Direct waarnemen van exoplaneten met hoog-contrast technieken

Gilles Otten
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

ESA – C. Carreau

Filosofen

Epicurus (300 v.C.)

"Er zijn ontelbare werelden, zowel lijkend als niet lijkend op het onze.“

Filosofen

Epicurus (300 v.C.)

"Er zijn ontelbare werelden, zowel lijkend als niet lijkend op het onze.“

Teng Mu (~13e eeuw)

"Hoe onredelijk zou het zijn om aan te nemen dat er naast de hemel en de aarde die we kunnen zien geen andere hemels en geen andere aardes bestaan“

Filosofen

Epicurus (300 v.C.)

"Er zijn ontelbare werelden, zowel lijkend als niet lijkend op het onze.“

Teng Mu (~13e eeuw)

"Hoe onredelijk zou het zijn om aan te nemen dat er naast de hemel en de aarde die we kunnen zien geen andere hemels en geen andere aardes bestaan“

Giordano Bruno (1548-1600)

"Er zijn ontelbare zonnen en ontelbare aardes die rondom hun zonnen draaien, precies zoals onze planeten hun baan rond onze zon volgen."

Belangrijke vragen

Hoe vormen planeten ?

Is ons zonnestelsel normaal of juist speciaal ?

Is de aarde uniek ?

Is er leven elders in het heelal ?

Belangrijke vragen

Hoe vormen planeten ?

Is ons zonnestelsel normaal of juist speciaal ?

Is de aarde uniek ?

Is er leven elders in het heelal ?

Met behulp van de Sterrenkunde
kan men deze vragen beantwoorden

Hoe ontdek je een exoplaneet?

Meest bekende methodes

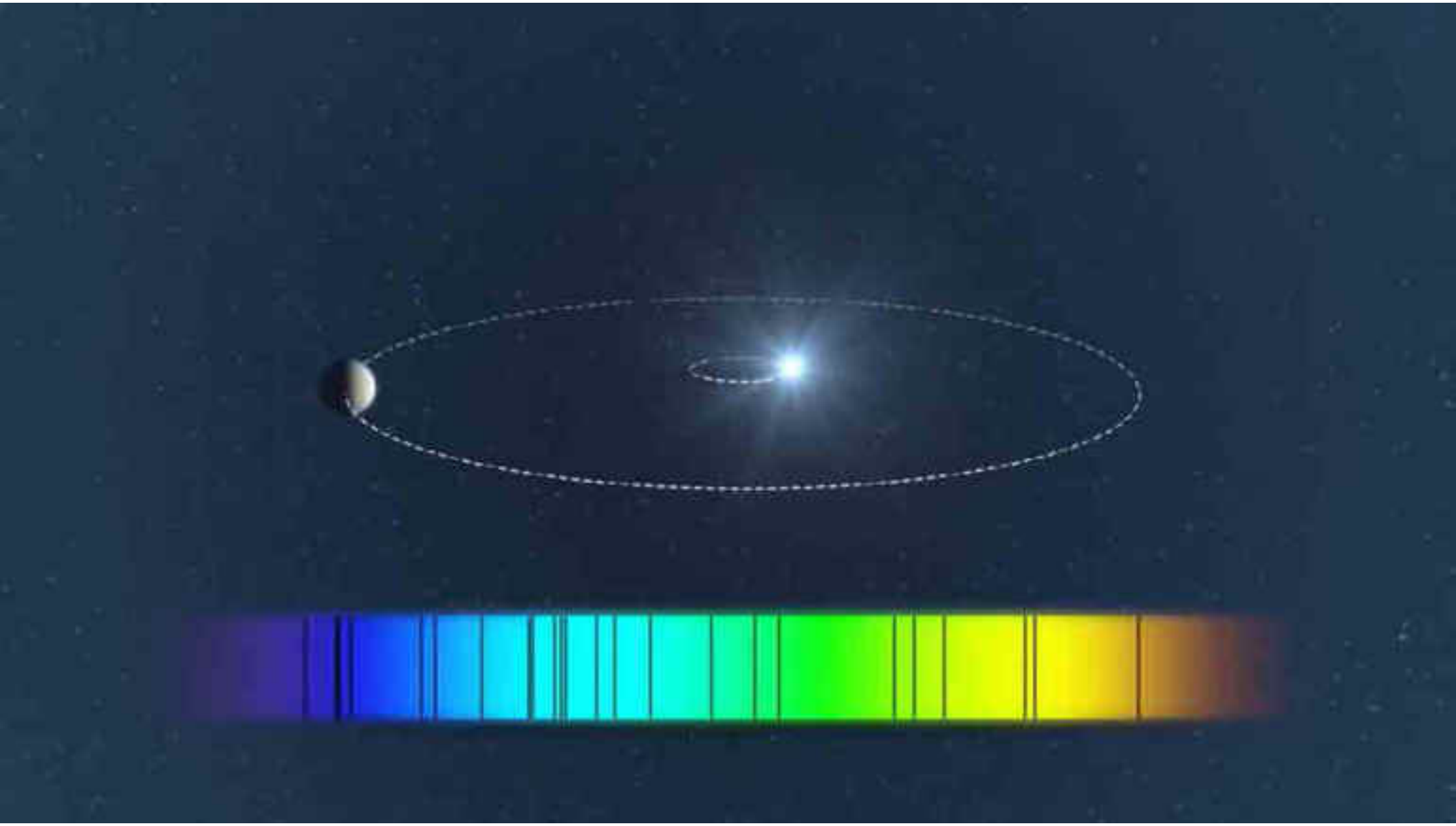
- Radiele snelheid
- Planeetovergangsmethode (transit)
- Astrometrie
- Microlenseffect
- Direct waarnemen

Hoe ontdek je een exoplaneet?

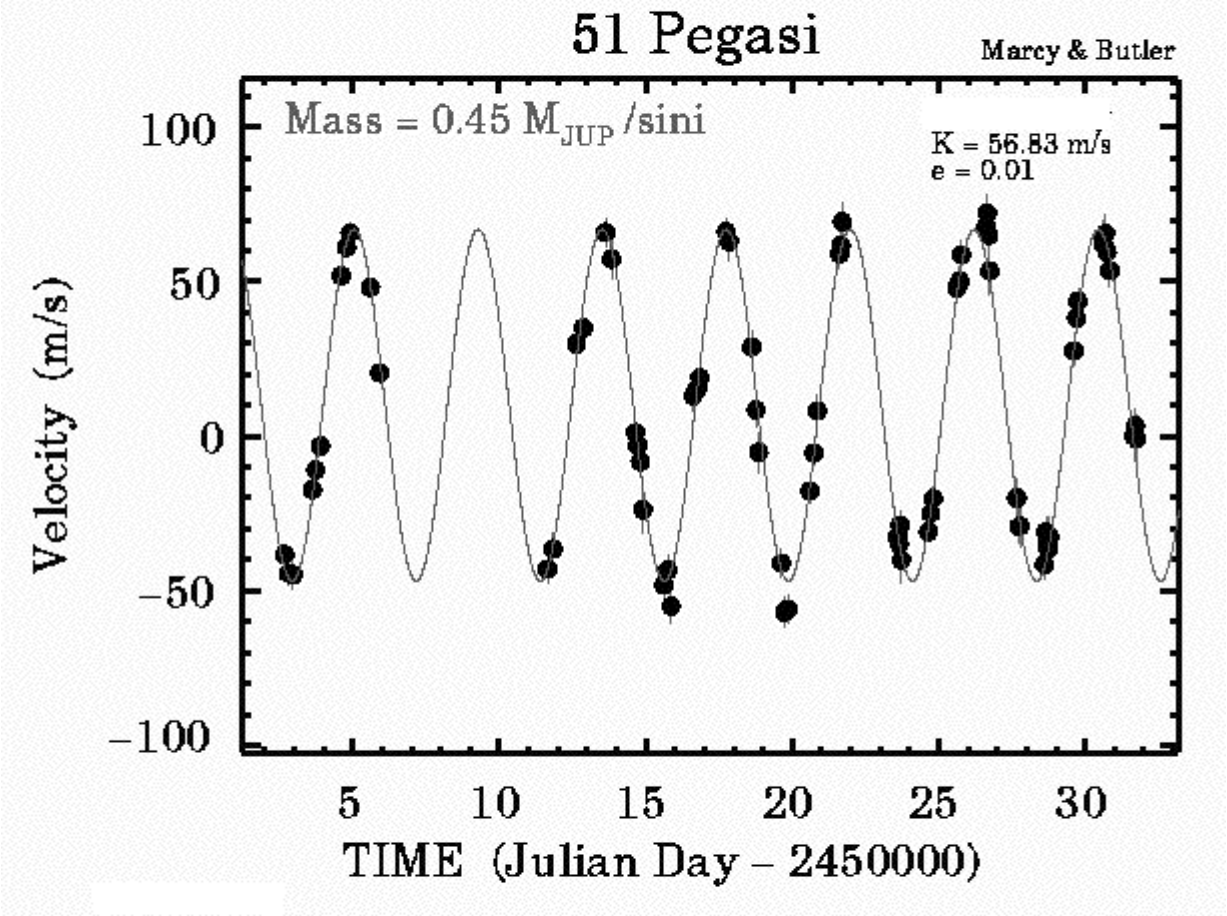
Meest bekende methodes

- **Radiele snelheid**
- **Planeetovergangsmethode (transit)**
- Astrometrie
- Microlenseffect
- **Direct waarnemen**

Radiele snelheid



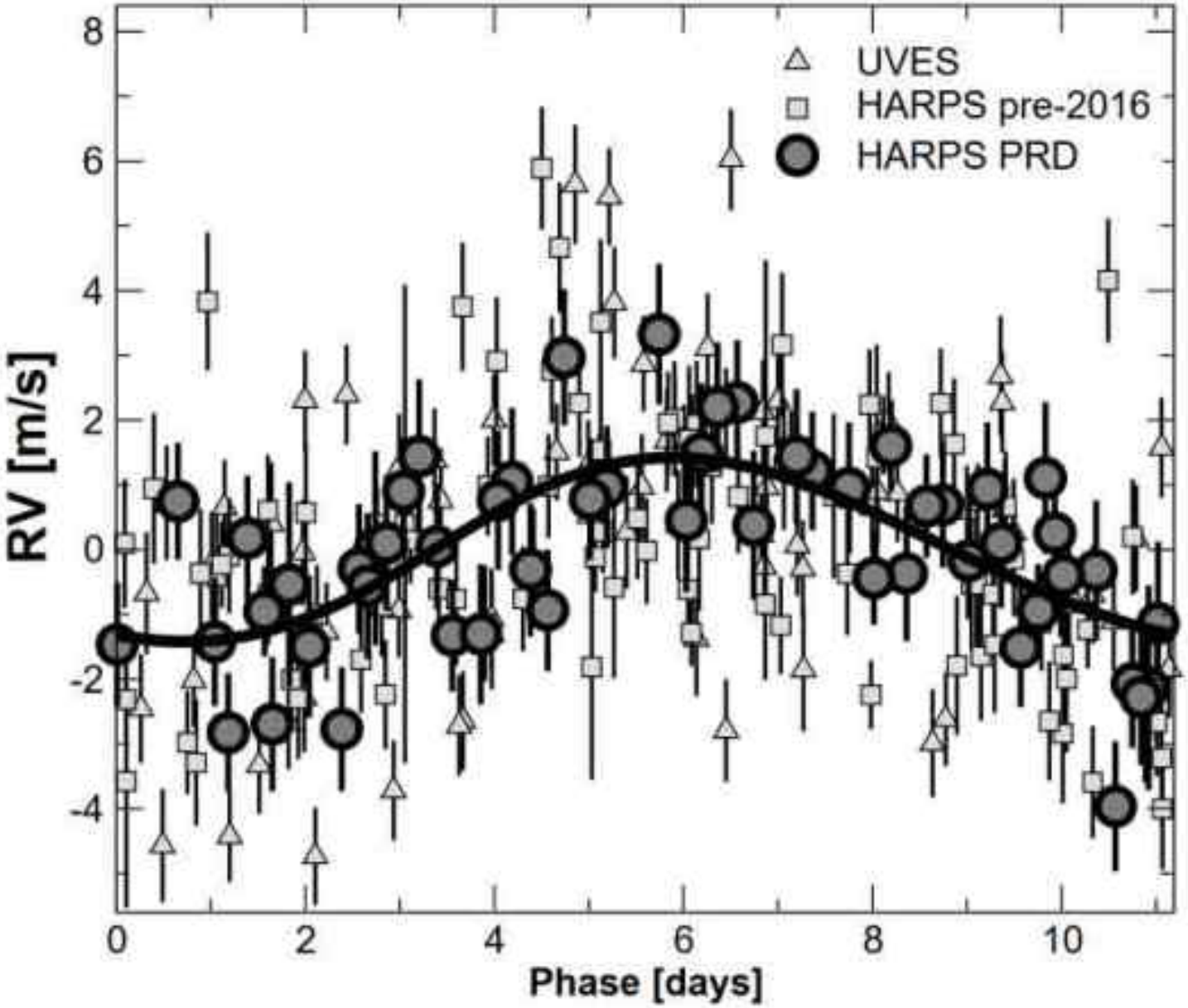
Eerste planeet rond zonachtige ster



Methode eerst toegepast door Mayor en Queloz in 1995

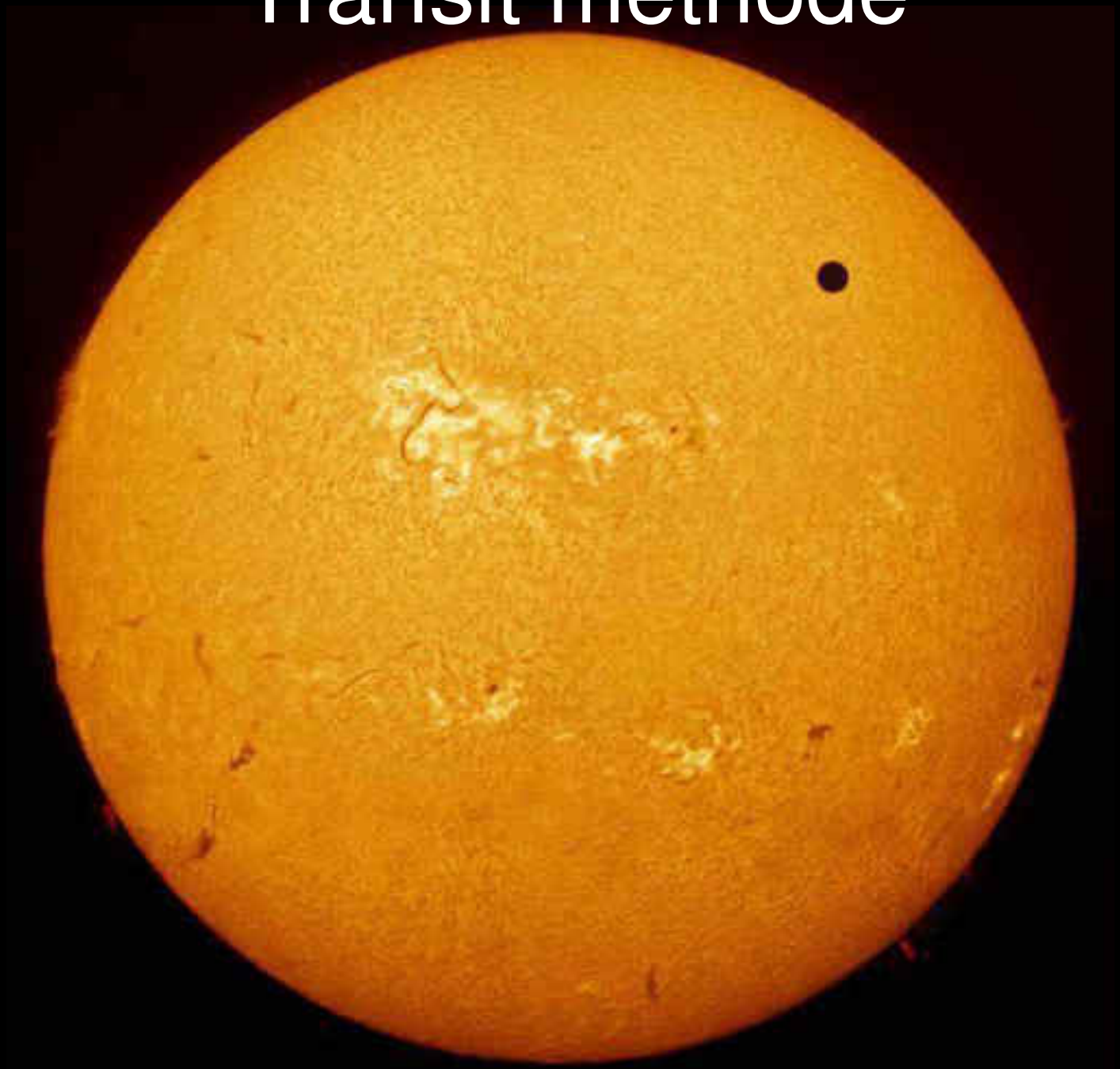
Zonder kennis van de hoek van de planeet aan de hemel geeft deze methode alleen een ondergrens voor de massa

