



Introduction to X-Ray Optics

Peter Friedrich, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

The Elektromagnetic Spectrum

*low energy
low frequency
long wavelength*

*high energy
high frequency
short wavelength*

Radio

Infrared

Visual Light

Ultraviolet

X-ray

Gamma

$E = 2.5 \text{ eV}$
 $\lambda = 500 \text{ nm}$

$E = 0,1 \dots 10 \text{ keV}$
 $\lambda = 12 \dots 0,12 \text{ nm}$

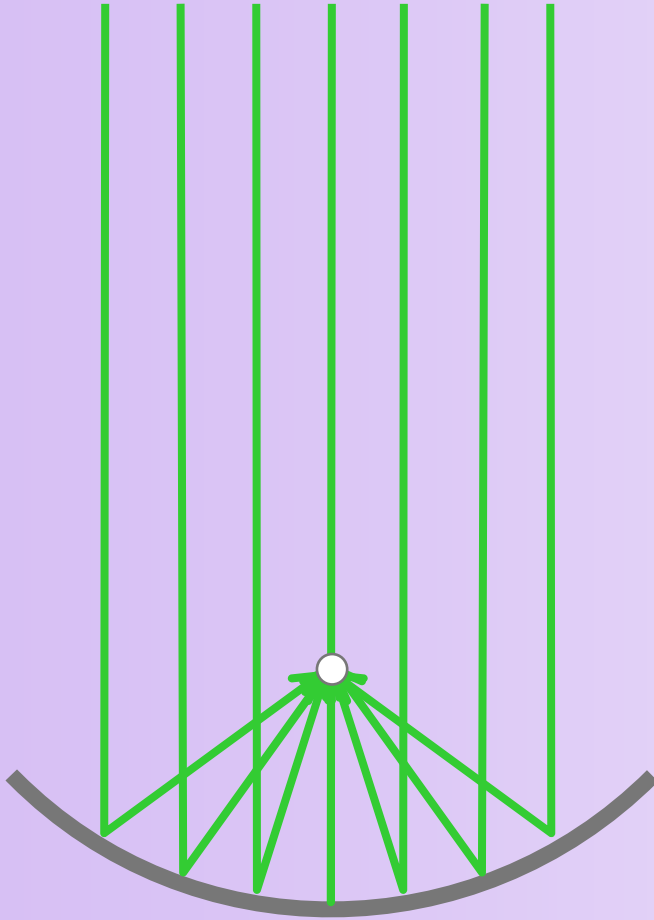
„soft“ X-rays

$E = 10 \dots 100 \text{ keV}$
 $\lambda < 0,12 \text{ nm}$

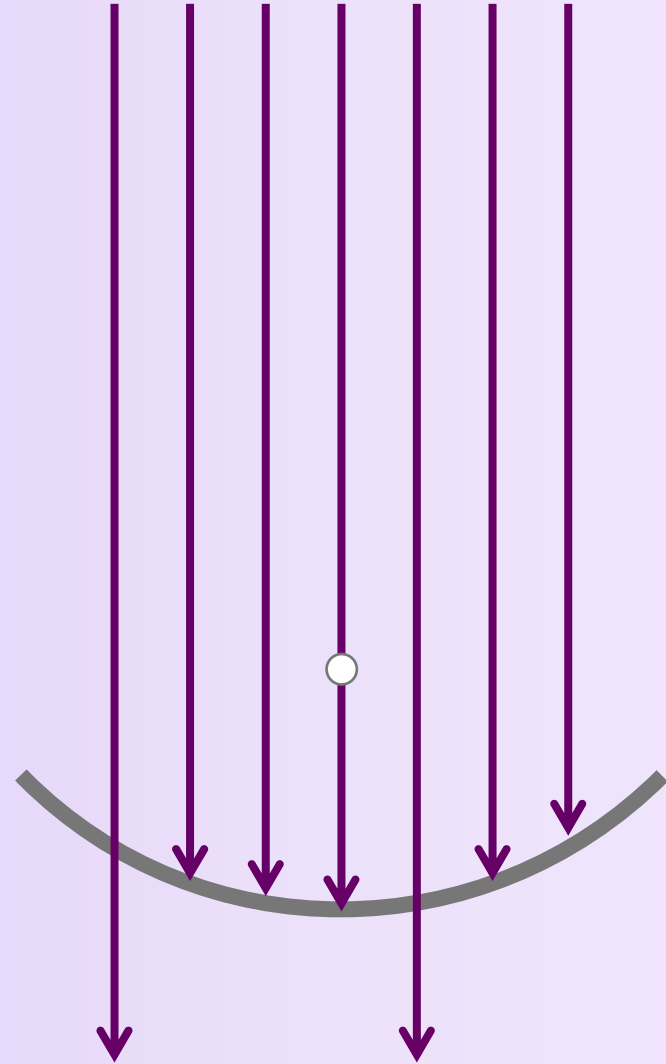
„hard“ X-rays



IR, Visible, UV



X-rays



Refraction Index / Grazing Angle

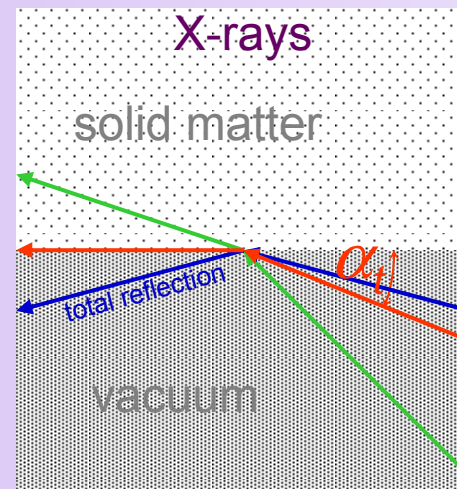
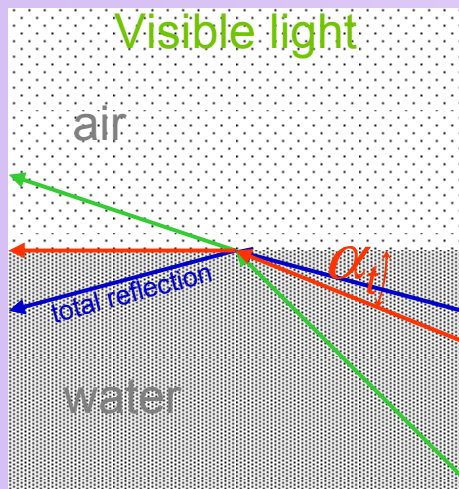
Complex refraction index n :

$$n = 1 - \underbrace{\delta}_{\text{phase change}} - i\underbrace{\beta}_{\text{absorption}}$$

*slightly less than 1
for X-rays in matter
exactly 1 in vacuum*

Critical grazing angle α_t :

