

# SOFIA

das fliegende Infrarot-Teleskop blickt „hinter“ die Sterne

Markus Röllig  
Universität zu Köln





S                   Stratosphären-  
O                   Observatorium  
F                   für  
I                   Infrarot  
A                   Astronomie

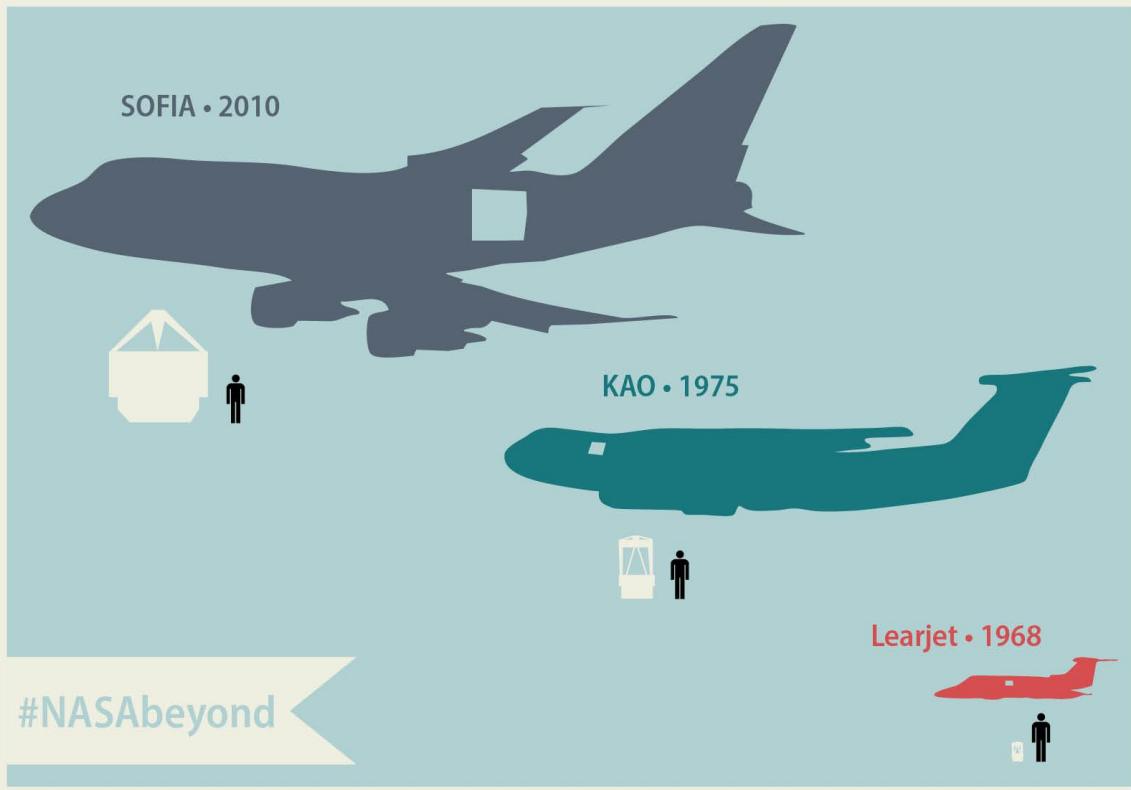


S                   STRATOSPHÄREN-  
O                   OBSERVATORIUM  
F                   für  
I                   Infrarot  
A                   Astronomie



# 40 Jahre Astronomie vom Flugzeug aus

*Celebrating more than 40 years of airborne astronomy*



# 40 Jahre Astronomie vom Flugzeug aus



Von NASA Ames/Eric James

Warning: In order to view the most up-to-date information, please click the refresh button on your browser.

**AIRCRAFT, LOCKHEED C-141A**

**Sale-Lot Number:** 91QSCI18175601  
**City, State:** Moffett Field, CA  
**Current Bid:** 8,000 USD (Reserve Not Met)  
**Bidders:** 3  
**Close Time:** 08/24 11:02 AM CT (Closed)  
**Time Remaining:**

[Description](#) [Bidding Details](#) [Bid History](#) [Item Location](#)

Note: When "Compatible" bidding occurs (two or more bids of the same amount are submitted), the "high bid" is determined by GSA Auctions system's evaluation, based on the time of submission and/or proxy.

To enhance bidder privacy, and protect GSA Auctions users from fraudulent emails, GSA Auctions has changed how User IDs are displayed on the bid history page. Only you can view your User ID, all other members will see anonymous user IDs, such as Bidder#.

As of February 14, 2009 bidders will be assigned the actual bidder number for the sale/lot based on when they placed their bid. If you are the first bidder for this sale you will see Bidder#1, if you are the second bidder you will see Bidder#2.

**Bidders in the Auction (Current top 10 bidders)**

Bidder	Bid Amount	Date-Time
Bidder#3	(Reserve not met) 8,000 USD	08/24/2018 10:52:05 AM CT
Bidder#2	7,000 USD	08/23/2018 05:07:17 PM CT
Bidder#1	6,000 USD	08/23/2018 10:14:15 AM CT

**Your Bids**

**Item Photos**

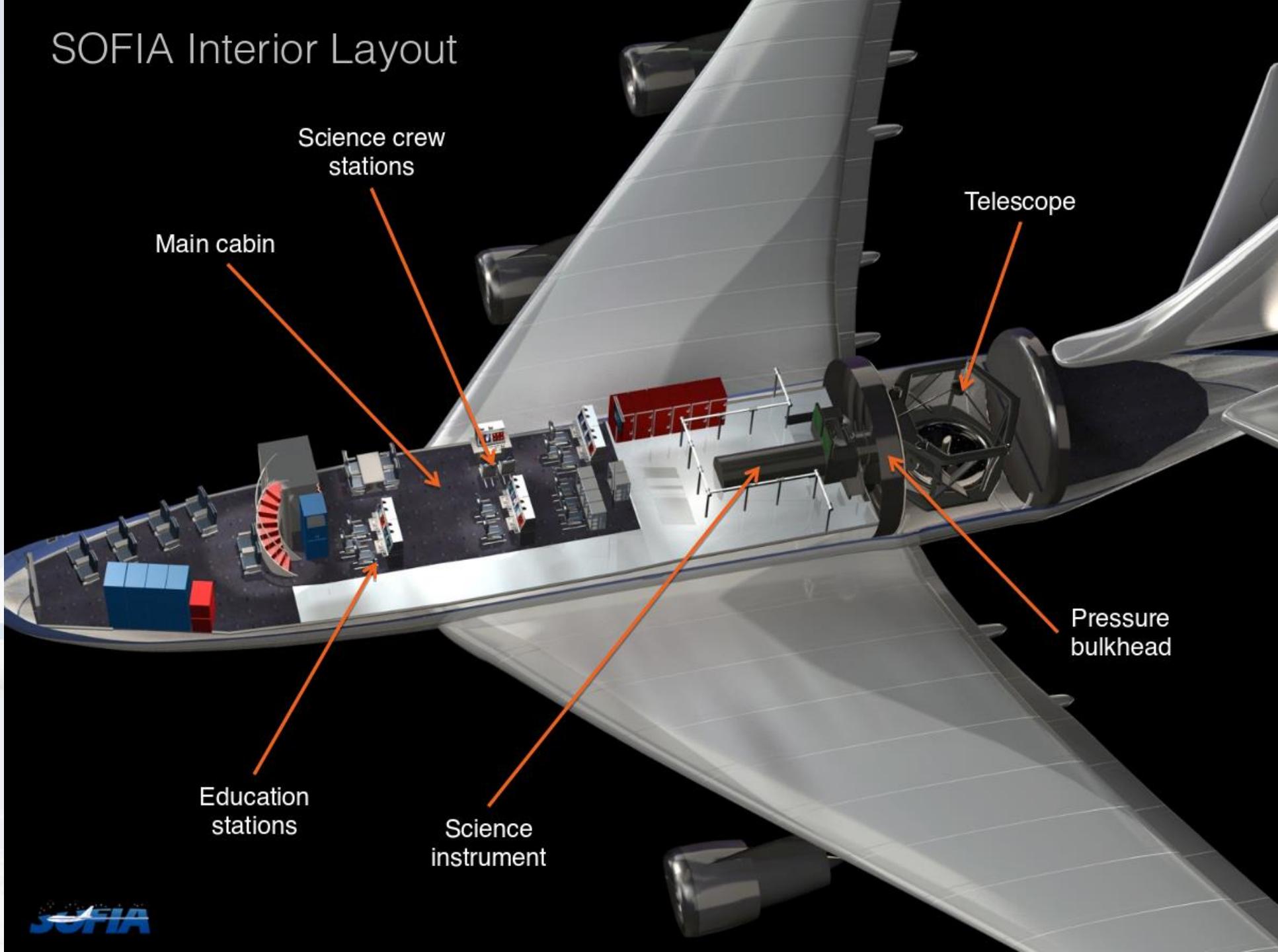
2018

# SOFIA

- Boeing 747SP (Special Performance)
- Registrierung **N747NA**
- Baujahr 1977
- Erster wissenschaftlicher Flug 2010
- Regelbetrieb seit 2014, ca. 500 Flüge seitdem
- Missionsdauer: 20 Jahre
- US/Deutsche Zusammenarbeit 80/20

