

# **Astro121 - Einführung in die Astronomie**

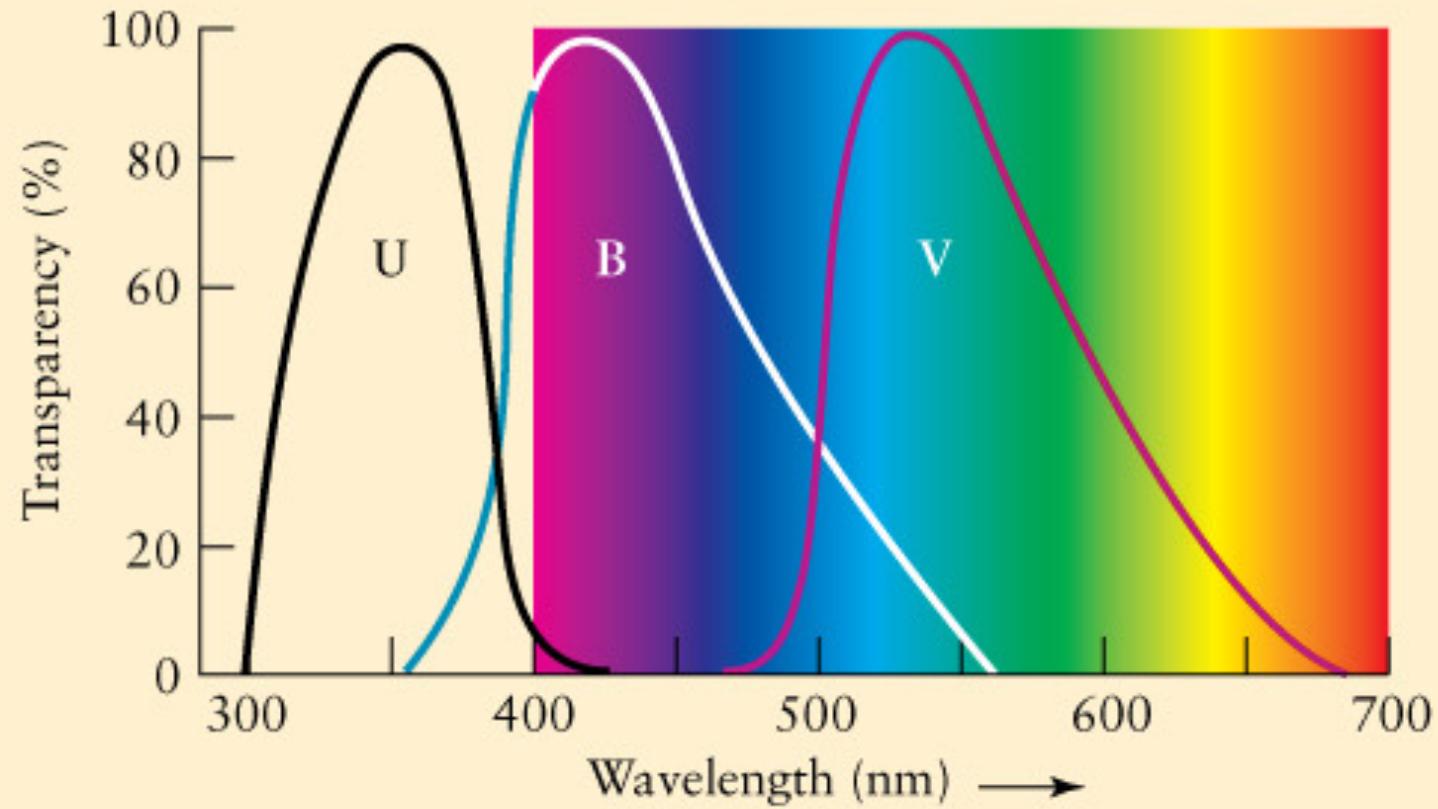
## **Sterne – Klassifikation I**

Prof. Frank Bigiel & Dr. Gunther Witzel

Argelander-Institut für Astronomie

# **Sterne - Helligkeiten**

# UBV-Photometrie



# Farbindex

$$FI = m_{\text{kurzwellig}} - m_{\text{langwellig}}$$

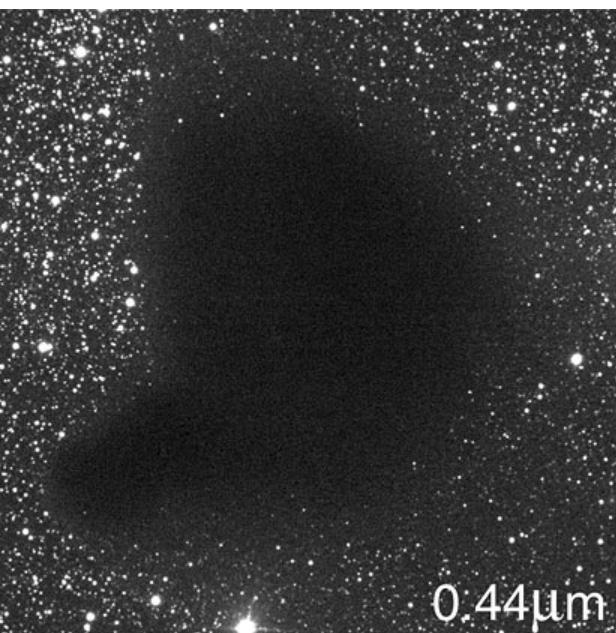
Je kleiner der Farbenindex (FI) desto blauer (höher die Oberflächentemperatur) des Sterns.

# Was können wir messen und was wissen wir?

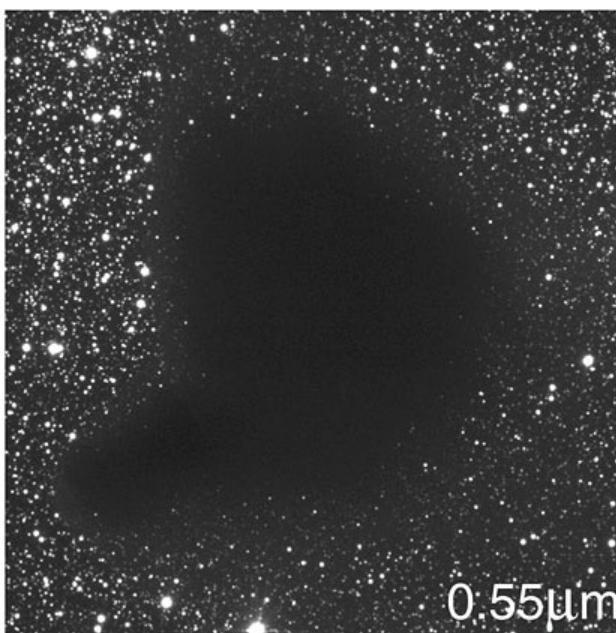
- Mittels der UVB-Photometrie ist es möglich, die Farben der Sterne zu messen. Die CCDs ergeben sehr genaue Helligkeitsunterschiede
- Wir wissen, dass das Spektrum der Sonne durch einen Planckschen Strahler (Schwarzer Körper) nahezu perfekt wiedergegeben wird.
- Wir wissen, um die Eigenschaften des Schwarzen Strahlers.
- Unsere Probleme bestehen im wesentlichen in der Entfernungsbestimmung und der Extinktion des Sternenlichts