$$\cos \alpha_t = 1 - \delta \quad (\text{Snell's law})$$



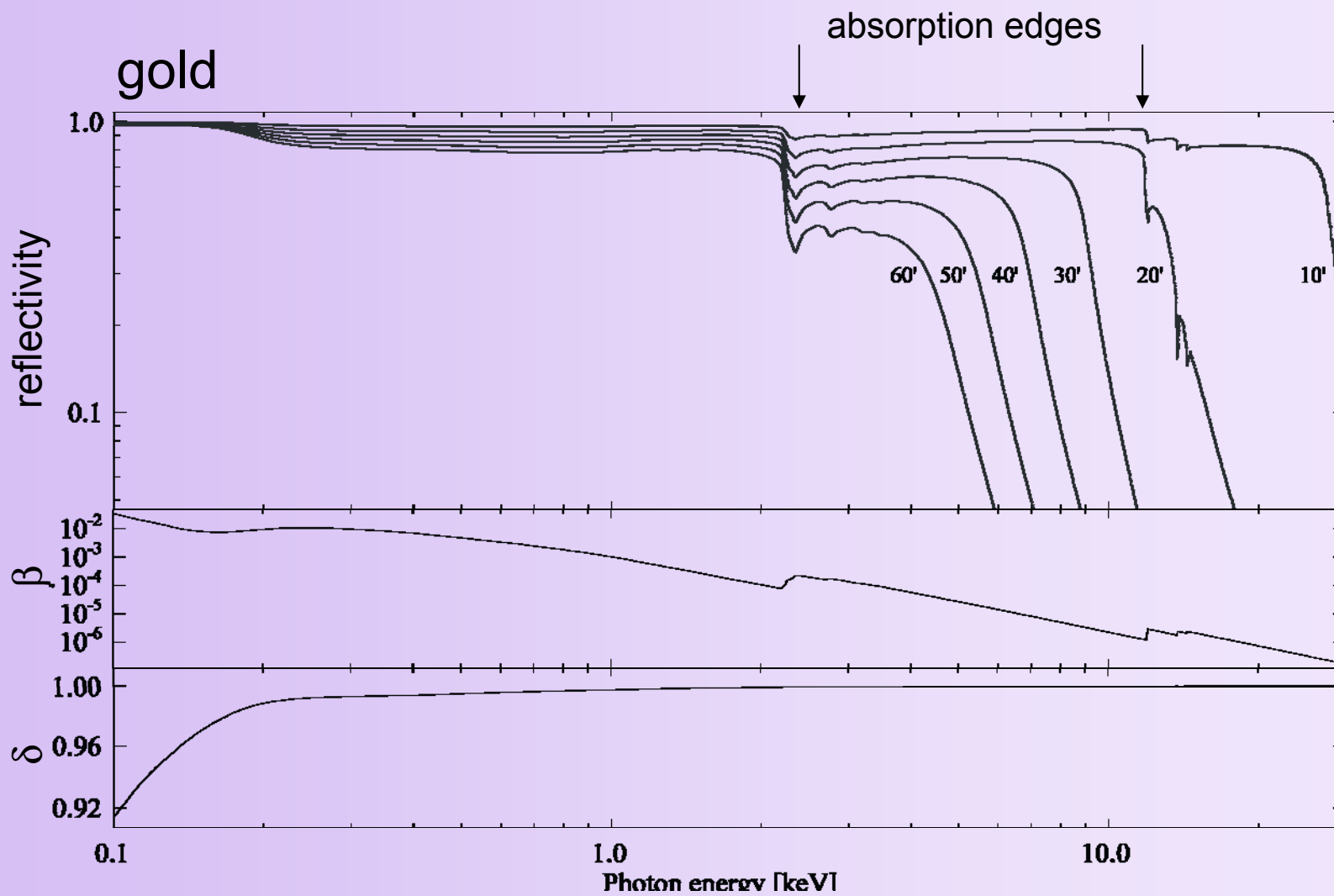
for $\delta \ll 1$:

$$\cos \alpha_t = \sqrt{2\delta}$$

$$\delta \sim E^{-2} \rightarrow \alpha_t \sim E^{-1}$$

$$\delta \sim Z \rightarrow \alpha_t \sim \sqrt{Z}$$

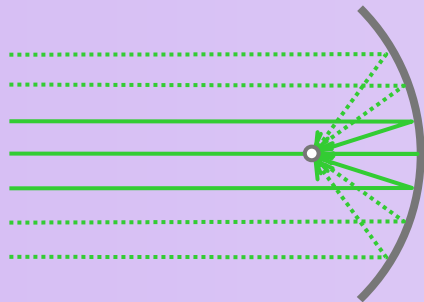
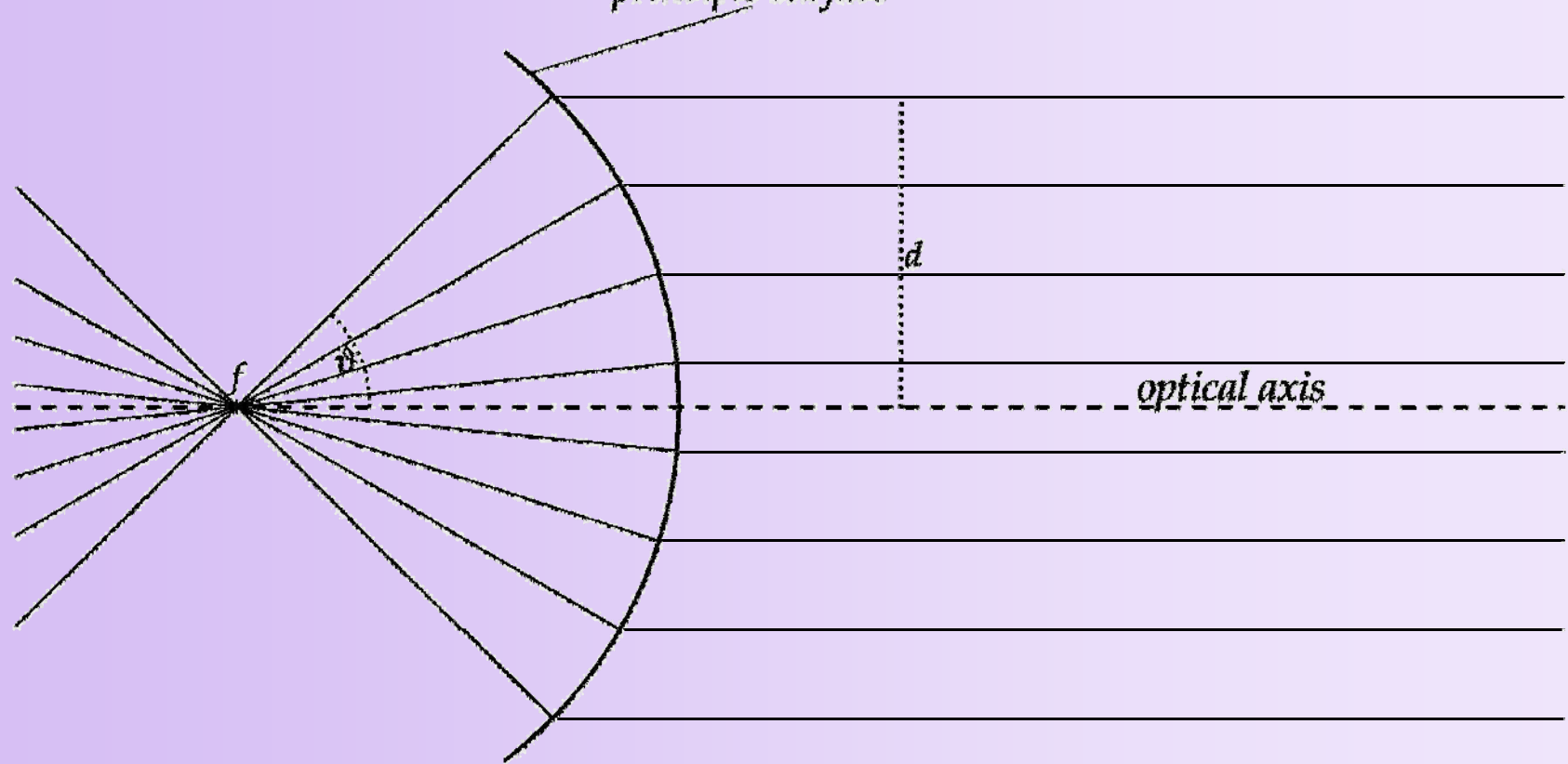
Optical Constants



Abbe's Sine Condition

$$d / \sin \vartheta = f$$

principle surface





Wolter 1952, Annalen der Physik

Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen¹⁾

Von *Hans Wolter*

(Mit 19 Abbildungen)

Inhaltsübersicht

Als Optiken zur Röntgenstrahlmikroskopie eignen sich Systeme von total-reflektierenden Spiegeln, die bei Hebung der sphärischen Aberration für einen Achsenpunkt zugleich die Abbesche Sinusbedingung bis zu Aperturen 0,05 befriedigend erfüllen. Für die Lebenduntersuchung biologischer Objekte empfehlen sich Wellenlängen um 24 \AA , die im Wasser wenig, aber in kohlenstoffhaltigen oder stickstoffhaltigen Stoffen stark absorbiert werden. Mit diesen weichen Strahlen ist eine Steigerung des Auflösungsvermögens gegenüber dem Lichtmikroskop um mindestens eine Größenordnung unter Verwendung der hier beschriebenen Optiken zu erwarten.

