

Extra-solare Planeten

Die Suche nach Leben im Universum

Hans Martin Schmid,
Institut für Astronomie, ETH Zürich

Direkte Abbildung von Exo-Planeten

oder

Gibt es Leben da draussen?

Hans Martin Schmid, Institut für Astronomie, ETH Zürich

1. Eine Reise durch unser Sonnensystem
2. Suche nach extra-solaren Planeten
3. Die direkte Abbildung von extra-solaren Planeten
4. Kurzer Ausblick: Nachweis von Leben?

Gibt es Leben da draussen?

1. Eine Reise durch unser Sonnensystem

Voyager 1+2

Start im Aug. + Sept. 1977

- seit 37 Jahren unterwegs
- noch teilweise funktionstüchtig
- die am weitesten entfernten von Menschen gebauten Sonden





Apollo, Cassini, Galileo, Mariner, Mars-Explorer, ...

Nach 15 Minuten



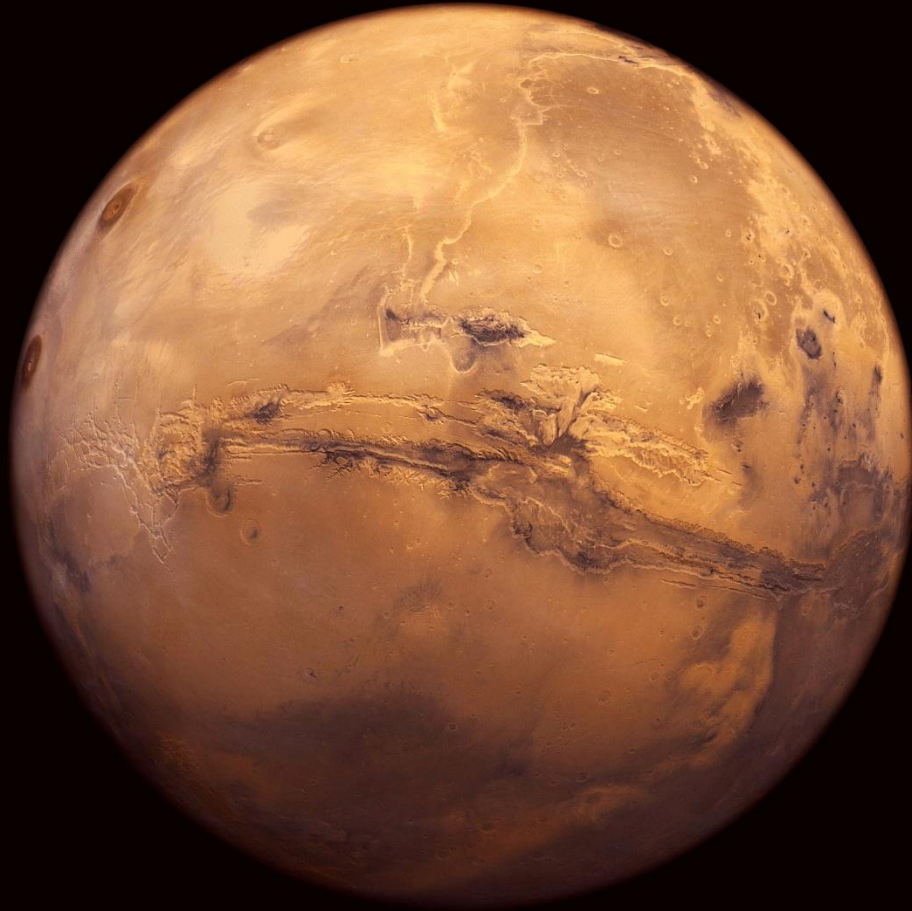
nach wenigen Tagen



wenige Wochen

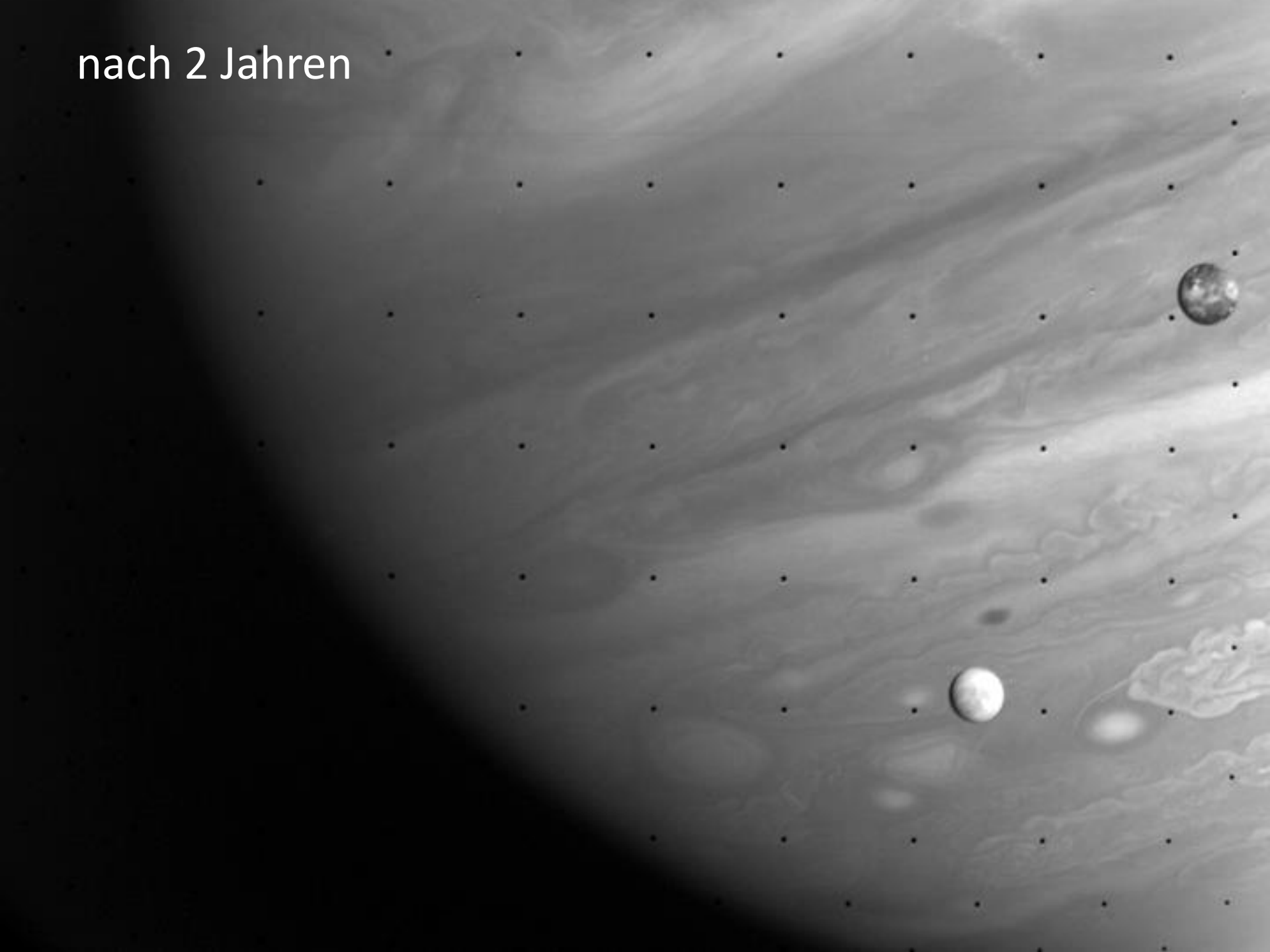


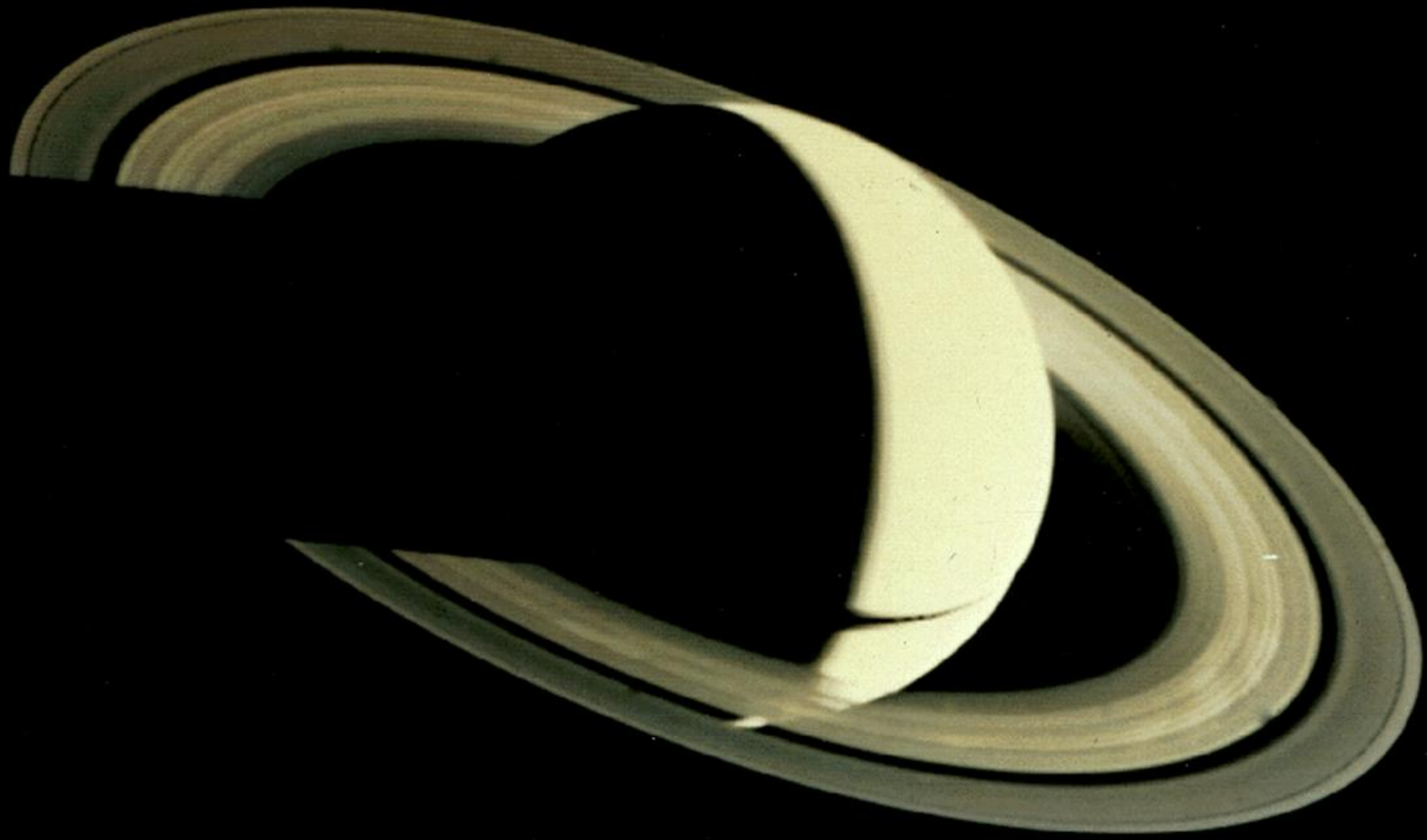
etwa ½ Jahr





nach 2 Jahren

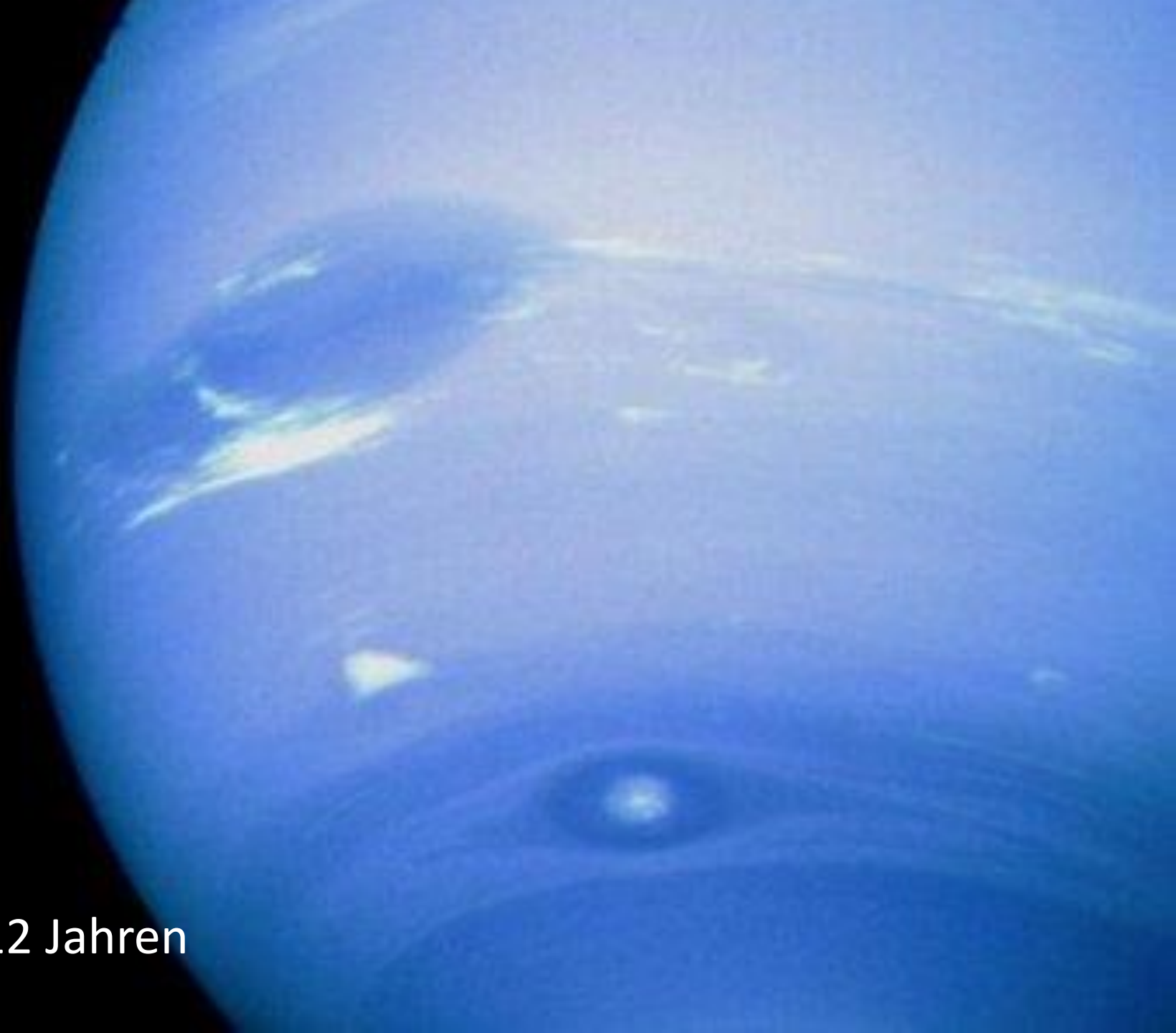




nach 4 Jahren



nach 8 Jahren



nach 12 Jahren



nach 13 Jahren

Sonnensystem

Erdähnliche Planeten

1. Merkur
2. Venus
3. Erde
4. Mars

Gasplaneten

5. Jupiter (330x schwerer als Erde)
6. Saturn
7. Uranus
8. Neptun

+ Monde, Asteroiden, TNOs,
Kometen, Staub, etc.

Sonne (330 000x schwerer als Erde)

- heisse, glühende Gaskugel
- besteht praktisch nur aus leichtem Gas

1
2
3
4



5



6



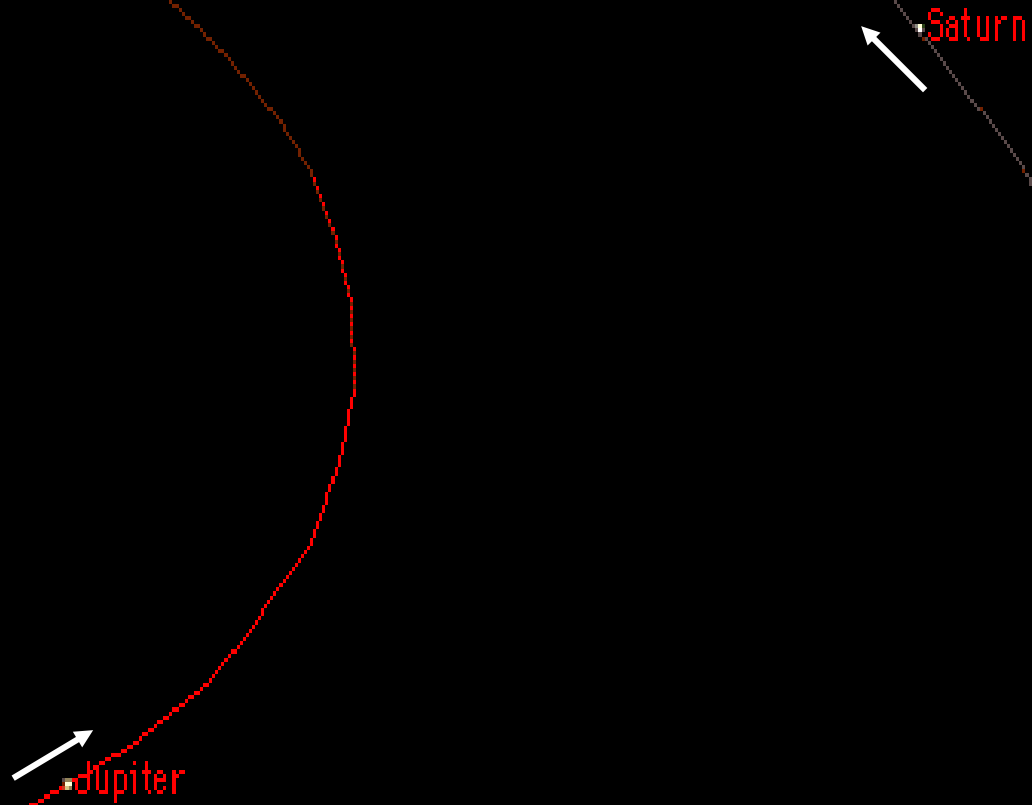
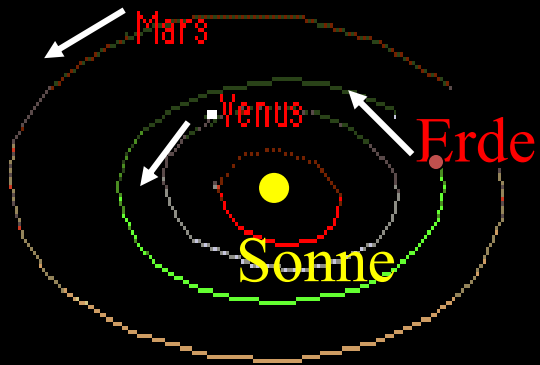
7



8

Sonnensystem

- alle Planeten kreisen in gleicher Richtung um Sonne
- die Planetenbahnen liegen in einer Scheibe



in Sternentstehungsgebieten gibt es
proto-planetare Scheiben



Junge Sterne
($< 10 \text{ MJ}$)
sind zuerst
von Scheiben
aus Gas und
Staub
umgeben

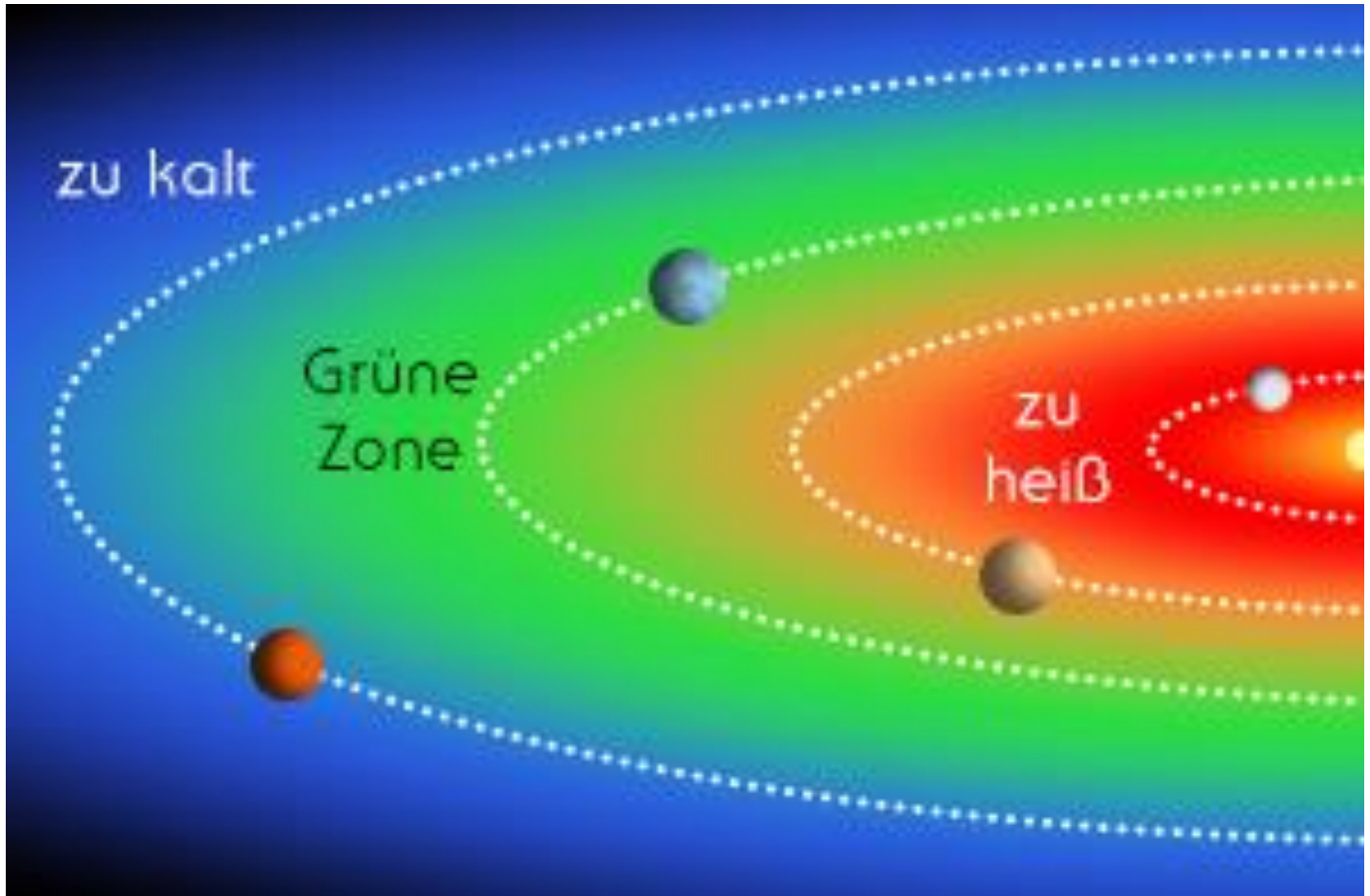


Planeten entstehen in the Scheiben aus Gas und Staub



- aus kleinen Staubteilchen in der Scheibe bilden sich Klumpen
- die grössten Körper ziehen andere Teilchen am stärksten an
- es bleiben nur noch einige wenige grosse Planeten übrig

Die bewohnbare Zone



Gibt es Leben da draussen?