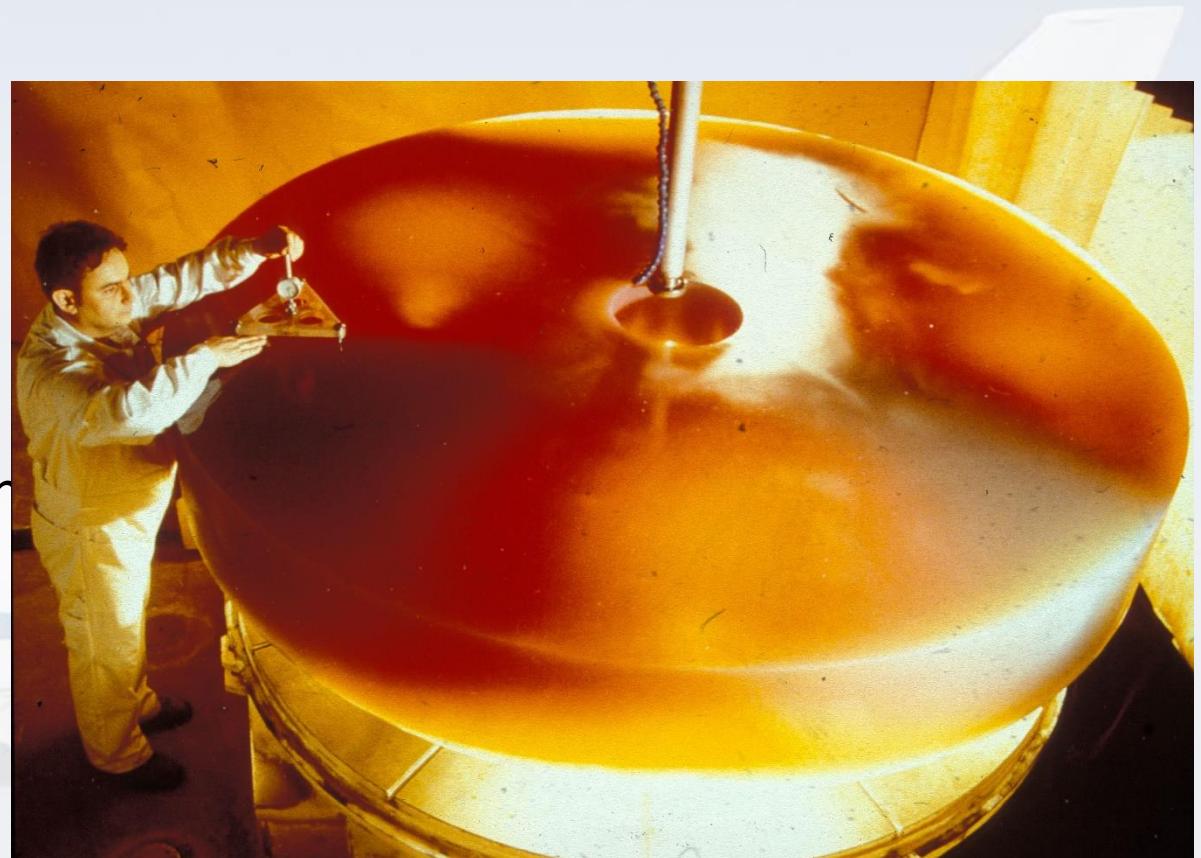


# SOFIA Interior Layout



# Teleskopspiegel

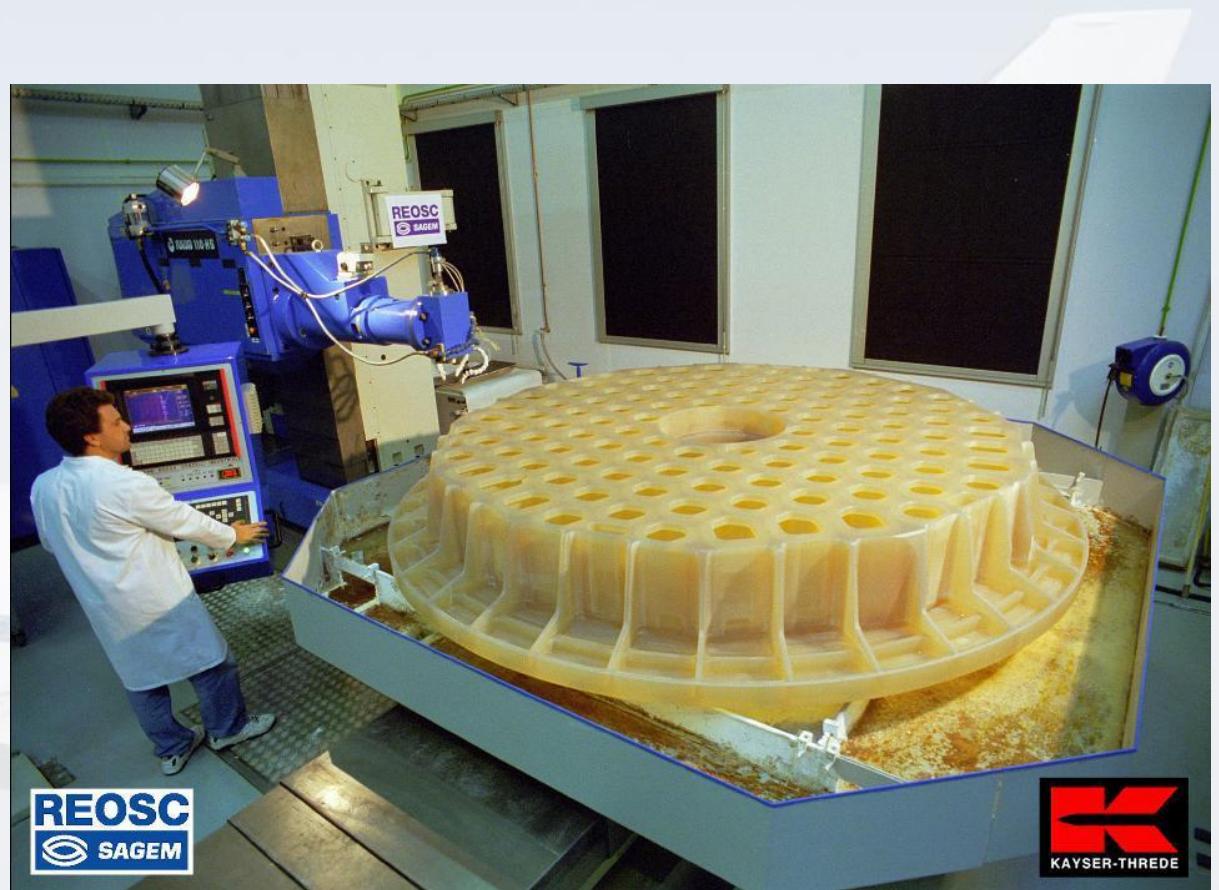
- Gefertigt von Schott, 1997
- Material: Zerodur (ähnlich Ceran)
  - extrem geringe Wärmeausdehnung
  - Spiegeleigenschaften stabil gegenüber Temperaturänderungen
- Gewicht des Rohlings: 4 t



Quelle: Deutsches SOFIA Institut

# Teleskopspiegel

- Gewicht des Rohlings: 4 t
- zu schwer für Betrieb!
- „Leichtgewichtung“ 1999
  - 120 Sacklöcher in die Rückseite des Spiegels gefräst
  - Wabenstruktur
  - Stegbreite teilweise nur noch 7 mm
  - Gewicht: 900 kg!



