

Přístroje pro astronomii

Velké systémy



Sylabus

Přednášky (cca po 2 vyučovacích hodinách)

- ❖ (Haderka) Historie astronomických pozorování, antické objevy a pozorovací metody, středověká astronomie, první dalekohledy a spektrometry. Spektrum elektromagnetického záření.
- ❖ (Palatka) Úvod do geometrické a vlnové optiky. Paraxiální prostor, lámavé a odrazné plochy, Fermatův princip, Huyghens-Fresnelův princip, disperze, difrakční jevy, zobrazovací soustavy, zvětšení, zorné pole, rozlišovací schopnost, vinětace, světelnost, vady zobrazení.
- ❖ (Palatka) Čočkové dalekohledy. Achromáty, apochromáty, ED- optika. Korekce barevné vady. Korekce sklenutí pole. Reduktory a korektory. Prodloužení ohniska. Vady. Výhody a nevýhody.
- ❖ (Palatka) Zrcadlové dalekohledy. Newtonův dalekohled. Tří- a vícezrcadlové systémy. Vady. Výhody a nevýhody.
- ❖ (Palatka) Katadioptrické systémy. Maksutov, Cassegrain, Schmidtova komora, Schmidt-Cassegrain, Schmidt-Newton, Ritchey-Chrétien, Dall-Kirkham. Vady. Výhody a nevýhody.
- ❖ (Schovánek) Montáže pro astronomické dalekohledy. Dobsonova montáž, vidlicová montáž, německá paralaktická montáž, speciální systémy.
- ❖ (Haderka) Některé velké profesionální systémy (např. Hale, Keck, VLT aj.) a jejich budoucnost. Aktivní optika. Adaptivní optika.
- ❖ (Nožka) Astronomie v různých oblastech světelného spektra – radioastronomie, rentgenová a gama astronomie, spektrometrie hvězd.
- ❖ (Nožka) Spektroskopie, spektrografy, interpretace spekter.
- ❖ (Mandát) Detektory pro astrometrii a fotometrii, fotometrické systémy a jejich význam.
- ❖ (Mandát) Astročásticové experimenty – projekt Observatoře Pierre Auger, CTA a další významné observatoře. Detekce neutrin a gravitačních vln.

Cvičení

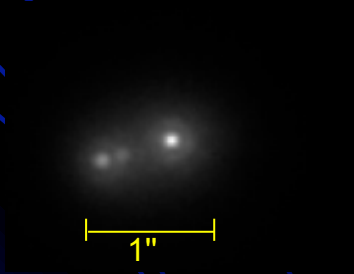
- (Tomáščík, Haderka) Praktické ukázky různých typů astronomických optických soustav [cca po 5. přednášce, cca 3 hodiny]
- (Tomáščík, Haderka) Základy ustavení montáží a pozorování [cca po 6. přednášce, za příznivého počasí večer, cca 3 hodiny]
- (Lenža) Odborná stáž na Hvězdárně Valašské Meziříčí [buď na podzim nebo na jaře, podle počasí a možností hvězdárny, Pá-So, nebo Pá-Ne]

Turbulence atmosféry

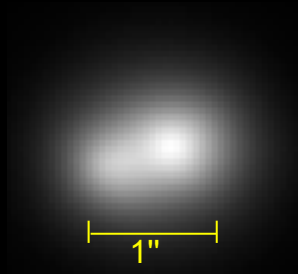
- Obraz v dalekohledu se při krátké expoziční době (<10-100 ms) rychle mění



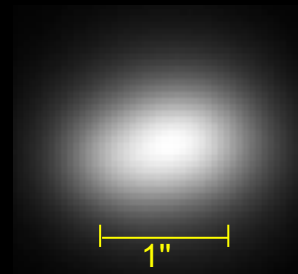
- Při dlouhé expoziční době je rozmazaný



1"
diffraction-
-limited



1"
„tip/tilt“



1"
21 min

Calar Alto
 $D=2,2$ m
 $\psi \approx 0,06$ "

Charakterizace míry turbulencí v atmosféře

- **Prostorové vlastnosti:**

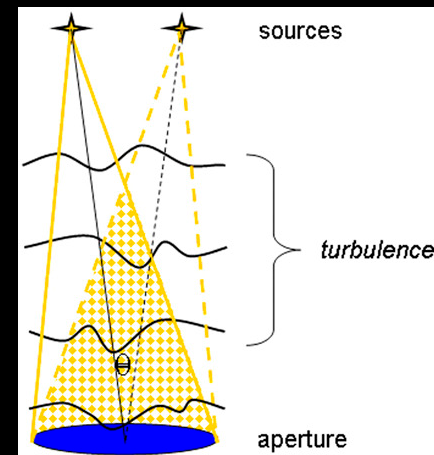
- Friedův parametr r_0 - velikost apertury, jejíž difrakčně omezená rozlišovací schopnost by byla stejná jako rozlišovací schopnost nekonečně velké apertury daná turbulencemi atmosféry
- „seeing“ ε - velikost difrakčního obrazce daného turbulencemi

- **Časové vlastnosti:**

- Na krátkých časových škálách [$10^{-2} - 10^{-3}$ s] – speklový dekoherenční čas τ_0
- Na delších časových škálách [sekundy až hodiny] - časový interval t_0 , po který je možné považovat obraz za translačně stabilní

- **Izoplanatický úhel**

- Maximální úhlová vzdálenost objektů θ_0 , které jsou deformovány velmi podobnými distorzemi vlnoplochy (definice je vágní...)



Modely turbulencí v atmosféře

- Kolmogorov (1941), Tatarski (1961), Fried (1967)

$$r_0 = \left\{ \frac{16,70}{\lambda^2 \cos(\zeta)} \int_h^\infty C_n^2(h) dh \right\}^{-3/5} \quad [\text{m}], \quad \varepsilon = 1,22 \frac{\lambda}{r_0} \quad [\text{rad}]$$

$$\tau_0 = \left\{ \frac{114,88}{\lambda^2 \cos(\zeta)} \int_h^\infty C_n^2(h) v^{5/3}(h) dh \right\}^{-3/5} \quad [\text{s}]$$

$$\theta_0 = \left\{ \frac{114,88}{\lambda^2 \cos^{8/3}(\zeta)} \int_h^\infty C_n^2(h) h^{5/3}(h) dh \right\}^{-3/5} \quad [\text{rad}]$$

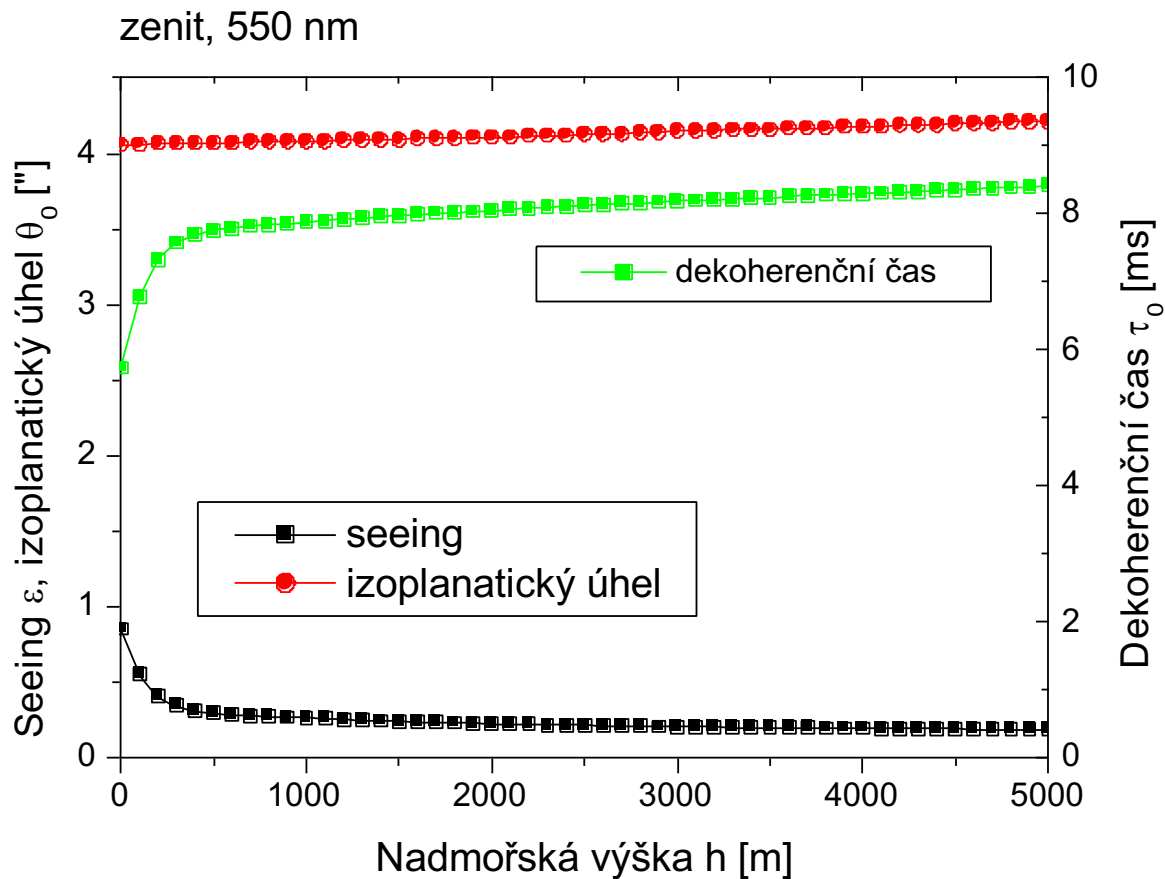
- Větrný profil $v(h)$ a turbulenční profil $C_n(h)$ se liší podle zeměpisné polohy a denní/noční doby

$$v(h) = 5 + 30 \exp\left(-\left[\frac{h-9400}{4800}\right]^2\right) \quad [\text{m/s}] \quad \text{Buftonův model}$$