1. Eine Reise durch unser Sonnensystem
2. Suche nach extra-solaren Planeten

Blaue Farbe stammt

- von der Lichtreflexion der Meere
 - von der Lichtstreuung in der Atmosphäre
- Indikator für günstige Bedingungen



wir suchen einem blauen Punkt



Astronomischer Distanzen-“Horror“

Grösse	Distanz			unser Model
	km	AE Sonne-Erde	Lichtlauf- zeit	
Distanz Sonne-Erde	150 000 000km	1 AE	8min20s	30 cm
Sonnendurchmesser	1 400 000 km			3 mm
Jupiterdurchmesser	140 000 km			0.3 mm
Erddurchmesser	12 000 km			0.03 mm
Jupiterbahn		5 AE	40 min	1.5 m
Neptunbahn		30 AE	4 Std	9 m
Voyager 1 (Photo)		43 AE	6 Std	13 m
Voyager 1 (heute)		130 AE	18 Std	40 m

Astronomischer Distanzen-“Horror“

Grösse	Distanz			unser Model
	km	AE Sonne-Erde	Lichtlaufzeit	
Distanz Sonne-Erde	150 000 000km	1 AE	8min20s	30 cm
Sonnendurchmesser	1 400 000 km			3 mm
Jupiterdurchmesser	140 000 km			0.3 mm
Erddurchmesser	12 000 km			0.03 mm
Jupiterbahn		5 AE	40 min	1.5 m
Neptunbahn		30 AE	4 Std	9 m
Voyager 1 (Photo)		43 AE	6 Std	13 m
Voyager 1 (heute)		130 AE	18 Std	40 m
Nächster Stern			4.4 J	100 km (Bern)*
Sirius			8.6 J	200 km (Genf)

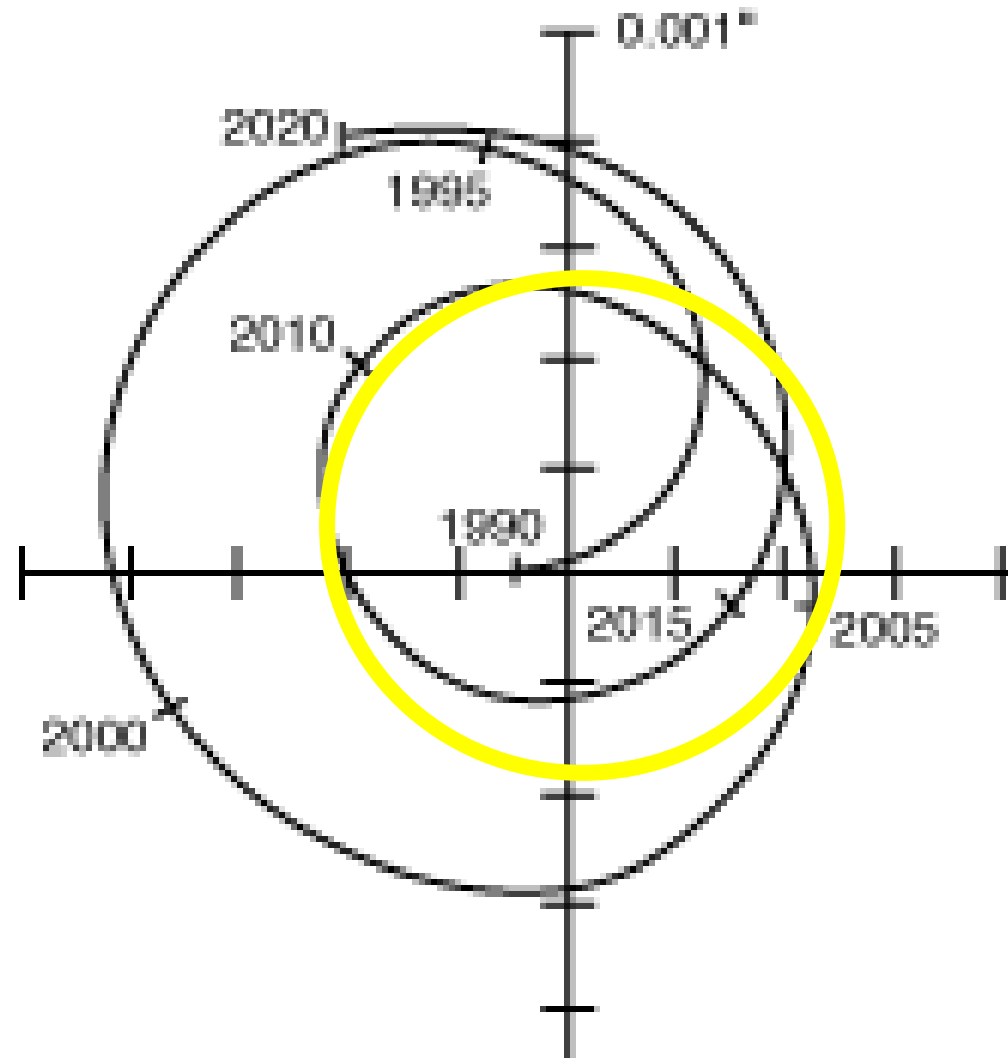
* Reisezeit für Voyager 1: ca. 100 000 Jahre (17 km/s)

Indirekter Nachweis von Planeten

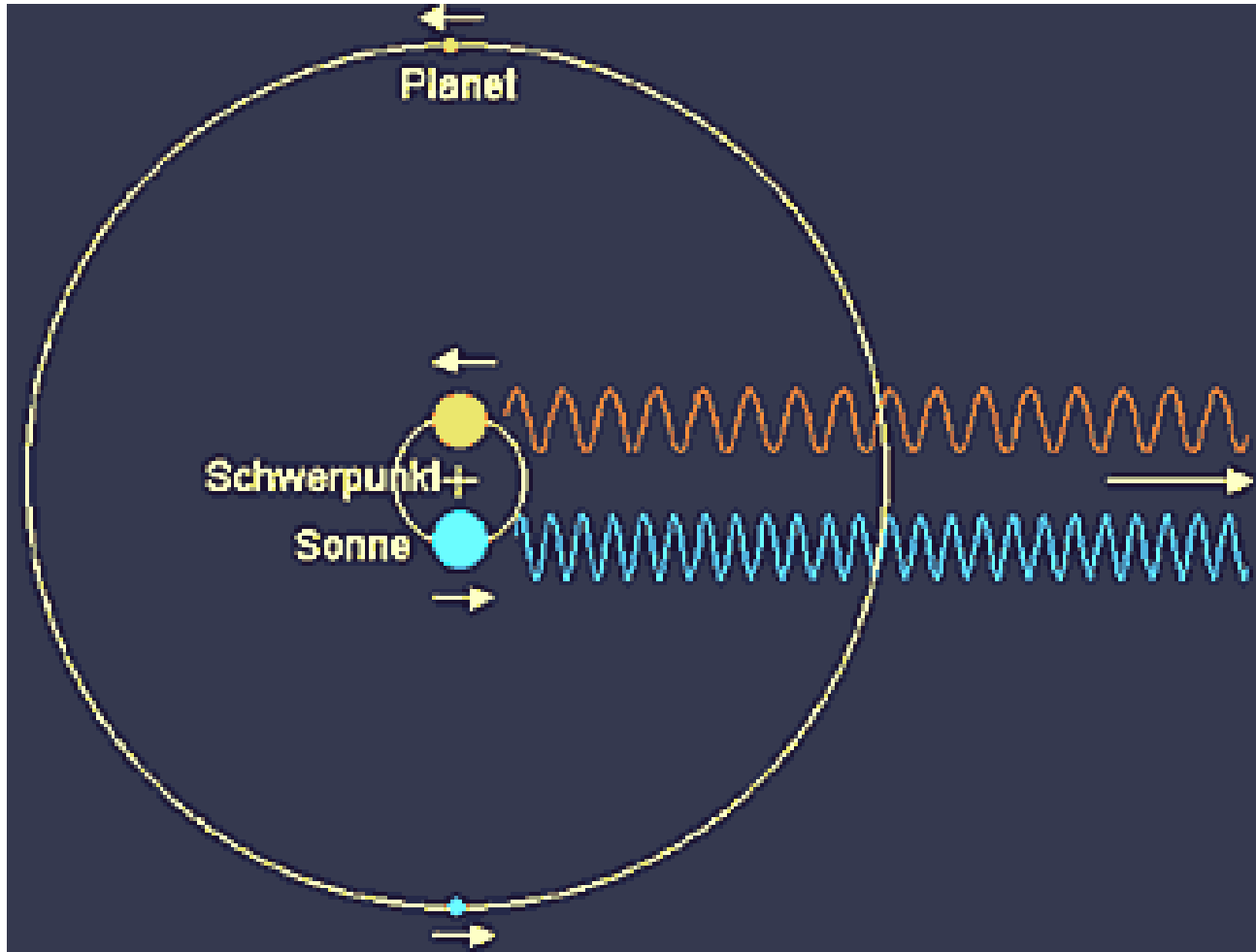
Bewegung des Sterns wegen Planeten

- Radialgeschwindigkeit
- Astrometrische Bahn

Beispiel Sonne →



Messung der Radialgeschwindigkeitvariationen von Sternen



<http://www.astronomie.info>

Dopplereffekt (radiale Geschwindigkeit) verschiebt Wellenlänge des Signals

Multiplanet system HD40307

Mayor et al. 2009, A&A 493, 639

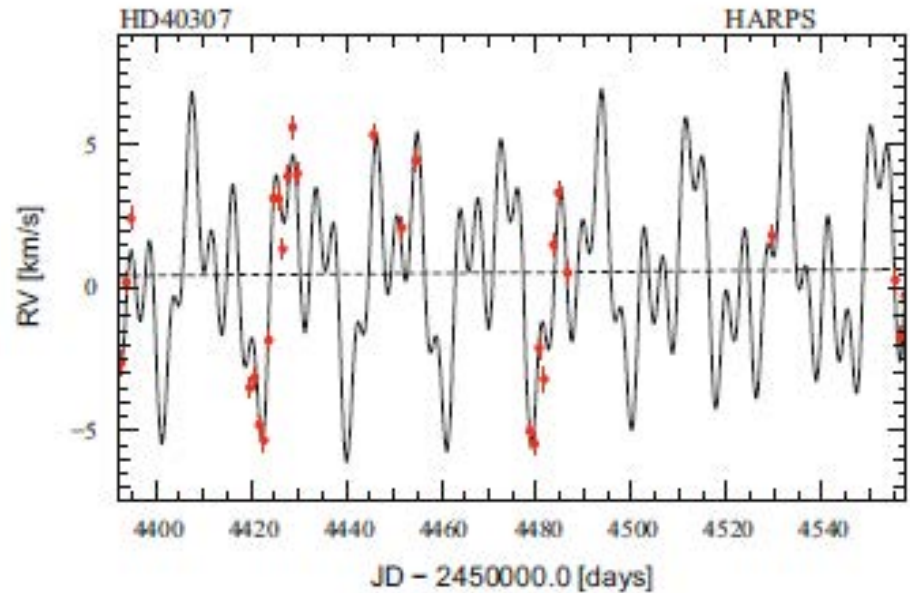


Fig. 3. Partial time window of HARPS relative radial velocities of HD 40307, with the 3-Keplerian model superimposed. Data for only ~6 months are displayed for clarity reasons.

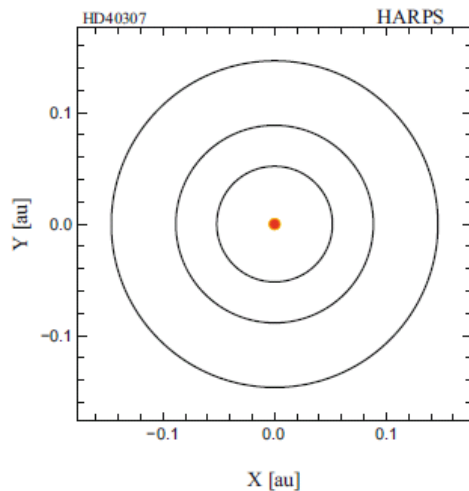
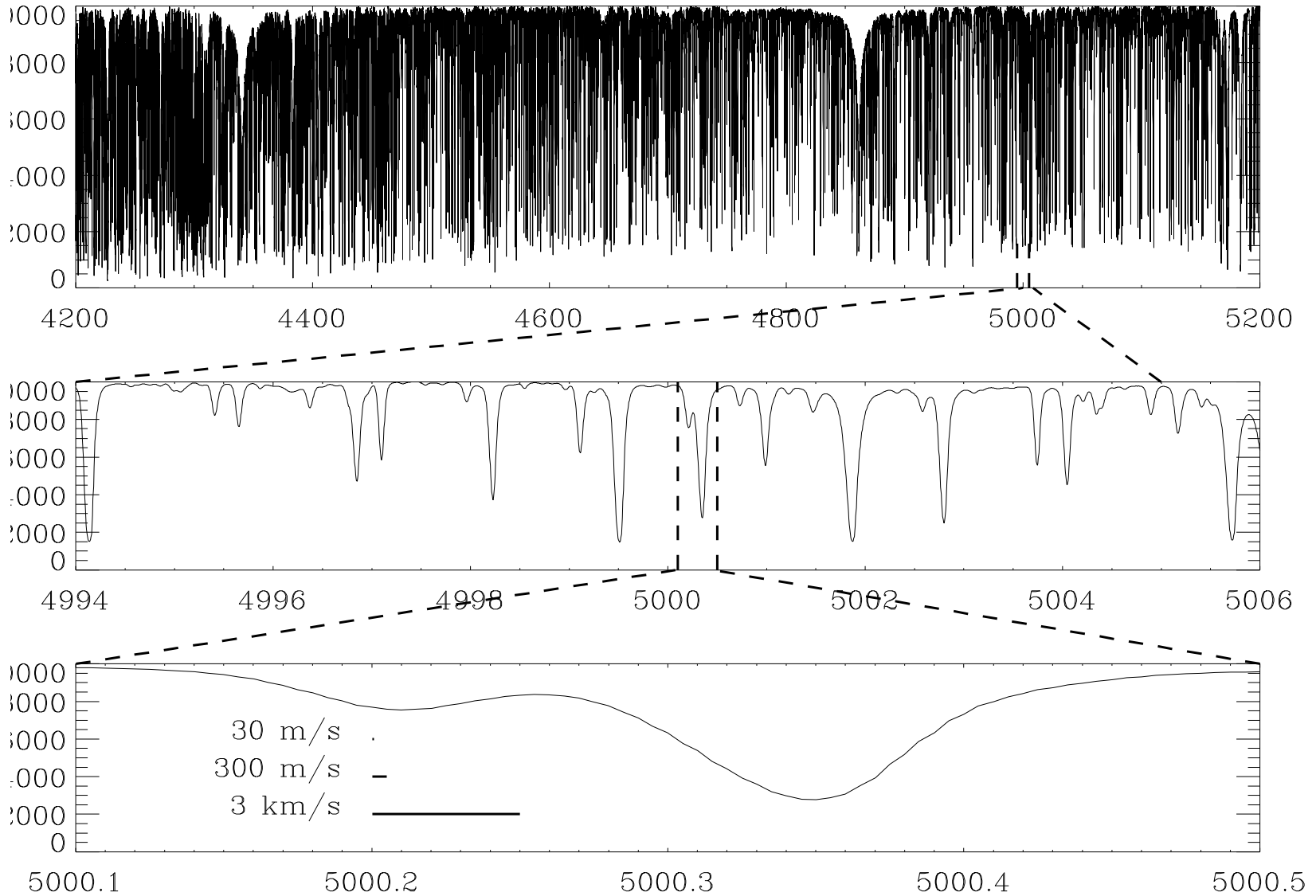


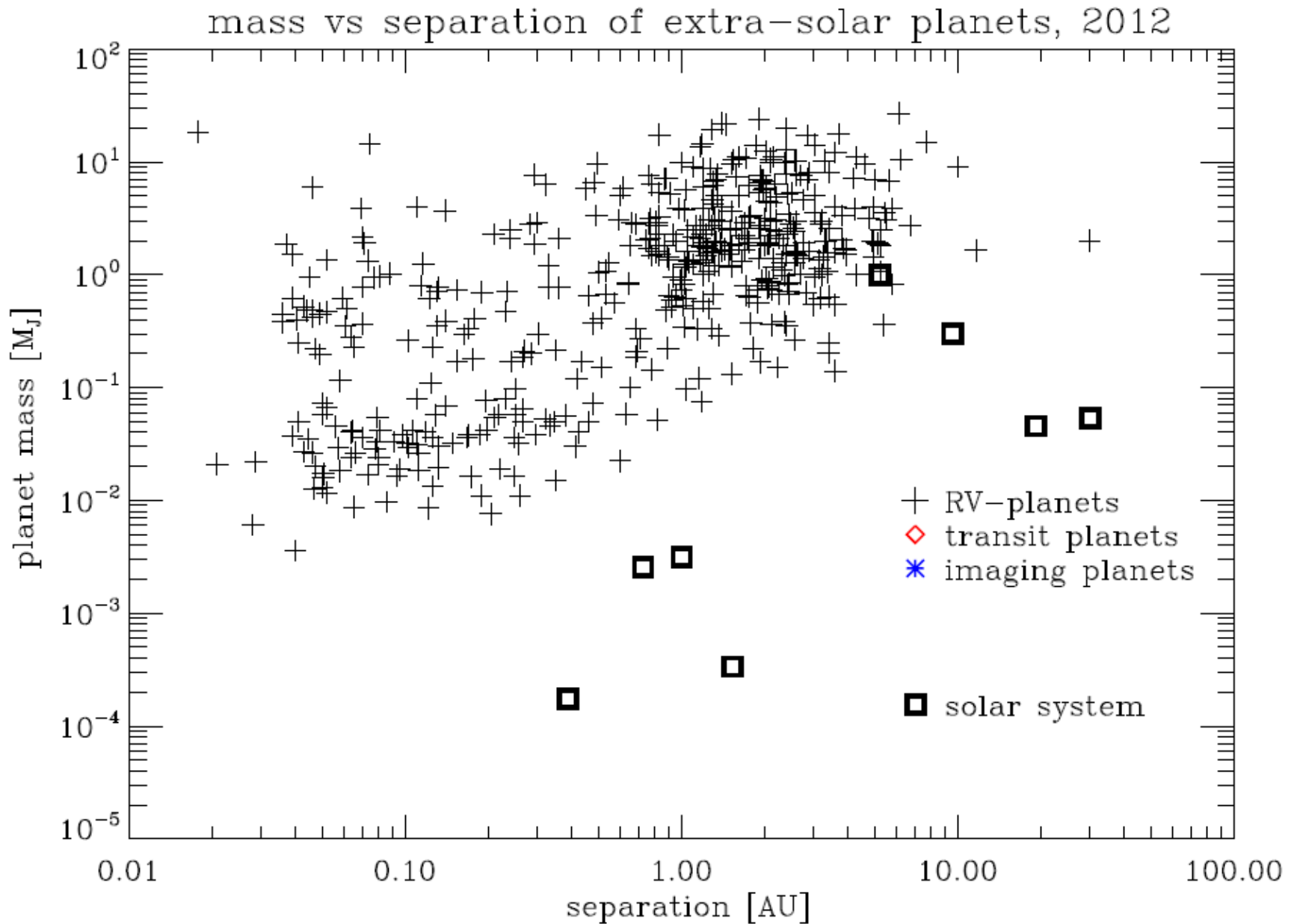
Fig. 4. Pole-on sketch of the 3 circular planetary orbits at the centre of the HD 40307 system.

Parameter		HD 40307 b	HD 40307 c	HD 40307 d
P	[days]	4.3115 ± 0.0006	9.620 ± 0.002	20.46 ± 0.01
T	[JD-2 400 000]	$54\,562.77 \pm 0.08$	$54\,551.53 \pm 0.15$	$54\,532.42 \pm 0.29$
e		0.0	0.0	0.0
ω	[deg]	0.0	0.0	0.0
K	[m s ⁻¹]	1.97 ± 0.11	2.47 ± 0.11	4.55 ± 0.12
V	[km s ⁻¹]		31.332	
drift	[m s ⁻¹ /yr]		0.51 ± 0.10	
$f(m)$	[10 ⁻¹⁴ M_{\odot}]	0.35	1.53	3.59
$m_2 \sin i$	[M_{\oplus}]	4.2	6.9	9.2
a	[AU]	0.047	0.081	0.134
N_{meas}			135	
Span	[days]		1628	
σ (O-C)	[ms ⁻¹]		0.85	
χ^2_{red}			2.57	

Radial velocity measurements and the absorption lines in the solar spectrum

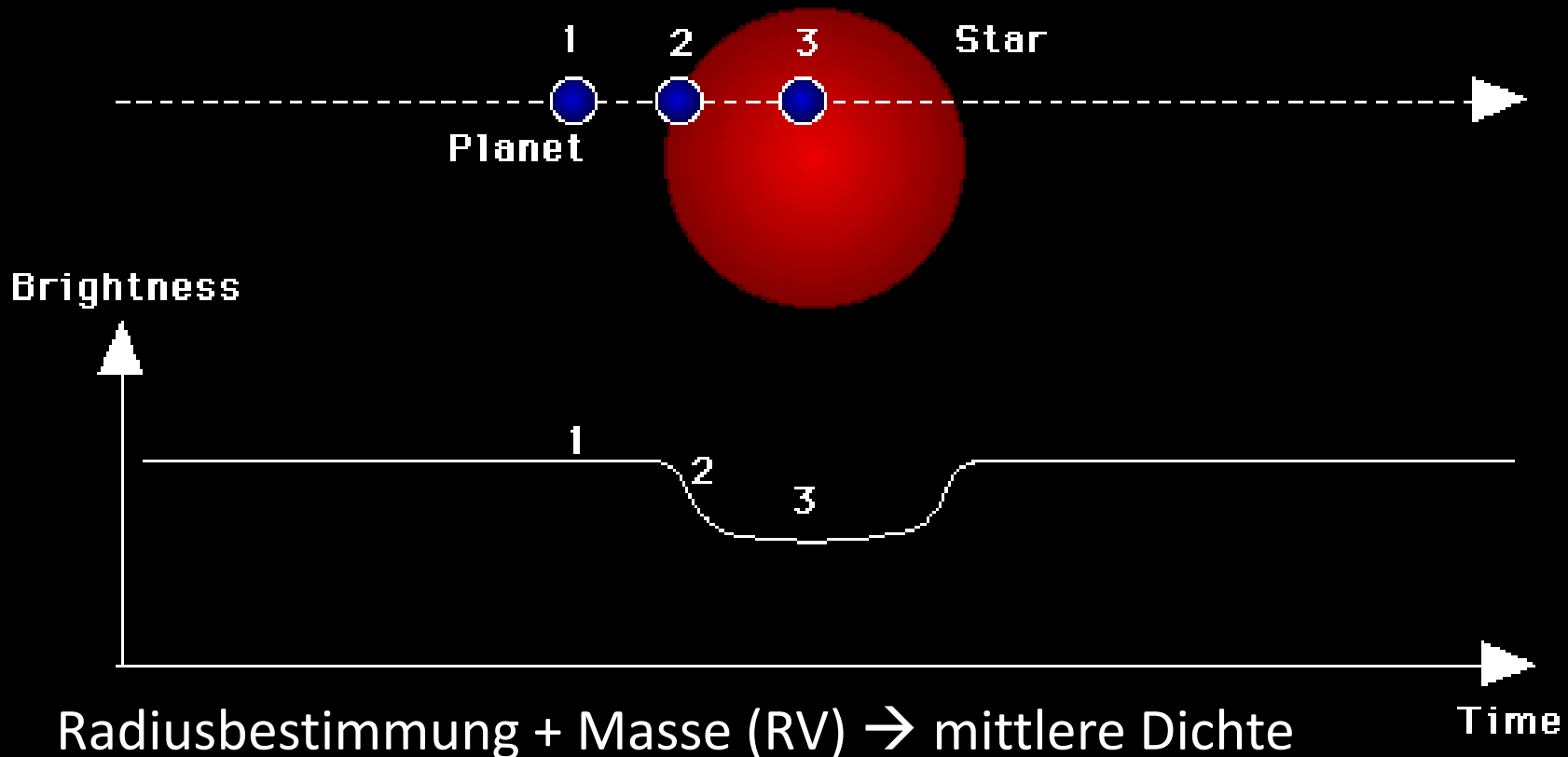


Masse-Separation für Planeten

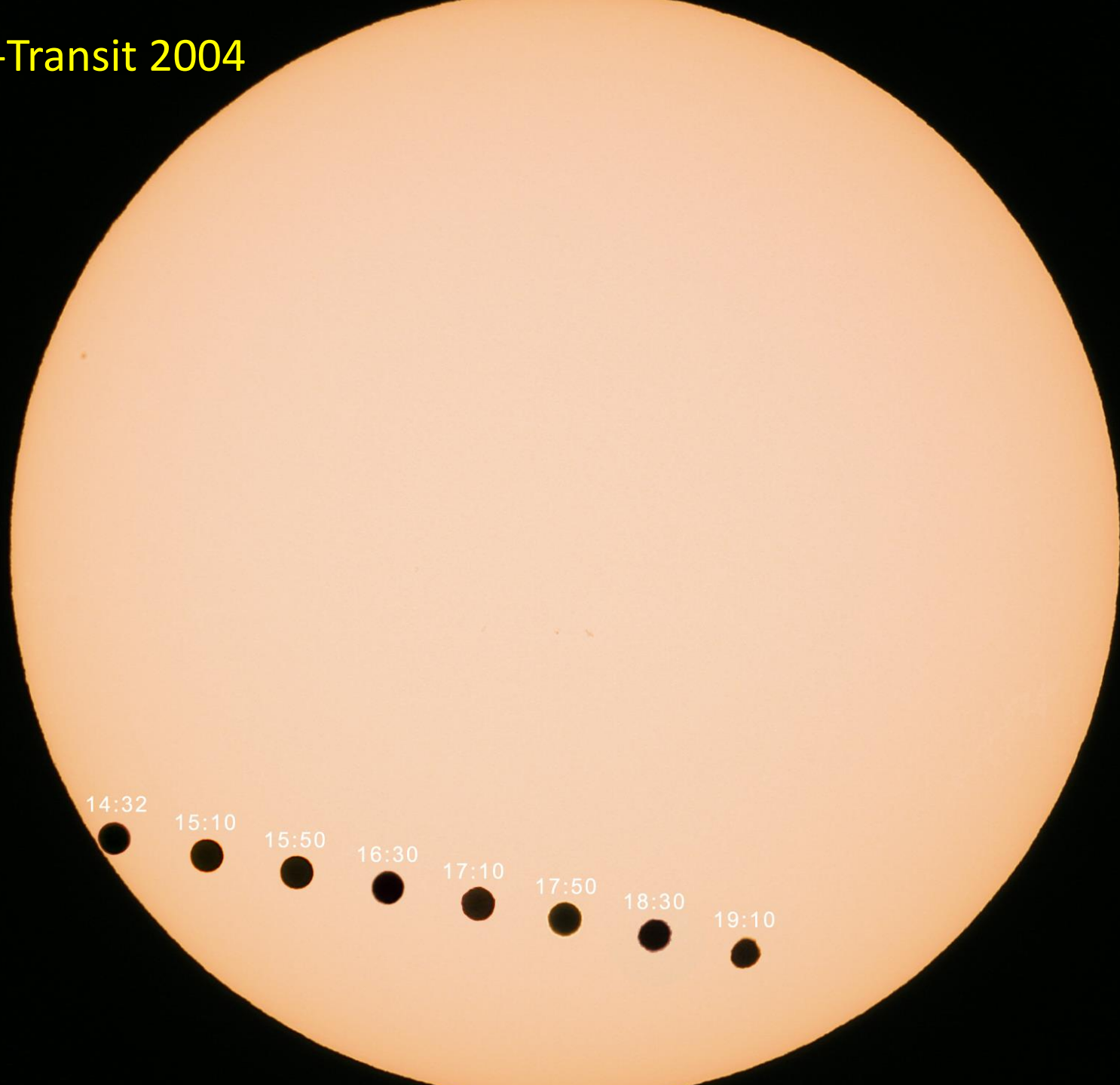


Indirekte Methode: Planetentransits

periodischen Transits ($\sim 0.01\%$ - 1% Effekt in der Lichtkurve)