# Interstellares Gas und Staub

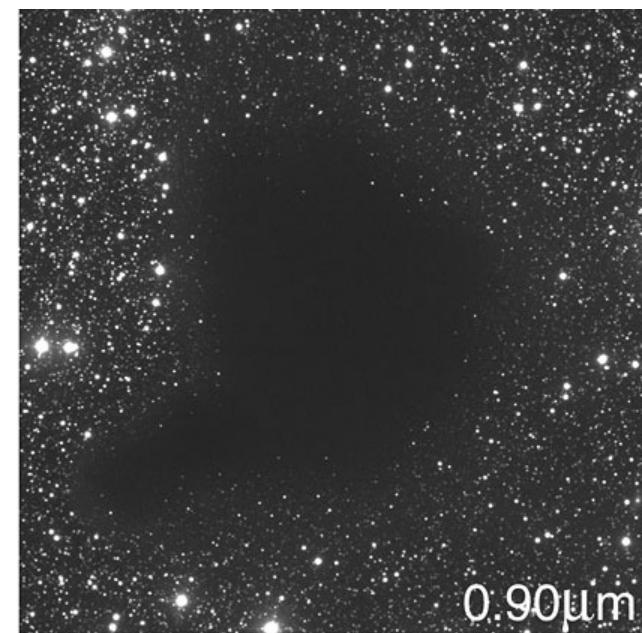




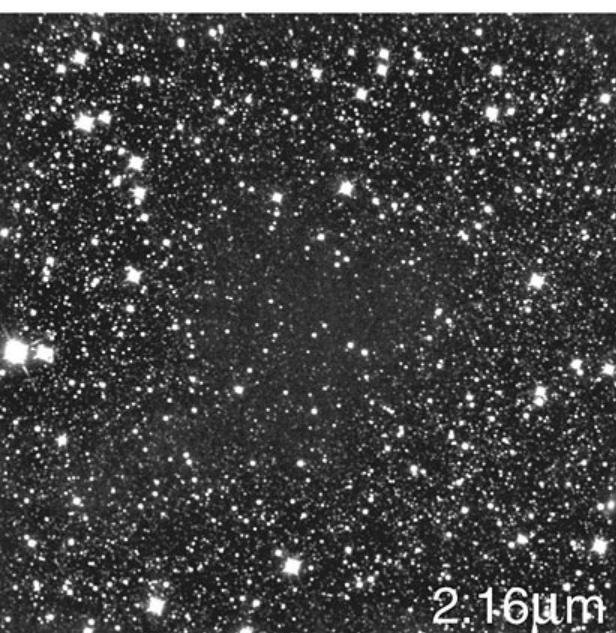
0.44 $\mu$ m



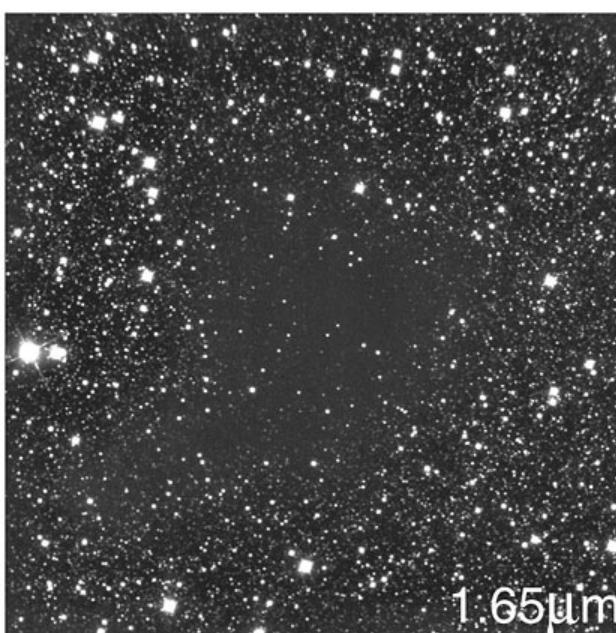
0.55 $\mu$ m



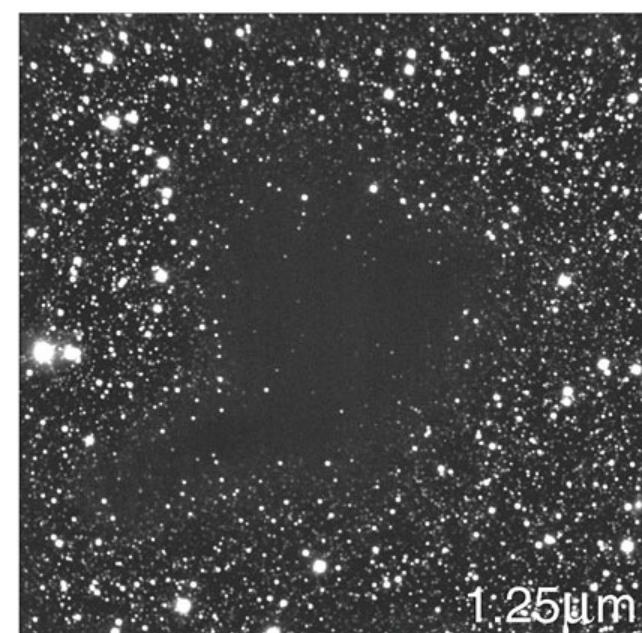
0.90 $\mu$ m



2.16 $\mu$ m

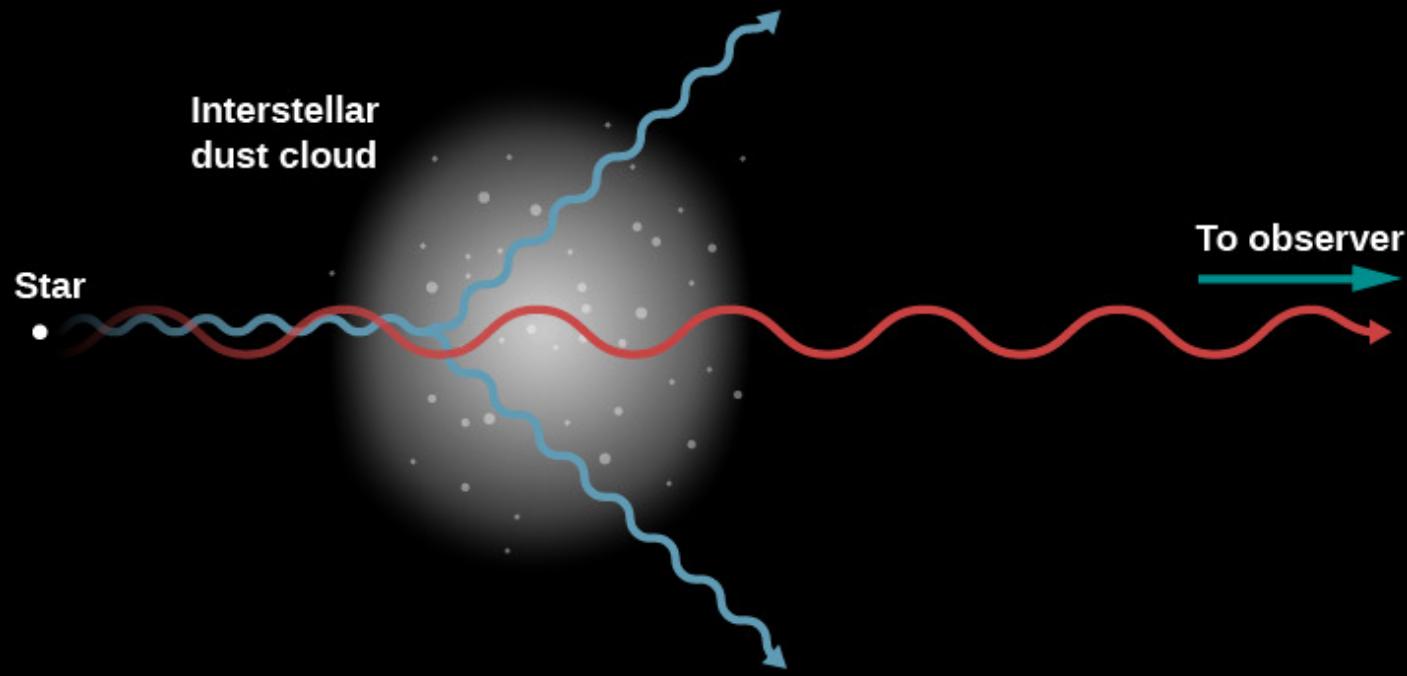


1.65 $\mu$ m



1.25 $\mu$ m

# Streuung des Sternenlichts führt zu Rötung



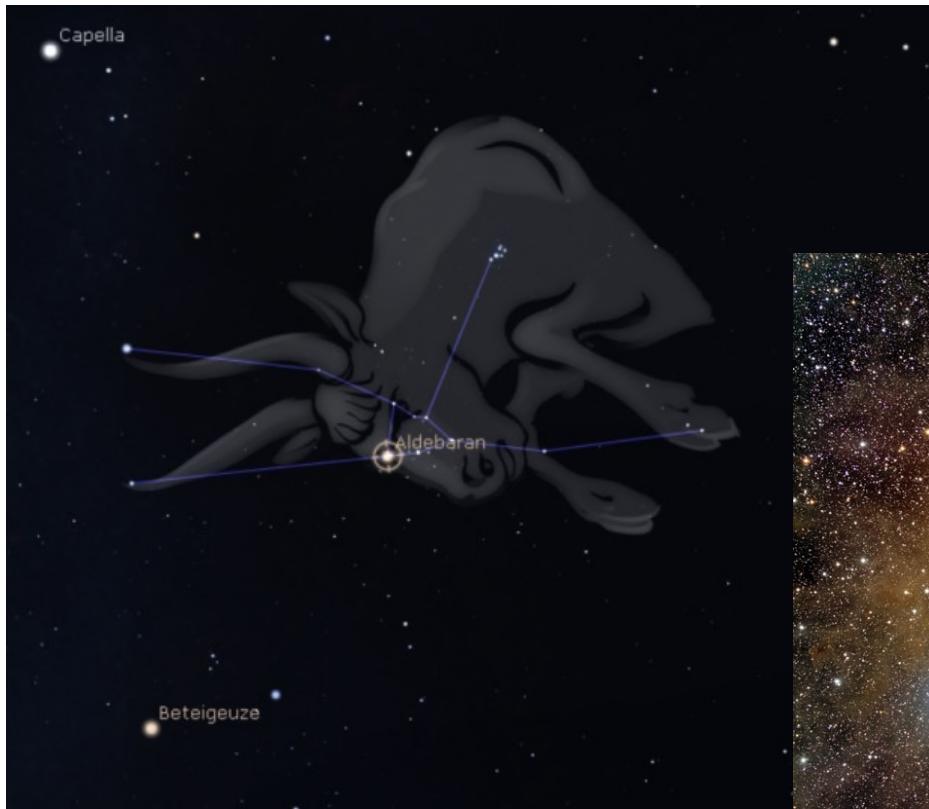
# Rötung/Verfärbung

$$E_{B-V} = (B - V)_{\text{beobachtet}} - (B - V)_{\text{Eigenfarbe}}$$

Gas zwischen den Sternen (interstellares Medium) bewirkt eine Streuung (und Absorption) des Lichtes. Je kürzer die Wellenlänge des Lichtes desto stärker die Streuung. Damit wird der **blaue Anteil** des Sternenlichts relativ zum Gesamtspektrum **reduziert, dass Sternenlicht erscheint röter.**

# **Sterne – Farben-Helligkeitsdiagramm**

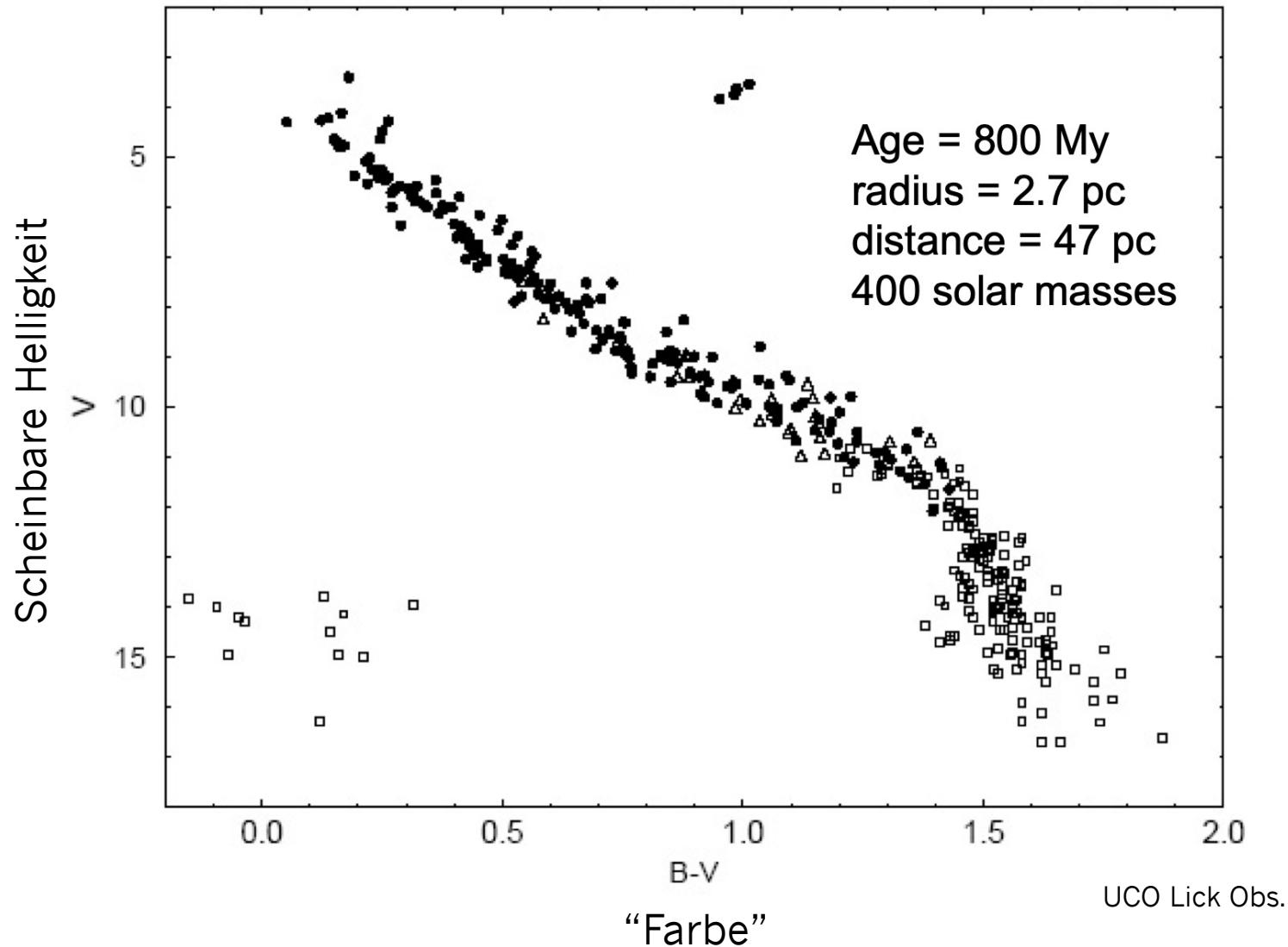
# Die Hyaden als „Schlüssel“



[Astrozwerge.de](http://Astrozwerge.de)

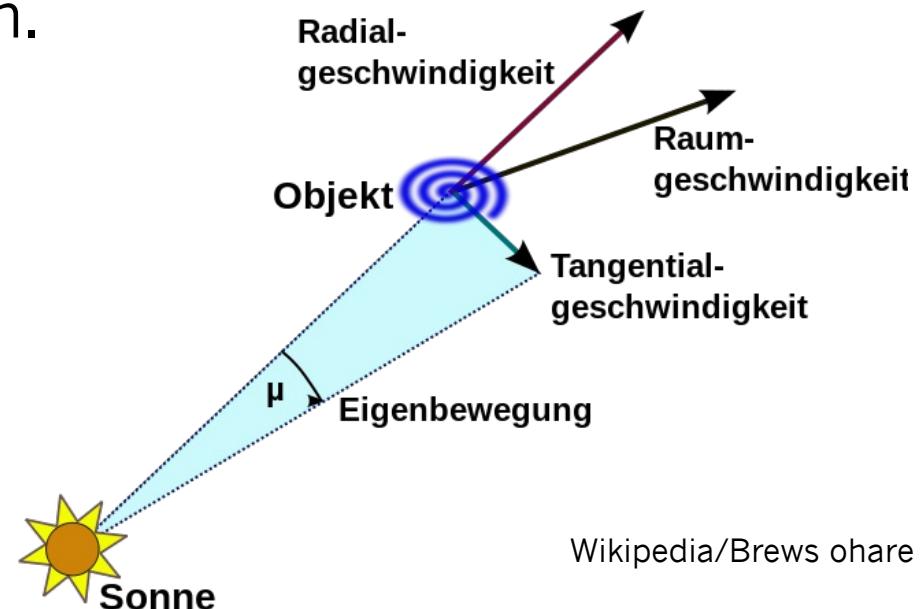
Jose Mтанous

# Farben – Helligkeitsdiagramm Hyaden



# Raumgeschwindigkeiten der Sterne

- Neben der **Dopplerverschiebung** der Emissions- und Absorptionslinien, die uns die **radiale Geschwindigkeit** der Quelle angeben ist die so genannte **Eigenbewegung** der Sterne seit Halley im Jahr 1718 bekannt.
- Vermessen wird die Eigenbewegung (engl. *proper motion*) durch den relativen Vergleich der Sternörter im Zeitraum von Jahrzehnten.



Wikipedia/Brews ohare

# Raumgeschwindigkeiten der Sterne

- Die Eigenbewegung bestimmt die tangentiale Geschwindigkeitskomponente des gesamten Geschwindigkeitsvektors.
- Wenn  $p$  die Parallaxe und  $\mu$  die Eigenbewegung in Bogensekunden ist, folgt

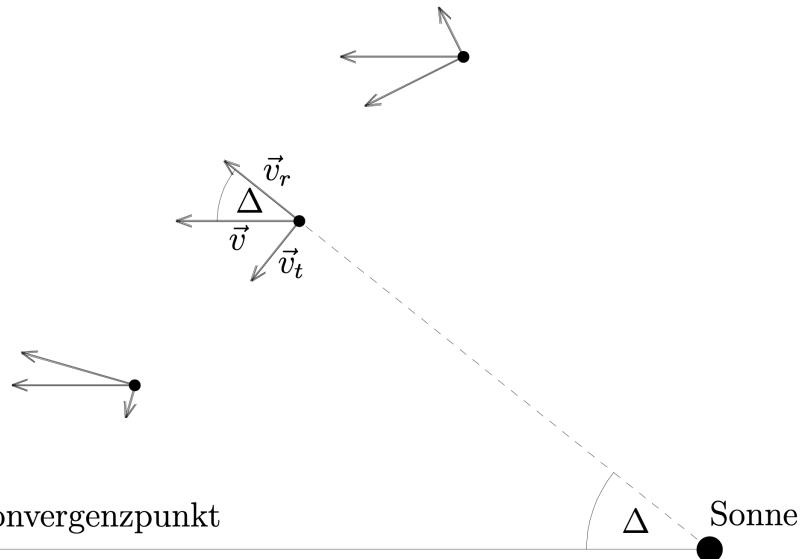
$$v_t \left[ \text{km s}^{-1} \right] = 4,74 \cdot \frac{\mu \left[ '' \text{a}^{-1} \right]}{p \left[ '' \right]}$$

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}$$

# Entfernungsbestimmung - Sternstromparallaxe

- Wird die Dopplergeschwindigkeit gemessen und ist der Winkel zw. dem Konvergenzpunkt K und den betrachteten Sternen bekannt, so folgt mit der gemessenen Eigenbewegung  $\mu$

$$v_r = v_{\text{Haufen}} \cdot \cos \vartheta \text{ und } v_t = v_{\text{Haufen}} \cdot \sin \vartheta = 4,74 \frac{\mu}{p}$$



zum Konvergenzpunkt

<http://www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/AstroPraktikum/Hyaden/Hyaden.pdf>