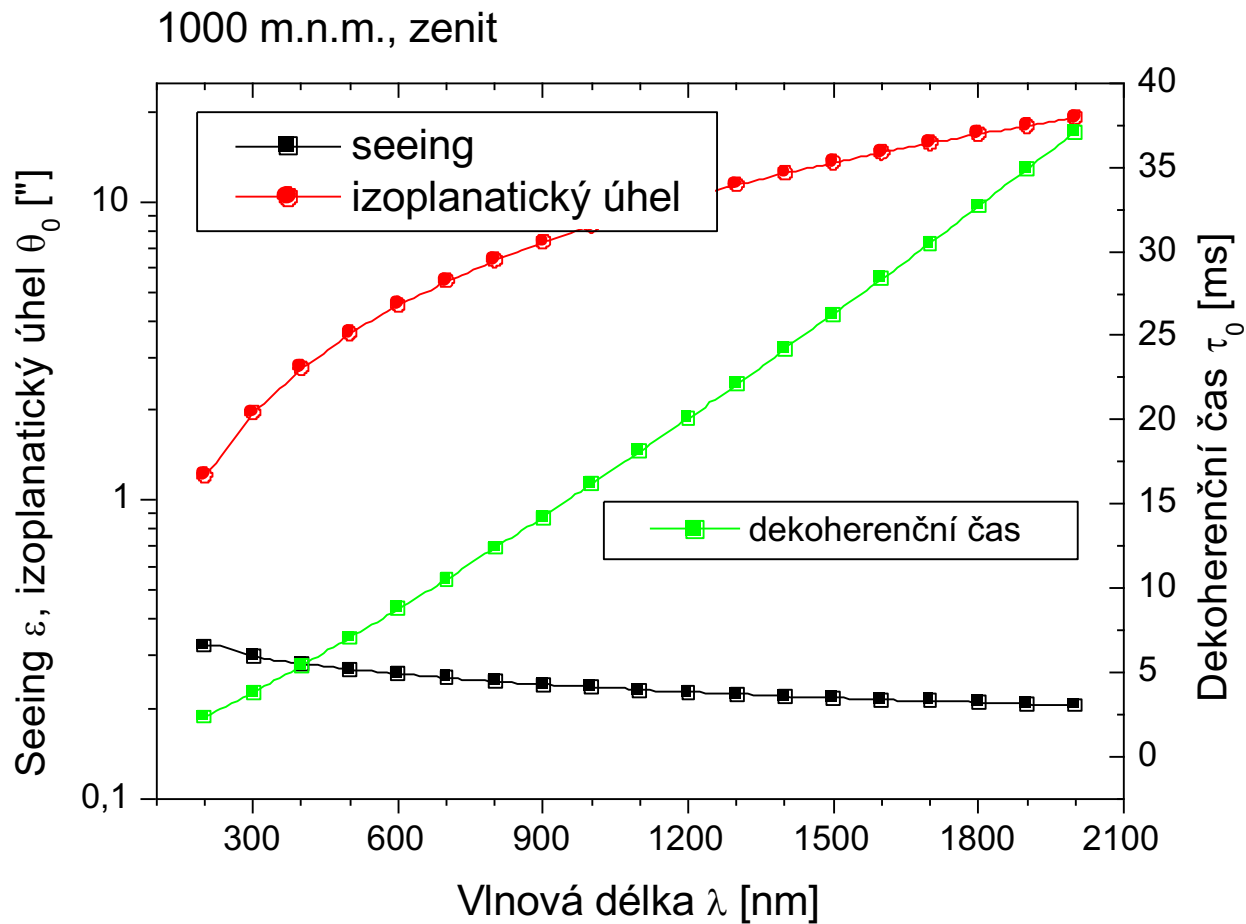
$$C_n^2(h) = 8,16 \times 10^{-54} h^{10} e^{\frac{-h}{1000}} + 3,02 \times 10^{-17} e^{\frac{-h}{1500}} + 1,90 \times 10^{-15} e^{\frac{-h}{100}} \quad [m^{-2/3}]$$

Hufnagel-Valley model (pevnina, noc, mimo obydlené oblasti)

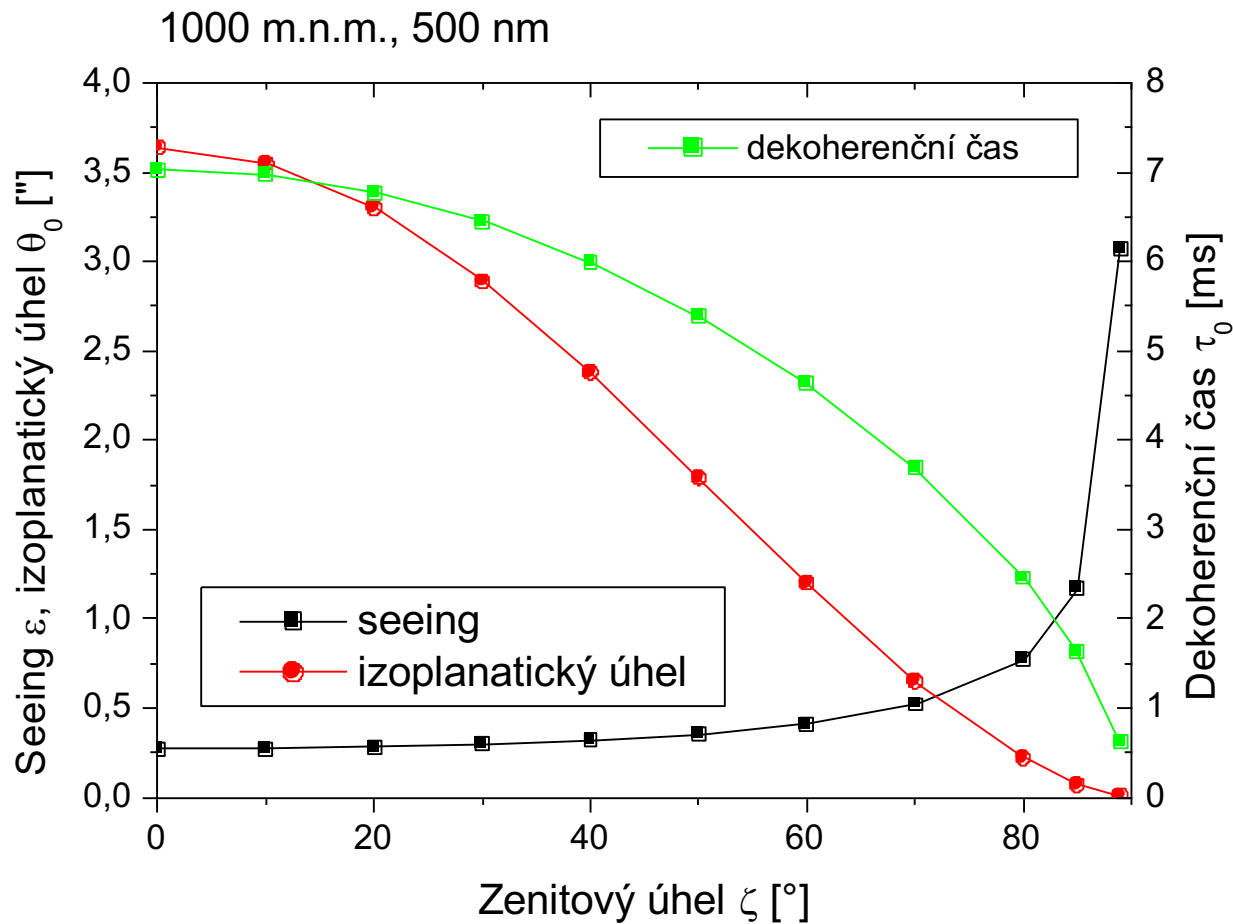
Závislost na nadmořské výšce



Závislost na vlnové délce



Závislost na zenitovém úhlu



Shrnutí

- Seeing, dekoherenční čas i izoplanatický úhel jsou funkcí vlnové délky, nadm. výšky a zenitového úhlu

	r_0	ε	θ_0	τ_0
$\sim \lambda$	$\lambda^{6/5}$	$\lambda^{-1/5}$	$\lambda^{6/5}$	$\lambda^{6/5}$
$\sim \zeta$	$\cos^{3/5}\zeta$	$\cos^{-3/5}\zeta$	$\cos^{8/5}\zeta$	$\cos^{3/5}\zeta$
$\sim h$	$h^{-3/5}$	$h^{3/5}$	$h^{-8/5}$	$h^{-3/5}$

- h - je potřeba dostat se nad 400-500 m.n.m.
- ζ - seeing se dramaticky zhoršuje až 20-30° nad obzorem, dekoherenční čas o něco rychleji
- λ - posunem do blízké IR se seeing zlepší jen nepatrně, ale výrazně se zvýší τ_0

Vliv atmosféry experimentálně

- Experimenty potvrzují turbulenční modely, v některých případech jsou modely trochu příliš pesimistické (10-20%, vyjimečně i více)
- V obydlených oblastech to může být výrazně horší (seeing i několikanásobně)
- Typické hodnoty:

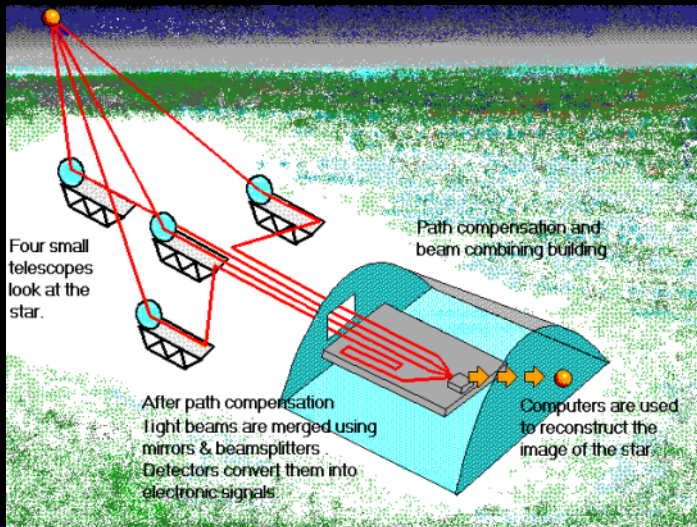
	Dobrá observatoř	Okolí Olomouce
Seeing	0,5"	3"
Dekoherenční čas	>10 ms	~ 1 ms
Izoplanatický úhel	4-10"	?

