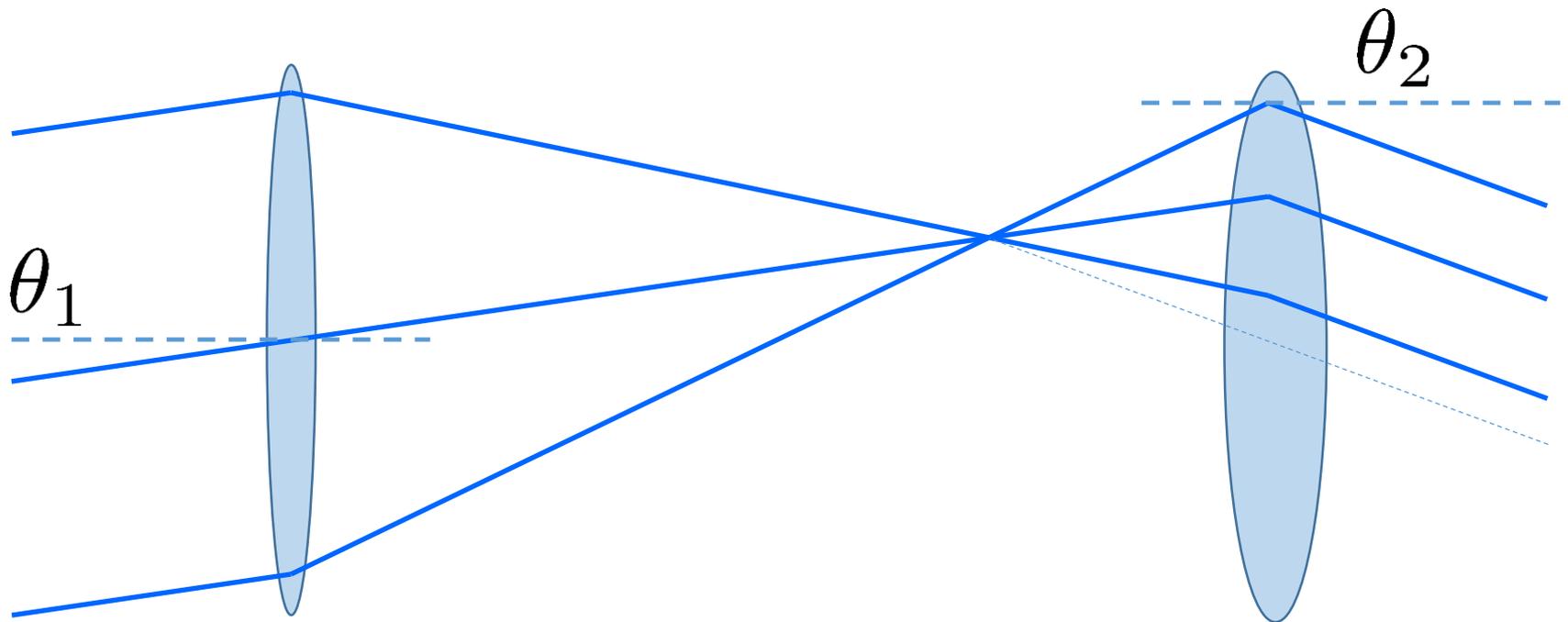
口径が望遠鏡の性能を決める。

# 望遠鏡で大きく写る理由



焦点距離に比例して、  
イメージセンサの像が大きくなっている。

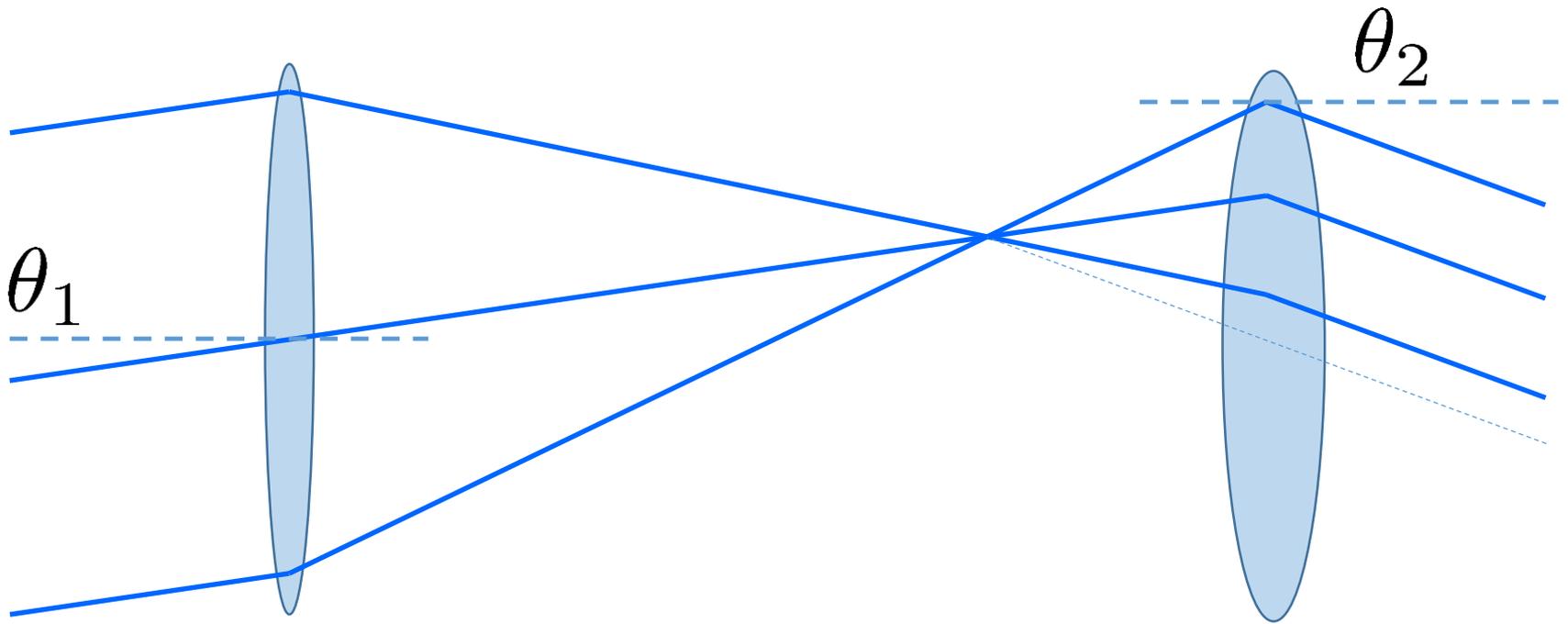
# 望遠鏡で大きく見える理由



$\theta_1 < \theta_2$  なので，拡大されている！！

※軸外からの光は厳密には結像しないため，角度が0に近いときのみ近似的に成立する議論である．

# 倍率



望遠鏡の倍率：角倍率  $m = \frac{\theta_2}{\theta_1}$