Venus-Transit 2004



14:32

15:10

15:50

16:30

17:10

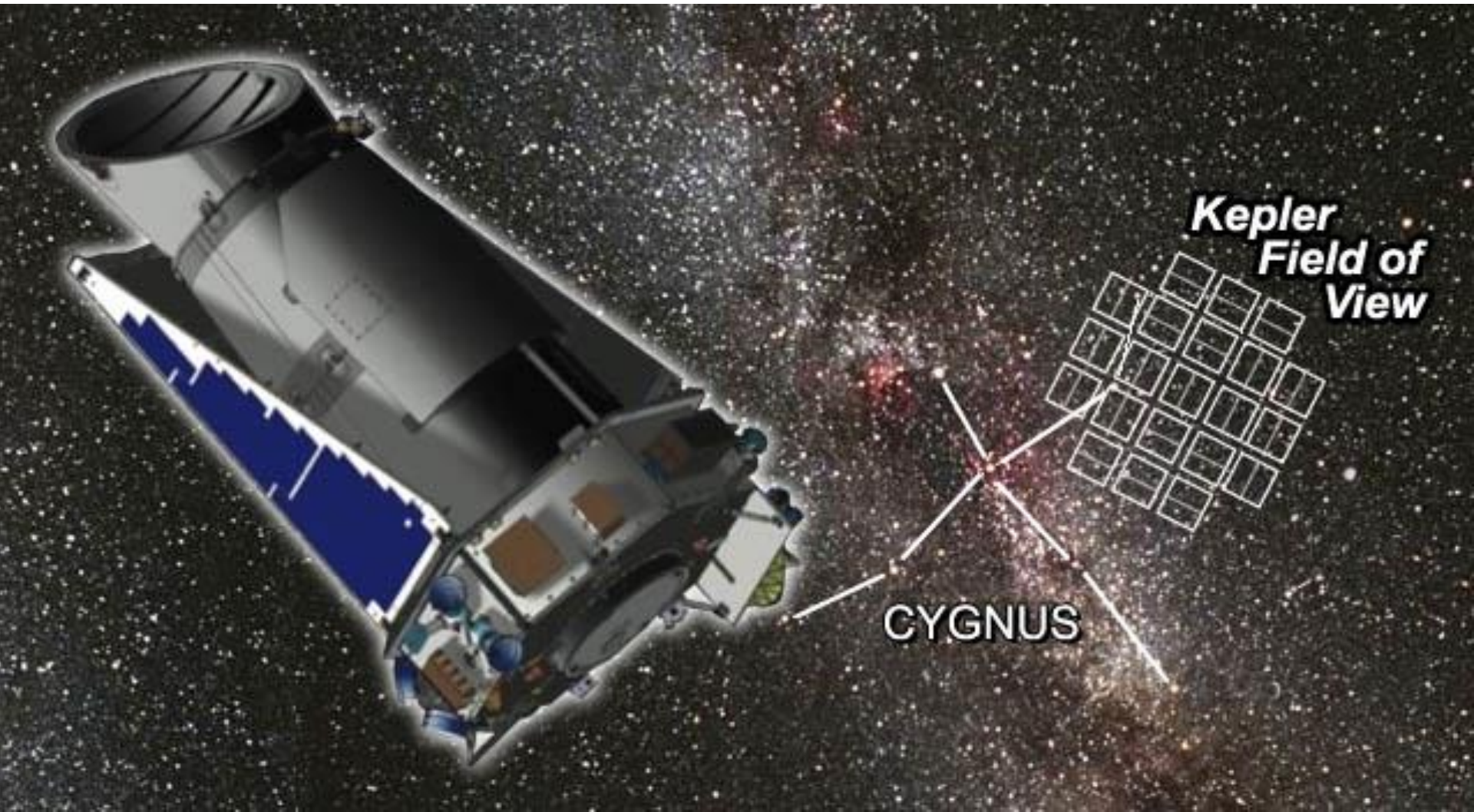
17:50

18:30

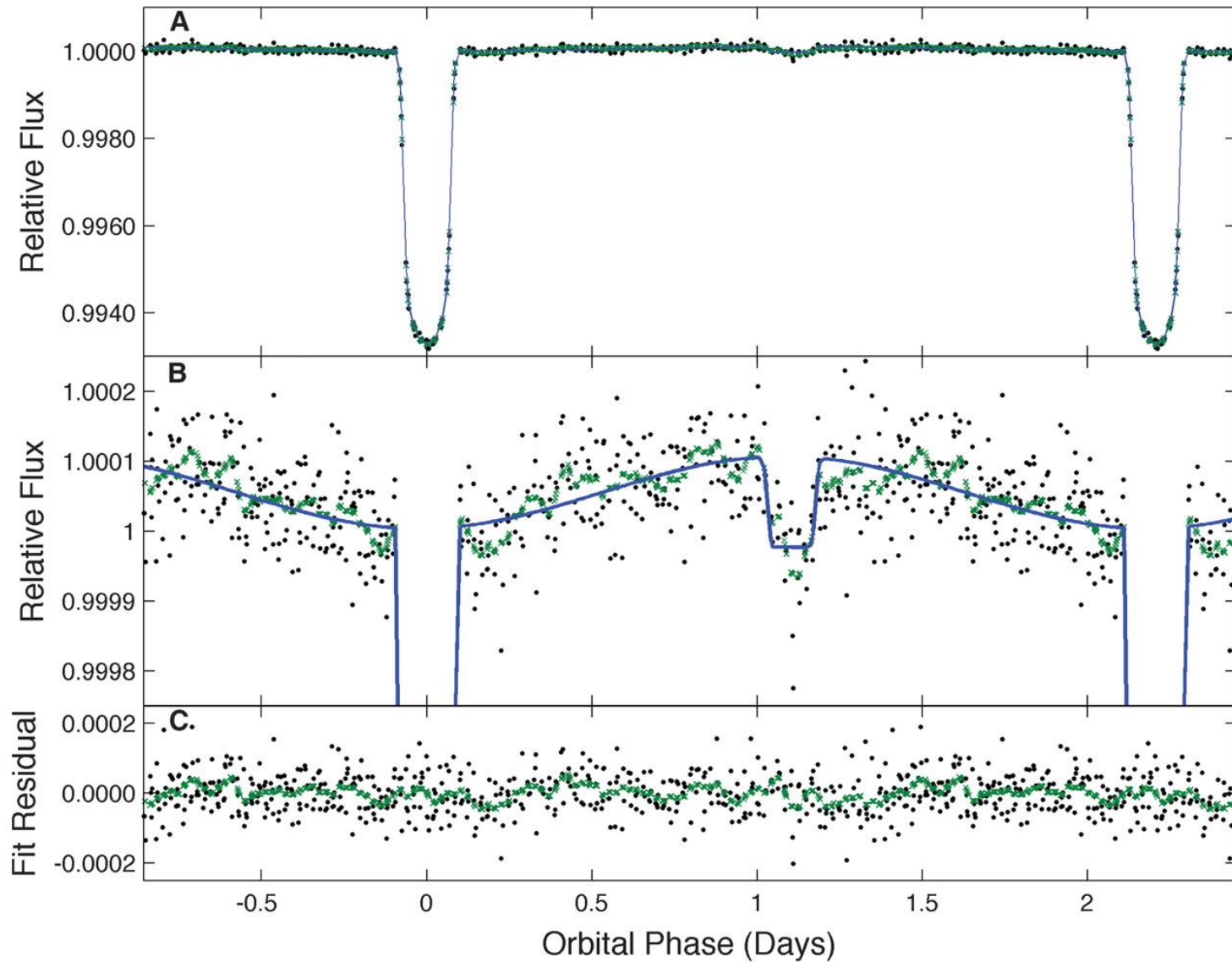
19:10

Revolution in den letzten 5 Jahren:

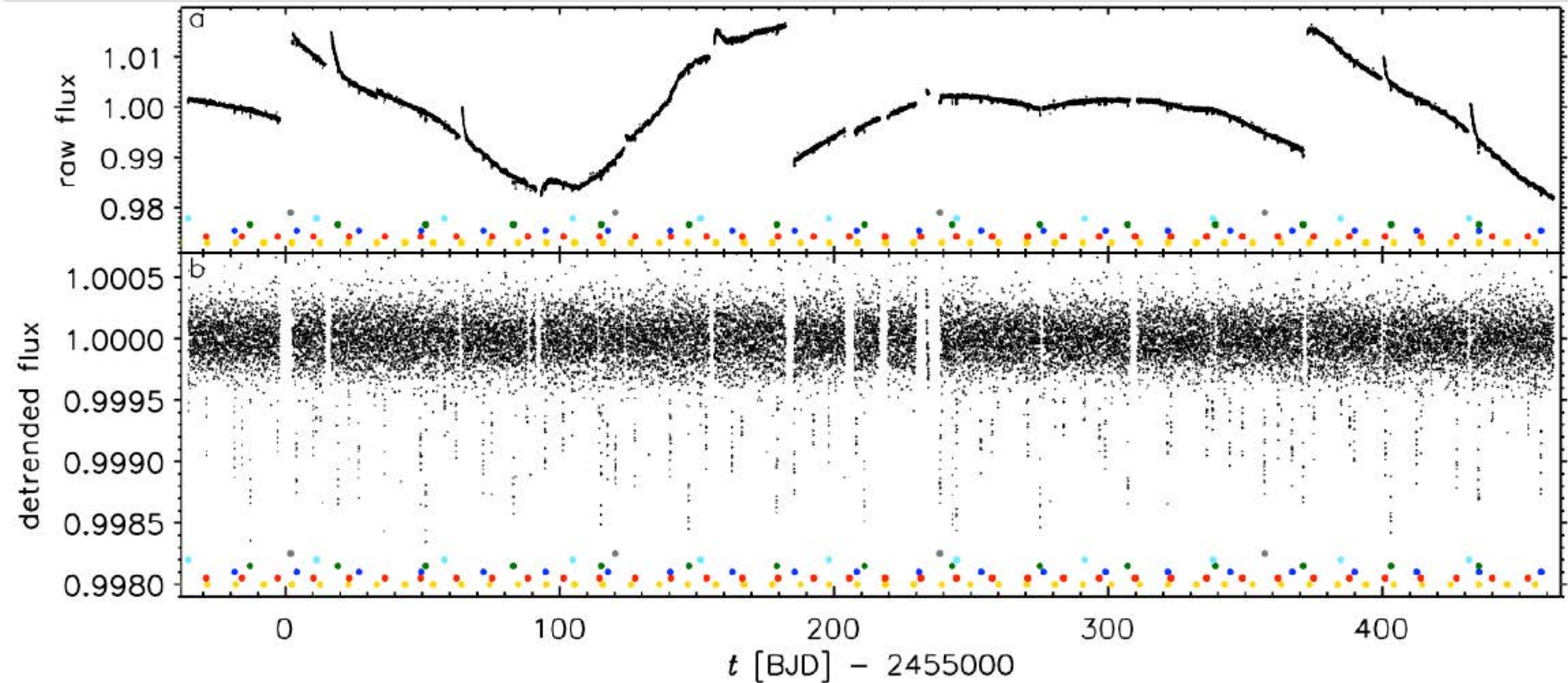
**Kepler-Satellit untersucht ca. 150000 Sterne
→ findet mehr als 3000 Planeten-Kandidaten**



HAT-P-7 b Transit beobachtet mit dem Kepler-Satellit

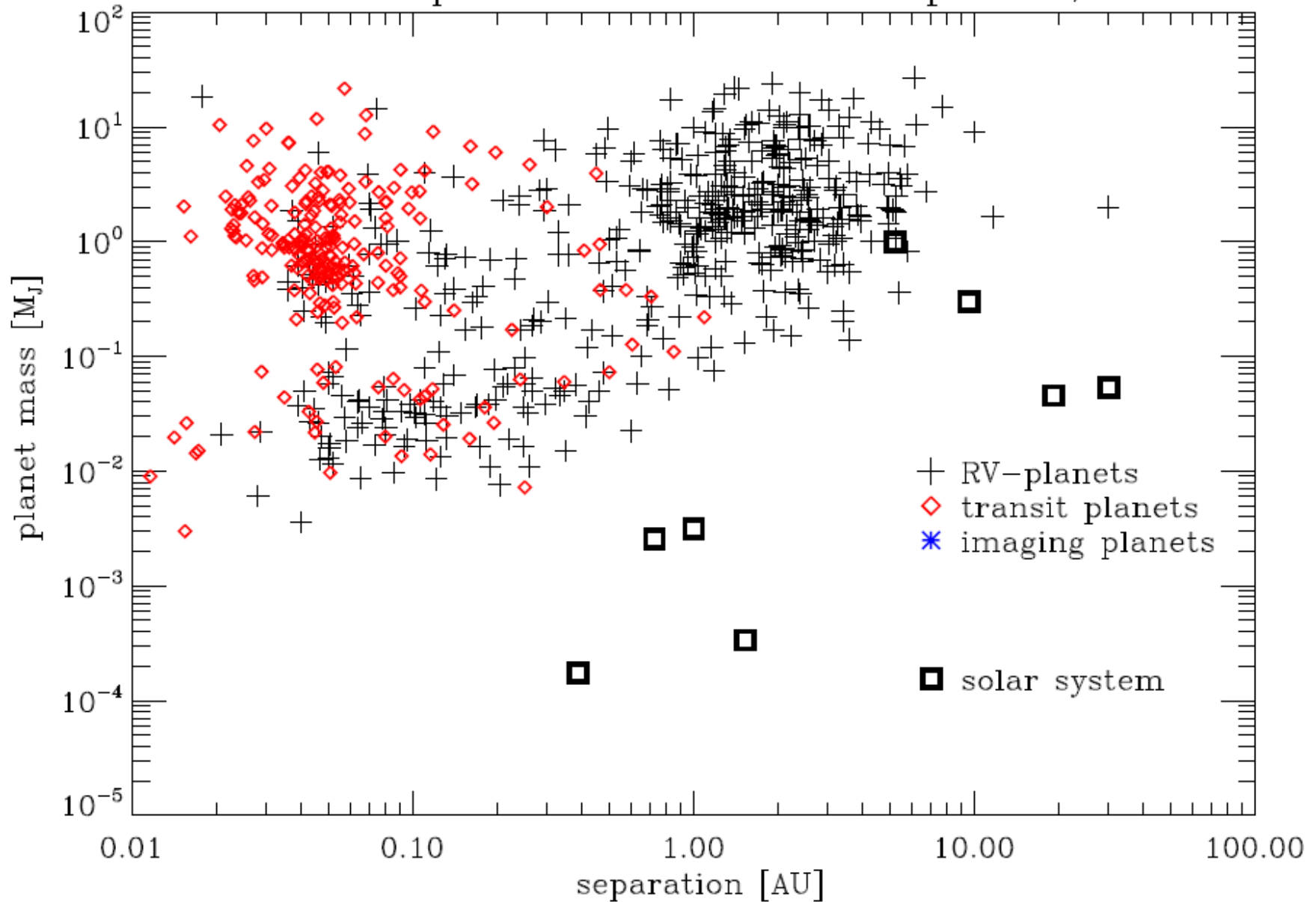


Kepler-11: 6 transiting planets

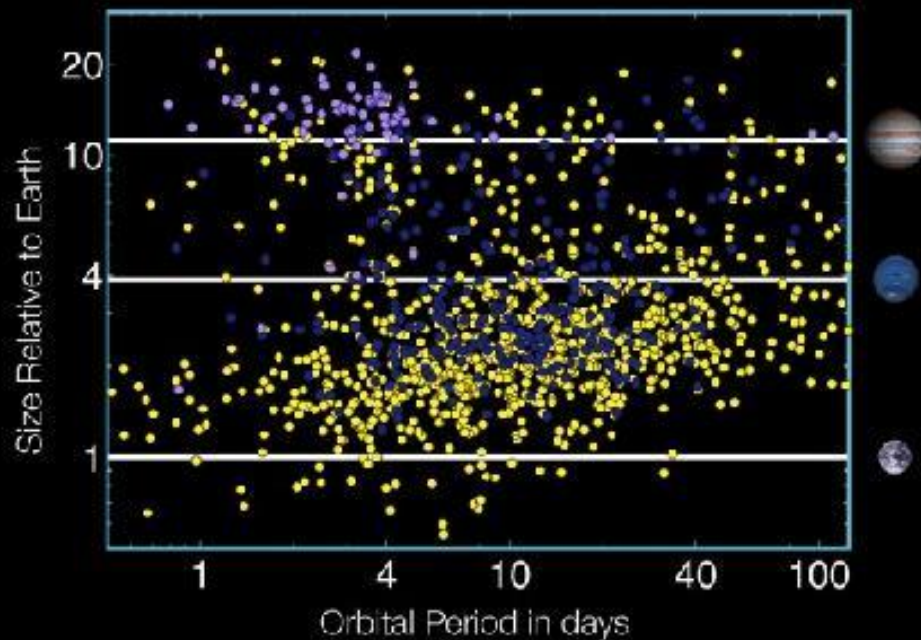


Masse-Separation für Planeten

mass vs separation of extra-solar planets, 2012



Kepler Candidates as of February 1, 2011



Kepler findet:

- Planeten sind sehr häufig (**es gibt mehr Planeten als Sterne!**)
- jeder 3. Stern hat eine Planeten $>$ als 2 Erdradien
- Systeme mit vielen Planeten sind häufig (wo es Platz hat, sind Planeten)
 - **es gibt viele Planeten in der bewohnbaren Zone**
- heiße Gasriesen sind einsam – sie haben Planetensystem ge(zer)stört

Gibt es Leben da draussen?

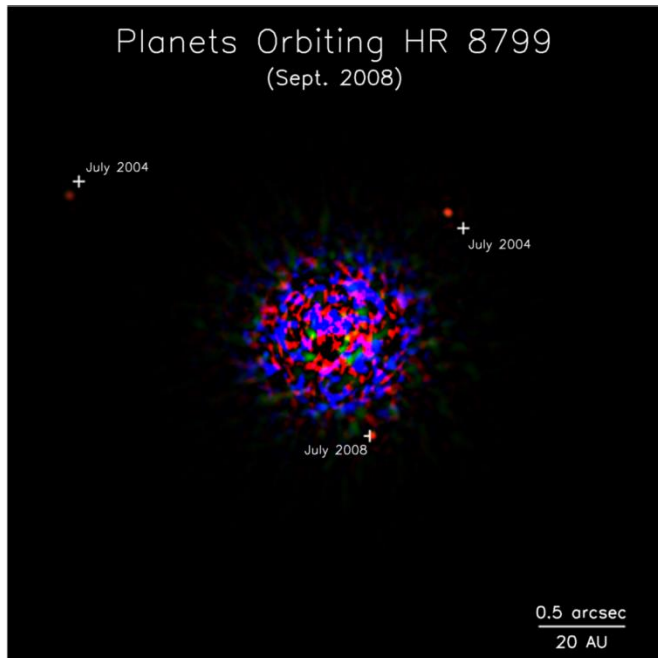
1. Eine Reise durch unser Sonnensystem
2. Die Suche nach extra-solaren Planeten
3. Die direkte Abbildung von Planeten

Junge Gasplaneten

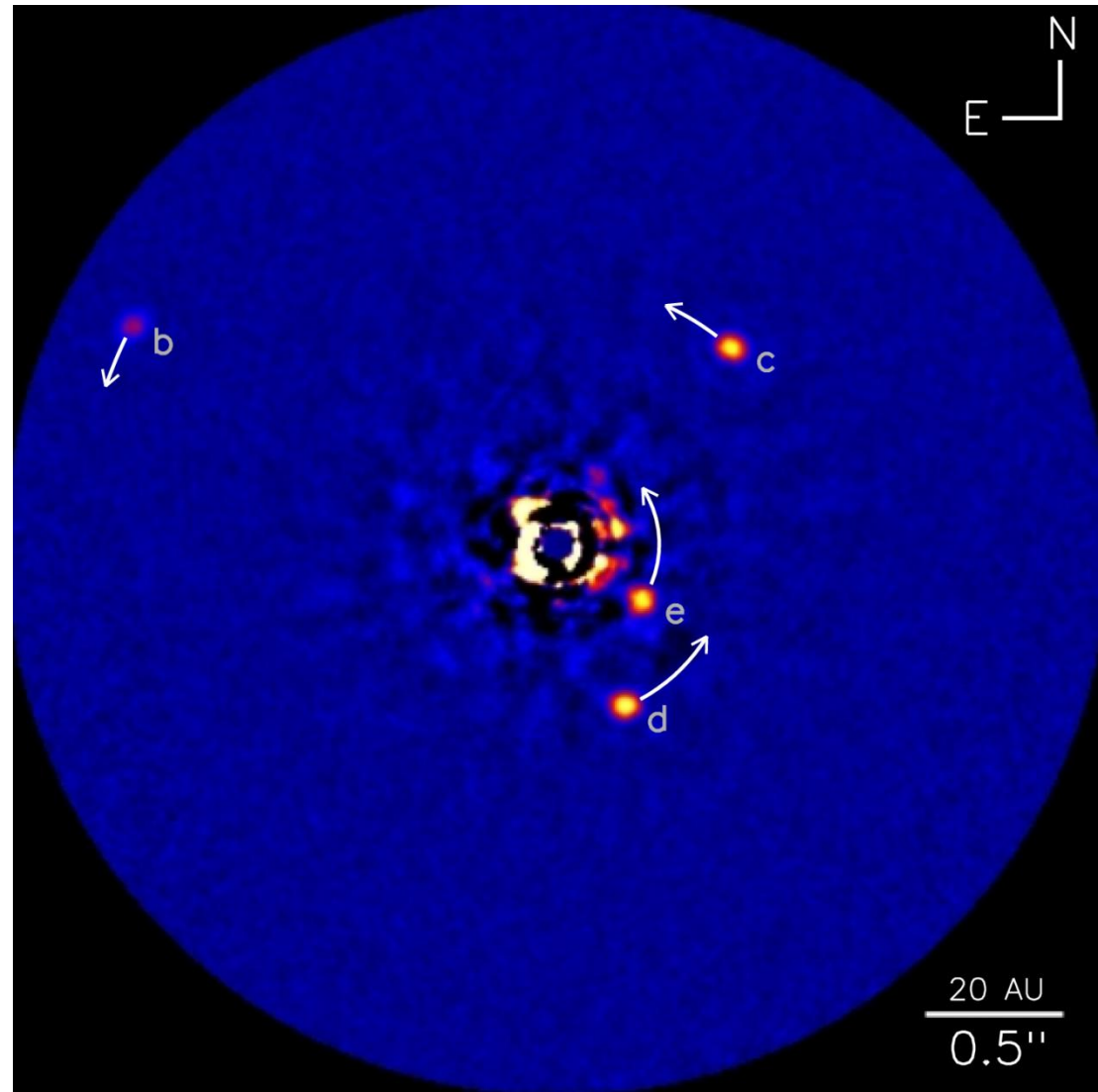
- erst vor $\sim 10 - 100$ Mio Jahren entstanden
 - befinden sich immer noch in einem starken Schrumpfprozess
- deshalb leuchten sie
- sind viel leichter zu finden
(“nur” 10 000 mal schwächer als Stern)

Problem: es gibt nur wenige junge Sterne mit jungen Planeten in der Sonnenumgebung.