Proxima Centauri b

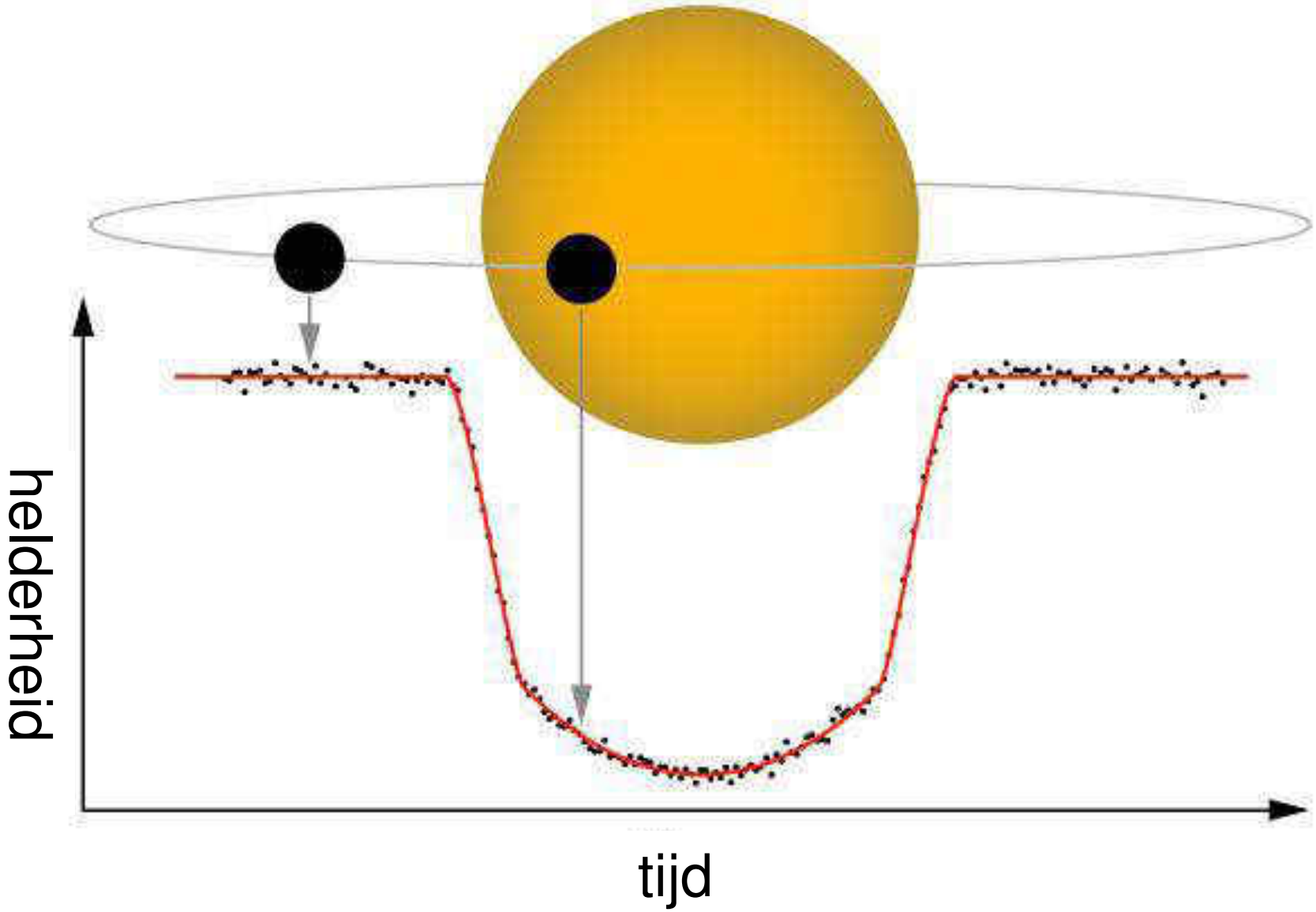


Dichtsbijzijnde ster lijkt een Aardachtige planeet te hebben

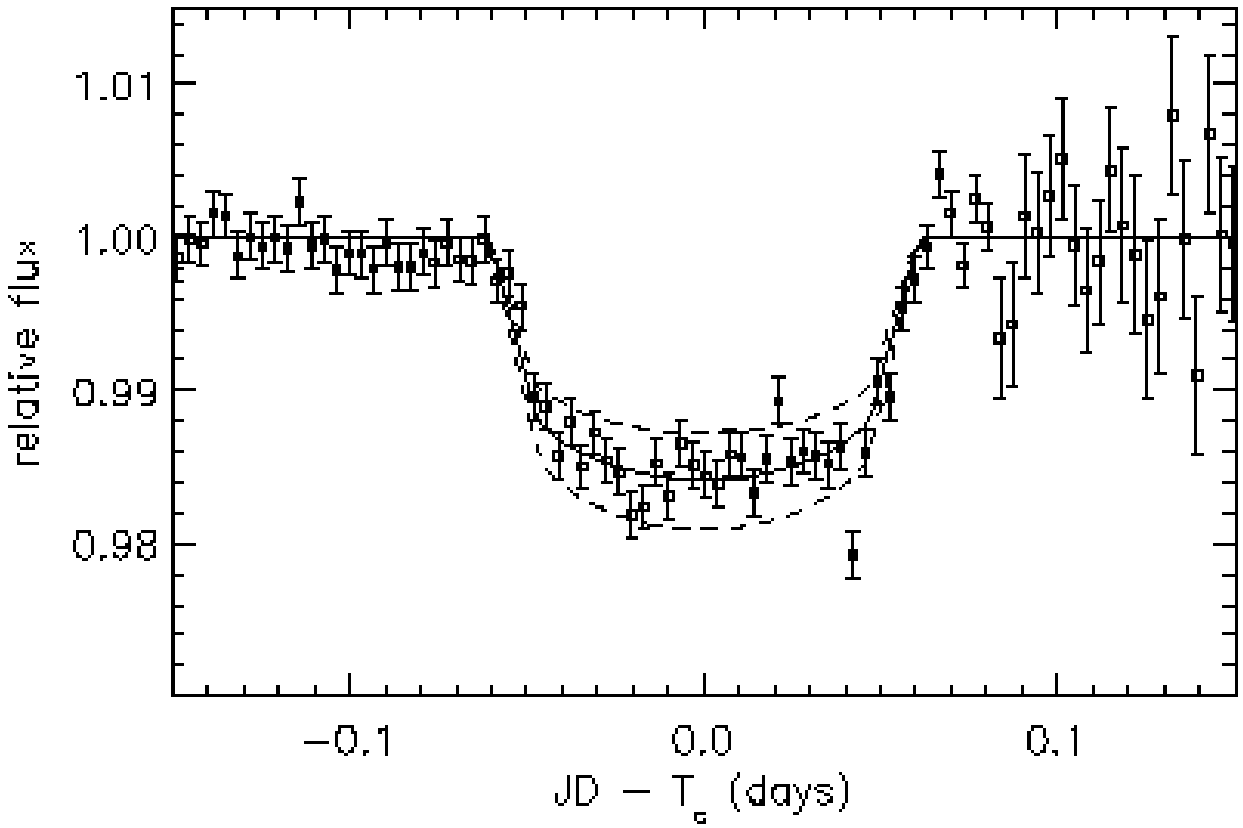
Transit methode



Venusovergang 2012, Paul Haese

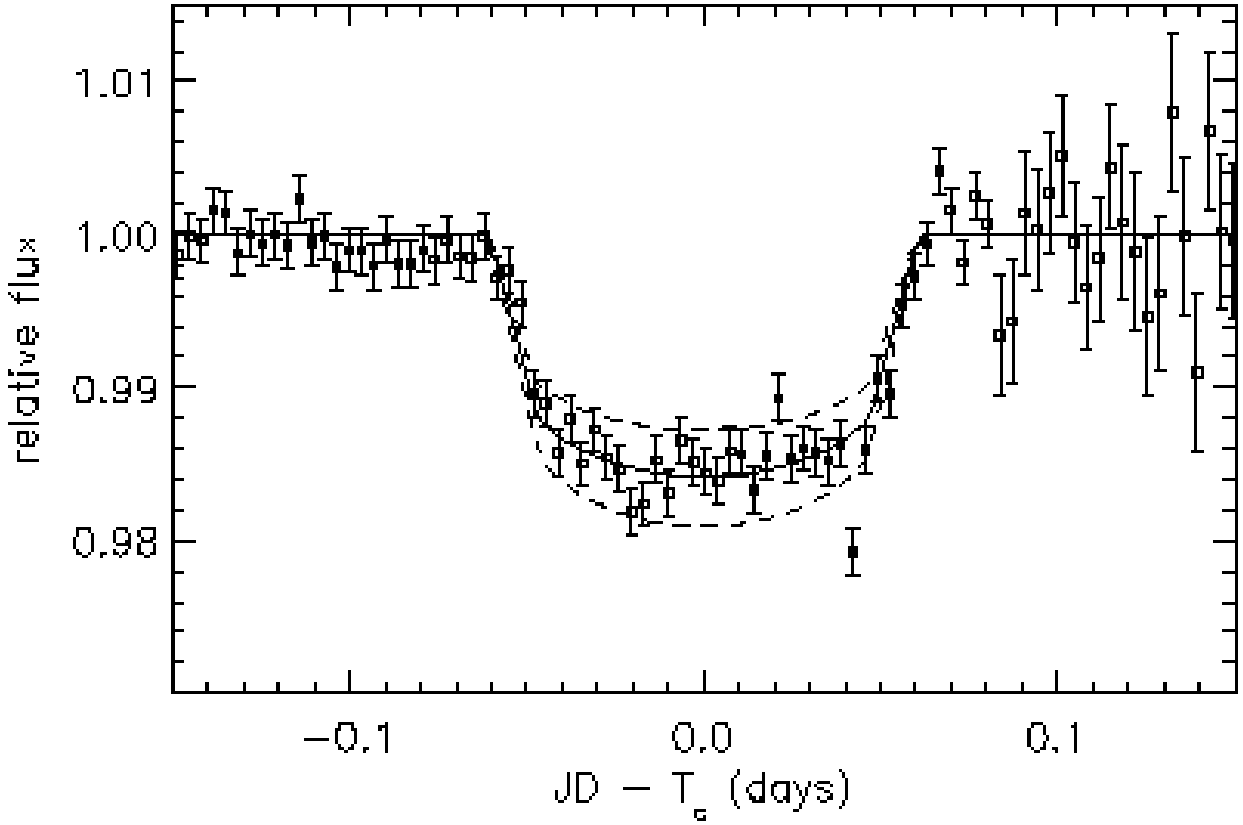

helderheid
tijd

Eerste ontdekking



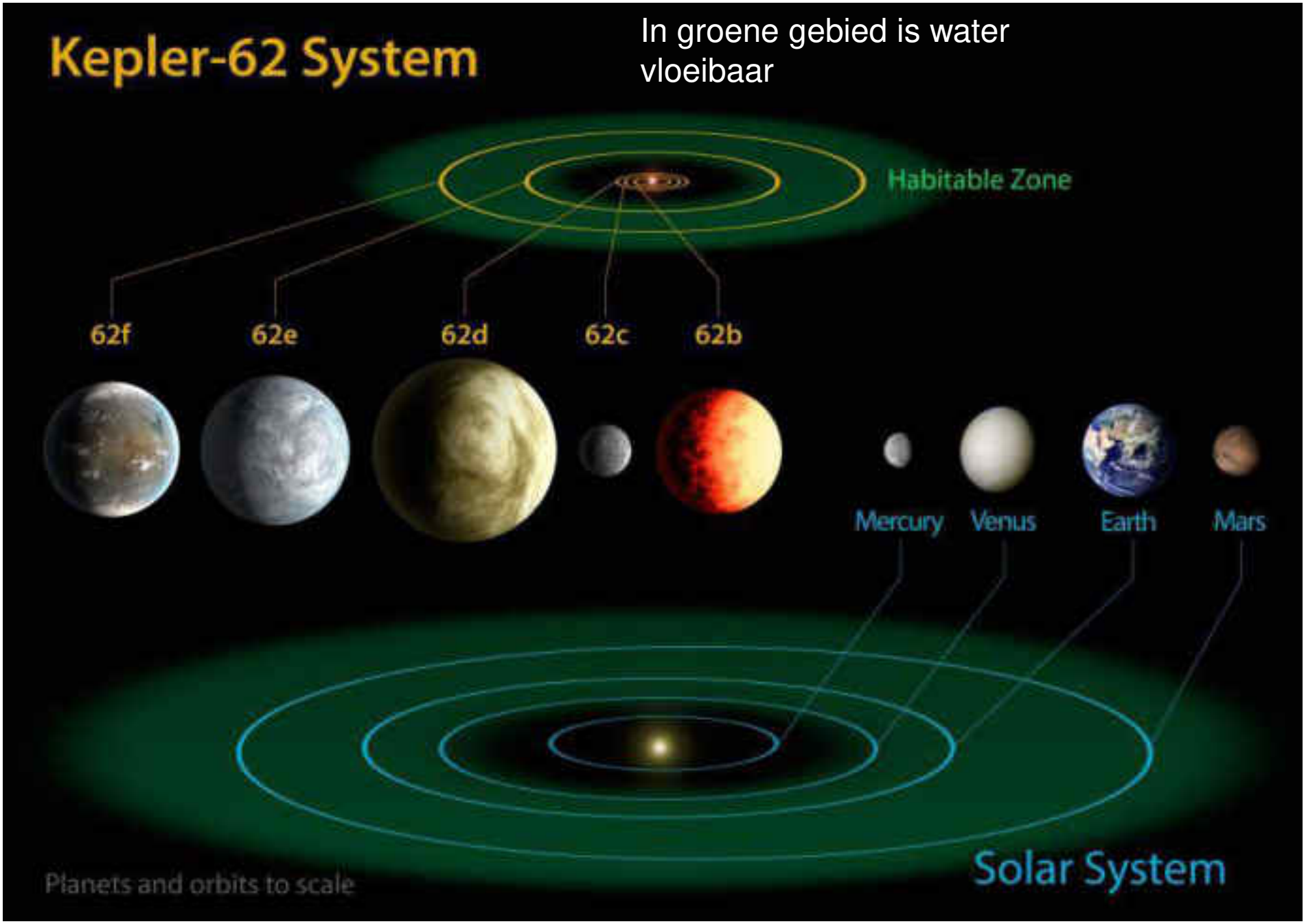
David Charbonneau in september 1999: **HD209458b**
Massa 71% van Jupiter, Temperatuur: 1100 graden Kelvin
10 keer dichterbij zijn ster dan Mercurius

Eerste ontdekking



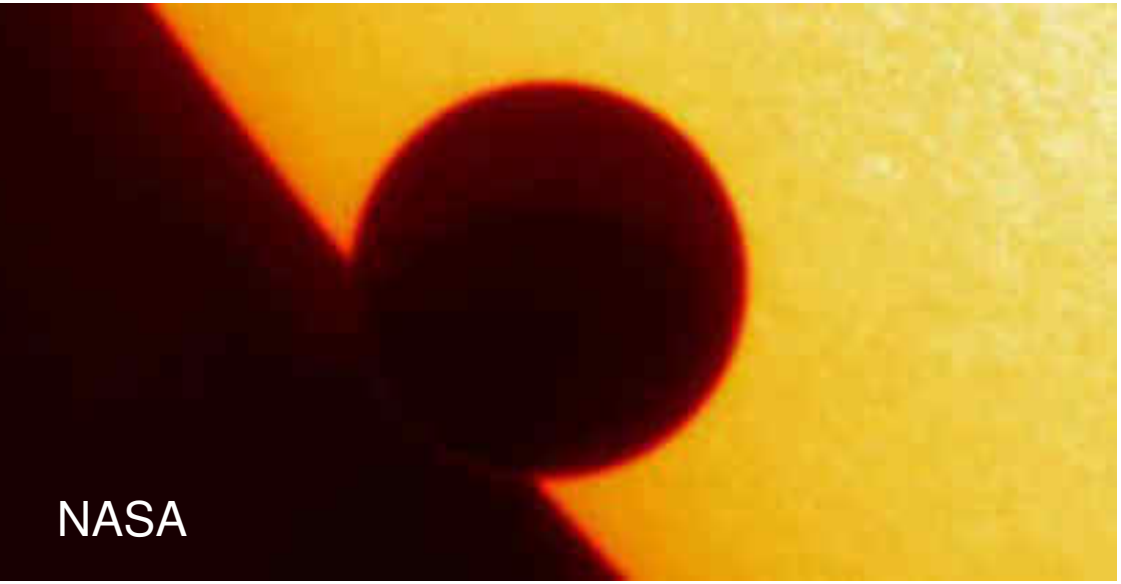
David Charbonneau in september 1999: **HD209458b**
Massa 71% van Jupiter, Temperatuur: 1100 graden Kelvin
10 keer dichterbij zijn ster dan Mercurius

Totaal onbewoonbaar

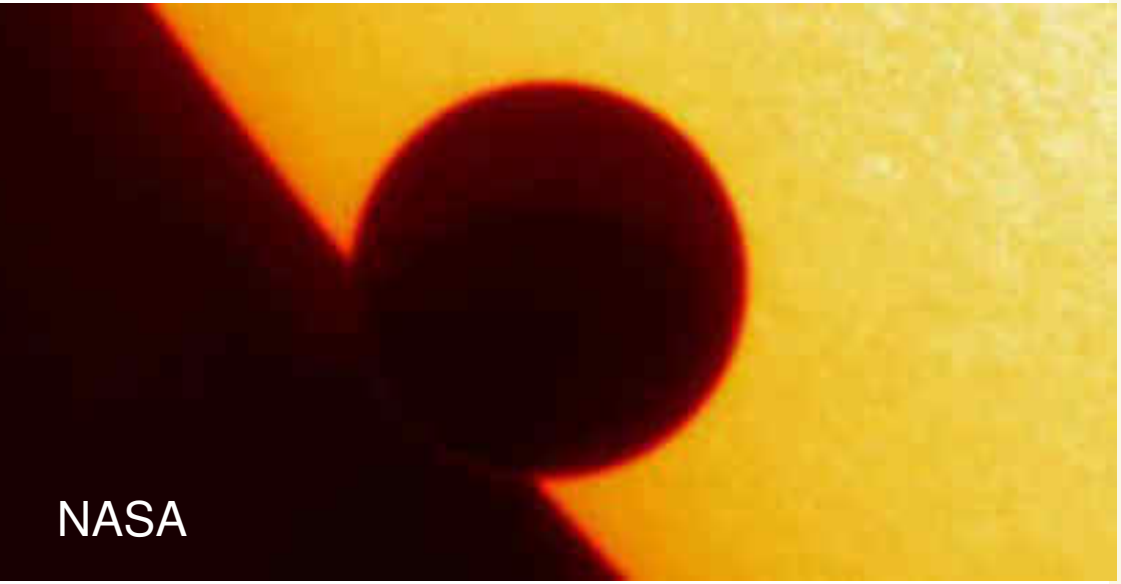

Kepler-62 System
In groene gebied is water vloeibaar
Habitable Zone
62f
62e
62d
62c
62b
Mercury
Venus
Earth
Mars
Planets and orbits to scale
Solar System

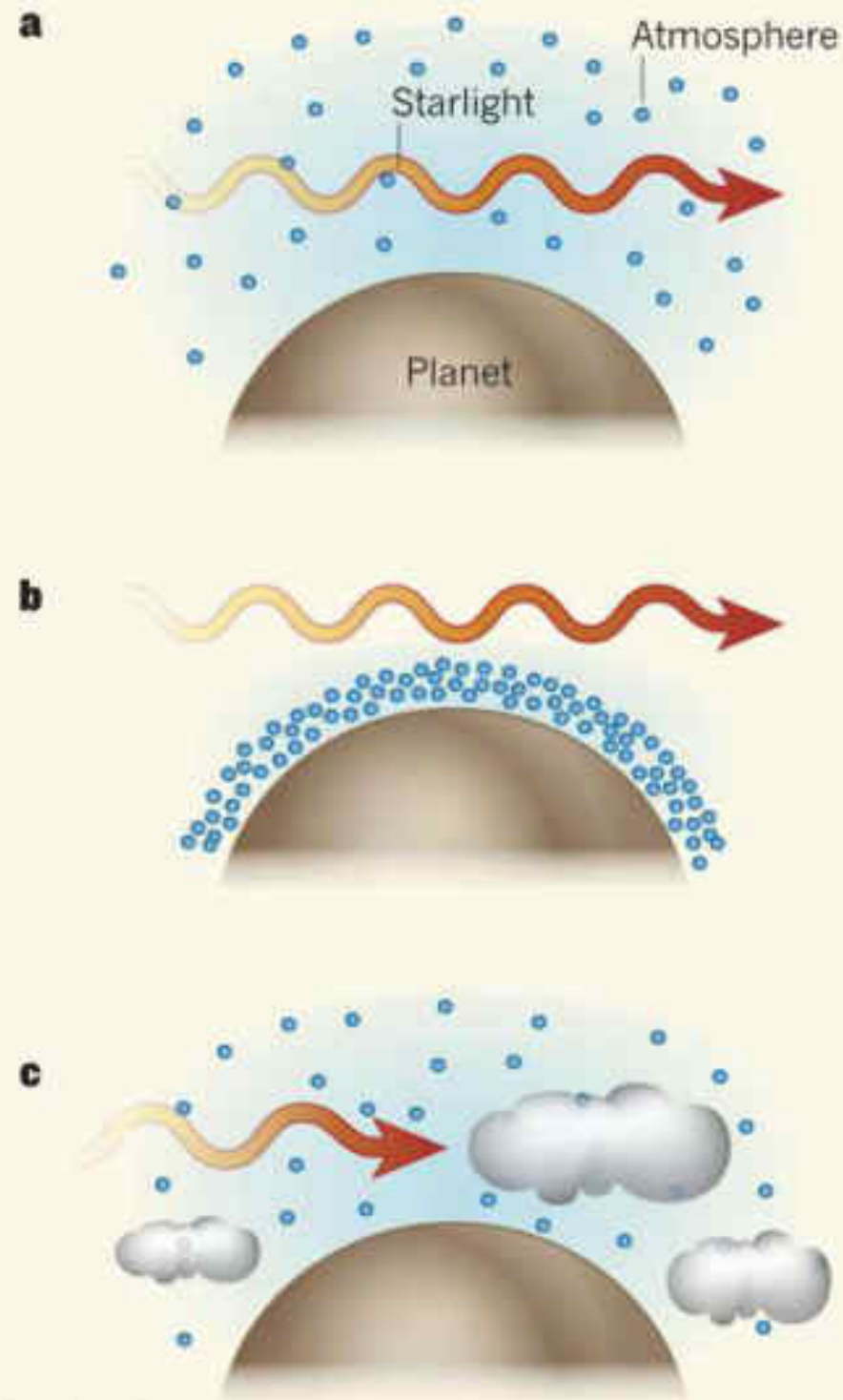
NASA

Atmosfeer meten



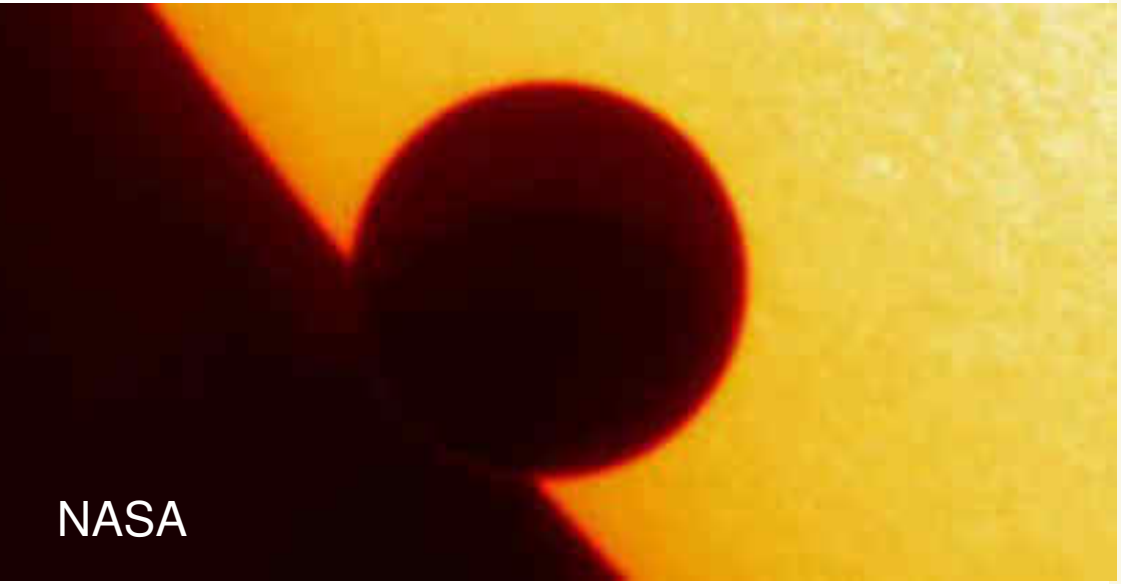
Atmosfeer meten

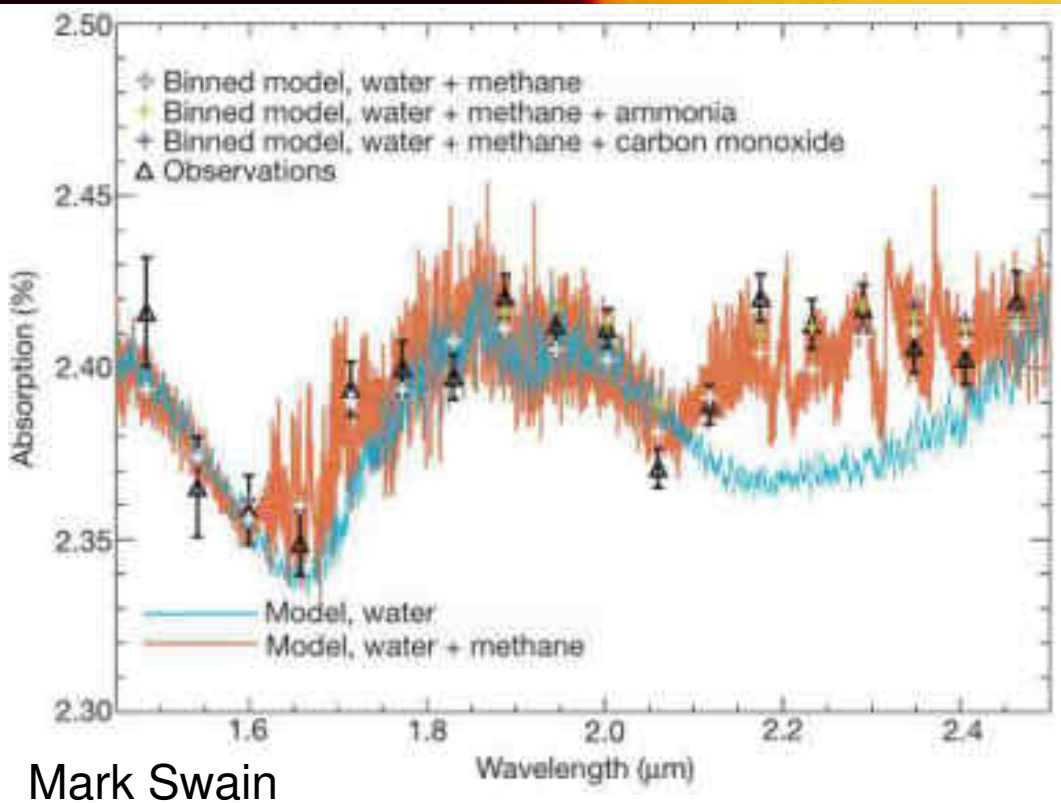




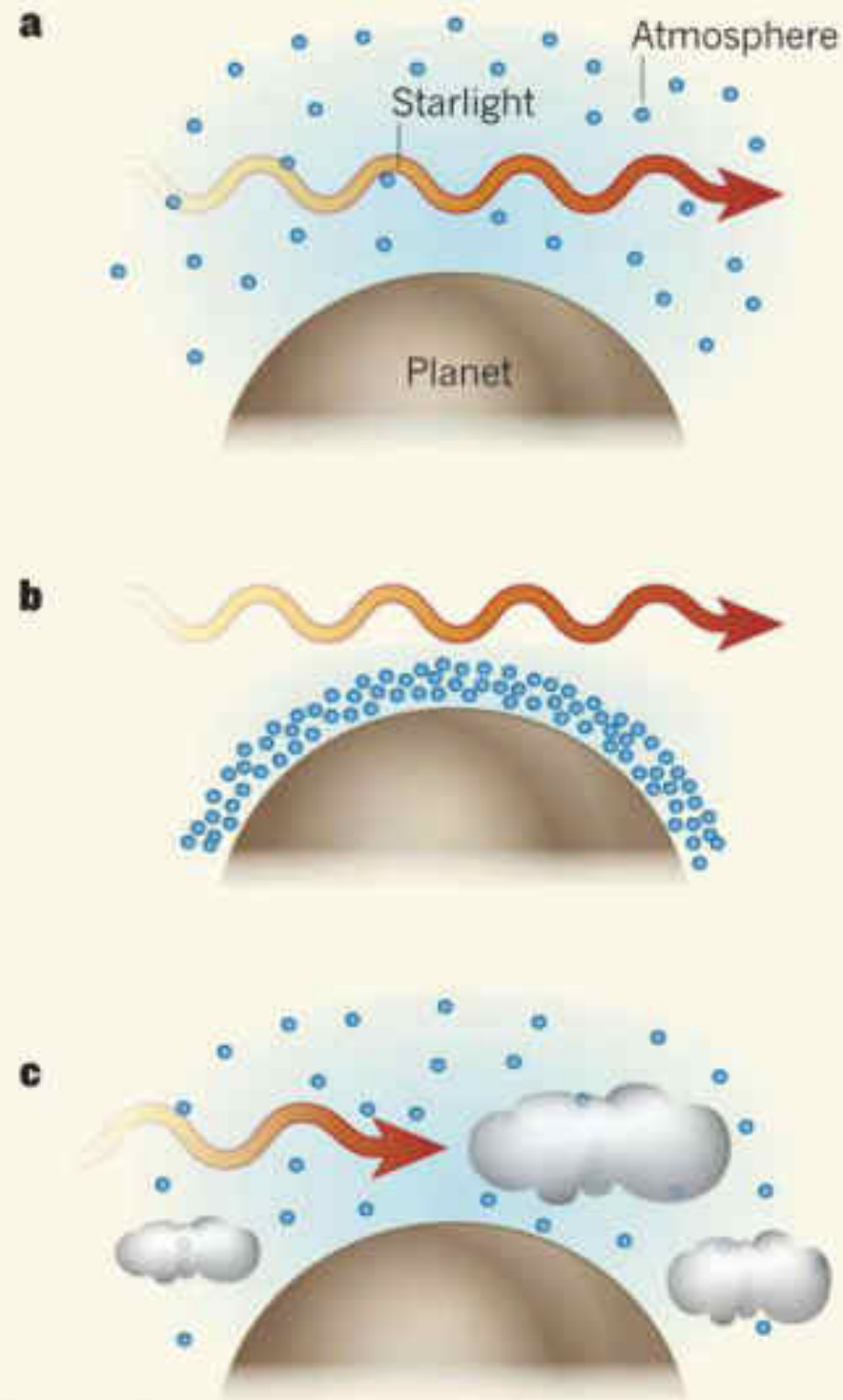
Drake Deming

Atmosfeer meten



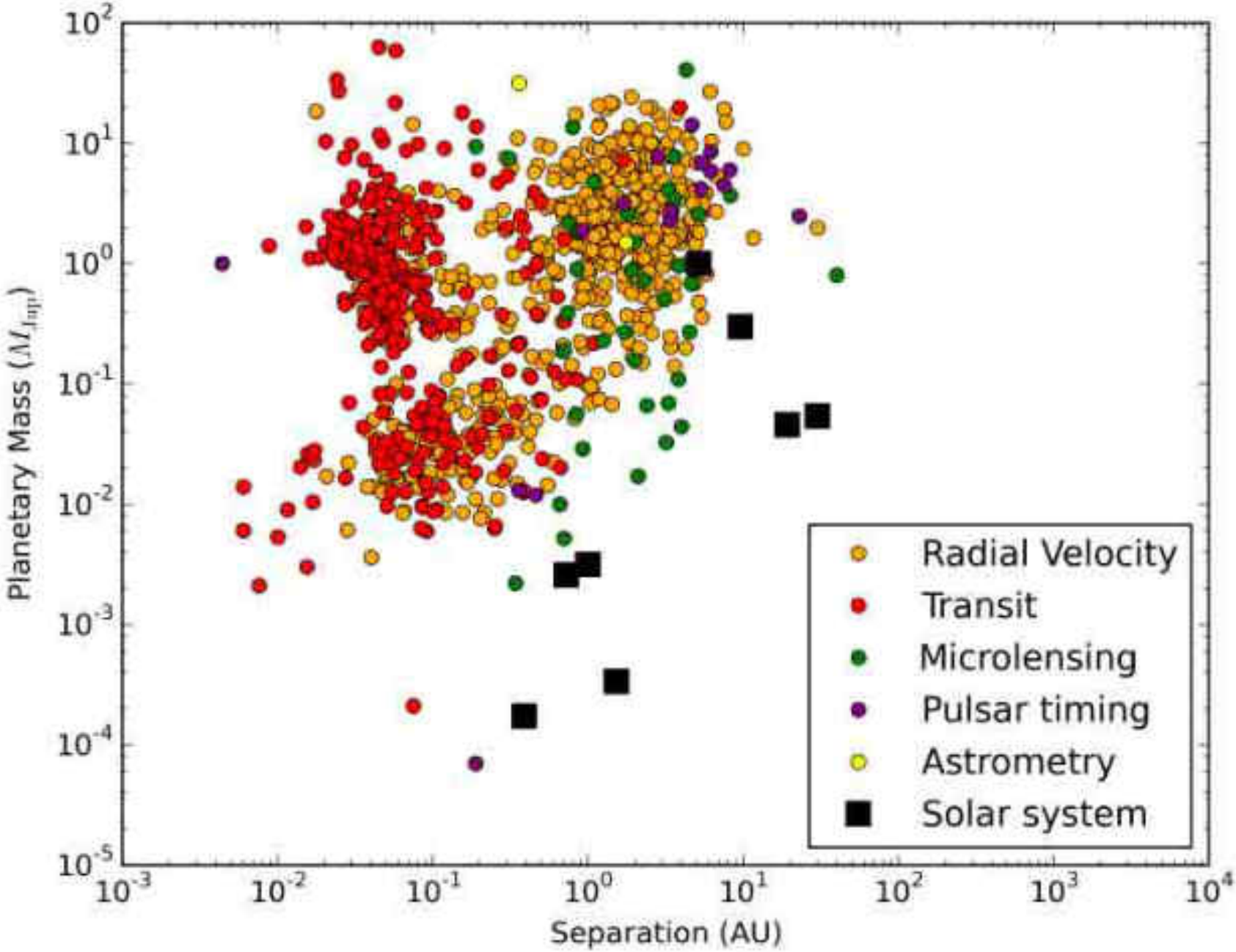


Mark Swain



Drake Deming

Huidige exoplaneten



Direct waarnemen

Hiermee kunnen we:

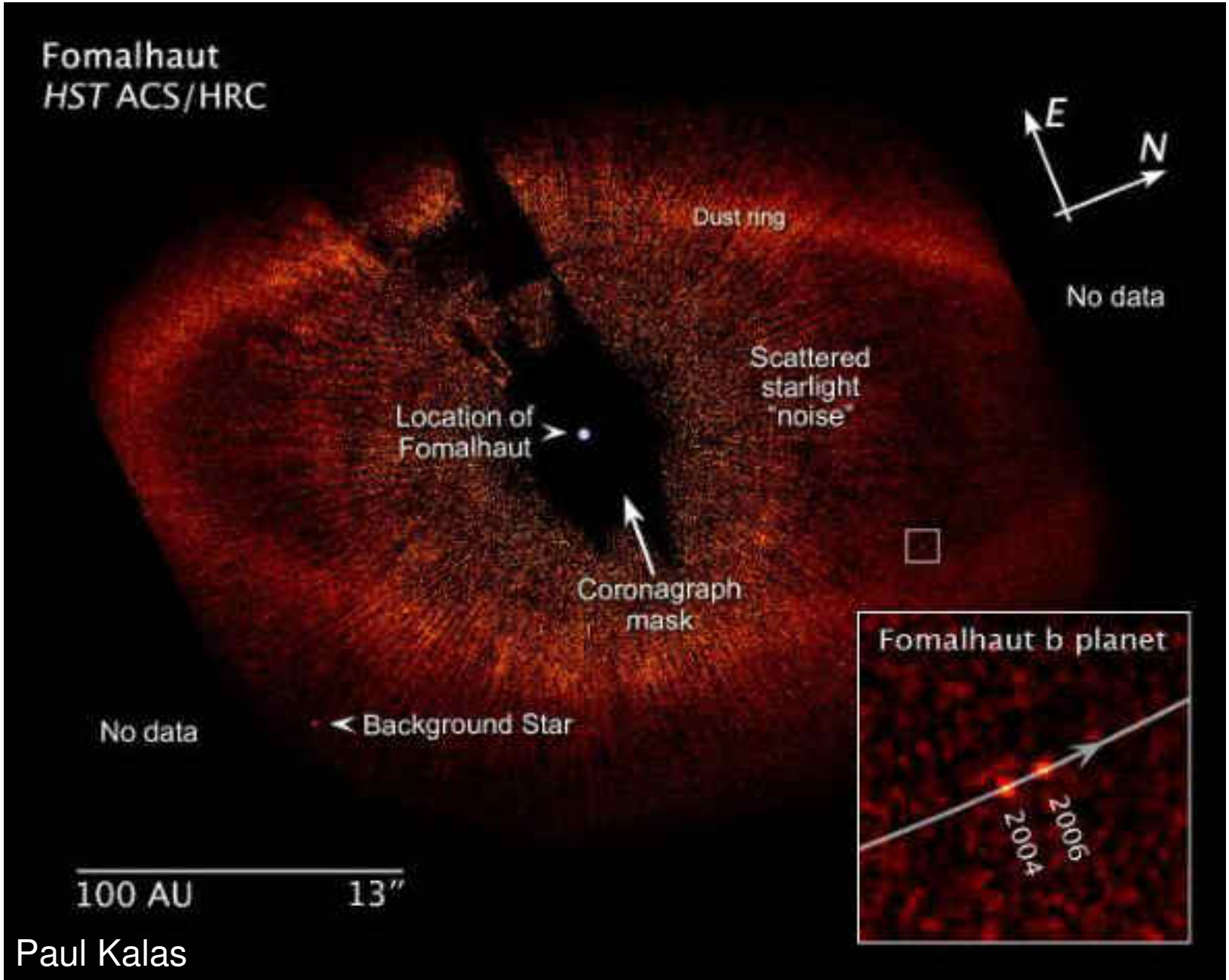
- Planeten ver van de ster waarnemen
- Planeetvormingstheorieen testen
- Rechtstreeks licht van planeetatmosfeer analyseren

Simpelste methode, tevens de moeilijkste

Ster kan gemakkelijk een miljard keer feller zijn

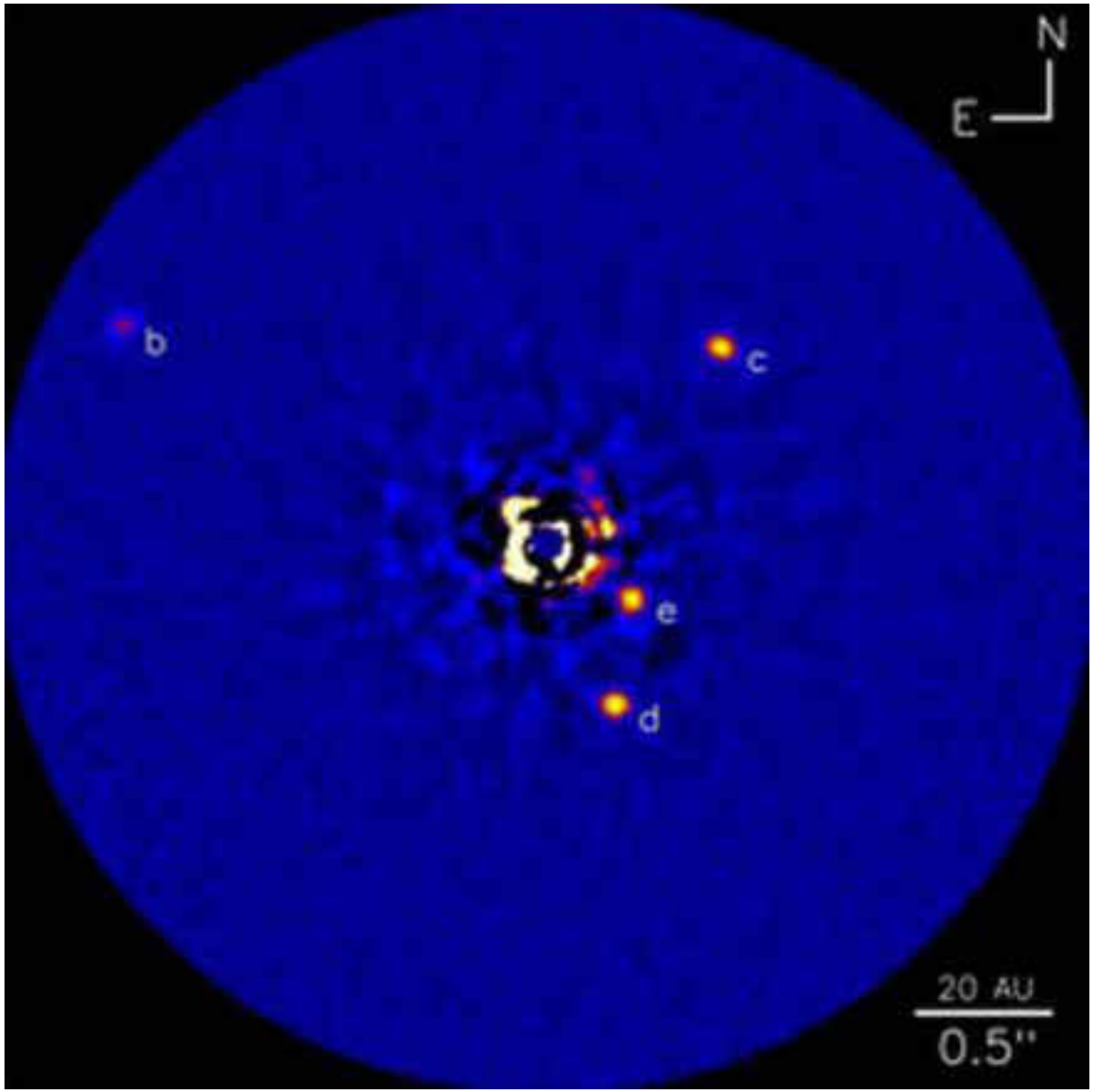
(Vaak vergeleken met vuurtoren en vuurvliegje)

Fomalhaut:
Een stofring en een herdersplaneet



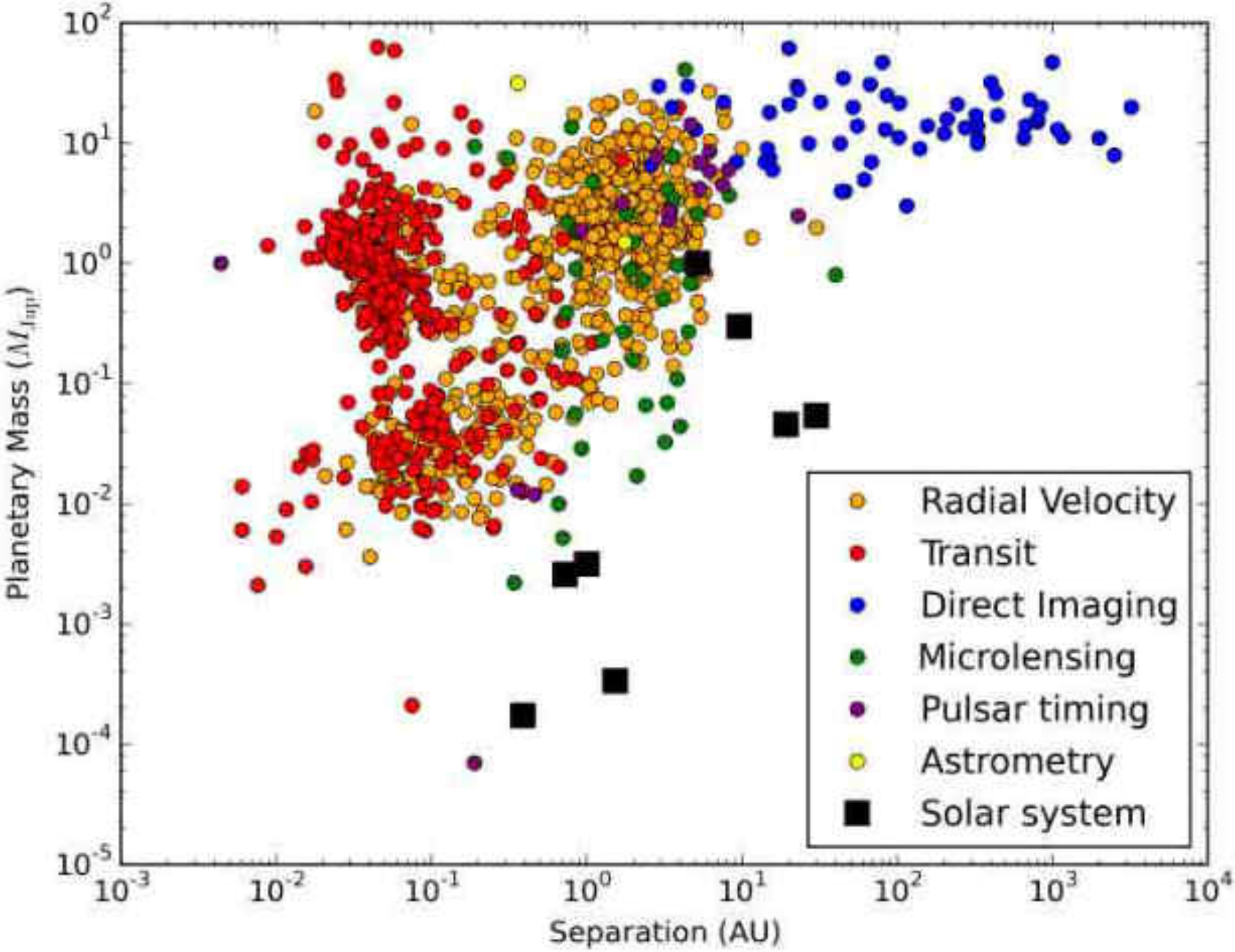
Paul Kalas

HR 8799, een ster met 4 planeten



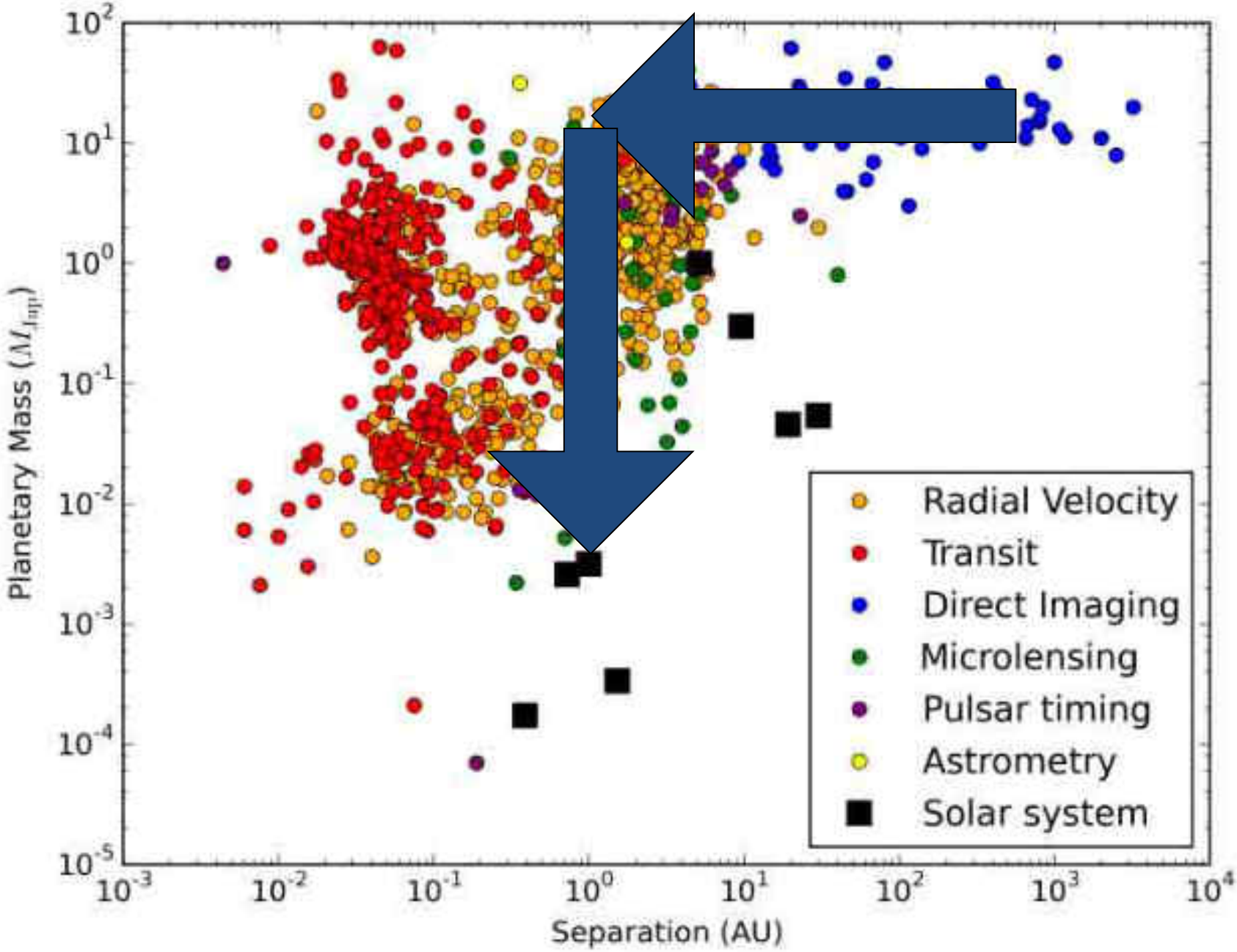
Benjamin Zuckerman

Huidige exoplaneten



<dichterbij de ster

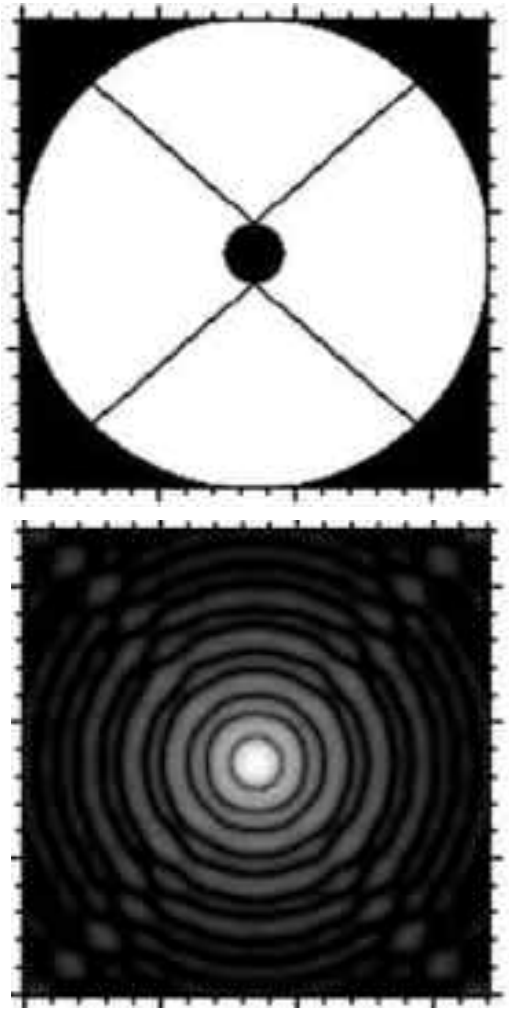
<hoger contrast

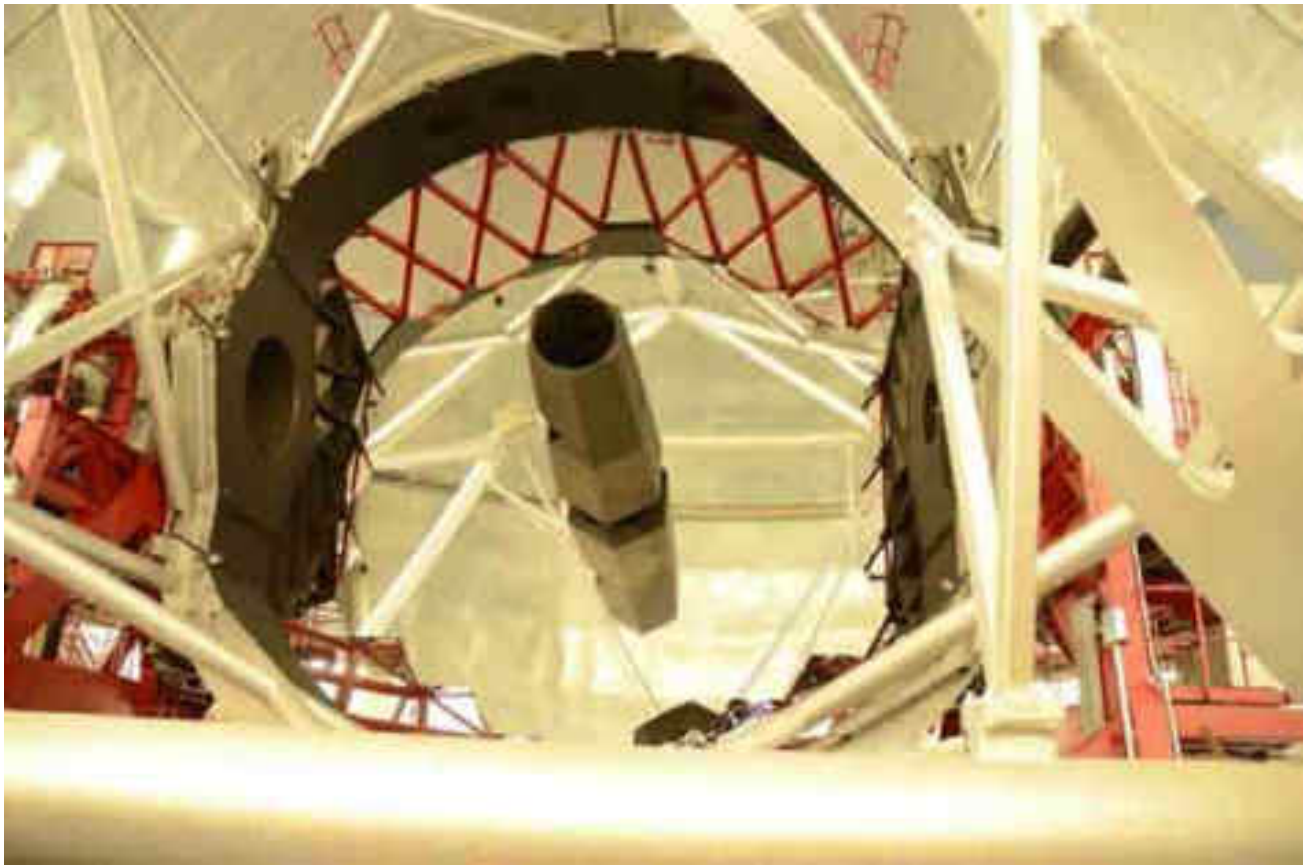


Uitdagingen

1. Ruimtelijk oplossen van planeet
2. Correctie van turbulente atmosfeer
3. Planeetlicht scheiden van sterlicht
4. Onderdrukken van achterblijvend sterlicht

Ruimtelijk oplossen





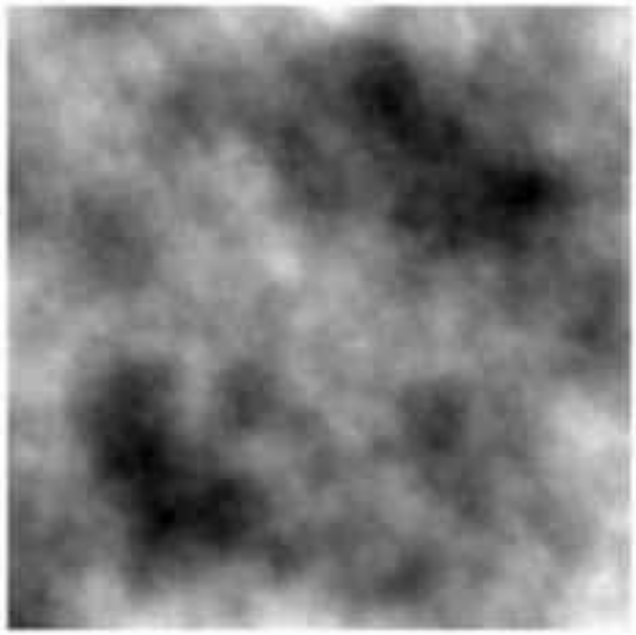
$$\theta = 1.22\,\lambda/D$$

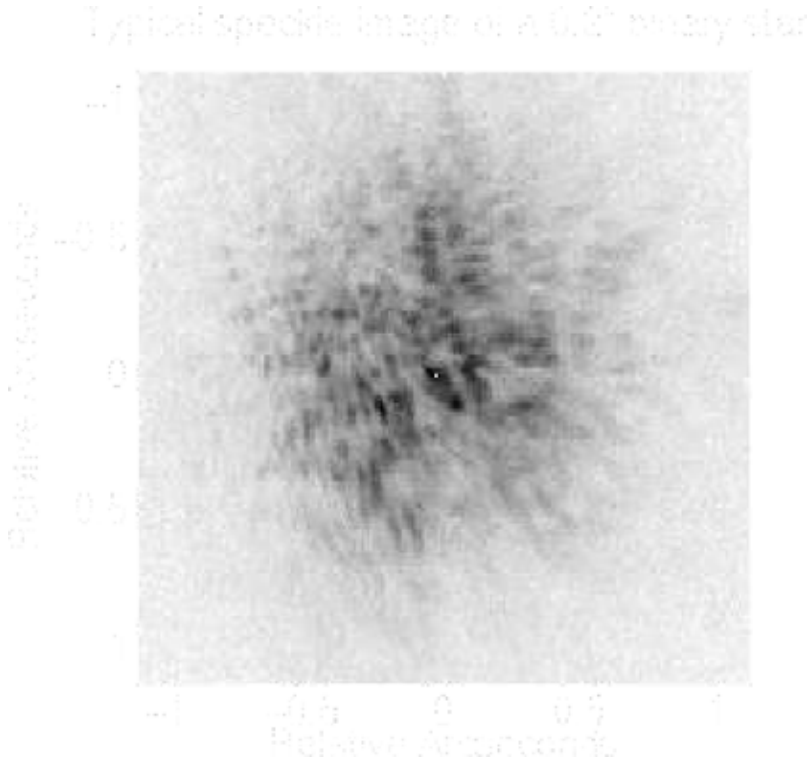
θ is hoek, λ is golflengte, D is diameter