# 倍率公式

倍率公式

$$m \approx \frac{f_{\text{obj}}}{f_{\text{eyep}}}$$

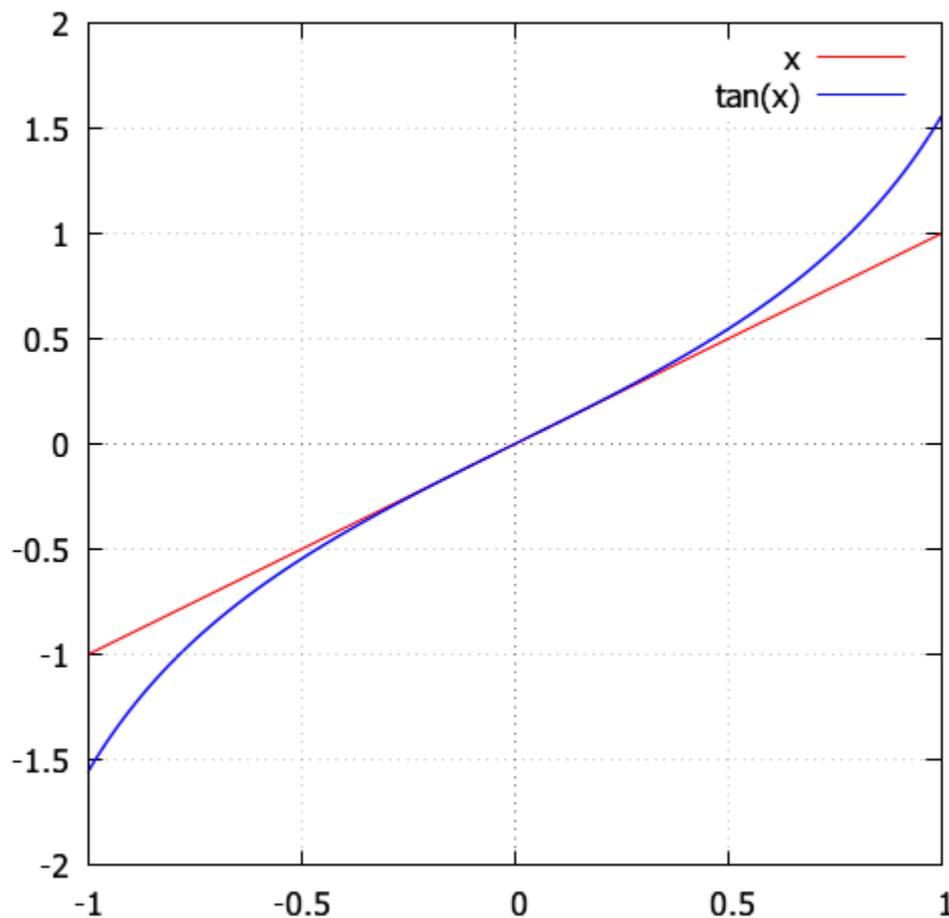
$f_{\text{obj}}$ : 対物焦点距離,  $f_{\text{eyep}}$ : 接眼焦点距離

これくらいは覚えないと  
まともに観測できないよね~☆



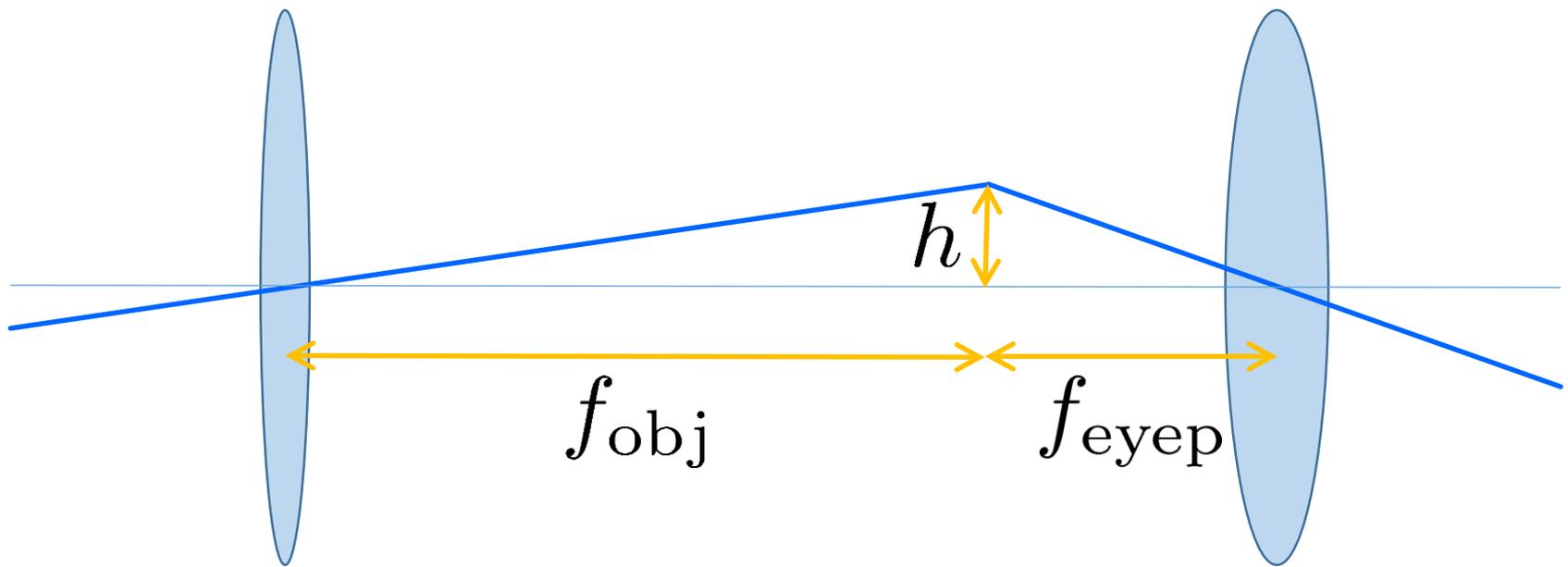
# 倍率公式はなぜ成立？

$\theta \approx 0 \Rightarrow \theta \approx \tan \theta$  を使う.