Erste erfolgreiche Abbildungen (~10 Planeten in 7 Systemen)



2008



2010

Das SPHERE - VLT Planet Finder Projekt



2002 – 2014

ca. 50 Pers. F, I, CH, D, NL

250 Arbeitsjahre, 10 Mio E

Members



ETH zürich



Fore optics

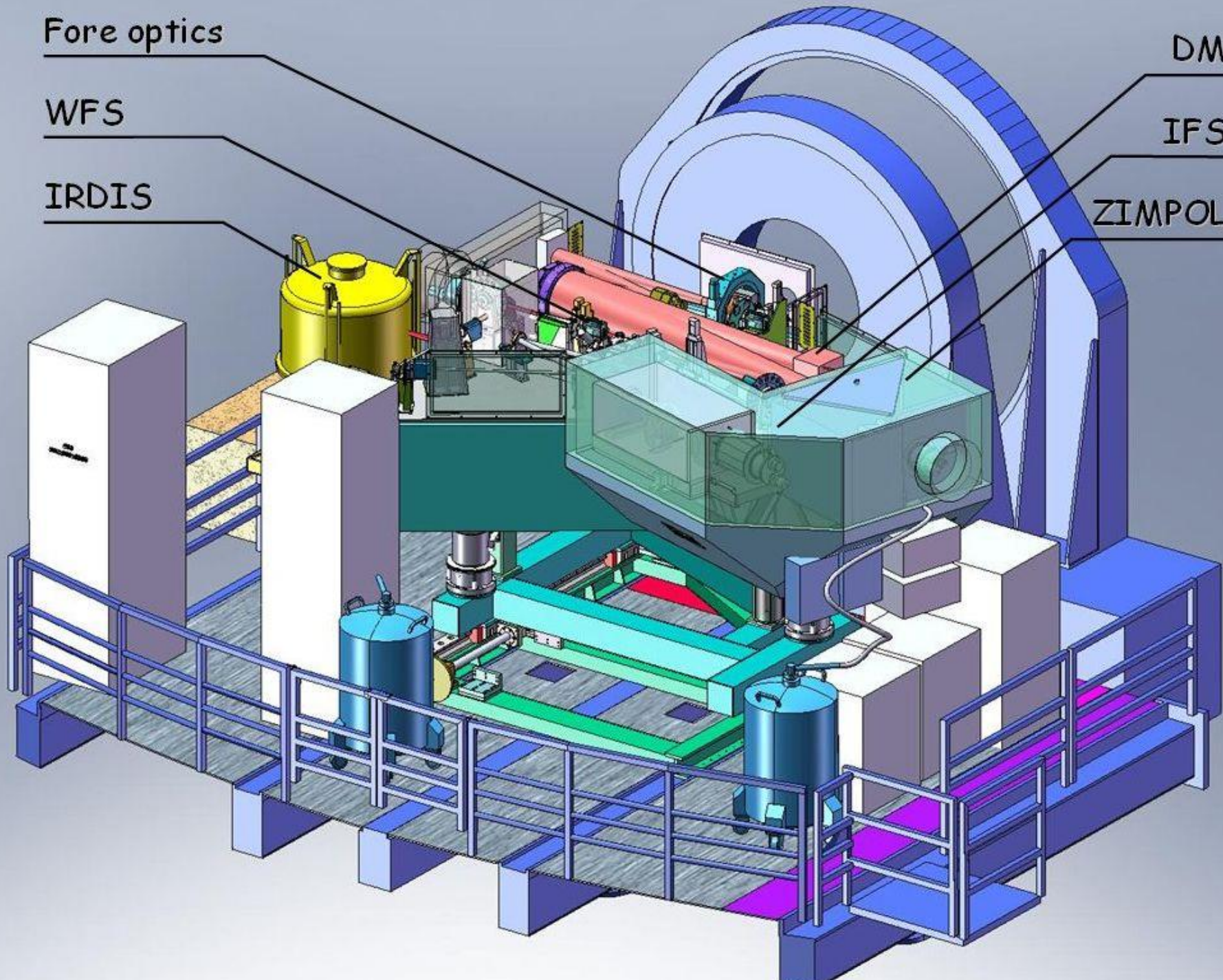
WFS

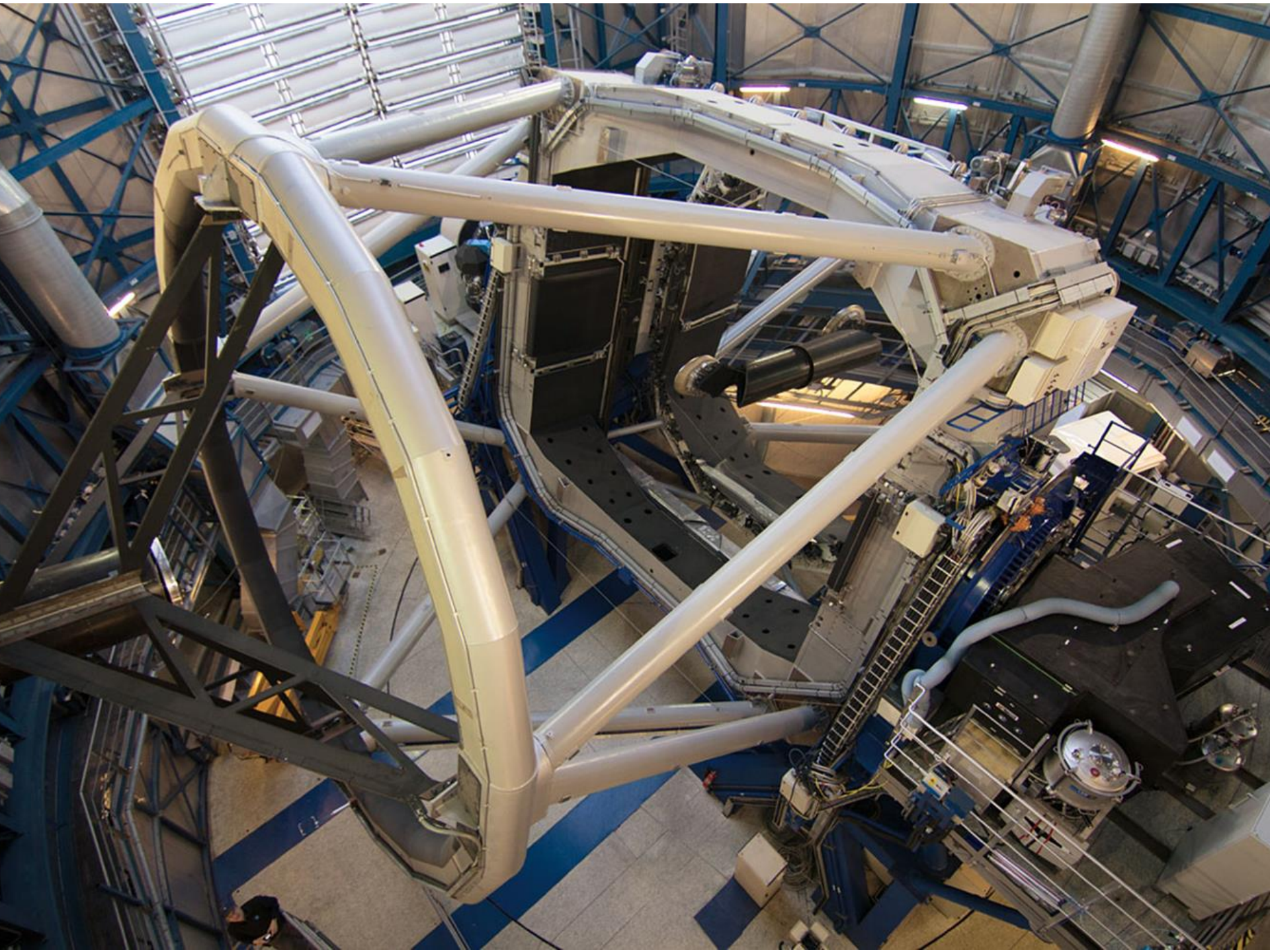
IRDIS

DM

IFS

ZIMPOL

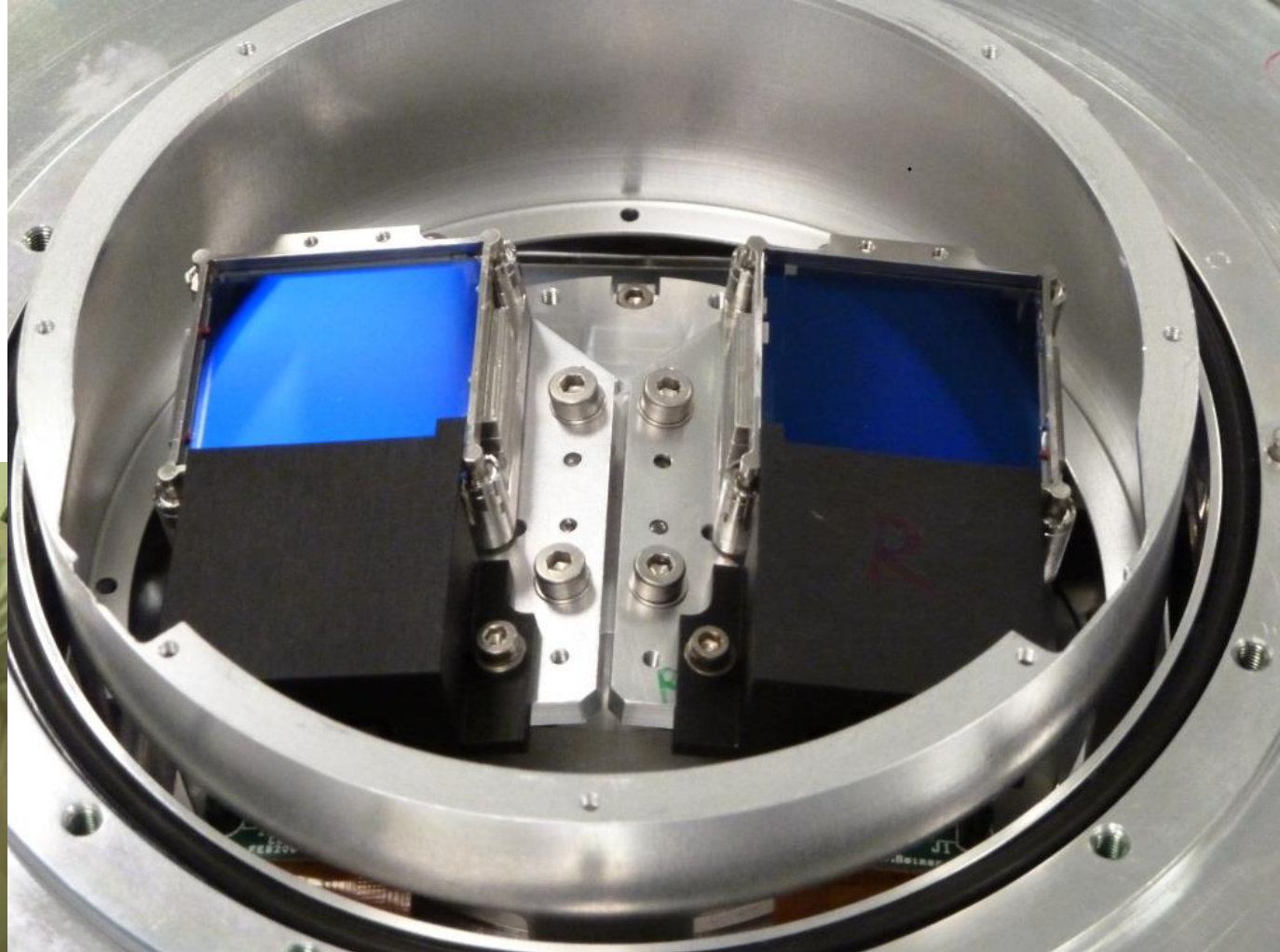
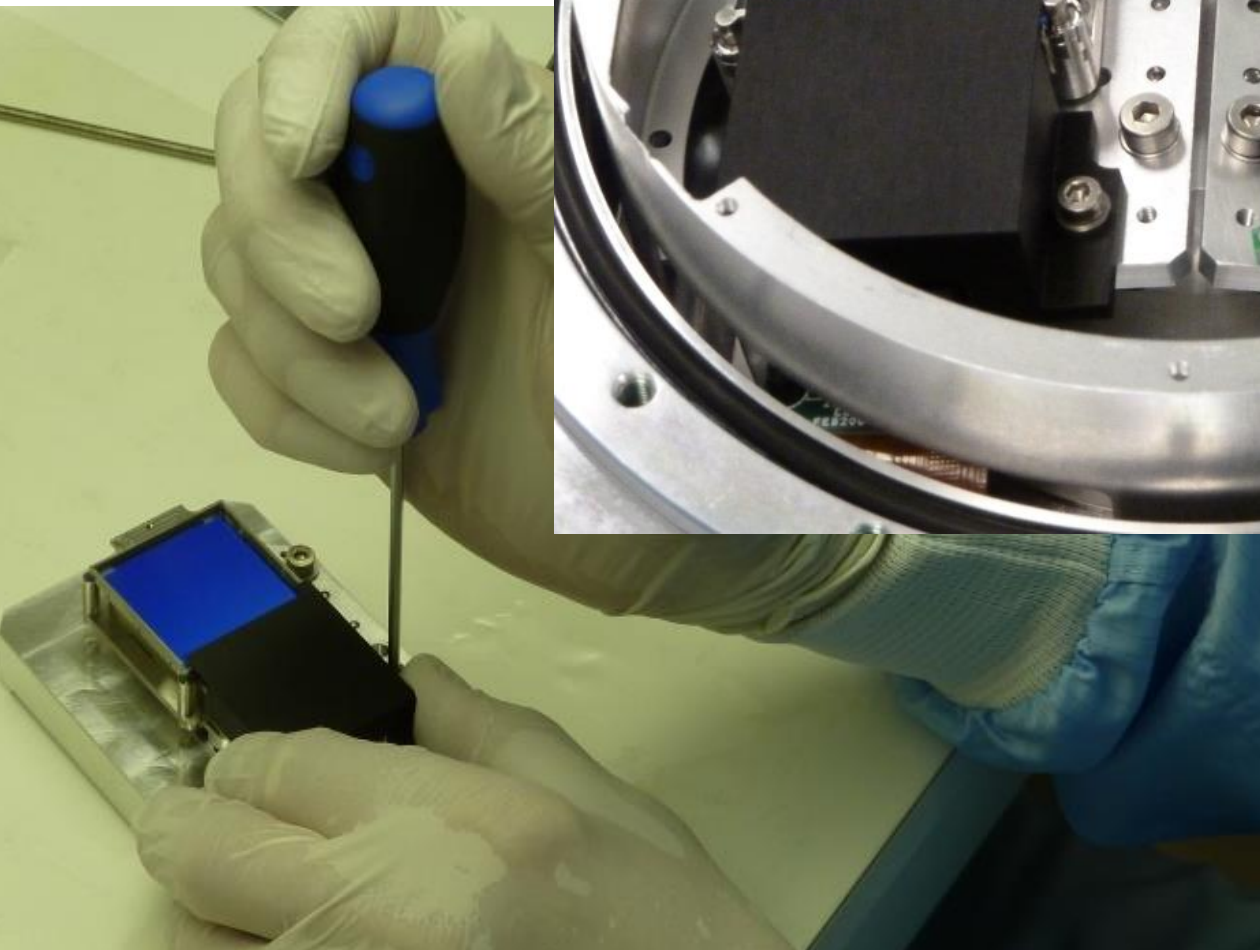






DANGER
DO NOT STAND NEAR THE RAILING
WHEN TELESCOPE IS TURNING
DO NOT LEAVE EQUIPMENT HIGHER
THAN 1.5 M. NEAR THE
PE

Bau von SPHERE



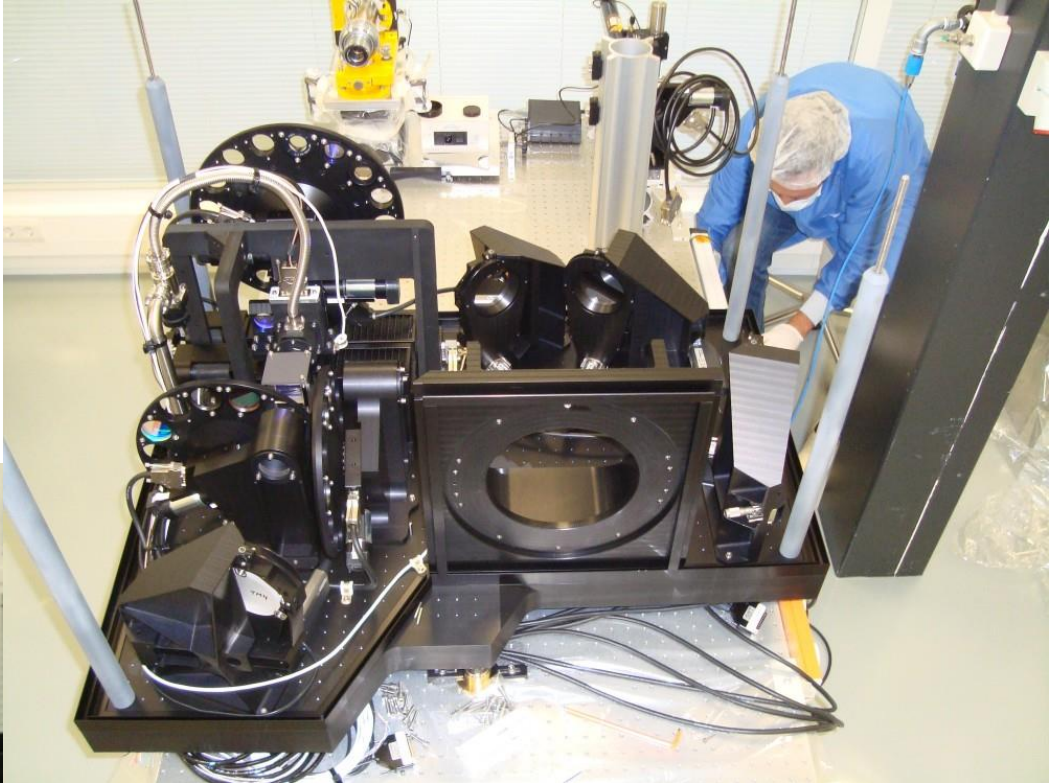
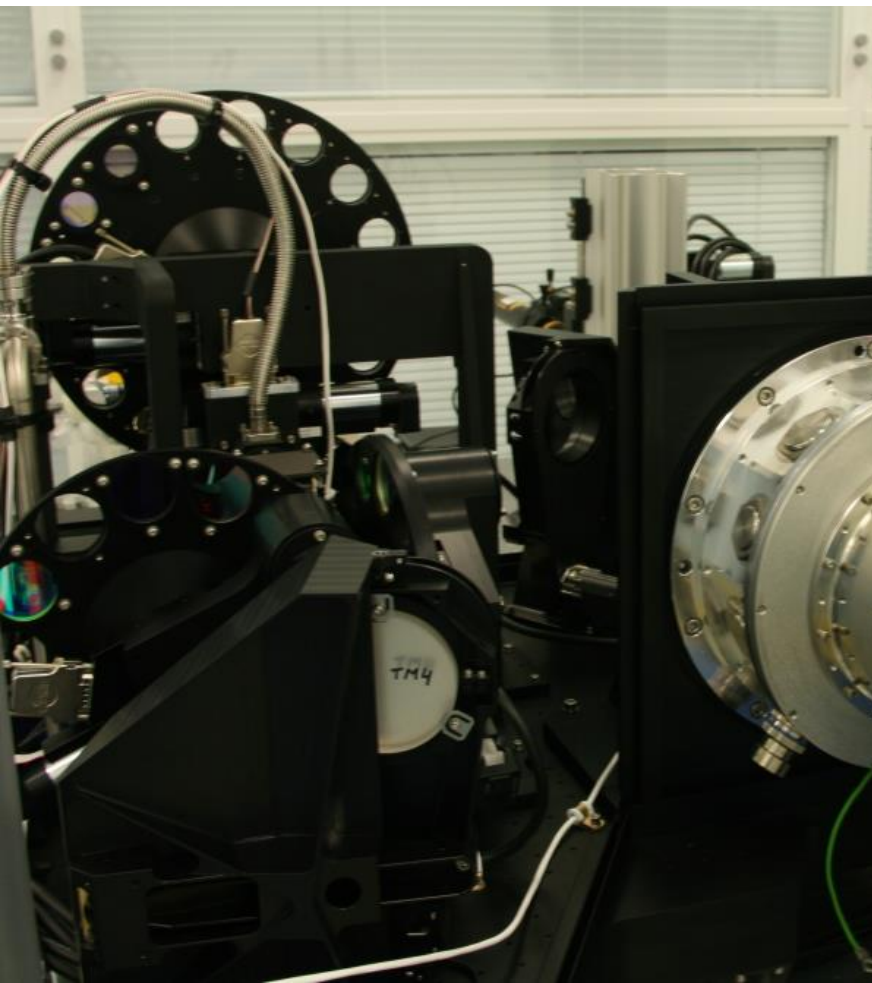




Figure 5. SPHERE in the assembly laboratory at IPAG with all instruments integrated into the common path.