# Entfernungsbestimmung - Sternstromparallaxe

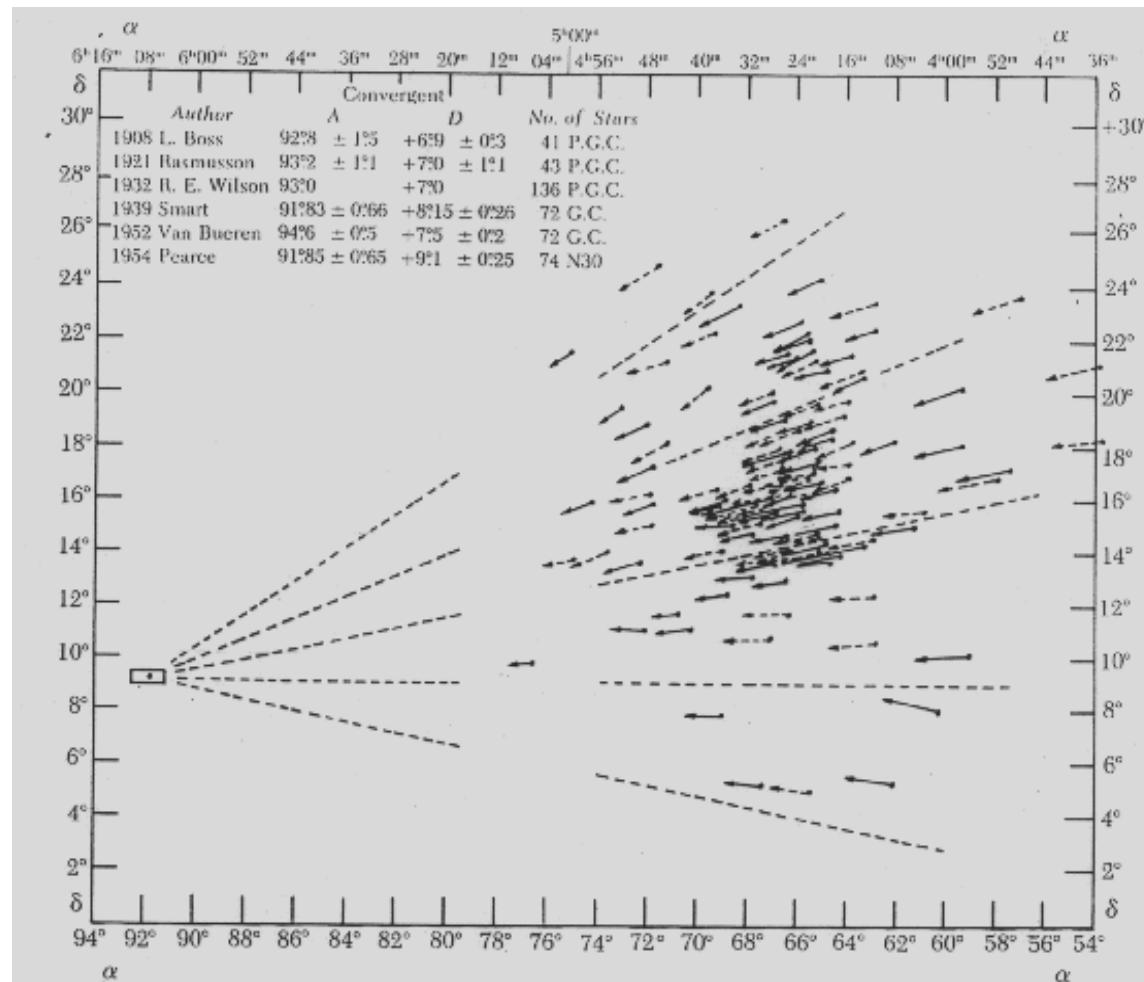
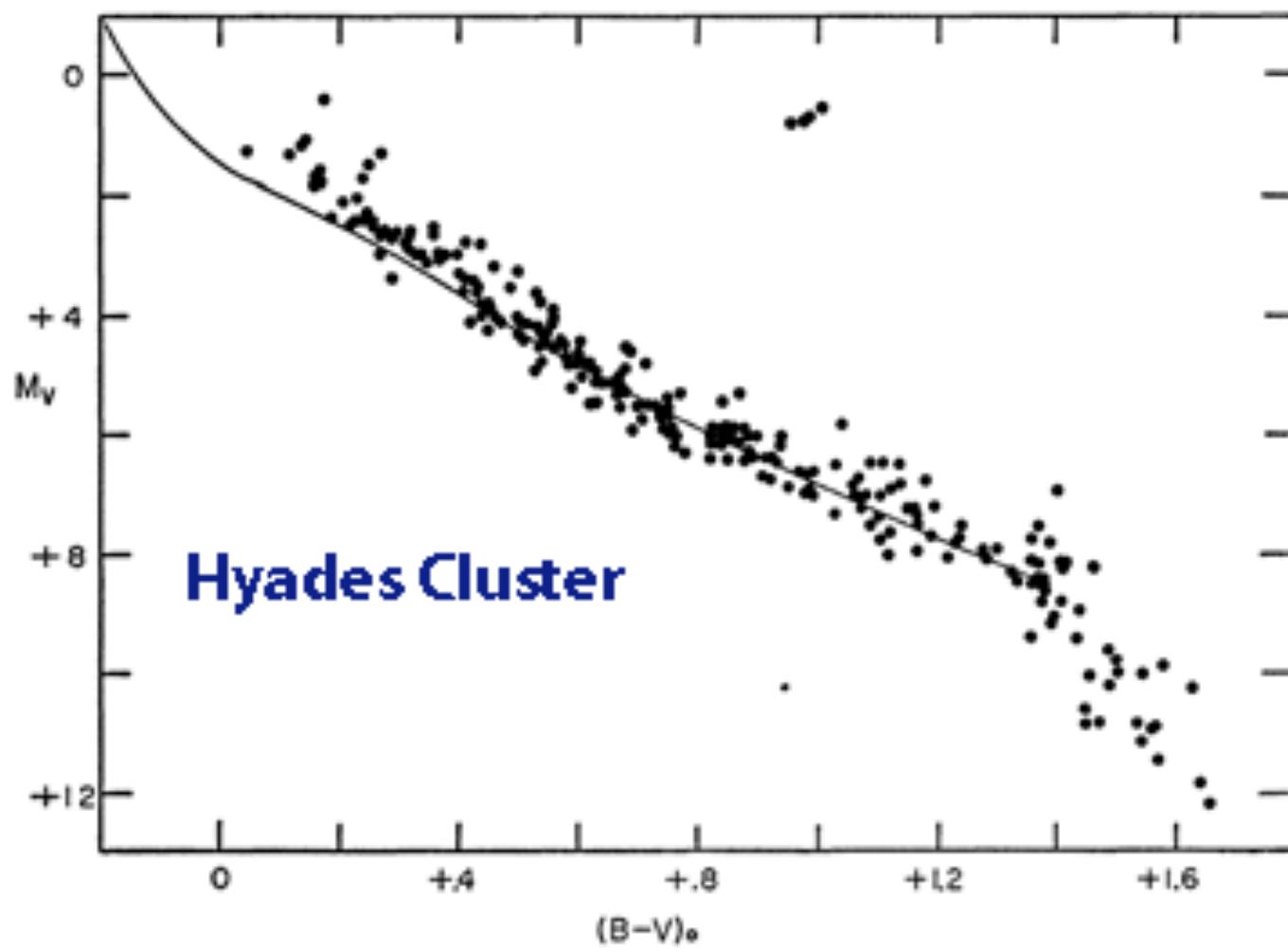


Figure 14-7. *The Hyades*. This most famous moving cluster (in the constellation Taurus) contains about 200 identified members, subtends  $25^\circ \times 25^\circ$  on the sky, and converges towards  $\alpha = 6^\text{h}0^\text{m}$ ,  $\delta = +9^\circ$ . (From O. Struve, B. Lynds, and H. Pillans: *Elementary Astronomy*. New York, Oxford University Press, 1959.)

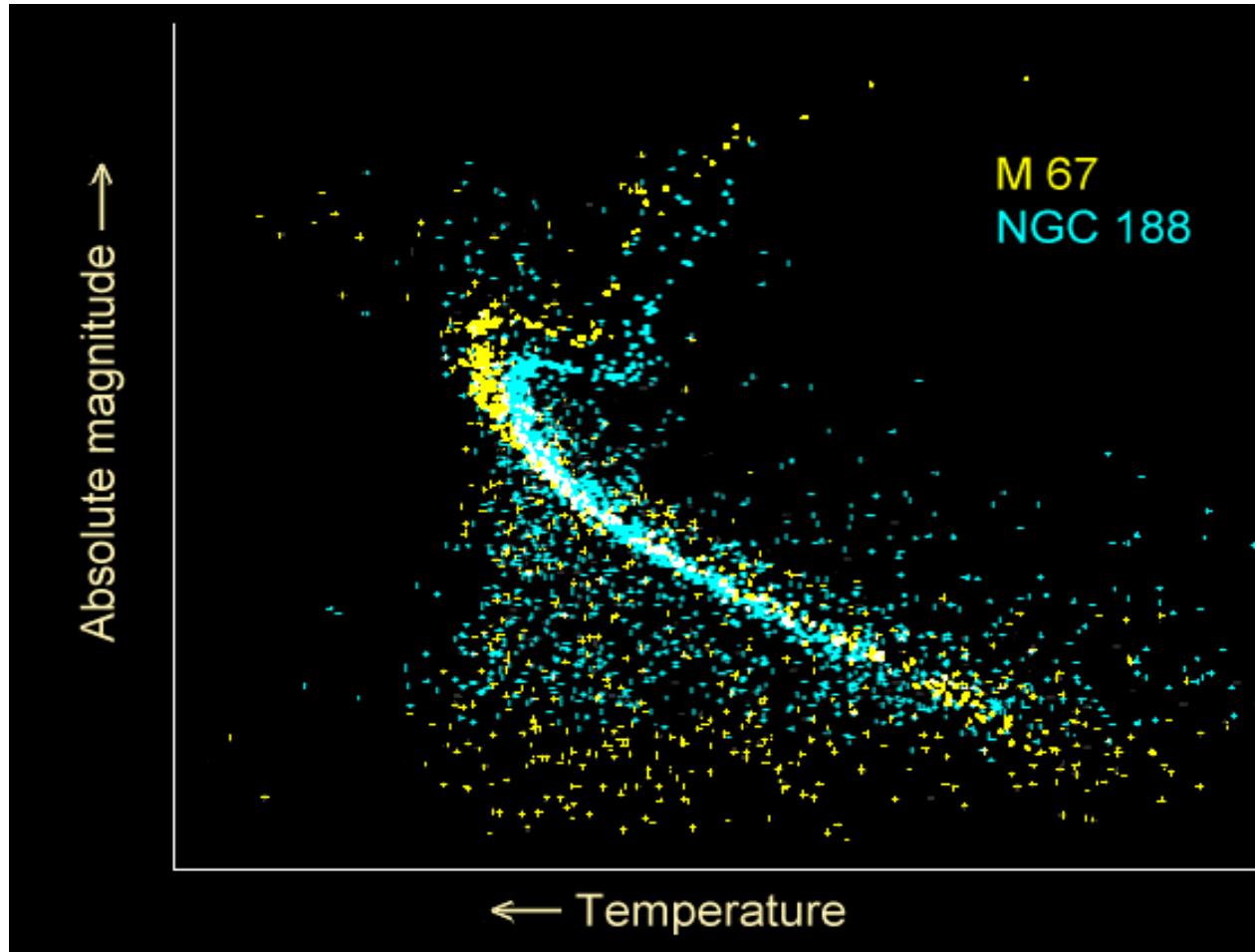
# Farben-Helligkeitsdiagramm Hyaden



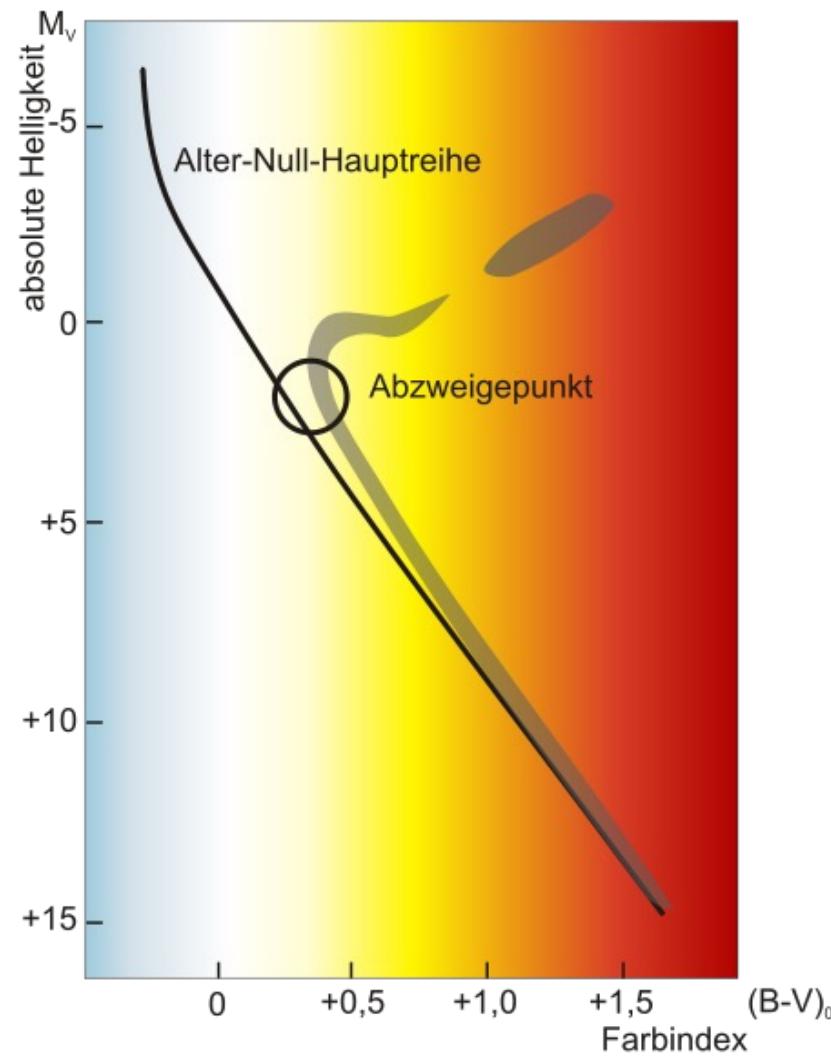
## Zusammenfassung:

- Wir haben nun für einen Sternhaufen ein **Farben-Helligkeitsdiagramm mit absoluten Helligkeiten**

# Sternhaufen



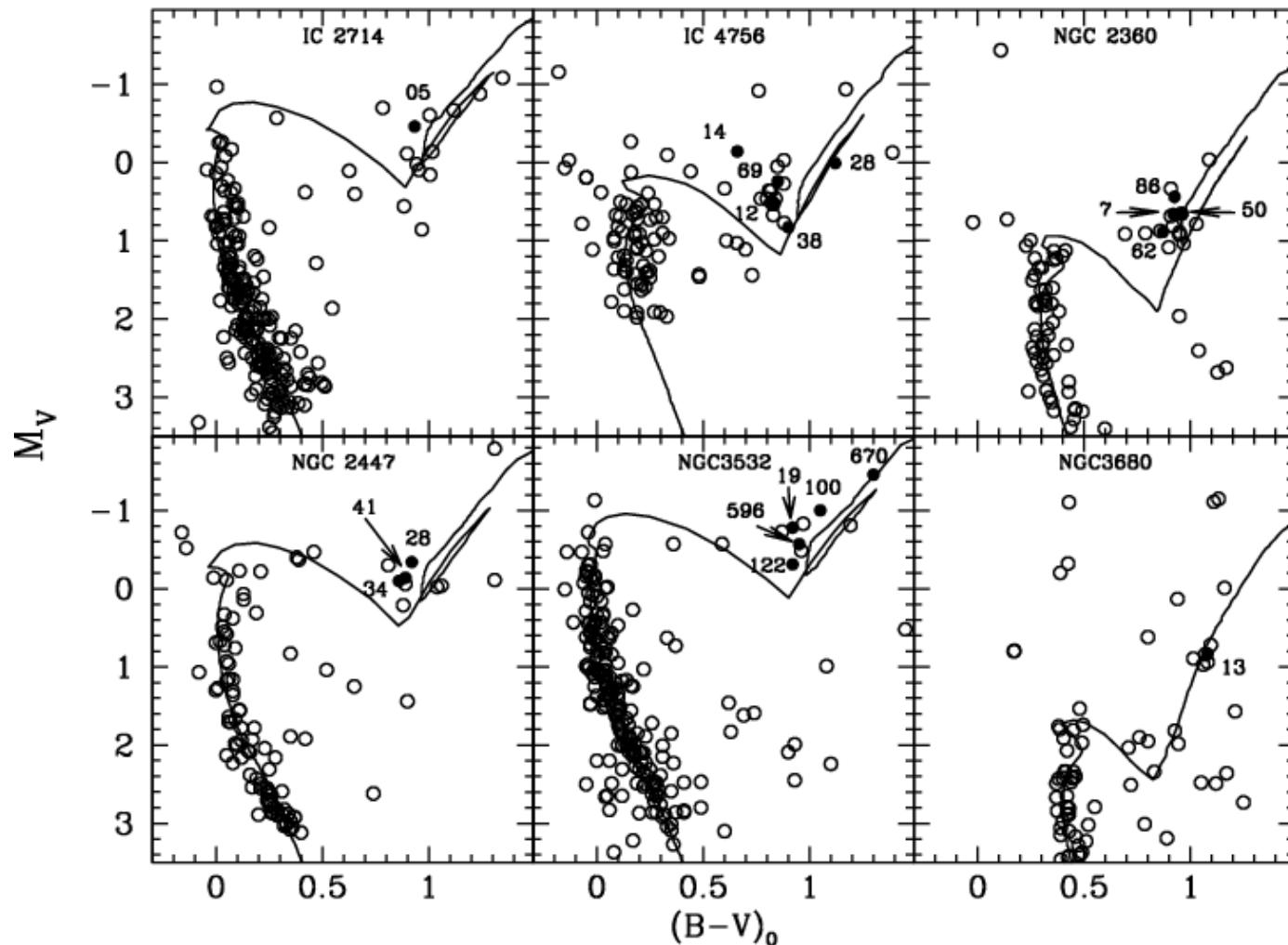
# Sternhaufen



# Sternhaufen

- Aus dem Farben-Helligkeitsdiagramm ist klar ersichtlich, dass NICHT alle Helligkeiten und Farben in JEDER Kombination in der Natur beobachtet werden.
- Aus dem Vergleich der Farben-Helligkeitsdiagramme verschiedener Sternhaufen ist zu erschließen, dass die Anordnung der Sterne entlang einer Hauptreihe erfolgt.
- Die Hauptreihe ist jedoch nicht in allen Sternhaufen mit gleicher Häufigkeit besetzt.
- Ein Abknickpunkt von den großen Helligkeiten hin zu den schwächeren, röteren Sternen ist zu beobachten.