Rozlišení 0,5"
odpovídá
dalekohledu o
průměru cca 30 cm

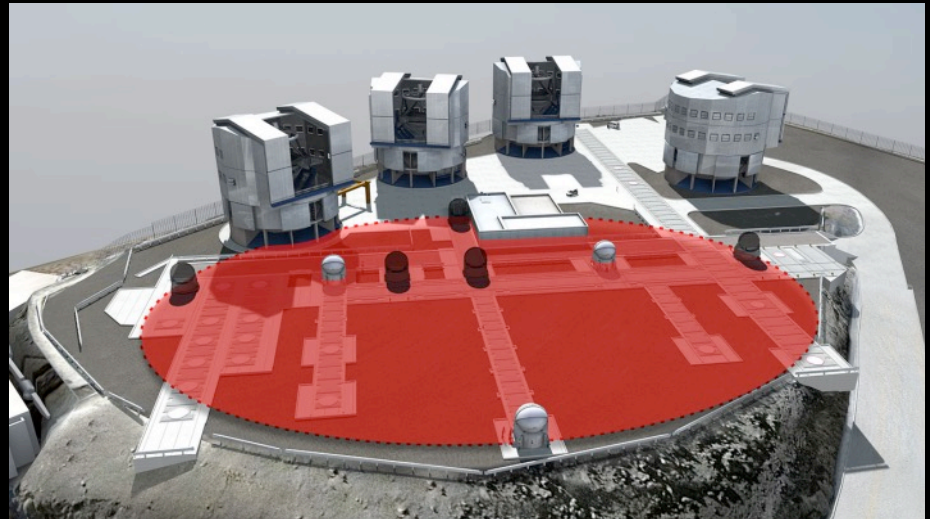
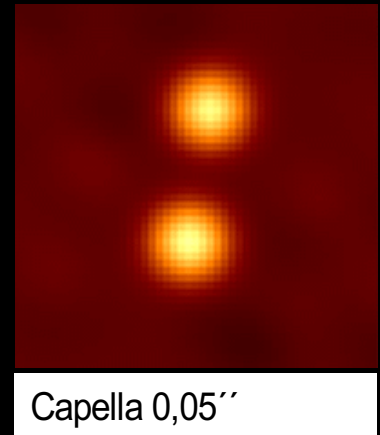
Korekční metody

- Interferometrie
- Speklová interferometrie
- Stabilizace obrazu
- Aktivní optika
- Adaptivní optika
- Lucky imaging

Interferometrie

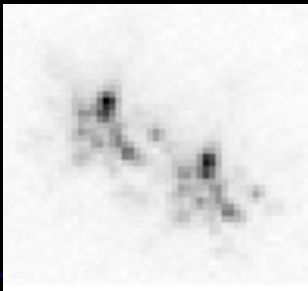


- COAST
(Cambridge)
100 m, 0,001"
- VLTI
(ESO, Chile)
0,002"
- aperture masking



Speklová interferometrie

- Labeyrie (1970)
- Snímek získaný krátkou expozicí ($< \tau_0$)



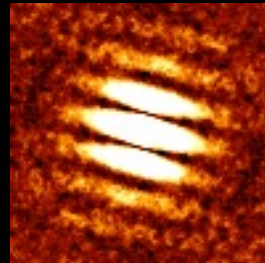
$$I(x, y) = P(x, y) * O(x, y)$$

↑ FFT ↓

$$i(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y) = p(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y) o(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)$$
$$\langle |i(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)|^2 \rangle = \langle |p(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)|^2 \rangle |o(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)|^2$$

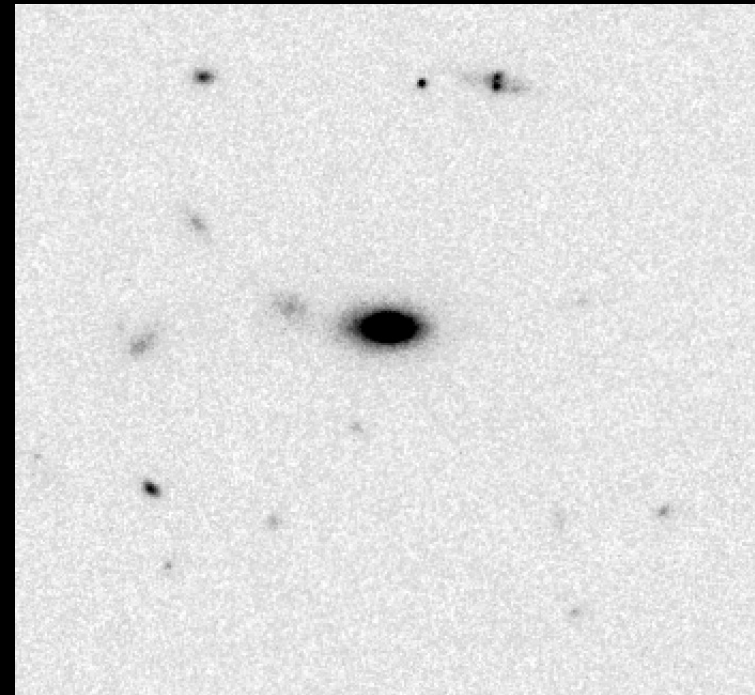
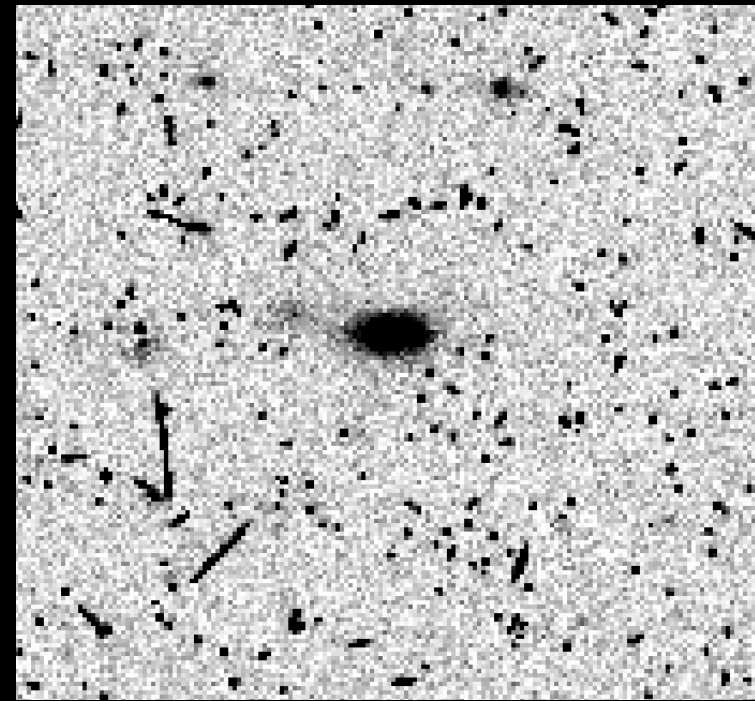


- Dobře použitelné zejména na pozorování těsných dvojhvězd

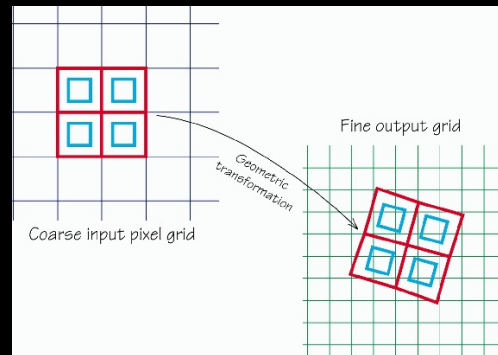


Drizzle

- Rekonstrukce podvzorkovaných obrazů (variable-pixel linear reconstruction)
- Vyvinut pro Hubble deep field

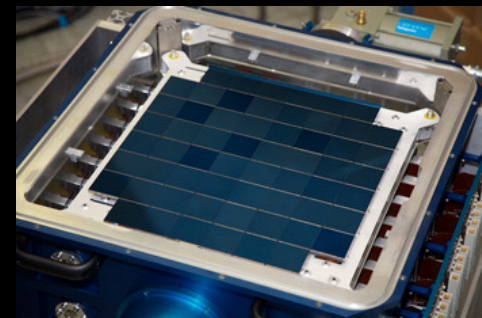
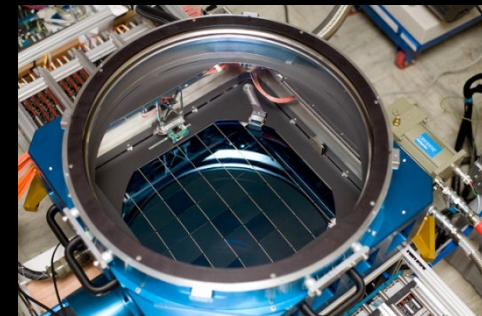


