

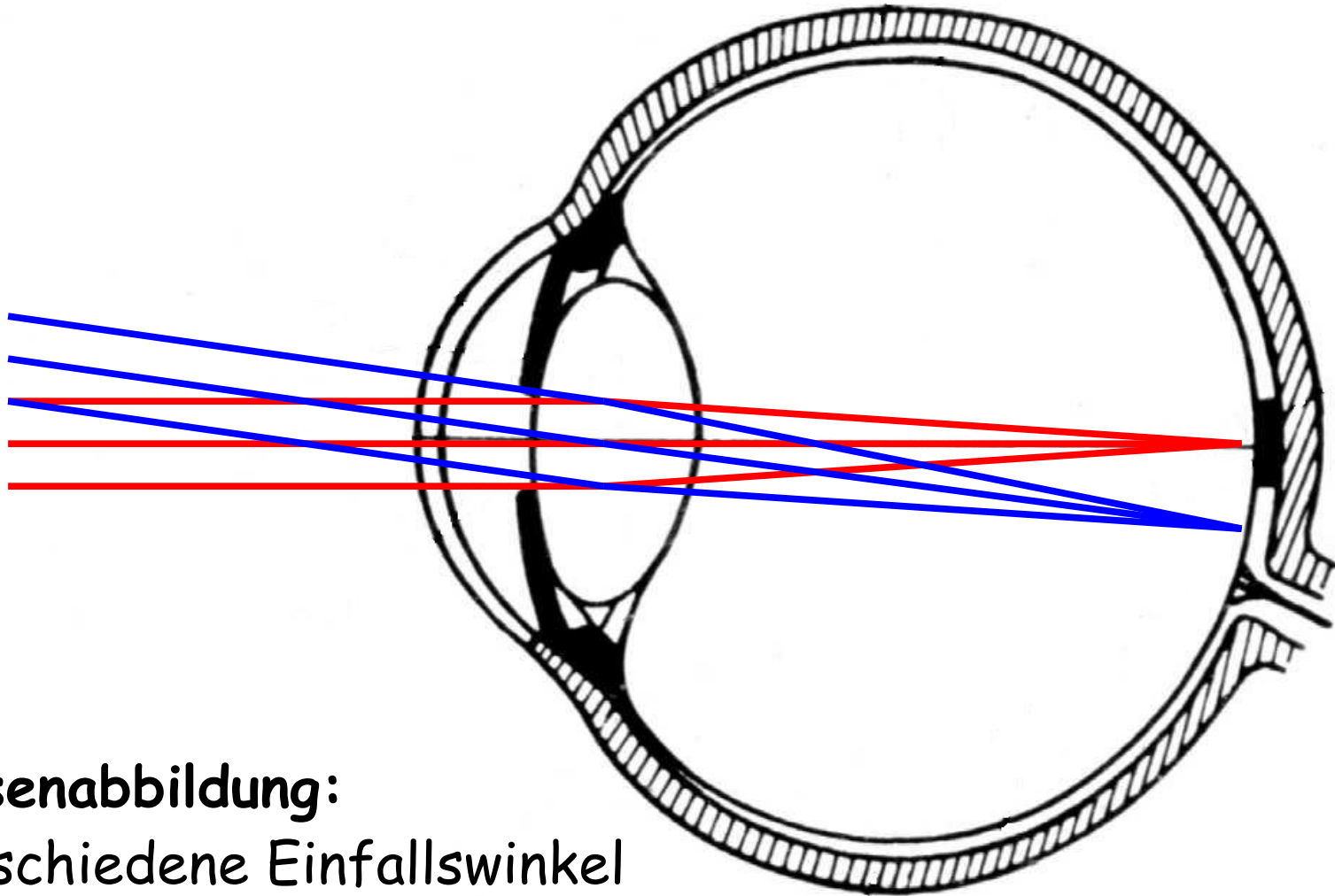
Teleskope & Detektoren

1. Teleskoptheorie
 - a) Historischer Zugang
 - b) Spiegelteleskope
 - c) Adaptive Optik
2. Nichtoptische Teleskope
 - a) Infrarot
 - b) Röntgenteleskope
 - c) Radioteleskope
3. Detektoren
4. Interferometrie

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
3-12: Yerkes Observatory
Courtesy of Yerkes Observatory



Abbildungstheorie

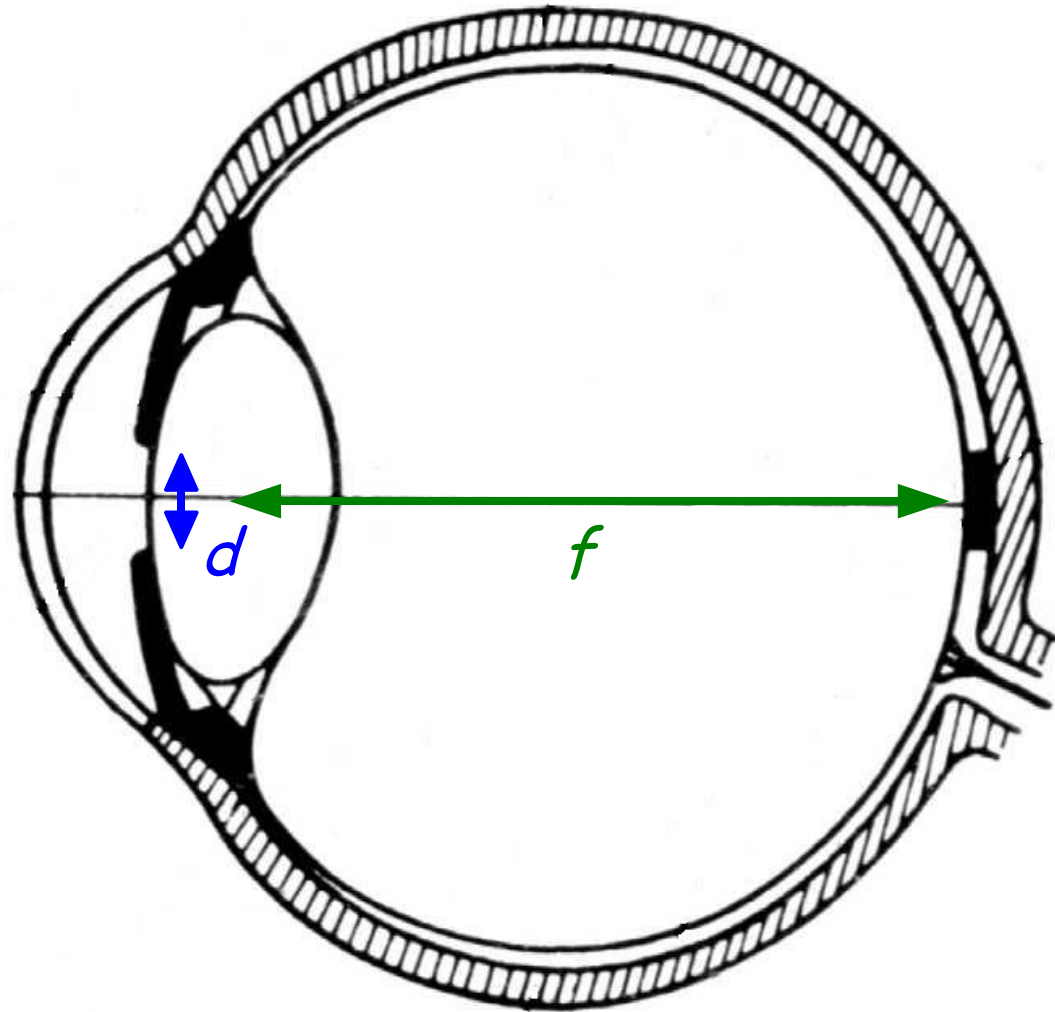


Linsenabbildung:

verschiedene Einfallswinkel

=> verschiedene Orte in der Fokalebene

Abbildungstheorie



Charakteristische
Größen:

Brennweite f

Öffnungsdurchmesser d

Abbildungstheorie

- Blendenzahl $k = f/d$
 - Alternative Bezeichnungen: Öffnungsverhältnis, Blende
 - Bestimmt **Lichtstärke** / Helligkeit des Bildes
 - Fähigkeit, möglichst viele Photonen zu konzentrieren
 - Bei Blende 8 muss man viermal solange belichten wie bei Blende 4
 - Schreibweise: f/k , z.B: $f/15$ -Teleskop ($f=90\text{cm}, d=6\text{cm}$)
 - Bsp.: menschliches Auge $k = 3\text{cm}/0.5\text{cm} \Rightarrow f/6$

Abbildungstheorie

- Plattenskala $s = \pi f / \text{rad}$
 - $= \pi f / 180^\circ$
 - $= 0.0175 f / ^\circ$
- Beschreibt Linsentransformation
 - Winkel \Rightarrow Ort
- Bsp.: $f = 90\text{cm}$
 - $\Rightarrow 1^\circ$ am Himmel wird auf die Länge von 1.6cm abgebildet
- CCD-Chip mit einer Pixelgröße von $10\mu\text{m}$
 - $\Rightarrow 0.00064^\circ/\text{pixel} = 2.3''/\text{pixel}$

Abbildungstheorie

• Auflösungsvermögen

- Fähigkeit eng beieinander liegende Objekte **getrennt** darzustellen
- begrenzt durch Beugung an der Öffnung
- Breite des Beugungsbildes:

$$d_0 = 1.22 \lambda k/f$$

- λ - Wellenlänge

- Mit Platten- und Blendengleichung

- **Auflösungsvermögen:**

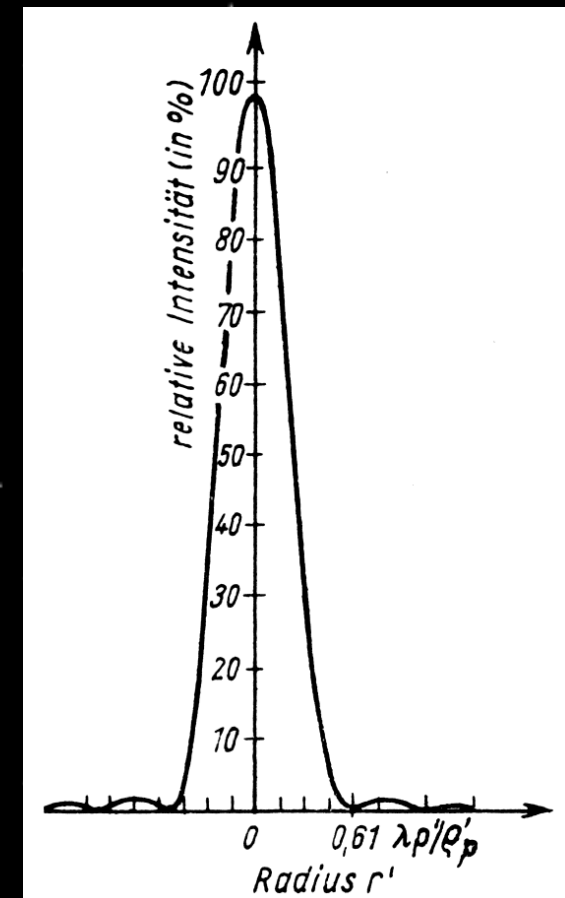
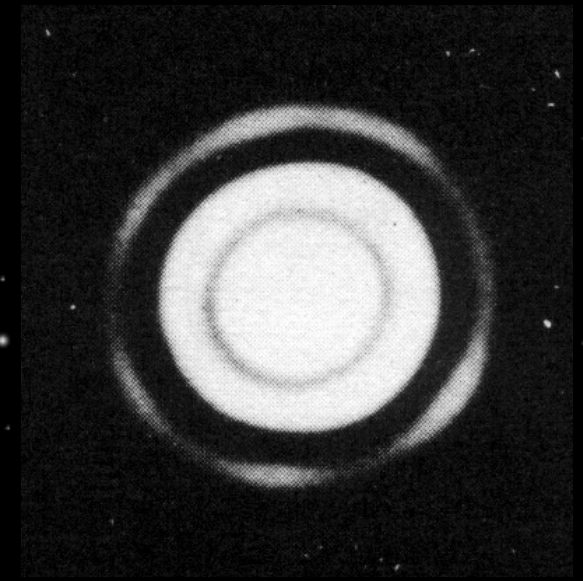
$$\begin{aligned}\Theta &= 1.22 \lambda/D \text{ [rad]} \\ &= 69.9^\circ \lambda/D\end{aligned}$$

- Bsp: Auge, $\lambda = 500\text{nm}$

$$\Rightarrow \Theta = 0.007^\circ = 0.4'$$

$d=6\text{cm}$ -Teleskop

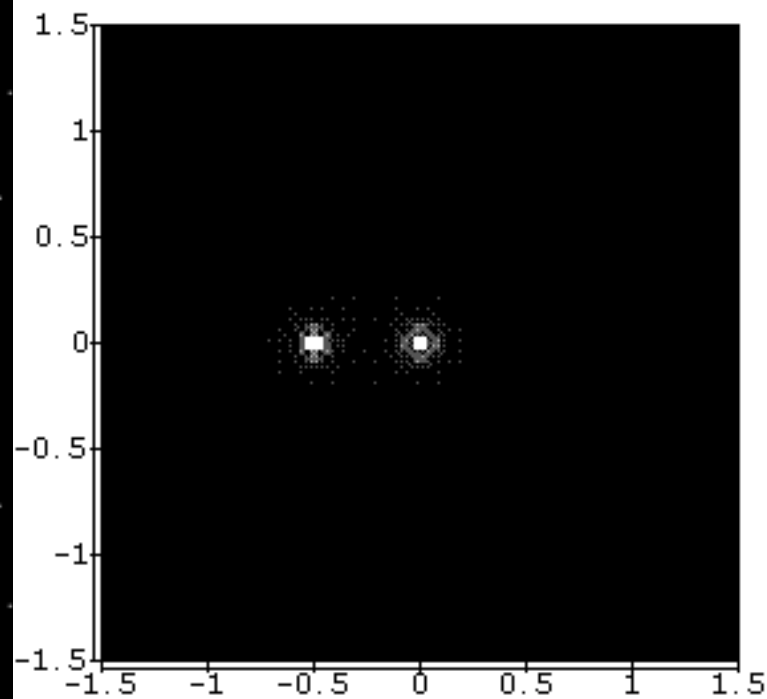
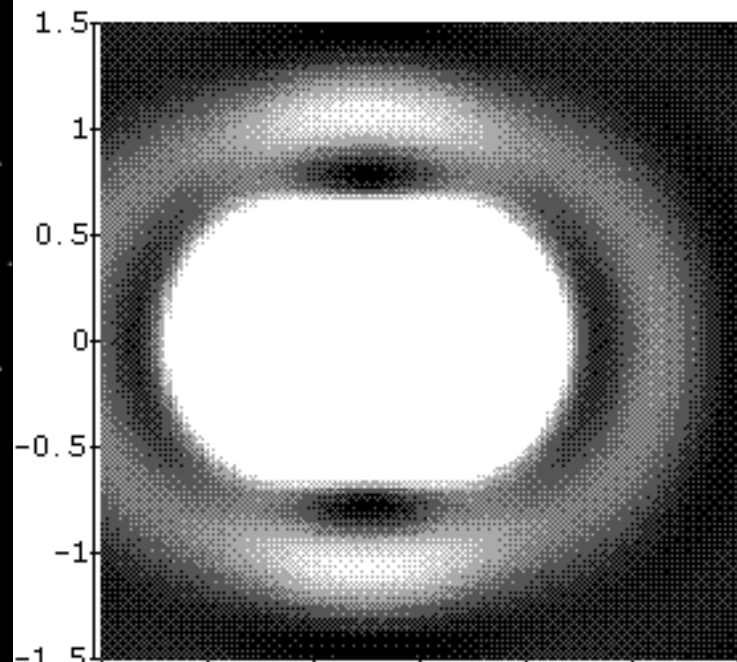
$$\Rightarrow \Theta = 0.0006^\circ = 2''$$



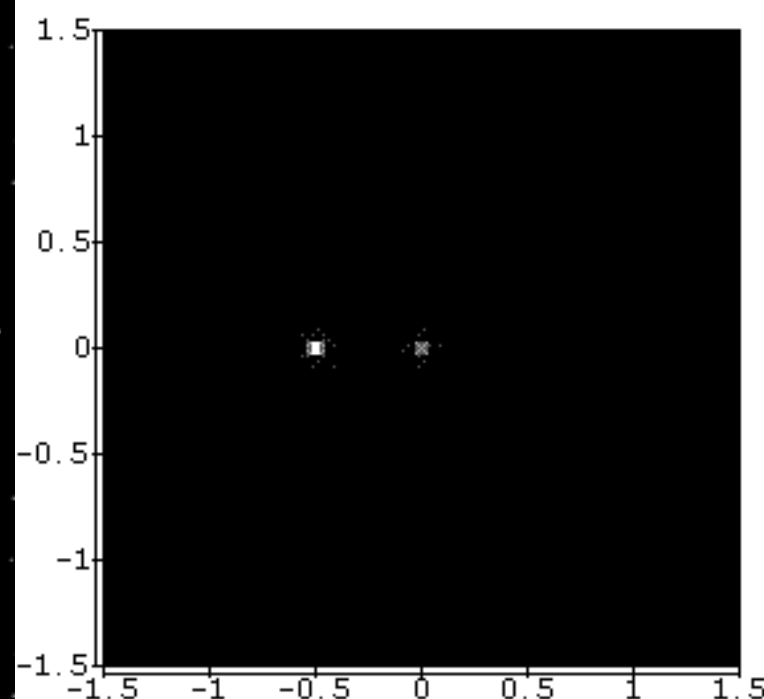
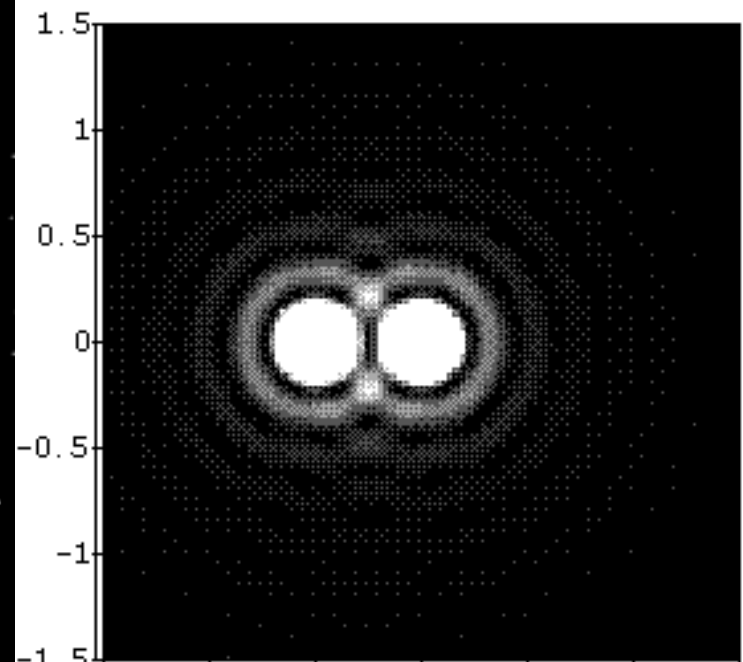
Auflösungs- vermögen

Sonne und
Jupiter in 33
LJ Entfernung
 $\sim 0.5''$

$$\theta = 1.22 \lambda/D$$



C. Objective size = 2.3876 m (94 in)
 $\theta_R = 0.0527$ arc sec at $\lambda=500$ nm
integration time = 7.3 seconds



D. Objective size = 5.08 m (200 in)
 $\theta_R = 0.0248$ arc sec at $\lambda=500$ nm
integration time = 1.6 seconds

Abbildungstheorie

- Das ideale Teleskop
 - Große Brennweite
 - hohe Vergrößerung
(Plattenskala)
 - Großer Öffnungsdurchmesser
 - Hohe Auflösung
 - Hohe Lichtausbeute
(kleine Blende)



Praktische Teleskope

- Für Beobachtung mit dem Auge

- Das austretende Licht muss wieder in parallele Strahlen gewandelt werden.