# Farben-Helligkeitsdiagramm



## Zusammenfassung:

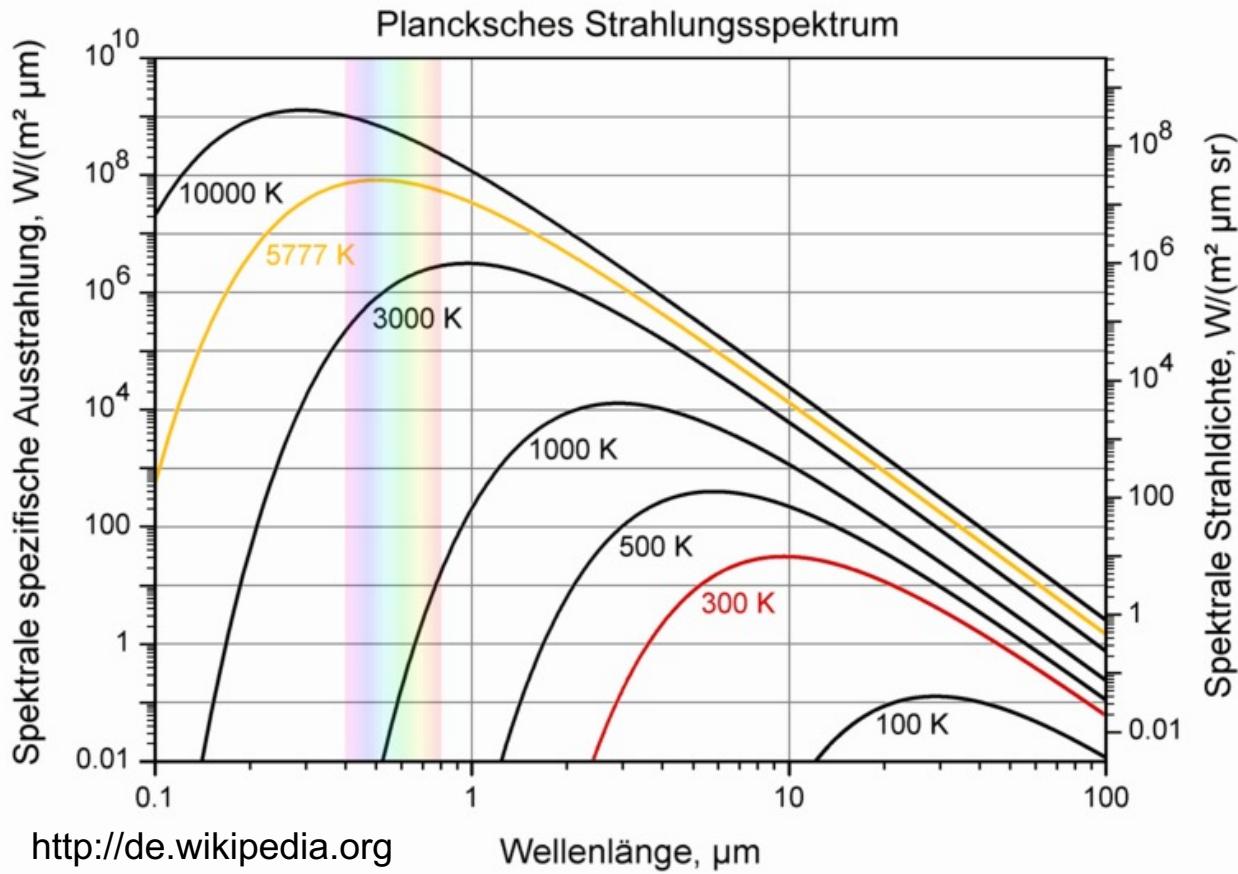
- Wir haben nun für einen Sternhaufen ein Farben-Helligkeitsdiagramm mit absoluten Helligkeiten
- Die Sterne **geringer absoluter Helligkeit verschiedener Sternhaufen** weisen die **gleichen Farben** auf. **Gleiche Farben** markieren **gleiche Oberflächentemperaturen**.

## Zusammenfassung :

- Wir haben nun für einen Sternhaufen ein Farben-Helligkeitsdiagramm mit absoluten Helligkeiten
- Die Sterne geringer absoluter Helligkeit verschiedener Sternhaufen weisen die gleichen Farben auf. Gleiche Farben markieren gleiche Oberflächentemperatur.
- Über das **Wiensche Verschiebungsgesetz** sind Farbe und Temperatur eindeutig miteinander verknüpft

$$-\lambda_{max} = \frac{2897 \mu m \cdot K}{T}$$

# Erinnerung: Sterne - Planck Gesetz



$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$$

# Was wissen wir jetzt über Sterne?

- Wir haben nun für einen Sternhaufen ein Farben-Helligkeitsdiagramm mit absoluten Helligkeiten
- Die Sterne geringer absoluter Helligkeit verschiedener Sternhaufen weisen die gleichen Farben auf. Gleiche Farben markieren gleiche Oberflächentemperatur.
- Über das Wiensche Verschiebungsgesetz sind Farbe und Temperatur eindeutig miteinander verknüpft

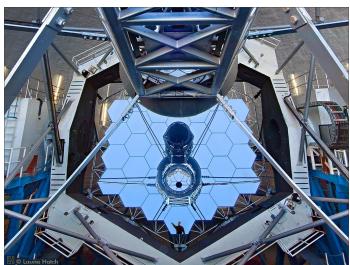
$$\lambda_{max} = \frac{2897 \mu m \cdot K}{T}$$

- Das **Stefan-Boltzmann Gesetz** kombiniert **Radius** und **Temperatur** zur **Leuchtkraft**

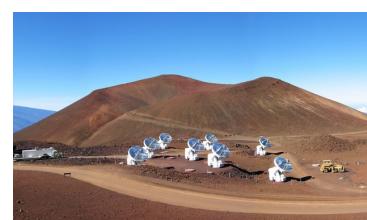
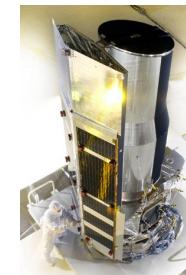
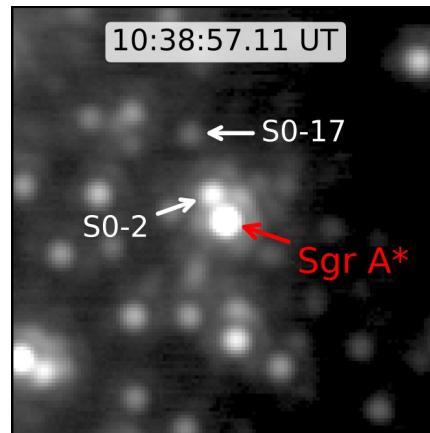
$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

# Sgr A\* mit dem EHT und GRAVITY

Weihnachtsvorlesung

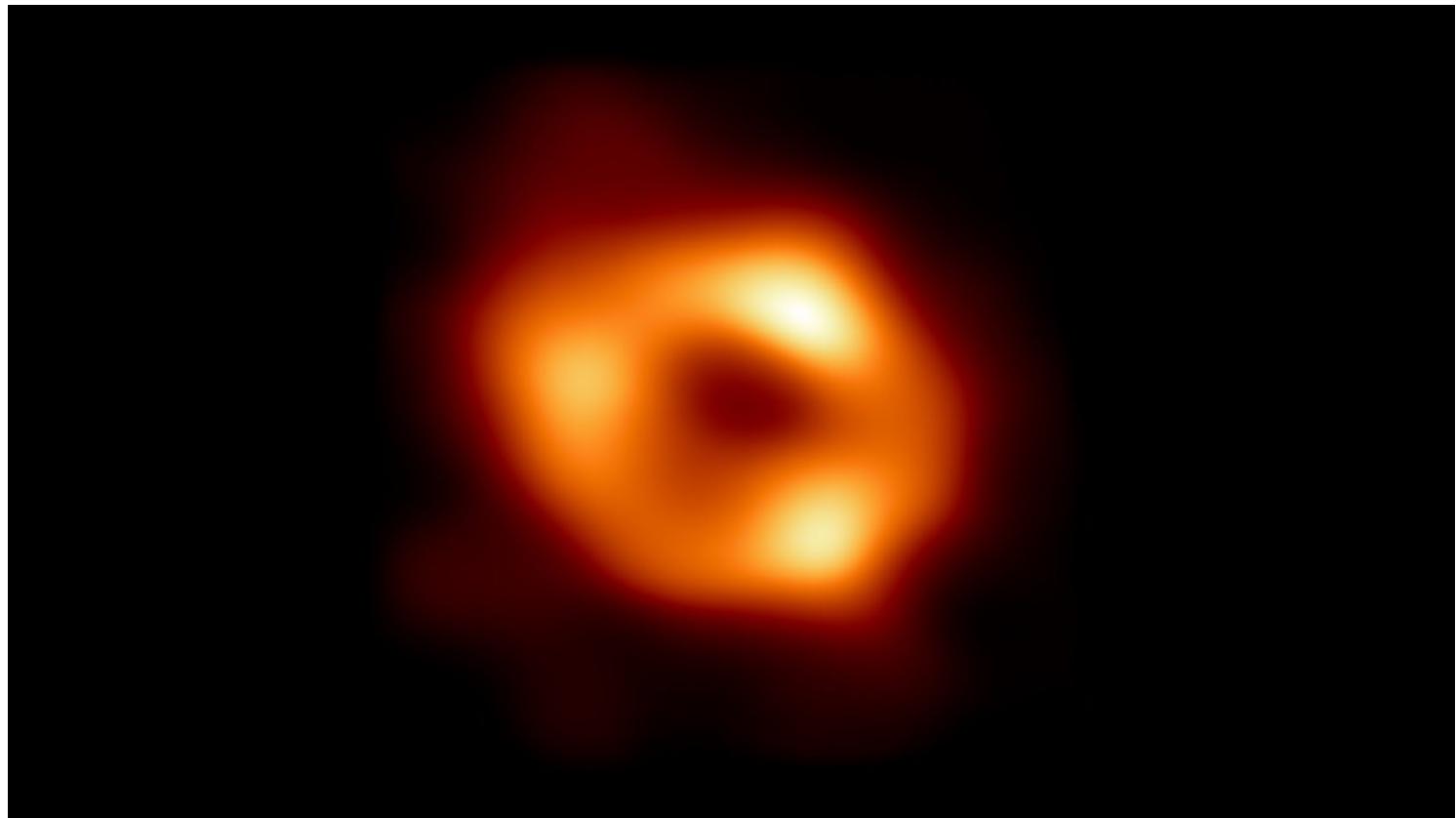


Credit: LAURIE HATCH



Max-Planck-Institut  
für Radioastronomie

Gunther Witzel, MPIfR, 21 Dezember, 2022



Hilbert (1916)

Die Grundlagen der Physik.  
(Zweite Mitteilung.)

Von

**David Hilbert.**

Vorgelegt in der Sitzung vom 23. Dezember 1916.