# 倍率公式はなぜ成立？

$\theta \approx 0 \Rightarrow \theta \approx \tan \theta$  を使う。

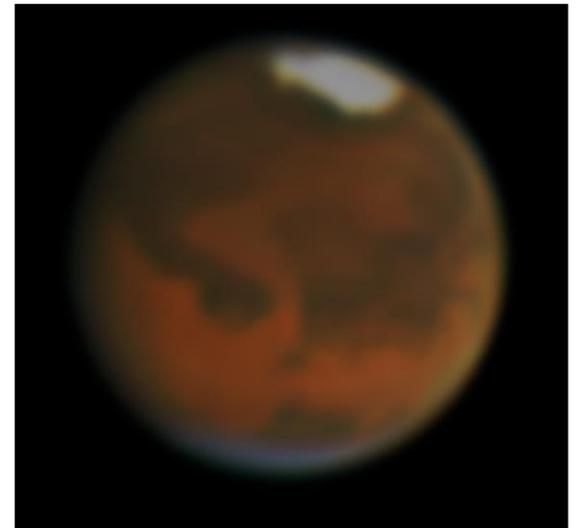


$$m = \frac{\theta_2}{\theta_1} \approx \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{h/f_{eyep}}{h/f_{obj}} = \frac{f_{obj}}{f_{eyep}}$$

# 大きく見る／写すということ

焦点距離の短い接眼レンズ，焦点距離の長い望遠鏡を使えば，いくらでも拡大できるが…

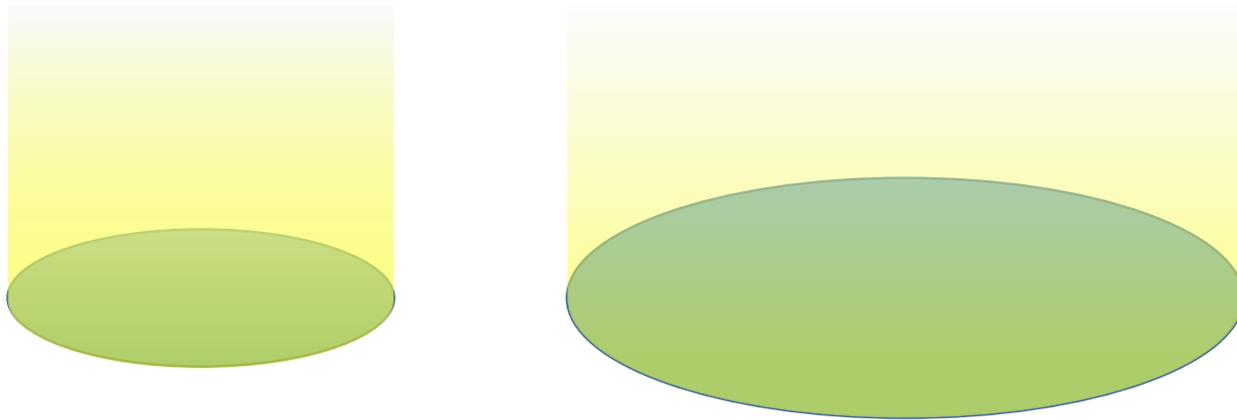
- 像が暗くなる
  - 細い光束を無理やり拡大しているため.
- 像がぼやける
  - 「分解能」の限界があるため.
- どちらも口径を大きくすることで改善可.



# 口径と像の明るさ

天体観測で利用できる光量は、  
レンズの面の受光量で決まっている。

→明るさ  $\propto D^2$



集光力 $P$ …人間の眼 ( $D = 7\text{mm}$ ) に対する受光量の比.