1. Schwierigkeiten der Schattenmikroskopie

Neben dem Elektronenmikroskop und dem Lichtmikroskop wünschen wir uns ein hochauflösendes Mikroskop für die Beobachtung lebender Objekte, also ein Mikroskop, das die Objekte unter Luftdruck mit einem — z. B. um eine oder mehrere Größenordnungen — gegenüber dem Lichtmikroskop gesteigerten Auflösungsvermögen beobachten läßt.

3. Annähernde Erfüllung der Abbesehen Sinusbedingung durch ein Zweispiegelsystem

Ein System aus 2 sich schneidenden Spiegelflächen hat eine Knickfläche, die so durch die Schnittkante der beiden Spiegel geht, wie Abb. 5 das andeutet. Um mit 2 Spiegeln bei streifendem Einfall alle achsenparallelen Strahlen in einem Punkt zu sammeln, verwenden wir ein Rotationsparaboloid (Abb. 6) und ein

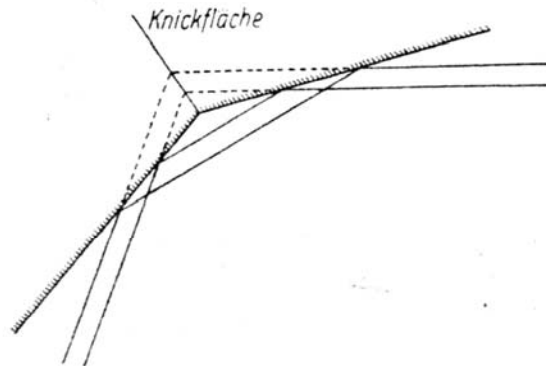


Abb. 5. Knickfläche bei zwei Spiegeln

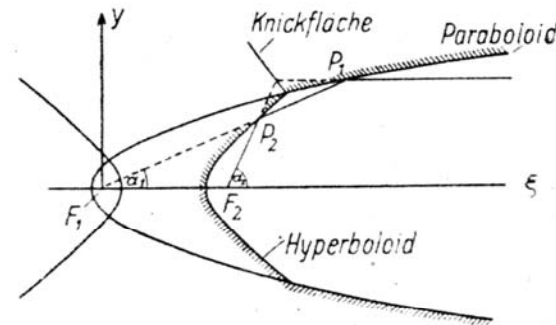


Abb. 6. Paraboloid und Hyperboloid in konfokaler Lage als Spiegelsystem für streifenden Einfall

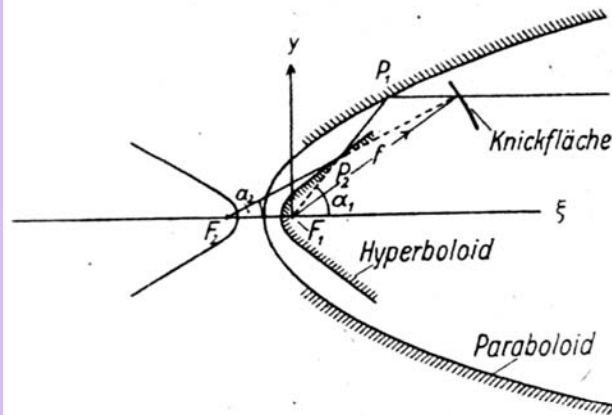


Abb. 15. Spiegelsystem 2. Art

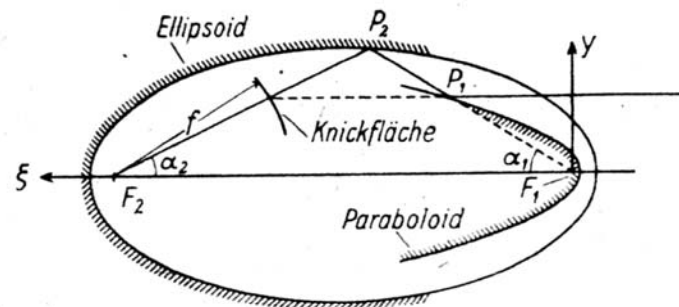
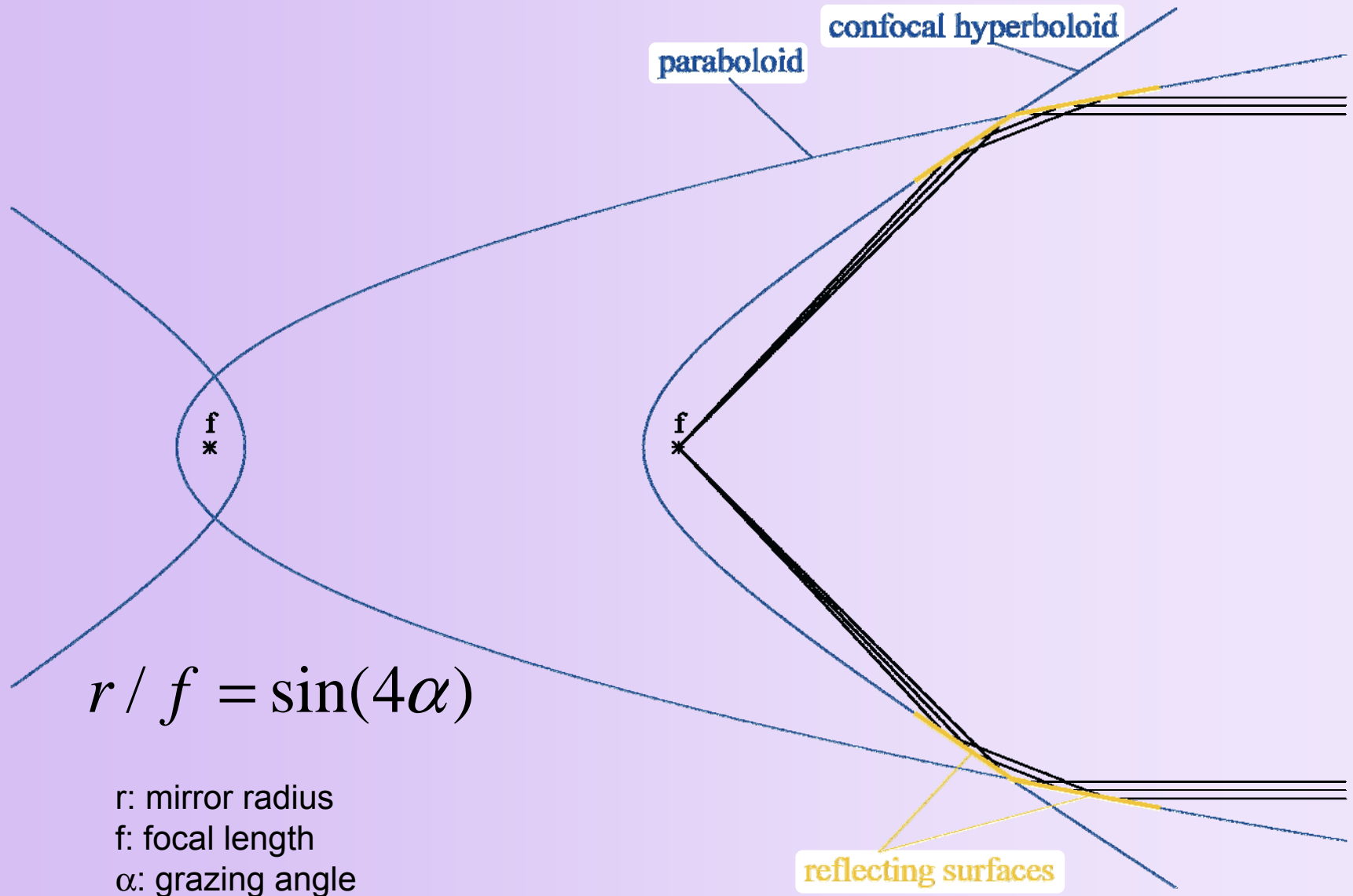
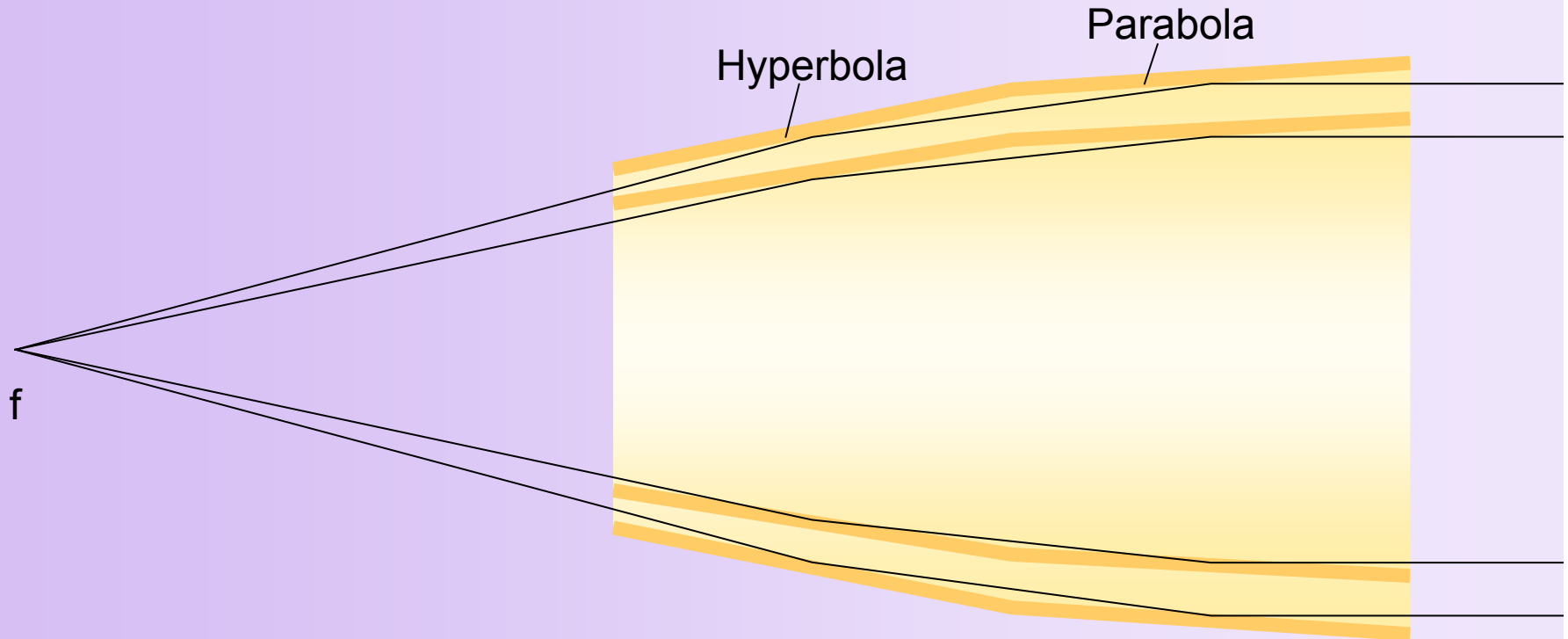