Quelle: Deutsches SOFIA Institut

# Teleskopspiegel

- Politur des Spiegels
  - Dauer: 15 Monate
  - Schliff zu parabolischer Form
  - Es folgt: Beschichtung mit Aluminium



Quelle: Deutsches SOFIA Institut

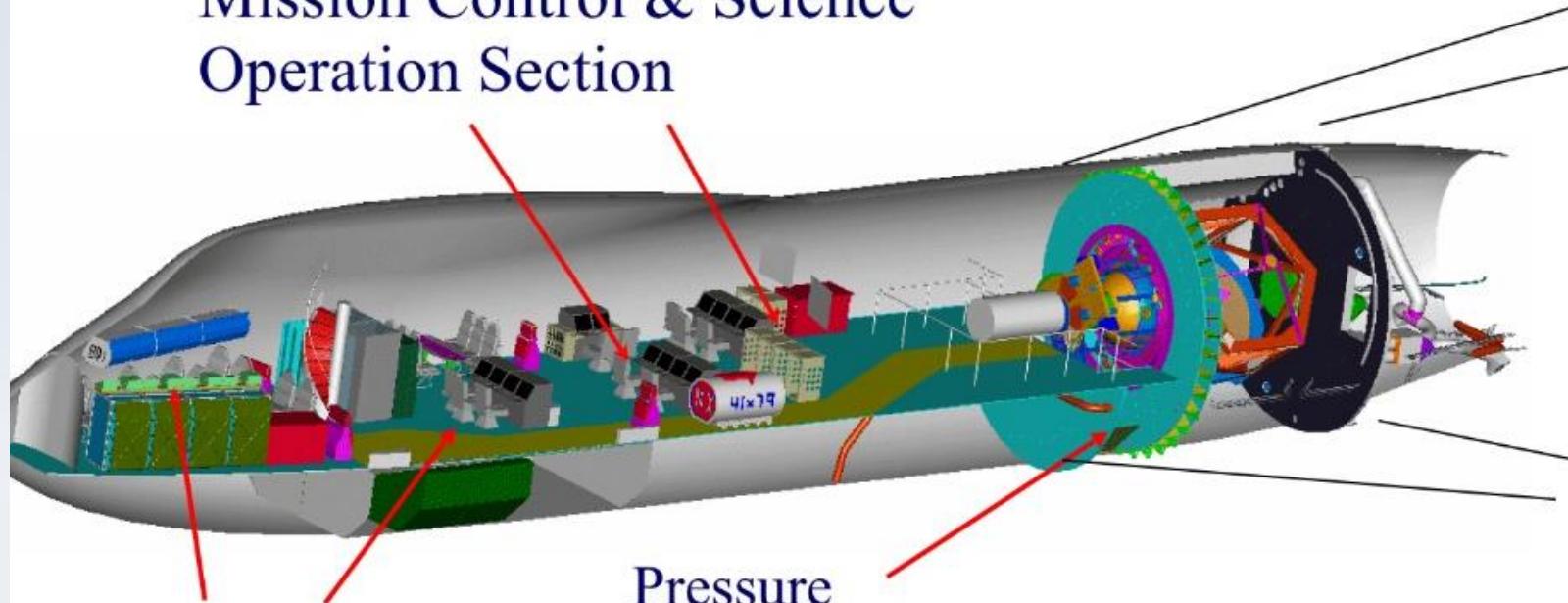
# Teleskopspiegel

- Haltestruktur
  - Kohlefaser-verstärktem Kunststoff
  - 2002 fertig



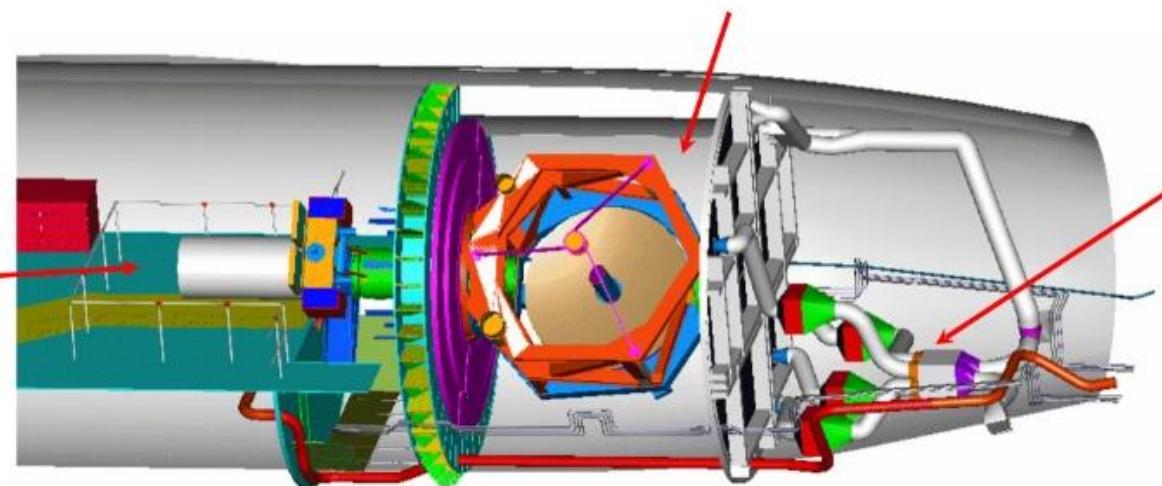
Quelle: Deutsches SOFIA Institut

## Mission Control & Science Operation Section

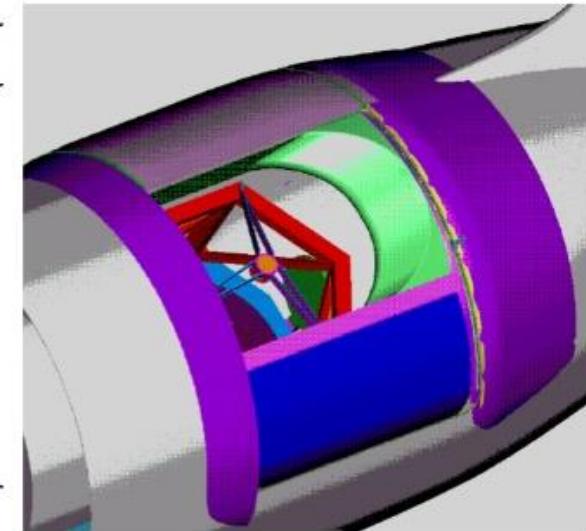