$$P = \frac{(D/\text{mm})^2}{49}$$

# 拡大率と明るさ

像が $\mu$ 倍の拡大率 $\rightarrow$ 単位面辺りの光量は $1/\mu^2$

直焦点撮影

$$\text{明るさ} \propto 1/f^2$$

眼視観察

$$\text{明るさ} \propto 1/m^2$$

# 総合的な明るさの指標

直焦点撮影：F値（口径比）

$$F = \frac{f_{\text{obj}}}{D}$$

明るさは $F^2$ に反比例する（ $F$ が大きいと暗い）。

眼視観察：RB値（相対的明度）

$$RB = \frac{(D/\text{mm})^2}{m^2}$$

明るさは $RB$ に比例する。

# 分解能

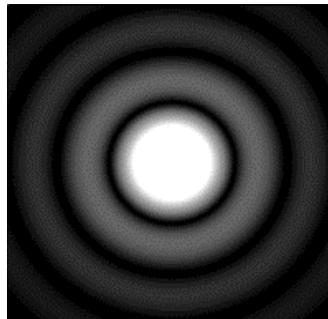
## 分解能

連続像のきめ細かさを表す指標（解像度とは違う）。  
接近した二つの点光源（例えば二重星）で、どのくらい離れれば分解できるかを見る。

口径（ $D$ ）と波長（ $\lambda$ ）を用いて、概ね $\lambda/D$ のオーダー。  
→口径が大きく、波長が短いほど分解能が高い。

なぜ星は無限小の像を結ばないのか？

→光が波であることに起因。開口部で回折した光が像にまとわりつく（**エアリーディスク**）。

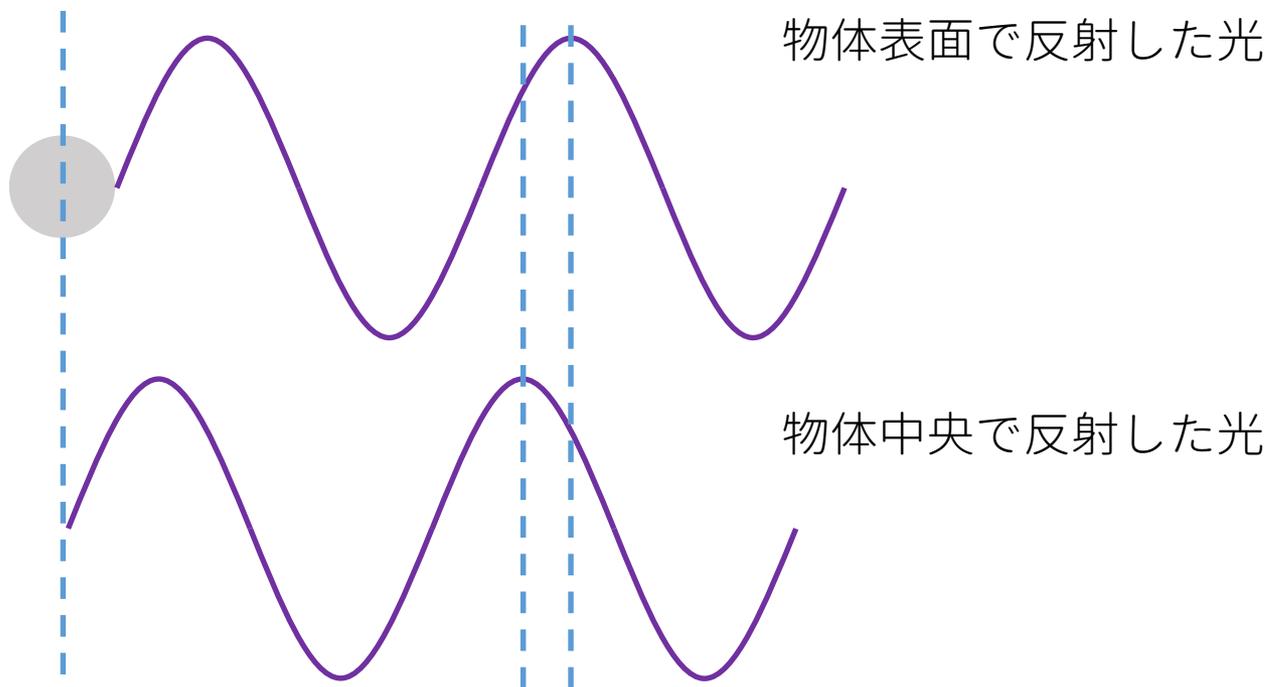


[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Diffraction\\_disc\\_calculated.png/200px-Diffraction\\_disc\\_calculated.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Diffraction_disc_calculated.png/200px-Diffraction_disc_calculated.png)

# 波長と分解能

「波でモノを見る」ということは、モノに当たった光の時間的に分解すること、すなわち、モノに当たった光が有意に干渉し合う様を見ることである。

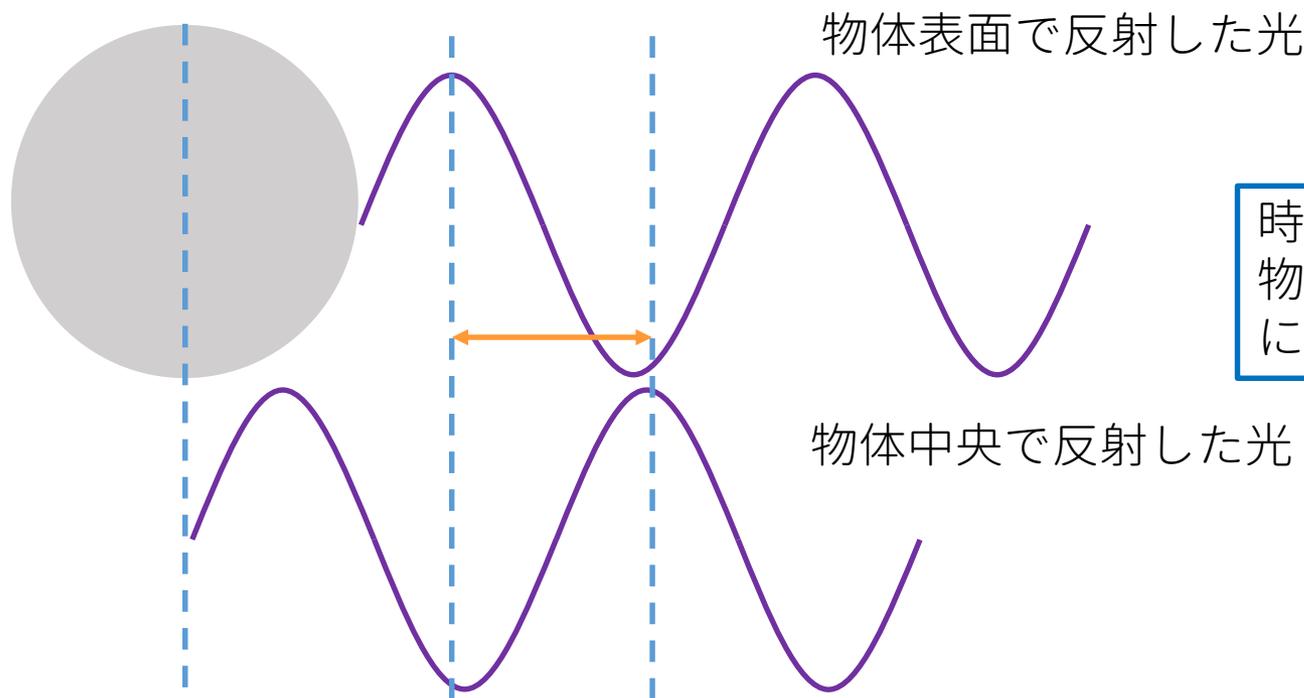
光の波長よりも小さい物体



# 波長と分解能

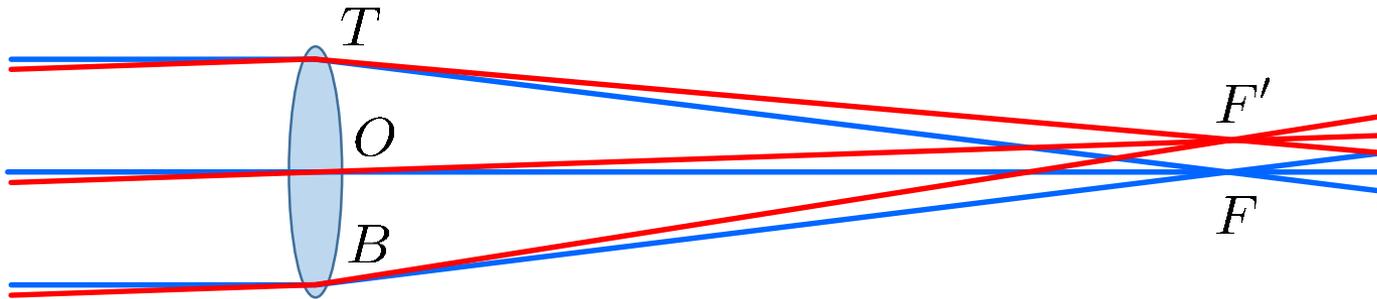
「波でモノを見る」ということは、モノに当たった光の時間的に分解すること、すなわち、モノに当たった光が有意に干渉し合う様を見ることである。