Oplossing

1. Ruimtelijk oplossen van planeet
   Grote telescopen (op Aarde)
2. Correctie van turbulente atmosfeer
3. Planeetlicht scheiden van sterlicht
4. Onderdrukken van achterblijvend sterlicht

Turbulente atmosfeer





Turbulente atmosfeer veroorzaakt uitgesmeerd sterbeeld

$$\theta = 1.22\,\lambda/r_0$$

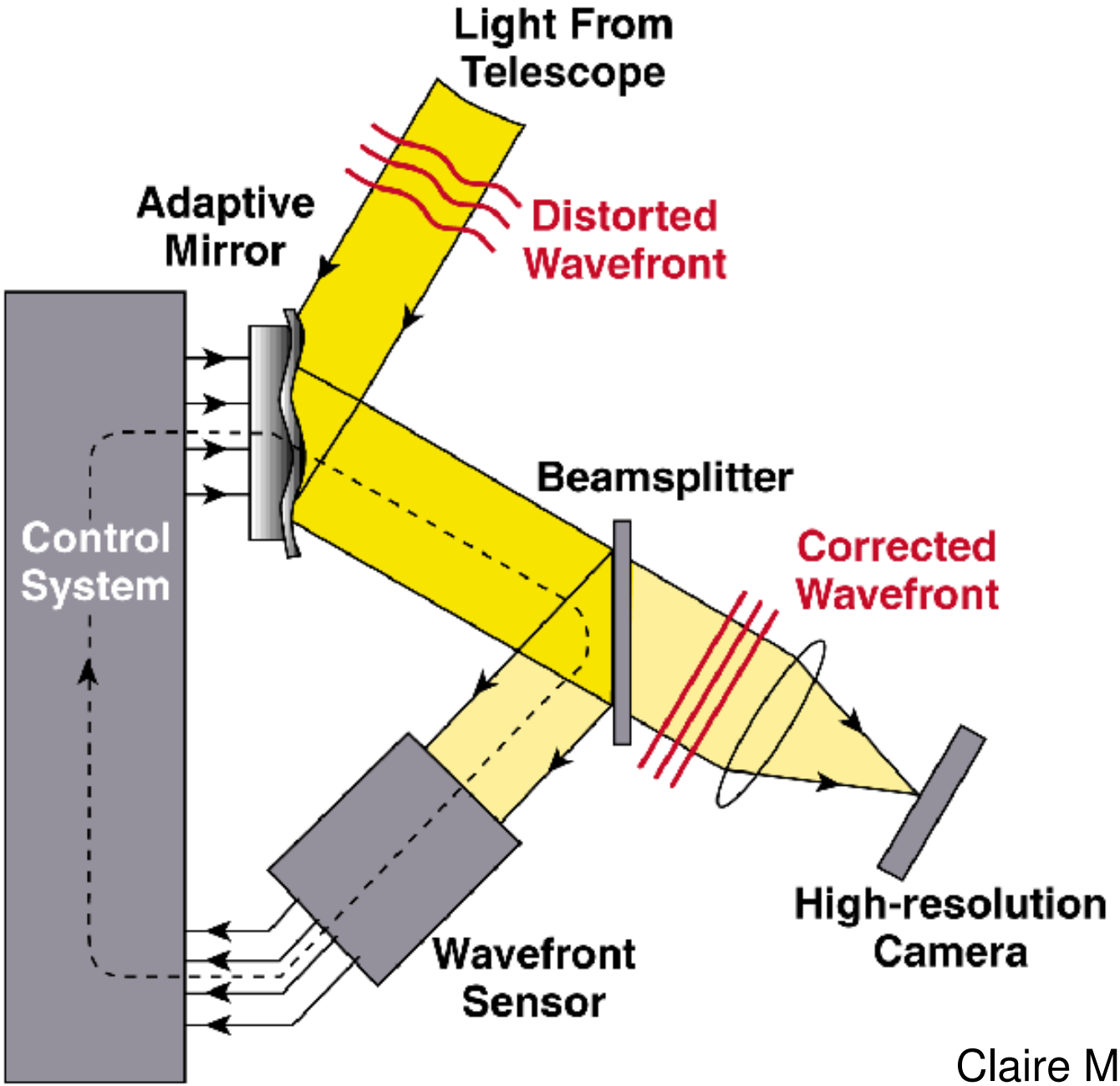
θ is hoek, λ is golflengte, r_0 is turbulentieschaal

Oplossing

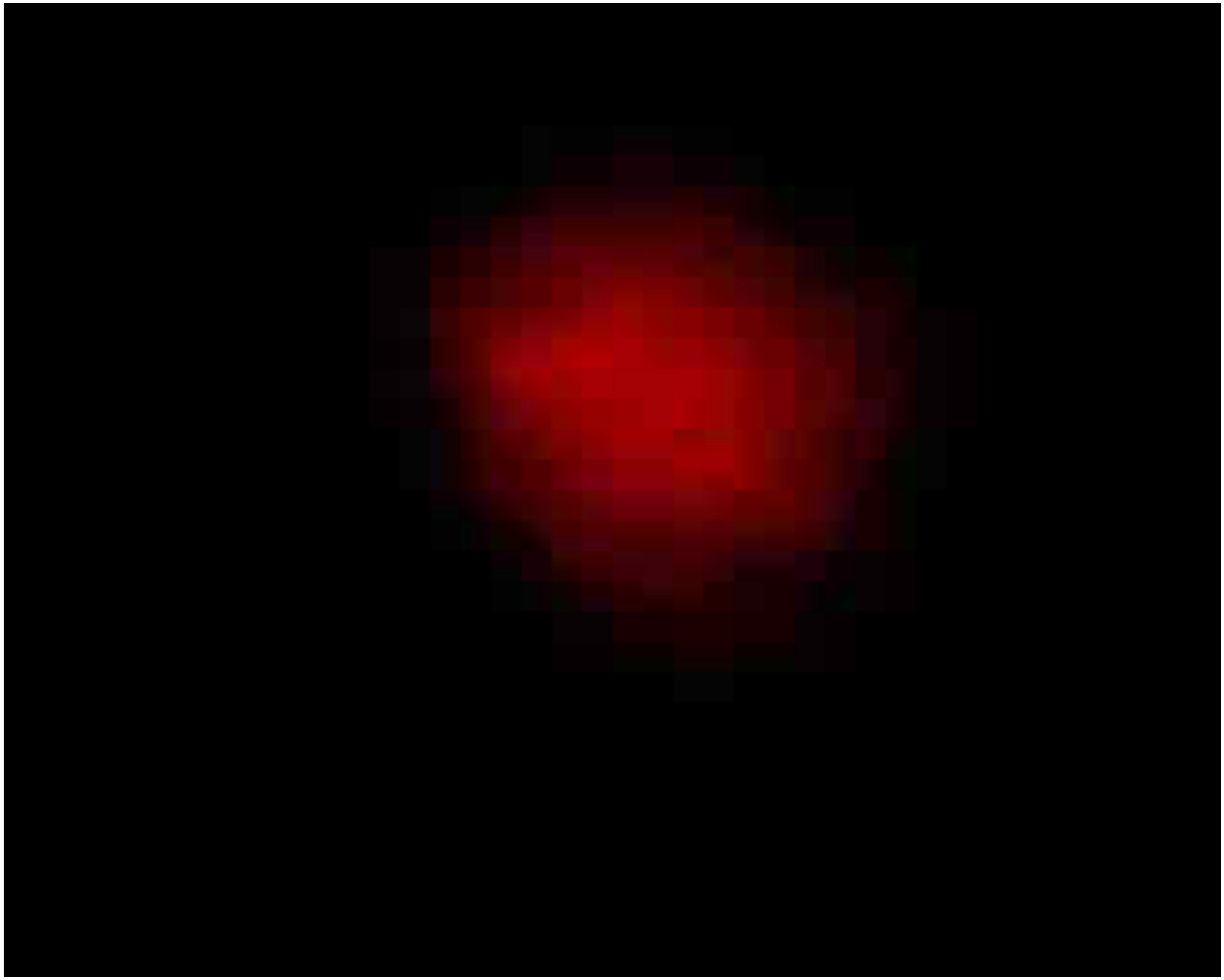
1. Ruimtelijk oplossen van planeet
   Grote telescopen (op Aarde)
2. Correctie van turbulente atmosfeer
   Adaptieve Optica
3. Planeetlicht scheiden van sterlicht

4. Onderdrukken van achterblijvend sterlicht

Adaptieve Optica

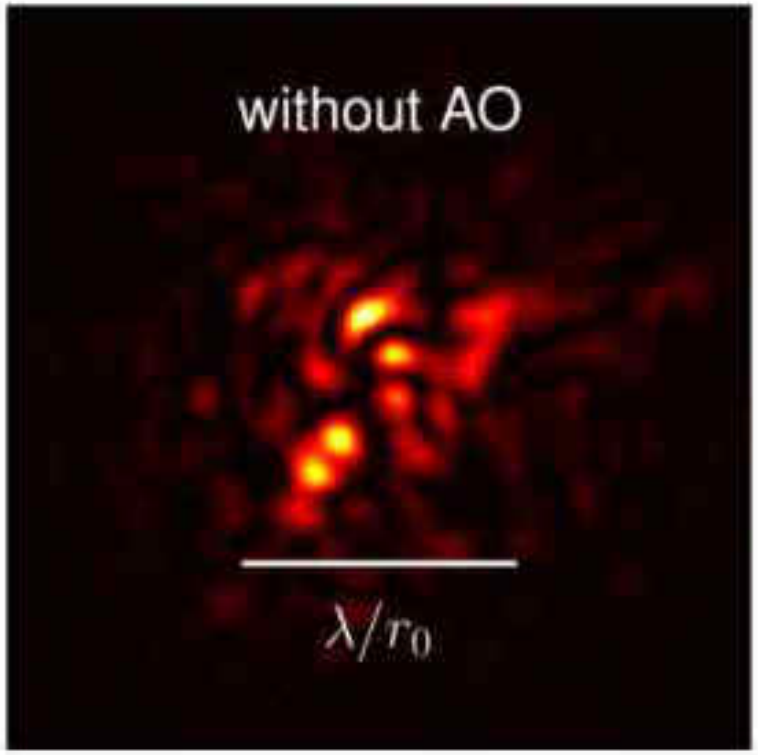


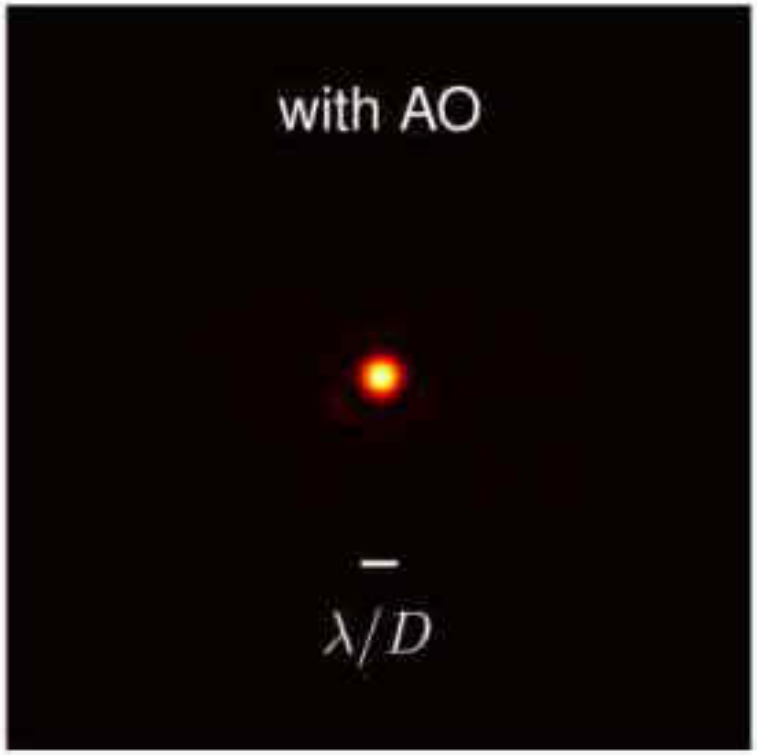
Claire Max



LBT AO

Adaptieve Optica

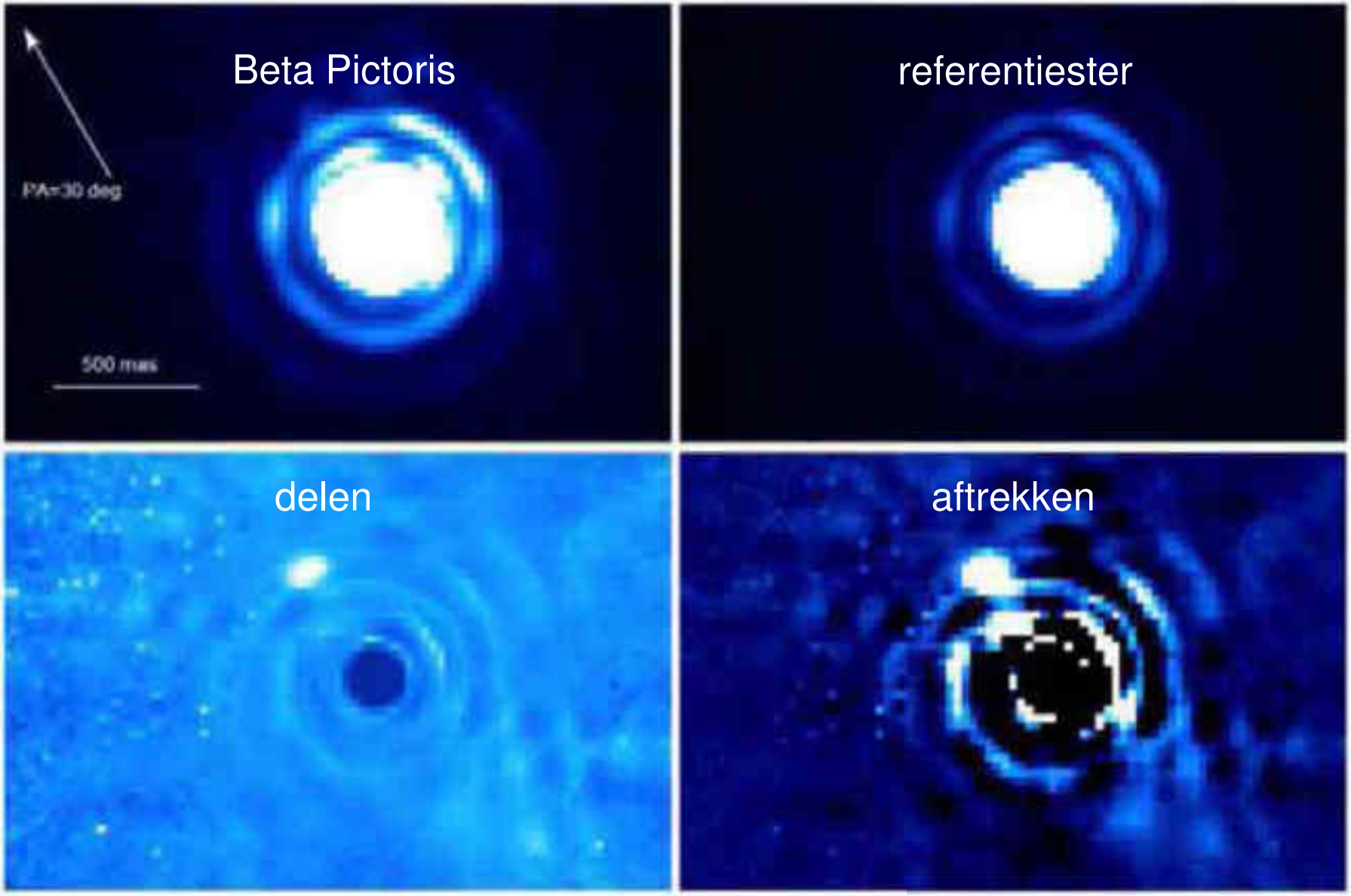




Oplossing

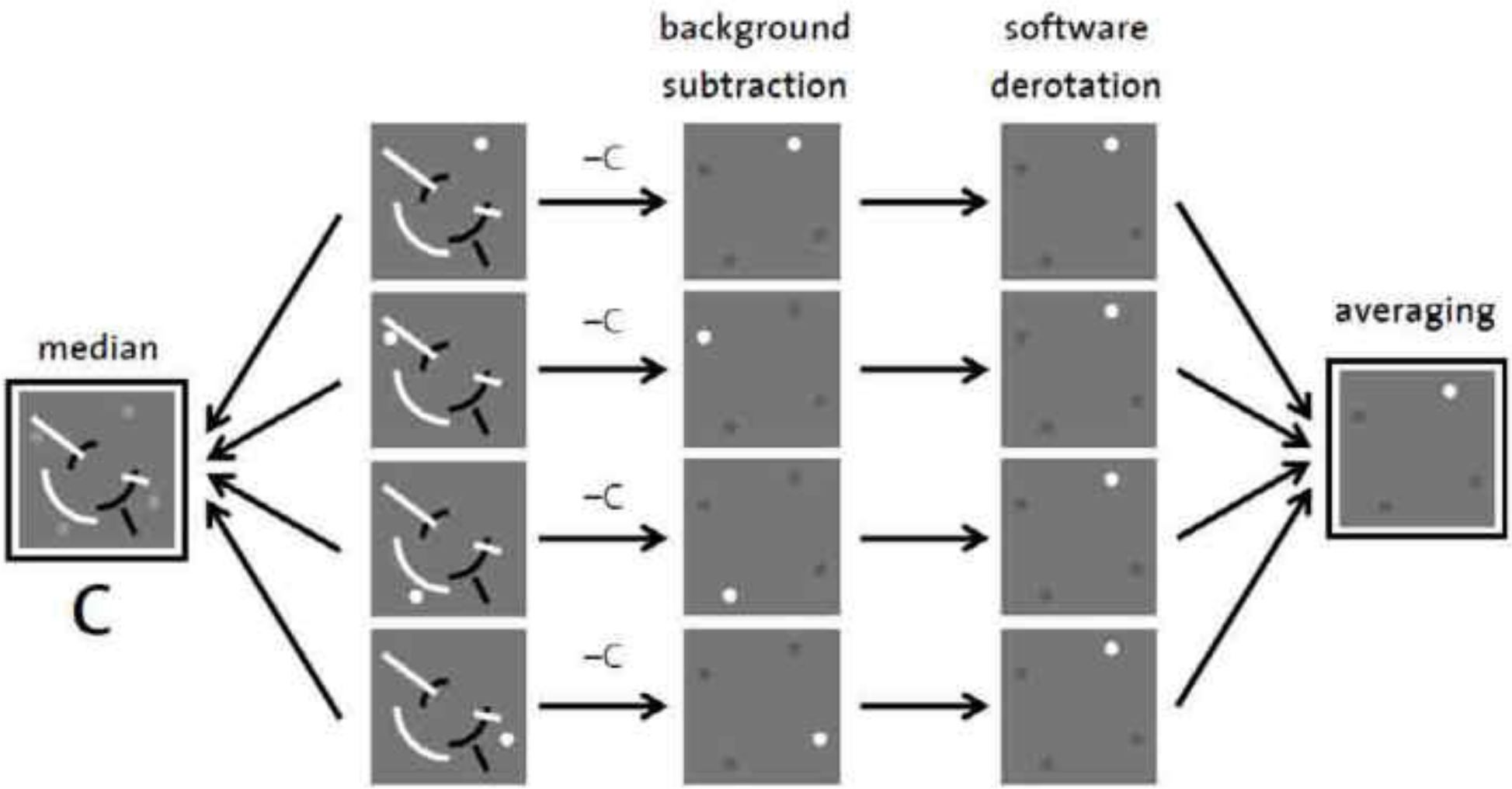
1. Ruimtelijk oplossen van planeet
   Grote telescopen (op Aarde)
2. Correctie van turbulente atmosfeer
   Adaptieve Optica
3. Planeetlicht scheiden van sterlicht
   Sterlicht subtractietechnieken
4. Onderdrukken van achterblijvend sterlicht

Referentiester



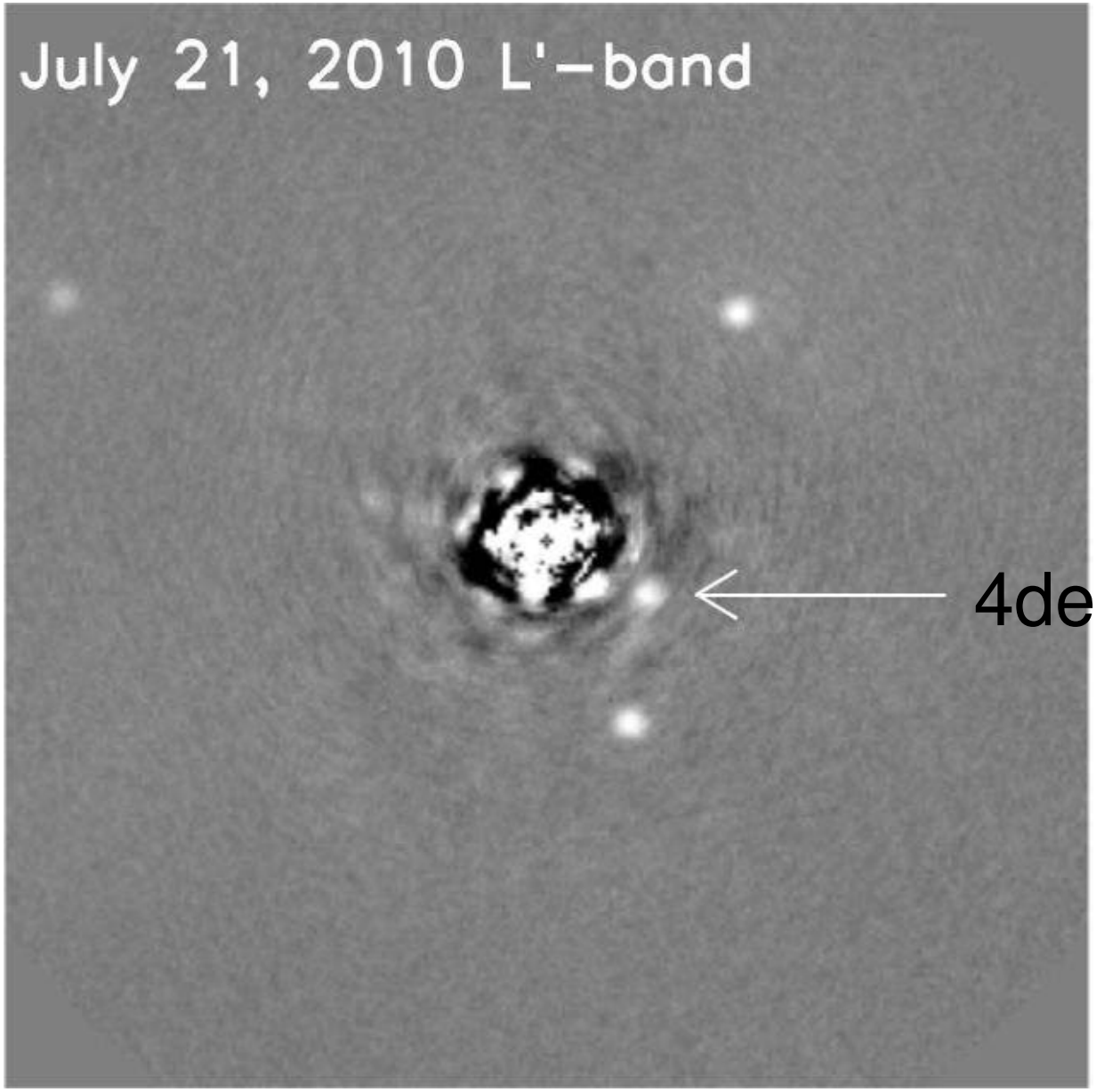
Lagrange et al. (2009)

‘Angular Differential Imaging’



Christian Thalmann

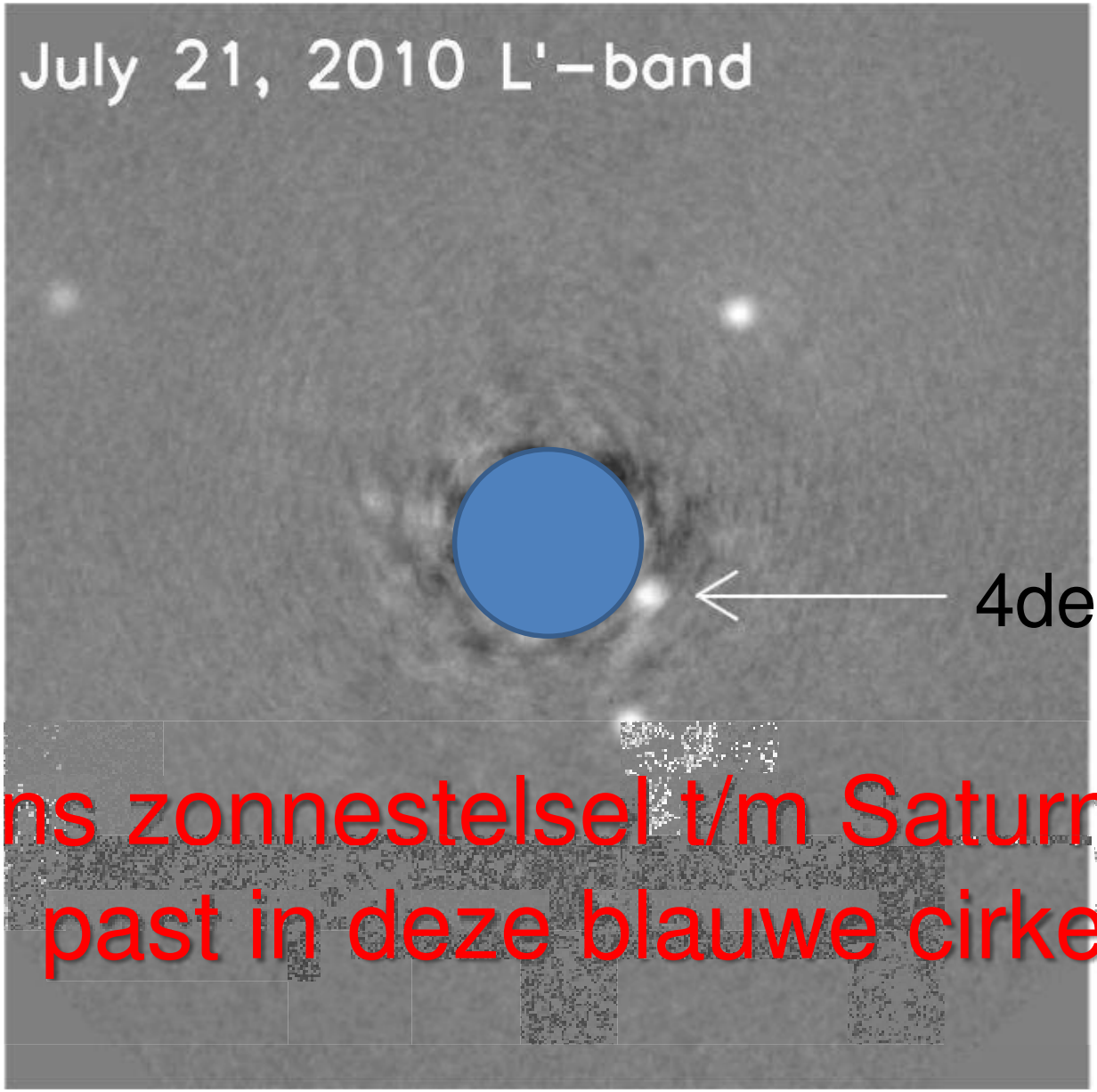
HR8799 stelsel



4de planeet !