Abb. 16. Spiegelsystem 3. Art

Wolter 1



Nesting of Wolter 1 Mirror Shells



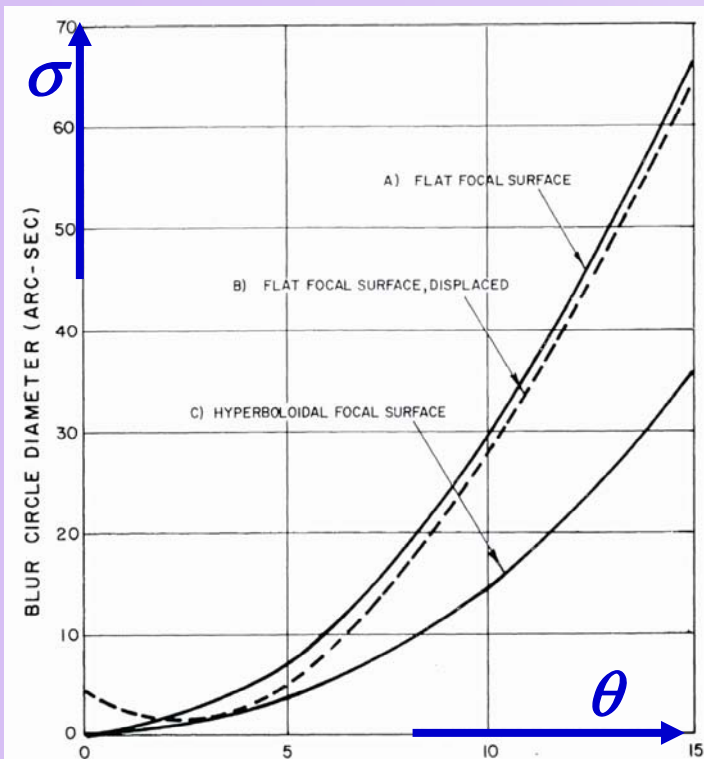
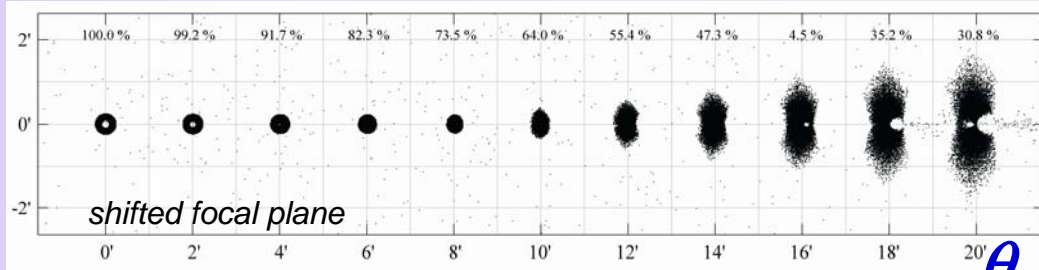
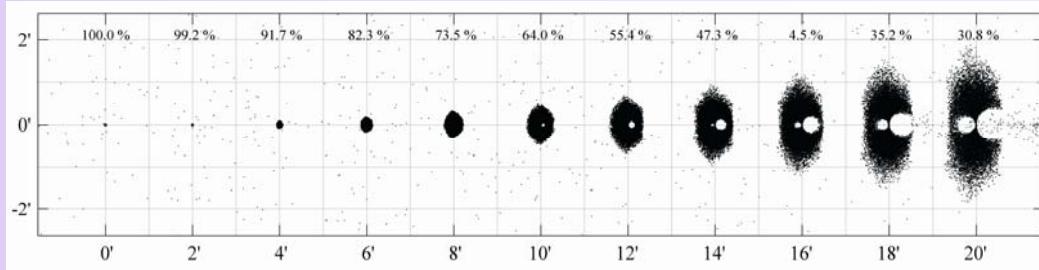
$$a \approx 2\pi r \times l \sin \alpha$$

a: projected area of one shell
l: length of a mirror element
 α : grazing angle

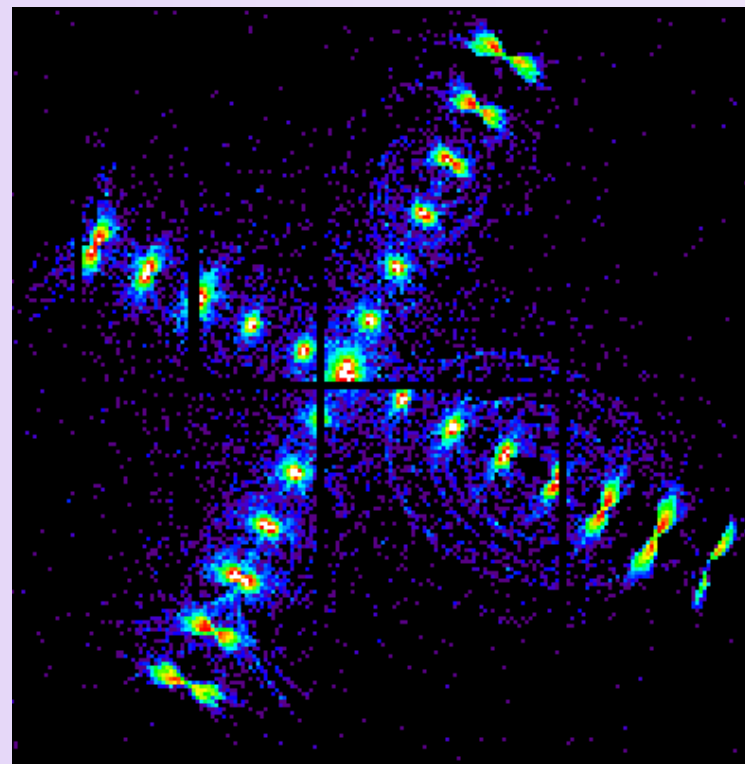
Of-Axis Blurring

rms blur circle σ :

$$\sigma = 5 \times \frac{l}{f} \times \frac{\tan^2 \theta}{\tan \alpha} + 4 \tan \theta \tan^2 \alpha$$