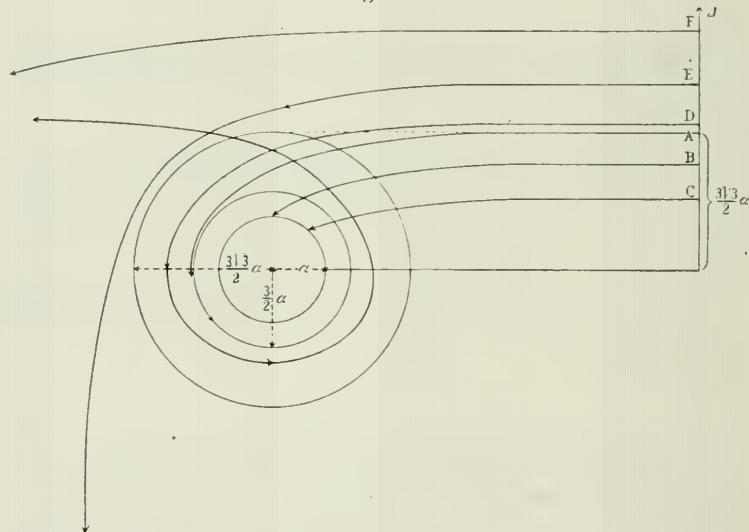
Allgemein erhalten wir für die Lichtbahn aus (56) wegen  
 $A = 0$  die Differentialgleichung

$$(62) \quad \left( \frac{d\varrho}{d\varphi} \right)^2 = \frac{1}{B^2} - \varrho^2 + \alpha \varrho^3;$$

dieselbe besitzt für  $B = \frac{3\sqrt{3}}{2}\alpha$  den Kreis  $r = \frac{3\alpha}{2}$  als Poincaréschen

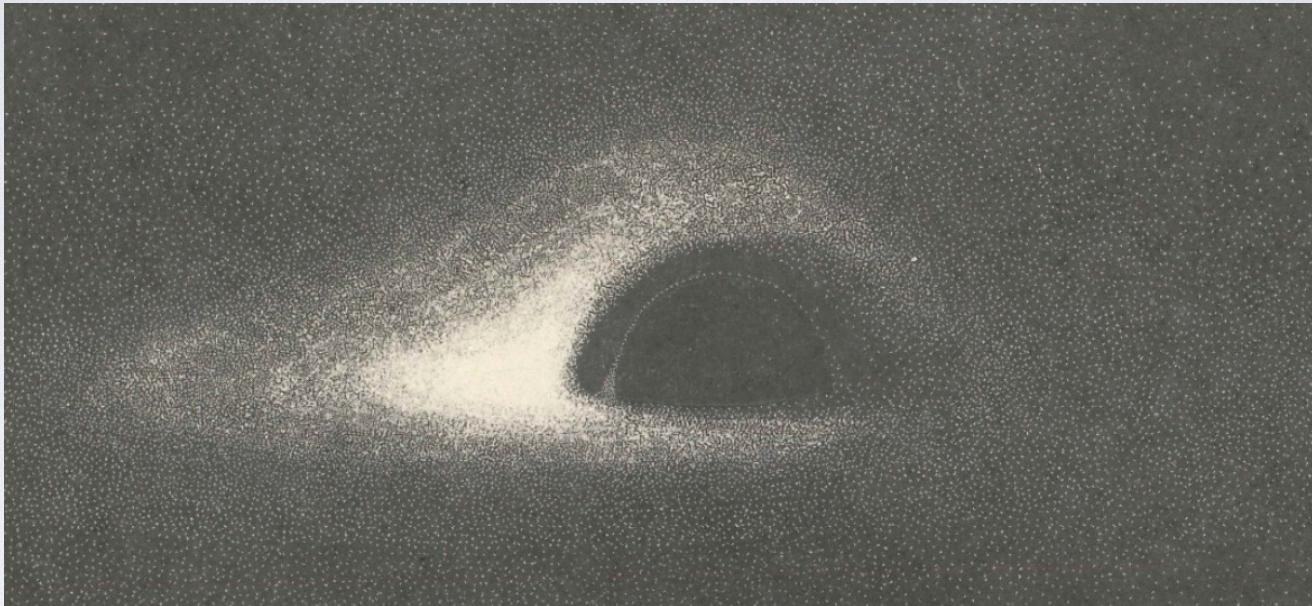
Daraus ziehen wir in Anlehnung an Poincarés Zykeltheorie den überdies recht anschaulichen Schluß: Der Lichtstrahl, der im Unendlichen auf den Abstand  $A = \frac{3\sqrt{3}}{2}\alpha$  hinzielt, biegt sich nach innen und nähert sich auf einer Spirale asymptotisch dem Kreise  $r = \frac{3}{2}\alpha$ . Dann ergibt sich für die Gesamtheit der betrachteten Strahlen die Fig. 23. Sie zeigt uns die Kreise  $r = \alpha$ ,

Fig. 23.



an welchem jeder herankommende Lichtstrahl endigt (ist doch dort die Lichtgeschwindigkeit 0), ferner  $r = \frac{3}{2}\alpha$  und  $r = \frac{3\sqrt{3}}{2}\alpha$ .

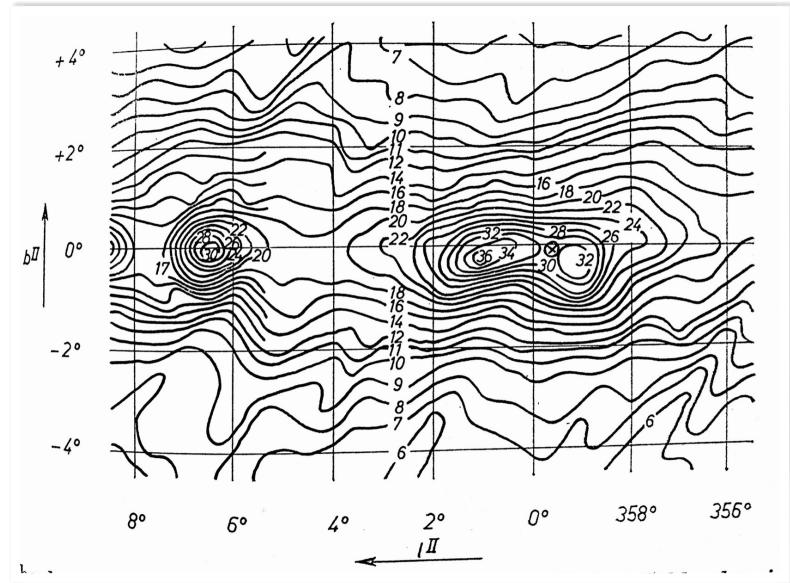
Max von  
Laue  
(1921)



J.P. Luminet, 1979

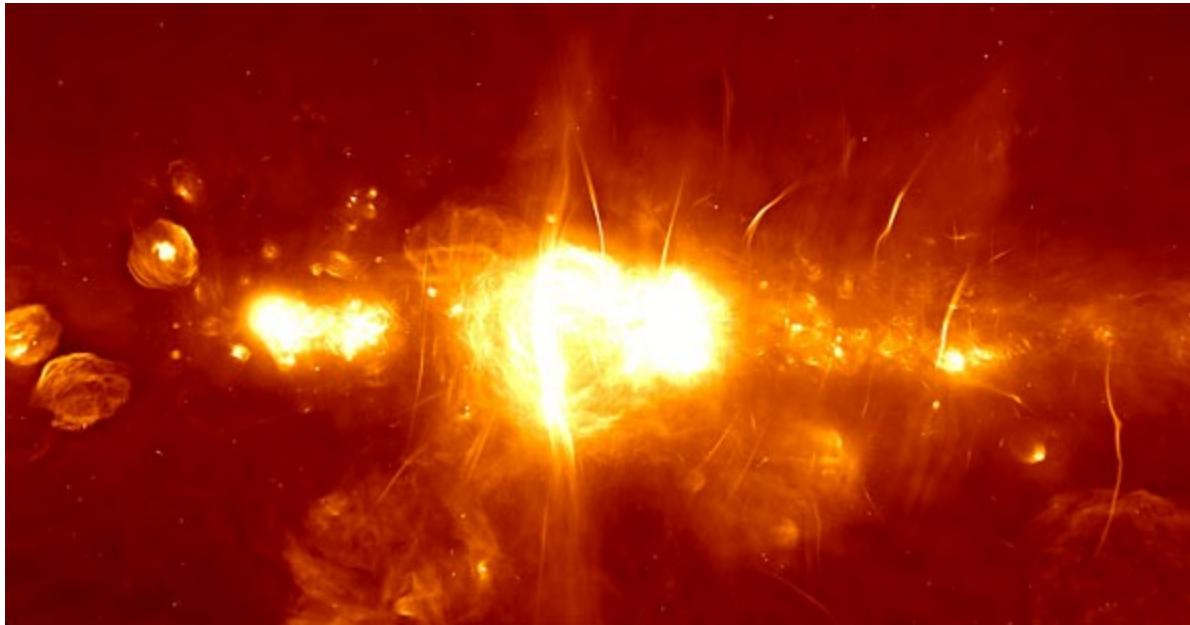
# Das Galaktische Zentrum

85 MHz, Mills+1956 (from Witzel+1967)



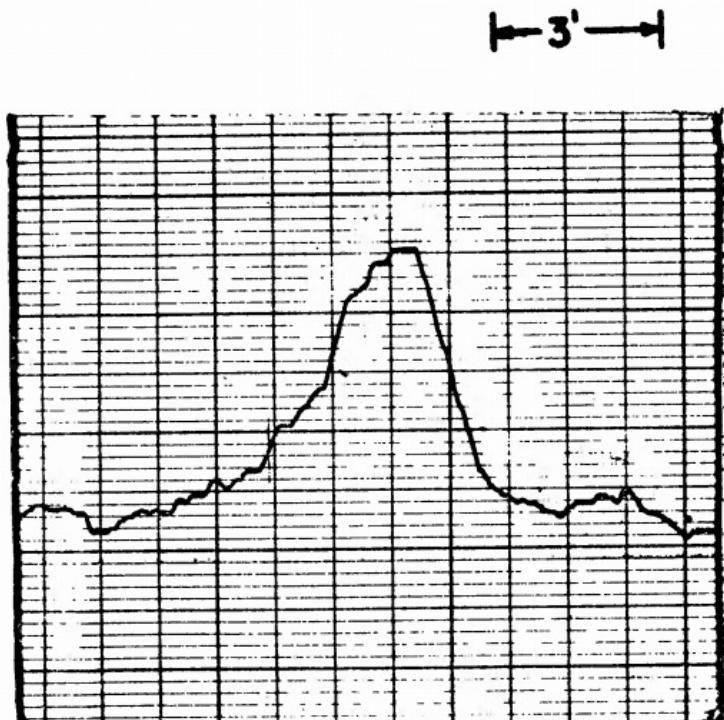
GuntherWitzel

# Das Galaktische Zentrum



MeerKAT 900-1670 MHz, 2x1 deg, 1000x500 lightyears

# The Galactic Center in the NIR: Becklin & Neugebauer 1967



GALACTIC CENTER

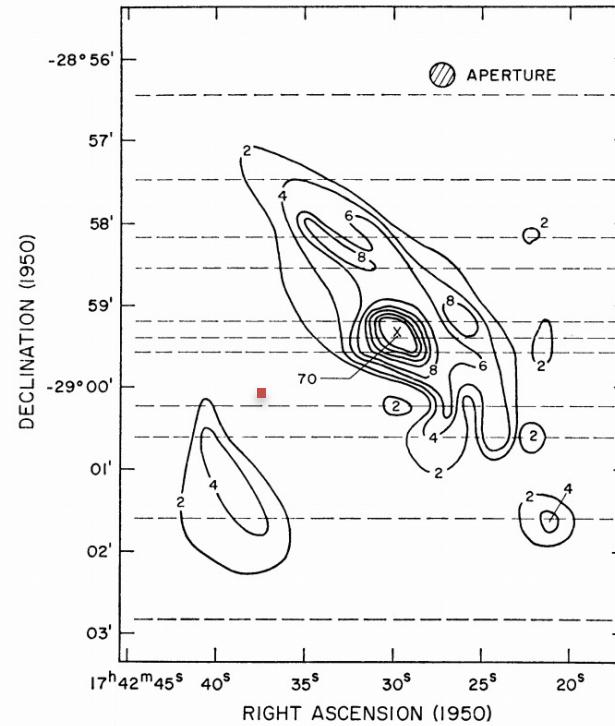
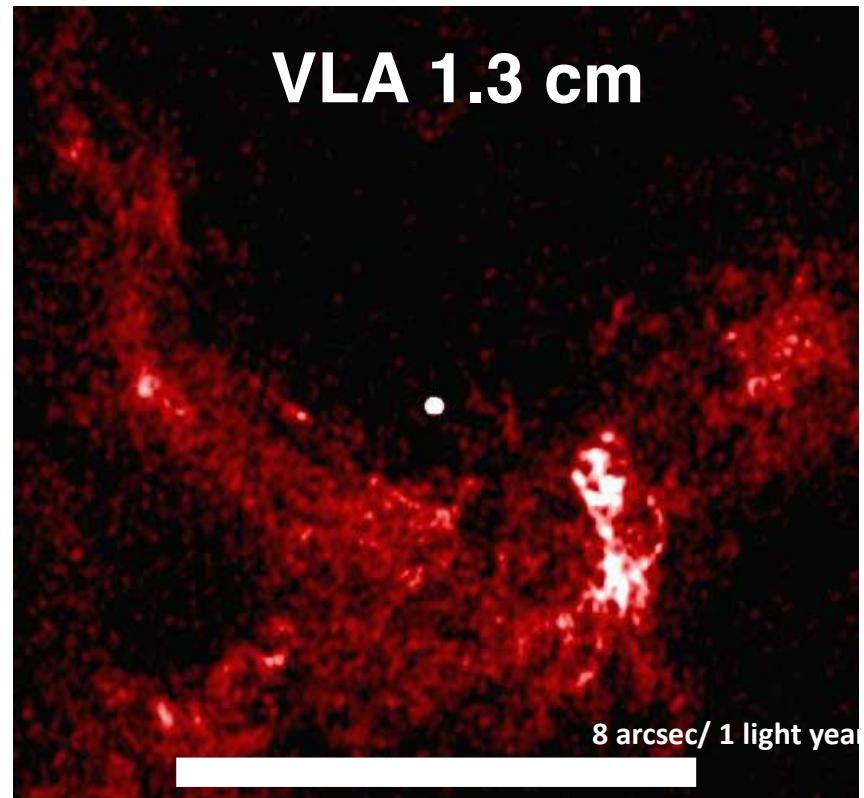
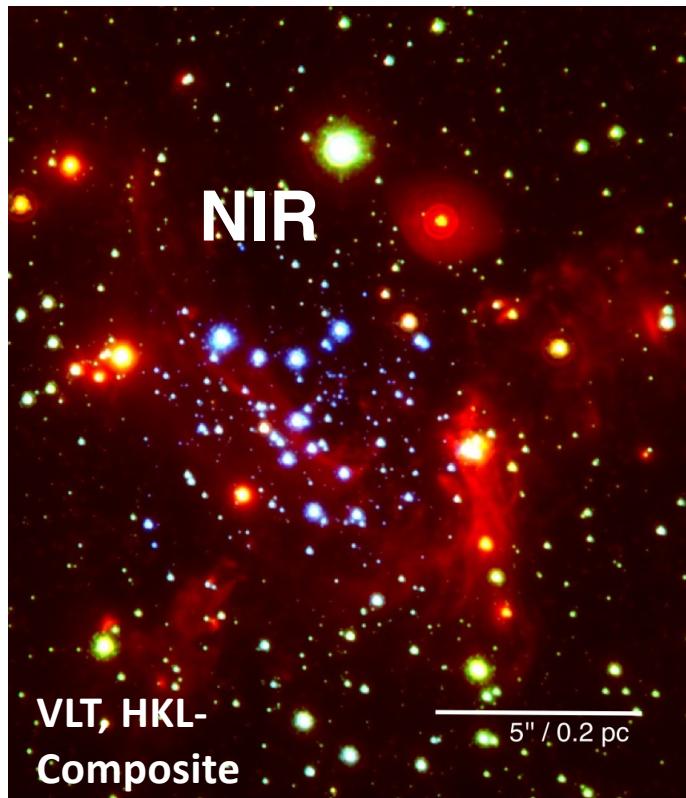
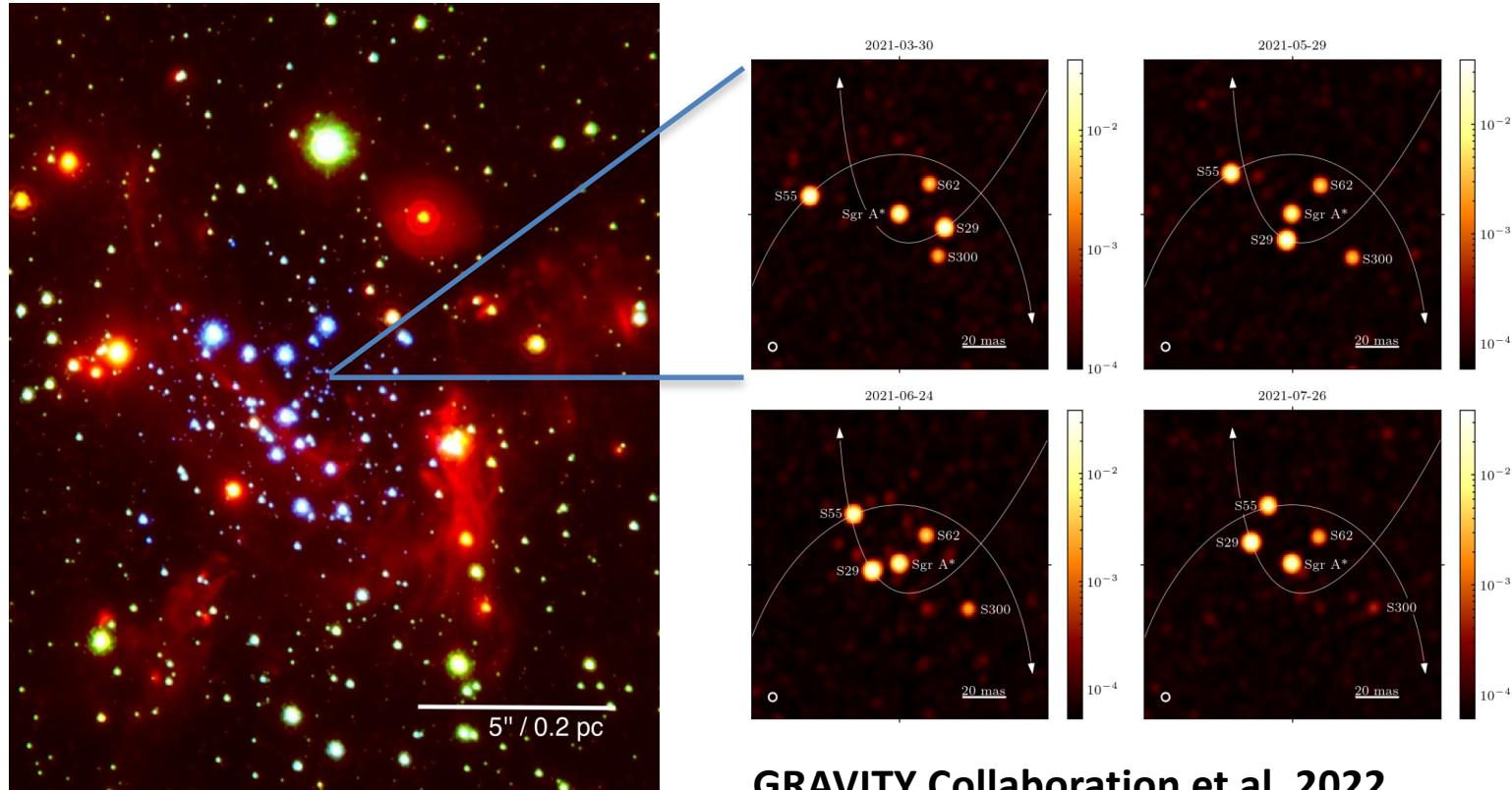