Marois et al., 2010

HR8799 stelsel



4de planeet !

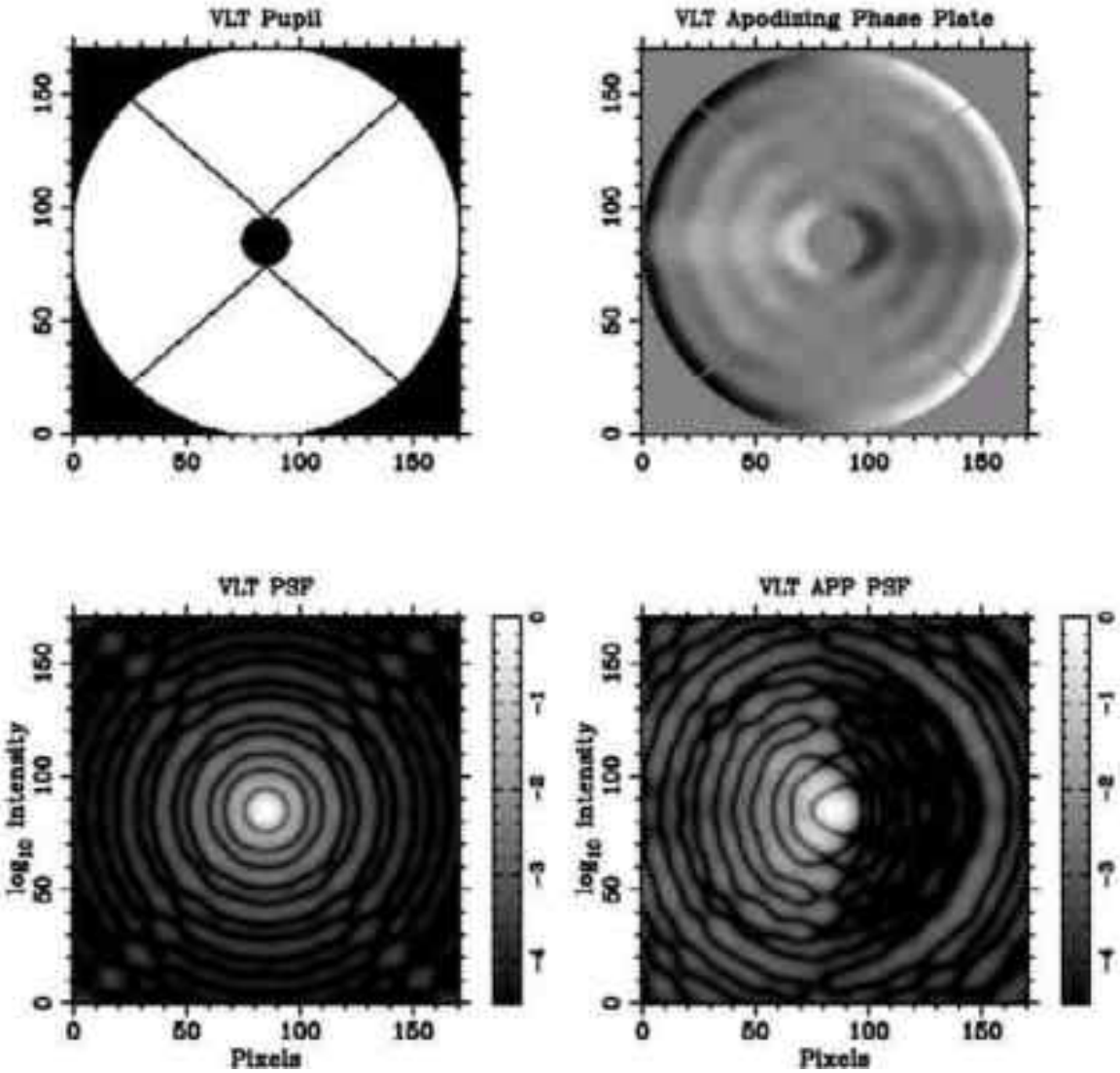
Ons zonnestelsel t/m Saturnus past in deze blauwe cirkel

Marois et al., 2010

Oplossing

1. Ruimtelijk oplossen van planeet
   Grote telescopen (op Aarde)
2. Correctie van turbulente atmosfeer
   Adaptieve Optica
3. Planeetlicht scheiden van sterlicht
   Sterlicht subtractietechnieken
4. Onderdrukken van achterblijvend sterlicht
   Coronagrafen [mijn promotieonderzoek]

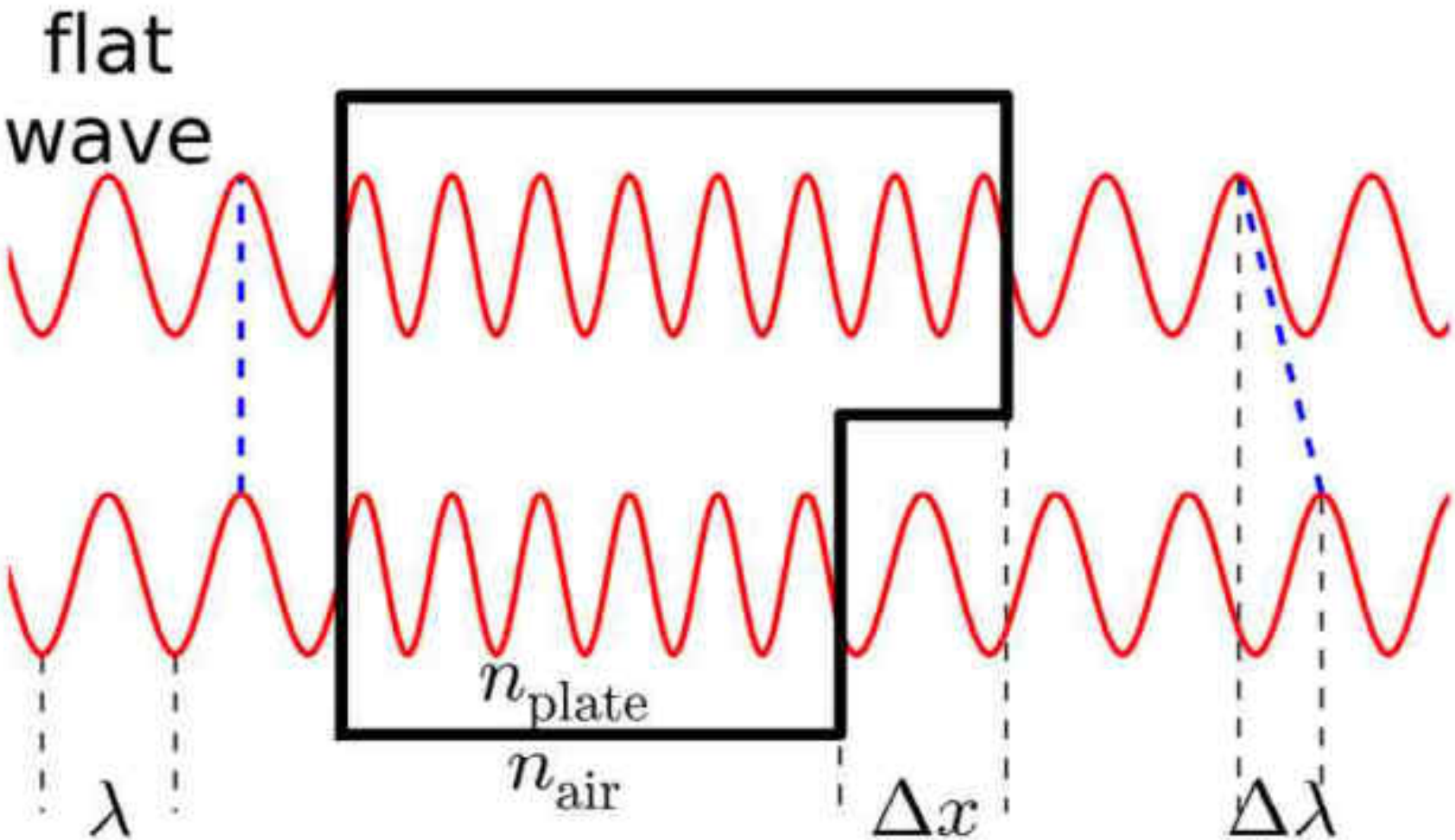
Apodizing Phase Plate (APP)



Zink Selenide met een draaibank bewerken

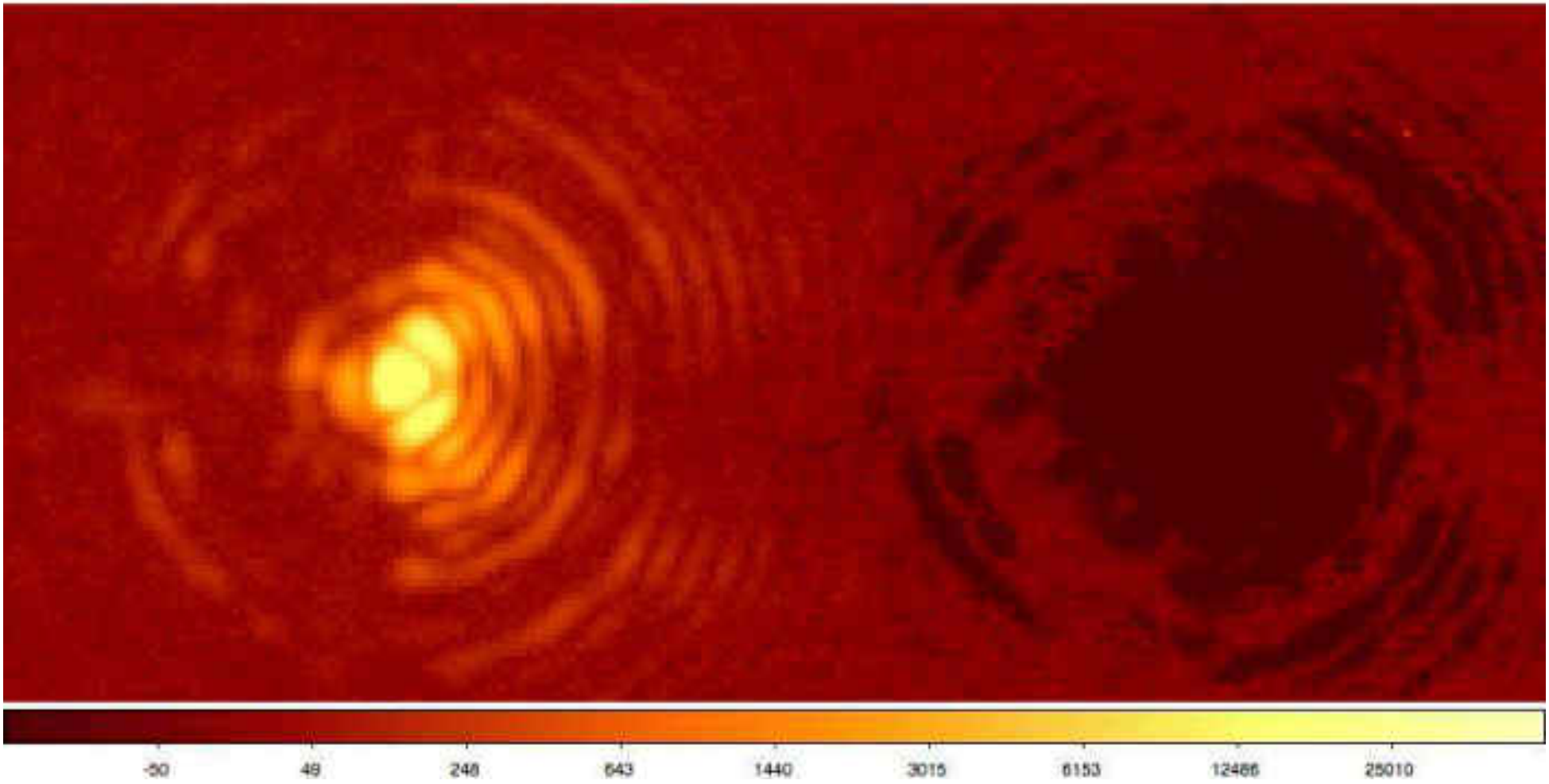
Codona & Angel, (2004)
Codona et al. (2006)
Kenworthy et al. (2007)

Klassieke fase



$$\Delta\phi = 2\pi\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 2\pi\frac{(n_{\text{plate}} - n_{\text{air}})\Delta x}{\lambda}$$

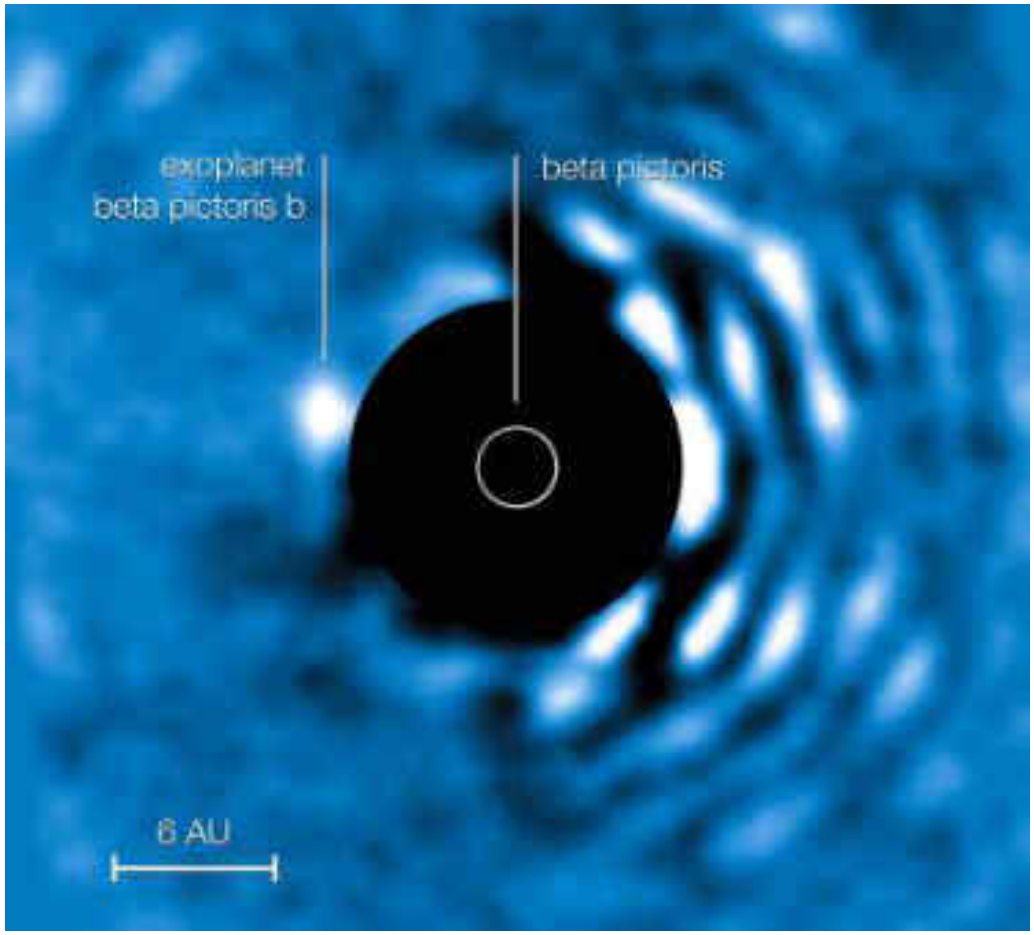
Echte opnames



Realtime VLT NACO APP data met positiesprongen

Wetenschap met APP

Beta Pictoris b

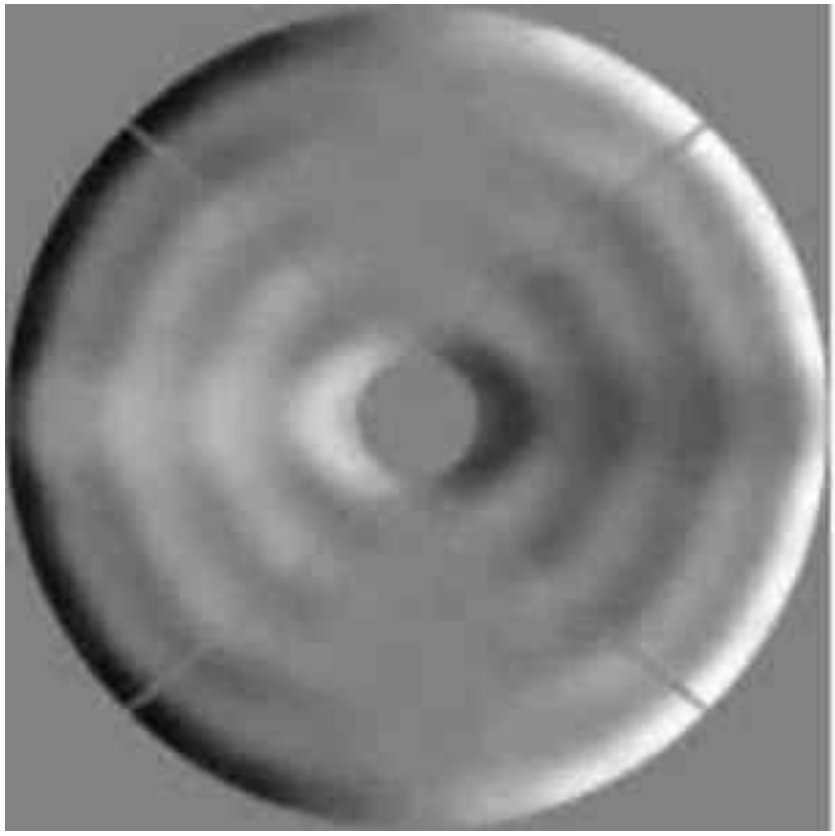


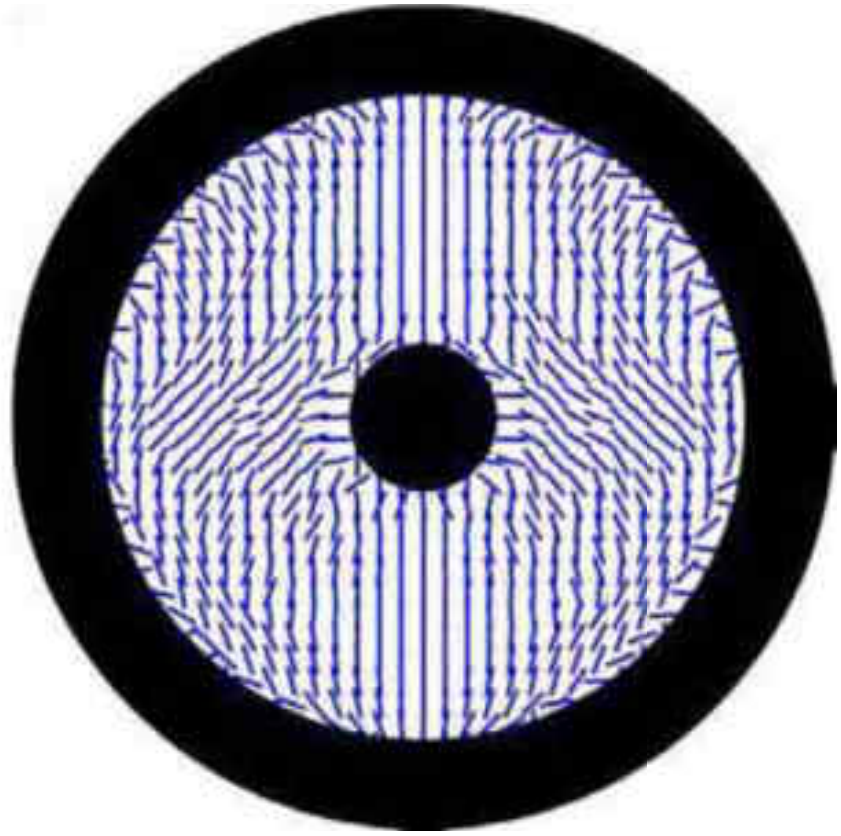
Quanz et al. 2010

Voordelen en nadelen van APP

+ Enkel stuk glas
+ Makkelijk uit te lijnen
+ Ongevoelig voor vibraties
+ Kleine binnenwerkhoek
+ Hoog contrast
- Enkelzijdig donker gat
- Chromatisch
- Extreme fasepatronen niet fabriceerbaar

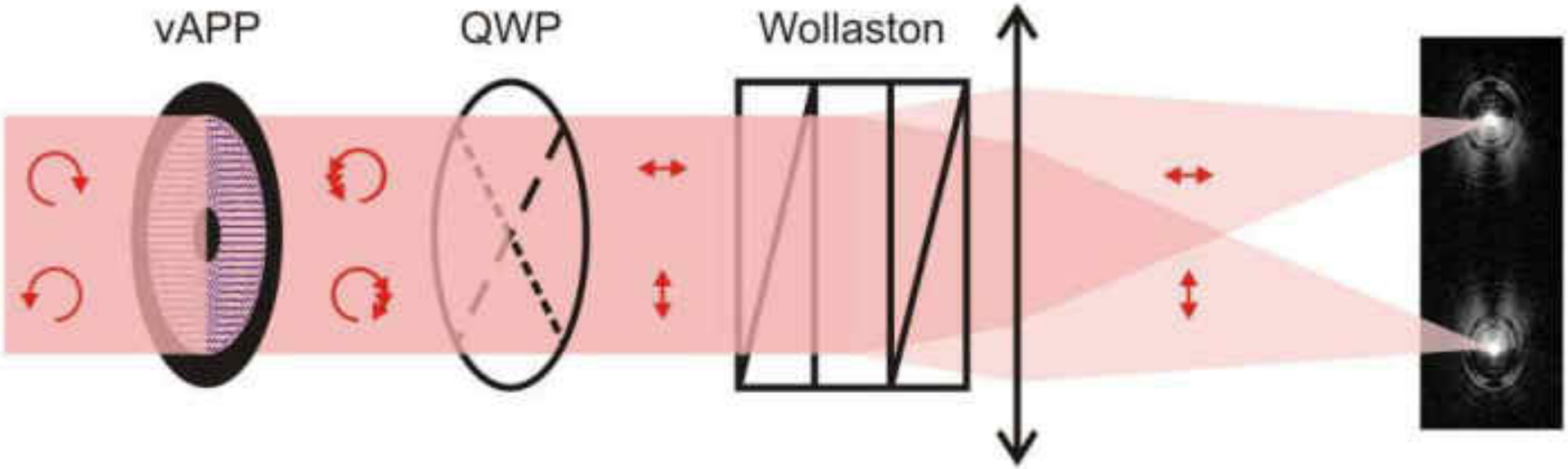
Klassieke => Geometrische fase





Van diktevariaties in glas naar hoekverschillen in een halfgolf-plaat

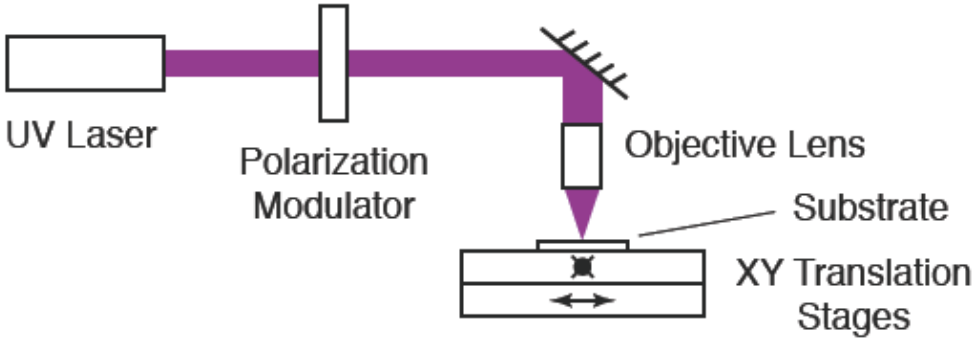
vector-APP (vAPP) schema



Snik et al. (Proc. SPIE 8450, 2012)