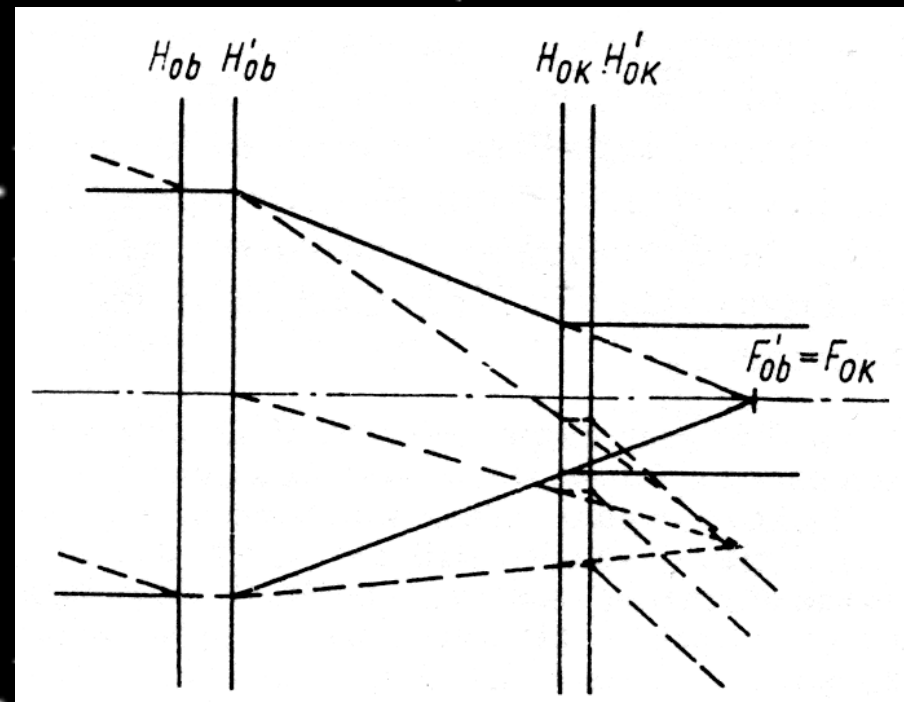
- Galilei-Teleskop:

- Sammellinse als Objektiv
- Zerstreuungslinse als Okular
- Vergrößerung

(Winkelvergrößerung)

$$V = - f_{Ob} / f_{Ok}$$

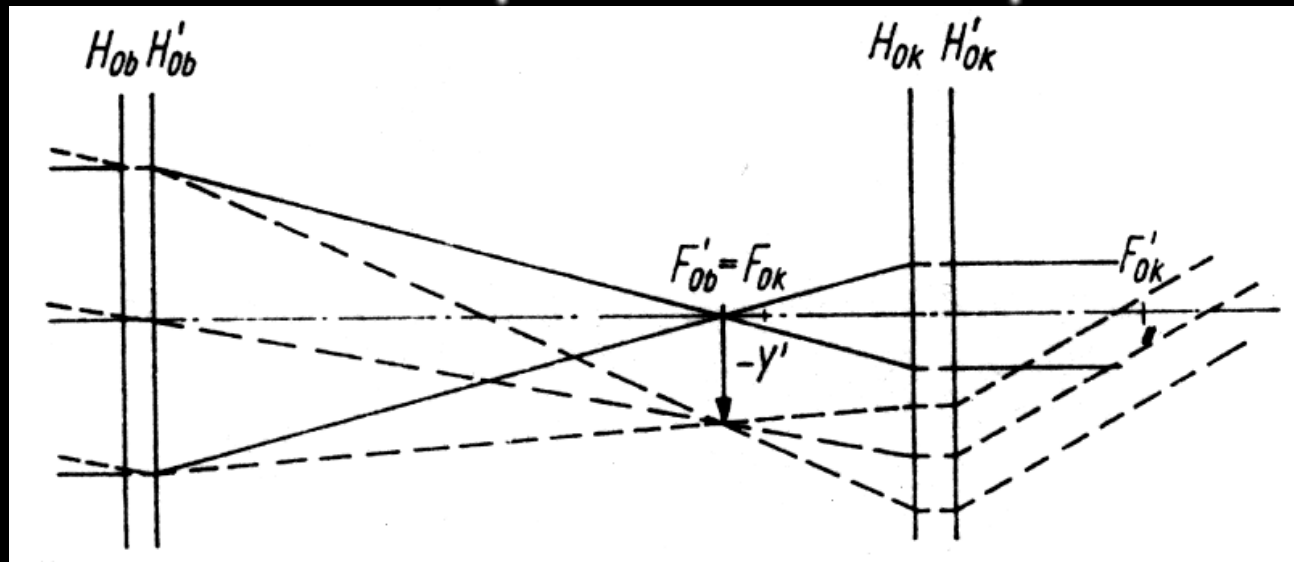
- Hohe Vergrößerung
- Kleines Gesichtsfeld



Praktische Teleskope

- Kepler-Teleskop:

- Sammellinse als Objektiv
- Sammellinse als Okular



- Vergrößerung $V = -f_{Ob} / f_{Ok}$
 - Großes Gesichtsfeld
 - Spiegelverkehrtes Bild

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
3-12: Yerkes Observatory
Courtesy of Yerkes Observatory



Größtes Linsenteleskop:
Yerkes-Observatory
1897

(1.02m Durchmesser)

Praktische Teleskope

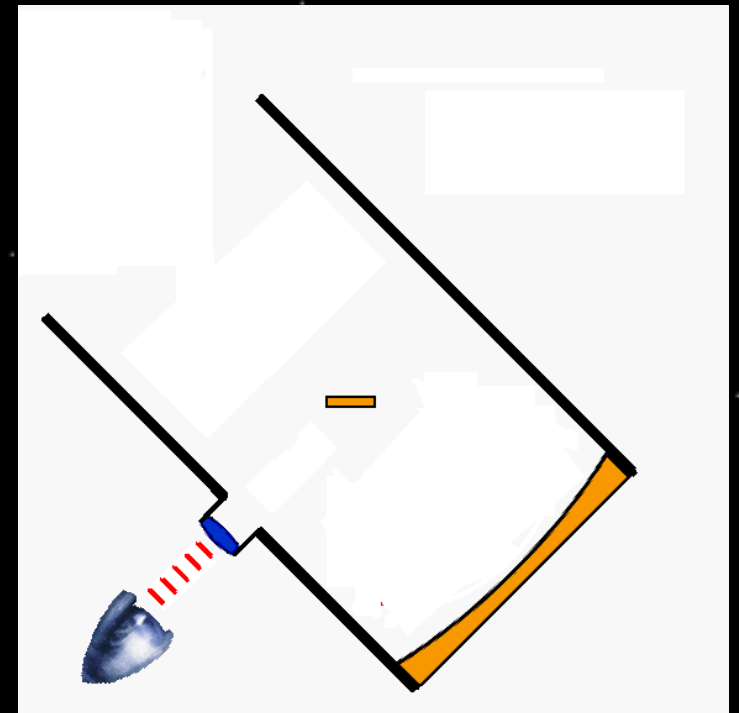
- Linsenteleskope:

- Große schwere Linsen schwer zu halten
- Extreme Anforderung an Glasqualität
- Brechzahl $n=f(\lambda) \Rightarrow$ Chromatische Abberation

- Ausweg:

- **Spiegelteleskope:**

- Parabolspiegel statt Linse
- Äquivalente Abbildung
- Kostengünstig:
 - Nur die Oberfläche muss auf $\lambda/20$ genau sein



The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
3-20: amateur Newtonian
Courtesy of Jay M. Pasachoff

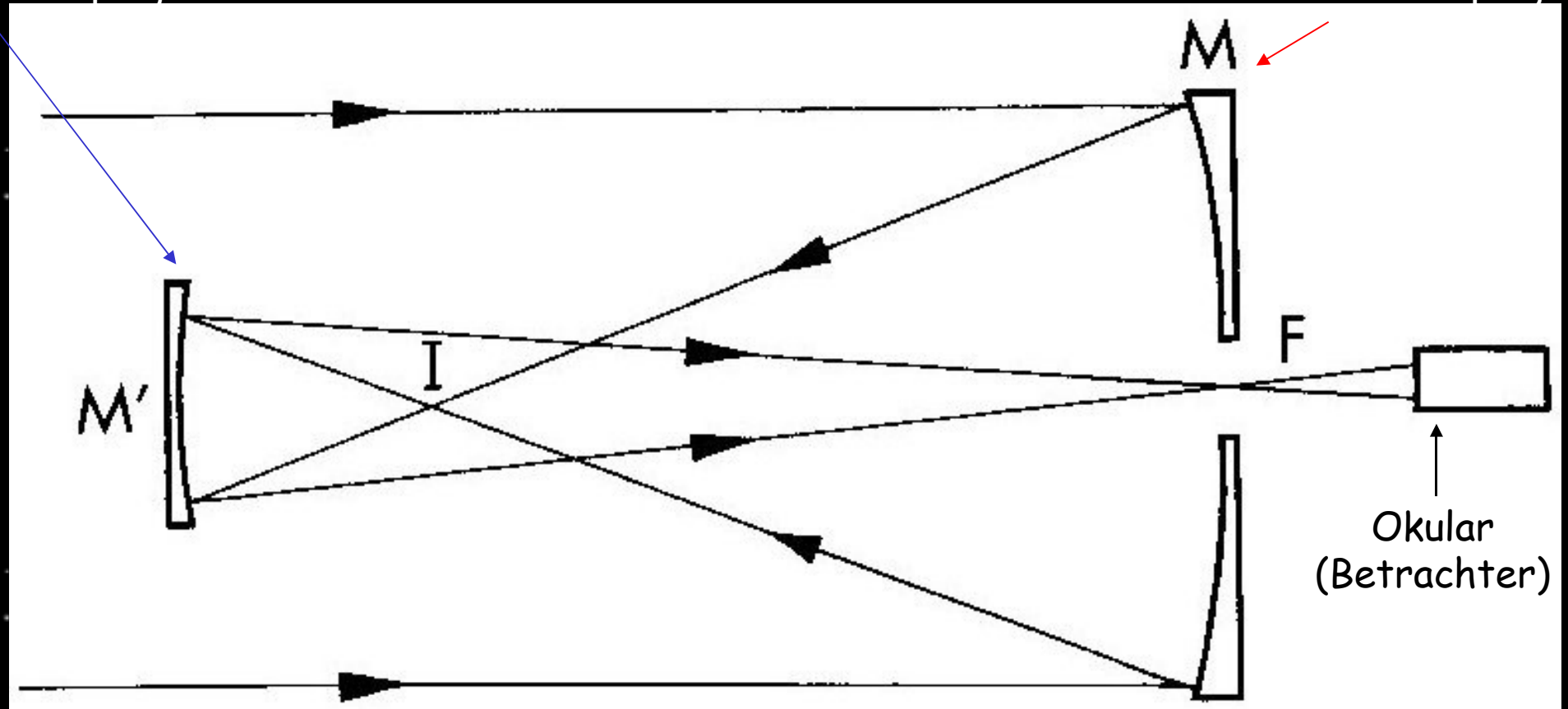


Das gregorianische Teleskop

(beschrieben 1663 von J. Gregory)

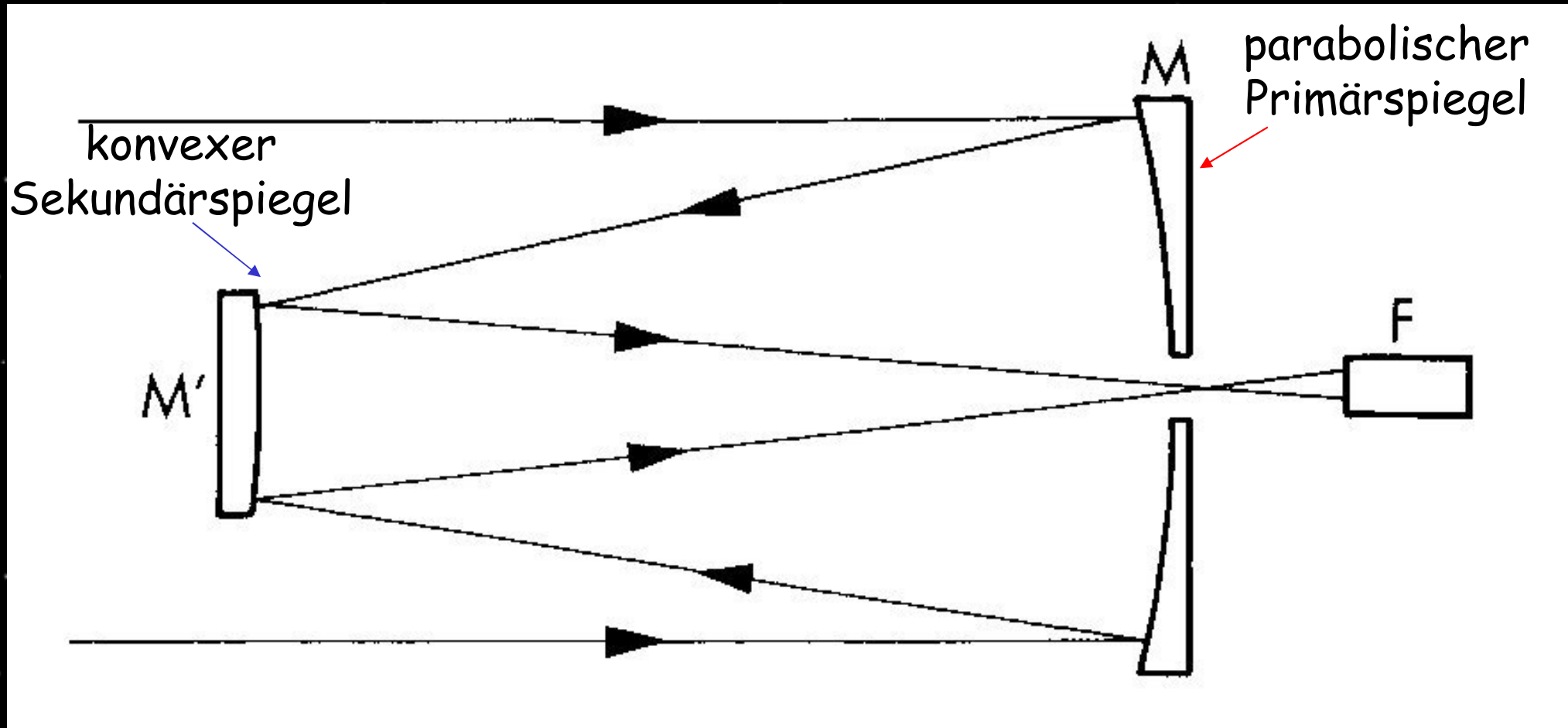
parabolischer
Sekundärspiegel

parabolischer
Primärspiegel



Das Cassegrain-Teleskop

(1672)

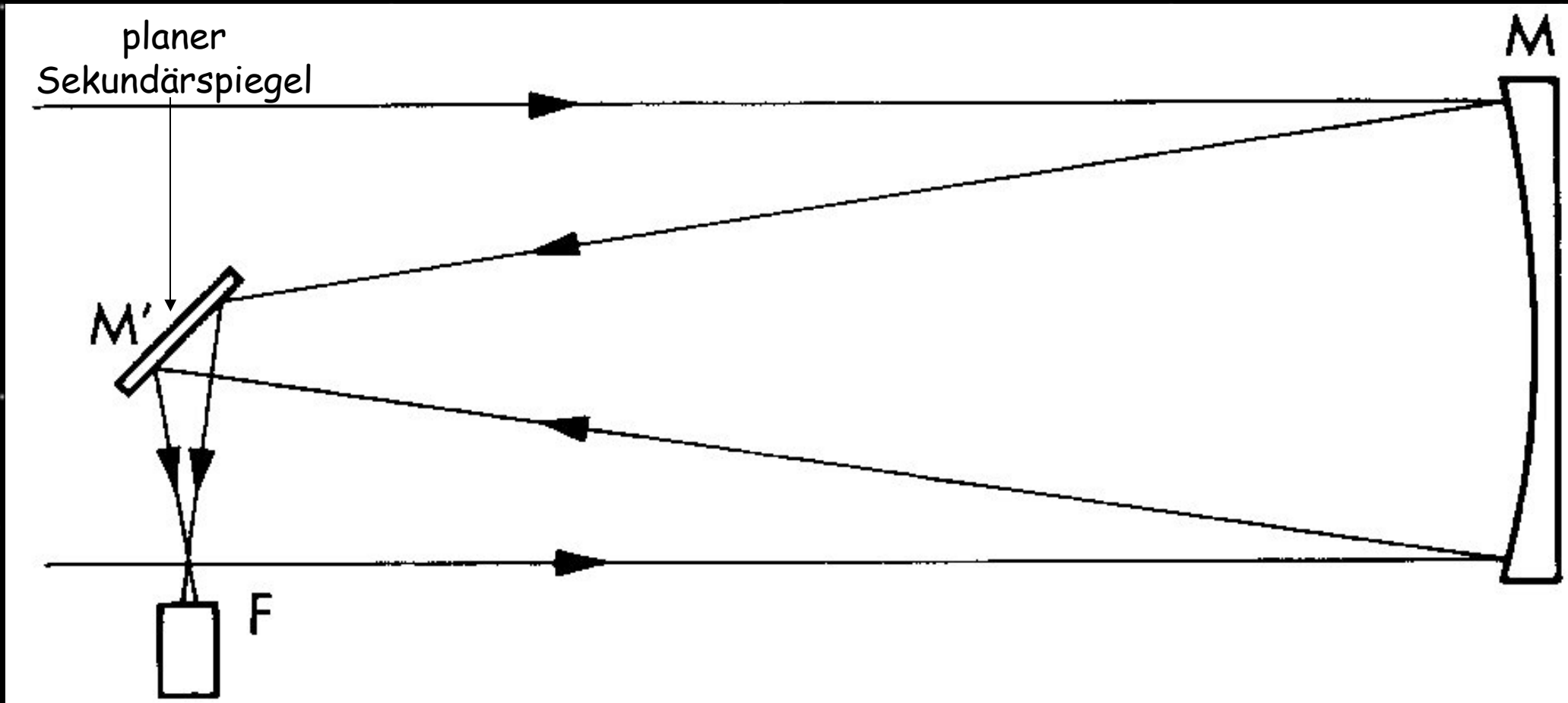


Ein konvexer Sekundärspiegel ermöglicht eine **größere Brennweite** und damit eine **höhere Vergrößerung**.

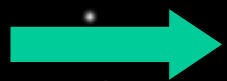
Das Cassegrain-System mit seinem Nasmyth-Fokus ist heute noch sehr populär.

Das Newtonsche Teleskop

(erster gebauter Reflektor; 1688)



Der gerade Sekundärspiegel ermöglicht einen Fokus außerhalb der Teleskopröhre (Newton-Fokus).

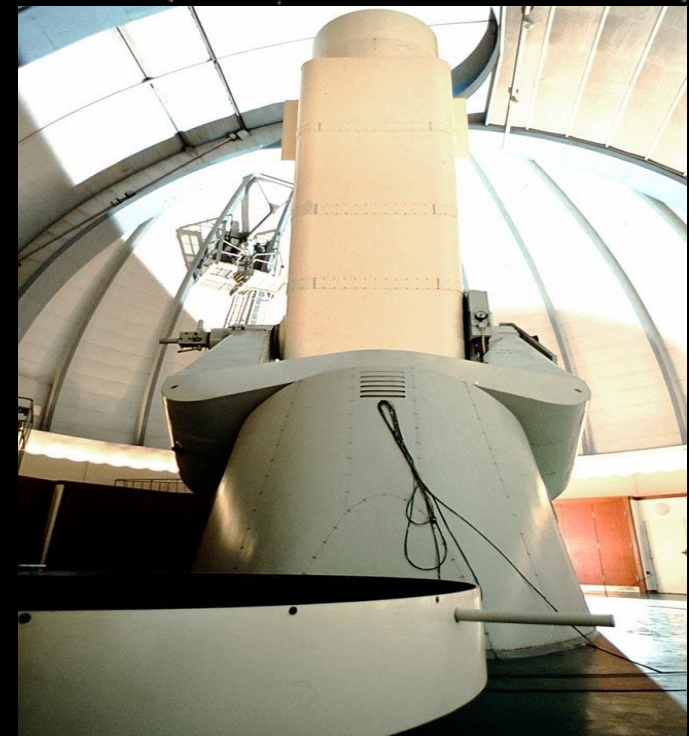
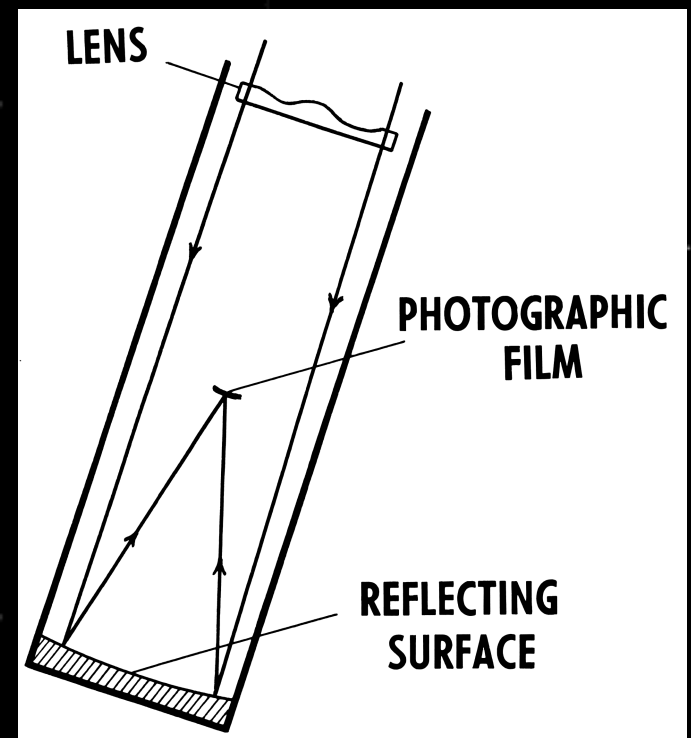


Einsatz eines Primärspiegels **ohne zentrales Loch** möglich!
Seitliche Anordnung von Instrumenten möglich!