From R. Giacconi et al. 1969





Characteristic Properties of an X-Ray Optics

Point spread function

- angular / spatial resolution
- contrast, signal/noise ratio

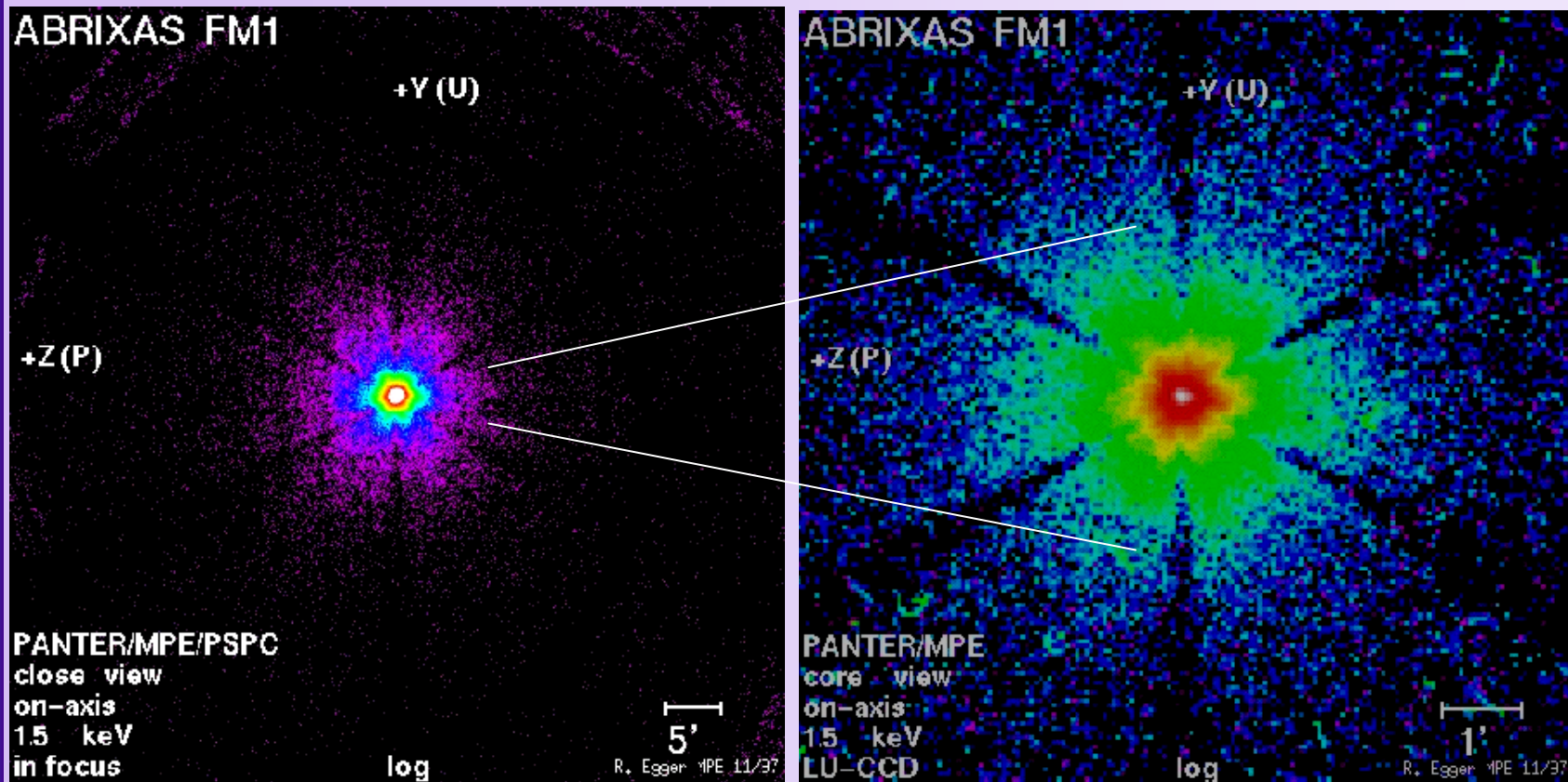
Effective area

- sensitivity

Point Spread Function (PSF)

The wings of the PSF are due to

- figure errors (lower spatial frequencies) → geometrical optics
- microroughness (higher spatial frequencies) → interference

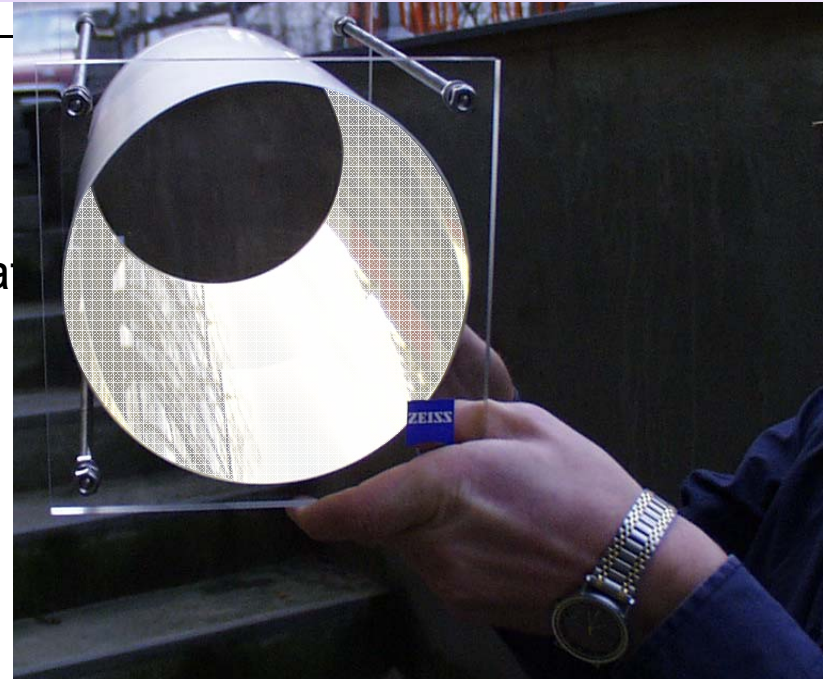
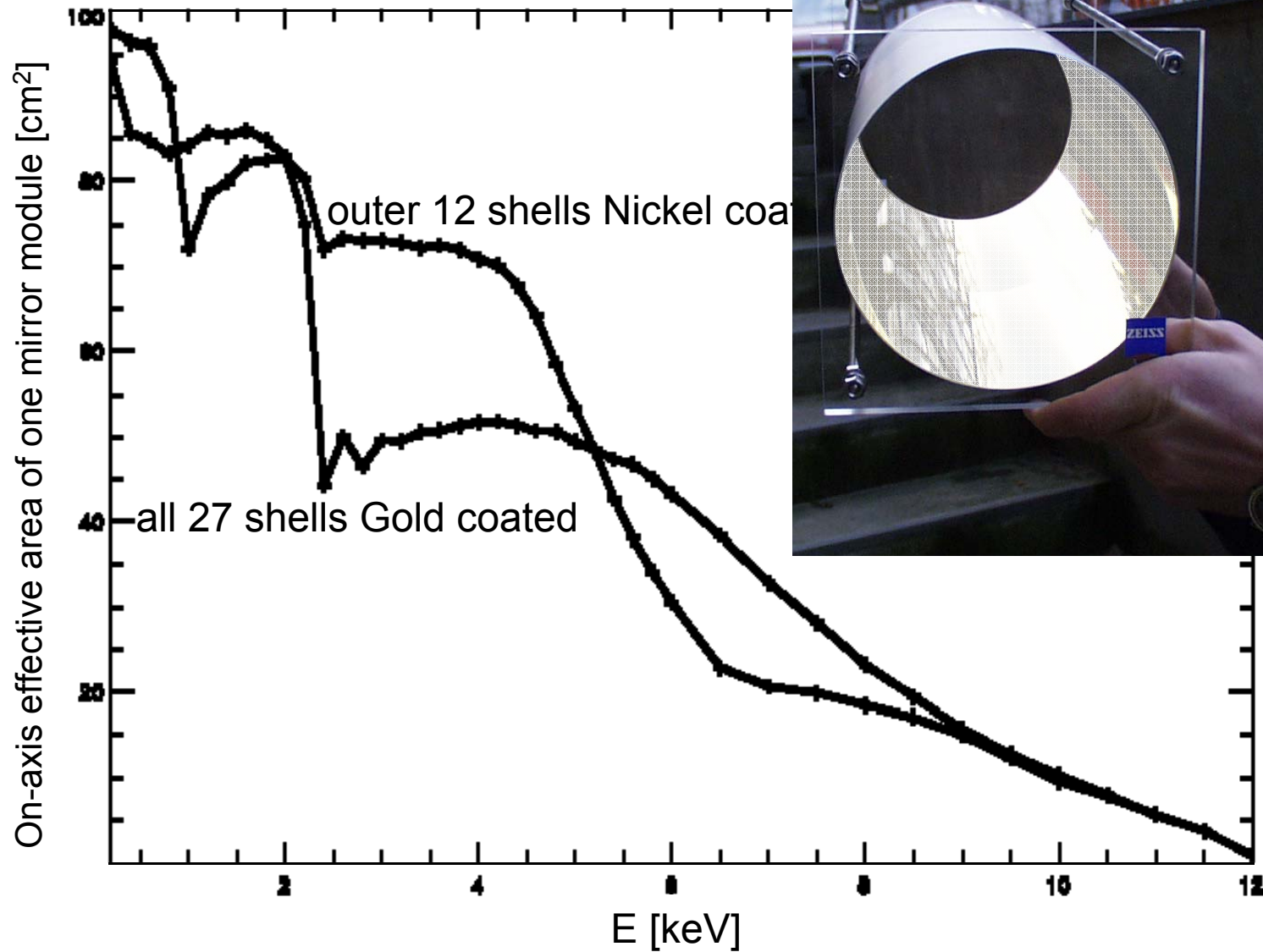