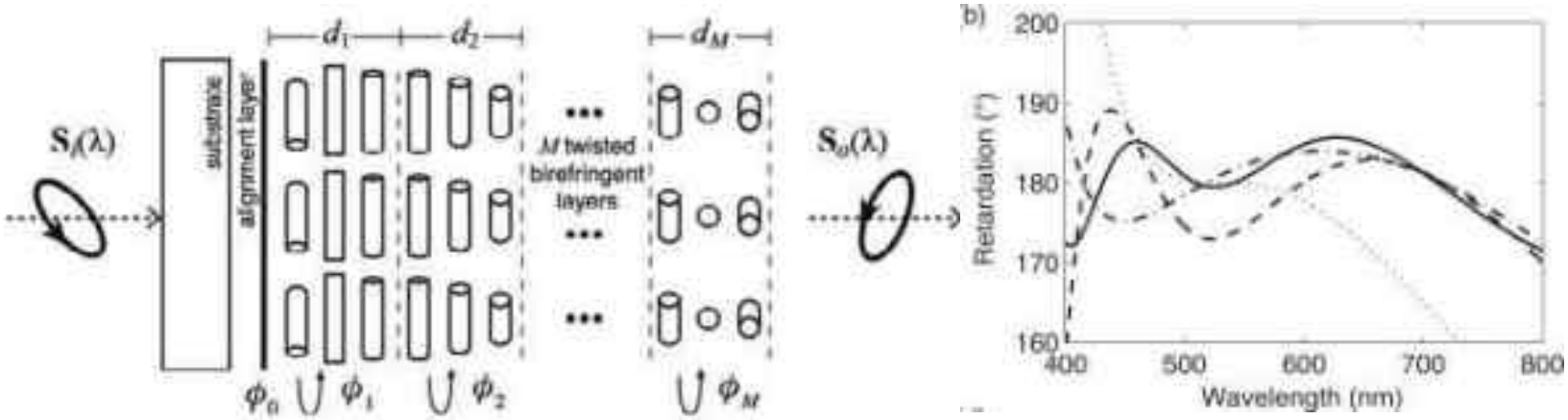
Vloeibaar kristalproductie

1. elk fasepatroon via laserschrijftechniek



Miskiewicz & Escuti (2014)

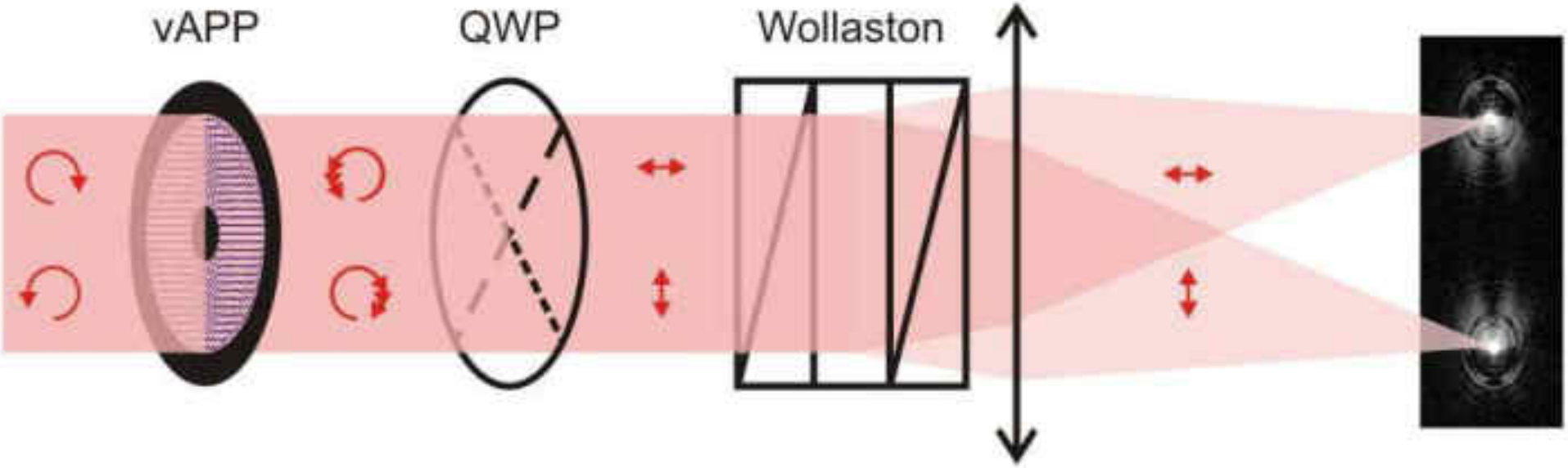
2. achromatizatie met meerdere zelfuitlijnende lagen



Komanduri et al. (2013)

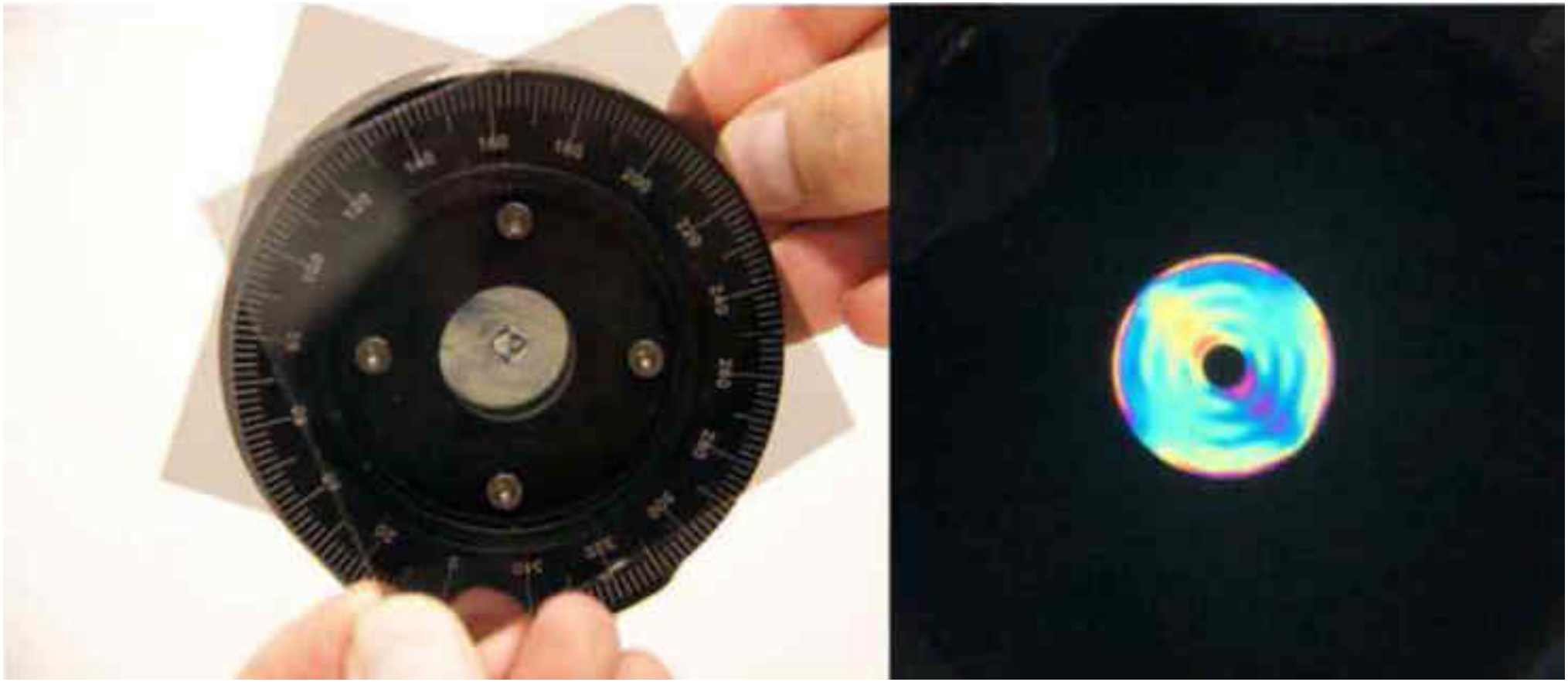
Alle problemen opgelost met vloeibare kristallen

- Halfgolf retarder gemaakt met vloeibaar kristal in een **gekozen patroon** zorgt voor faseverschil met een **achromatische golflengteafhankelijkheid**
- Splitsen van circulaire polarisatie zorgt voor **complementaire PSFs**

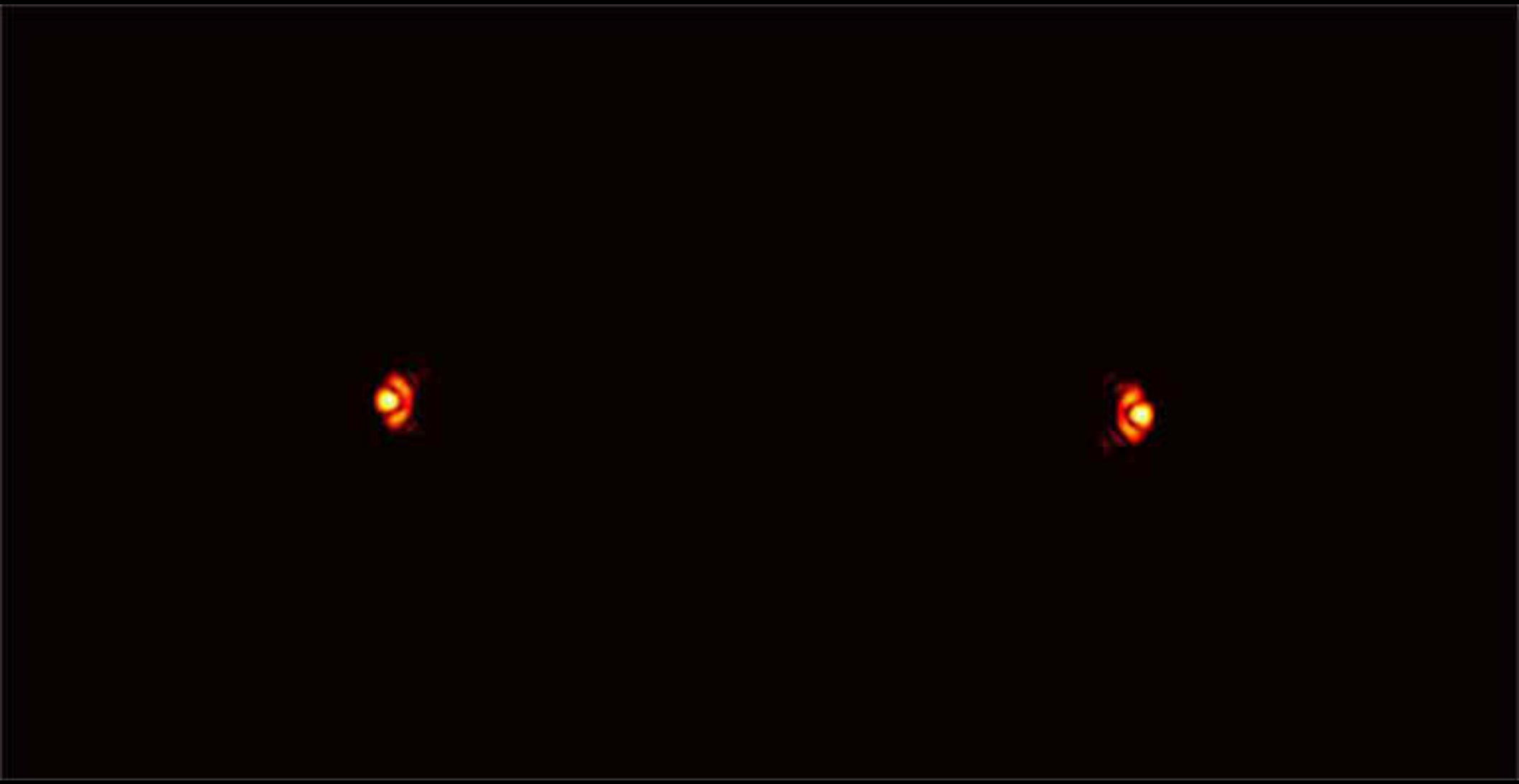


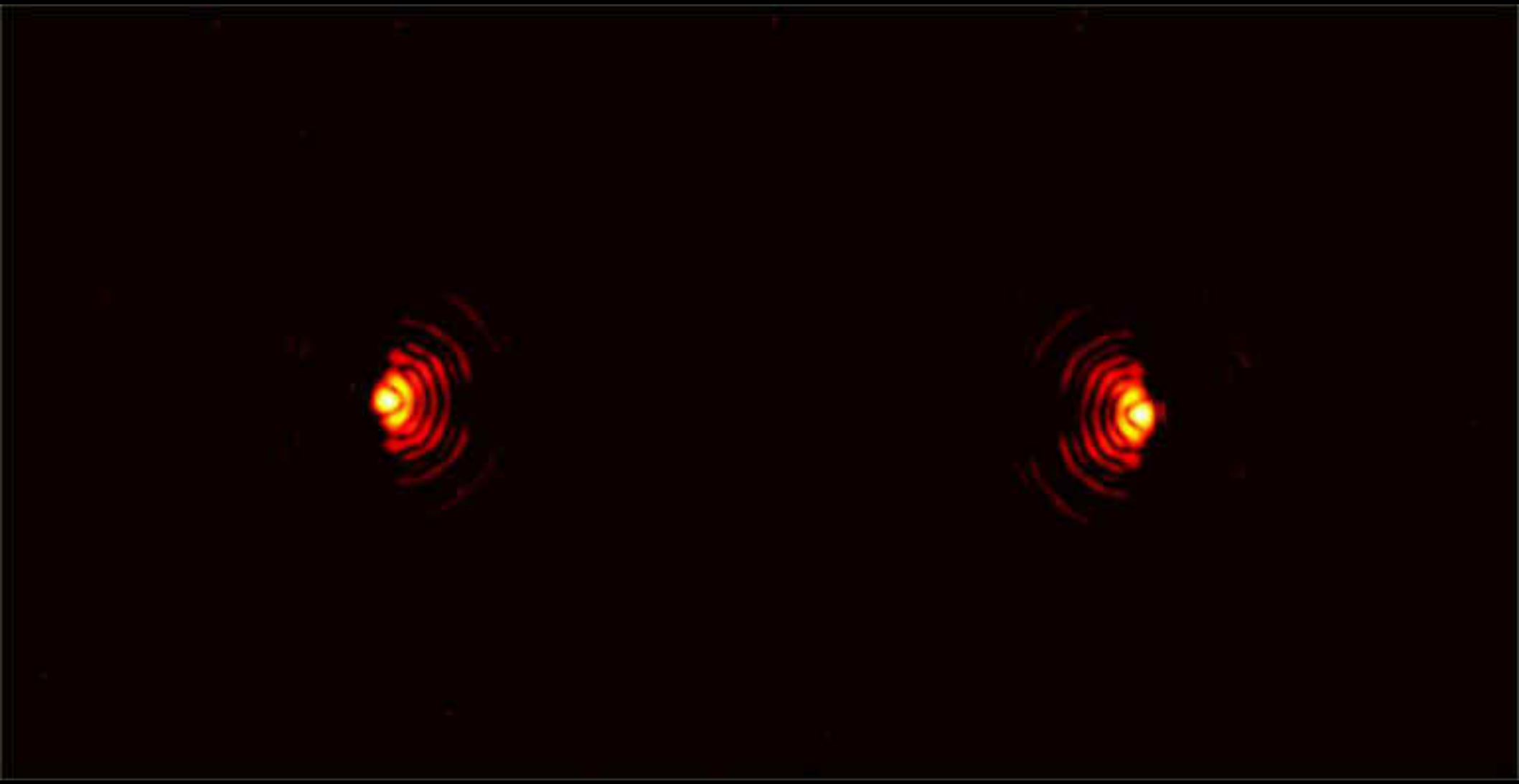
Snik et al. (Proc. SPIE 8450, 2012)

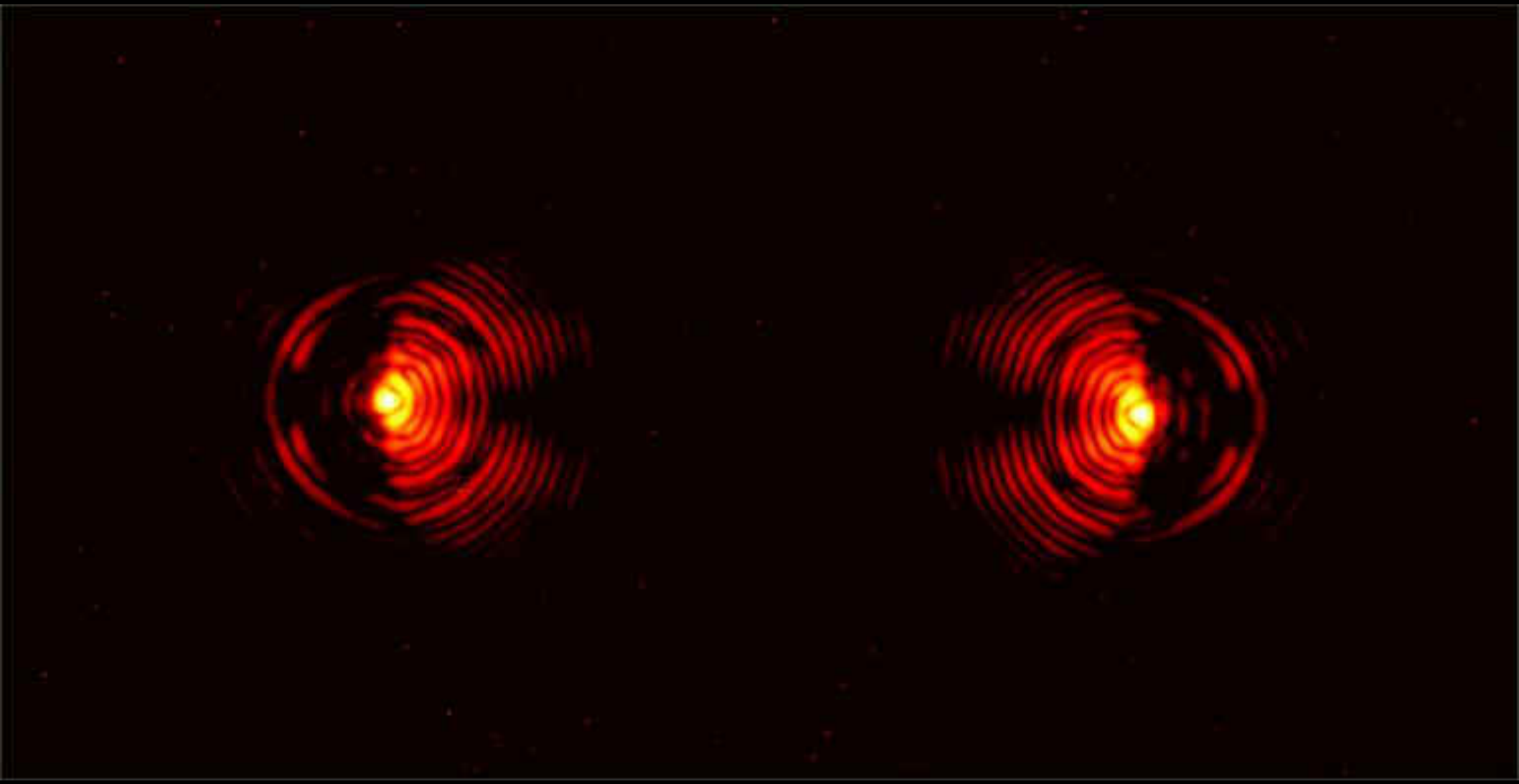
Eerste breedband vAPP prototype



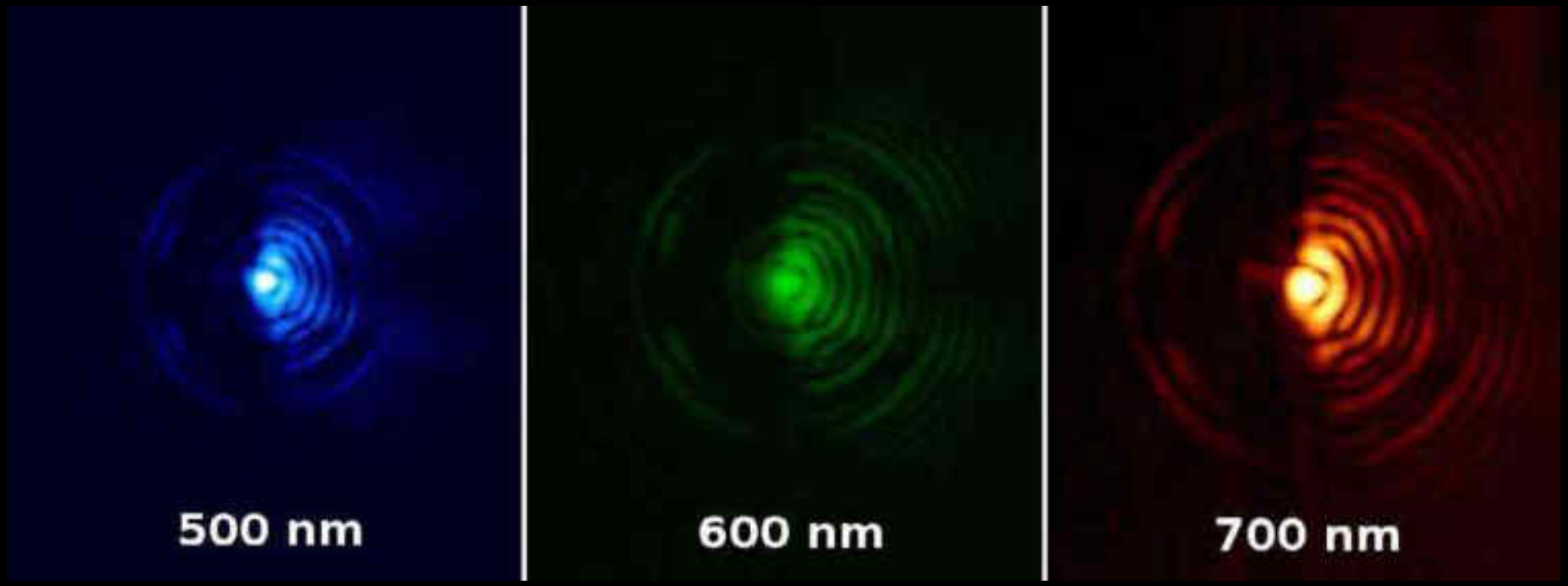
Otten et al, Optics Express, (2014)







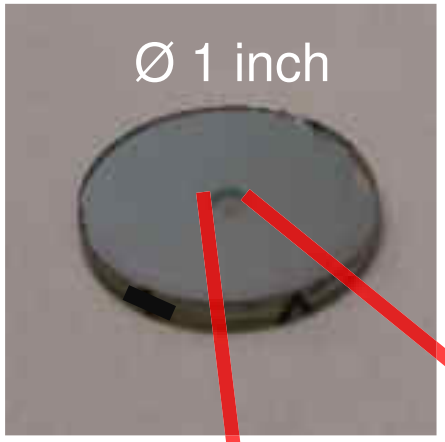
Achromatisch gedrag



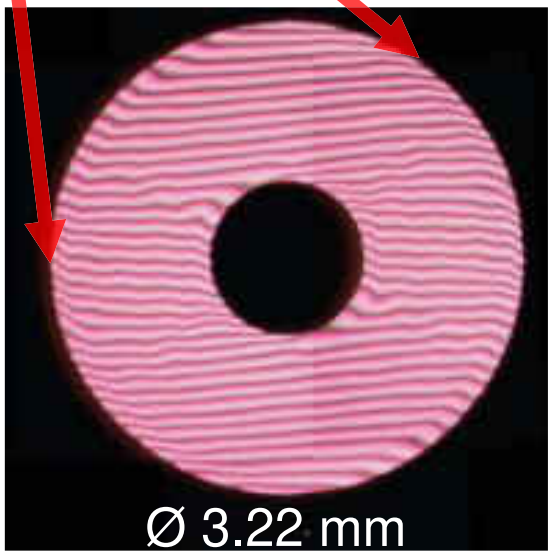
Clay/MagAO

MegAO

Installatie



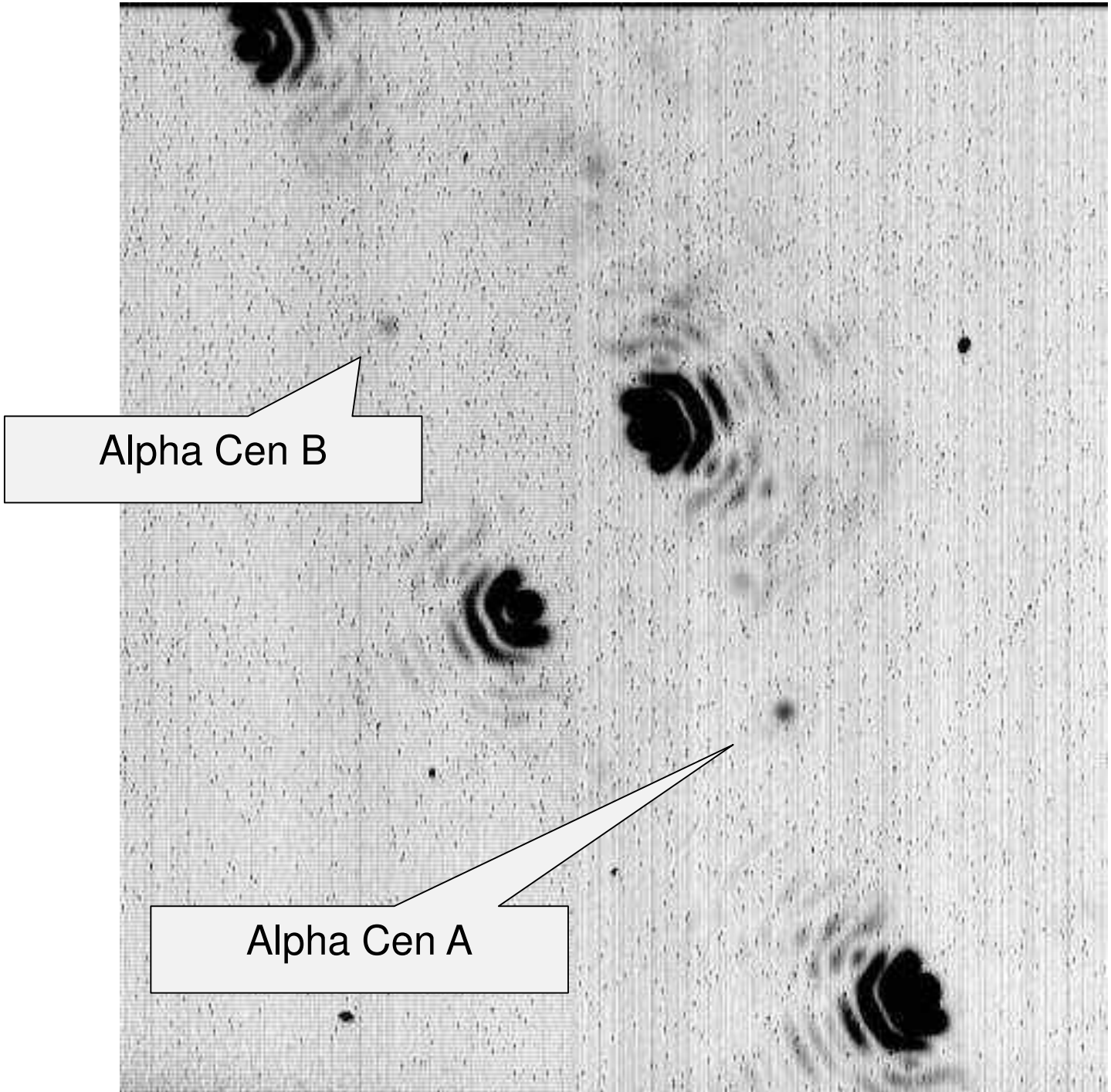
ImagineOptix &
Geometric-Phase
Photonics Lab NCSU