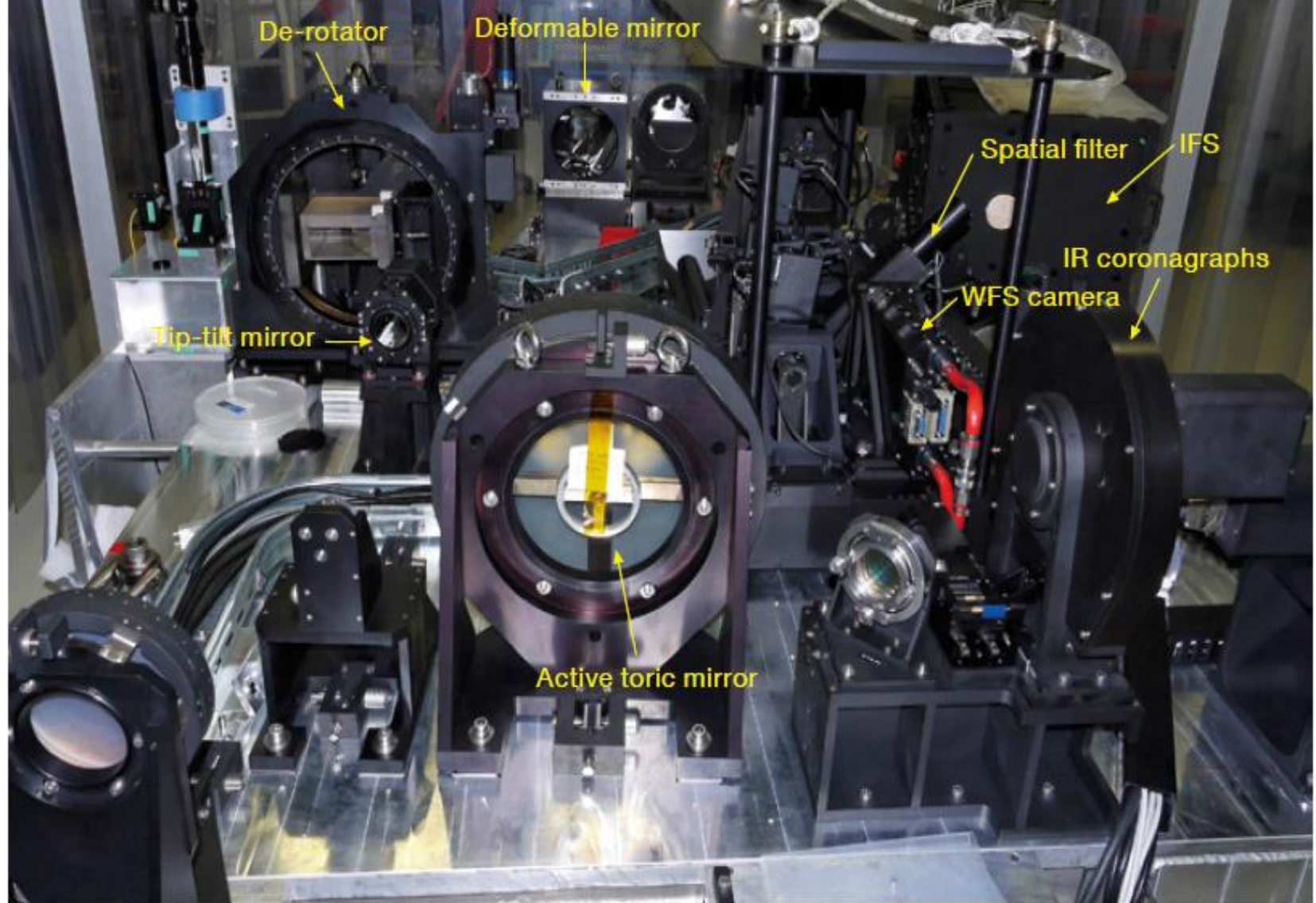
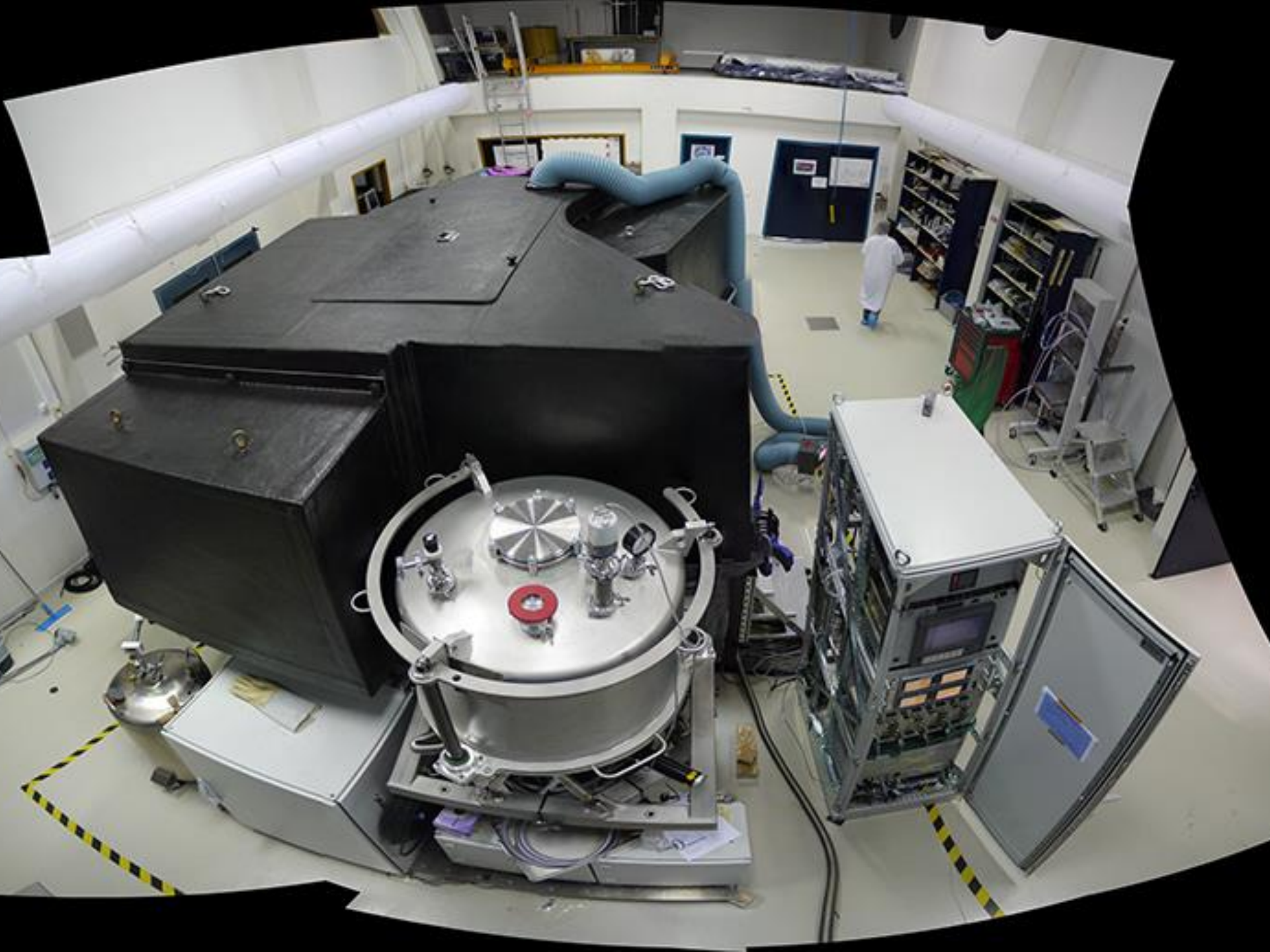
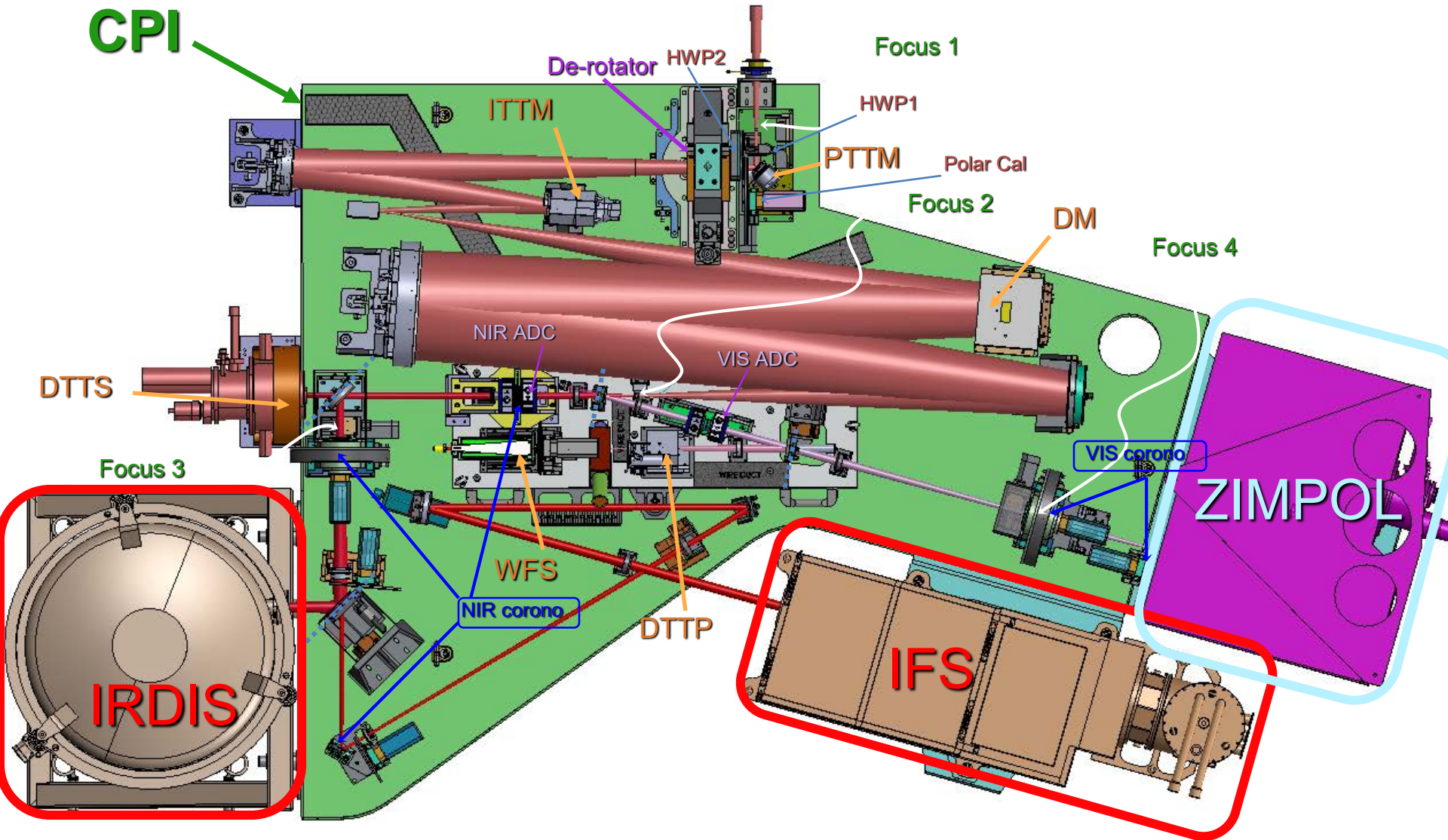


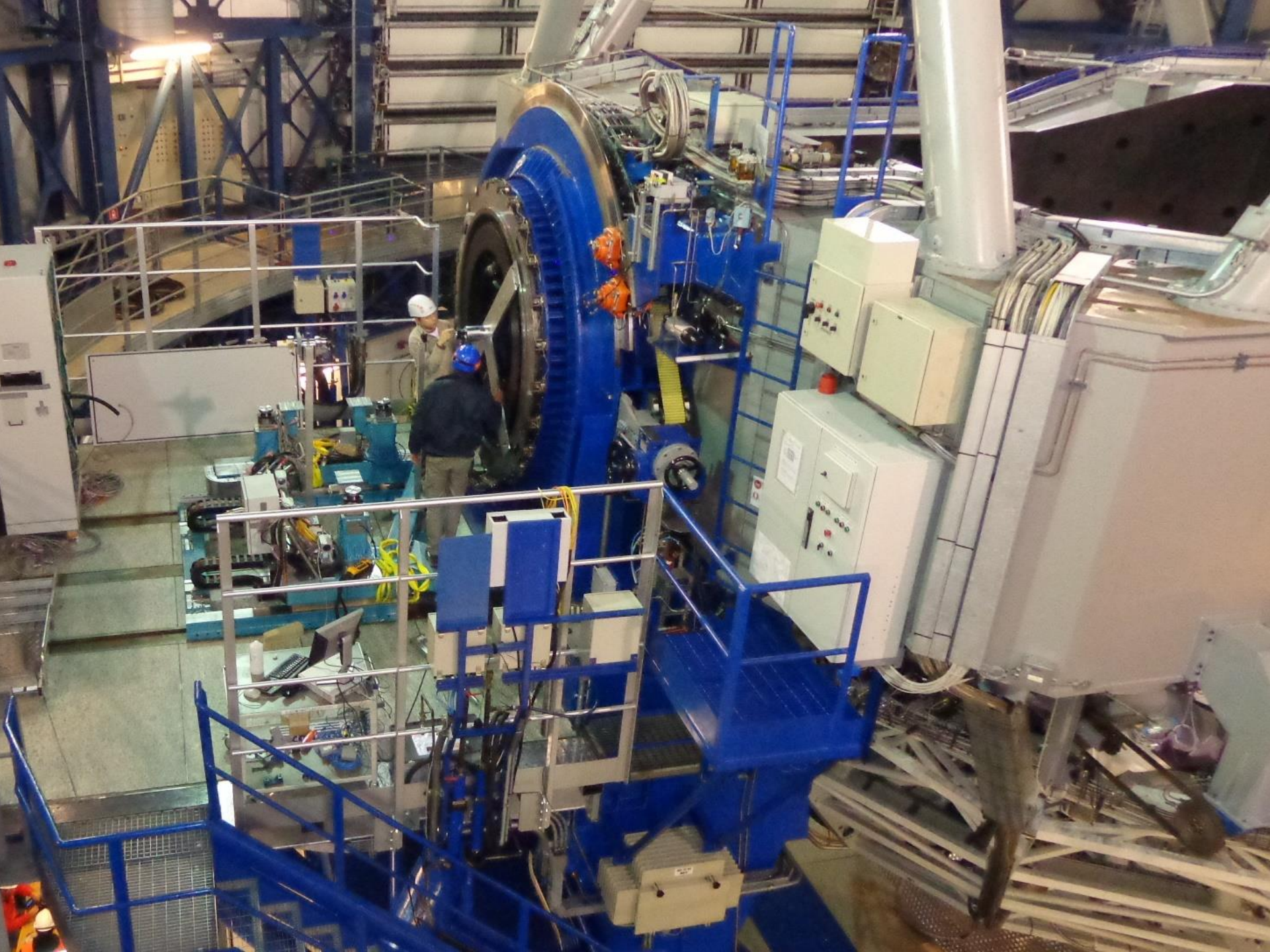
Figure 6. Detailed view of the SPHERE optical bench is shown with the main subsystems indicated. The active toric mirror, used to compensate for the HODM temperature-dependent shape-at-rest, is clearly visible in the centre foreground.



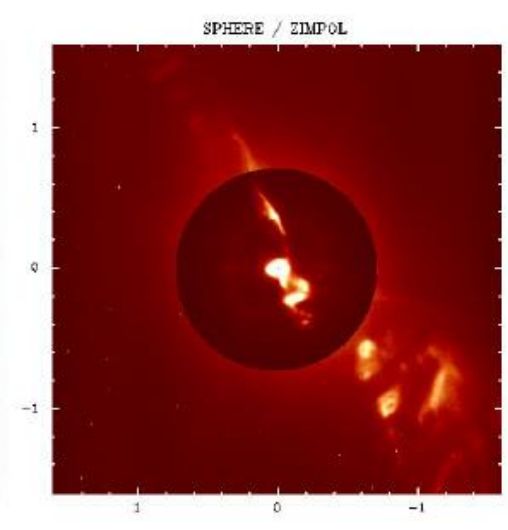
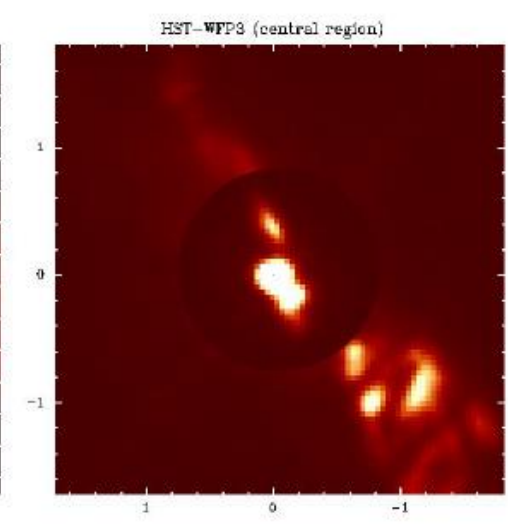
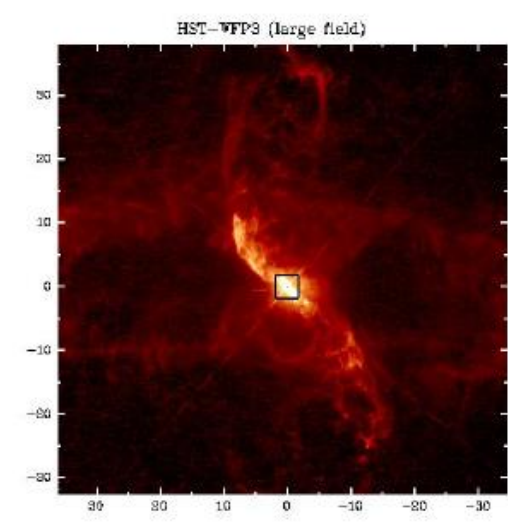
Instrument Design







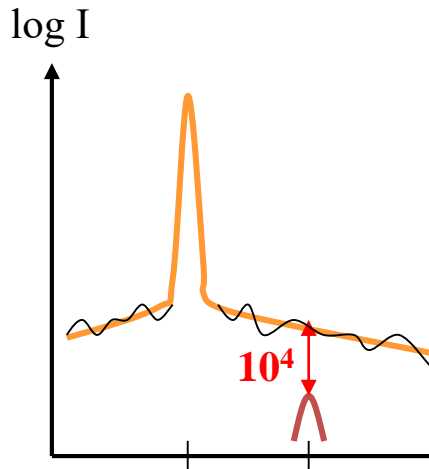
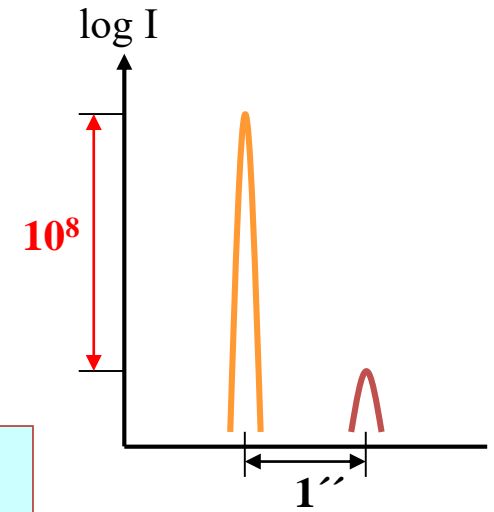
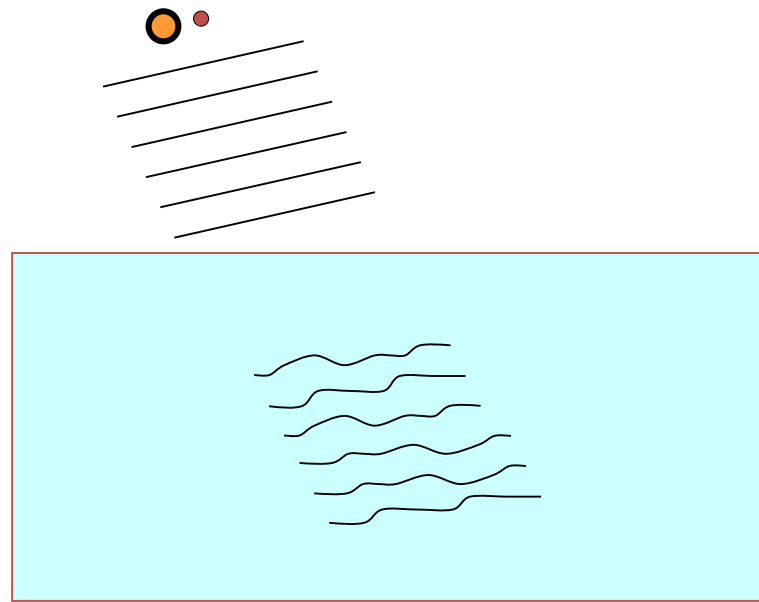




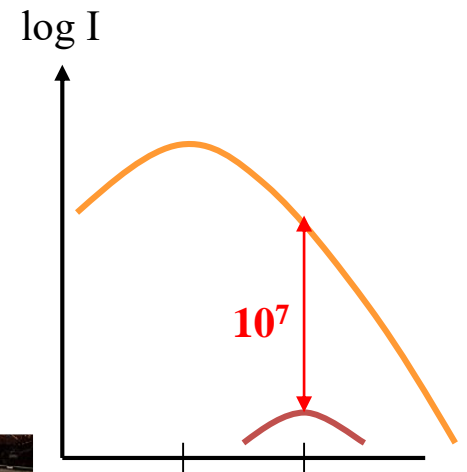


Funktionsweise von SPHERE

Beispiel: Sonne – Jupiter System (15 Lj)



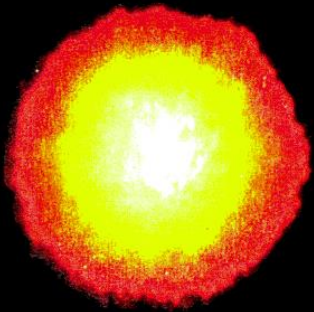
X-AO
←



schwaches Planetensignal im variablen Halo des Sterns

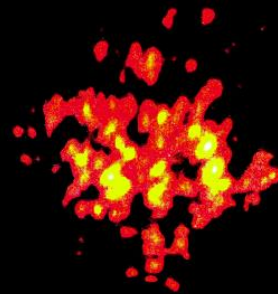


ABER:
Luftunruhe (seeing) macht alles zu Nichte



Auflösung

lange Belichtung



kurze Belichtung
0.01Sek



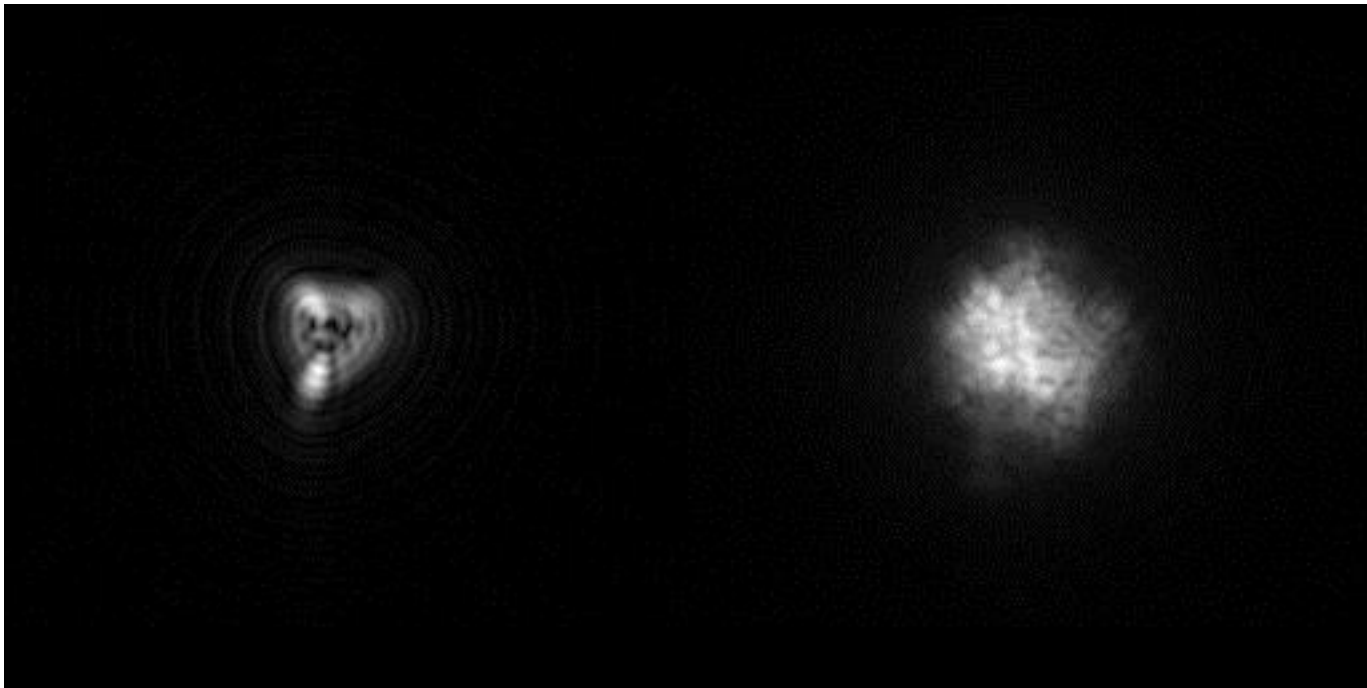
Auflösung

Luftunruhe korrigiert

Simulation der Lichtsprenkel (speckles)

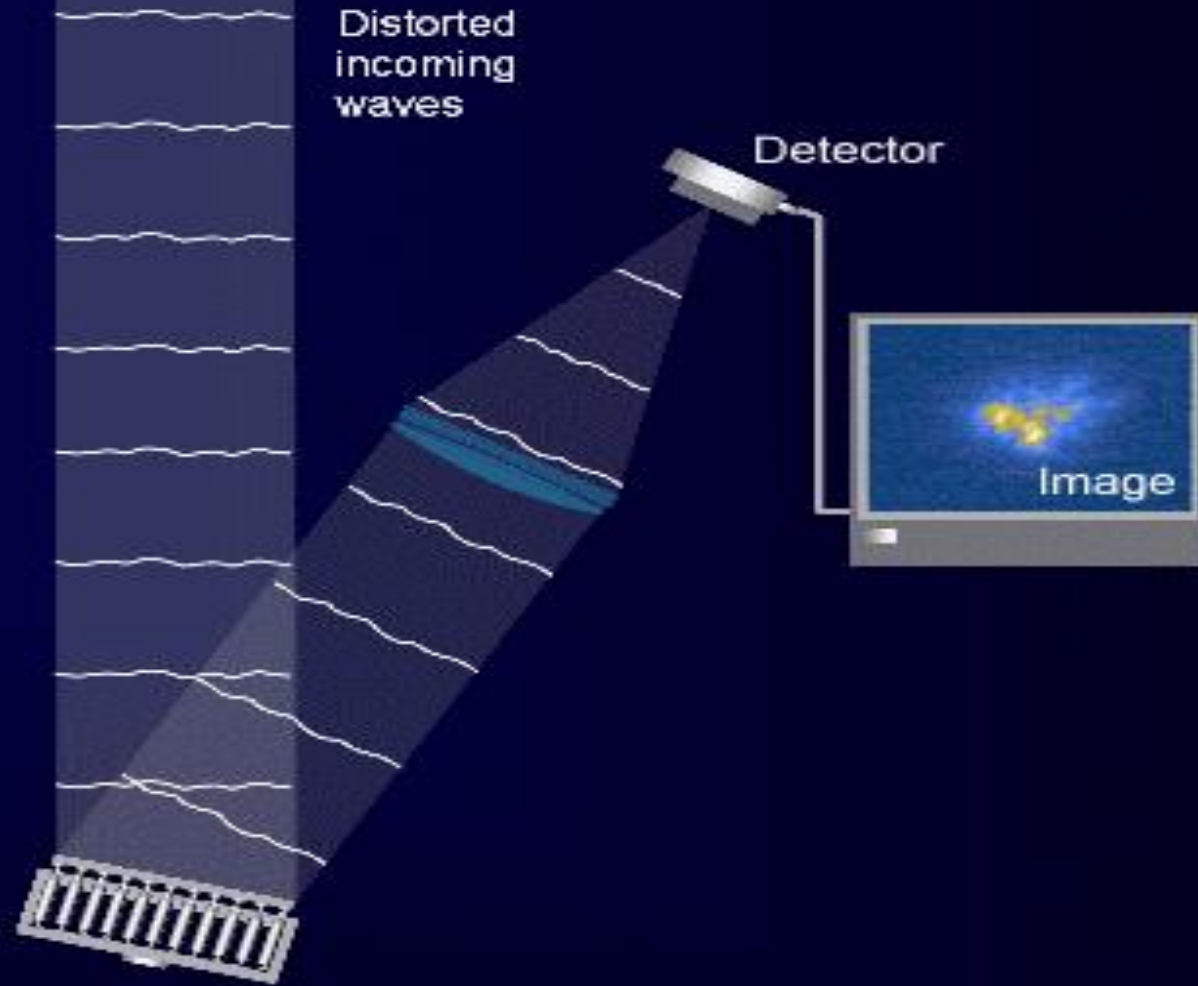
Links : Sequenz von 40 Lichtsprenkel (entsprechend 0.05 Sekunden)