<p>obraz bez vad (nekonečná apertura)</p>	<p>PSF přes dalekohled</p>
<p>obraz kamerou (undersampling)</p>	<p>korekce drizzle</p>



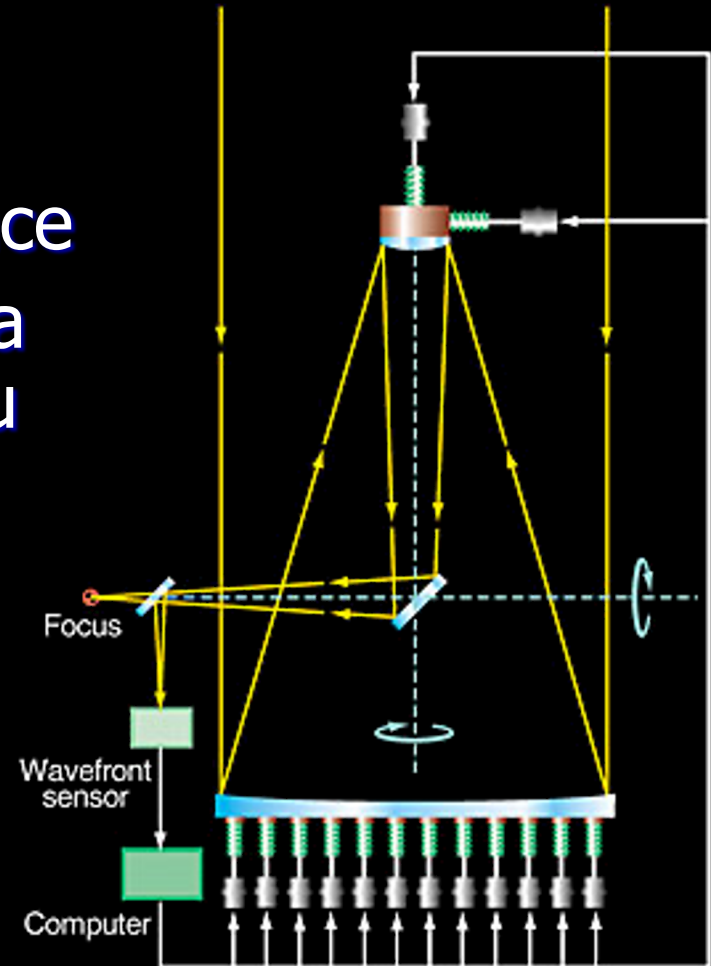
Stabilizace obrazu (tip-tilt)

- Pohybuje se optickou komponentou nebo snímacím čipem podle údajů z pomocného senzoru
- „Orthogonal transfer CCD“ (Pan-STARRS - Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, 3° Havaj) – posouvá náboj podle posunu signálu z jasných hvězd (1,4 Gpix)
- Technika přináší zlepšení faktorem 2x
- v IR-oblasti a 10-30% ve viditelné oblasti
- Je součástí všech systémů adaptivní optiky



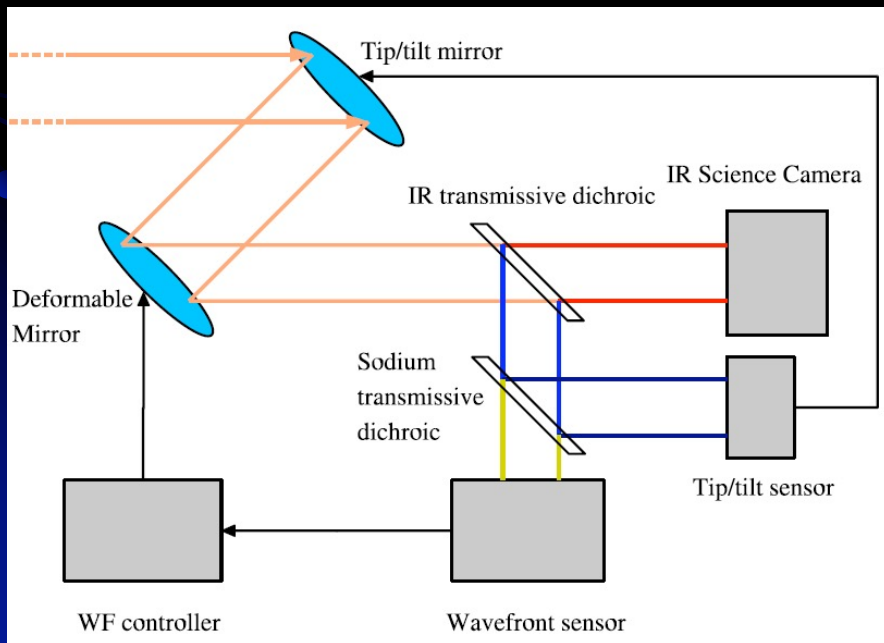
Aktivní optika

- Koriguje vnější nepříznivé vlivy – vítr, teplota, mechanické napětí, gravitace
- Velikost zrcadel je omezena požadavky na mechanickou stabilitu
- Většina nových systémů (nebo jejich segmentů) používá tenká zrcadla, jejichž tvar se nastavuje pomocí aktuátorů



Adaptivní optika

- Používá deformovatelné zrcadlo
 - Pracují zpravidla v IR (1,2-2,2 μm)
 - Používá se buď naváděcí hvězda v izoplanatickém úhlu ($>12^{\text{m}}$) nebo umělá hvězda (excitace pulsním Na laserem)
 - multiconjugate adaptive optics
- ESO VLT, Keck, Subaru a další
 - Rozlišení typ. 0,05"



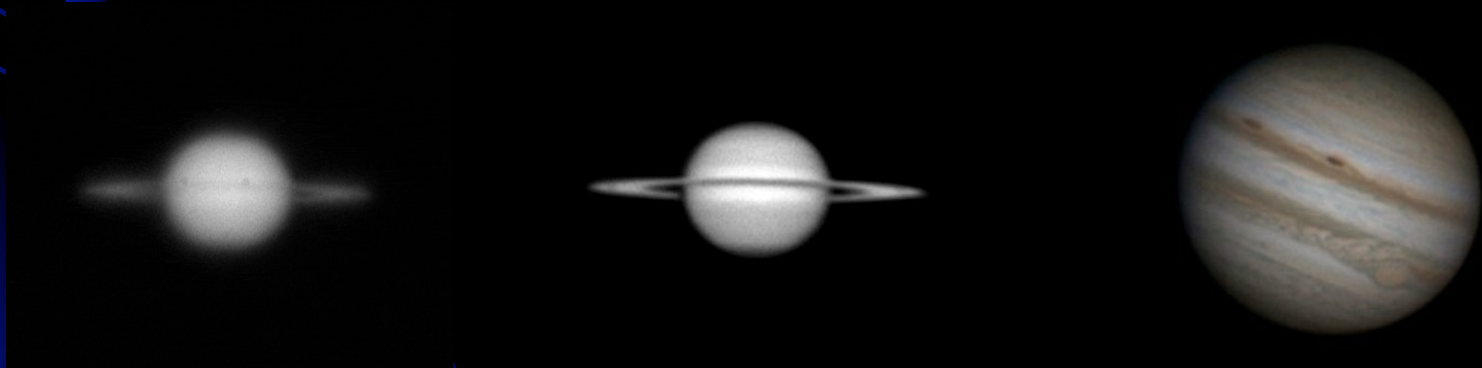
AO systém s Na laserem na VLT

Lucky imaging

- Výběr ze snímků pořízených s krátkými expozicemi ($< \tau_0$) – skládají se ty, které jsou nejméně zasaženy seeingem
- Případně lze kombinovat s off-line tip-tilt technikami a speklovou interferometrií
- Lze dosáhnout rozlišení 0,1" v červené oblasti spektra
- Výhodné je mít kameru s vysokou citlivostí (velké QE, nízký šum)

Amatérský lucky-imaging

- Malé dalekohledy, webkamery (málokdy se podaří snímat s expozicí $< \tau$)
- Zpravidla jen pro nejjasnější objekty – Slunce, Měsíc, Venuše, Mars, Jupiter, Saturn
- Software pro tip-tilt a wavelet-filtering (Registax)