PSPC: ~30" resolution at 1.5 keV

CCD: 3.4" resolution

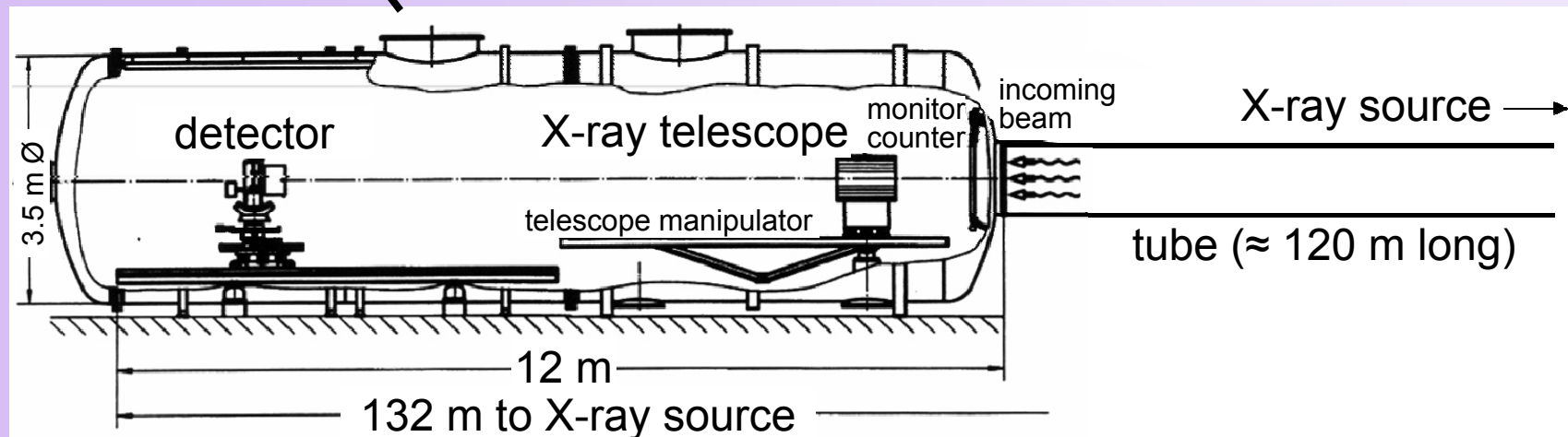
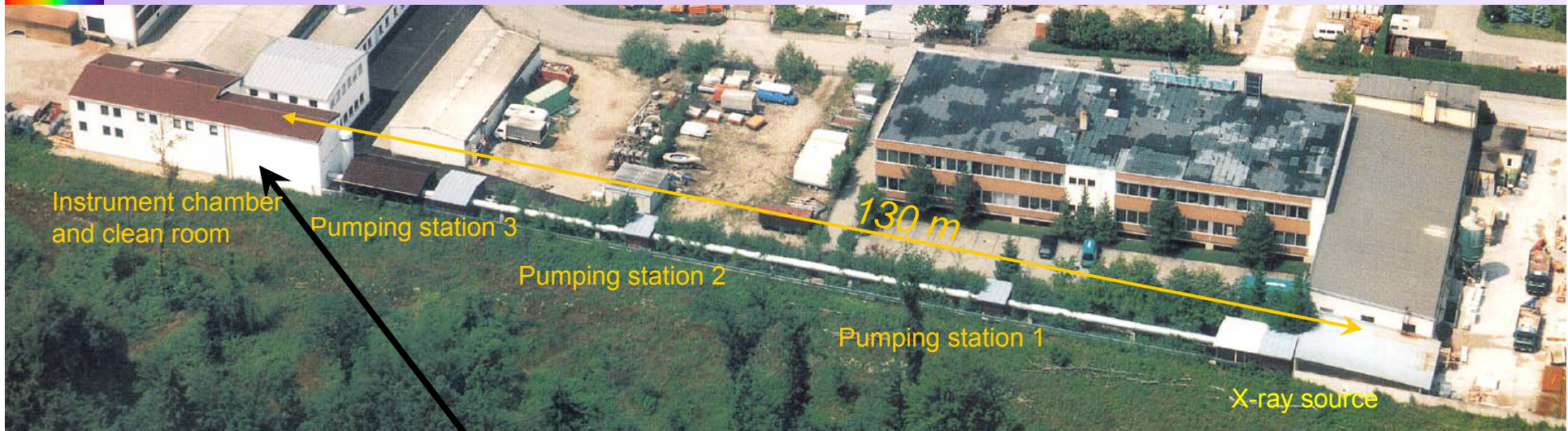
Effective Area