Rechts: Die Summe dieser Lichtsprenkel, wie sie ein integrierender Detektor in 2 Sekunden messen würde → es entsteht ein Sternscheibchen



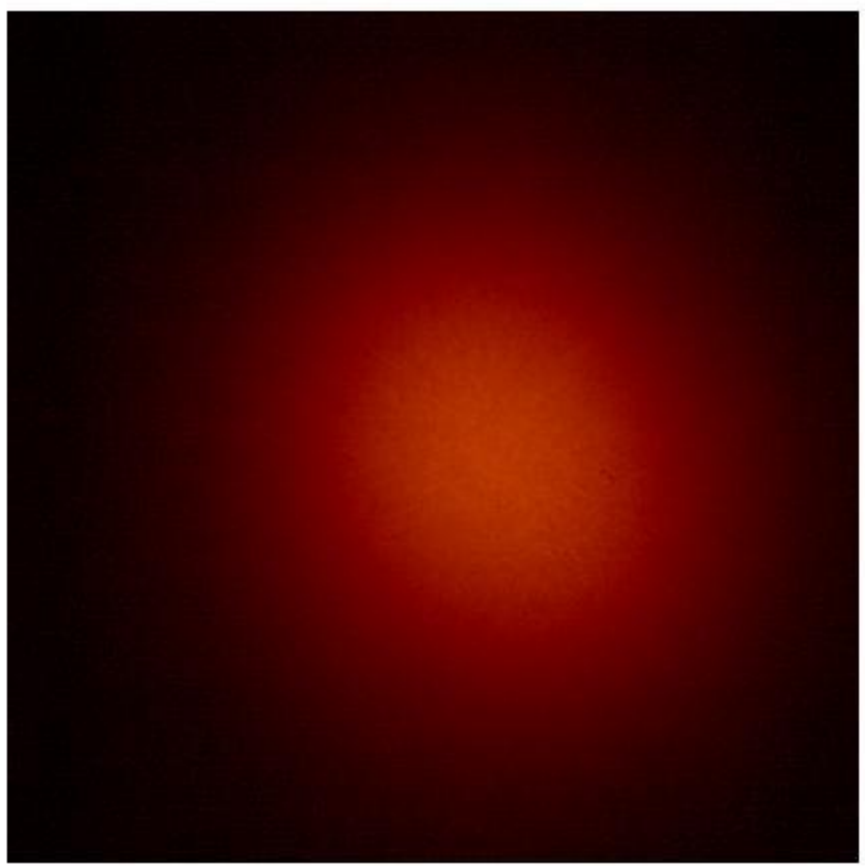
Adaptive Optik

1. Wellenfrontsensor misst die Deformation der Wellenfront durch Erdatmosphäre
2. Computer berechnet Korrektur
3. Deformierbarer Spiegel korrigiert Wellenfrontfehler



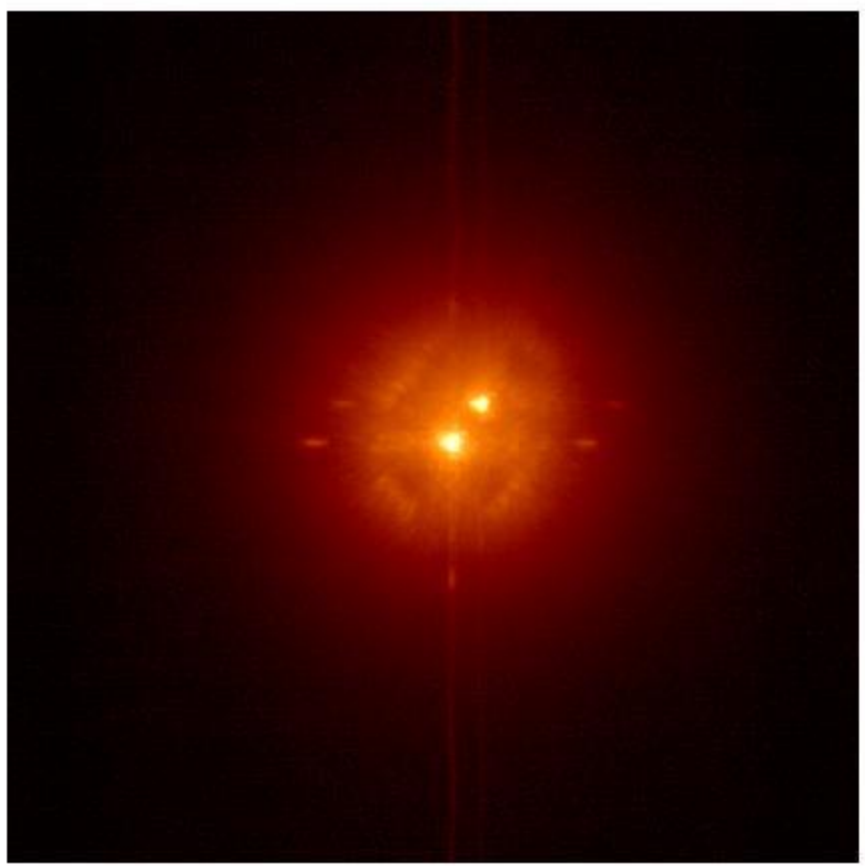


1"



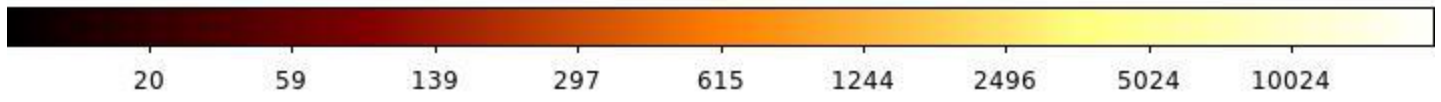
max:
240

1"



max:
53181

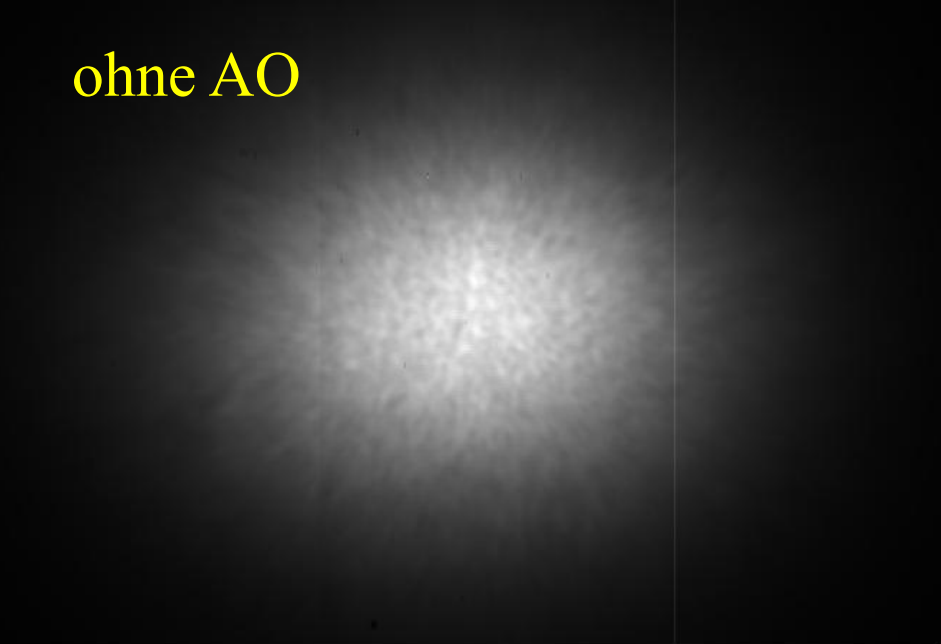
HD 196524
sep = 0.2"



Mond – Saturn – Titan ($0.5^\circ - 0.5' - 0.5''$)

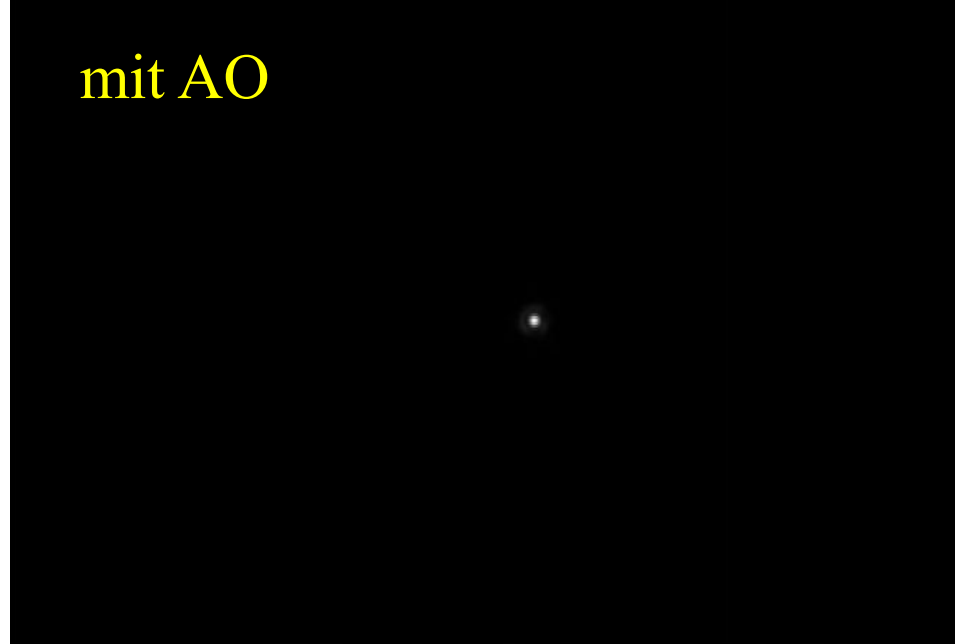


ohne AO



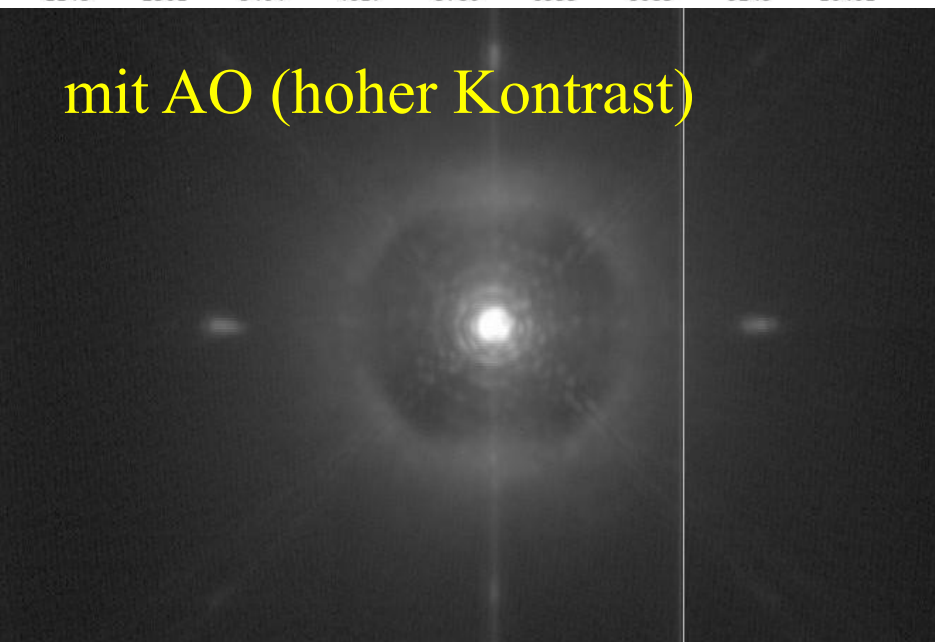
1148 2301 3464 4617 5780 6933 8085 9249 10401

mit AO



6466 12939 19476 25950 32486 38960 45433 51970 58444

mit AO (hoher Kontrast)



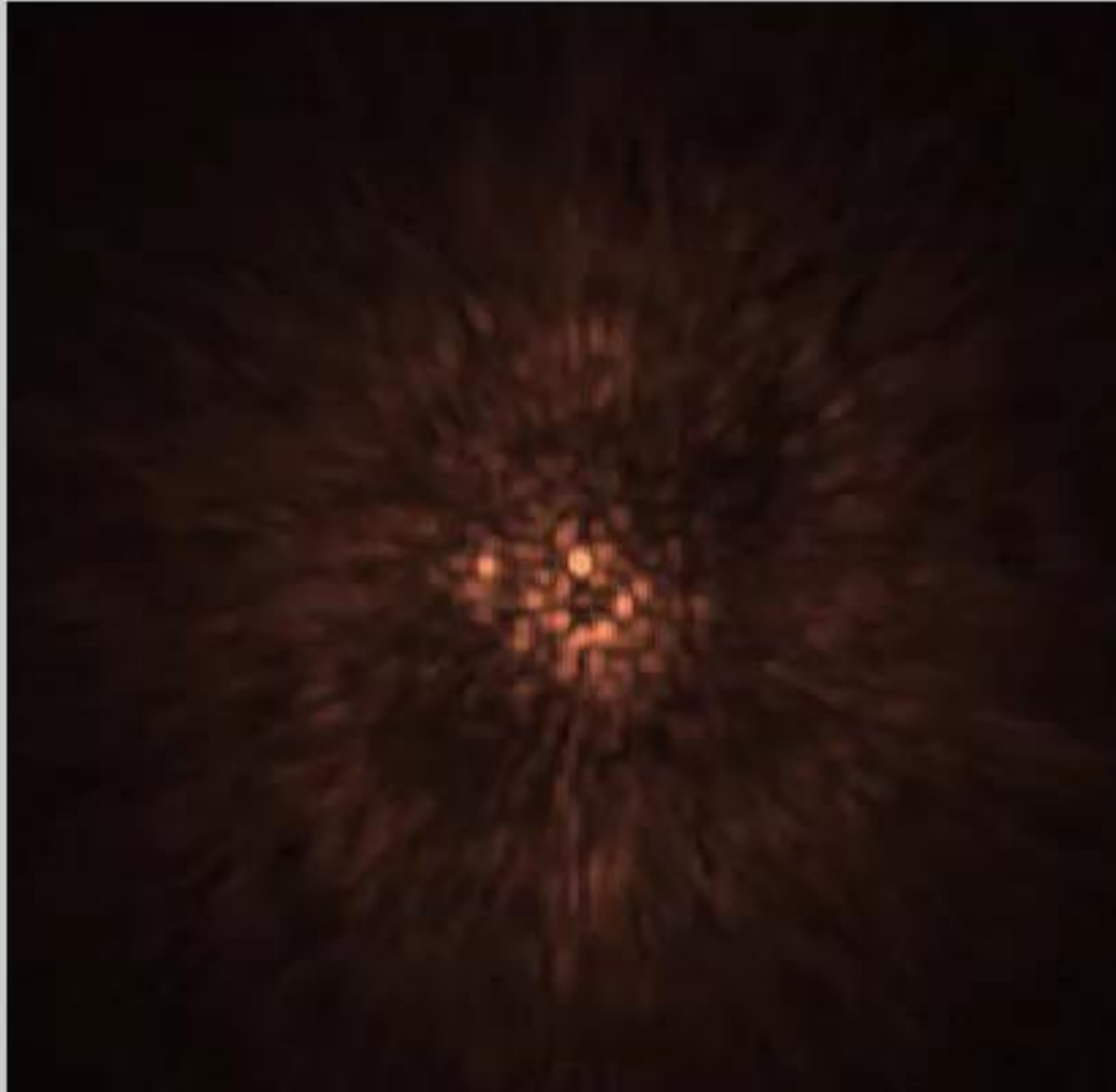
-2 10 34 82 177 366 742 1502 3003

mit AO und Koronagraph



190 268 427 741 1375 2628 5124 10161 20123

Temporal speckle variations



differenzielles Signal

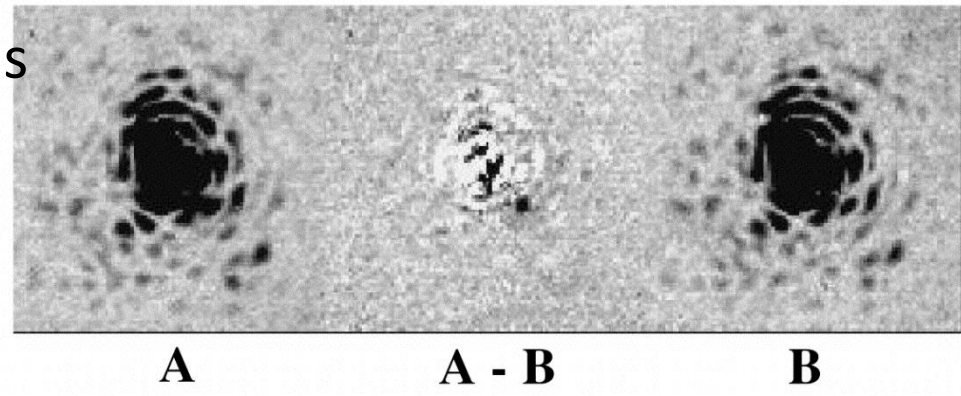
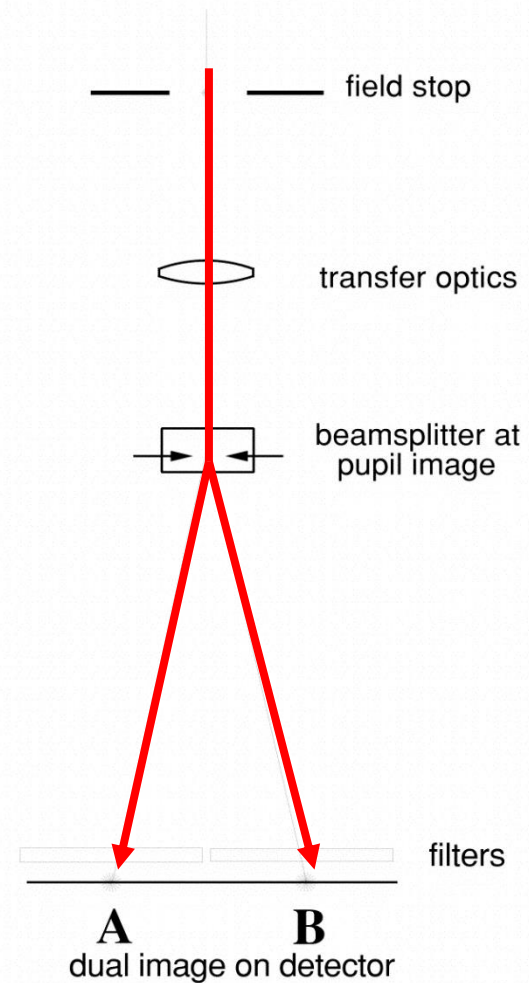
Unterschied in der Eigenschaft

- direkten Licht des Sterns
- reflektierten Lichts des Planeten

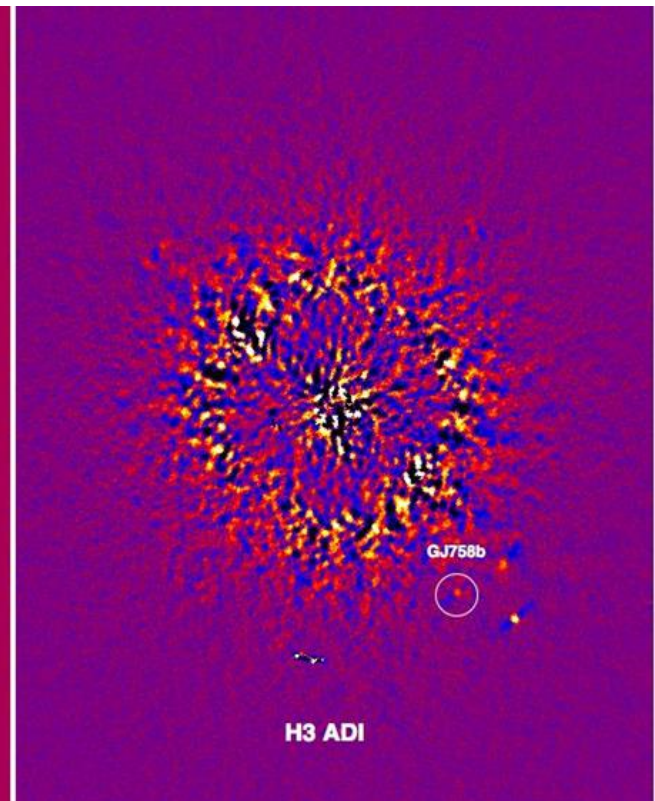
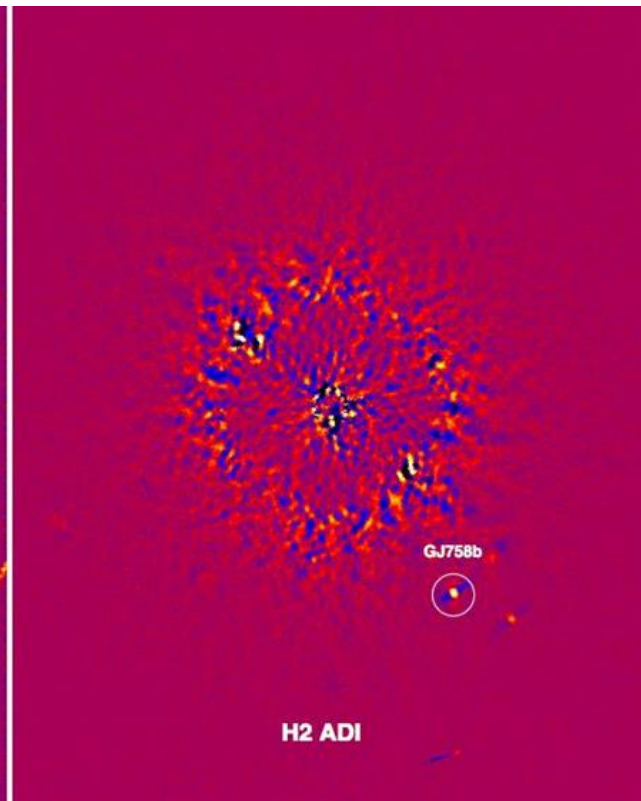
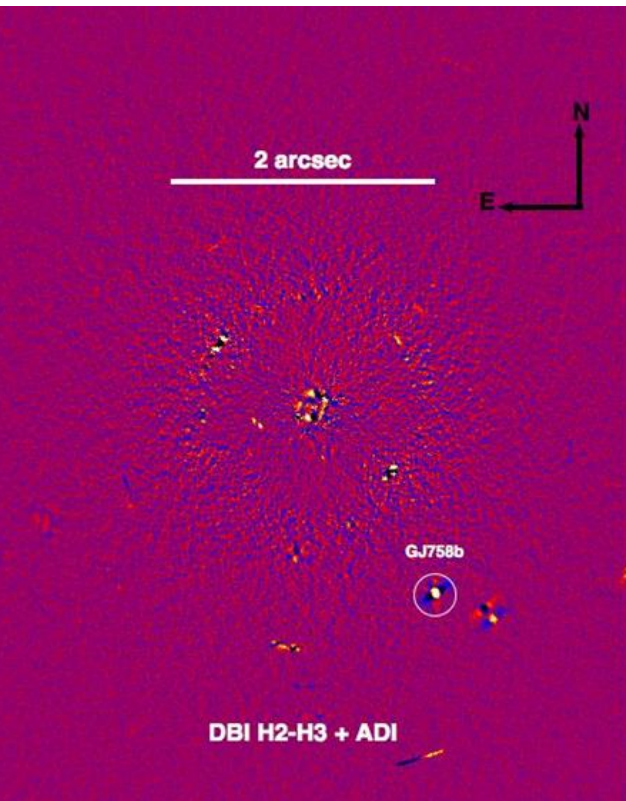
1) Streupolarisation