## Education & Public Outreach Section

## Science Instrument



## Open Port Cavity

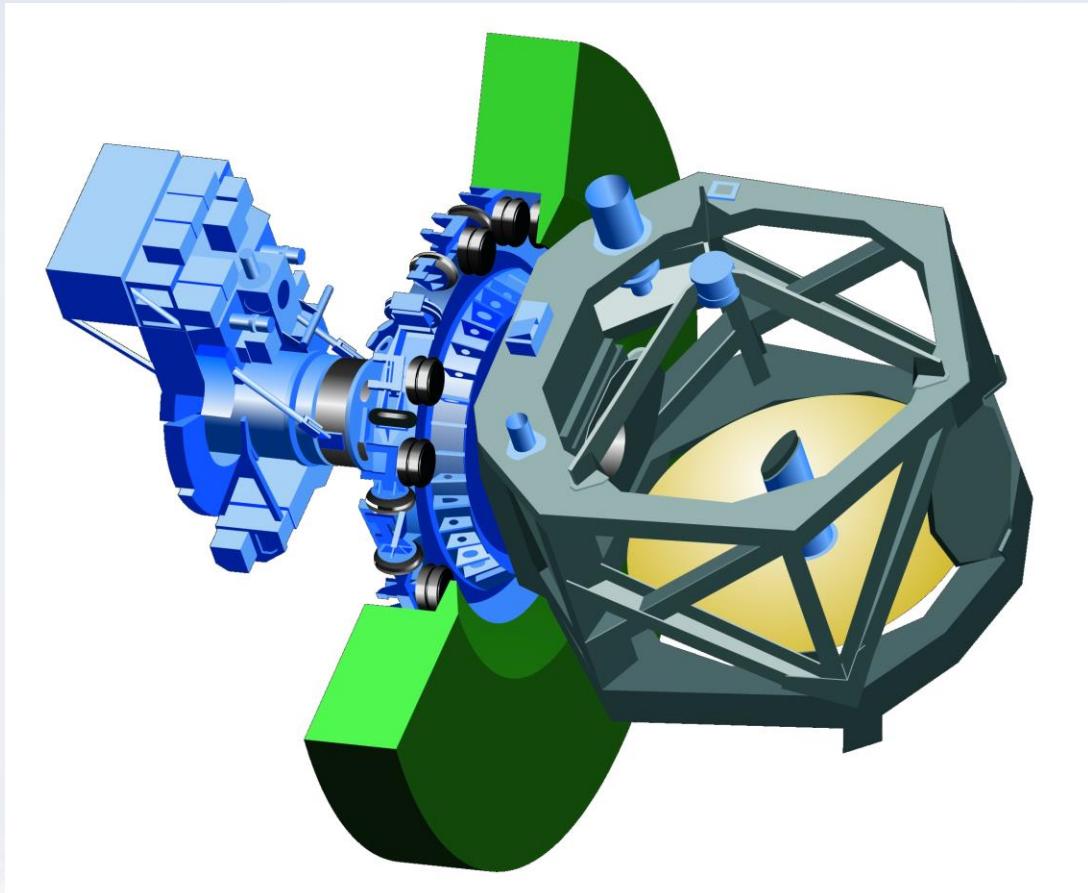


## Telescope Cavity Door

Cavity Environmental Control System

Quelle: NASA/DLR

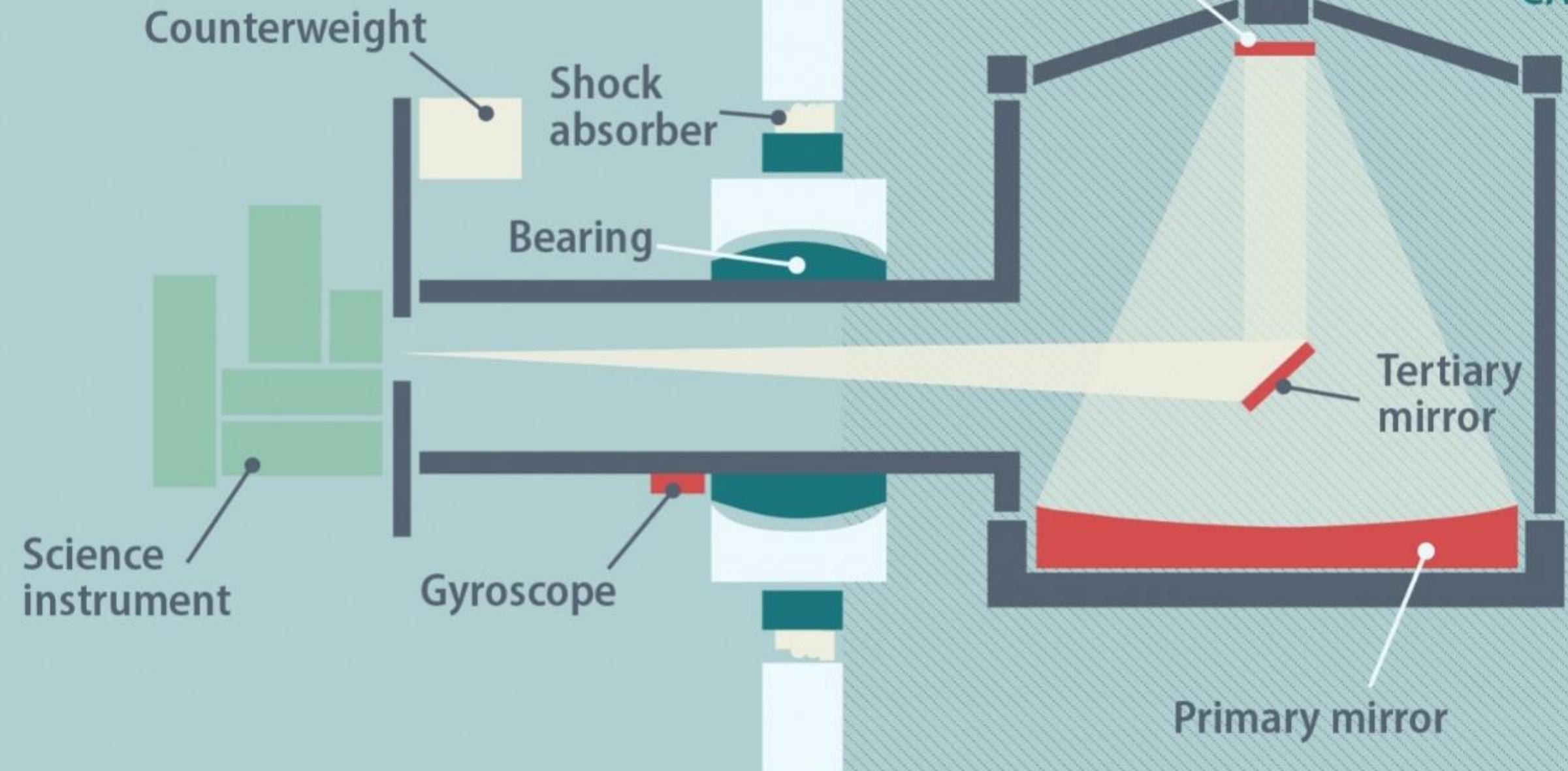
# Teleskop



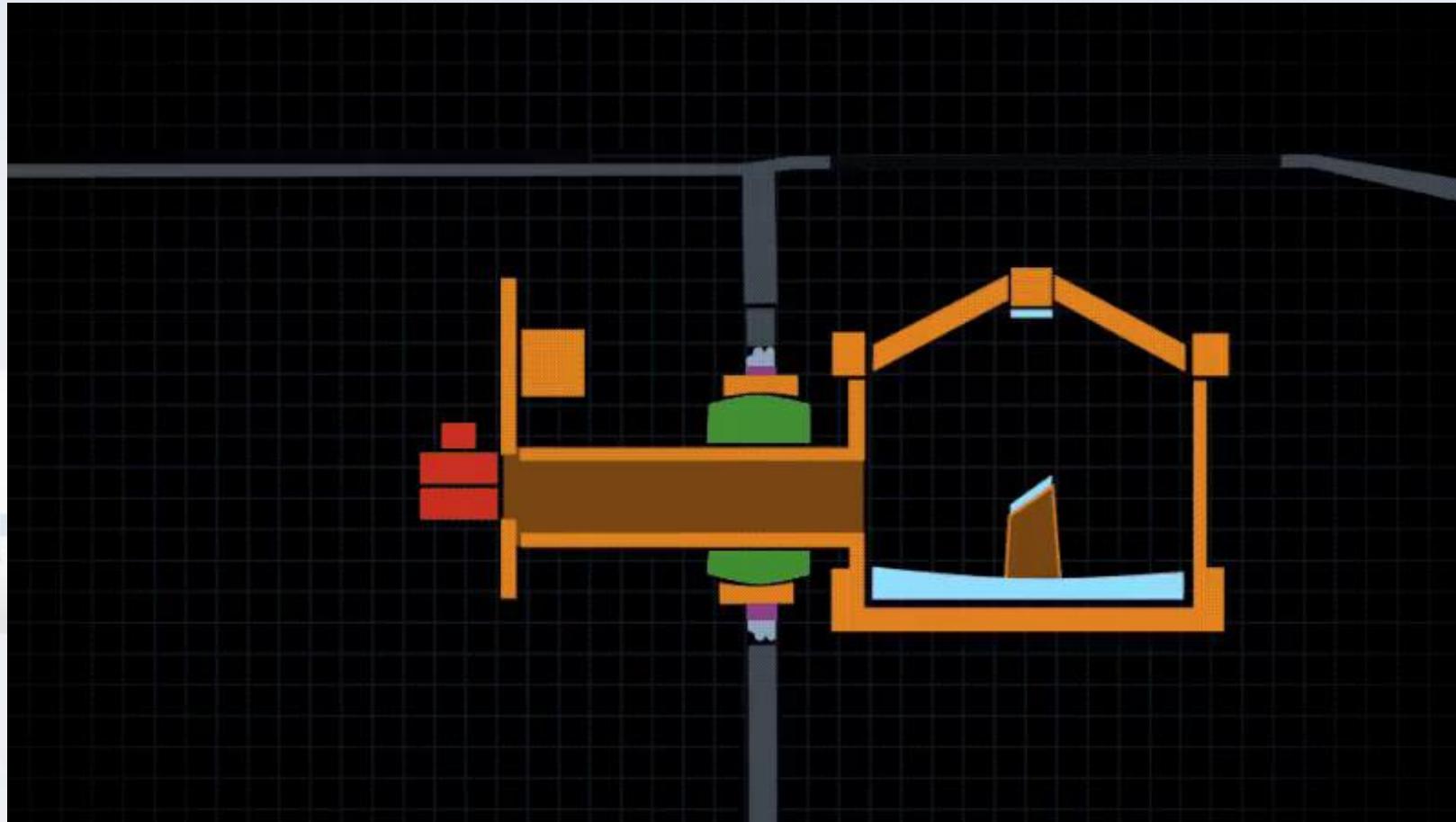
- Teleskop:
  - Primärspiegel
    - 2.7 Meter Durchmesser
    - $\lambda > 0.3 \mu\text{m}$
  - Pointing Genauigkeit  $\sim 1''$ 
    - Beugungslimitiert für  $\lambda > 20 \mu\text{m}$
  - Chopper: 10' bei 2 Hz
  - Optik bei Umgebungstemperatur  $\sim 240\text{K}$
  - Gewicht: 17 t
  - Blendenzahl f/19.6