Der Schmidt-Spiegel

- Sphärischer Hauptspiegel
 - Leicht zu fertigen
- Dünne Korrekturplatte
 - Sehr großes Gesichtsfeld

Landessternwarte Tautenburg:
Spiegeldurchmesser 2m,
Schmidt-Platte 1.34m,
Gesichtsfeld: $2.4^{\circ} \times 2.4^{\circ}$



Strahlführung

Coudé-System:

- Auskopplung des Strahls des Cassegrain-Teleskops entlang der Stundenachse (Nachführachse)
 - Festes Bild im Fokus
 - keine Bildrotation im Laufe der Nacht

Nasmyth-System:

- Auskopplung des Strahls entlang der Höhenachse
 - Stationäre waagerechte Montierung der Empfänger

Die großen Optischen

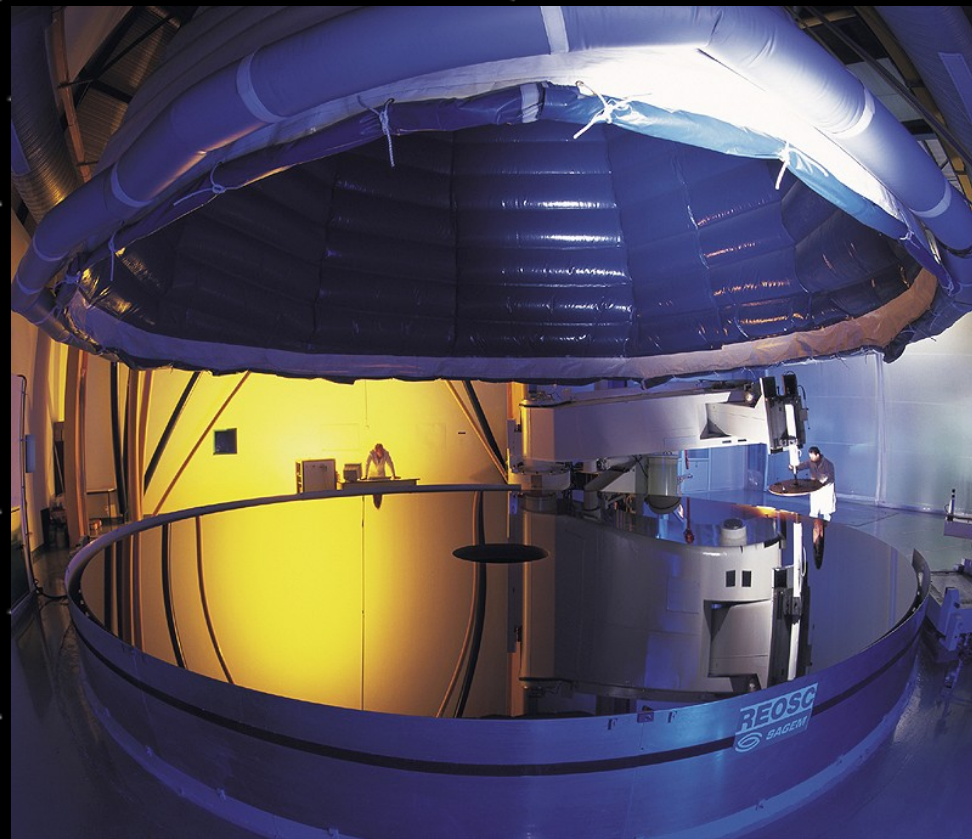


Hale-Reflector (5m), Mount Palomar

VLT



Der Primärspiegel



polierter Primärspiegel

- *Material:* Spezialkeramik („Zerodur“)
- *Beschichtung:* Aluminiumfilm
- *Durchmesser:* 8,2 m
- *Dicke:* 17,5 cm
- *Optische Oberfläche:* 50 m²
- *Gewicht:* 23 t
- aktive Kontrolle der Oberfläche
- *Produktionszeit:*

2 Jahre !

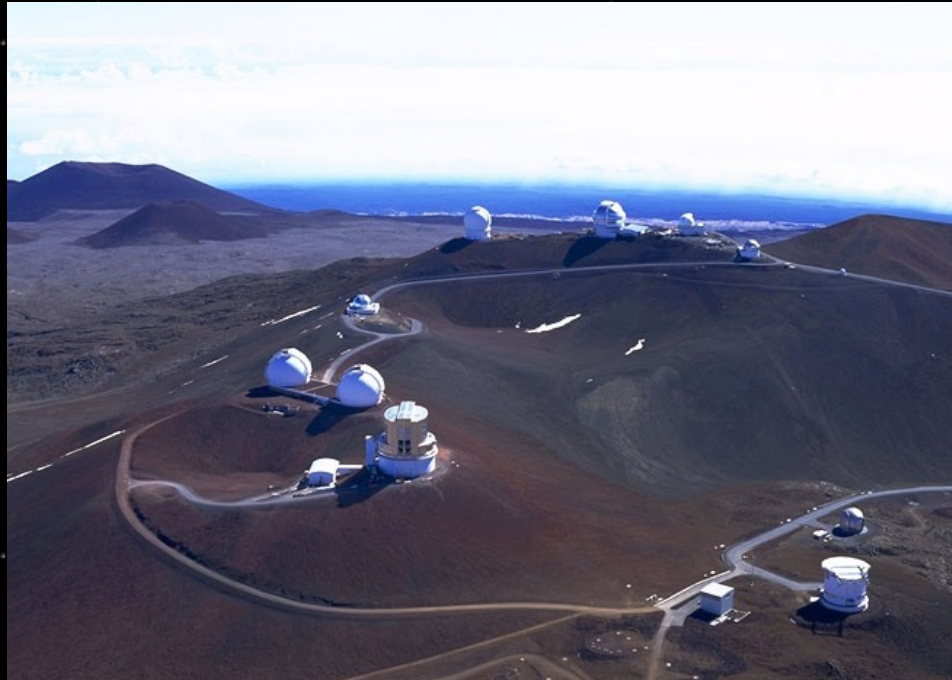
Der Primärspiegel stellt das „Herz“ jedes Teleskops dar und muss mit extremer Präzision gefertigt werden !

➡ max. Abweichung von der idealen Form: 0,05 µm !

Die Keck-Teleskope

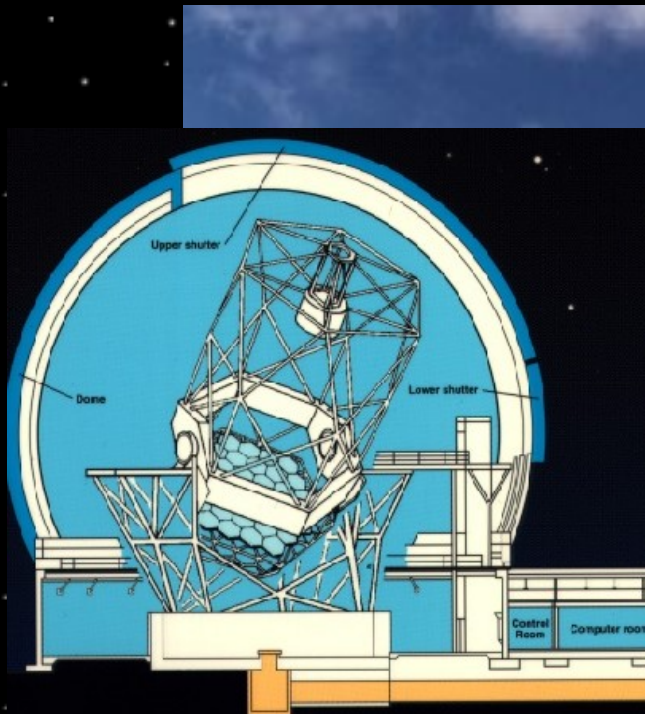


- *Standort:* Mauna Kea (4200 m), Hawaii
- *Betreiber:* CIT, U of C, NASA
- *Inbetriebnahme:* Mai 1993 (Keck I)
Oktober 1996 (Keck II)
- *Ø der Primärspiegel:* 10 m (segmentiert)
 - *Anzahl der Segmente:* 36
 - *Ø der Segmente:* 1,8 m (sechseckig)
- *bewegliche Masse:* 905 t
- aktive und adaptive Optik
- Auflösung bis 0.3''

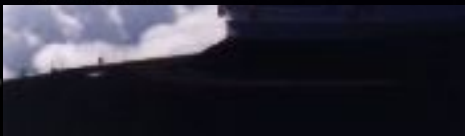


bisher größte Einzelteleskope

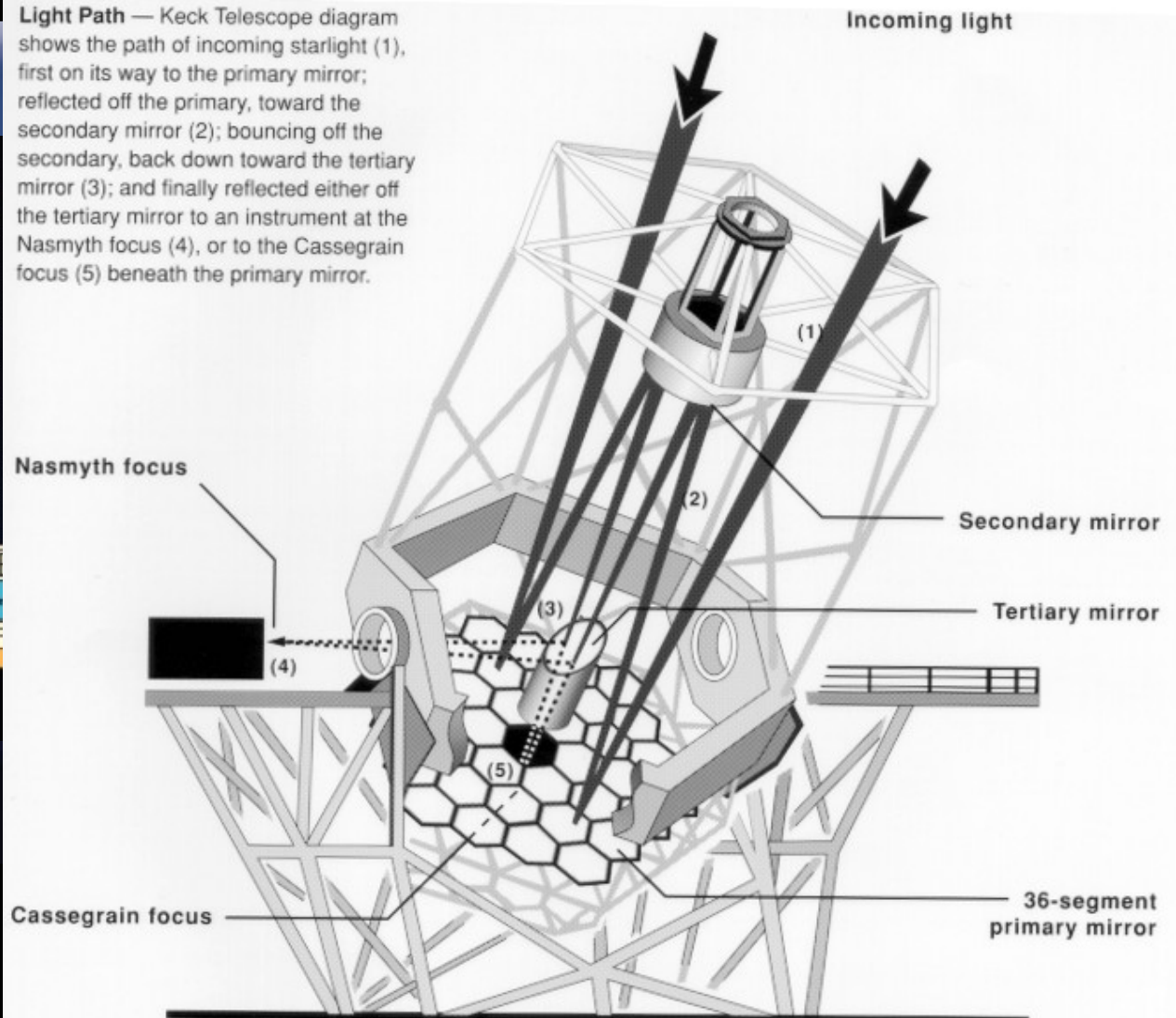
Die Größe des Teleskops



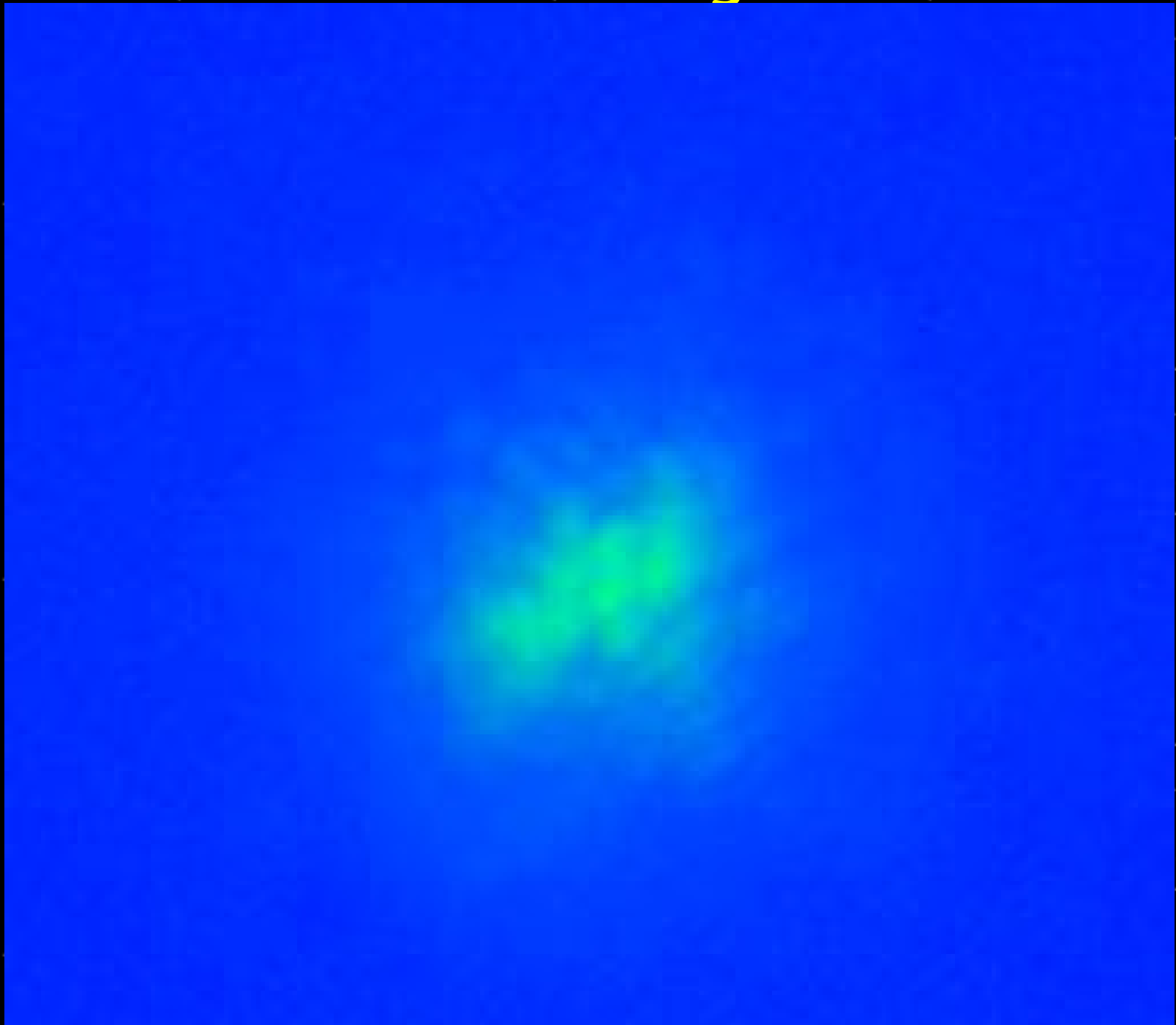
Keck I



Light Path — Keck Telescope diagram shows the path of incoming starlight (1), first on its way to the primary mirror; reflected off the primary, toward the secondary mirror (2); bouncing off the secondary, back down toward the tertiary mirror (3); and finally reflected either off the tertiary mirror to an instrument at the Nasmyth focus (4), or to the Cassegrain focus (5) beneath the primary mirror.

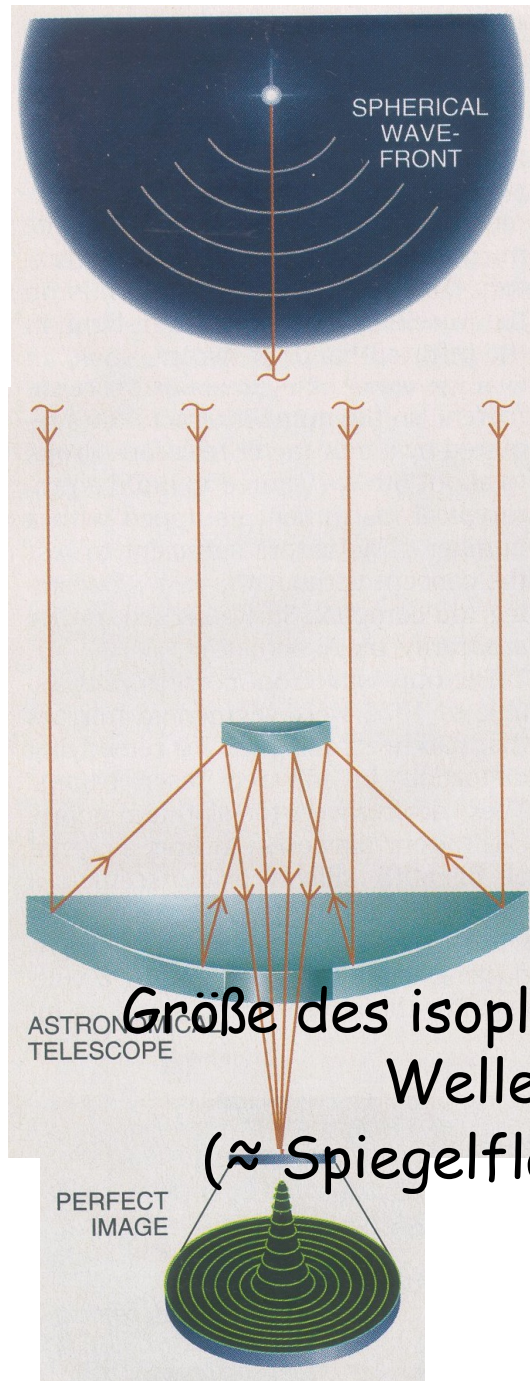


Das Seeing

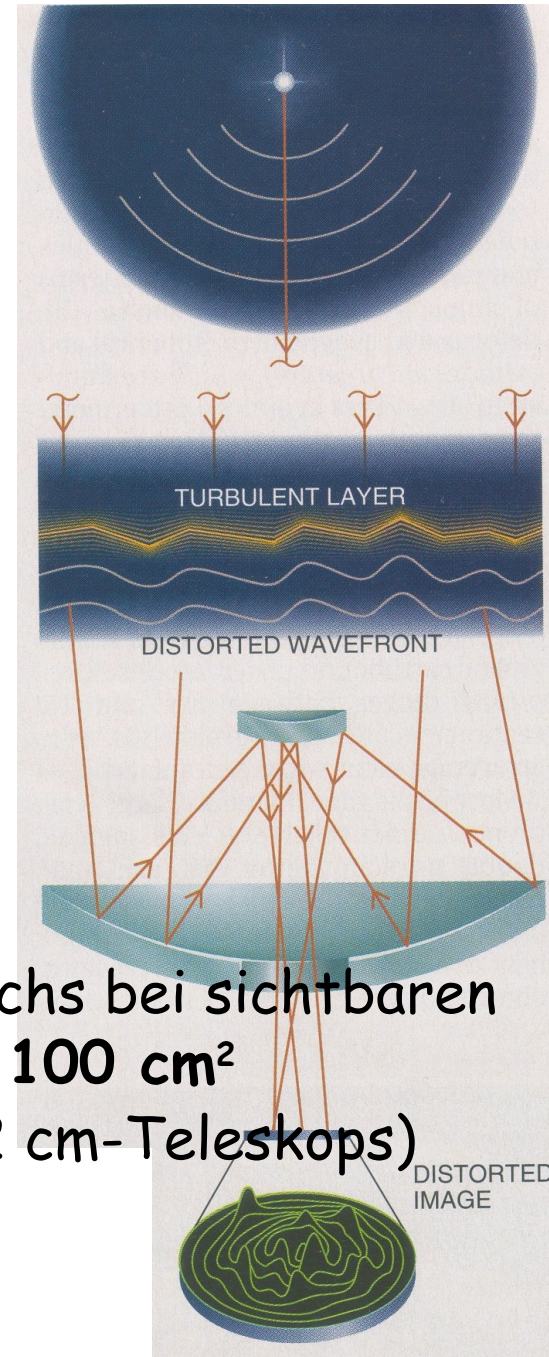


Seeing

Idealfall



Realfall



Größe des isoplanaren Bereichs bei sichtbaren Wellenlängen: ca. 100 cm^2
(\approx Spiegelfläche eines 12 cm-Teleskops)

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
1-Opener: Hubble in orbit
Courtesy of NASA/JSC

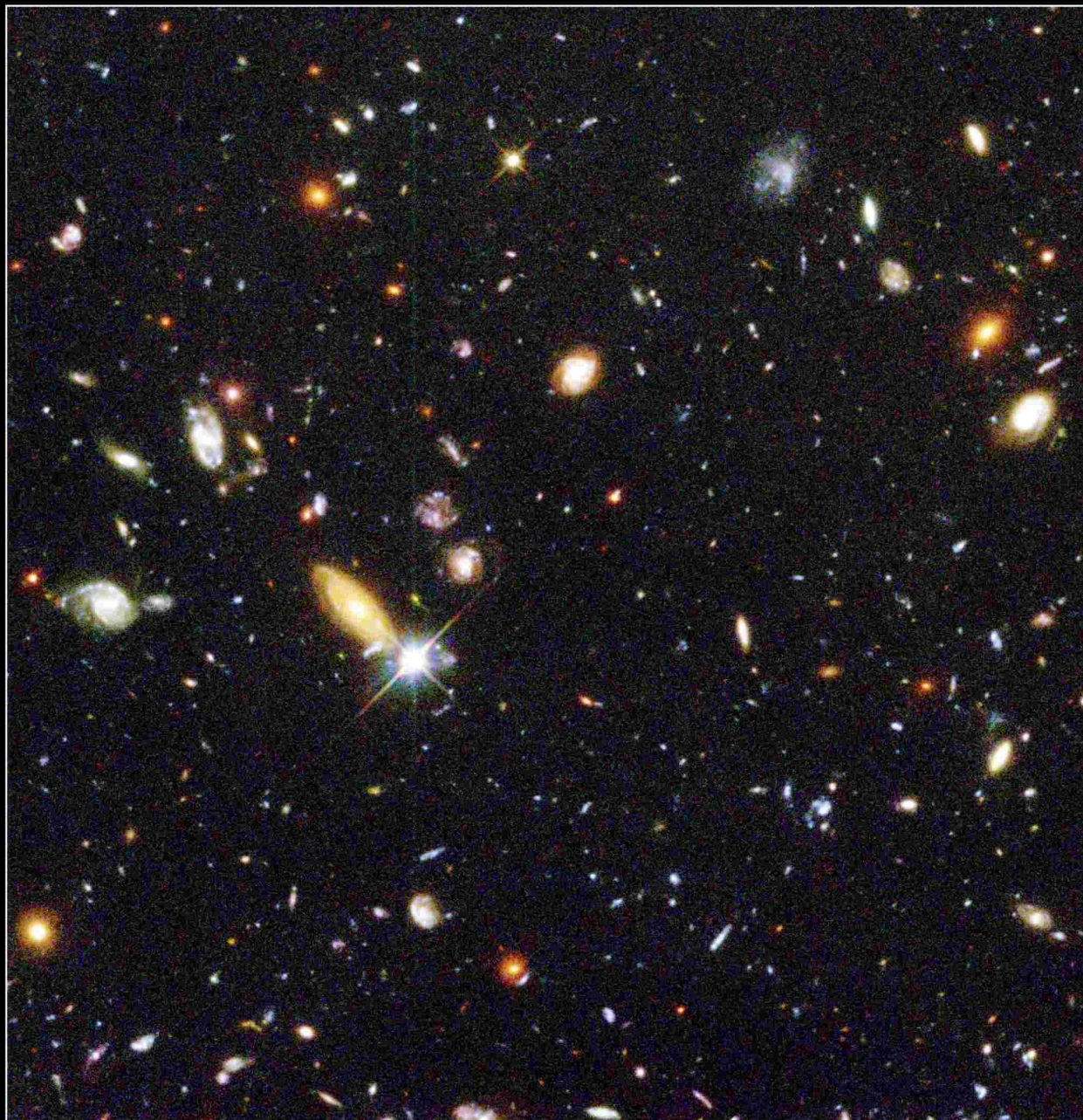


Harcourt, Inc.