FIG. 6.—A contour map of the galactic center region at  $2\mu$  taken with an aperture of  $0'25$  diameter is given. Contour lines are labeled in units of  $1.6 \times 10^{-19} W m^{-2} Hz^{-1}$  sterad $^{-1}$  and are uncertain by about the same amount. The unlabeled contours in the center have values 10, 12, 14, and 16, respectively. The position of each scan is shown by a dashed line.

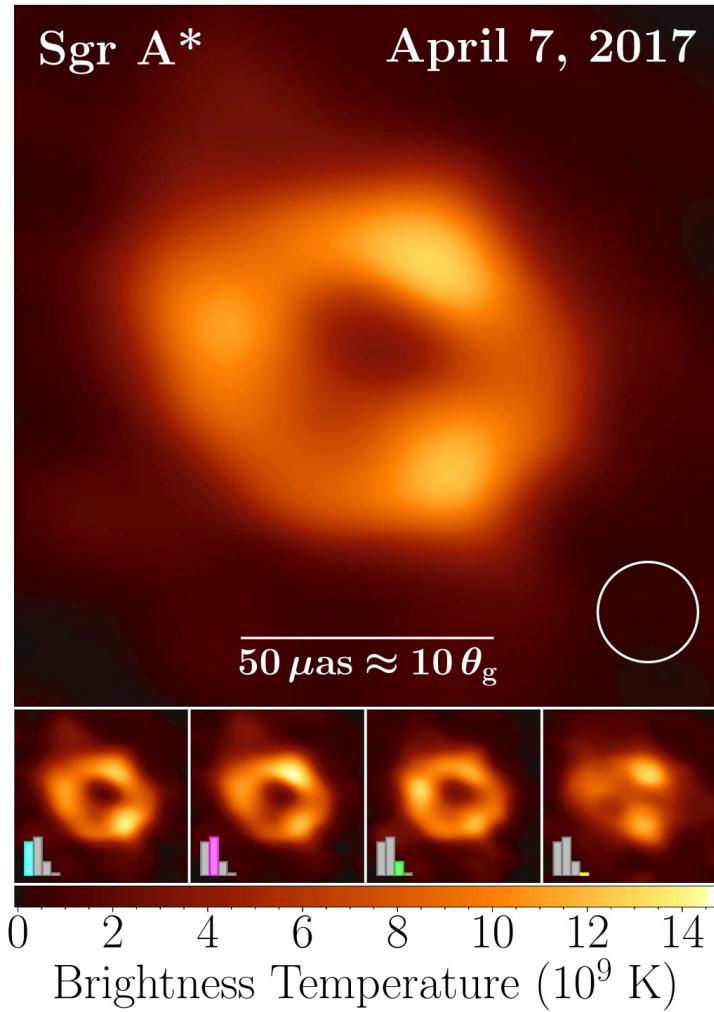
# Die inneren 0.6 pc



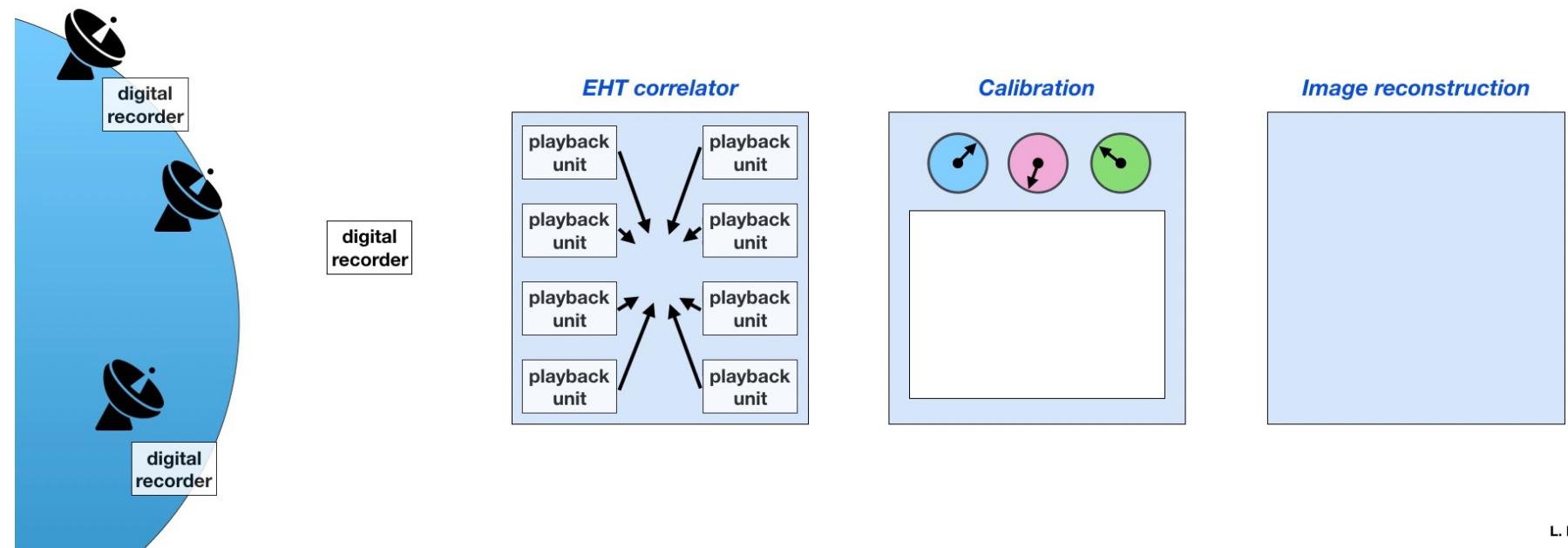
# The tiefste Bild des Galakitschen Zentrums: GRAVITY



Sgr A\* 2017



# Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

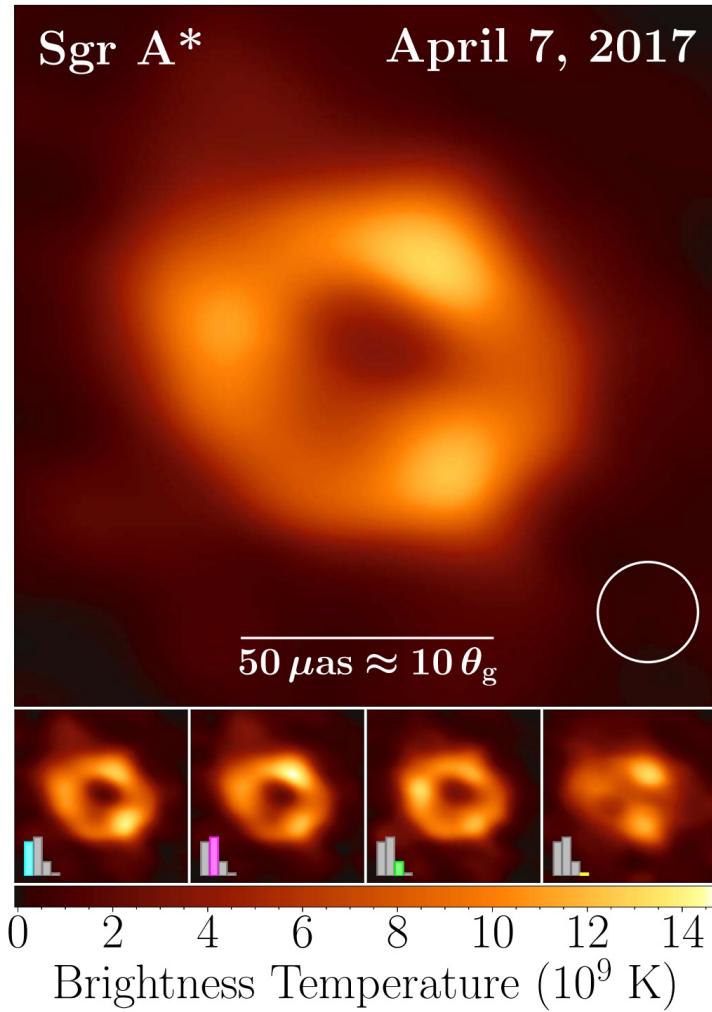




Max-Planck-Institut  
für Radioastronomie

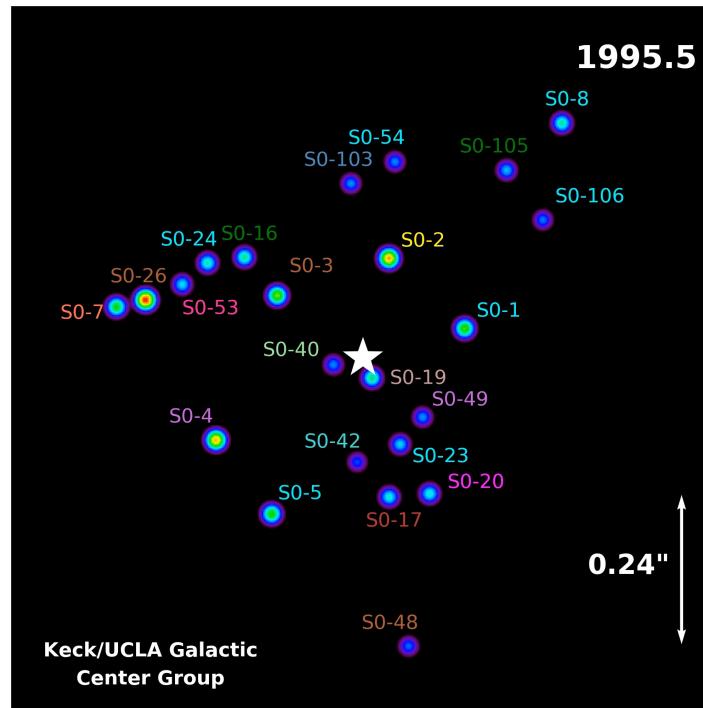
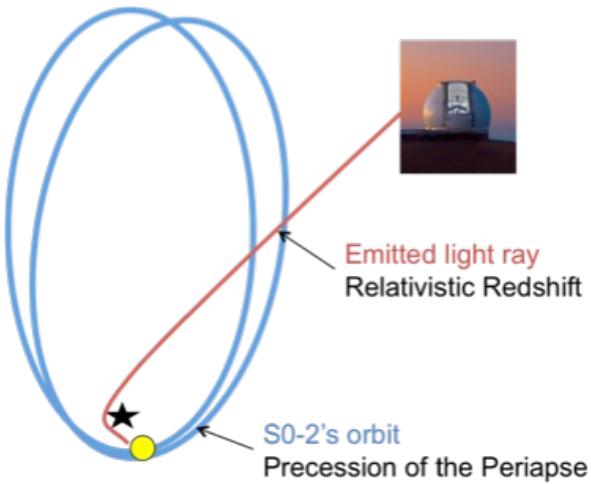
**GuntherWitzel**