光の波長程度の物体



時間的に分解可能であり、  
物体内部からの光と有意  
に干渉できる。

# 口径と分解能



焦点から微小にずれた点で光がどれだけ干渉して消えるかを見る。

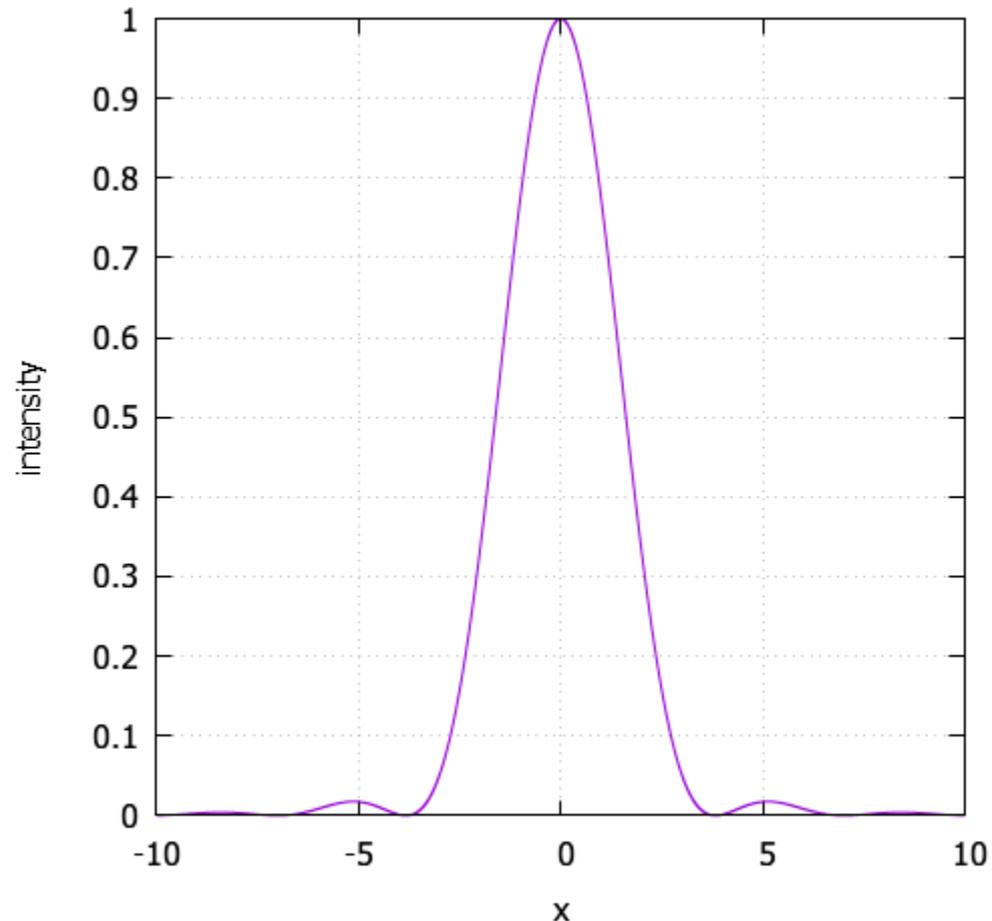
干渉で消すには光路差が長くなれば良い。

$$|TF' - BF'|$$

口径が大きくとすると光路差が大きくなるので、  
口径大 $\Rightarrow$ 高分解能 となる。

# より詳細な議論

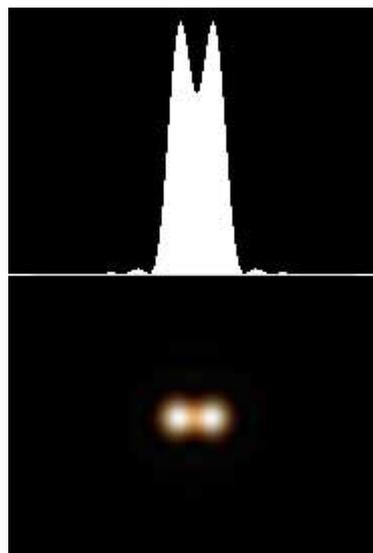
円形開口からの回折を考えれば、エアリーディスク典型幅が  $\lambda/D$  のオーダーであることが分かる。