of one ABRIXAS / CAST mirror module

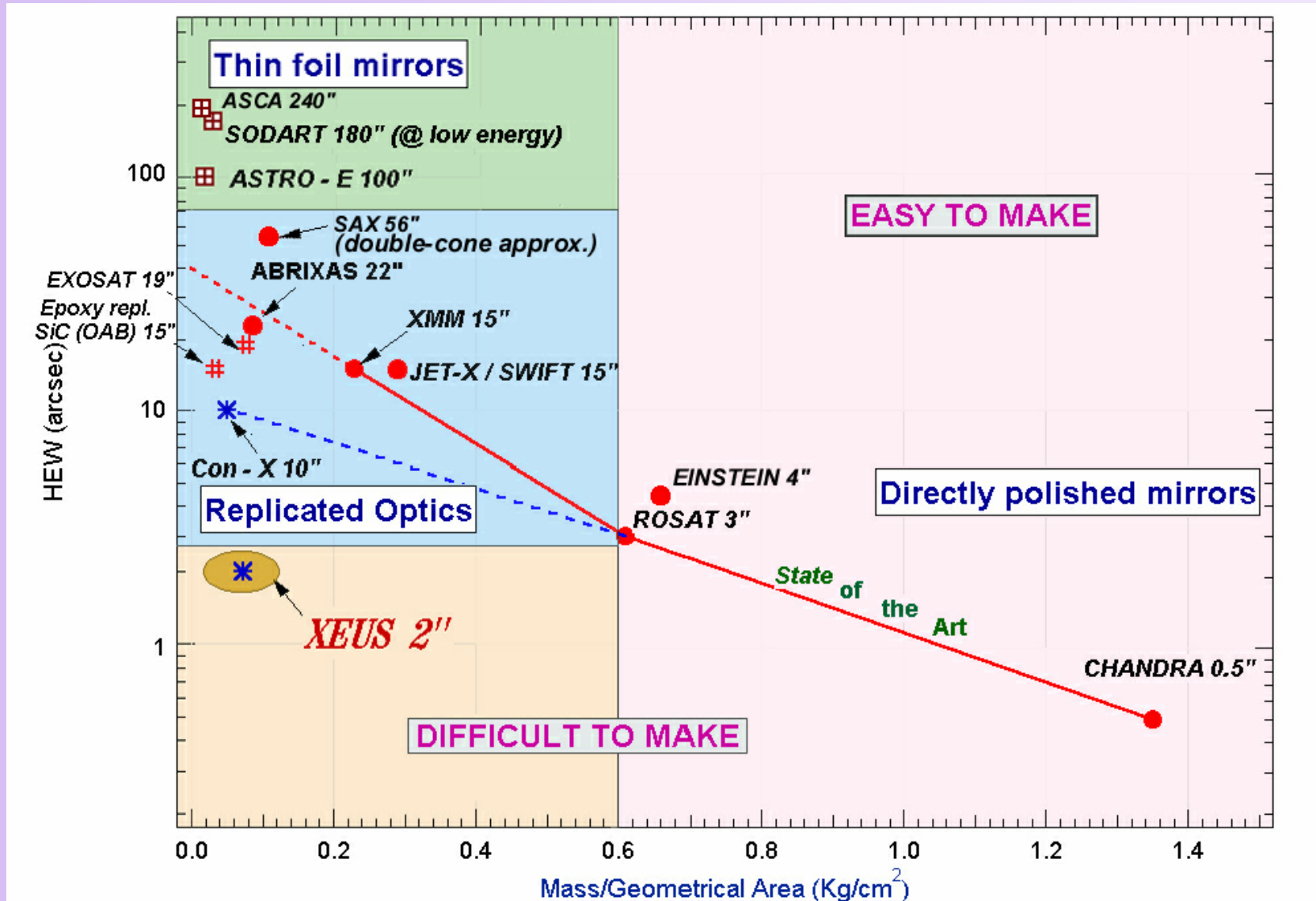


Test and Calibration

The PANTER X-ray test facility with its 130 m long tube and big vacuum chamber allows tests and calibrations of detectors, optics, and complete instruments.