Sgr A\* 2017



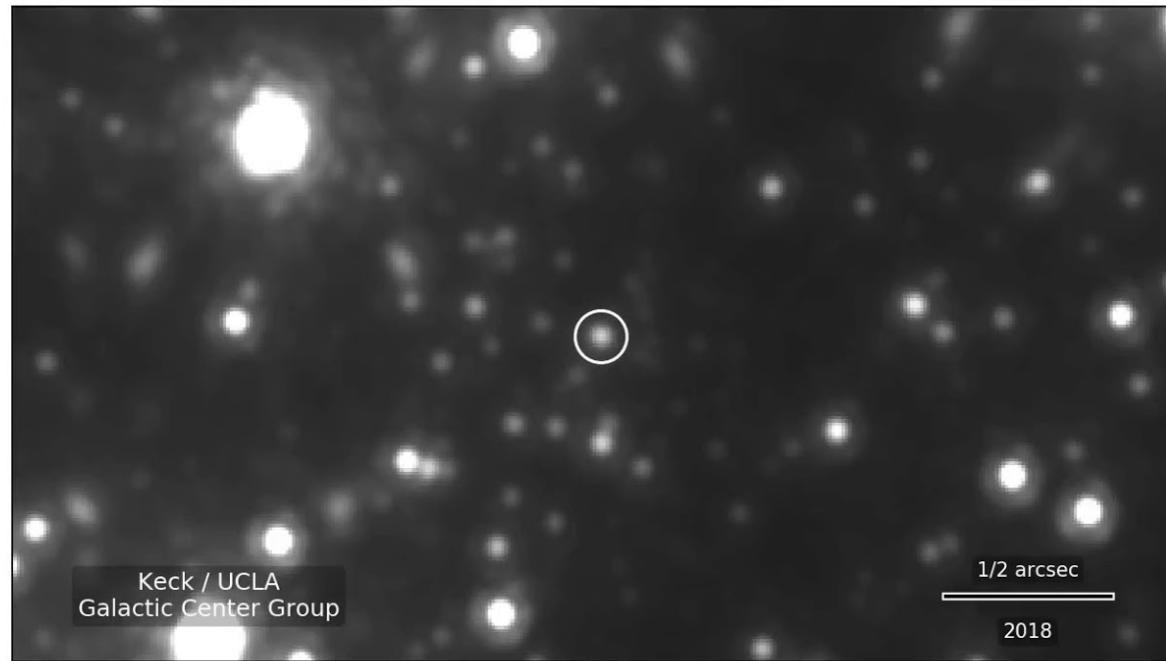
# Galactisches Zentrum im NIR: Der S-star Sternenhaufen

# NIRC2 @ Keck2

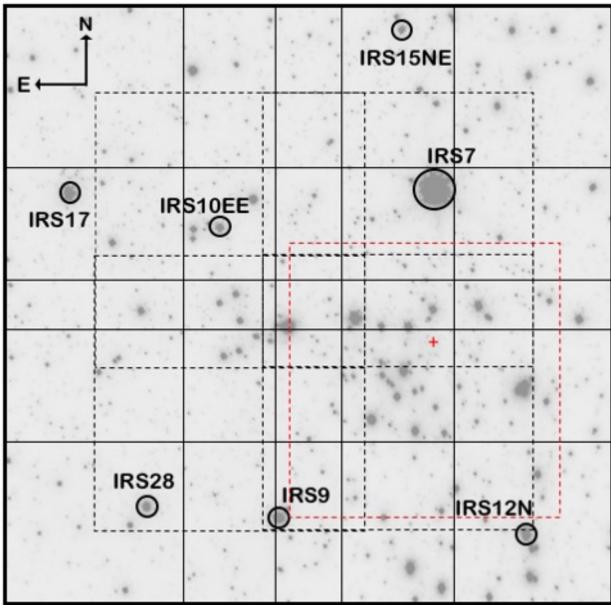


# Galactic center in the NIR: Dynamics of the S- star cluster

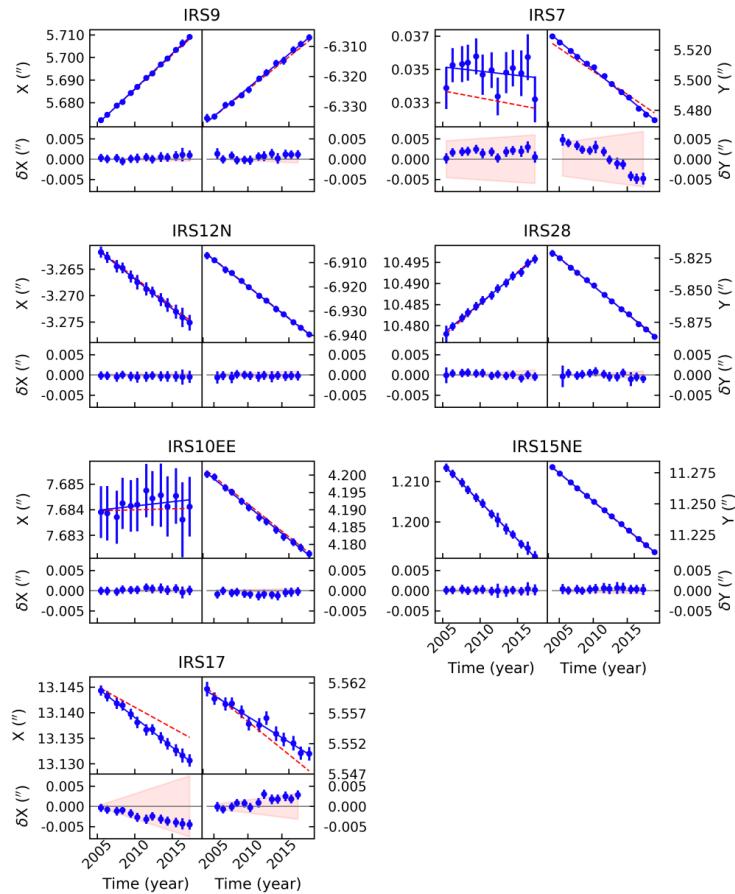
NIRC2 @ Keck2



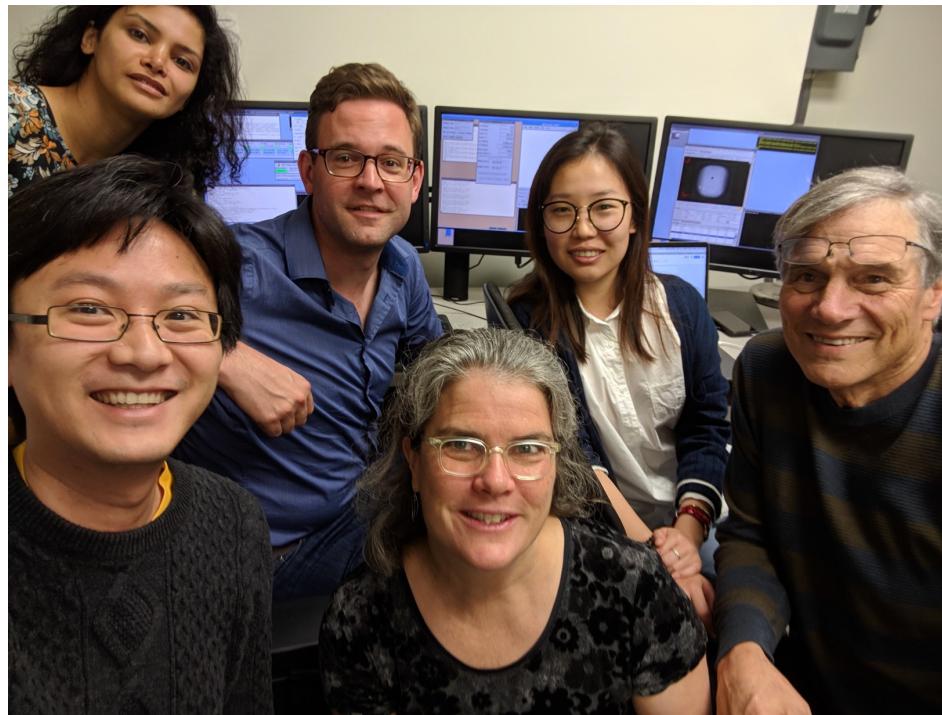
# Bezugssystem



Sakai et al. 2019  
Reid 2018 privat communication  
(Reid et al. 2007)

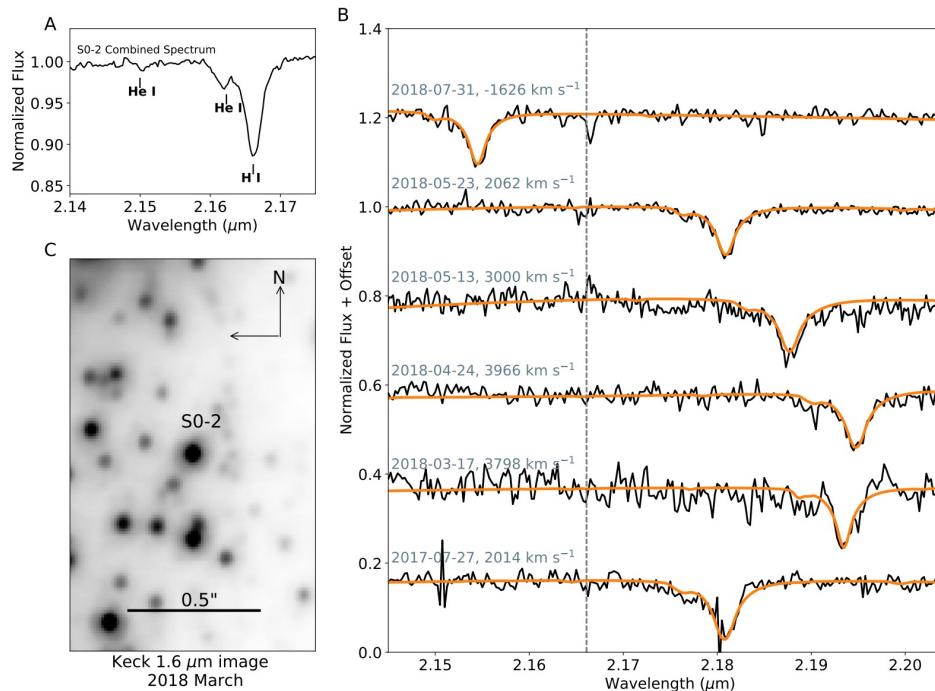


## **Observations 19 May 2018**



# Galactic center in the NIR: Dynamics of the S- star cluster

NIRC2 @ Keck2



Do et al. 2019



**GuntherWitzel**

Max-Planck-Institut  
für Radioastronomie

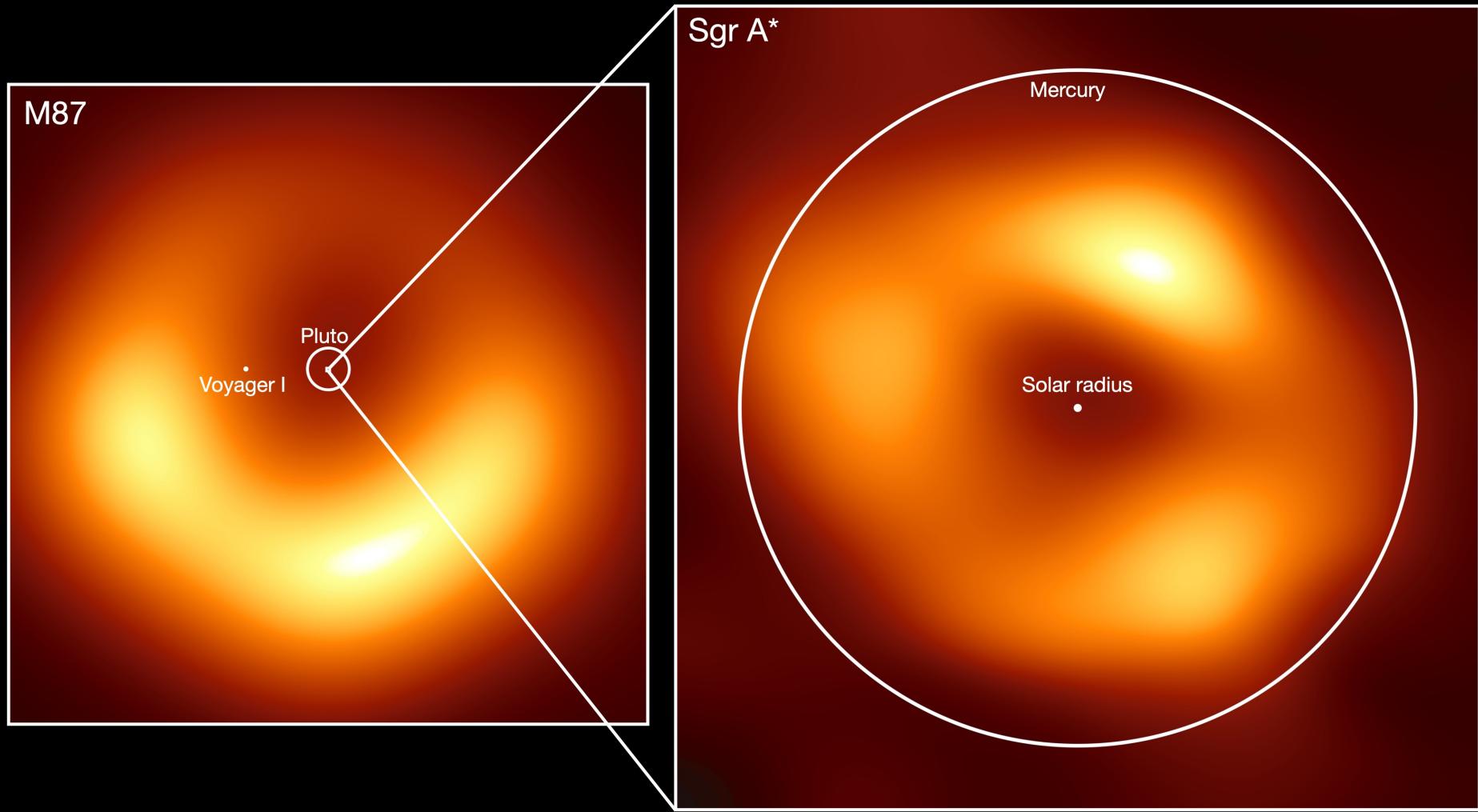
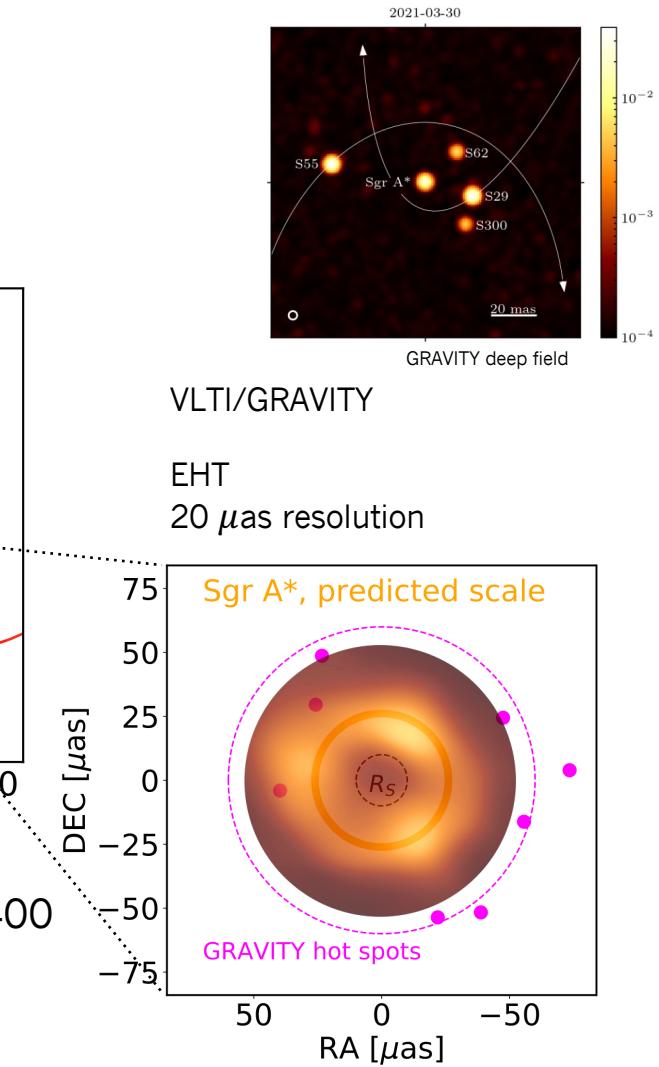
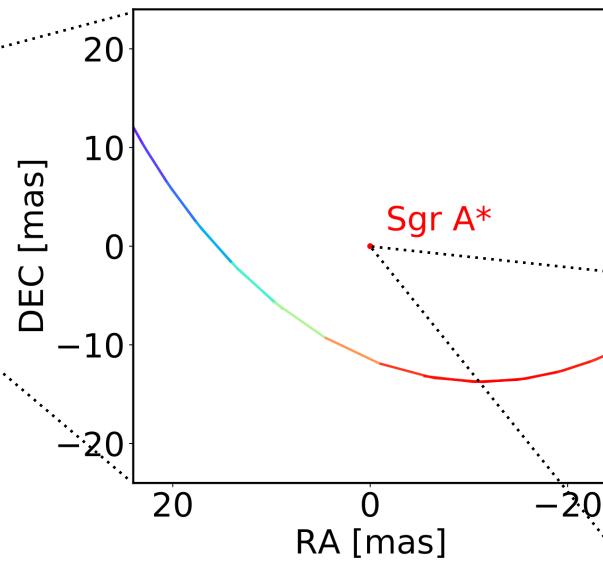
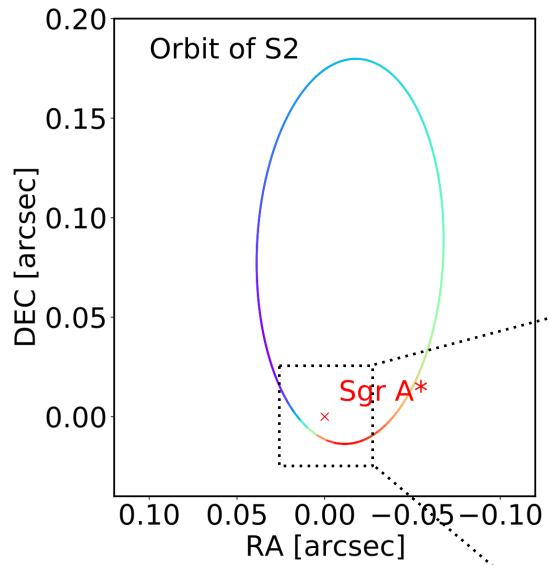