# 様々な分解能

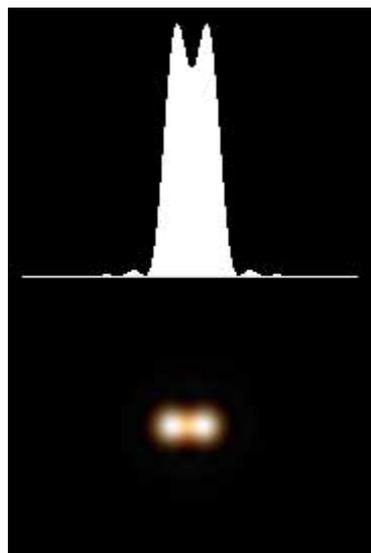
どこまでを「分離した」と見做すかによって異なる分解能の定義が存在する。

<http://www7a.biglobe.ne.jp/~tomoyu/column/co072.htm>



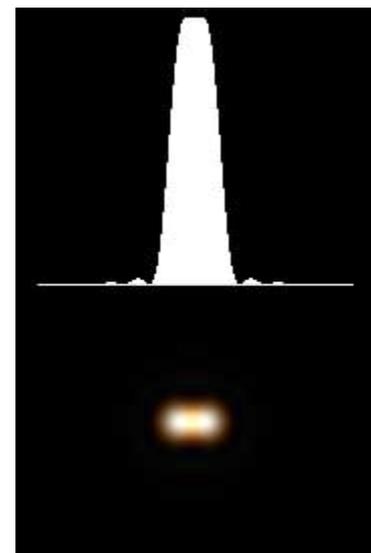
レイリーリミット  
エアリーディスク  
半径の半分で規定

$$\frac{128}{D/\text{mm}} (")$$



ドーズリミット  
ドーズによる経験式  
よく使う

$$\frac{116}{D/\text{mm}} (")$$



スパローリミット  
ピークが一つになる  
距離で規定

$$\frac{100}{D/\text{mm}} (")$$

# 要するに…

デカい望遠鏡買っとけ





### 3. 望遠鏡各論

<http://www.vixen.co.jp>

# 望遠鏡の種類

望遠鏡は集光機構であればよいので、いろいろな光学系を考  
えることができる。



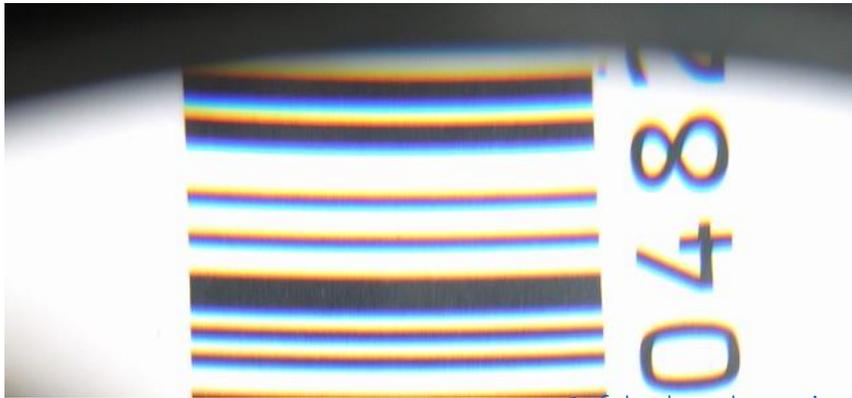
**屈折望遠鏡**…凸レンズなどのレンズ群で集光

**反射望遠鏡**…凹面鏡などの反射鏡群で集光

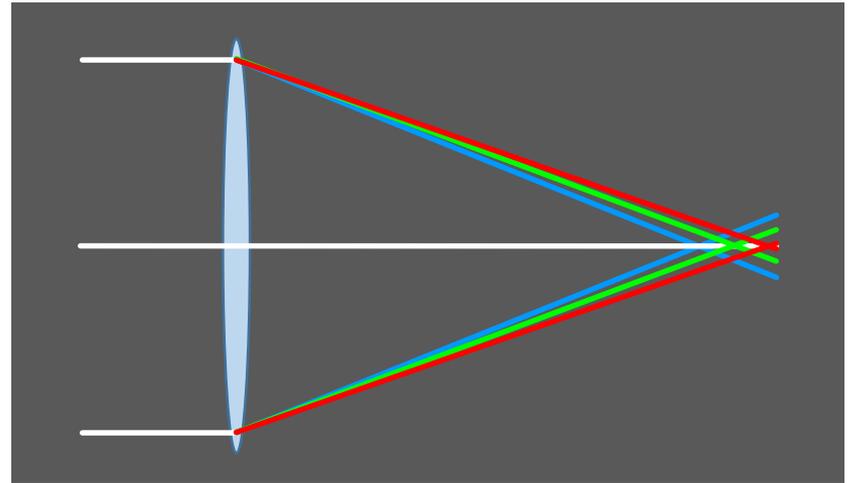
**カタディオプトリック式望遠鏡**…屈折と反射の組み合わせ

# 屈折望遠鏡

- レンズを用いて集光する.
- 接眼方向と天体の方向が一致している.
- **色収差**との闘い.



[ww1.fukuoka-edu.ac.jp](http://ww1.fukuoka-edu.ac.jp)