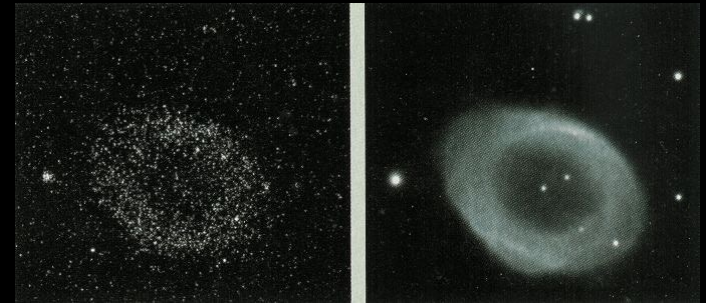


L. Motáň & O. Haderka, SAO Grygov

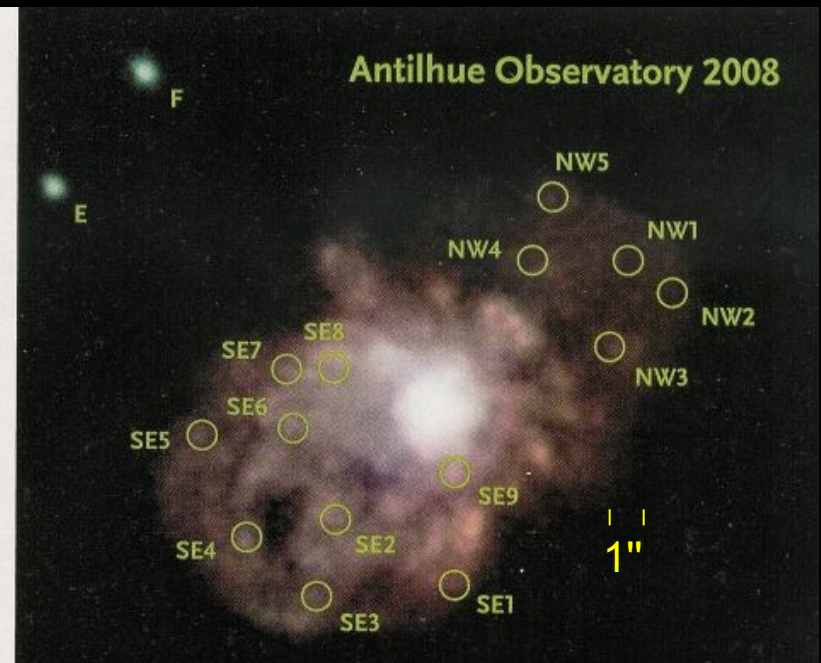
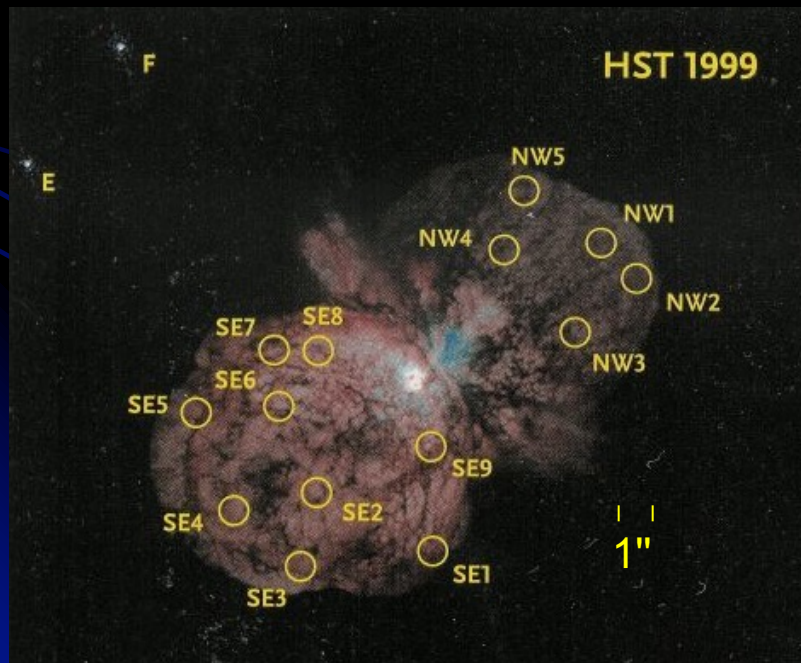
Martin Trojan

Deep-sky amatérský lucky imaging

- Náročnější, vyžaduje velmi citlivé kamery



Homunculus, η Car
Sky & Telescope, březen 2009



Kamery pro lucky imaging

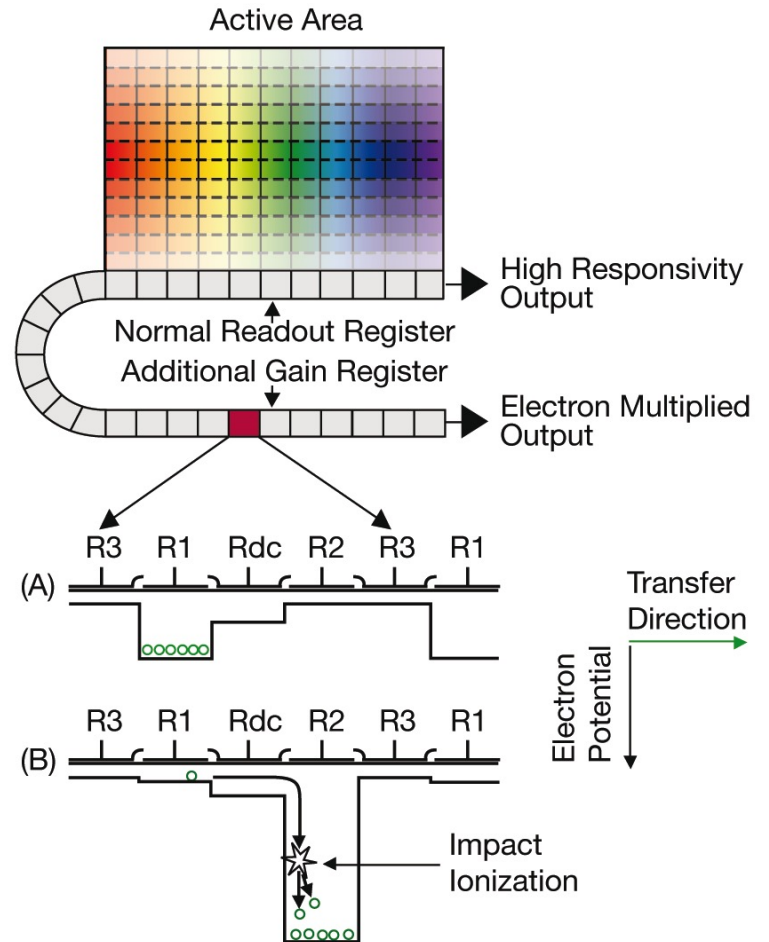
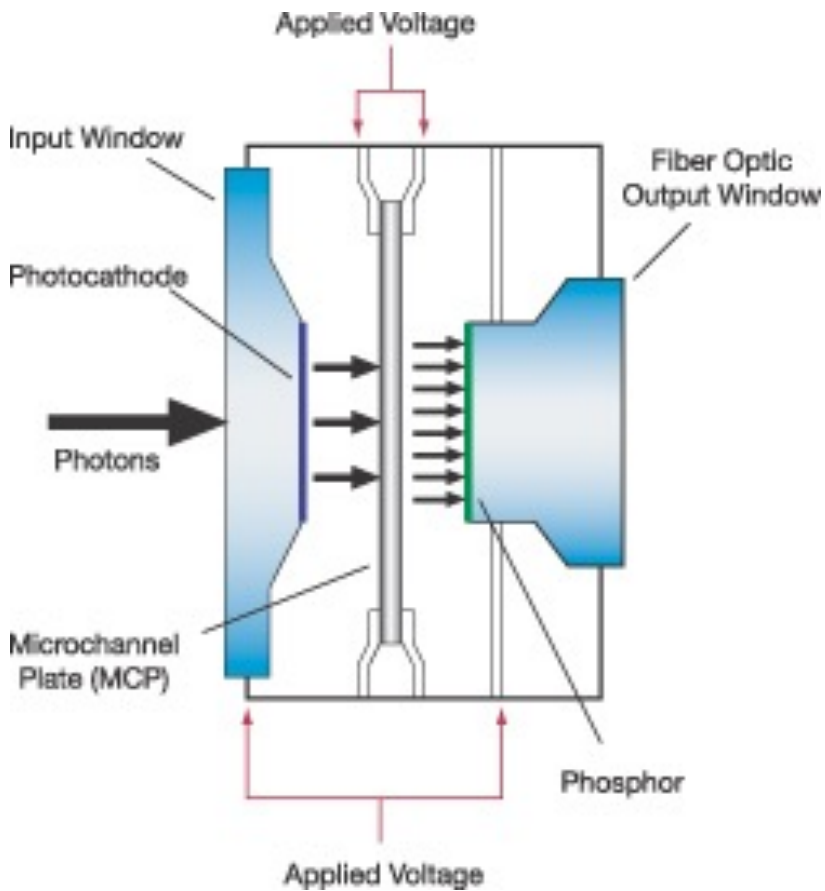
- Co nejvyšší kvantová účinnost
- Co nejnižší vyčítací šum

Kamery s vnitřním zesílením – iCCD, EMCCD
(v astronomii často nazývané
L3CCD - „Low-light-level CCD“)

Institute of Astronomy
Cavendish Astrophysics group
University of Cambridge
England, UK