CABIN

TELESCOPE  
CAVITY

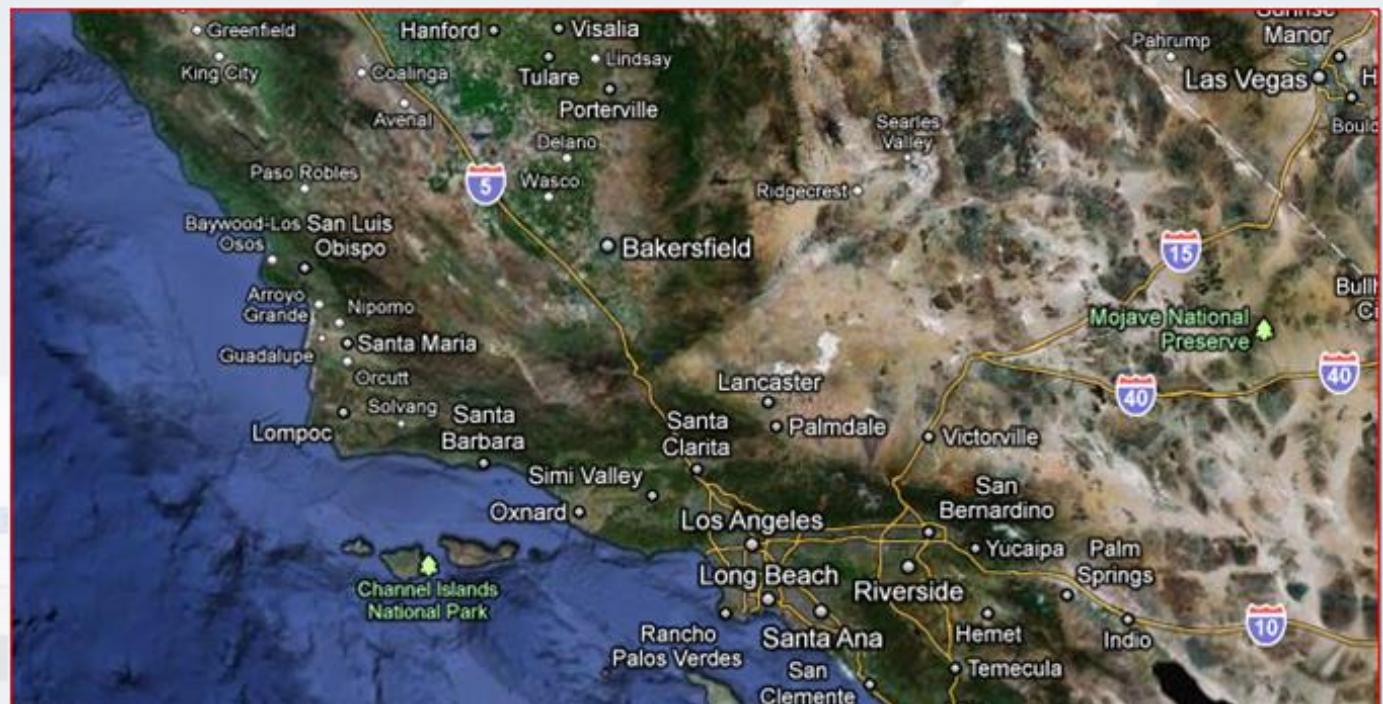


# SOFIA - Teleskopaufhängung



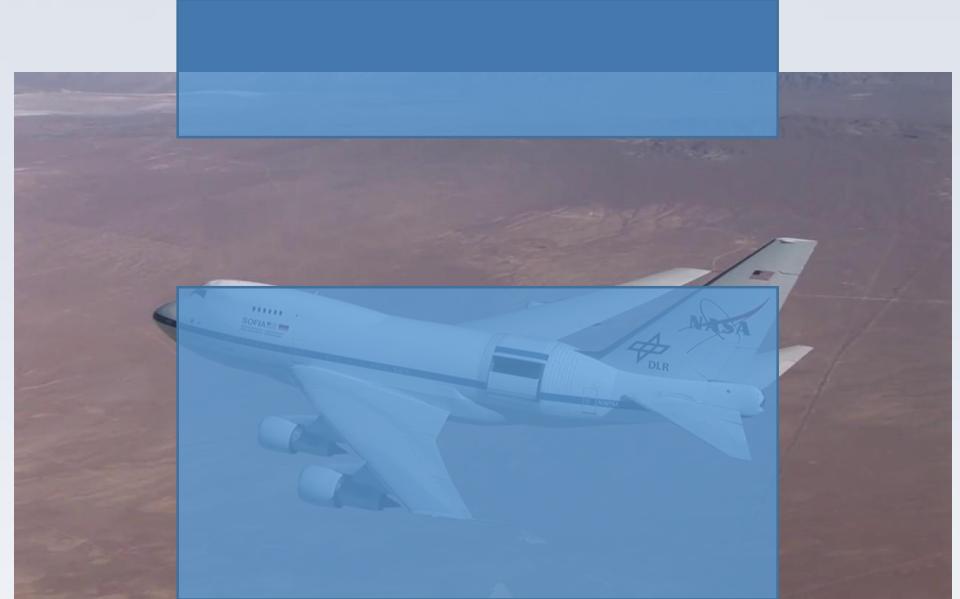
# Betrieb

- Flexibel, weltweit einsetzbar  
(Südhimmel von Neuseeland)
- SOFIA Flight Operations Center
  - Armstrong Flight Research Center Dryden, Palmdale, CA
- Typische Flugzeit 10 Std.  
(immer nachts)
- Im Jahr ca. 100  
wissenschaftliche Flüge



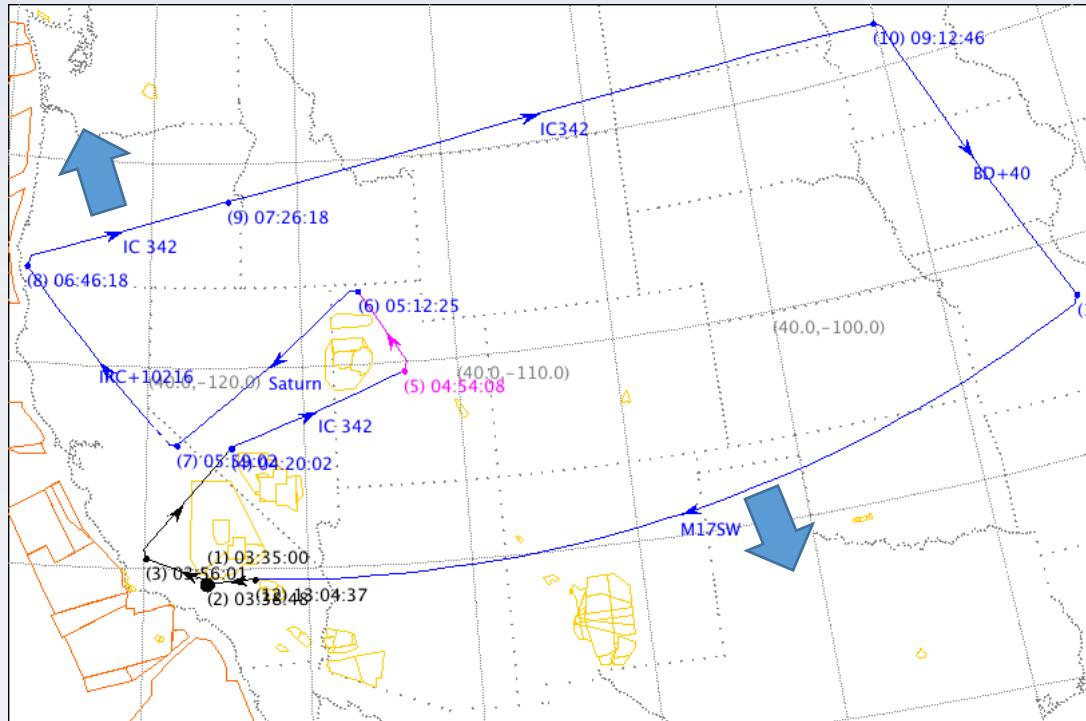
# Flugplanung

- Blickrichtung des Teleskops: Backbord
- Freiheit in Azimuth:  $\pm 3^\circ$
- Freiheit in Elevation:  $20^\circ$ - $60^\circ$