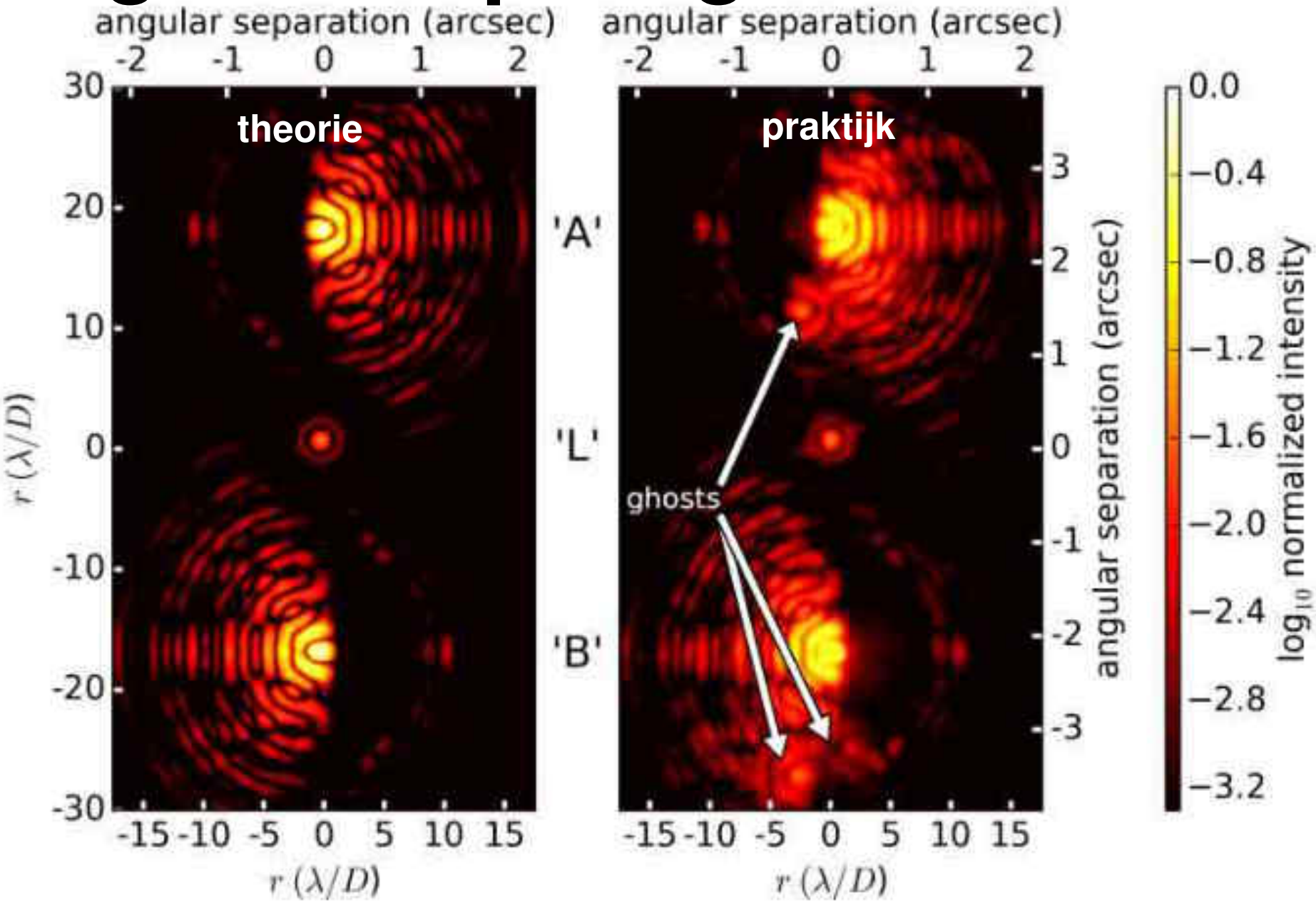
Jared Males

‘First light’ op MagAO – Mei 2015

‘First light’ op MagAO – Mei 2015

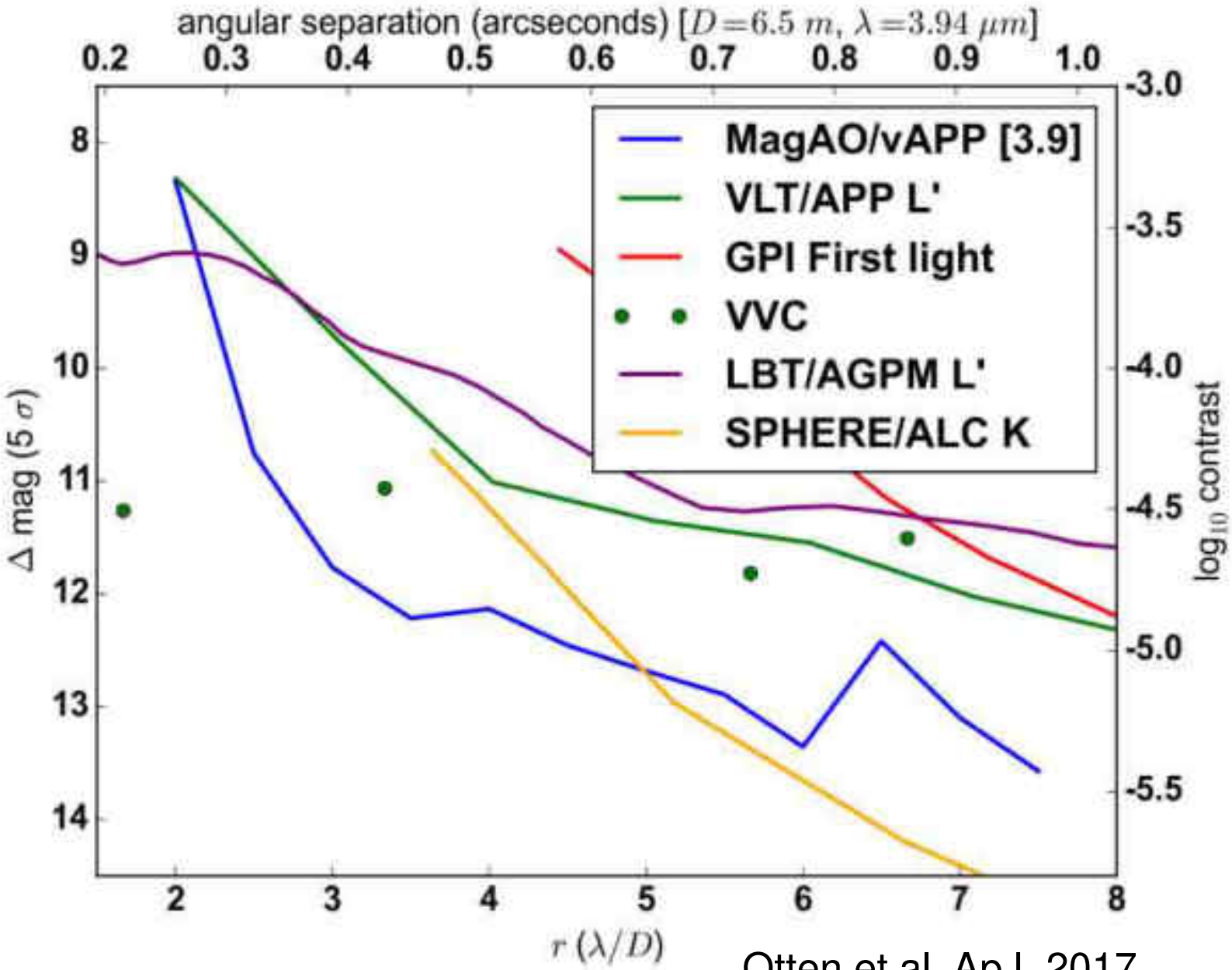


gvAPP op MagAO/Clio2

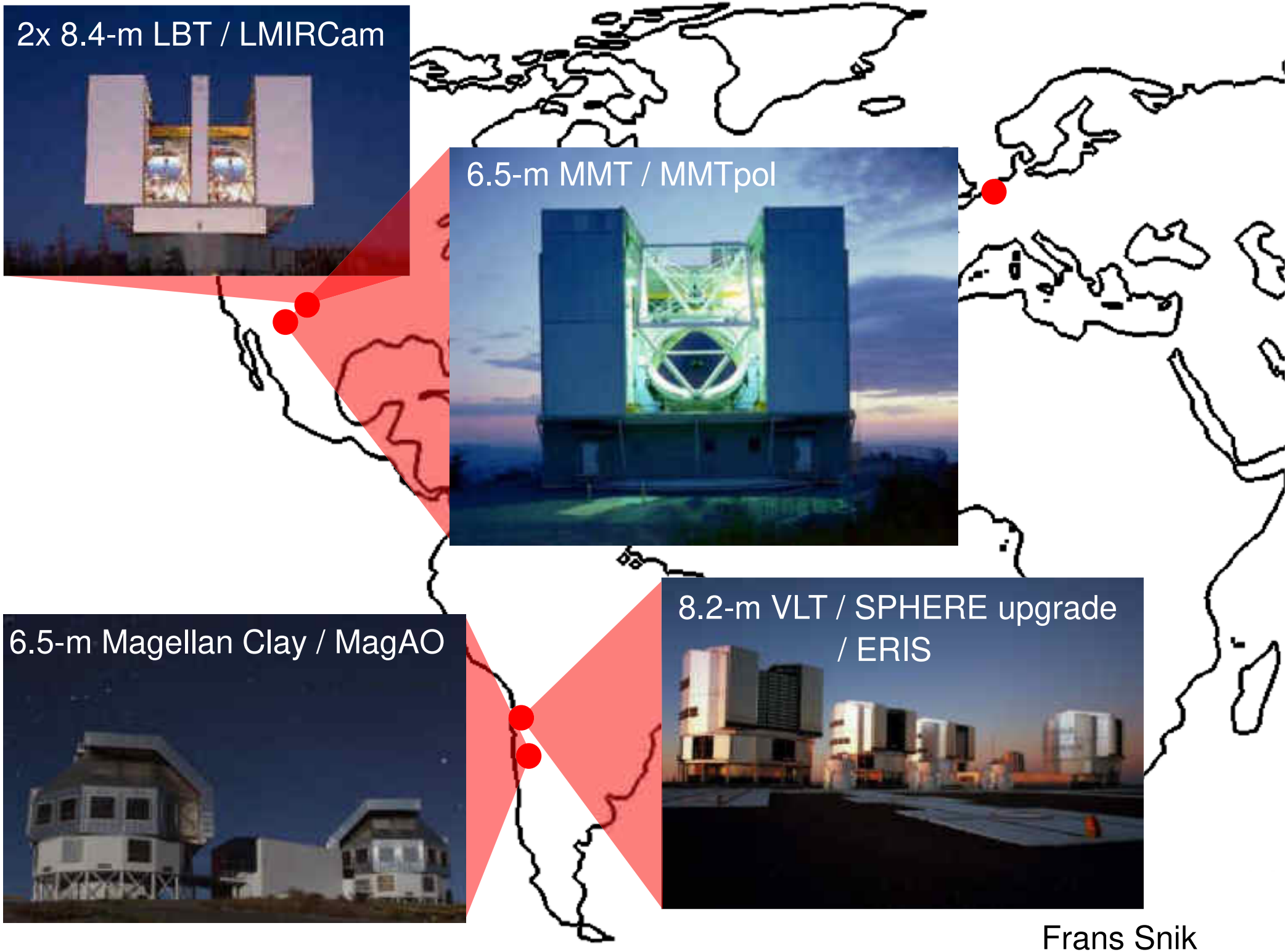


Otten et al, ApJ, 2017

praktijktest



Otten et al, ApJ, 2017


2x 8.4-m LBT / LMIRCam
6.5-m MMT / MMTpol
6.5-m Magellan Clay / MagAO
8.2-m VLT / SPHERE upgrade / ERIS

Frans Snik

E-ELT
dit is een auto

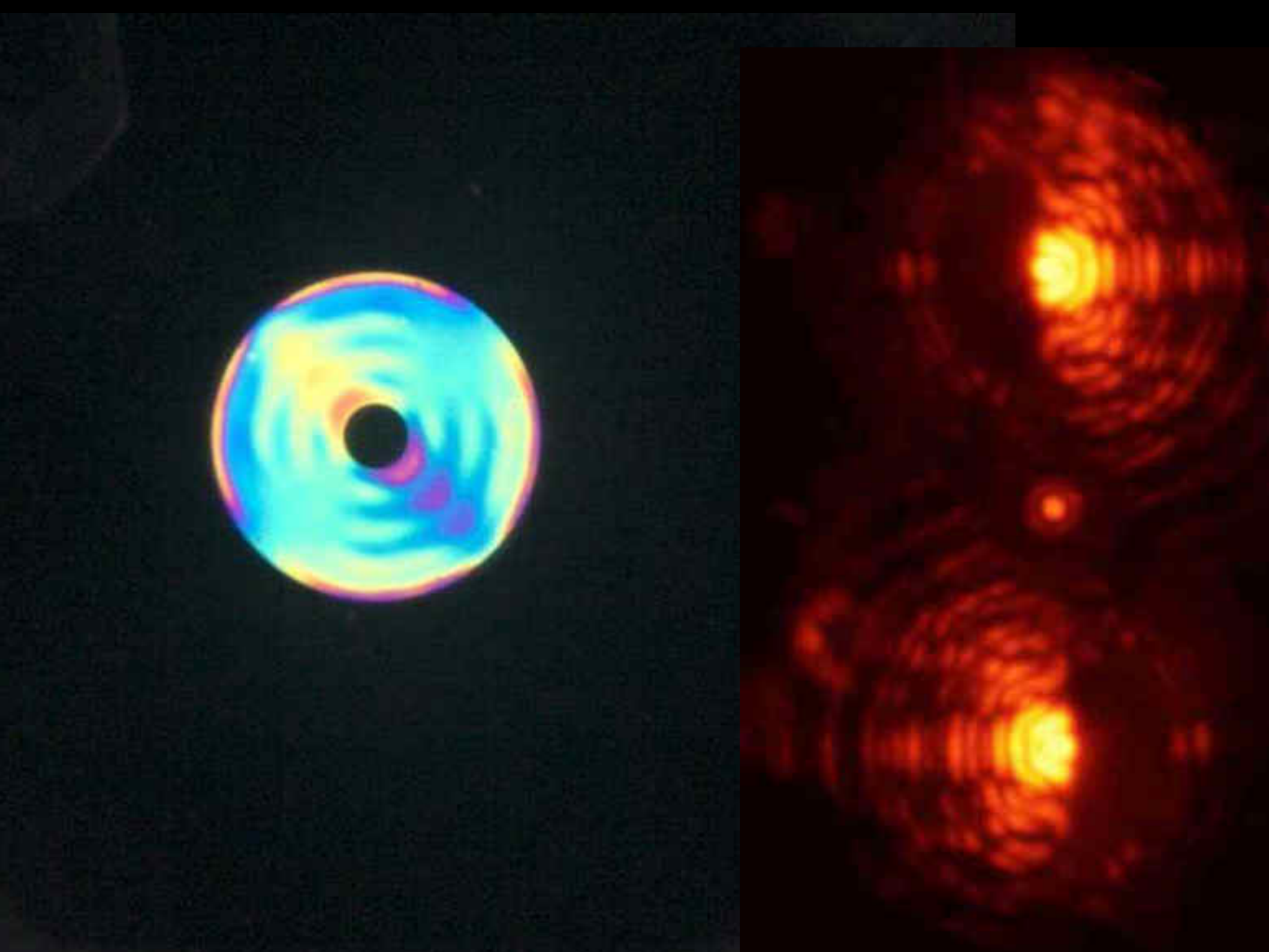
European Extremely Large Telescope

40 meter telescoop in Chili op 3 km hoogte (~2024)

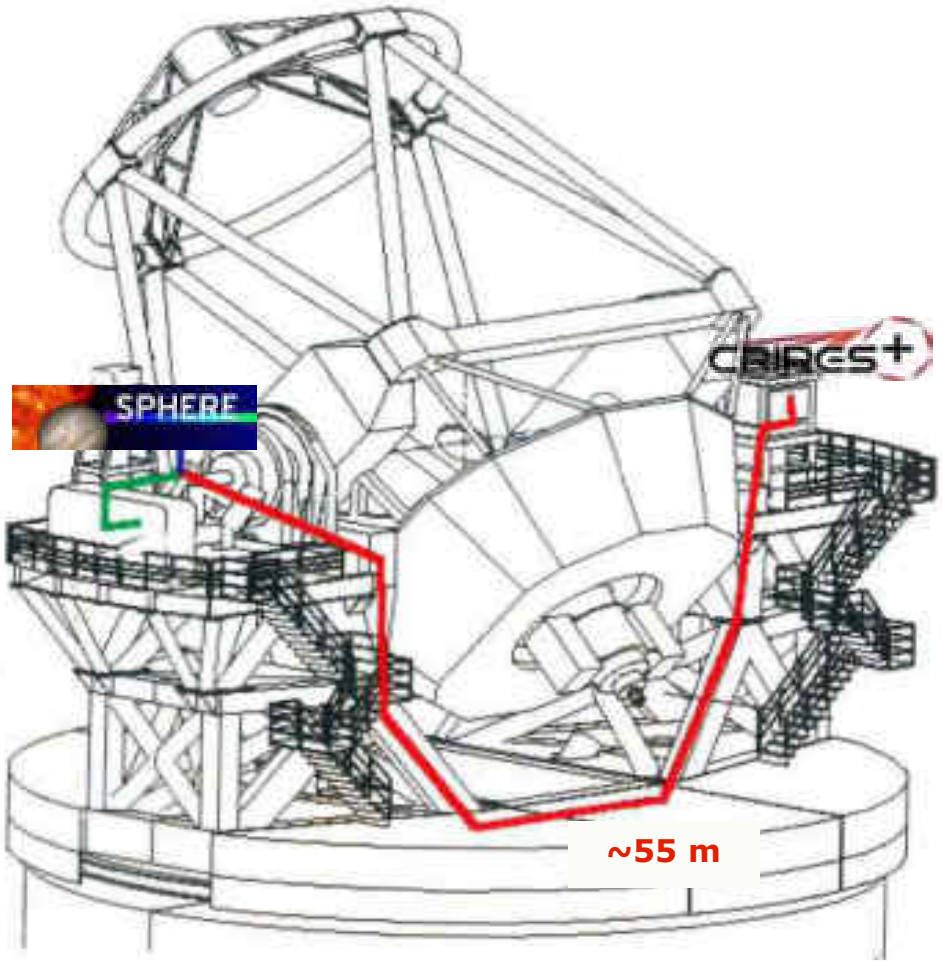
4 keer groter in diameter dan huidige record

gvAPP is gepland voor meerdere instrumenten

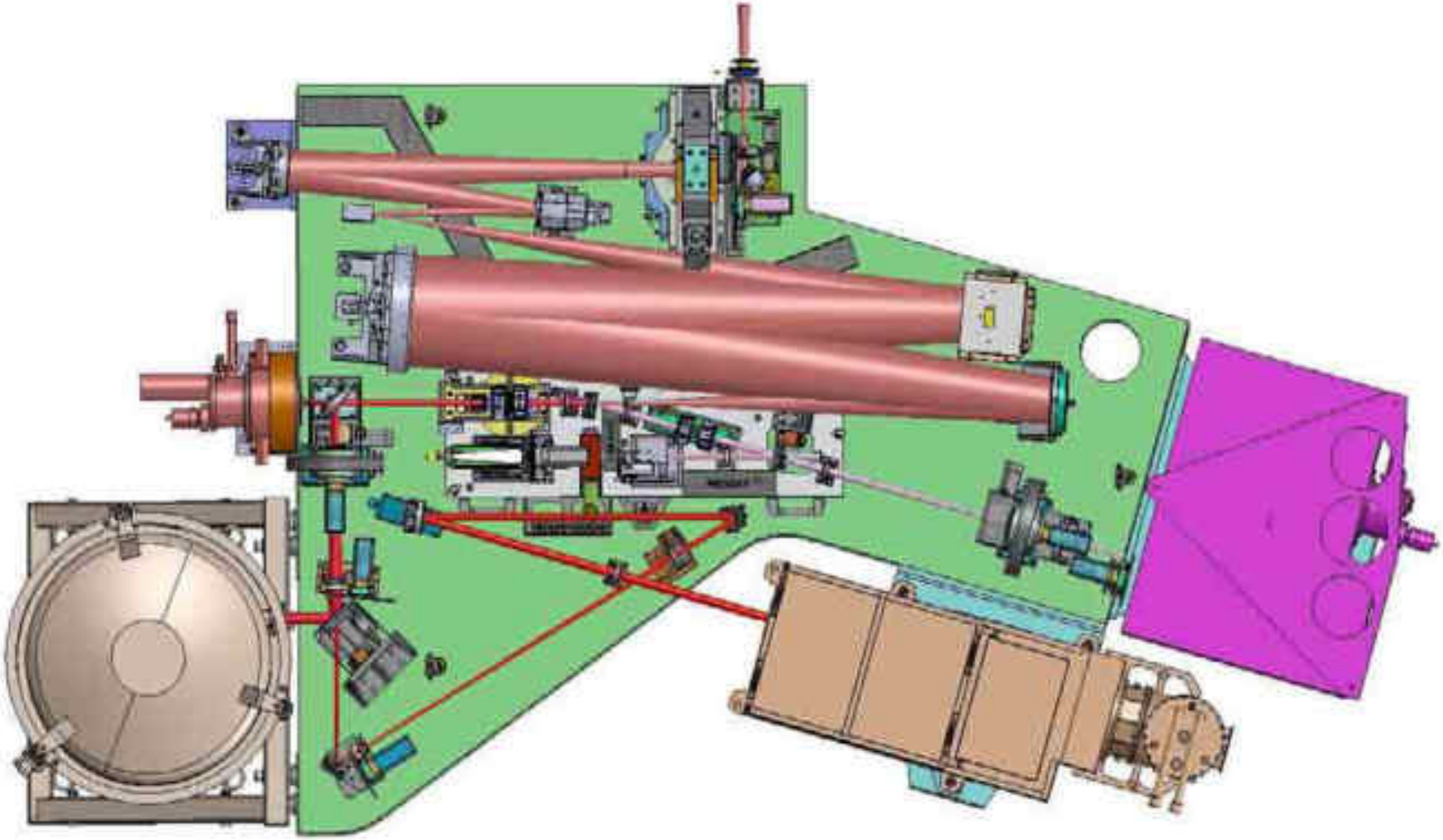
Mogelijkheid om aardachtige planeet in bewoonbare zone te zien (voor kleine ster)