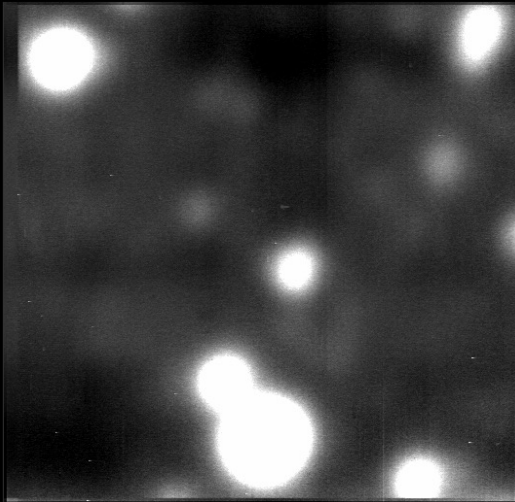


ICCD, EMCCD

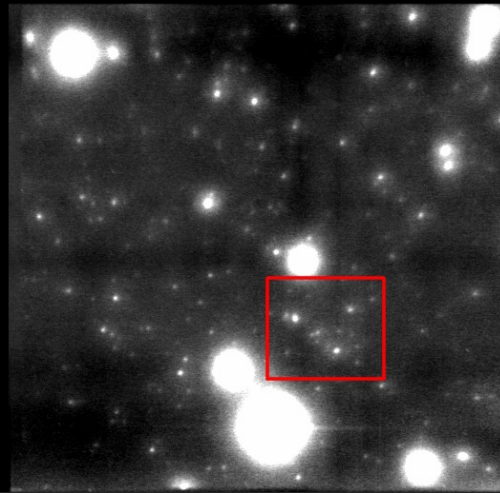


LuckyCam – jádro M13

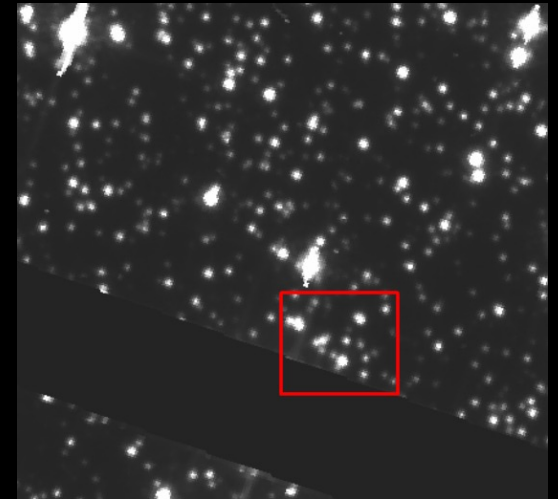
LuckyCam na Haleově teleskopu observatoře na Mt. Palomaru.
Jádro kulové hvězdokupy M13, 10" pole.



Standardní kamera,
seeing 0,6"

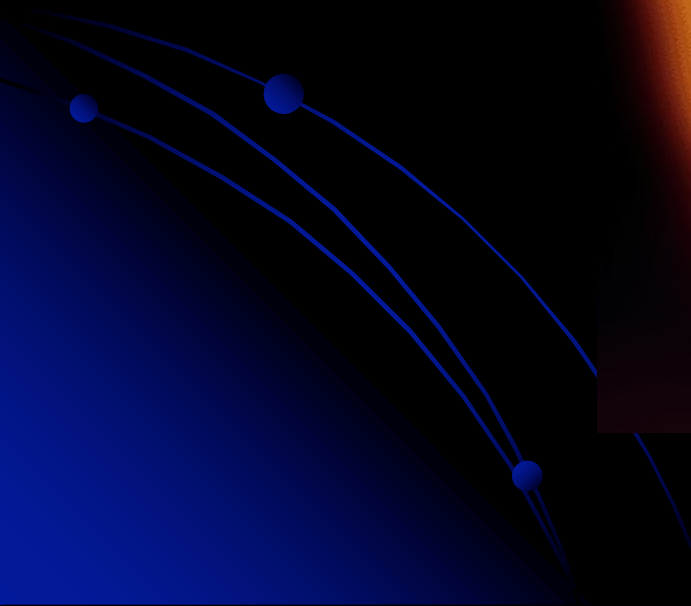
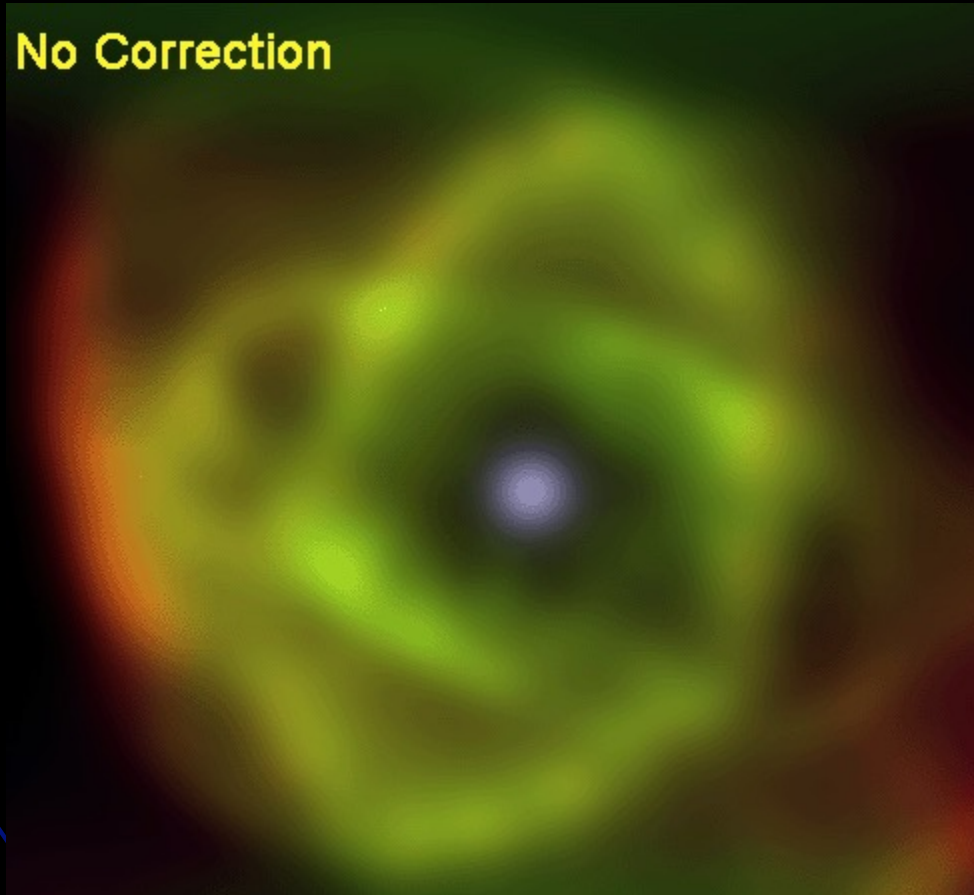


LuckyCam spolu s
AO systémem
teleskopu



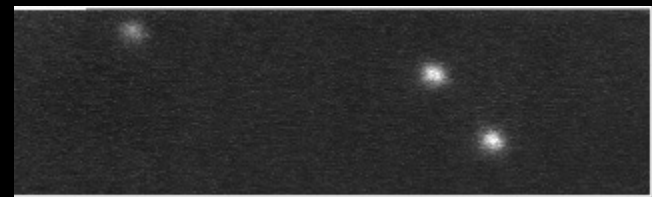
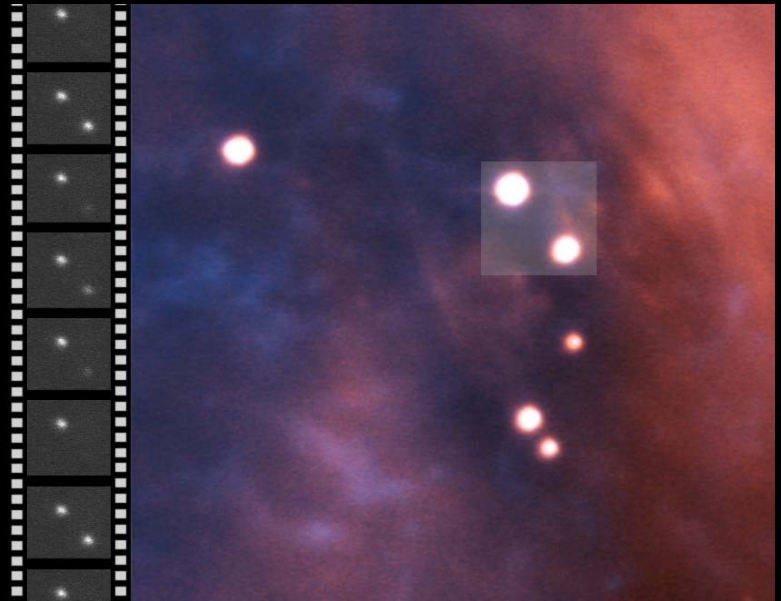
HST

Cat's Eye Nebula (NGC6543, Dra)