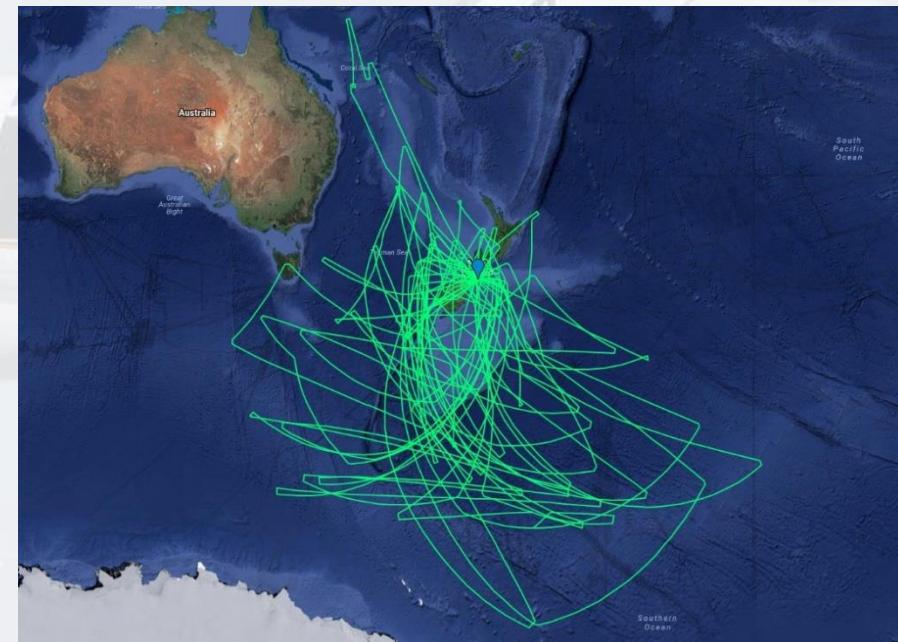


Quelle: Planetarium Hamburg

# Flugplanung



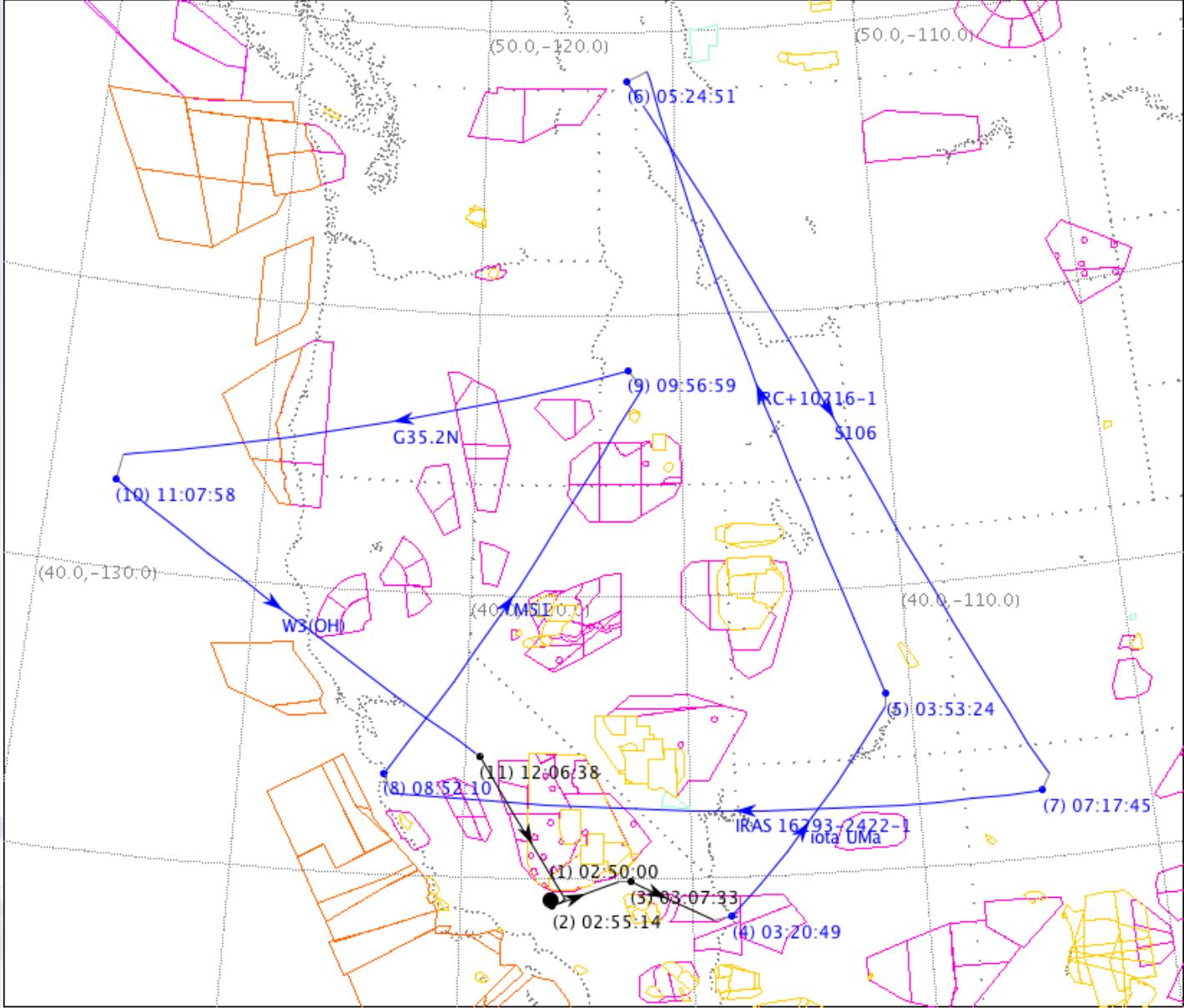
- Blickrichtung des Teleskops: Backbord
- Freiheit in Azimuth:  $\pm 3^\circ$
- Freiheit in Elevation:  $20^\circ$ - $60^\circ$



2018: Flüge in Neuseeland

# Flugplanung

- Geschlossene Flugwege
- Länge der „legs“ richtet sich nach Beobachtungszeit.
- Nicht in Richtung Sonne beobachten
- Wissenschaftliche Qualität der Anträge
- Politische Regeln
- Luftverkehrsregeln
- Hemisphäre/Saison