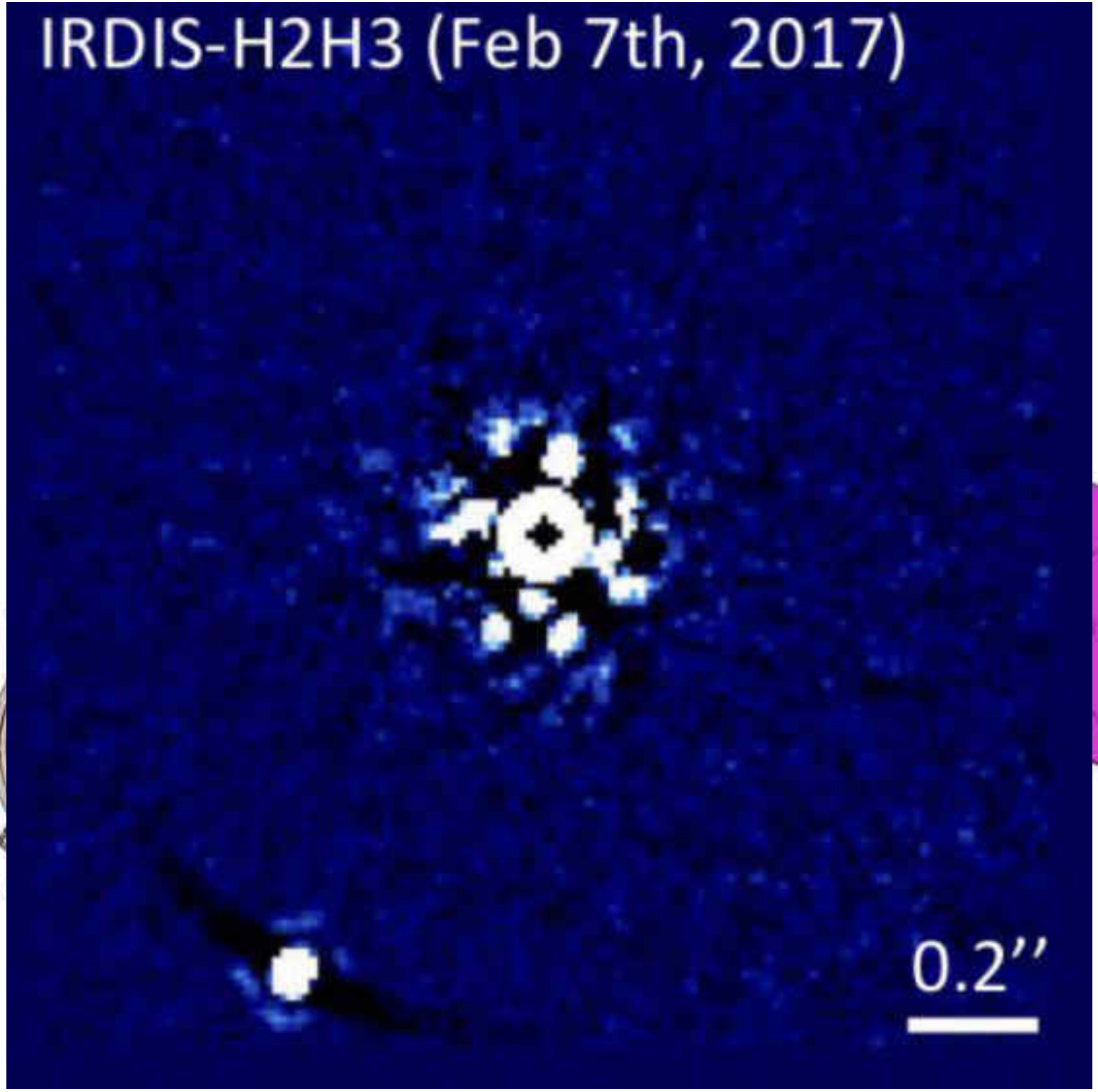


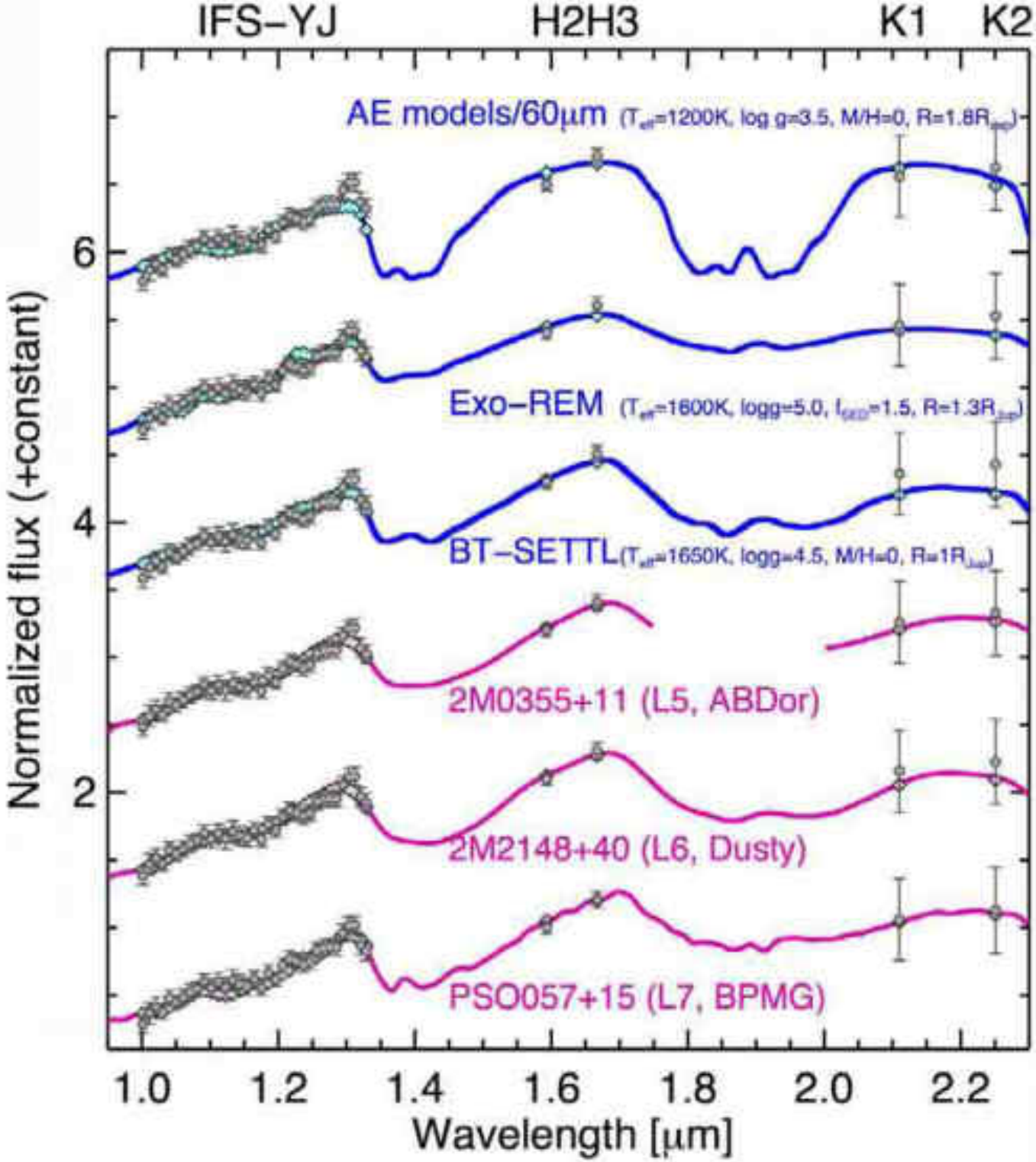
Huidig werk: HiRISE project

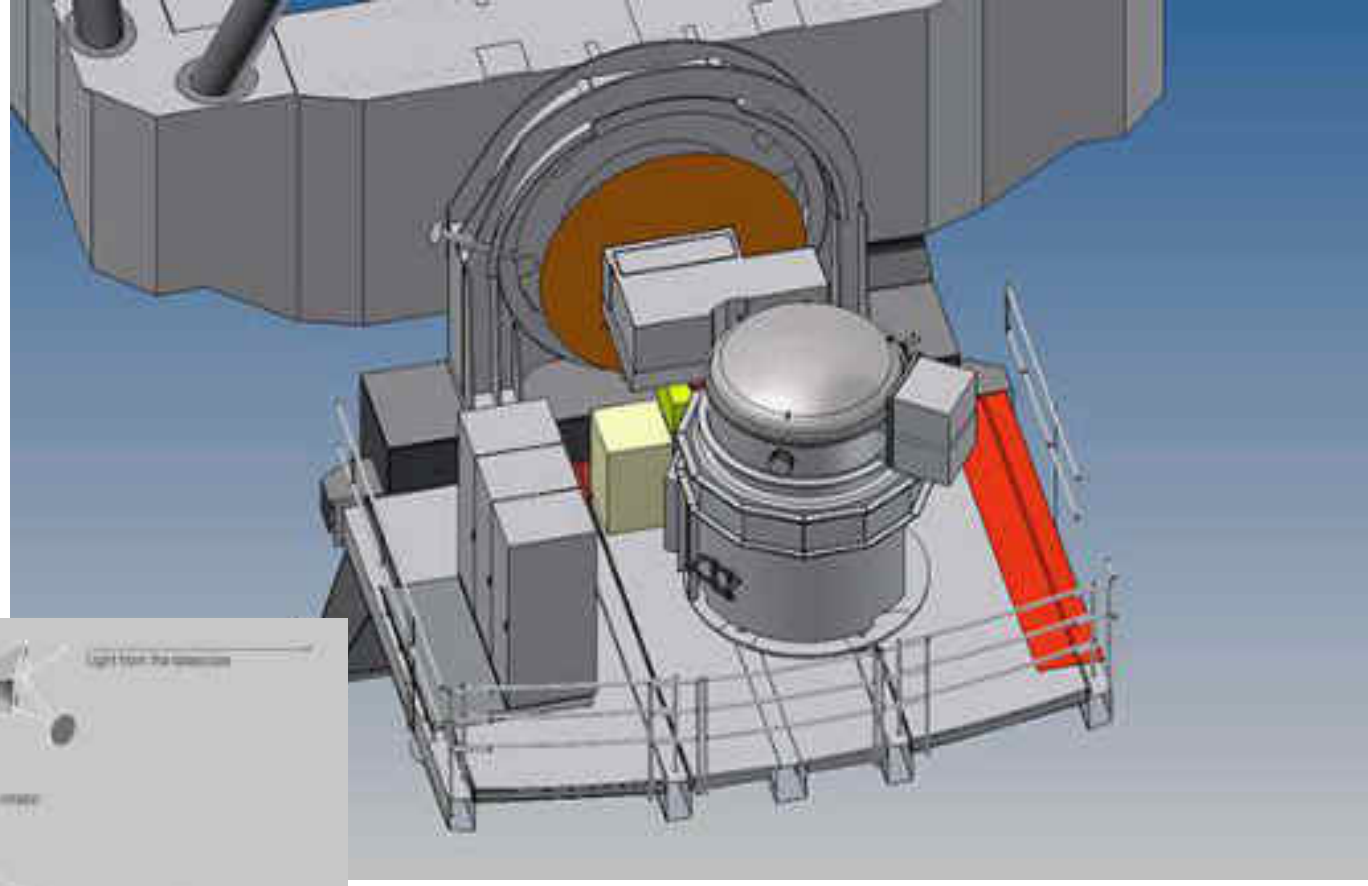


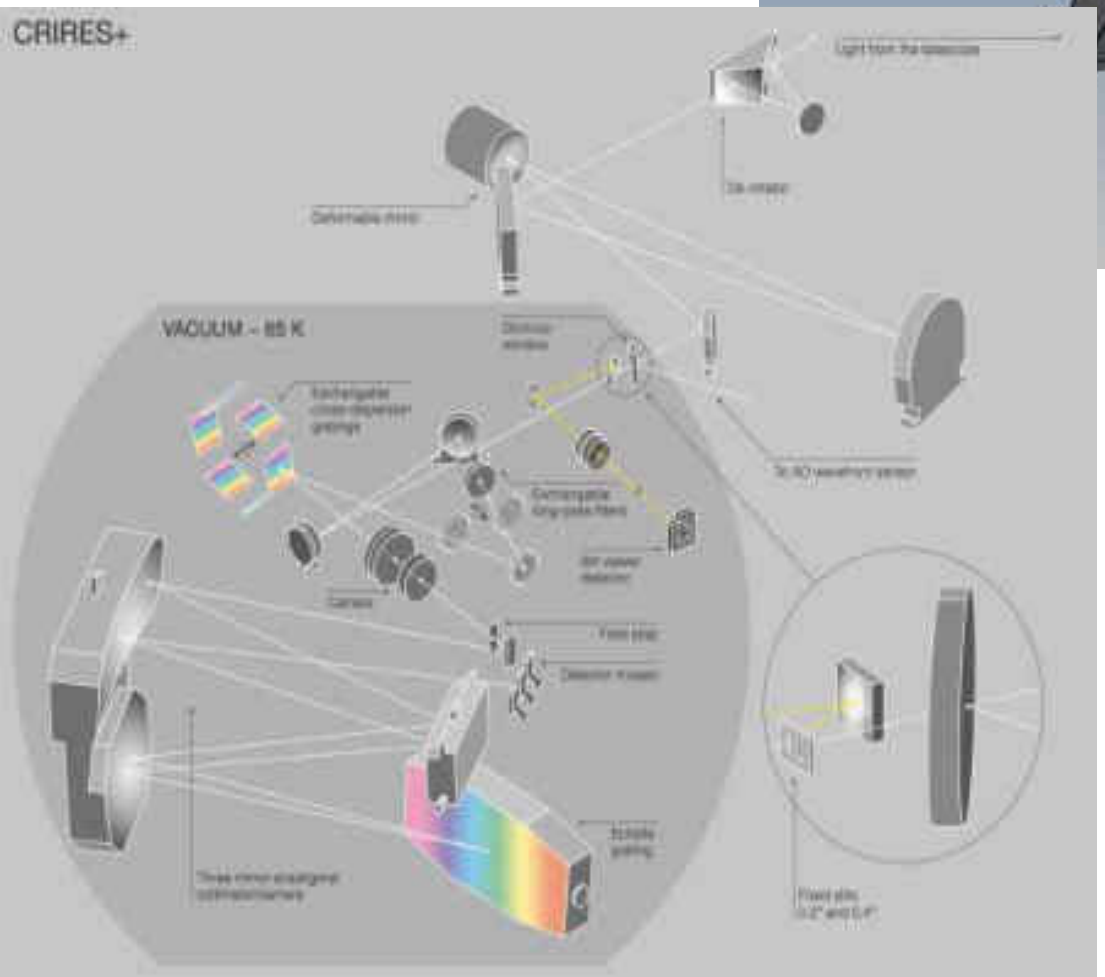
SPHERE




IRDIS-H2H3 (Feb 7th, 2017)
0.2''


IFS–YJ
H2H3
K1
K2
AE models/60μm
Exo–REM
BT–SETTL
2M0355+11 (L5, ABDor)
2M2148+40 (L6, Dusty)
PSO057+15 (L7, BPMG)
Normalized flux (+constant)
6
4
2
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
Wavelength [μm]

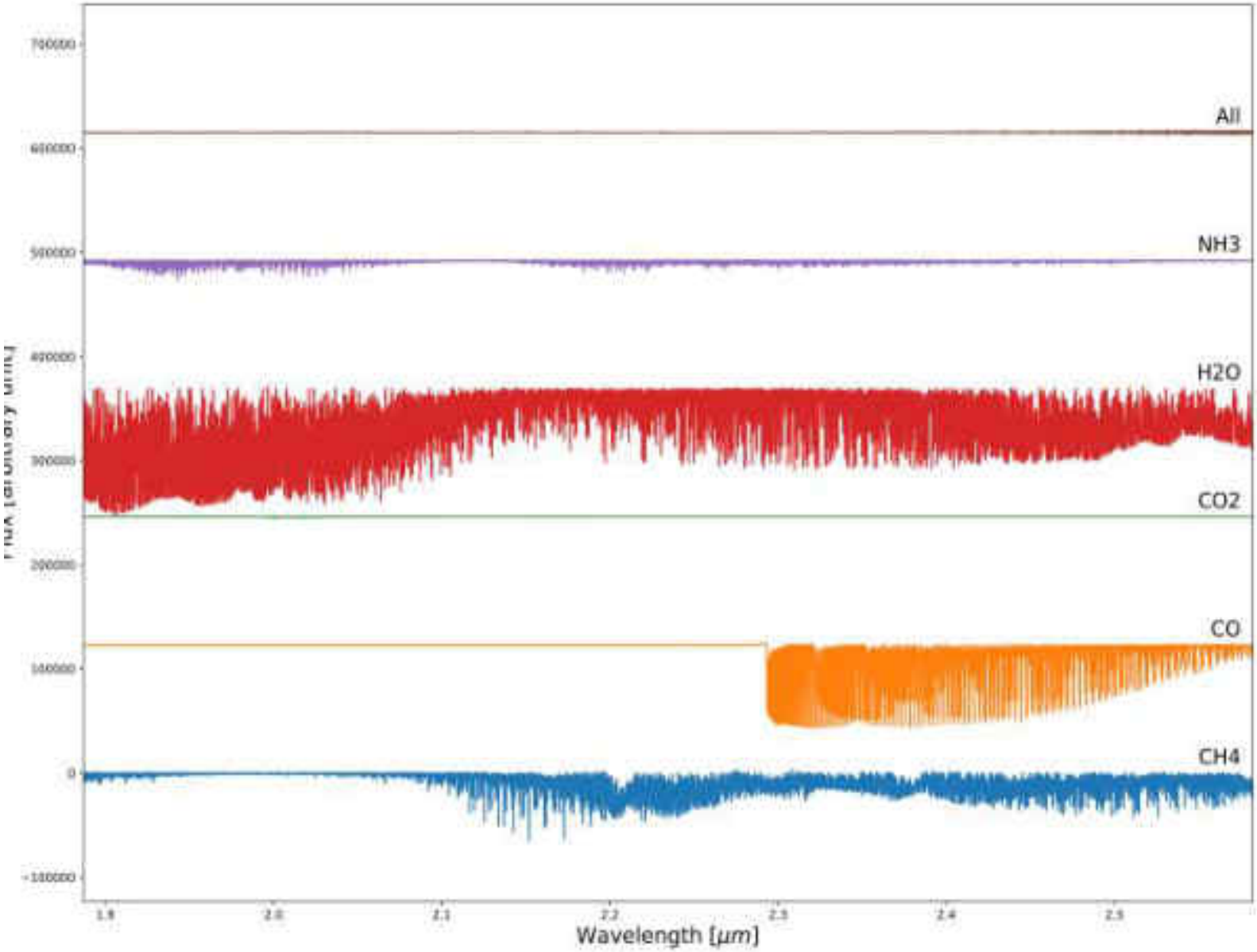




Spectrale resolutie van 100.000

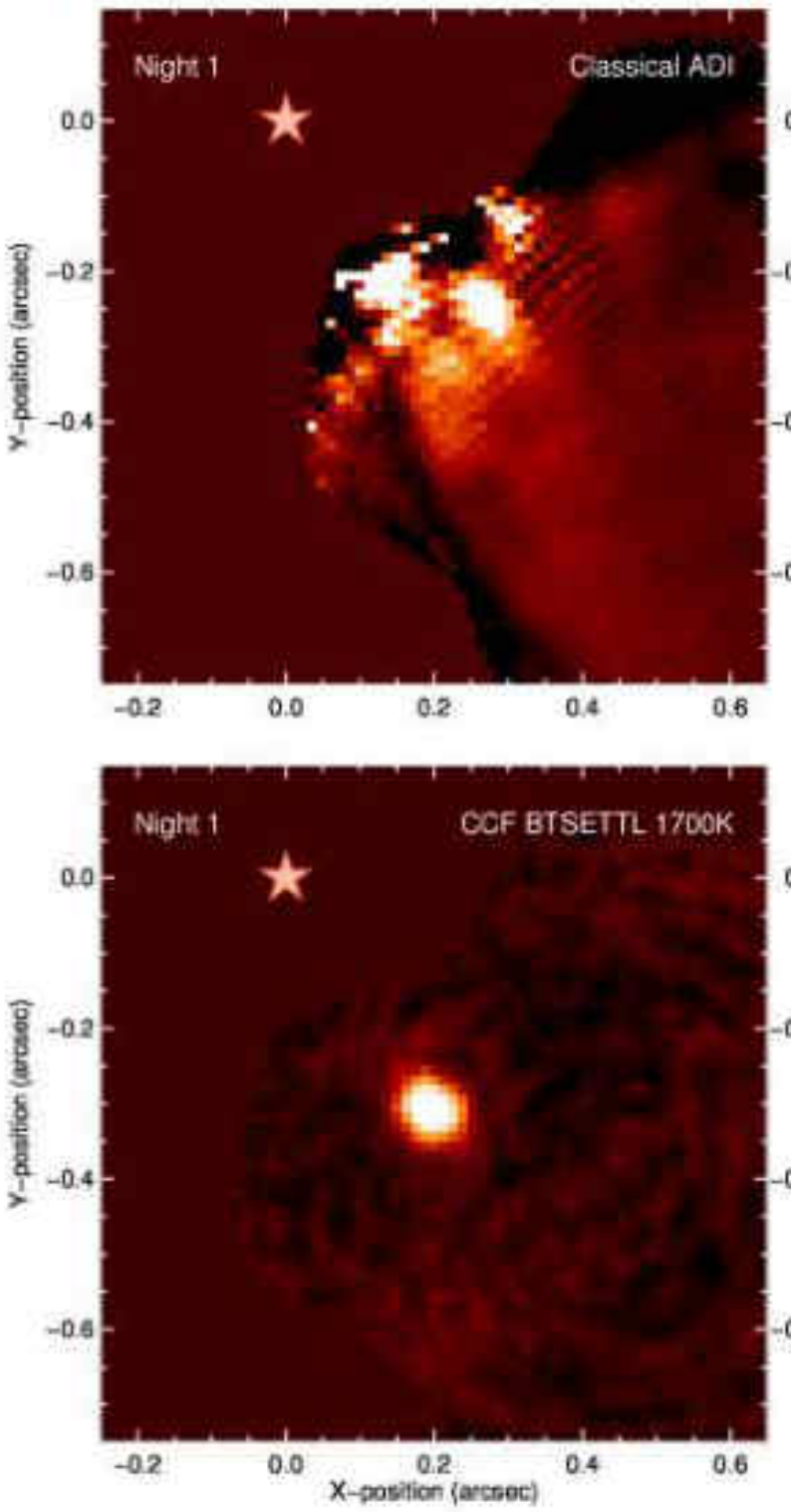
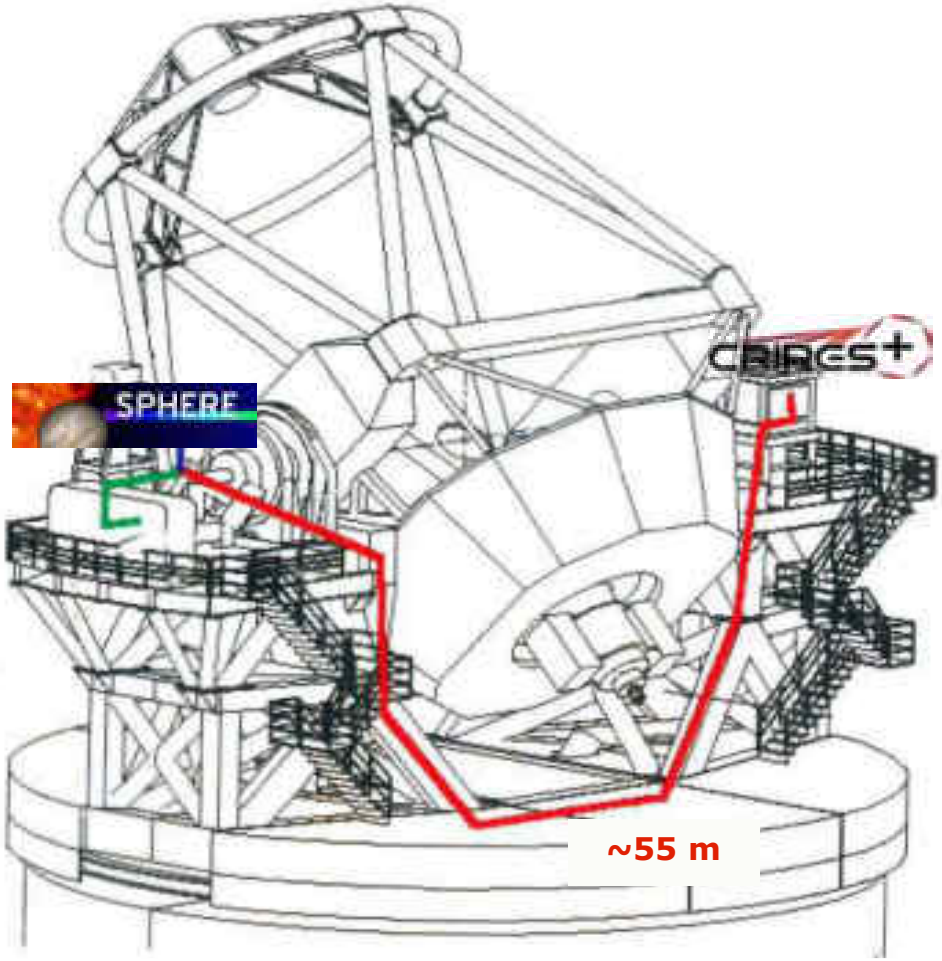
Op een golflengte van 2 micron,
is dit een resolutie van 20 picometer

Vingerafdrukken van chemische stoffen



Sterke verbetering van het signaal

Bevestiging dat er Water en Koolmonoxide in de atmosfeer van de planeet zit



Vanaf 2020