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
3-23: HST mirror
Courtesy of Raytheon Optical Systems



Harcourt, Inc.



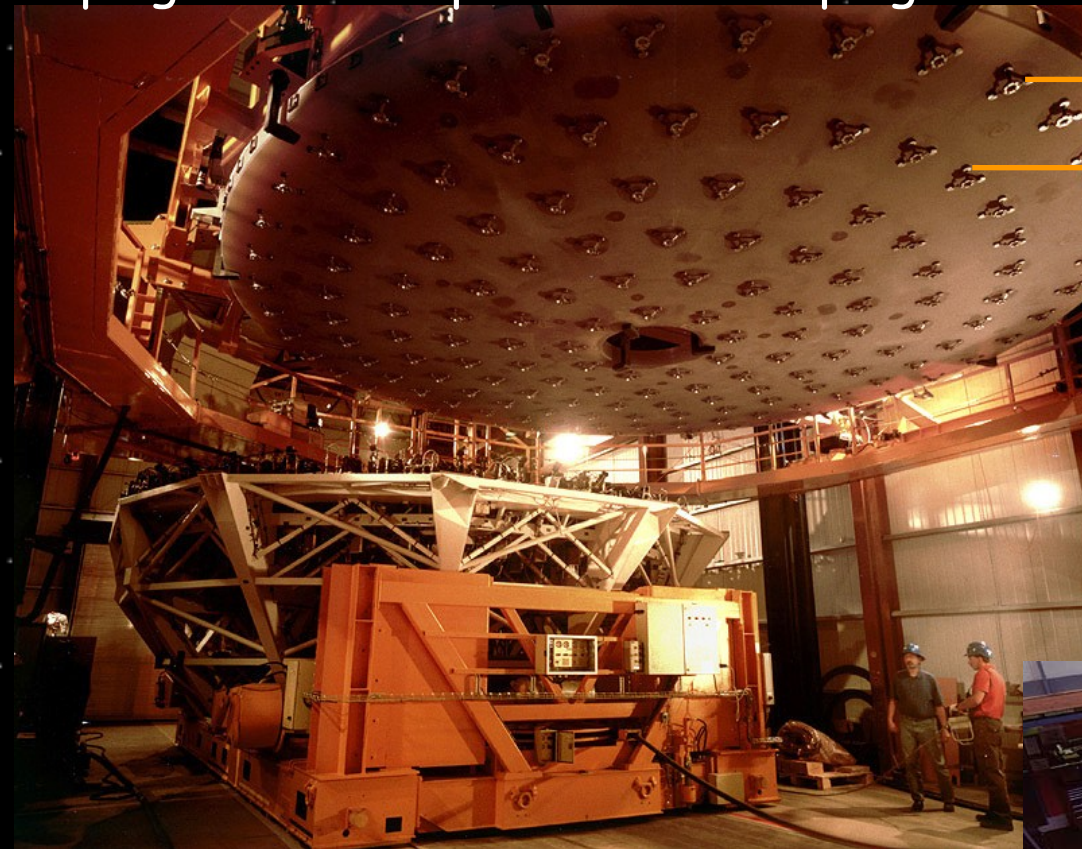
Hubble Deep Field
Hubble Space Telescope • WFPC2

VLT



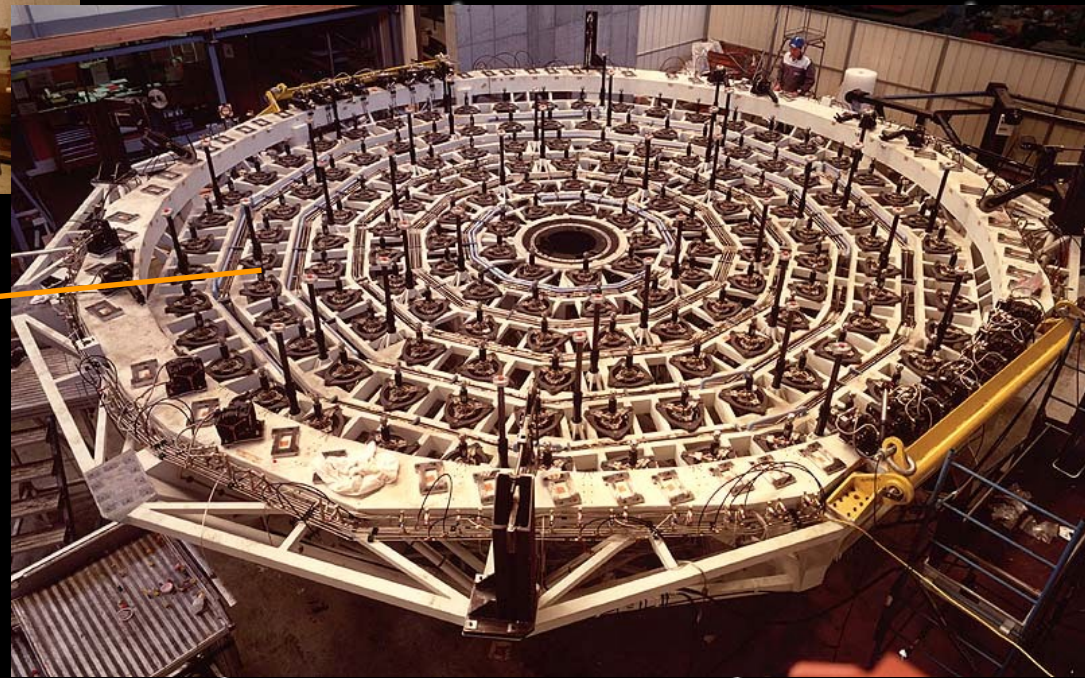
Die aktive Optik

Spiegel beim Einpassen in die Spiegelzelle



„Drucktassen“ zur Verteilung des Gewichtes und zur Verformung der Oberfläche

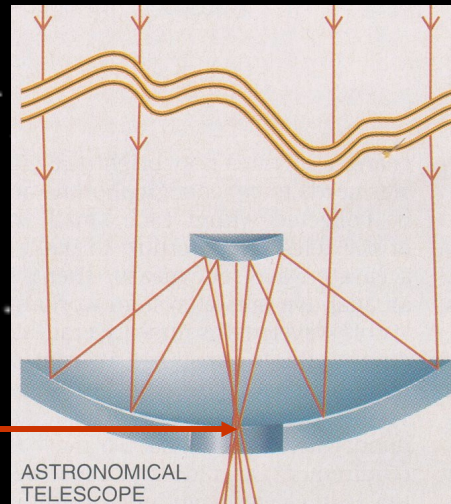
Spiegelzelle mit hydraulischen Stempeln



hydraulische Stempel („Aktuatoren“) zur aktiven Verformung der Spiegeloberfläche

Die adaptive Optik

Voraussetzung: **Guide star**
natürliche oder künstliche
Punktquelle im Sichtfeld



ASTRONOMICAL TELESCOPE

Aufteilung des Strahls in
Analysestrahl und Bildstrahl

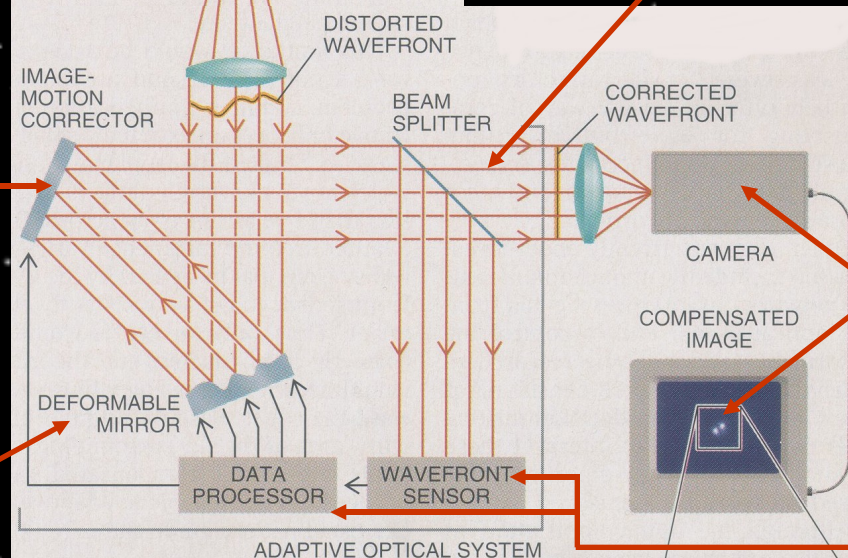


IMAGE-MOTION CORRECTOR

DISTORTED WAVEFRONT

BEAM SPLITTER

CORRECTED WAVEFRONT

CAMERA

COMPENSATED IMAGE

DEFORMABLE MIRROR

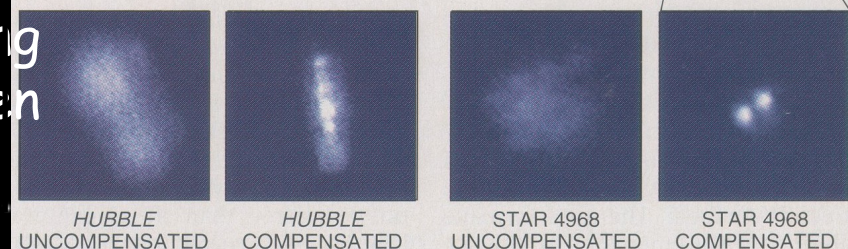
DATA PROCESSOR

WAVEFRONT SENSOR

ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM

Detektion und Analyse
des Bildes

Analyse des Verzerrungs-
musters und Steuerung
des verformbaren
Spiegels



HUBBLE UNCOMPENSATED

HUBBLE COMPENSATED

STAR 4968 UNCOMPENSATED

STAR 4968 COMPENSATED

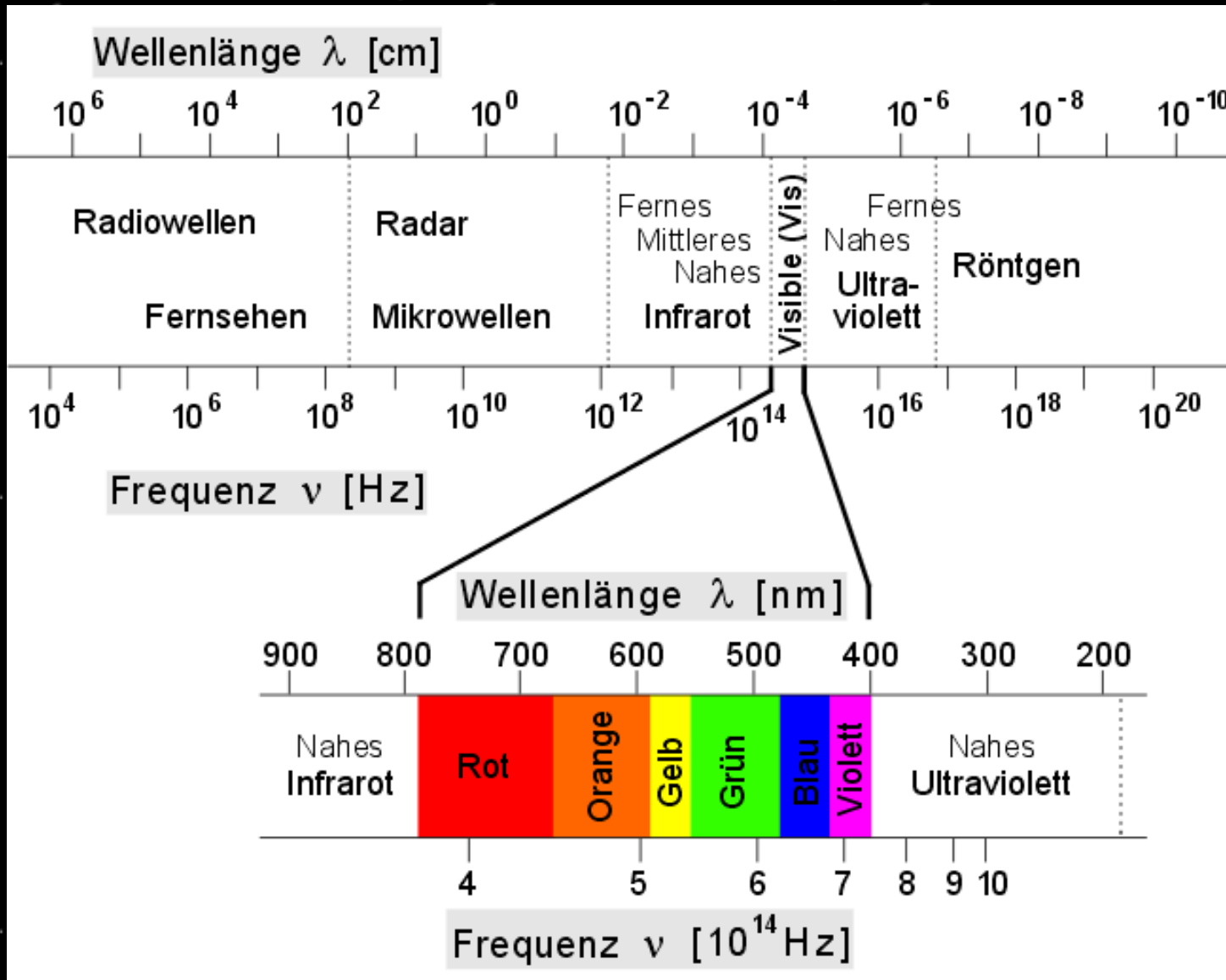
Konzentration des
Sternenlichts in
einem schmalen Strahl

Bewegungskorrektur
des Bildes

Korrektur der Verzerrung
durch einen verformbaren
Spiegel

Teleskope bei anderen Wellenlängen

Das elektromagnetische Spektrum

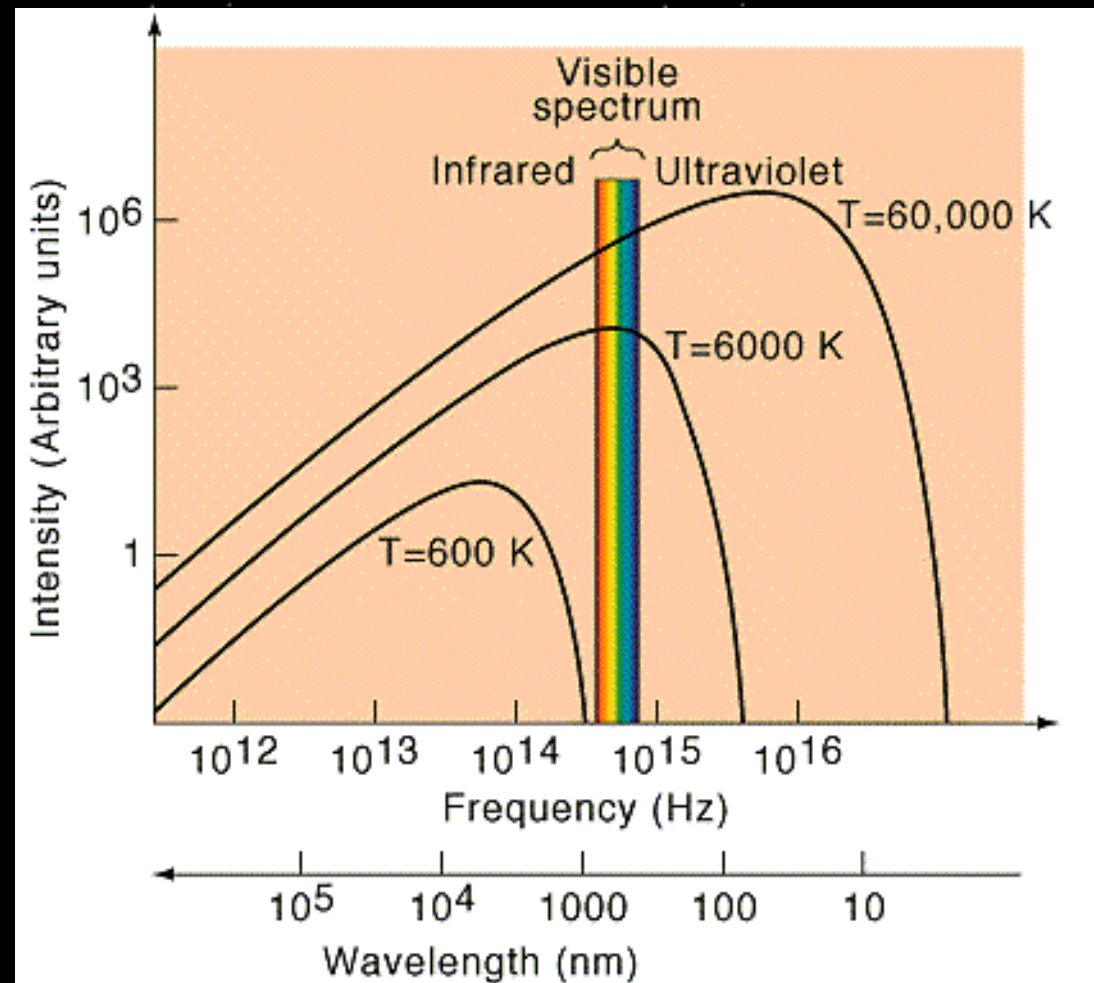


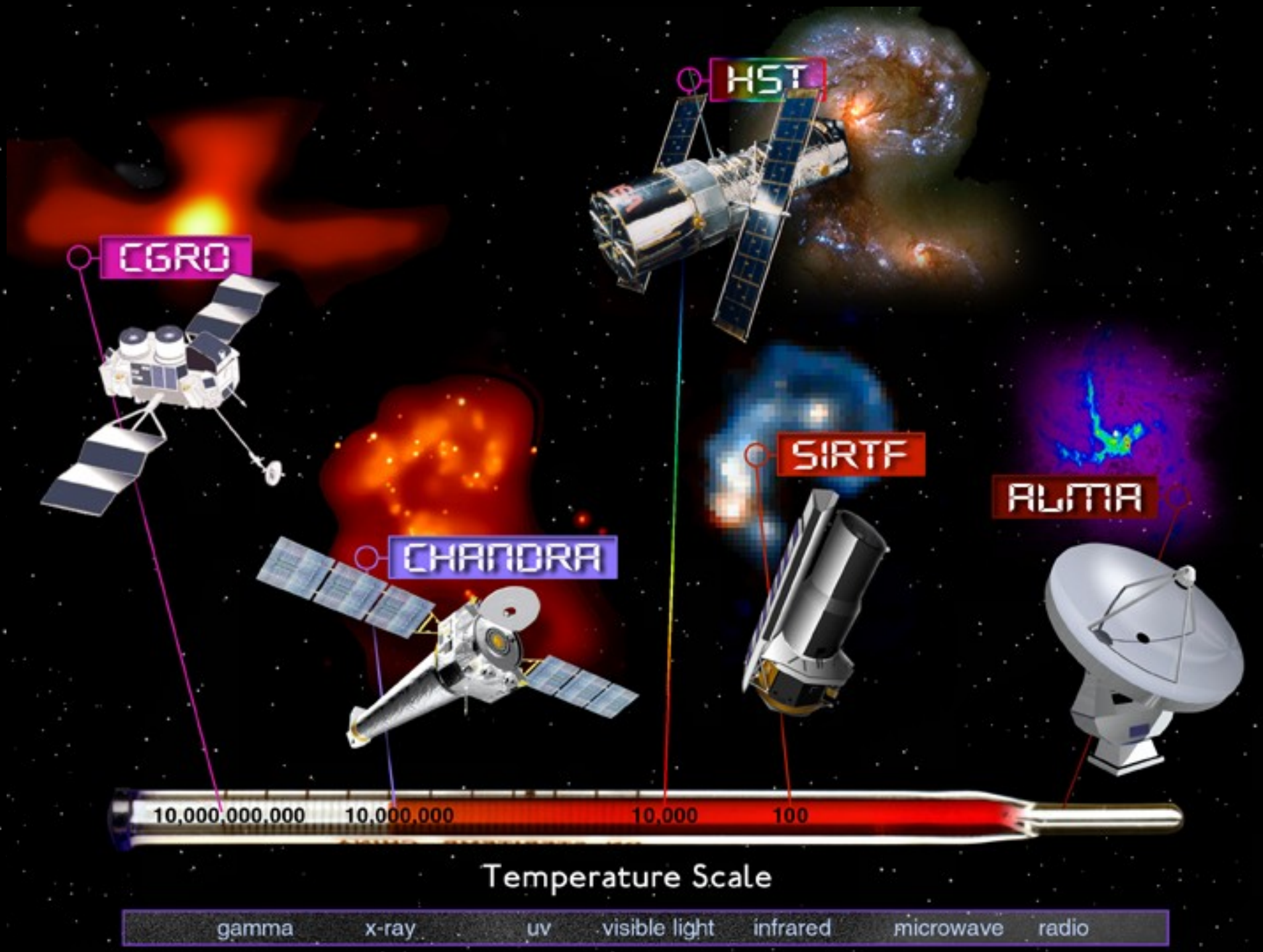
Teleskope bei anderen Wellenlängen

Objekte verschiedener Temperaturen strahlen bei verschiedenen Frequenzen

Schwarzkörperstrahlung:

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}$$

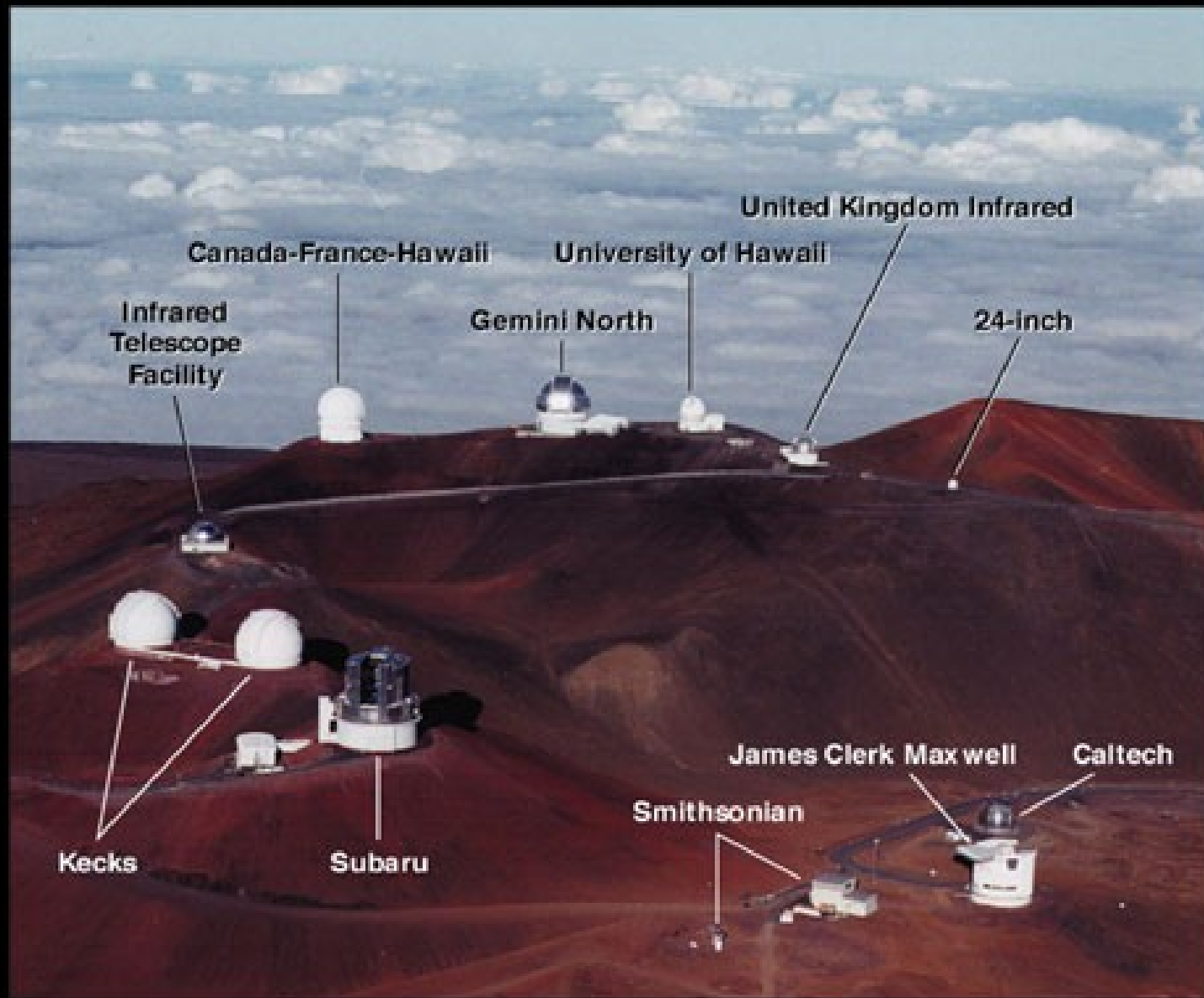




Temperature Scale

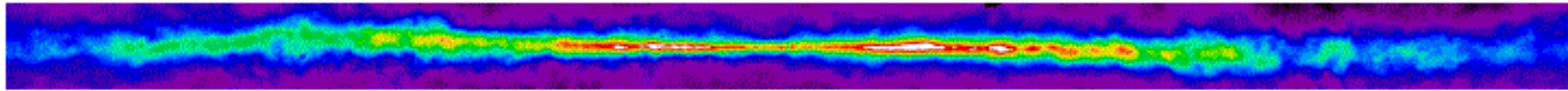
gamma x-ray uv visible light infrared microwave radio

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
3-13: Mauna Kea Observatory

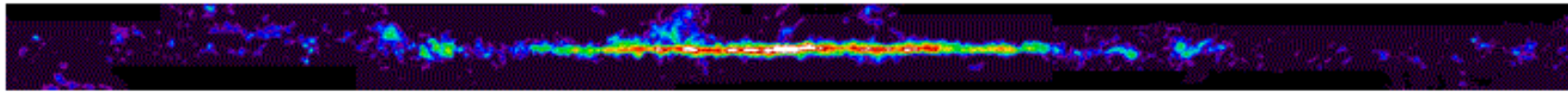


Teleskope bei anderen Wellenlängen

cm range



mm range



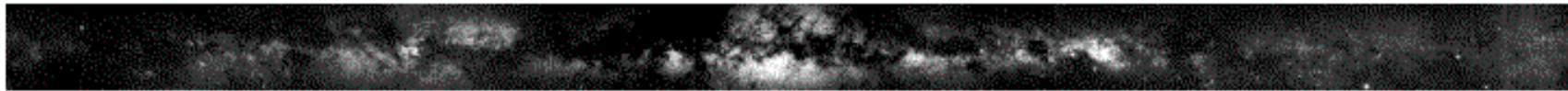
Mid Infrared



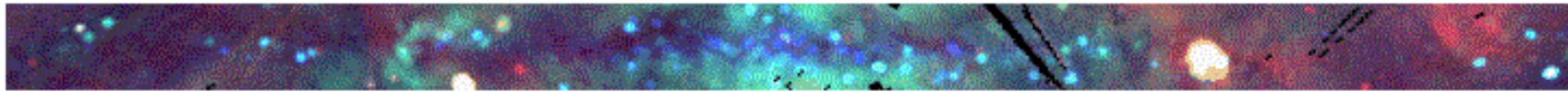
Near Infrared



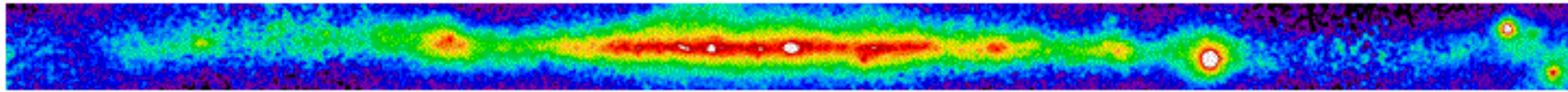
Optical



X-Ray

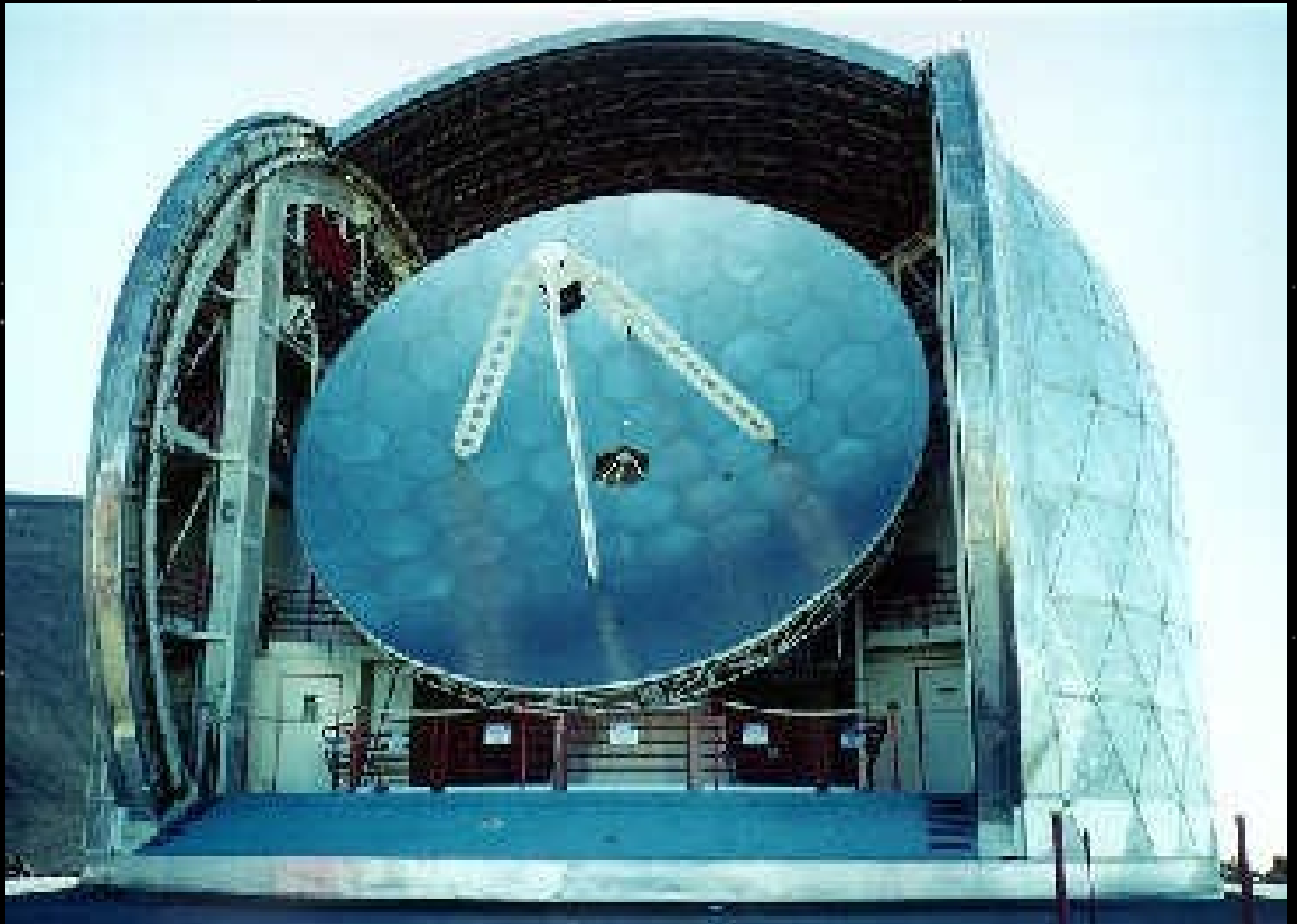


Gamma Ray



Bei verschiedenen Wellenlängen sehen wir die unterschiedlichen Komponenten der Milchstraße

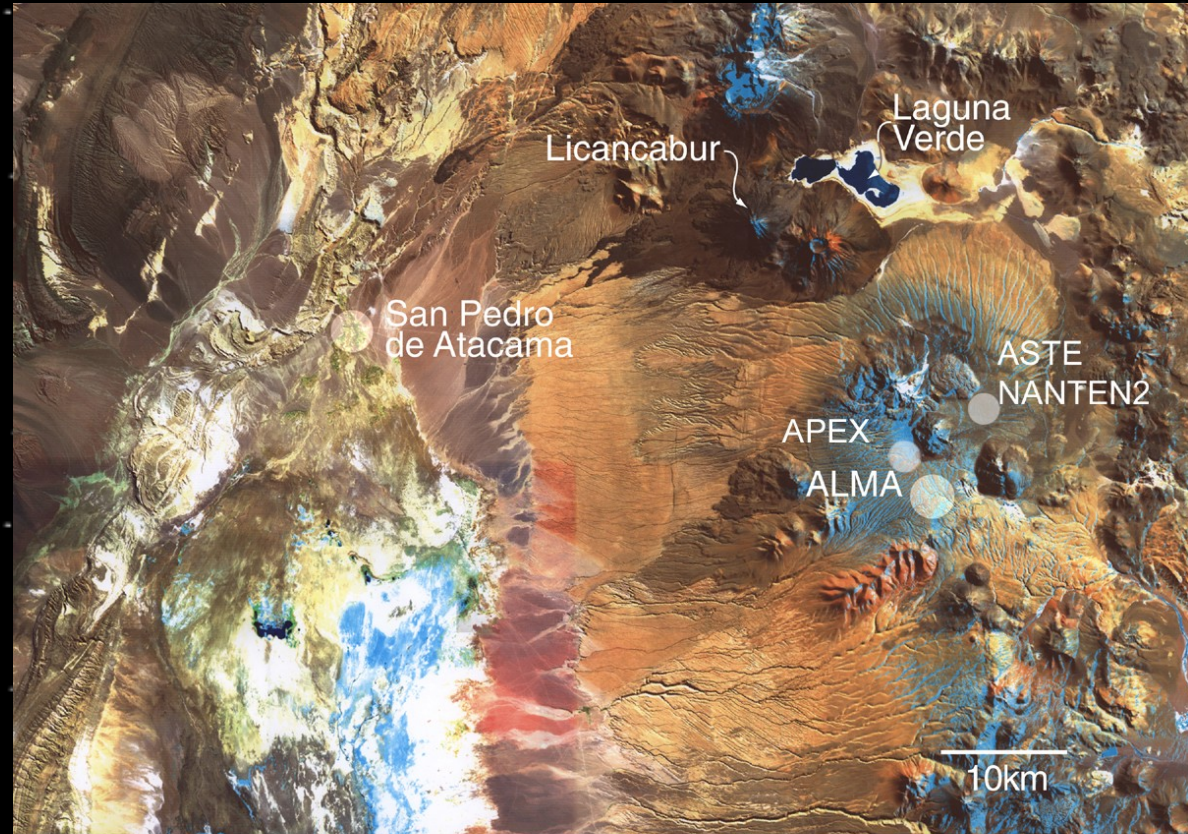
Radioteleskope



KOSMA



NANTEN-2



Location of the Compact Configuration of ALMA

ESO PR Photo 24c/99 (8 June 1999)

© ESO/Cornell University



Effelsberg



Radiowellenlängen:

λ von cm-dm statt $< \mu\text{m}$

Auflösungsvermögen:

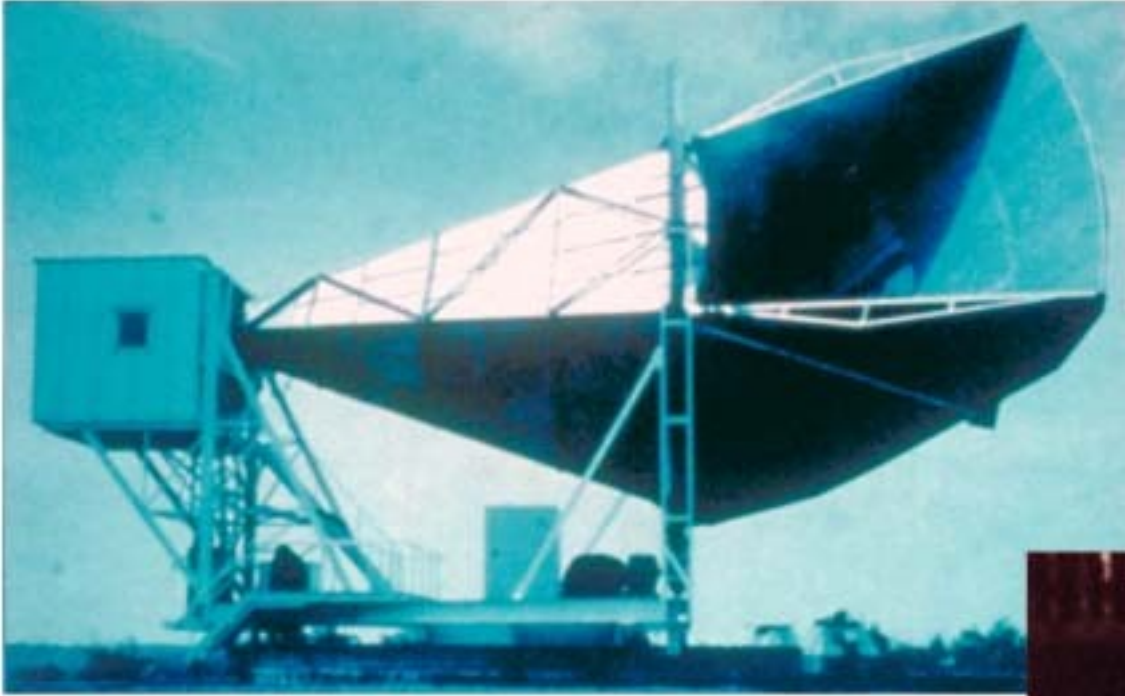
$$\Theta = 1.22 \lambda / D \text{ [rad]}$$

=> Teleskope müssen riesig sein.