Flight Plan Name: File: 201505\_GR\_04\_WX12.fp

Flight ID: 2015/05/22

Est. Takeoff Time: 2015-May-22 02:50 UTC

Est. Landing Time: 2015-May-22 12:35 UTC

Flight Duration: 09:45

Weather Forecast: 1200 Thu May 21 2015 - 0000 Sun May 24 2015 UTC

Forecast Timestamp: 0445 Thu May 21 2015 UTC

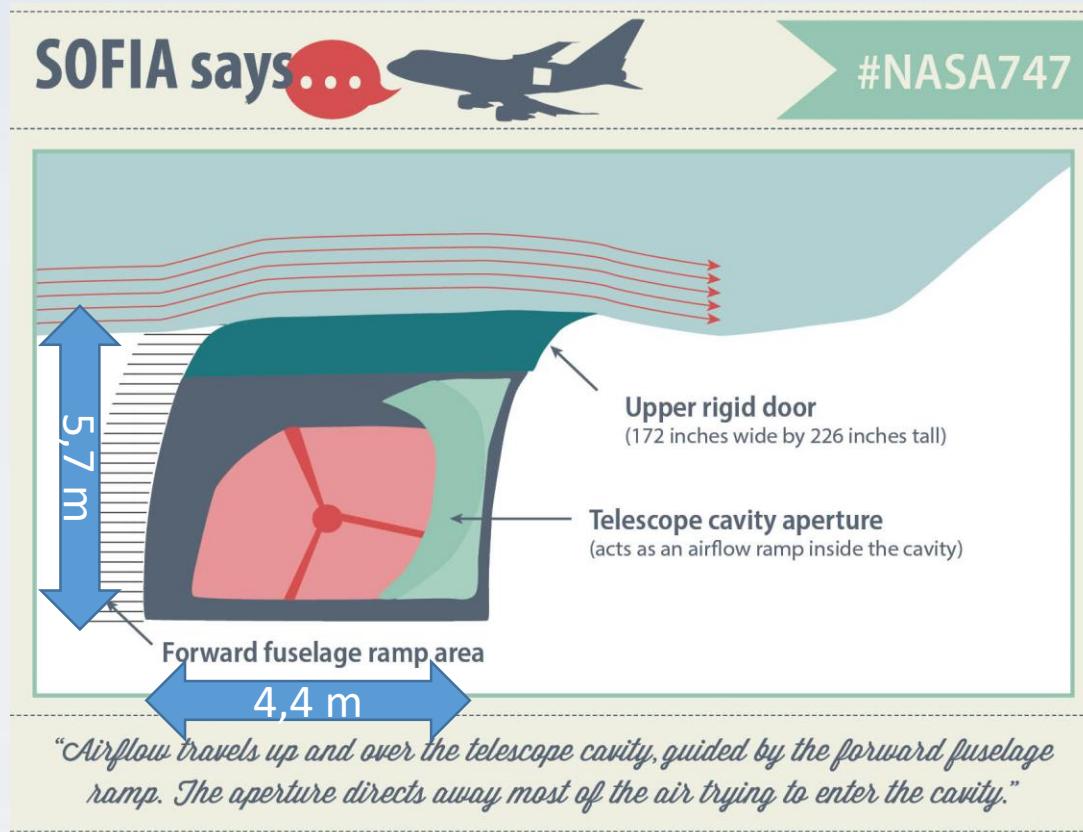
Saved: 2015-May-21 12:31 UTC User: kbower

# Das Teleskop muss noch in das Flugzeug



Quelle: Deutsches SOFIA Institut

# Das Problem mit der Tür

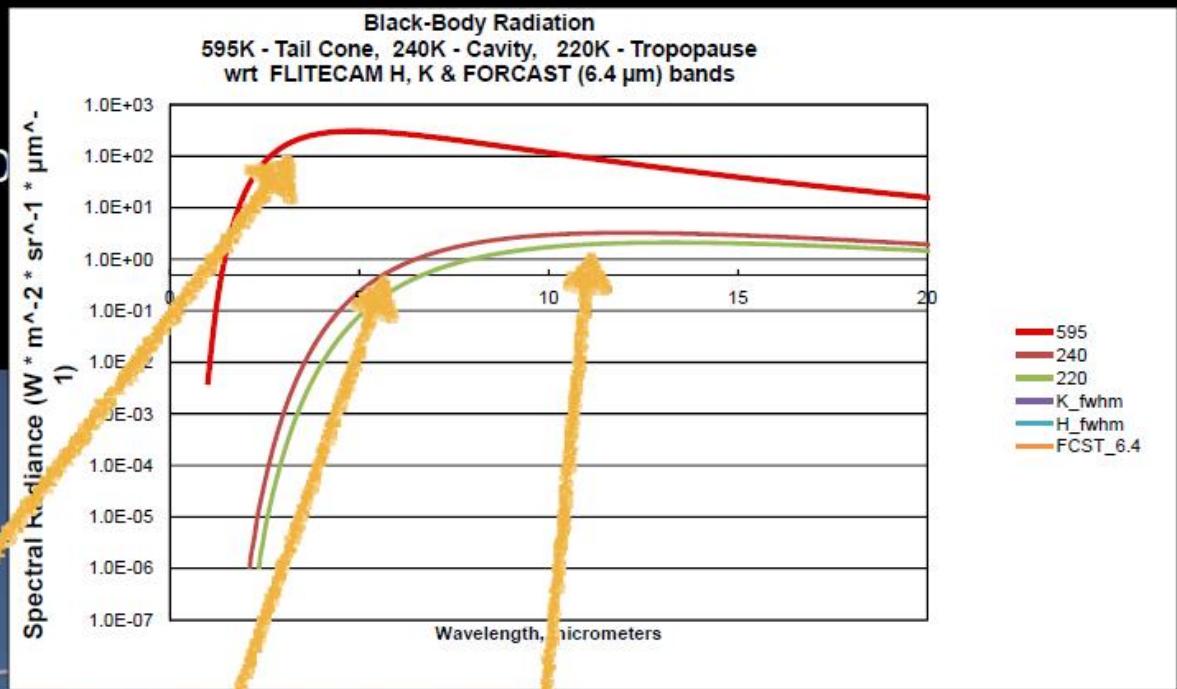
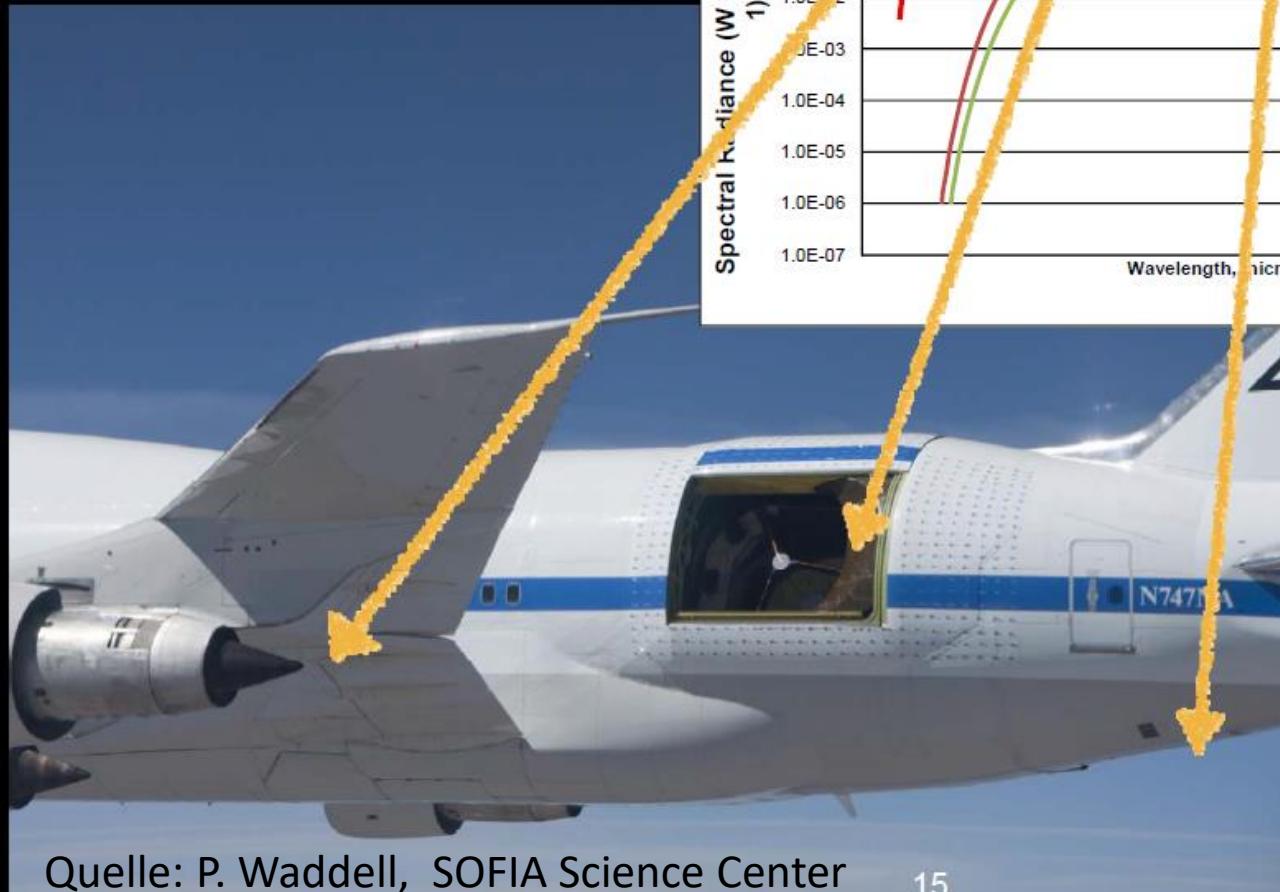


- Spiegel extrem empfindlich
- Tür muss Dicht schließen
  - Problem: Flugzeugrumpf dehnt sich im Flug (Überdruck!)
- Tür muss garantiert schließen
  - Landung mit offener Tür absolut keine Option
  - Problem: Eisbildung im Flug
- Reduzierung von Streulicht