色収差を

- それなりに軽減したもの（**アクロマート**）
  - 頑張って軽減したもの（**アポクロマート**）
- が売られている。

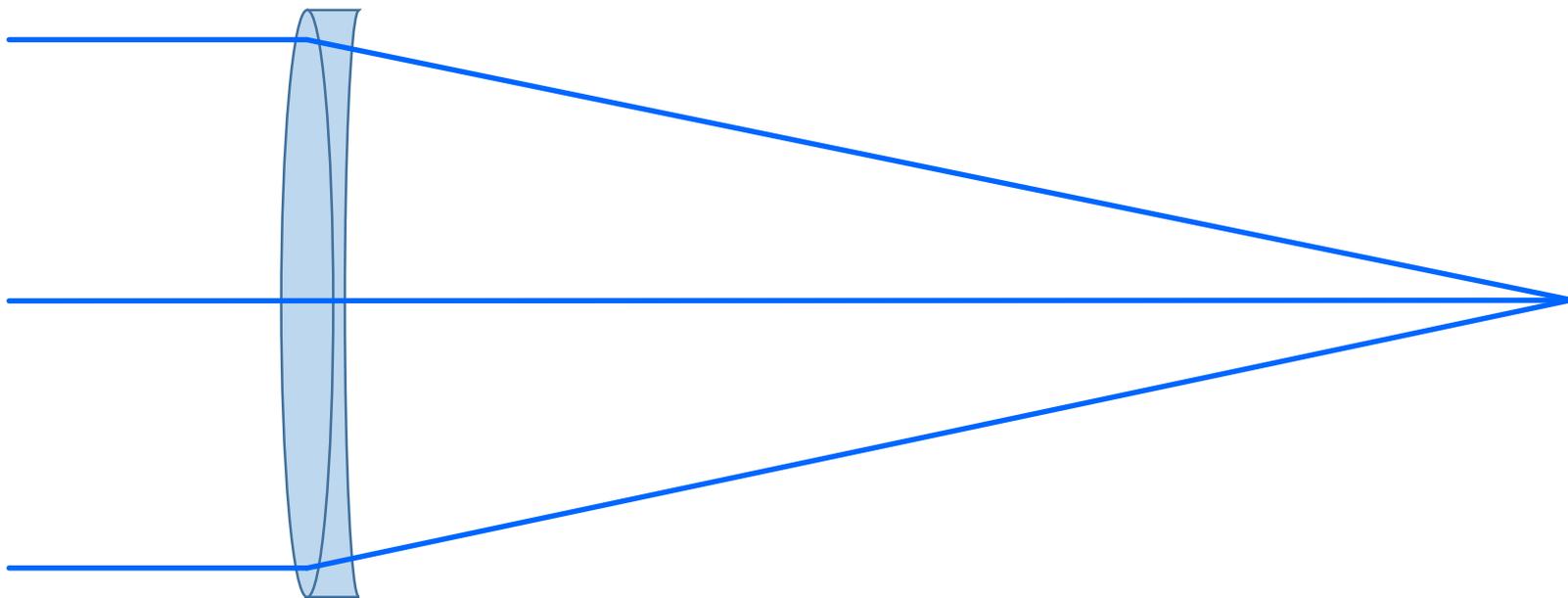
# 屈折望遠鏡



<http://www.vixen.co.jp>

- 比較的細長い
- レンズフードがある
- 小口径～中口径が多い

# 屈折望遠鏡：アクロマート



- 凹レンズを組み合わせることで青以外の色収差を軽減.
- 青ハロが出るため、写真鏡には使わない.
- 安価（10cmで数万円台）.
- 比較的軽いものが多い.

# 青八口



# 屈折望遠鏡：アポクロマート

- 様々な方法で青ハロも抑えた屈折望遠鏡.
  - 材質…フローライト，異常低分散ガラス（ED，SD）
  - レンズ組み合わせ
- 高価（10cmでウン十万）
- 重いものが多い。