Die Oberflächengenauigkeit von $\lambda/20$ lässt sich leicht erreichen



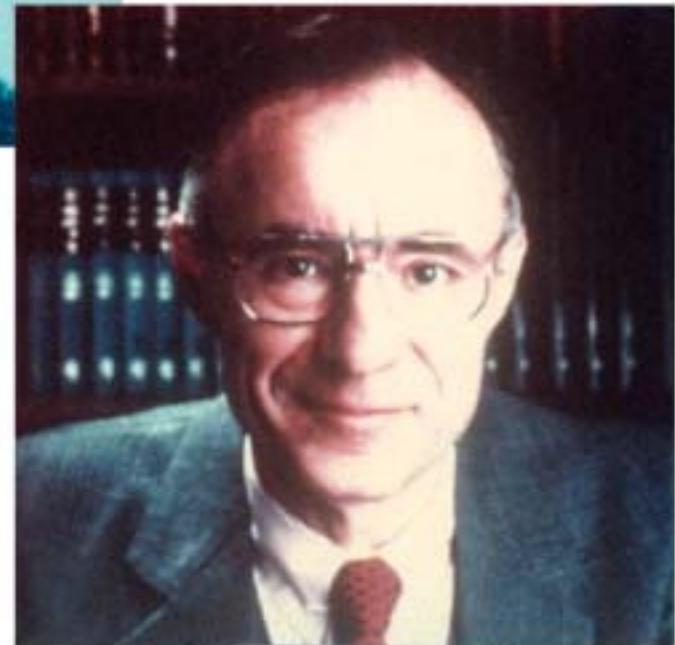
DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Microwave Receiver

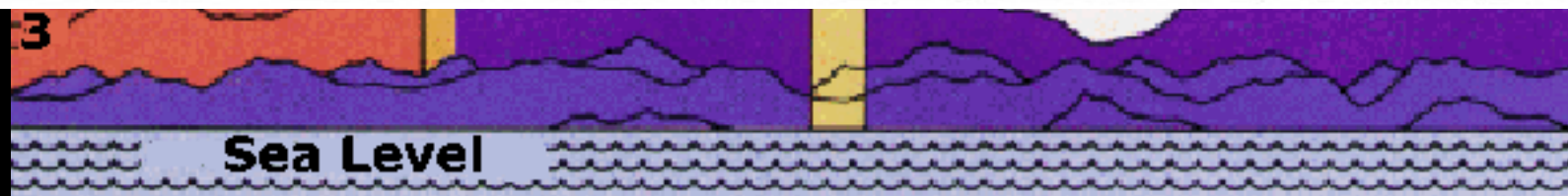
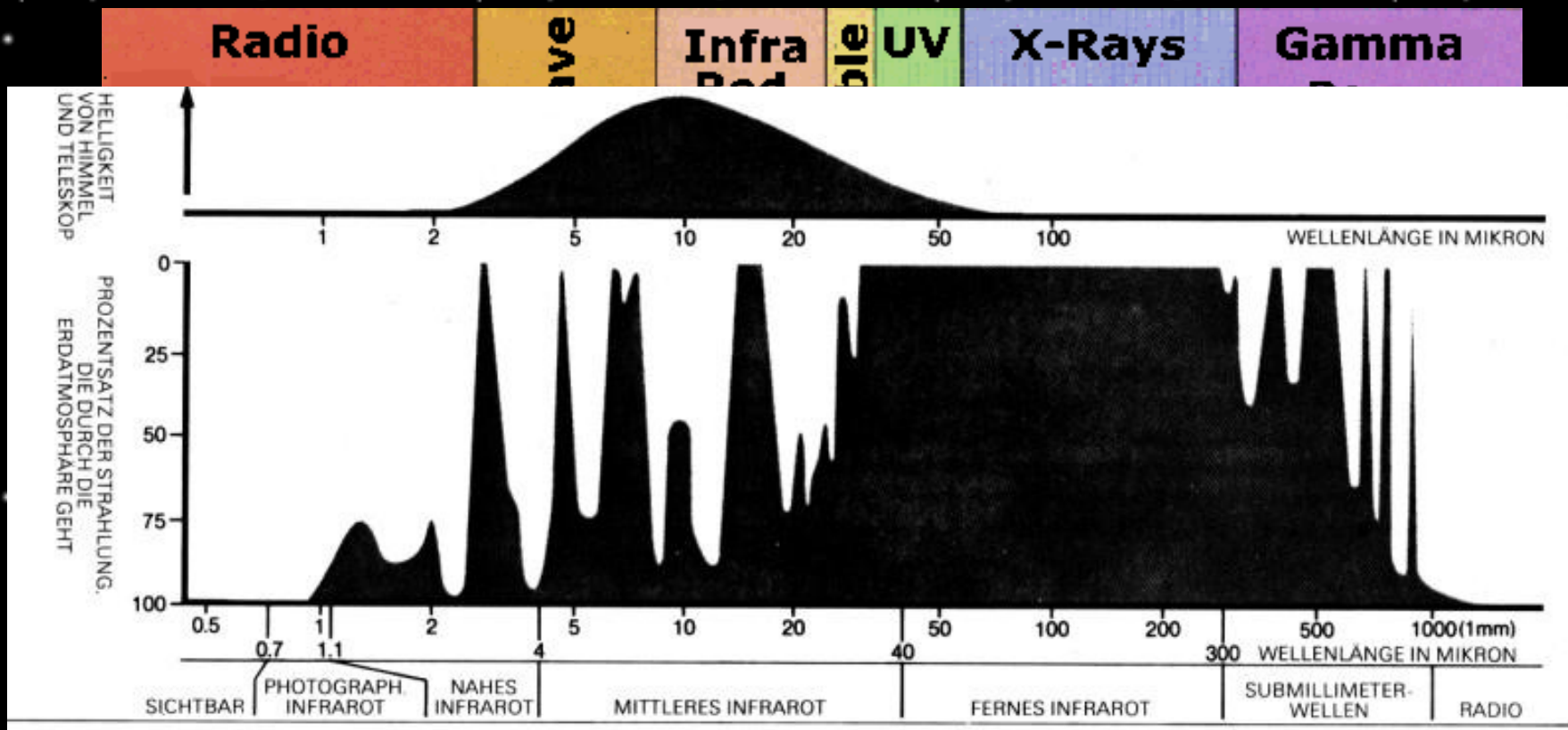


Robert Wilson



Arno Penzias

Die Atmosphäre



SOFIA

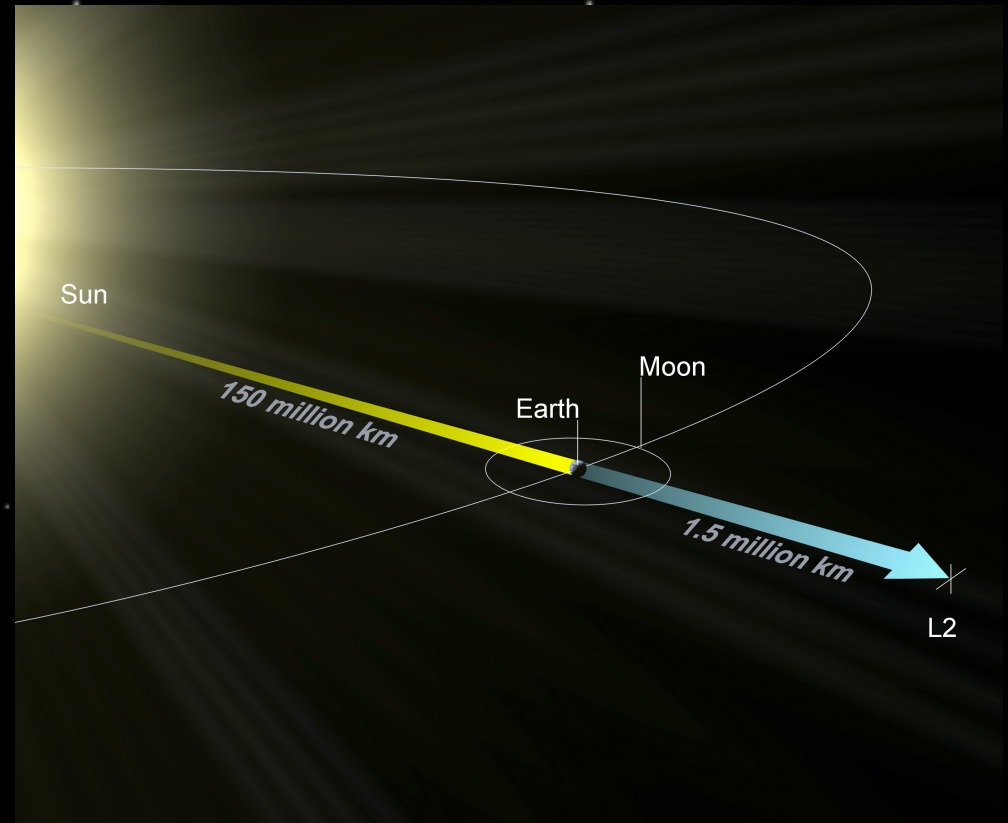
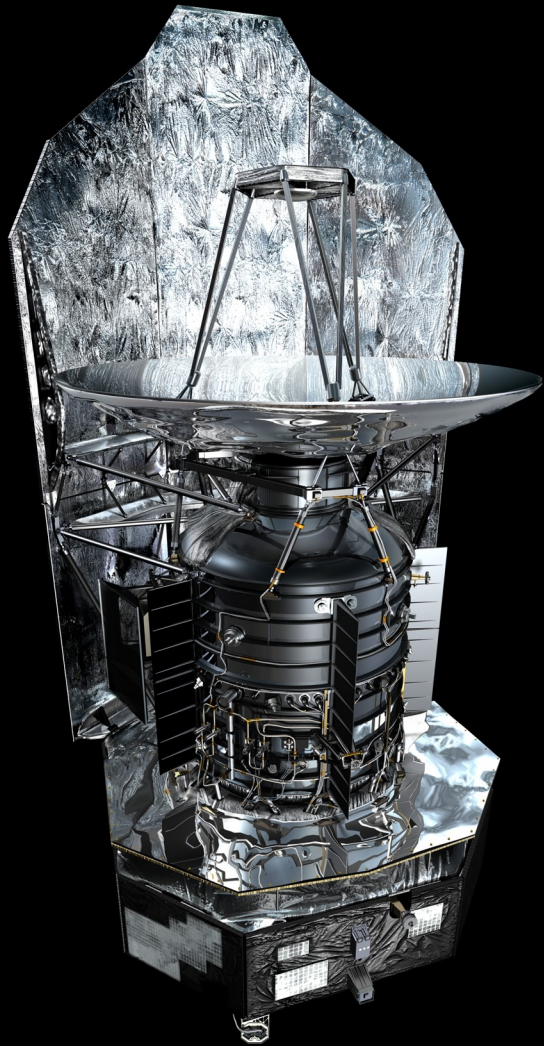


SOFIA



Herschel

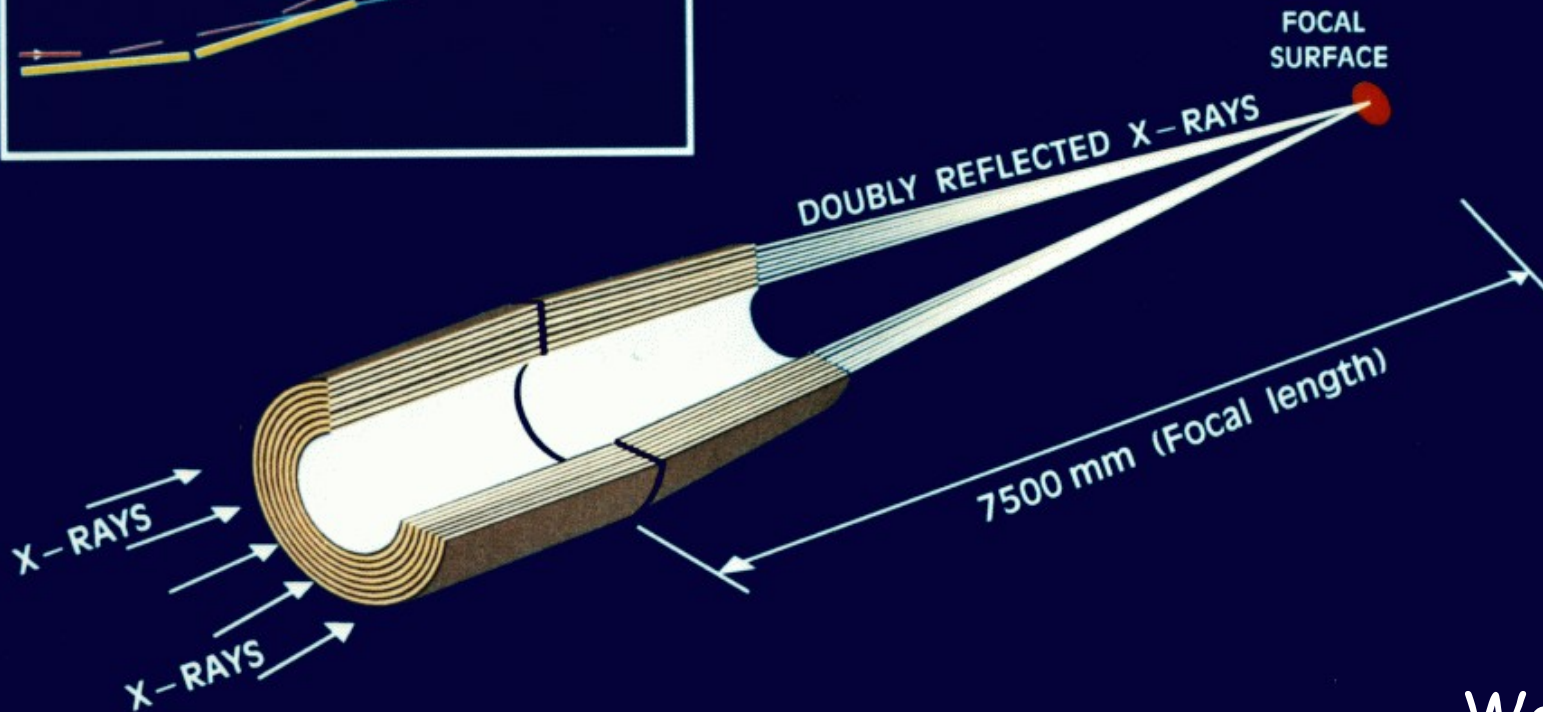
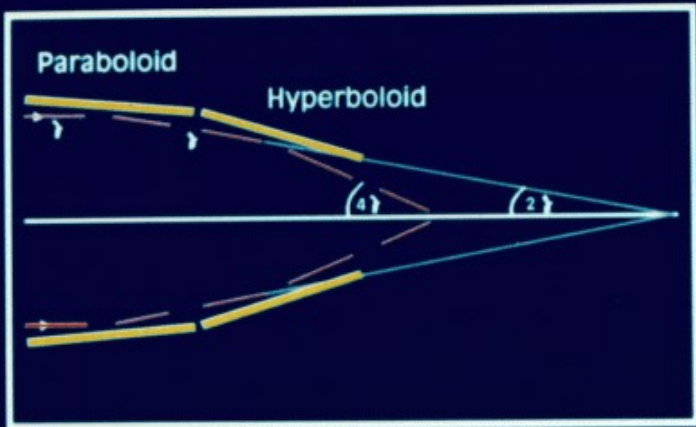
Fern-Infrarot-Observatorium



Röntgenteleskope



Harcourt, Inc.

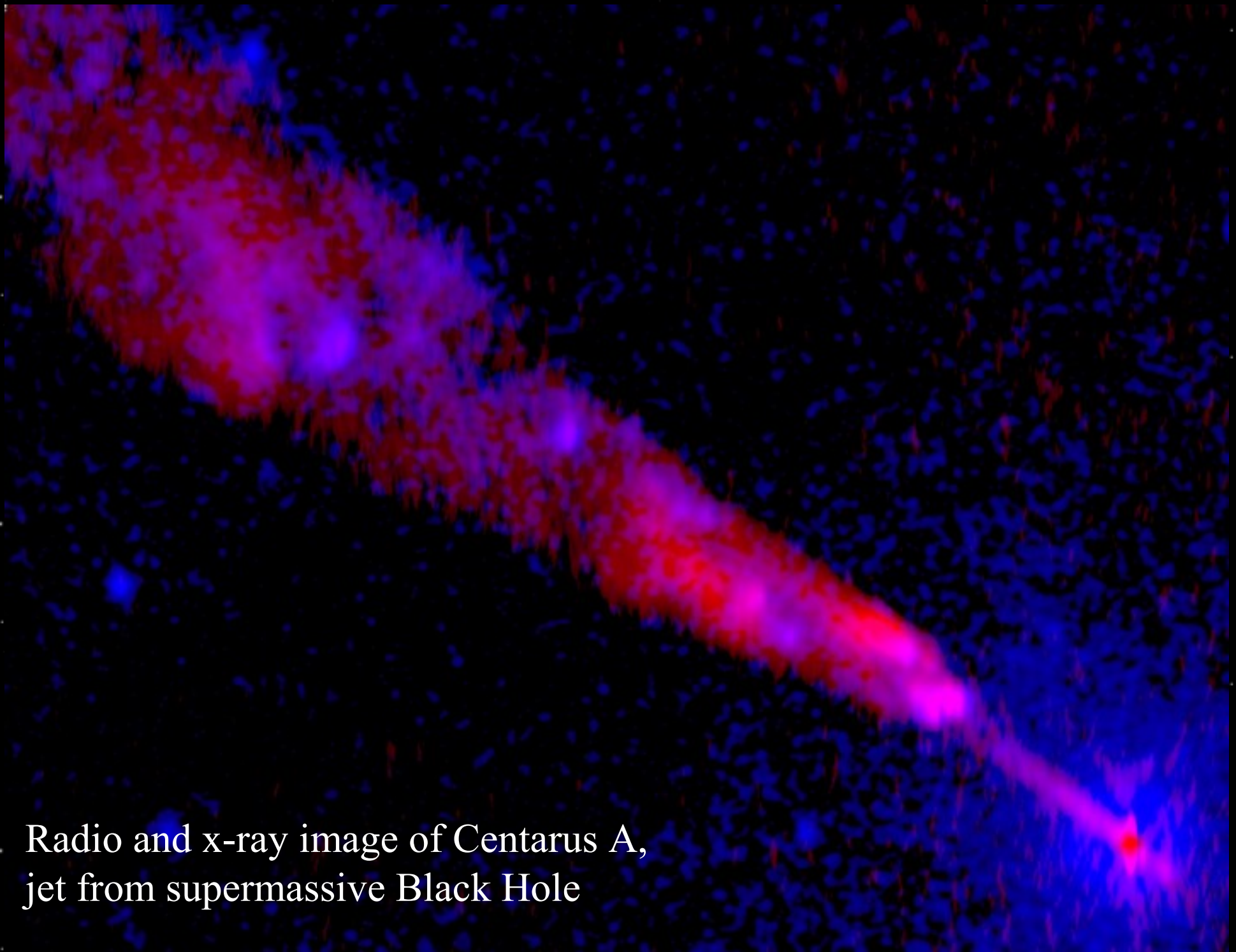


Wolter-Teleskop

XMM and Chandra



weitere Satelliten



Radio and x-ray image of Centarus A,
jet from supermassive Black Hole



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORSS)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

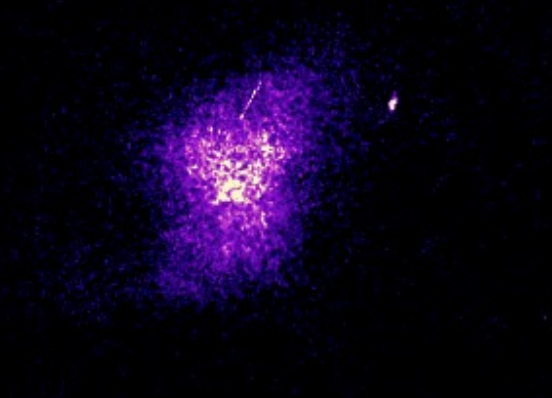
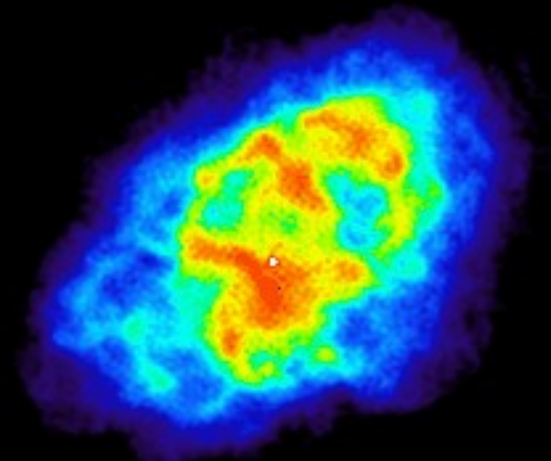
© European Southern Observatory



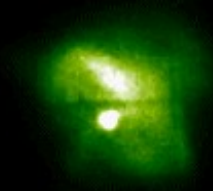
im Sichtbaren

Der Krebsnebel

im Radiowellenbereich



im Ultravioletten



im Röntgenlicht

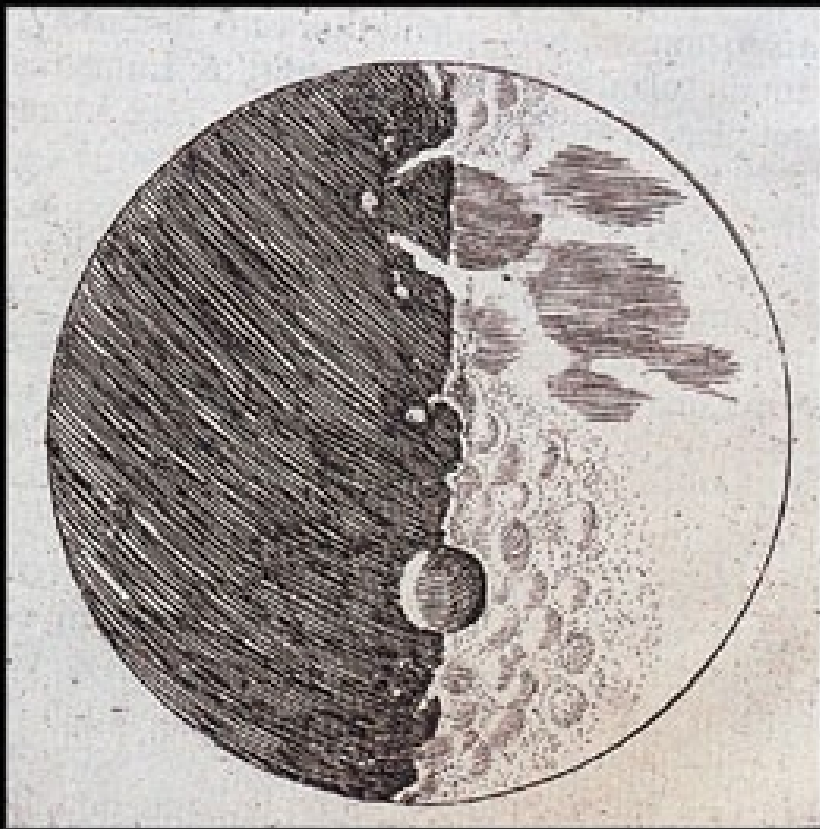
Detektoren

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium

By Pasachoff/Filippenko

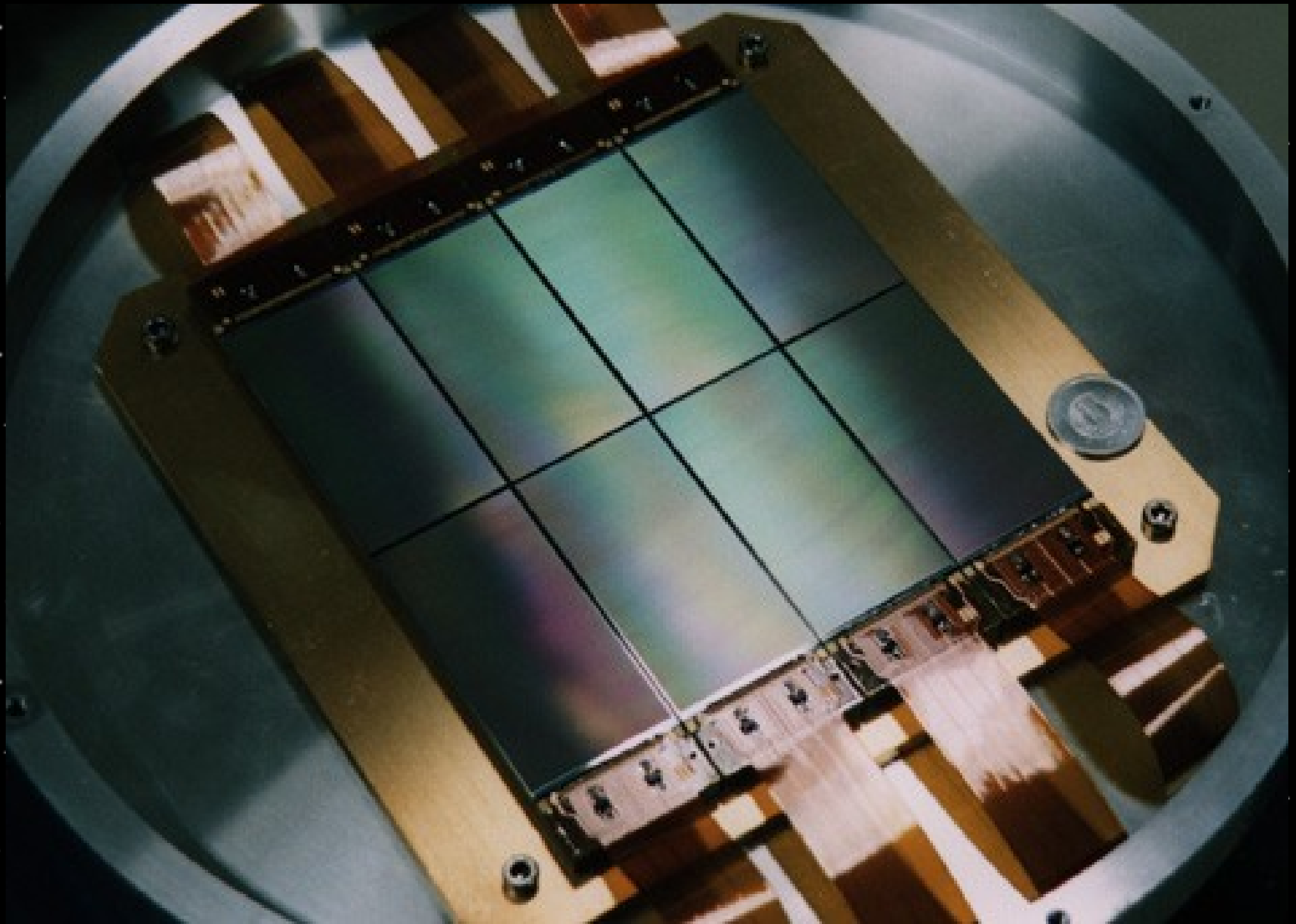
3-1: Galileo's moon

Courtesy of Jay M. Pasachoff after Ewen Whitaker (LPL/U.Az)