2) Absorption durch Moleküle

→ schwaches Signal des Planeten
kann im hellen Lichthalo des Sterns
detektiert werden



Gl 758 + T-type brown dwarf



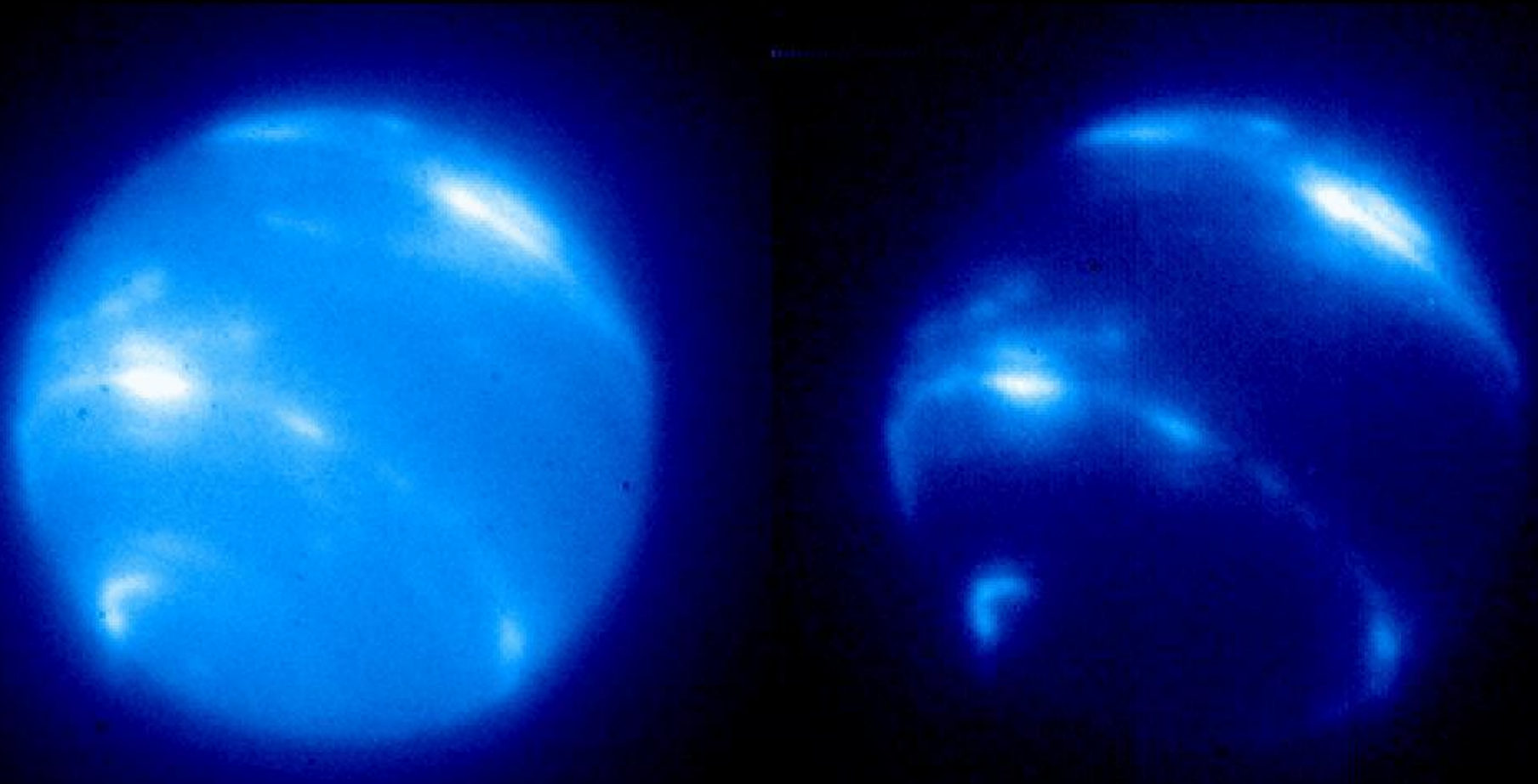
Difference image
A-B

Continuum band
A

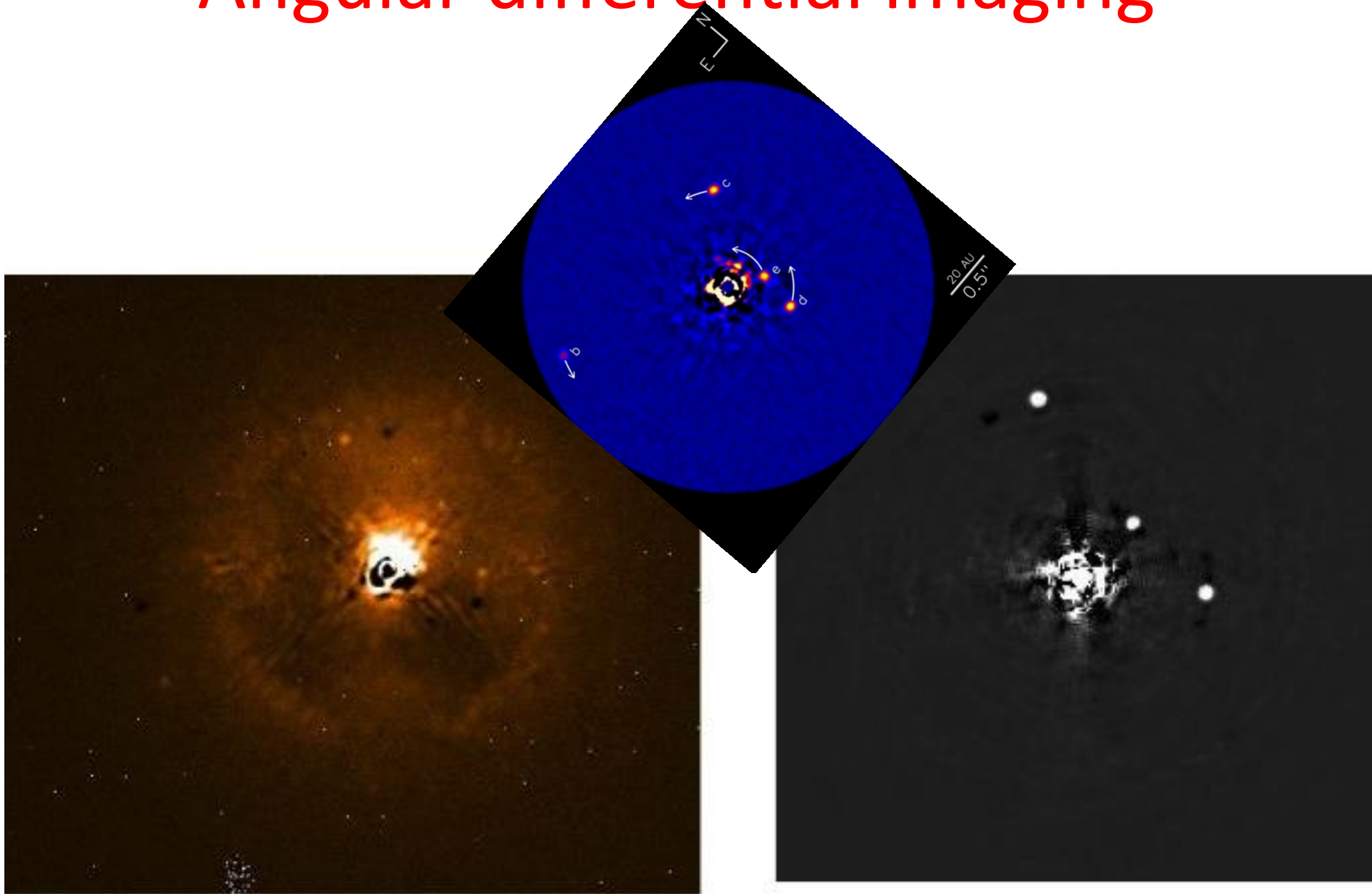
CH₄ Absorption
B

Spectral differential imaging

Neptune in continuum and CH₄ absorption

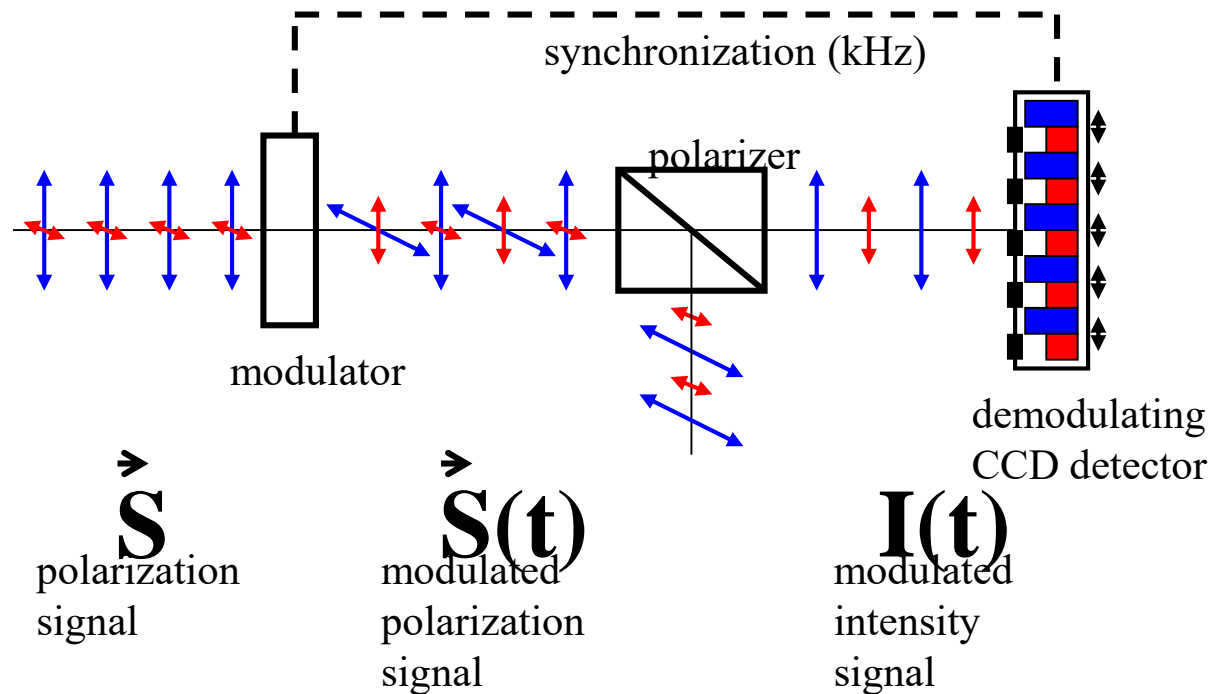


Angular differential imaging



Polarimetric differential imaging

ZIMPOL fast modulation principle



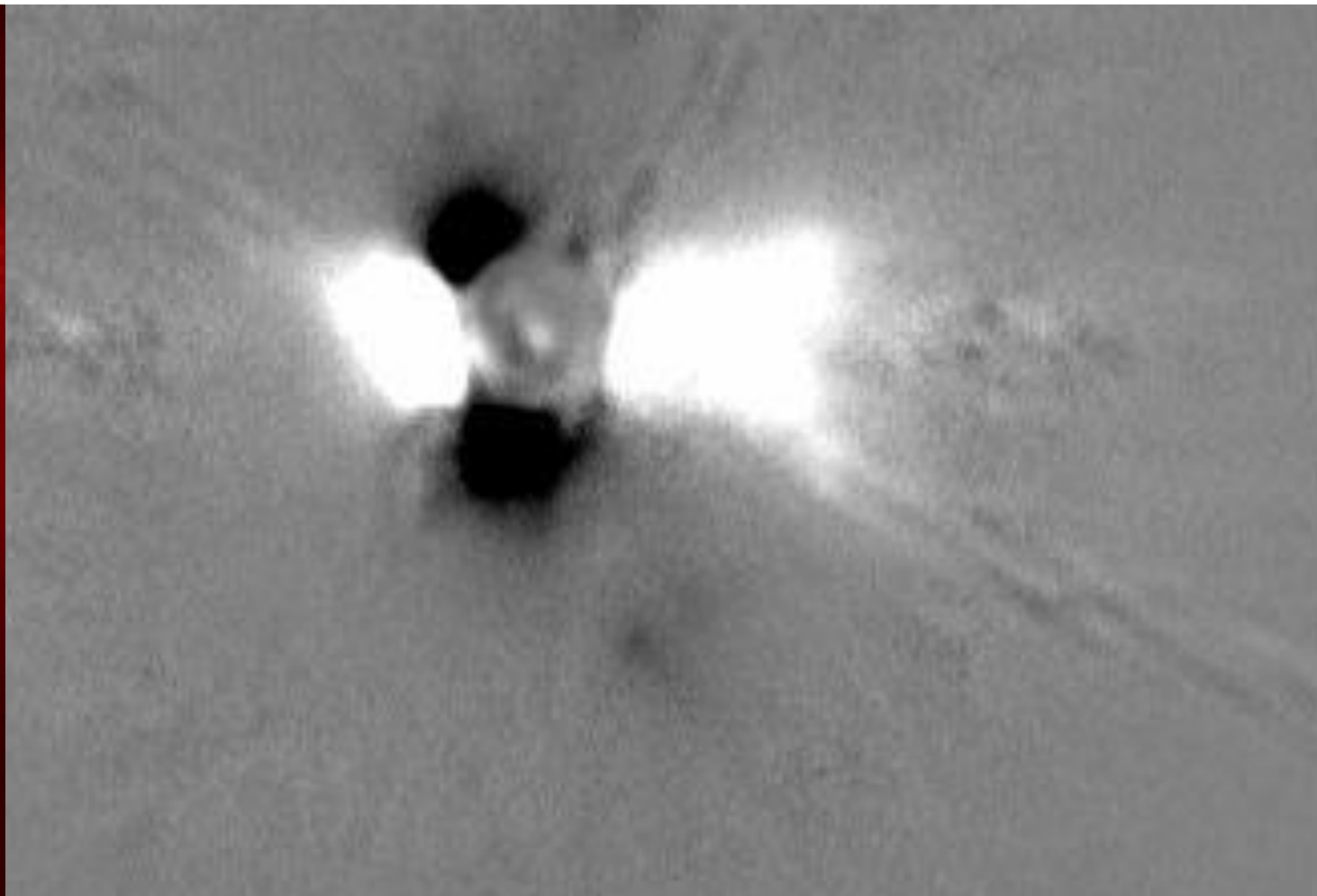
Advantages:

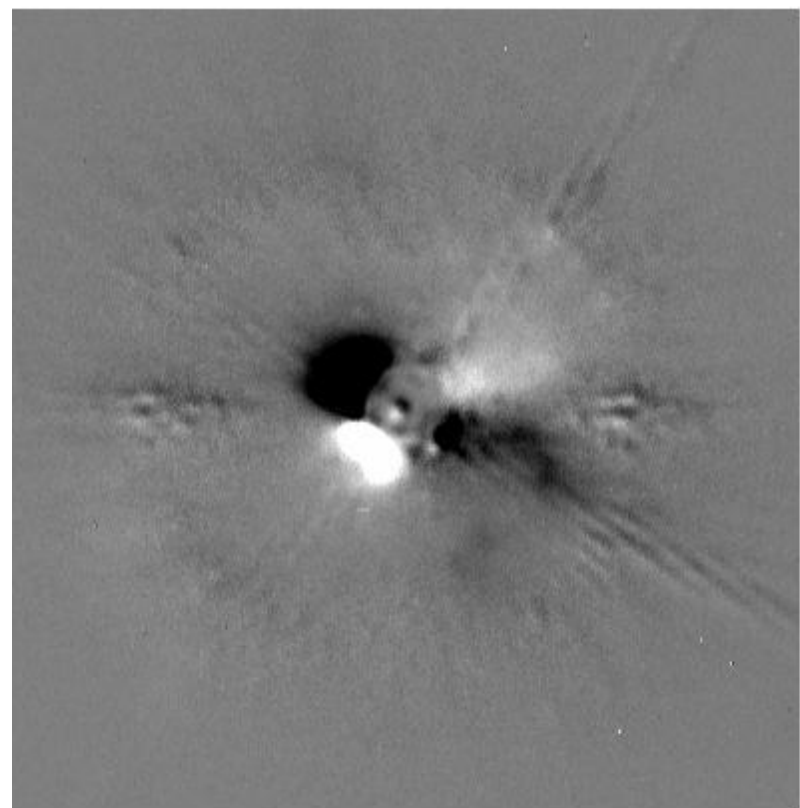
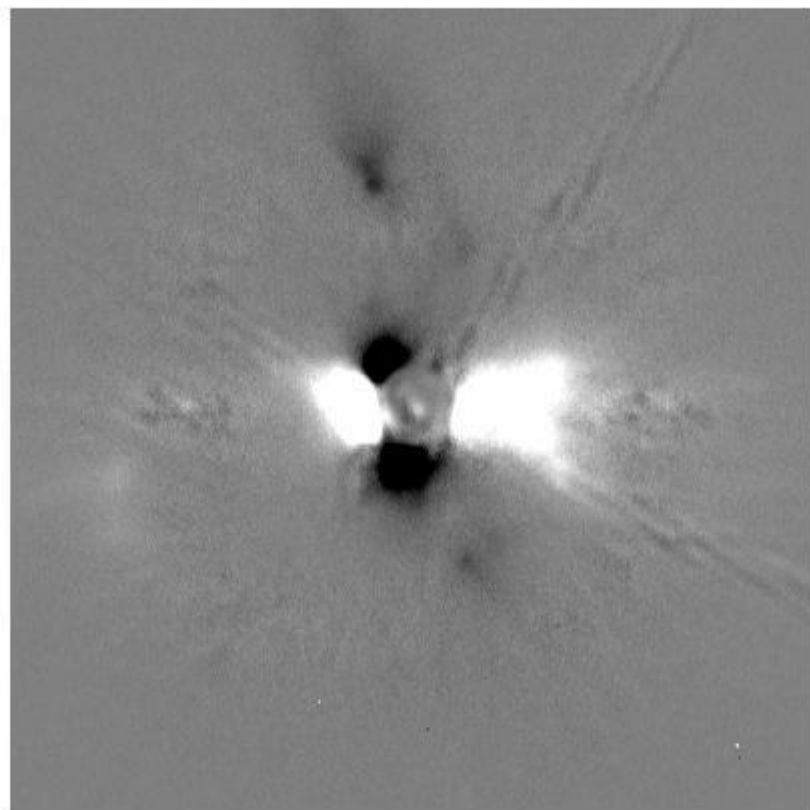
- images of two opposite polarization modes are created **almost** simultaneously
→ modulation faster than seeing variations
- both images are recorded with same pixel
- both images are subject to **almost** exactly the same aberrations
- integration over many modulation cycles without readout (low RON)