Manufacturing Techniques

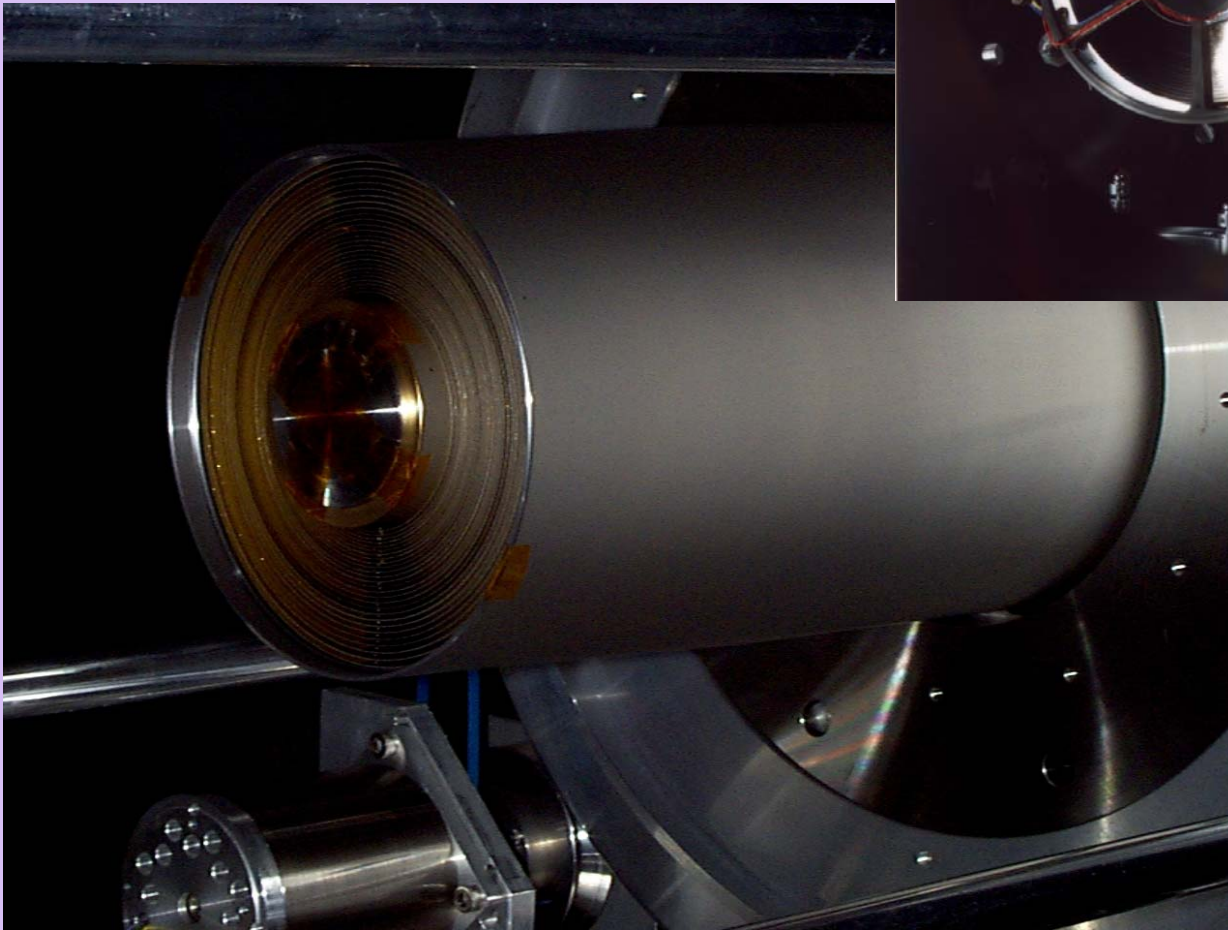


From O. Citterio, Brera

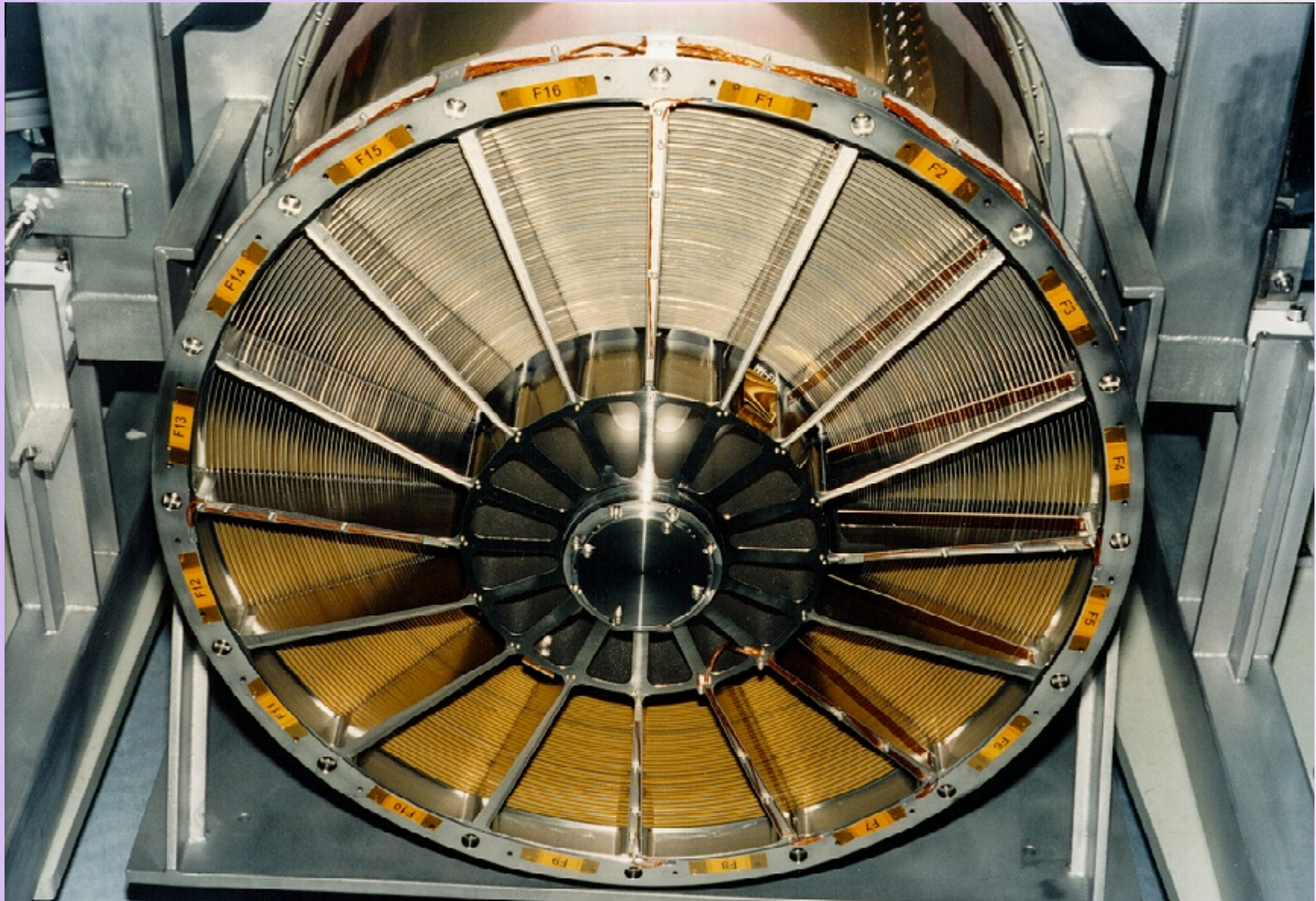


Nested Wolter-1 shells:

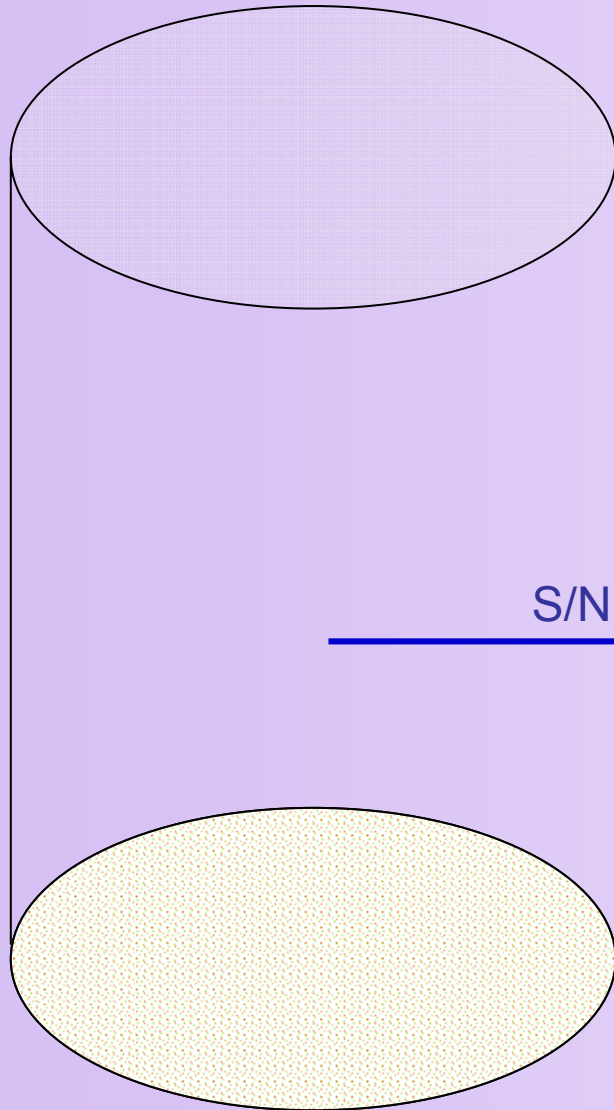
**ABRIXAS / CAST
telescope module**



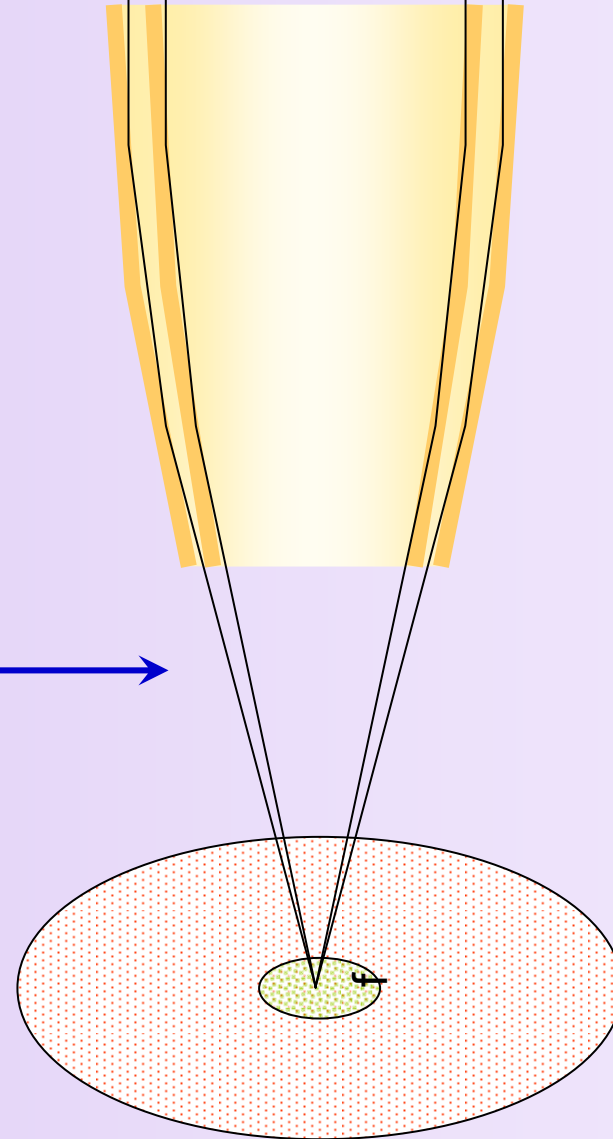
Nested Wolter-1 shells: XMM-Newton telescope module



Advantage of an imaging optic



S/N improved!





Literature

- B. Aschenbach, "X-ray telescopes", 1985, Reports on Progress in Physics, **48**, 579
- E. L. Church, "Role of surface topography in X-ray scattering", 1979, SPIE **184**, 196
- R. Giacconi, W. P. Reidy, G. S. Vaiana et al., "Grazing-Incidence Telescopes for X-Ray Astronomy", 1969, Space Science Reviews **9**, 3
- Serlemitsos, Y. Soong, "Foil X-ray mirrors", 1996, Astrophysics and Space Science **239**, 177
- L. P. Van Speybroeck, R. C. Chase, "Design Parameters of Paraboloid-Hyperboloid Telescopes for X-ray Astronomy", 1972, Applied Optics **11**, 440
- H. Wolter, "Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen“, 1952 Annalen der Physik (6. Folge) **10**, 94