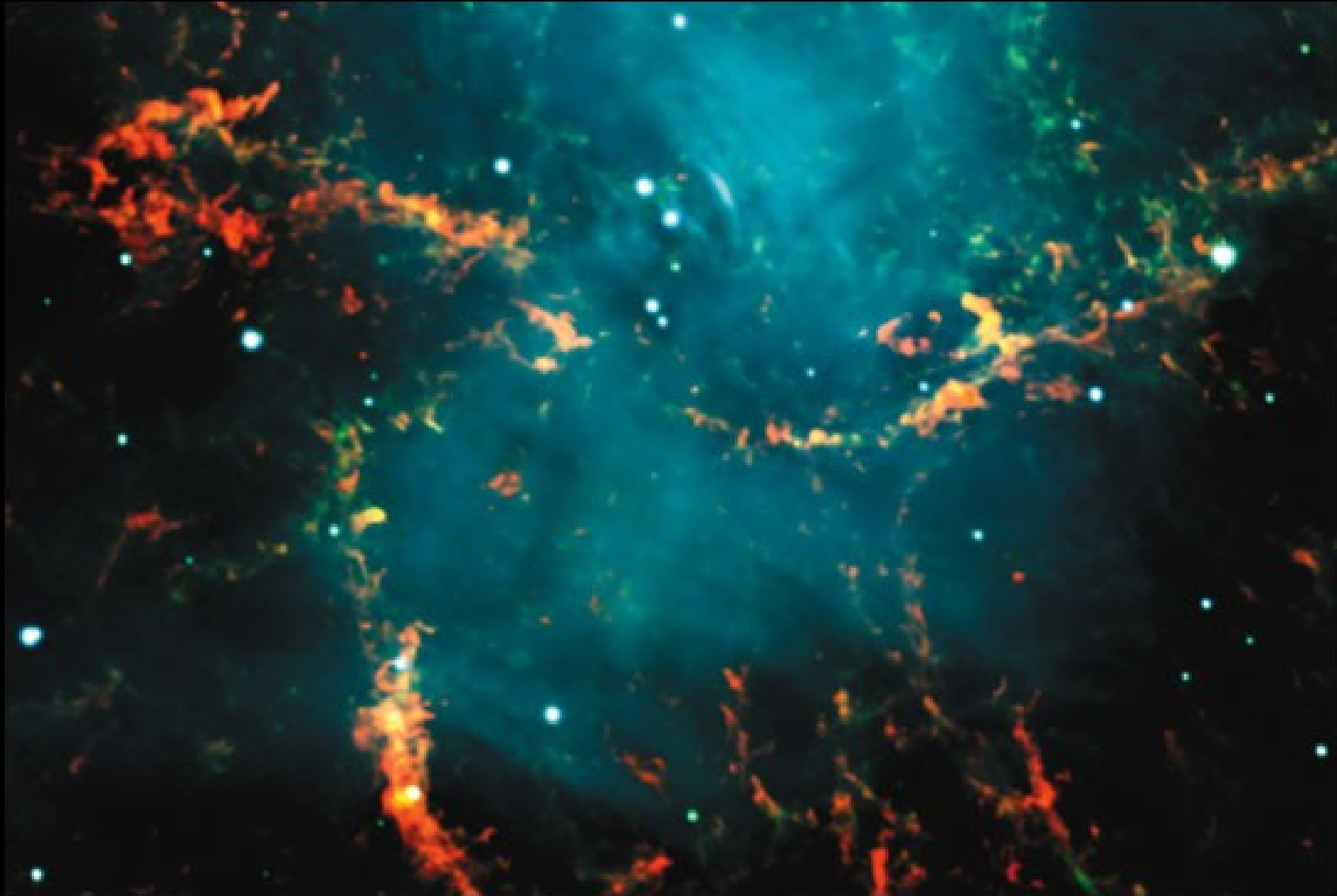


Harcourt, Inc.





The Cosmos: Astronomy in the New Millennium
By Pasachoff/Filippenko
1-3 top: Crab Nebula center
Courtesy of European Southern Observatory



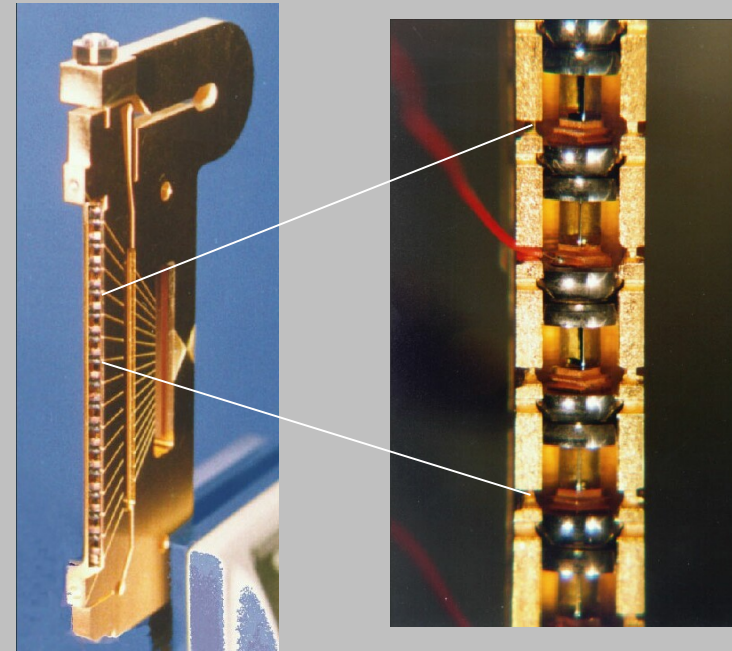
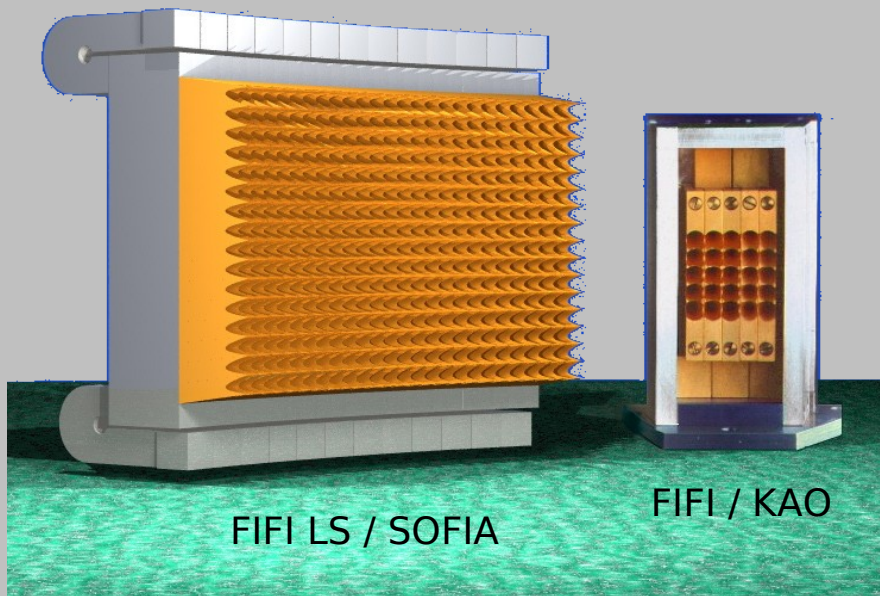
Detektoren

Quantitative Beschreibung: **Quantenausbeute**

$Q(\lambda) = \text{detektierte Photonen} / \text{empfangene Photonen}$

- Auge: $Q(500\text{nm}) \approx 0.01$
- Photoplatte:
 - $Q \approx 0.01$
 - Aber lange Belichtung möglich
- Photovervielfacher: $Q \approx 0.2$
- CCD (Charge coupled device):
 - Q bis 0.3
 - Eigenrauschen
 - erfordert Kühlung

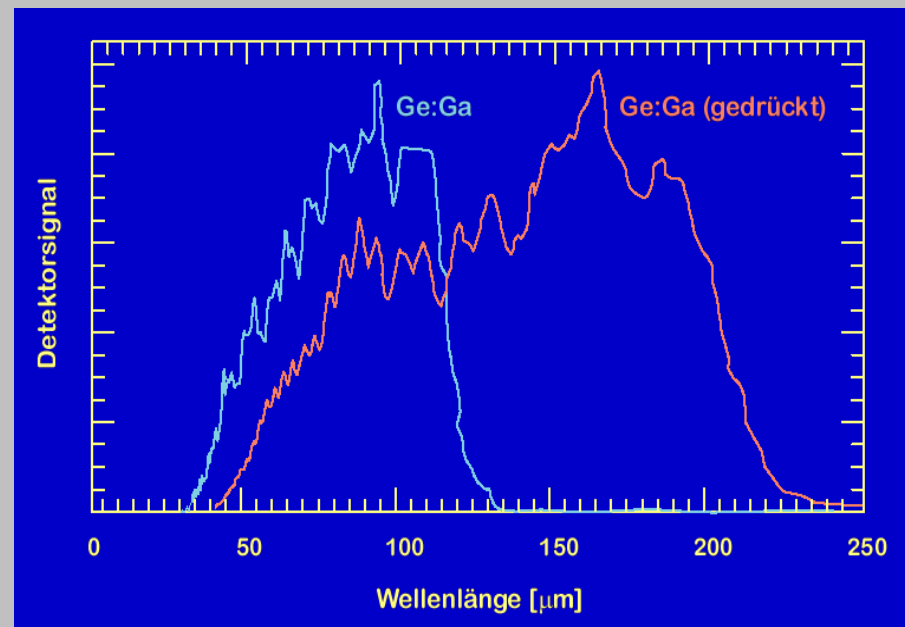
Ge:Ga Detektor-Arrays



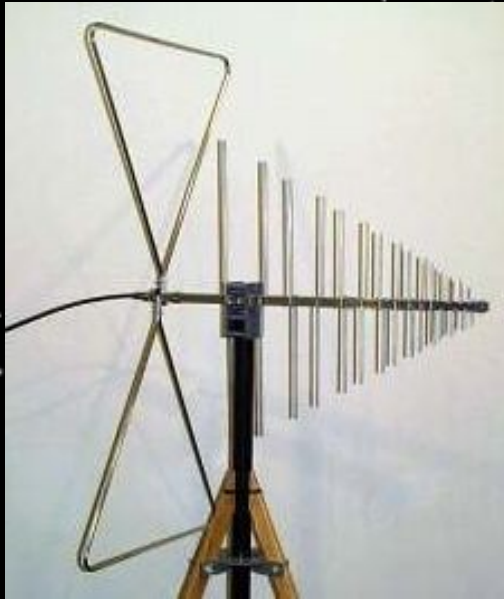
Zwei 16x25 - Pixel - Arrays, Ge:Ga Photoleiter
(un)gedrückt, in integrierenden Hohlräumen

Flächenfüllende Lichtsammelhörner

Kryogene Ausleseelektronik (kapazitiv rück-
gekoppelte Transimpedanzverstärker mit
Multiplex-Auslesung)



Antennen als Empfänger



- Direkte phasenkohärente Messung der elektromagnetischen Wellen
 - erlaubt direkte Verstärkung
 - einfache Zusammenschaltung vieler Antennen
 - => Interferometer

Karl Guthe Jansky

◆ 1930

◆ Radiostrahlung vom Zentrum der Milchstr.

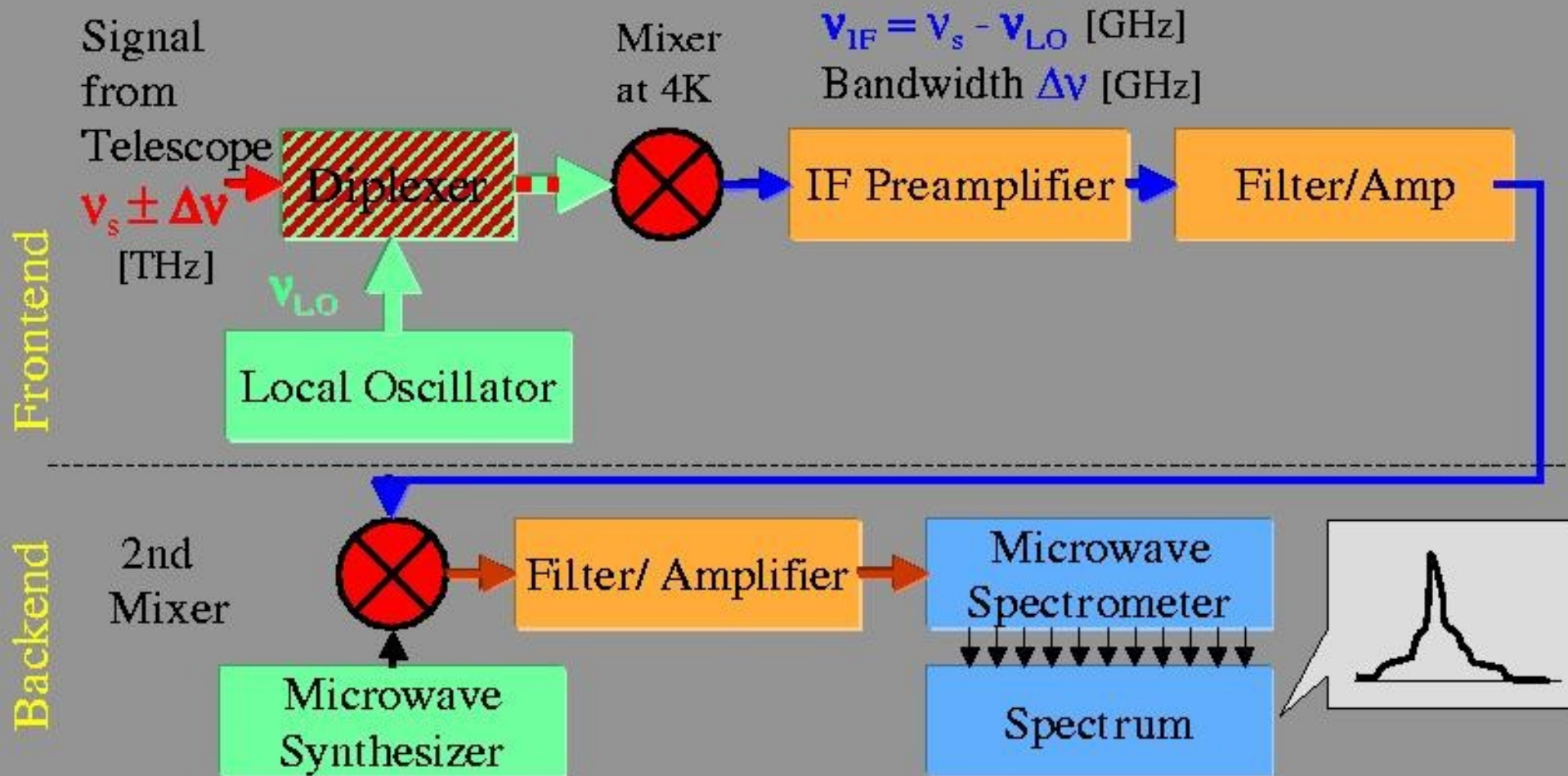
$1\text{Jy}=10^{-26}\text{ W/m}^2\text{Hz}$



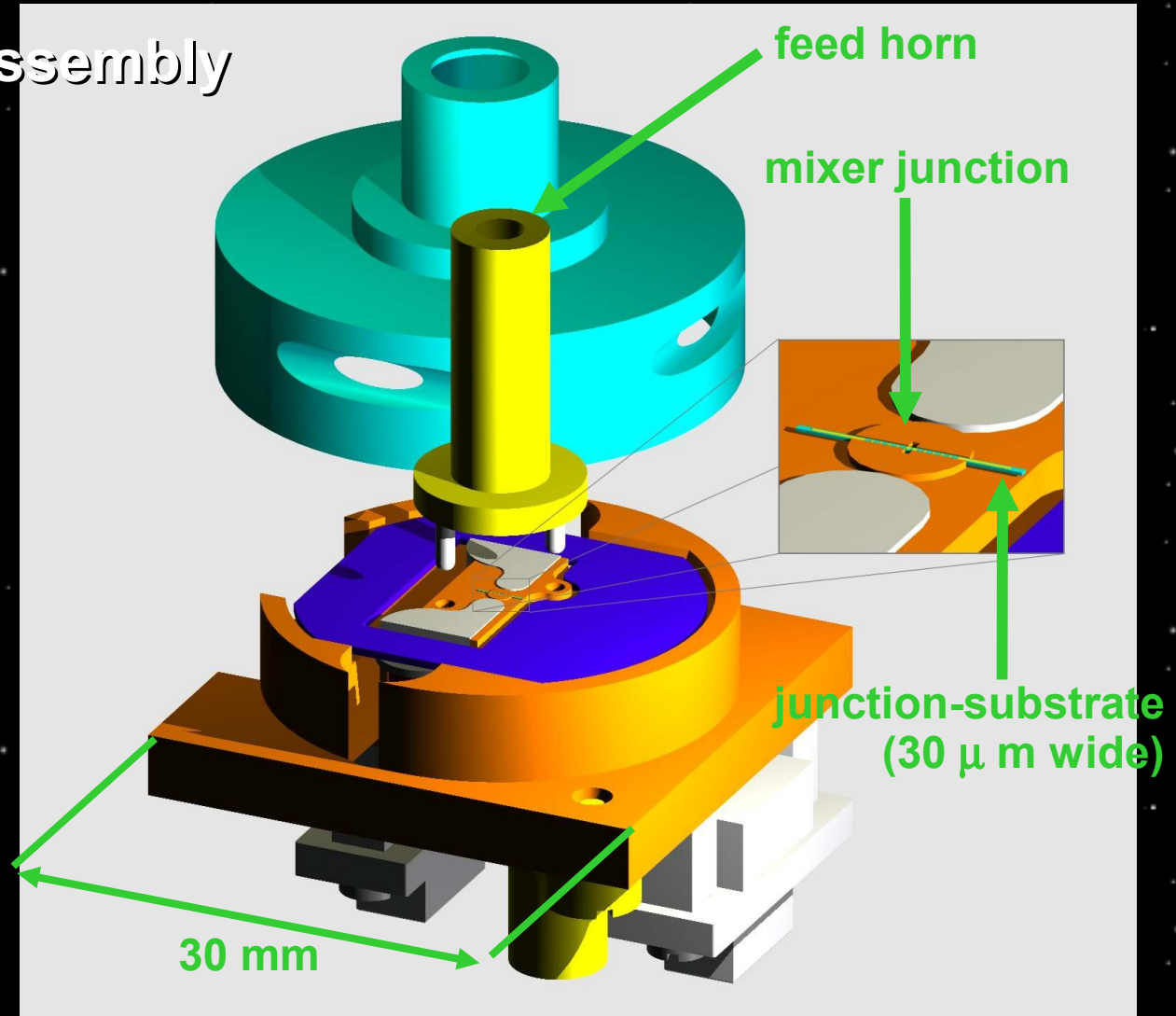
Cambridge array for Interplanetary Scintillations (81.4 MHz)