ZIMPOL polarimetry

Left: raw frame with even and odd rows with I_0 and I_{90}

Right: reduced image $I_0 - I_{90}$





02 -2e+02 -1e+02 0.49 1e+02 2e+02 3e+02 4e+02

-2e+02 -1e+02 0.49 1e+02 2e+02 3e+02

Stokes Q

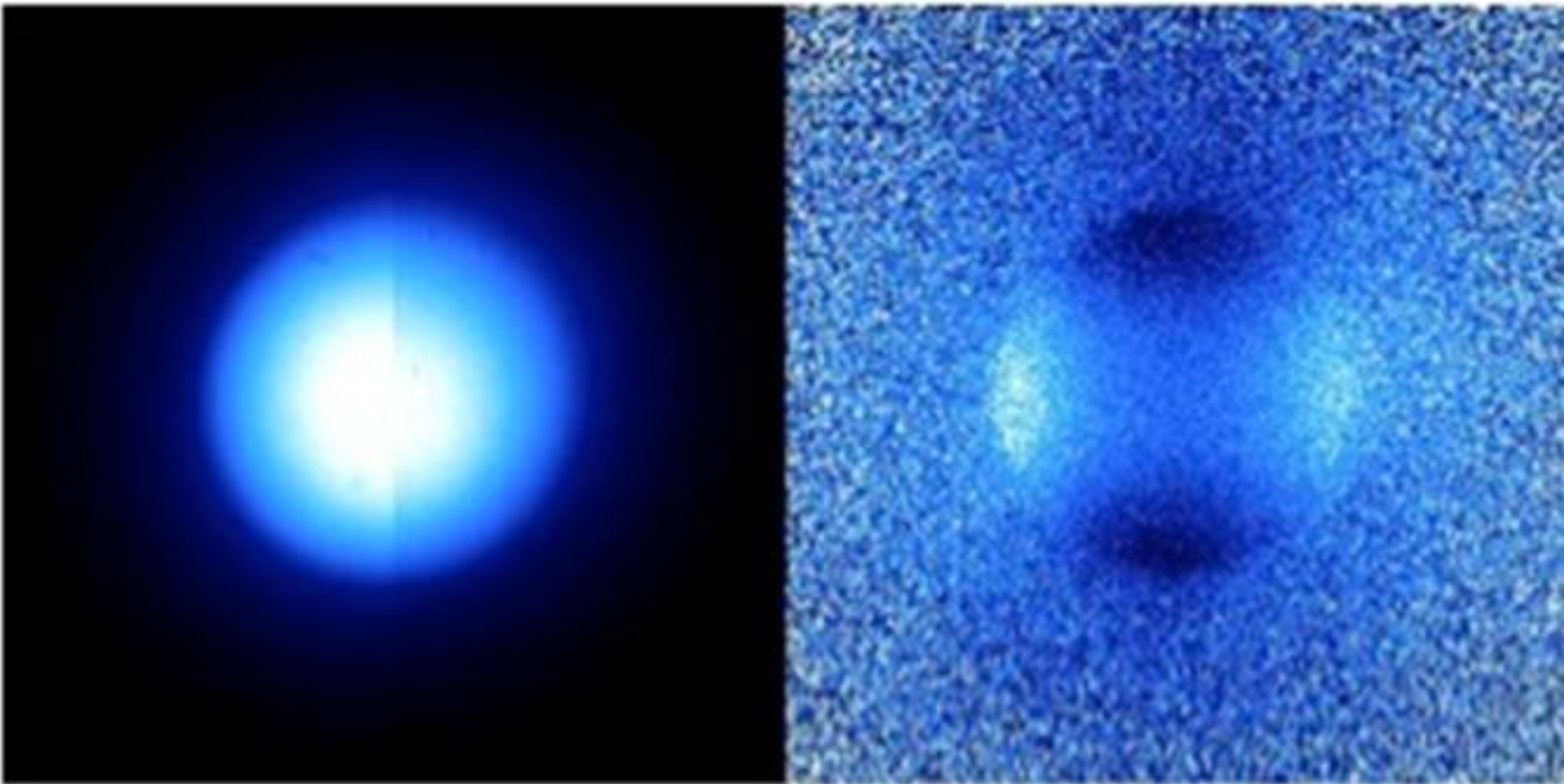
$$I_0 - I_{90}$$

Stokes U

$$I_{45} - I_{135}$$

R Aqr: light scattering by the circumstellar dust within 0.3 arcsec

Titan with SPHERE



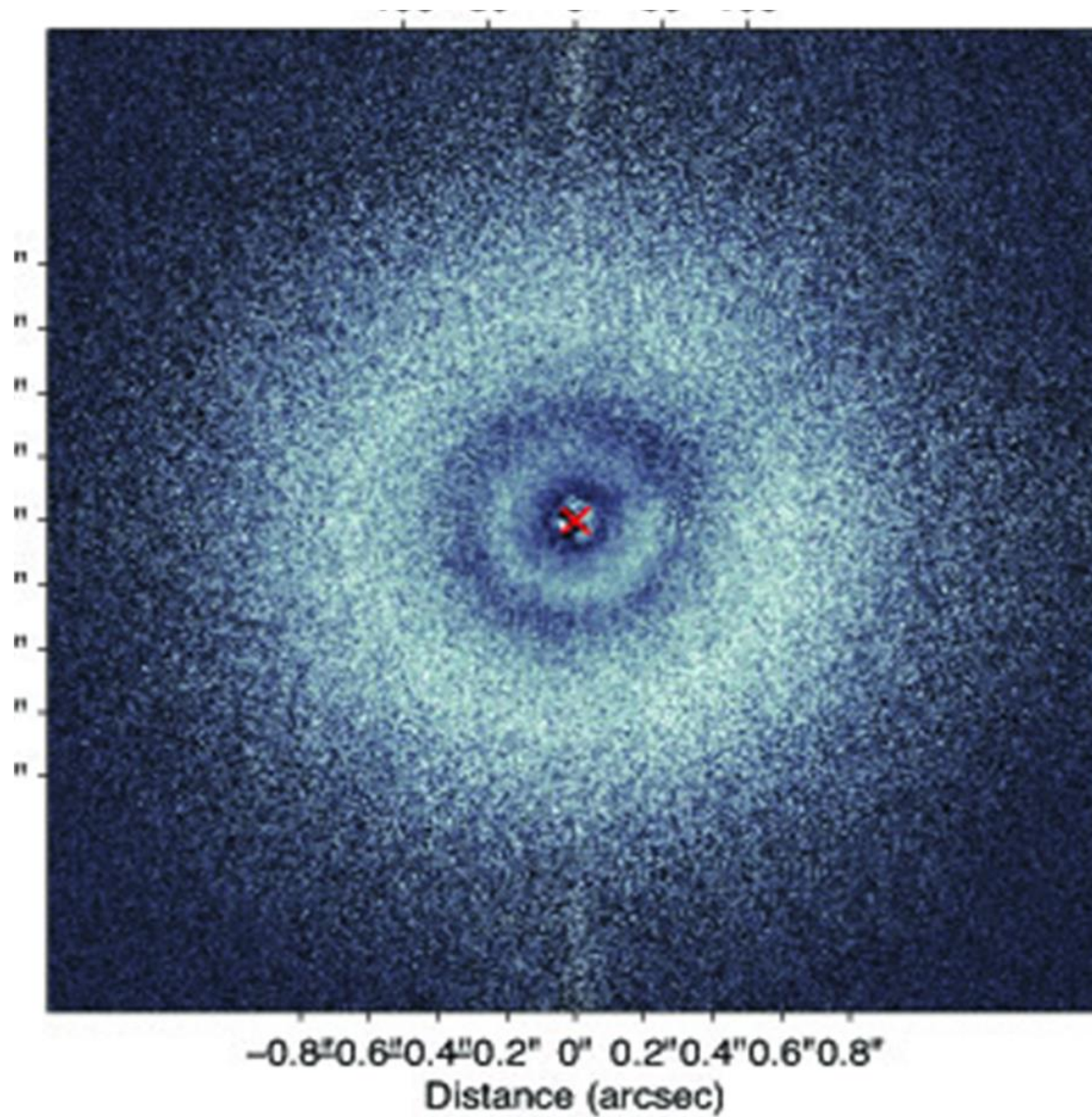
Stokes I

$$I_0 + I_{90}$$

Stokes -Q

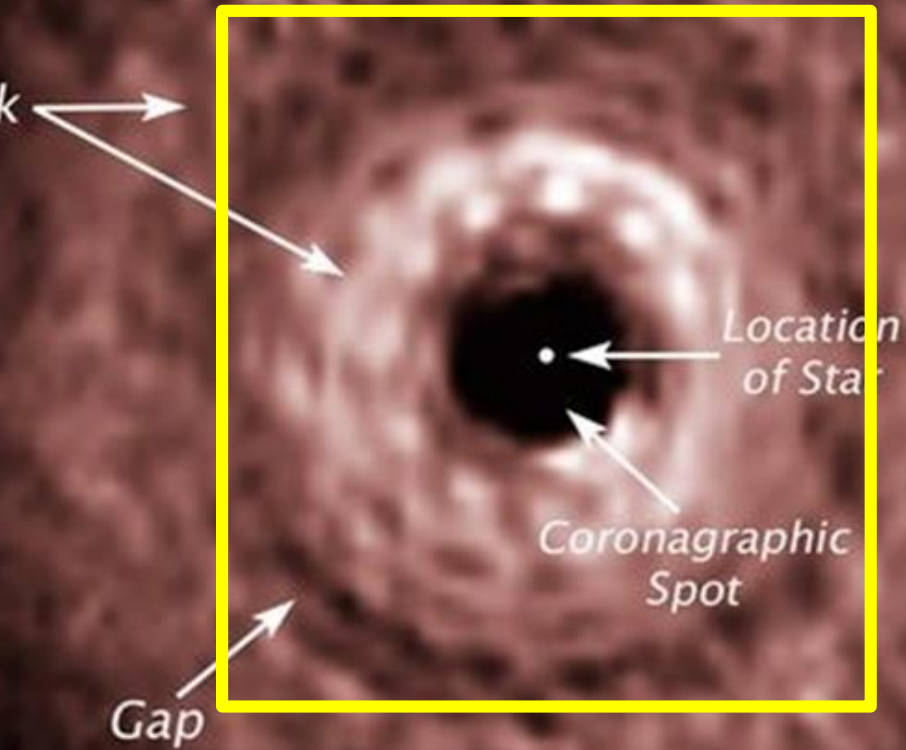
$$-I_0 + I_{90}$$

ZIMPOL scattered light (polarization) image of a circumstellar gas disk around a young star

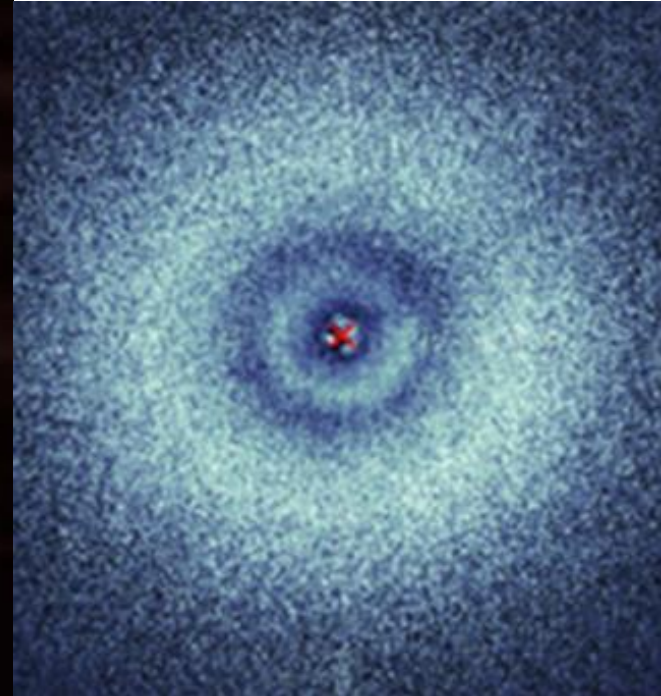


March 30,
2015

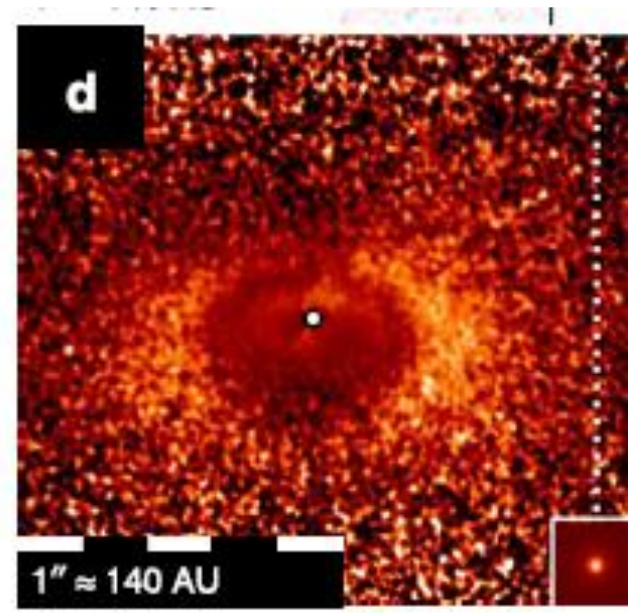
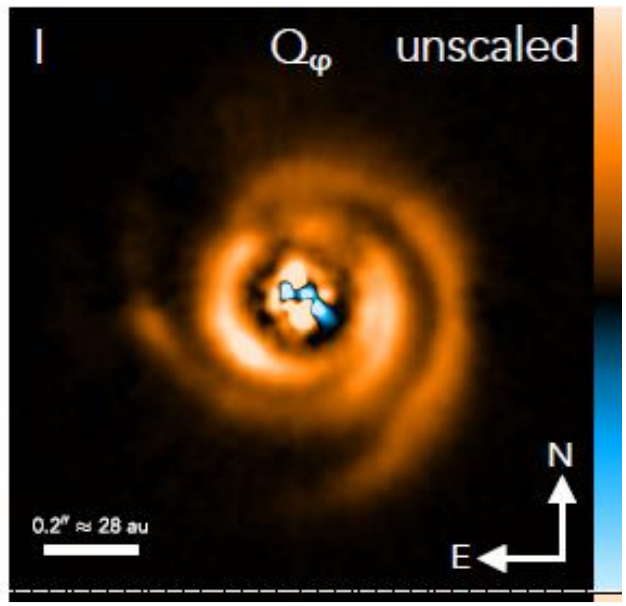
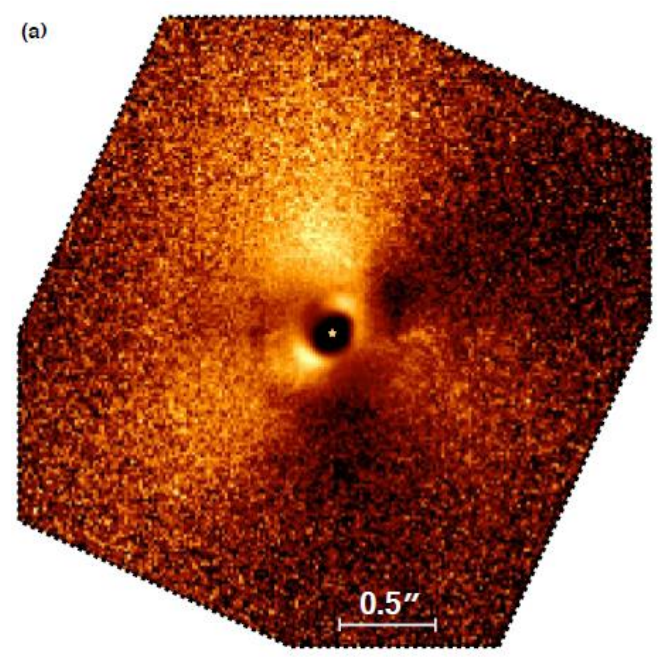
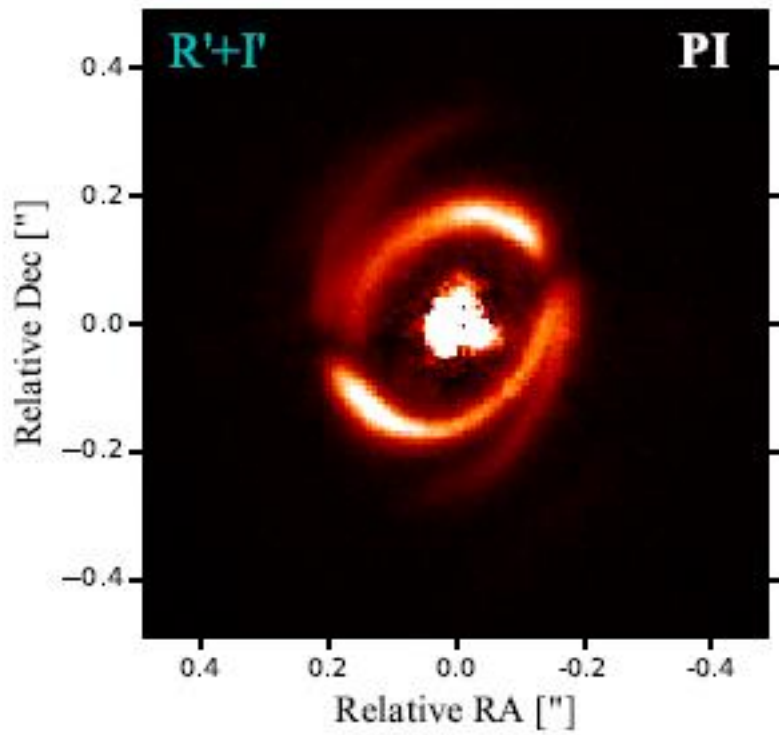
Protoplanetary Disk
NICMOS/NIC2
F180M+F222M



15 billion miles
160 AU 3"



ZIMPOL-
SPHERE



wir suchen solche Punkte

Erste Versuche (Feb-Juni 2016)

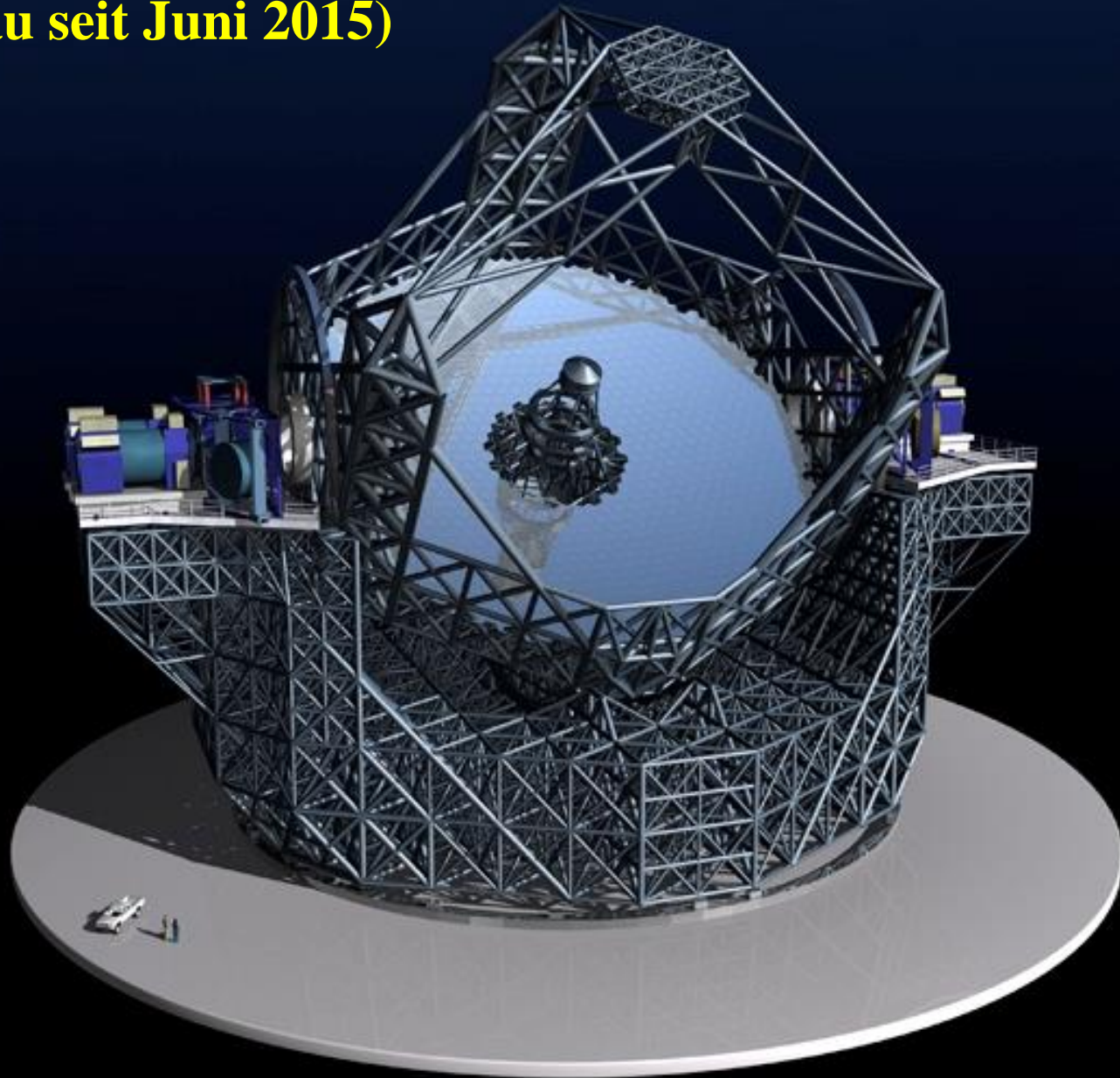
α Cen A + α Cen B, Sirius und Altair

- 8 Std-Belichtungszeit pro Stern
- 10000 Bilder zur Suche eines Punkts

Gibt es Leben da draussen?

1. Eine Reise durch unser Sonnensystem
2. Die Suche nach extra-solaren Planeten
3. Die direkte Abbildung von Planeten
4. Kurzer Ausblick:
Nachweis von Leben?

39 m E-ELT: European Extremely Large Telescope (im Bau seit Juni 2015)



Vorteile des E-ELT

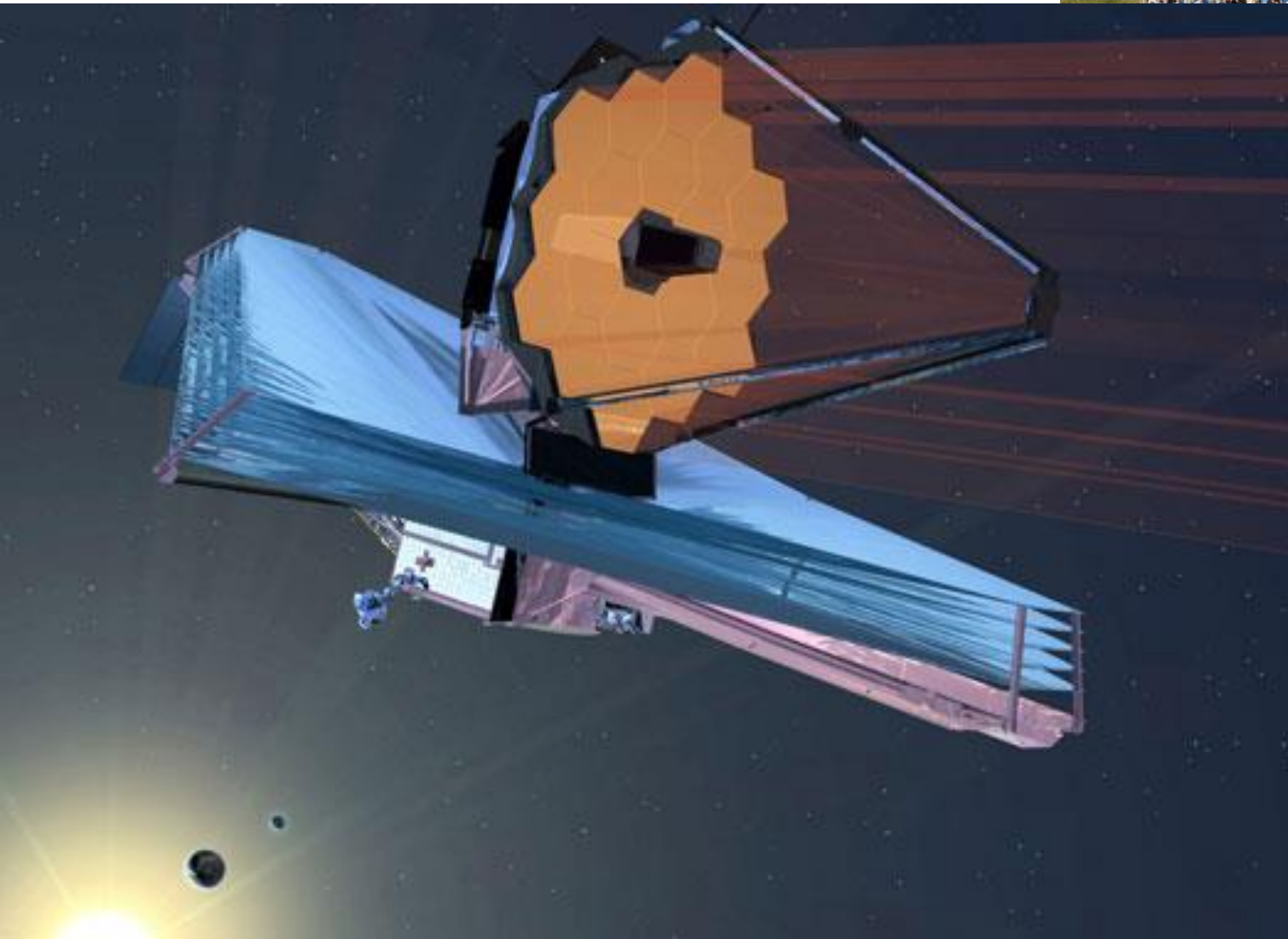
- sammelt viel mehr Licht $\sim D^2$ (5 x 5)
- fokussiert viel besser das Licht $\sim 1/D^2$ (5 x 5)
- 40m E-ELT

braucht $5 \times 5 \times 5 \times 5 = 625$ mal weniger lang für eine Planetendetektion als ein 8m VLT

→ terrestrische Planeten anstelle von Gasriesen können detektiert werden

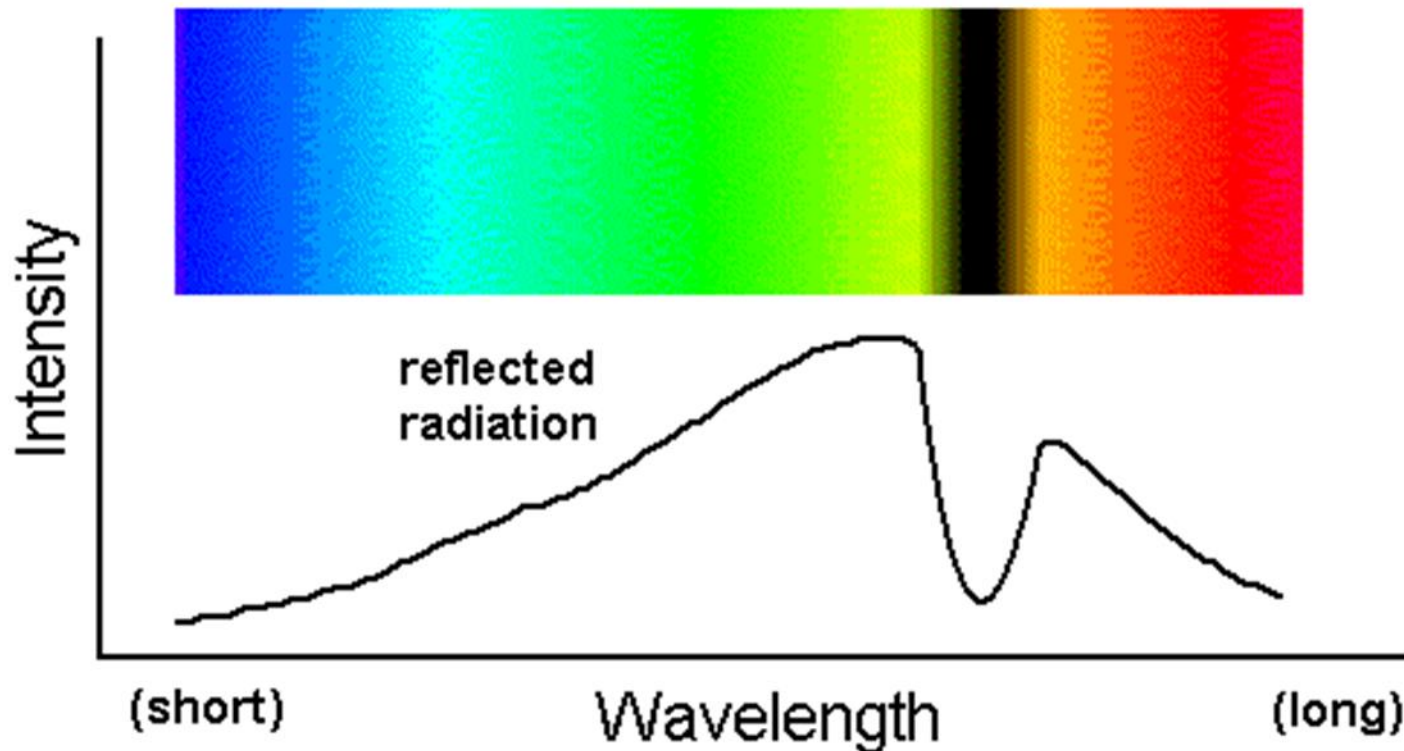
Kosten (~ 1 MEuro) vergleichbar mit einer grossen Satellitenmission (z.B. Rosetta Mission)

James Webb Space Telescope (ab 2018)



Nachweis von Leben

- Planet in der bewohnbaren Zone
- “vielversprechende Eigenschaften”, z.B. → blau
- Spektrum, mit speziellen Eigenschaft



Die Suche nach einem blauen Punkt

Zusammenfassung

bisher: Masse, Bahnen, und Radien

- Fast alle Sterne haben Planeten
- Planetensysteme zeigen eine sehr grosse Diversität

jetzt: erste direkte Planetenentdeckungen

- physikalische Eigenschaften der Atmosphäre

Zukunft : neue Projekte

- noch bessere Teleskope werden entwickelt
- Nachweis von Leben könnte um 2030 möglich sein (z.B. freier Sauerstoff)