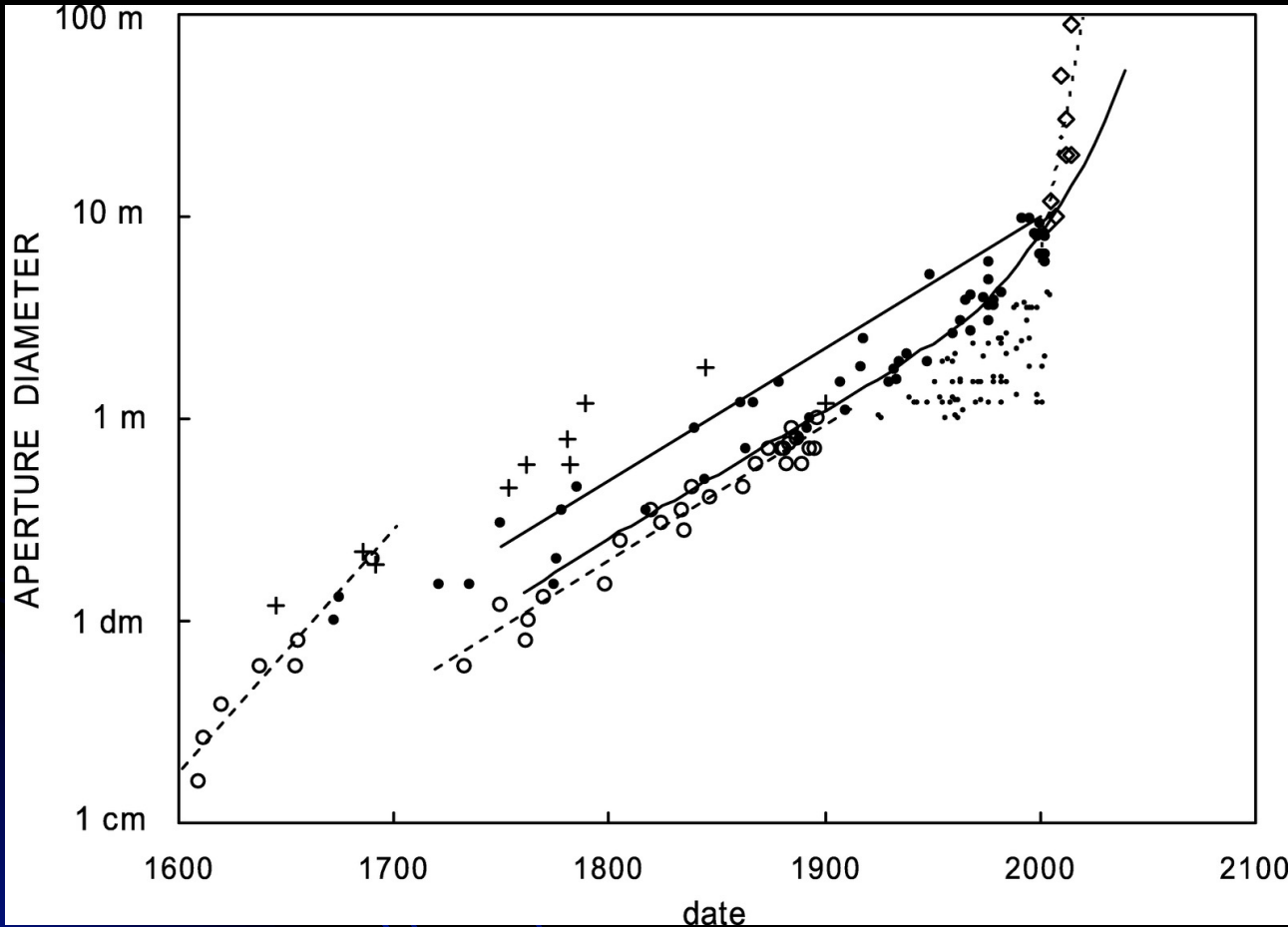


Pulzar v Krabí mlhovině (M1)

Zbytek po výbuchu supernovy v roce 1054,
centrální hvězda se změnila
v pulzar s periodou 33 ms



Historický růst dalekohledů



R. Racine, Pub.
Astron. Soc. Pac.
116, 77 (2004)

Fig. 1. — Aperture diameters as a function of commissioning dates for major telescopes. *Open circles*, refractors; *filled circles*, reflectors; *small filled circles*, 20th century telescopes with $D \geq 1$; *crosses*, instruments with shortcomings; *diamonds*, future instruments, including five ELTs.

Největší pozemské systémy

- GTC (Gran Telescopio Canarias) – 10,2 m
 - Keck 1, Keck 2 – 10 m, Mauna Kea, Havaj
 - HET (Hobby-Eberly Telescope) – 9,2 m, Texas
[+ Southern African Large Telescope (SALT)]
 - LBT (Large Binocular Telescope) – 2 x 8,4 m
(Arizona, USA)
 - Subaru – 8,2 m, Mauna Kea, Havaj
 - VLT 1-4 – 8,2 m, Paranal, Chile
 - Gemini N+S – 2 x 8,1 m, Mauna Kea, Havaj
- ...celkem ~20 (single/aperture) teleskopů nad 5 m

Gran Telescopio Canarias

- primární zrcadlo z 36 hexagonálních segmentů o tloušťce cca 8 cm
- azimutální montáž
- aktivní optika
- adaptivní optika



Keckovy dalekohledy

- primární zrcadlo z 36 hexagonálních segmentů
- azimutální montáž
- aktivní optika
- adaptivní optika
- mohou pracovat spolu jako interferometr (vzdálenost 85 m)



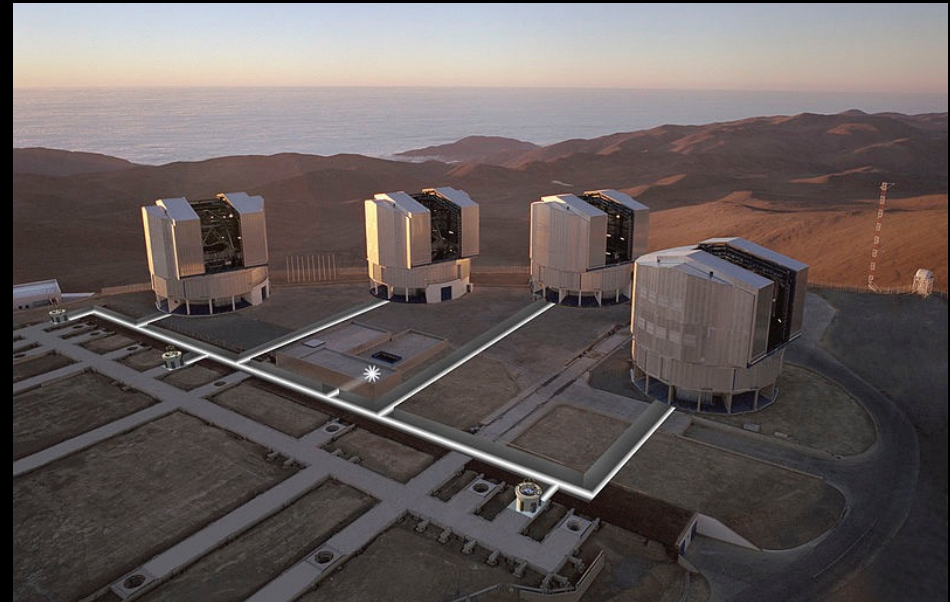
Hobby-Eberly Telescope

- hlavní zrcadlo (11x9,7 m) fixováno v úhlu 55° - 91 hexagonálních segmentů
- kopule je otočná horizontálně
- pohybují se přístroje v primárním ohnisku
- aktivní optika

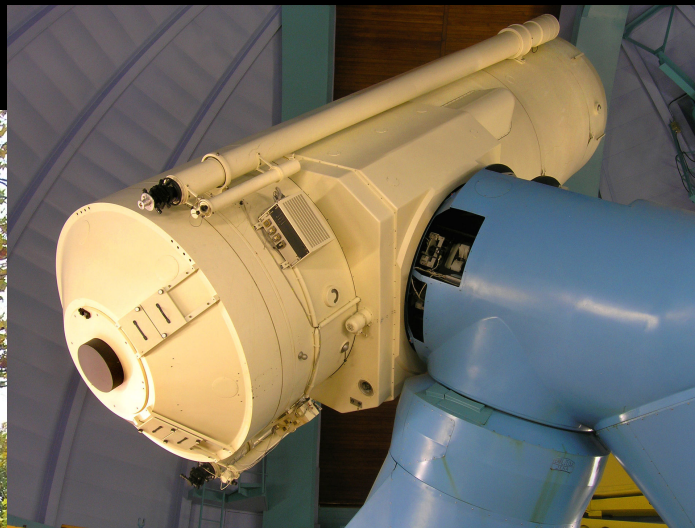


Very Large Telescope

- 4 x 8,2m, 4 x 1,8 m (pohyblivé)
 - jako čtyři nezávislé dalekohledy
 - jako interferometr (VLTI)
 - *syntéza apertury (zatím nerealizováno)*
 - aktivní optika
 - adaptivní optika

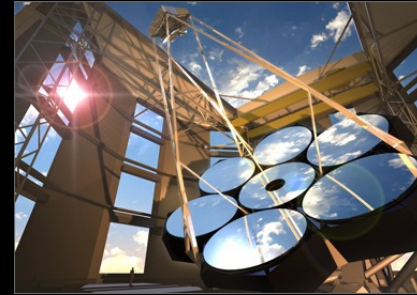


ČR – Ondřejovský „dvoumetr“



Velké dalkohledy budoucnosti

- Giant Magellan Telescope – 7 x 8,4 m (24,5 m) – Chile (Las Campanas, 2029)
- Thirty Meter Telescope – Havaj (2027, protesty)
- European Extremely Large Telescope – 39,3 m – Chile (Cerro Amazones, 2027)



Great Paris Exhibition Telescope
(lens at the same scale)
Paris, France (1900)

Yerkes Observatory
(40" refractor
lens at the same scale)
Williams Bay,
Wisconsin (1893)

Hooker (100")
Mt Wilson,
California
(1917)

Hale (200")
Mt Palomar,
California
(1948)

Multi Mirror Telescope
(1979-1998)
Mount Hopkins, Arizona

Hobby-Eberly Telescope
Davis
Mountains,
Texas (1996)

BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)
Zelenchuksky, Russia
(1975)

Large Zenith Telescope
British Columbia, Canada
(2003)

Gaia
Earth-Sun L2 point
(2014)

Kepler
Earth-trailing
solar orbit
(2009)

James Webb Space Telescope
Earth-Sun L2 point
(planned 2018)

Hubble Space Telescope
Low Earth
Orbit
(1990)



Tennis court at the same scale

Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
Hebei, China
(2009)