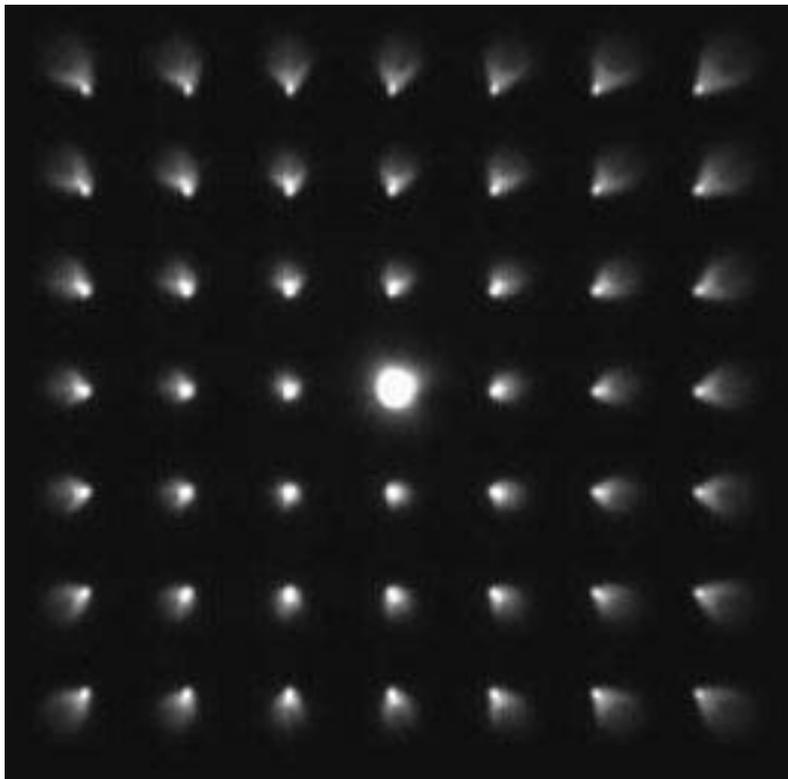
# 青ハ口の無さパ°ネE

FSQ106-ED  
での作例

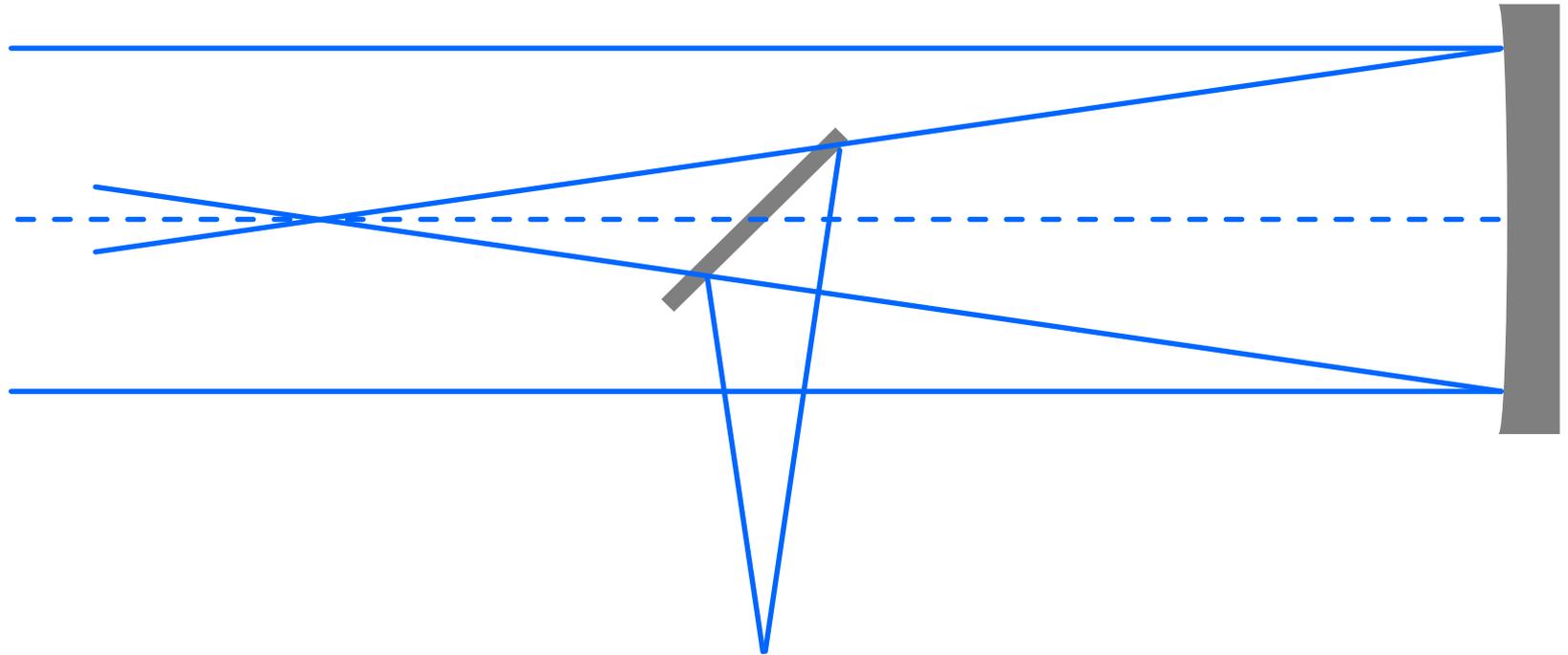


# 反射望遠鏡

- 凹面鏡を用いて集光する。
- 色収差は全くないが、**コマ収差**がある。



# 反射望遠鏡：ニュートン式



- 放物面鏡の主鏡と斜めの副鏡（斜鏡）がある。
- 比較的軽い。
- 安価（20cmで高くて10万円程度）で中～大口径が多い。
- 光軸がずれやすい（振動に弱い）。
- F5以下のものは**コマコレクター**使用推奨。

# 反射望遠鏡：ニュートン式

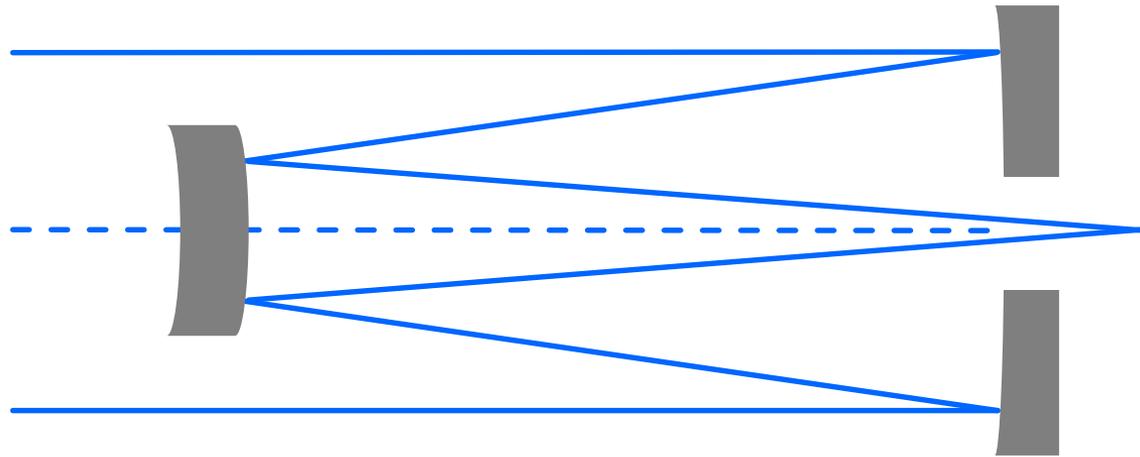


[www.kyoei-osaka.jp](http://www.kyoei-osaka.jp)



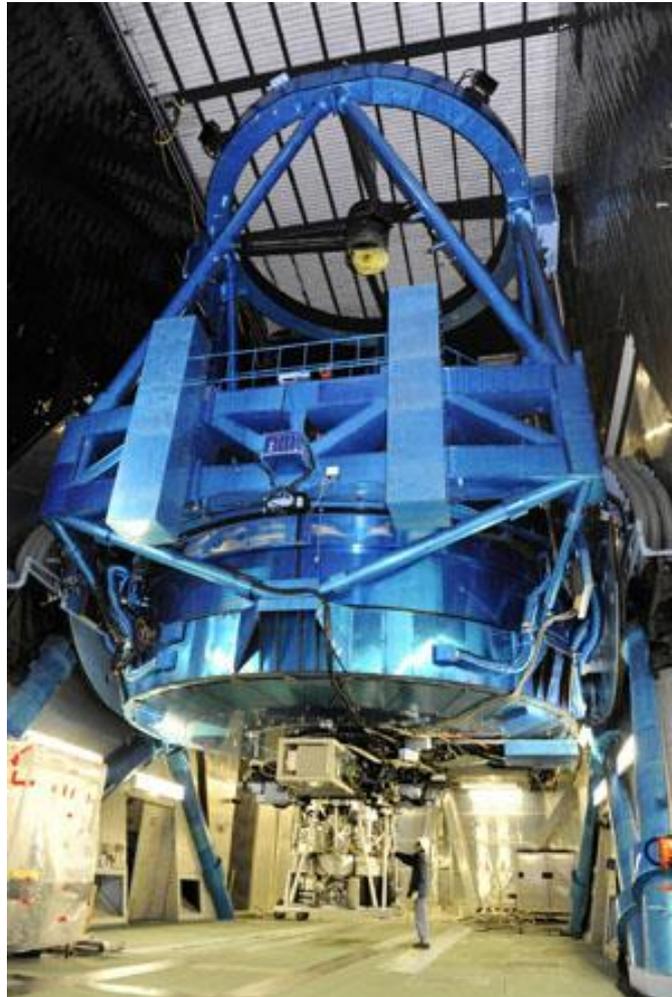
<http://www.vixen.co.jp>

# 反射望遠鏡：カセグレン式



- 放物面鏡の主鏡と凸双曲面副鏡から成る。
- 短い。
- 大望遠鏡に多い。
- 光軸がずれやすい（振動に弱い）。
- F値が大きいものが多い。

# 反射望遠鏡：カセグレン式



[metamorphose-planet.blog.so-net.ne.jp](http://metamorphose-planet.blog.so-net.ne.jp)

# カタディオプトリック望遠鏡

- 反射望遠鏡の各種収差を軽減するための補正レンズを含む。
  - シュミットレンズ…4-6次非球面レンズ
  - マクストフレンズ…凹凸レンズ
- 準ニュートン…ニュートン式をもとに作られたもの。
- 準カセグレン…カセグレン式をもとに作られたもの。
- 光軸調整が非常に難しい。

# カタディオプトリック望遠鏡

←マクストフカセグレン  
↓シュミットカセグレン



<http://www.kenko-tokina.co.jp>



<http://www.meade.com>

望遠鏡のカタログの読み方～有効径、集光力、極限等級、分解能、有効最高倍率

<http://www7a.biglobe.ne.jp/~tomoyu/column/co072.htm>

新スペースVLBI入門 (3) 口径と解像度

<http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.198/mspace.html>

ファインマン物理学II (光・熱・波動)