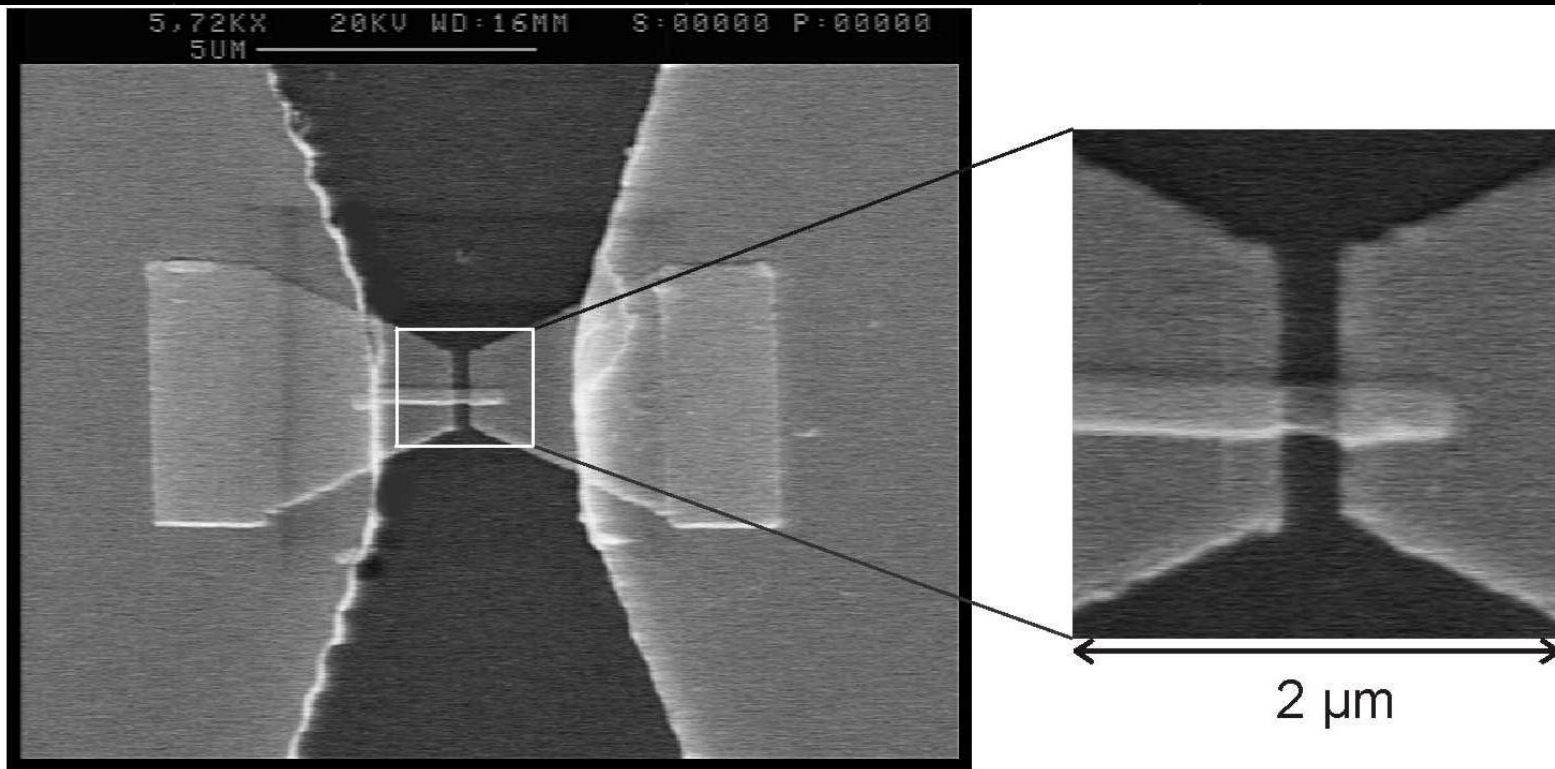


Heterodyne Principle



Terahertz-Mixer-Assembly (KOSMA-Design)

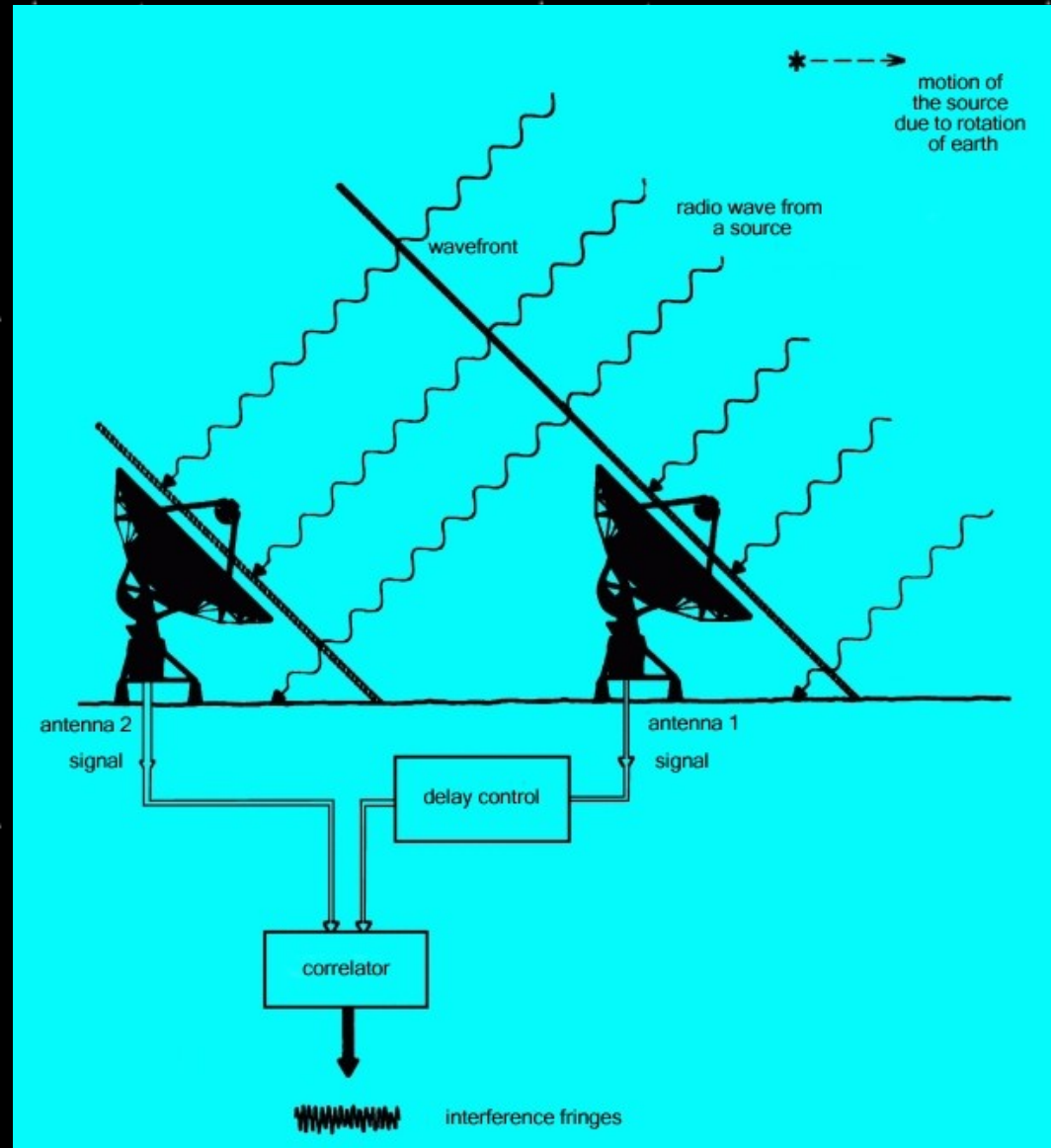




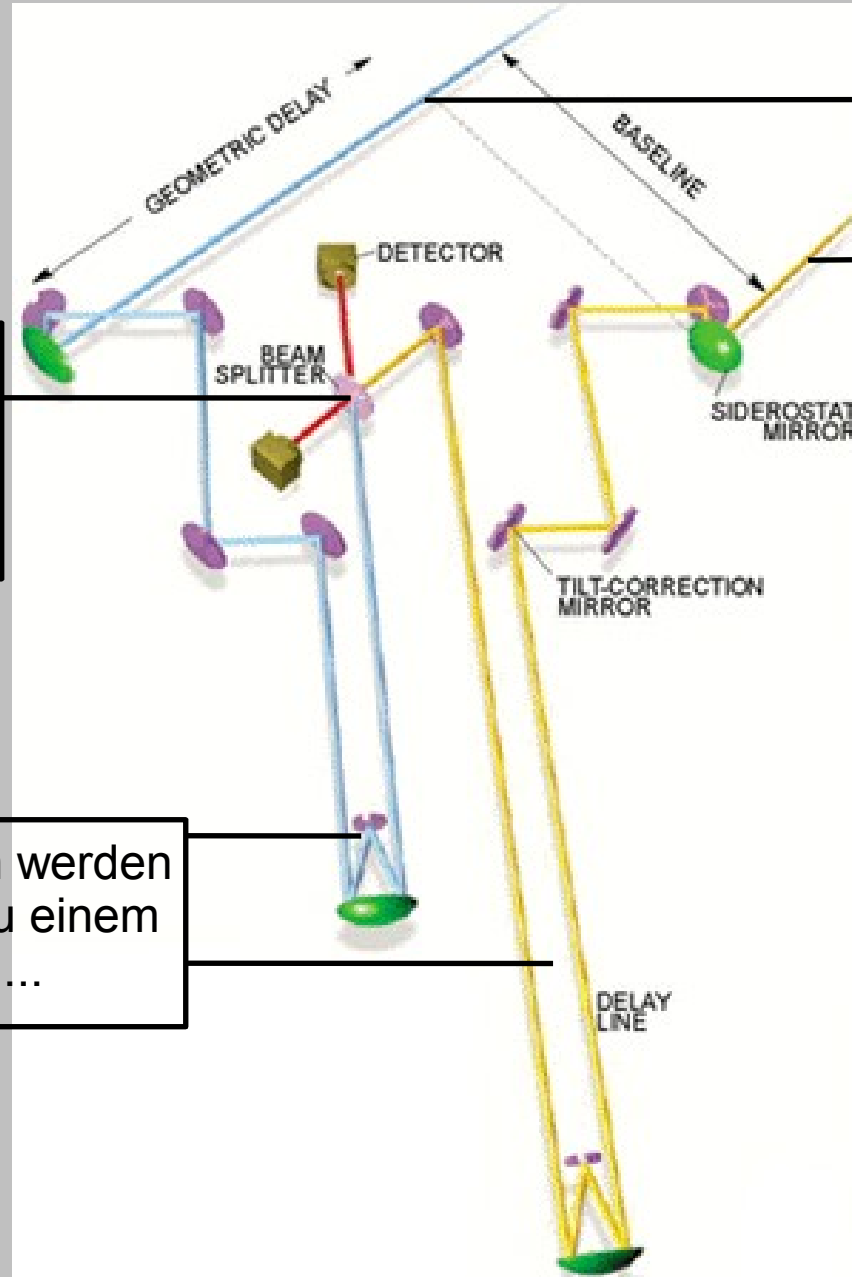
KOSMA Niobium Hot-Electron-Bolometer: $(150 \times 150 \times 10) \text{ nm}^3$

Astronomische Interferometer

- Kombination mehrerer Teleskope
- Kompensation der Weglängendifferenz



Optische Interferometer in der Astronomie



Licht (gelb und blau) des beobachteten Objektes wird von zwei Spiegeln eingefangen

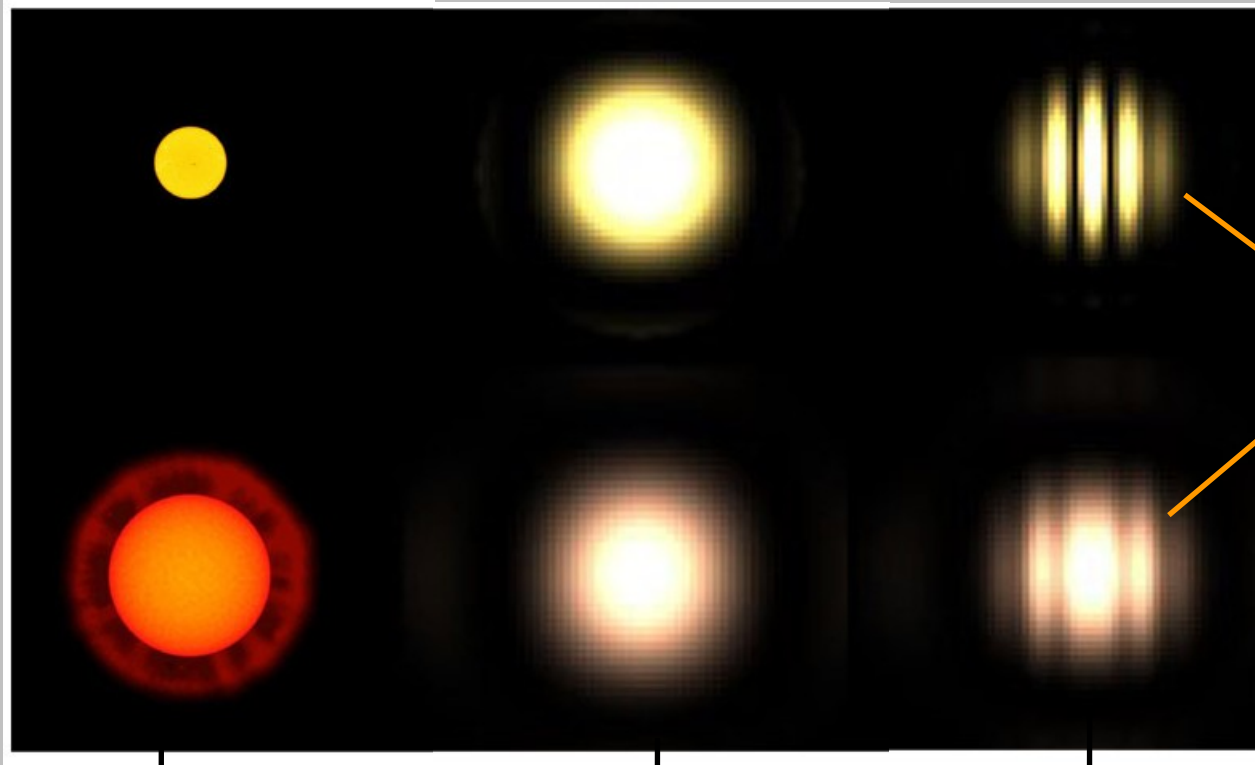
... und dort vereinigt. Detektoren messen das Interferenzmuster.

Getrennte Strahlen werden über Hilfsspiegel zu einem Strahlteiler geführt ...

Abstand der Spiegel = Basislinie

Das Aussehen von Sternen im Interferometer

(Simulation)



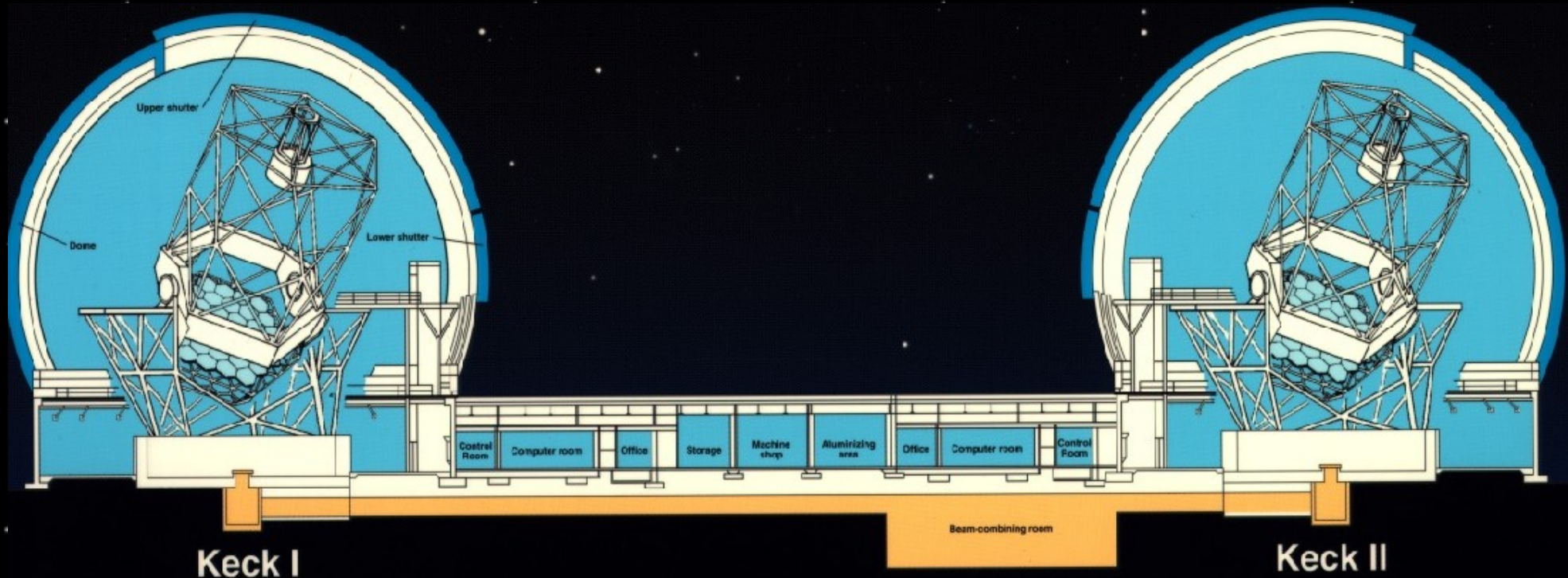
Interferenzmuster

Sterne mit unterschiedlichem Durchmesser

Sicht eines einzelnen Teleskops

Sicht eines Interferometers

- Auflösung des Interferometers bestimmt durch Basislinie L , nicht mehr durch Größe des Einzelspiegels
 - $\Theta \approx \lambda/L$ [rad]
 - scheinbar größeres Teleskop
 - aber richtungsabhängig
 - hohe Auflösung nur in Richtung der Basislinie





LBT

VLT





VLA

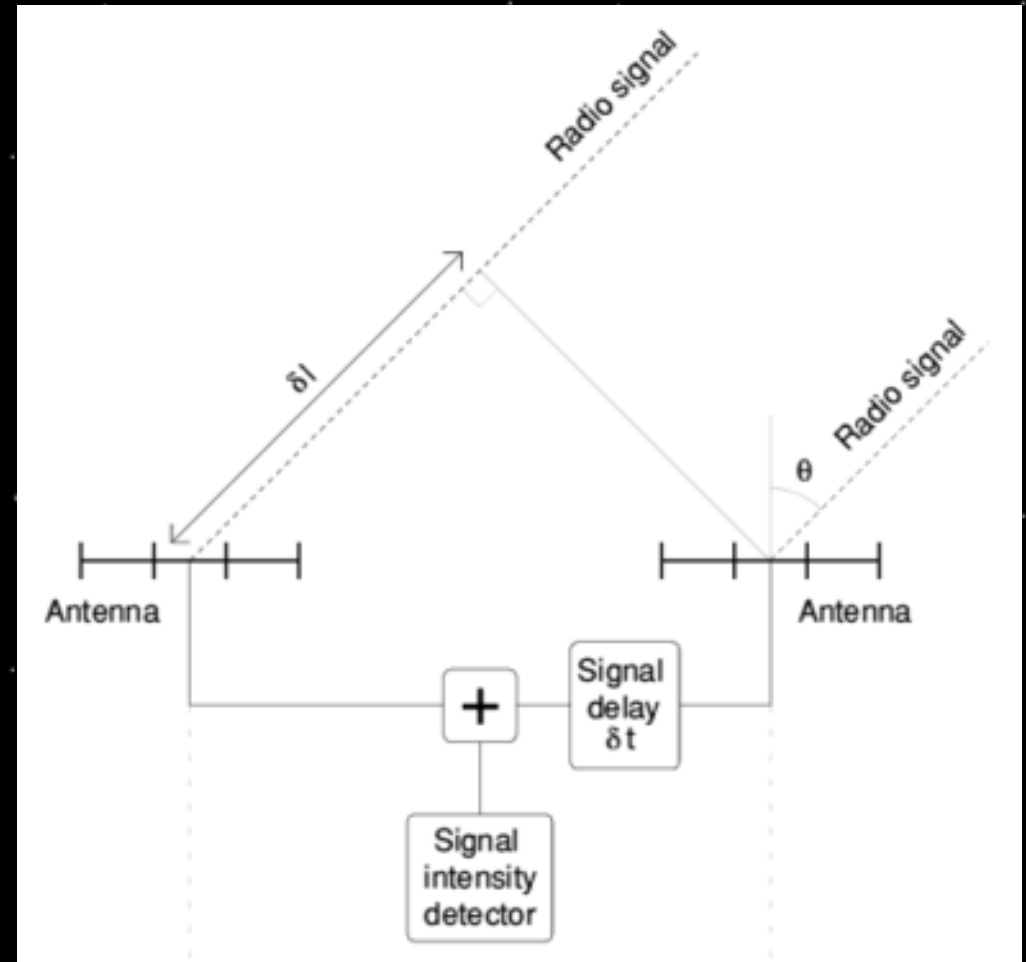


ALMA



LOFAR

- Antennen mit Rundumempfangscharakteristik
- Rechnerische Verzögerung
- Gleichzeitige Beobachtung des ganzen Himmels



LOFAR



LOFAR

- Gesamter Himmel in 1s
- bei 42MHz