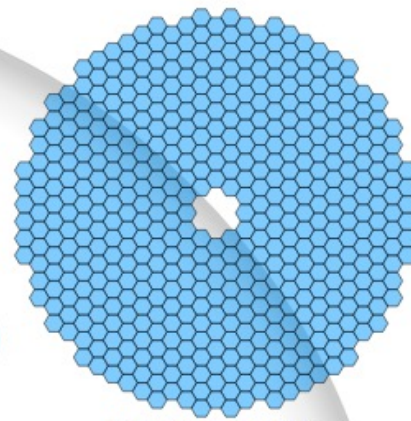
Gran Telescopio Canarias
La Palma,
Canary Islands,
Spain (2007)

Keck Telescope
Mauna Kea, Hawaii
(1993/1996)

Southern African Large Telescope
Sutherland,
South Africa
(2005)

Gemini North
Mauna Kea,
Hawaii (1999)

Subaru Telescope
Mauna Kea,
Hawaii (1999)

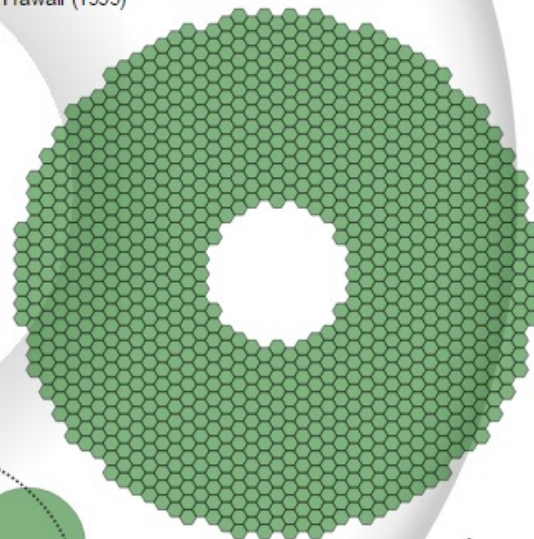


Thirty Meter Telescope
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)

Large Binocular Telescope
Mount Graham,
Arizona (2005)

Gemini South
Cerro Pachón,
Chile (2000)

Large Synoptic Survey Telescope
El Peñón, Chile
(planned 2020)



European Extremely Large Telescope
Cerro Amalago,
Chile (planned 2022)

Human at the same scale

0 5 10 m
0 10 20 30 ft

Very Large Telescope
Cerro Paranal, Chile
(1998-2000)



Giant Magellan Telescope
Las Campanas Observatory,
Chile (planned 2020)

Magellan Telescopes
Las Campanas,
Chile (2000/2002)

Overwhelmingly Large Telescope
(cancelled)

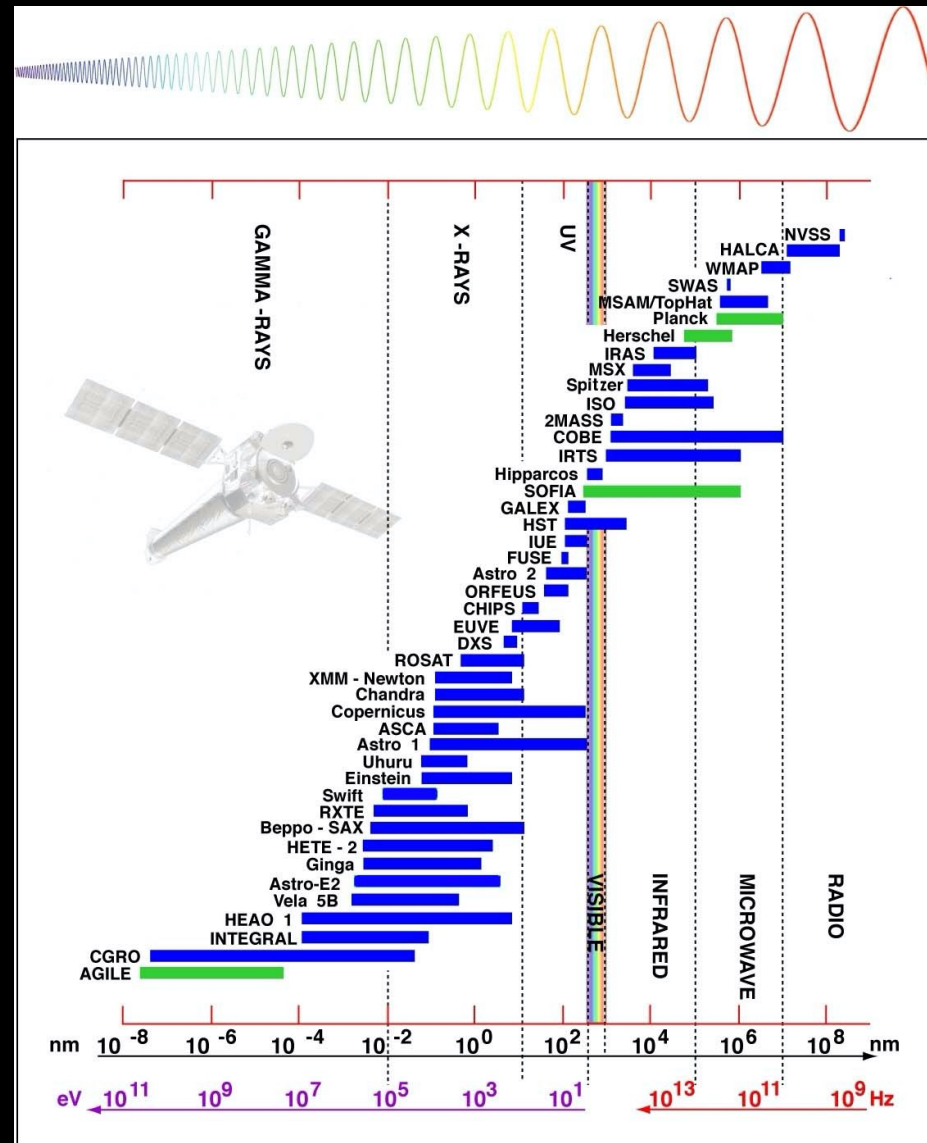
Arecibo radio telescope at the same scale



Basketball court at the same scale

Vesmírné teleskopy

- Vysoká pořizovací cena, nákladná nebo dokonce nemožná údržba
- Pozorování ve spektrálních oborech, které ze Země obtížné nebo nemožné
- HST (1990, 2,5 m)
- Kepler (2009, 1,4 m)
- Spitzer (2003, 0,85 m)
- James Webb (2021?, 6,5 m, 18 segmentů)

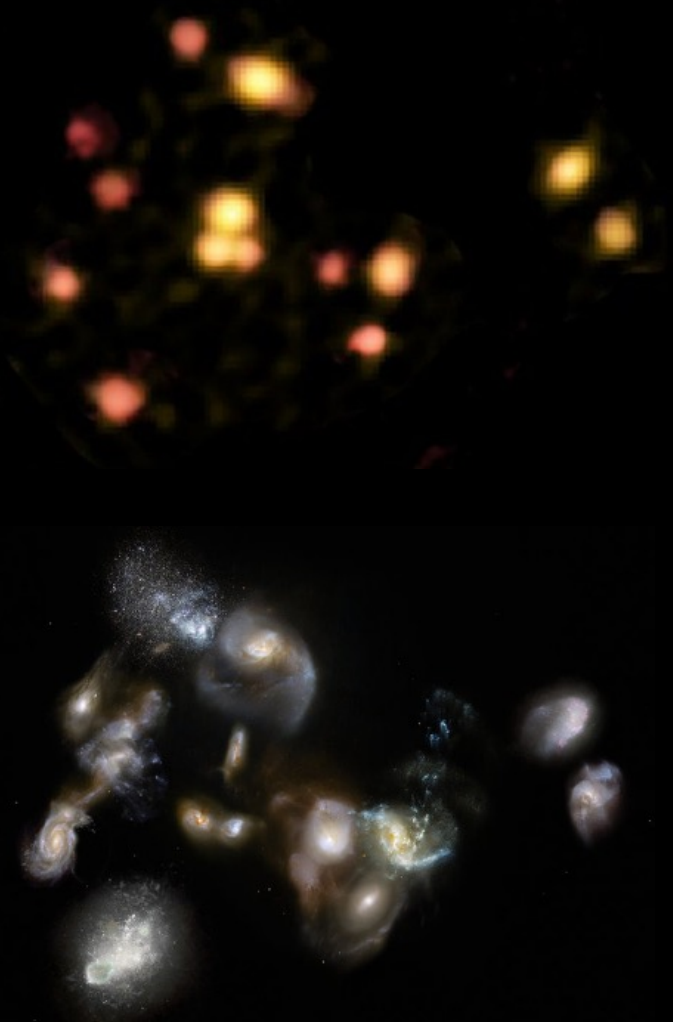


Shrnutí

- I z povrchu Země lze provádět zobrazování na difrakčním limitu optiky
 - Korekcemi při dlouhých expozicích (stabilizace obrazu, adaptivní optika)
 - Krátkými expozicemi (lucky-imaging, speková interferometrie)
- Dlouhé expozice se přiblíží difrakčnímu limitu jen v IR oblasti, technicky velmi náročné
- Krátké expozice se přiblíží difrakčnímu limitu i ve viditelné oblasti, jsou jednodušší, ale s omezeným dosahem
- Obojí funguje (dobře) jen na malých úhlových rozměrech

Neoptické pozemské systémy

- ALMA (Atacama Large Millimeter Array) – interferometr složený z 66 radioteleskopů (12 a 7 m průměr), 0,3 – 9,6 mm, antény operují ve vzdálenostech 0,15-16 km



Studijní materiál

<http://jointlab.upol.cz/haderka>