Abbildung: Lia Medeiros



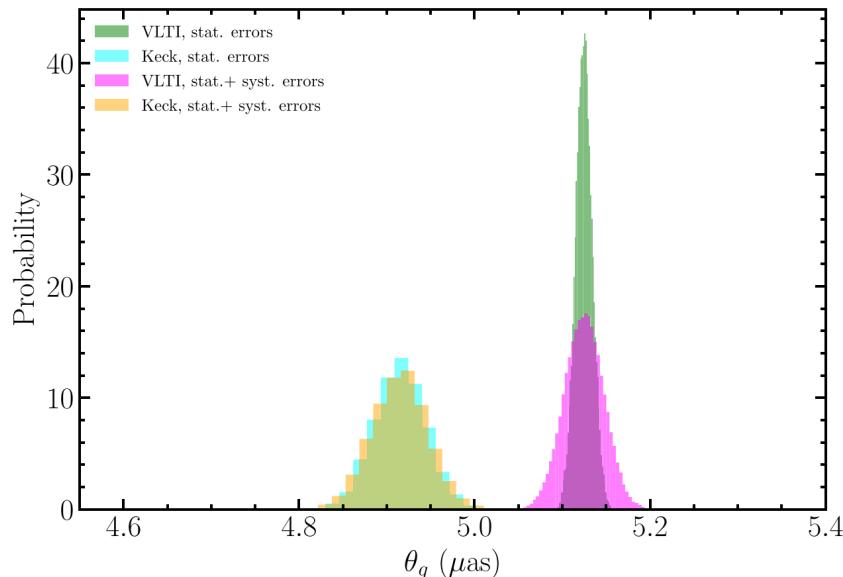
# BH parameters

**KECK:**

$$M = (3.975 \pm 0.058 \pm 0.025) \times 10^6 M_{\odot}$$

$$R_0 = (7959 \pm 59 \pm 32) \text{ pc}$$

$$\theta_g = 4.92 \pm 0.03 \pm 0.01 \mu\text{as}$$



**GRAVITY:**

$$M = (4.297 \pm 0.012 \pm 0.040) \times 10^6 M_{\odot}$$

$$R_0 = (8277 \pm 9 \pm 33) \text{ pc}$$

$$\theta_g = 5.125 \pm 0.009 \pm 0.020 \mu\text{as}$$

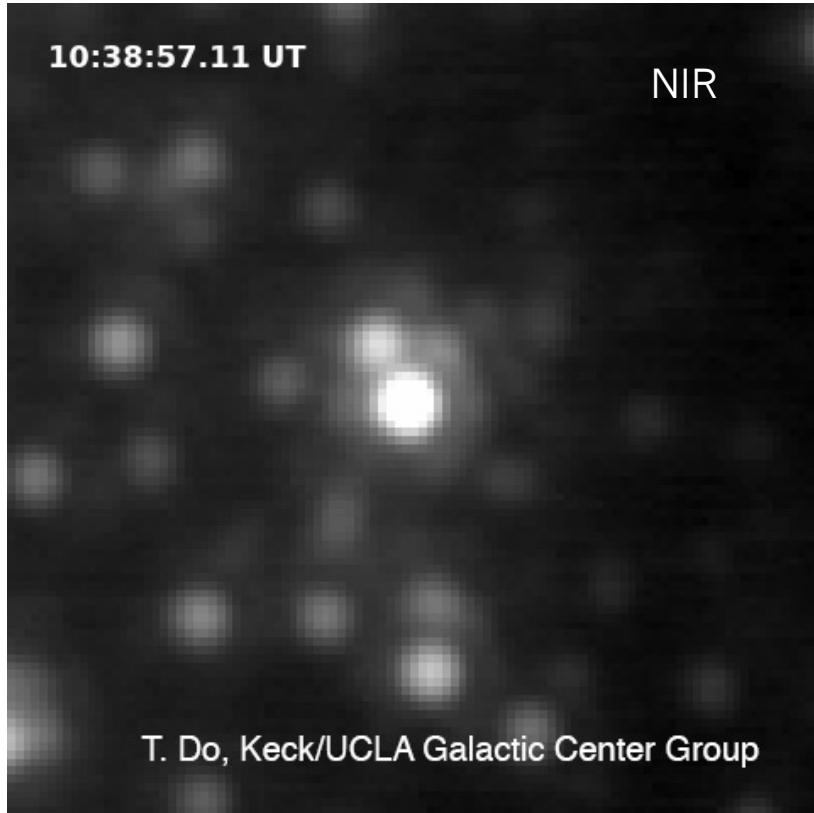
**Reid et al. 2009, 2014, 2019:**

$$R_0 = (8.15 \pm 0.15) \text{ kpc}$$

For the VLTI value, the systematics were derived by error propagation according to  $M \sim R_0^2$  (Gravity Collaboration et al. 2022)

**See also GRAVITY Collab. et al.  
2018, 2019, 2020a, 2021b,  
2022**

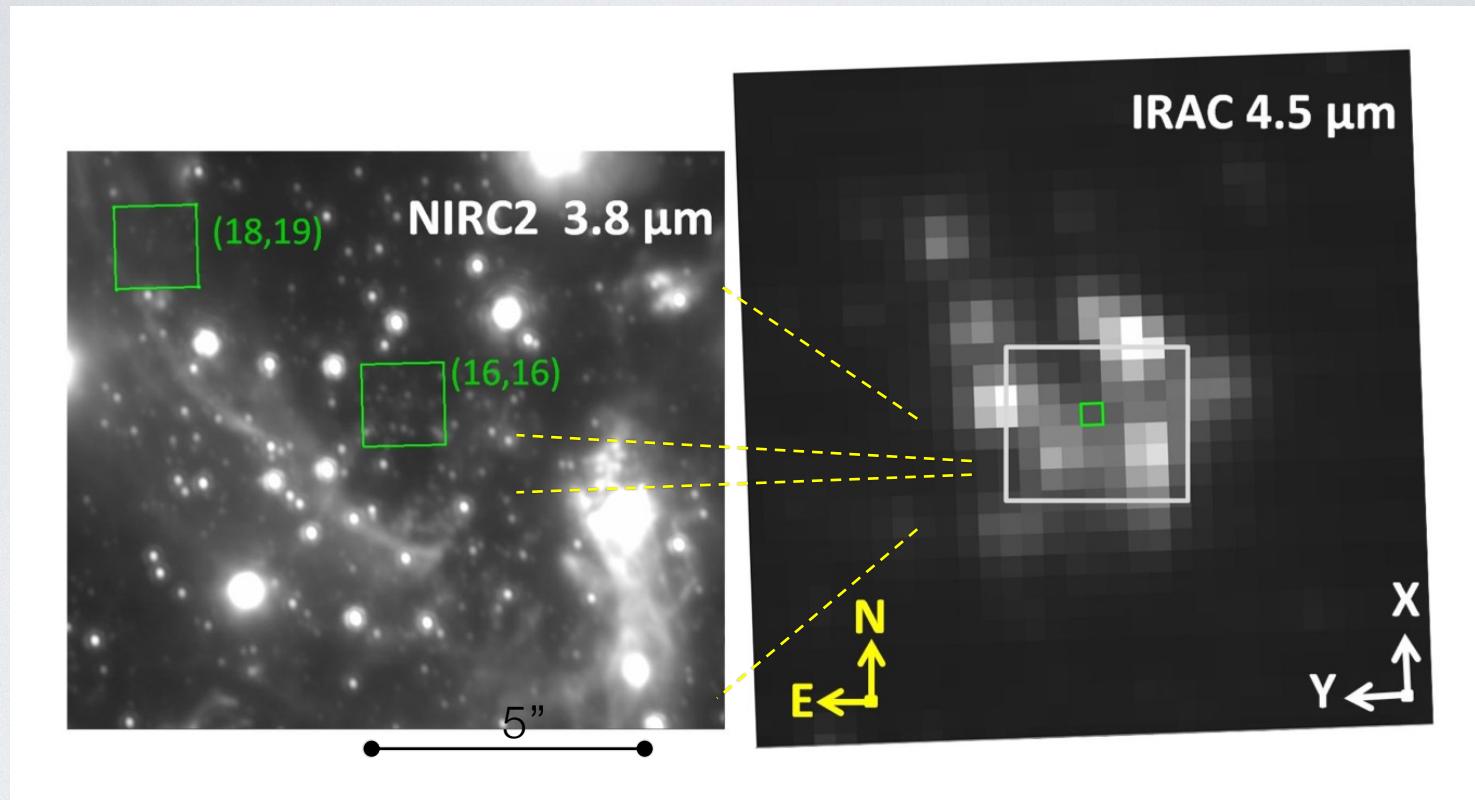
# Sgr A\*:Variable on shortest timescales



Do, Witzel et al. 2019

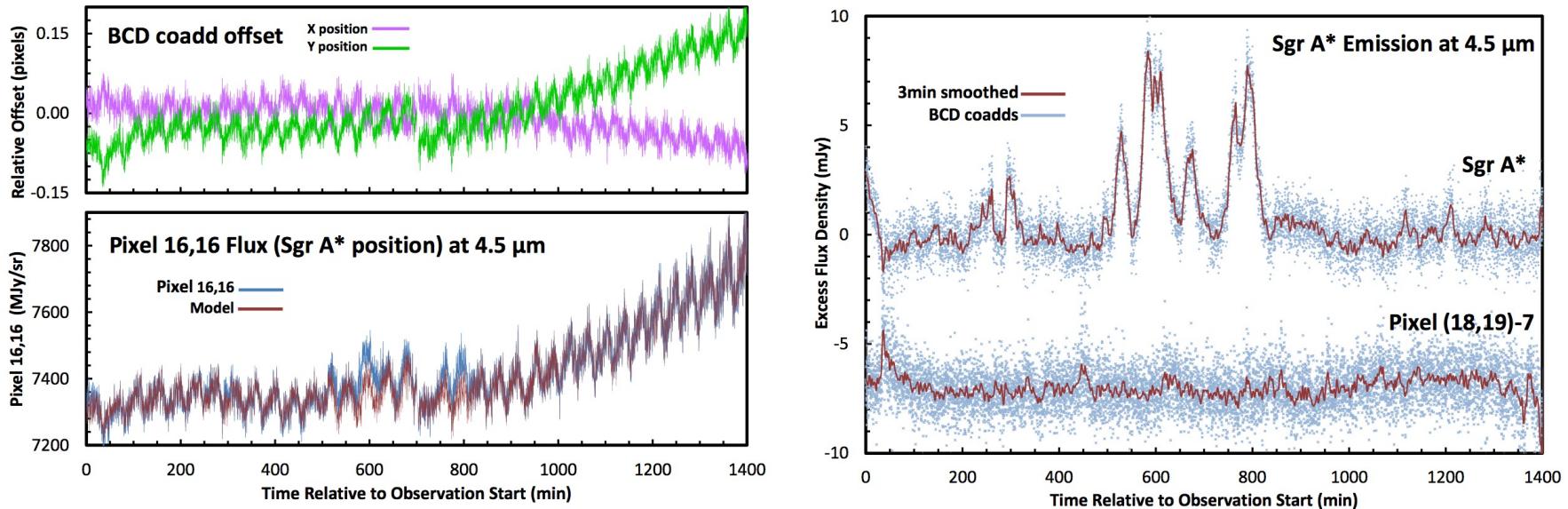


## IRAC/Spitzer 4.5 $\mu$ m monitoring of Sgr A\*



Hora, Witzel et al. 2014

# IRAC/Spitzer 4.5 $\mu$ m monitoring of Sgr A\*



Hora, Witzel et al. 2014

## Audio representation of 3.8 years of Sgr A\* (2:05 min duration)