Quelle: NASA/SOFIA/USRA/ASP/L. Proudfoot

# STRAY LIGHT BACKGROUND IN CRUISE

## SELECTED BACKGROUND SOURCES



WARM EARTH &  
ATMOSPHERE

WARM CAVITY &  
TELESCOPE

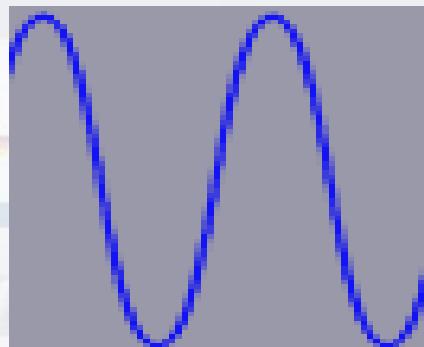
HOT ENGINE &  
PLUME

S                   Stratosphären-  
O                   Observatorium  
F                   für  
I                   **INFRAROT**  
A                   **ASTRONOMIE**

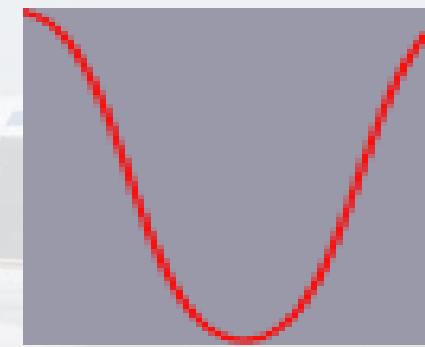


# Infrarot ?

- Eine Eigenschaft dieser Wellen ist ihre Wellenlänge, bzw. ihre Frequenz.

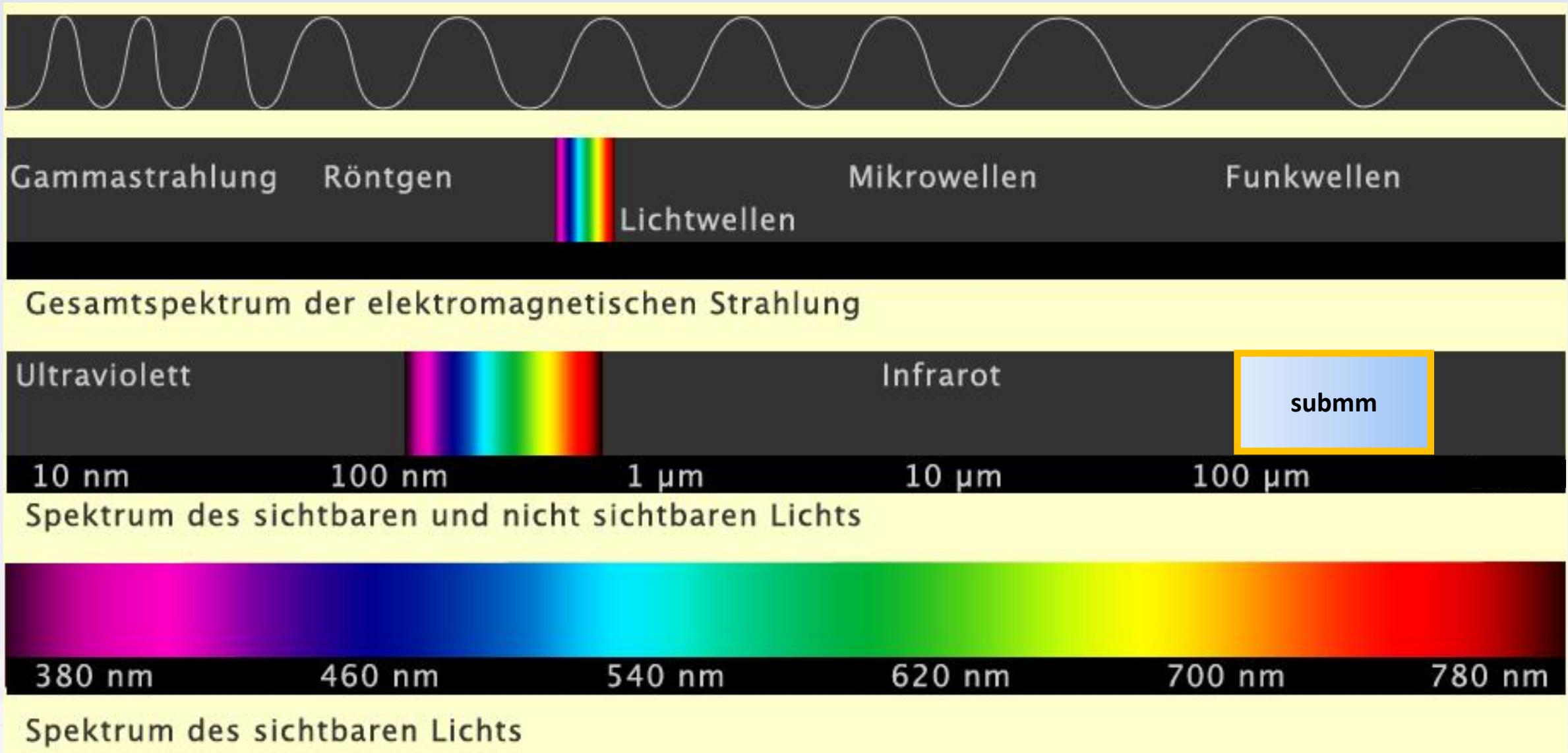


kurze Wellenlänge  
=  
hohe Frequenz

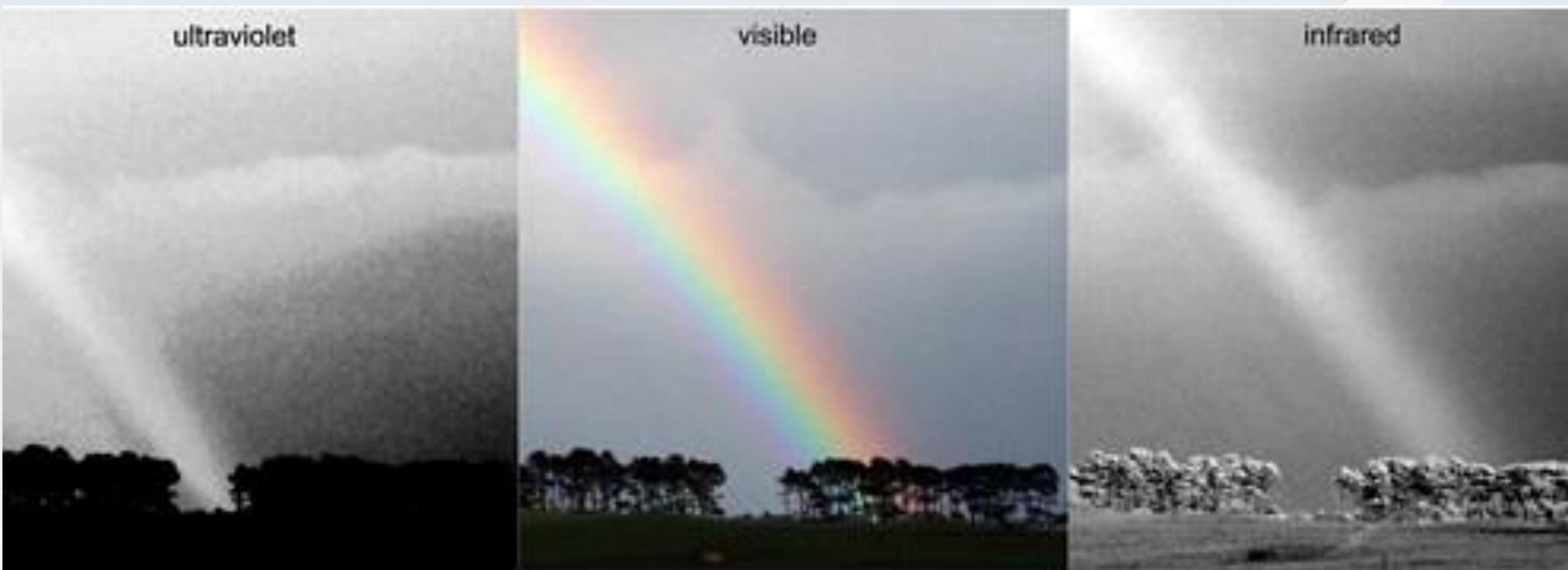


lange Wellenlänge  
=  
niedrige Frequenz

# Infrarot ?



# Infrarot ?

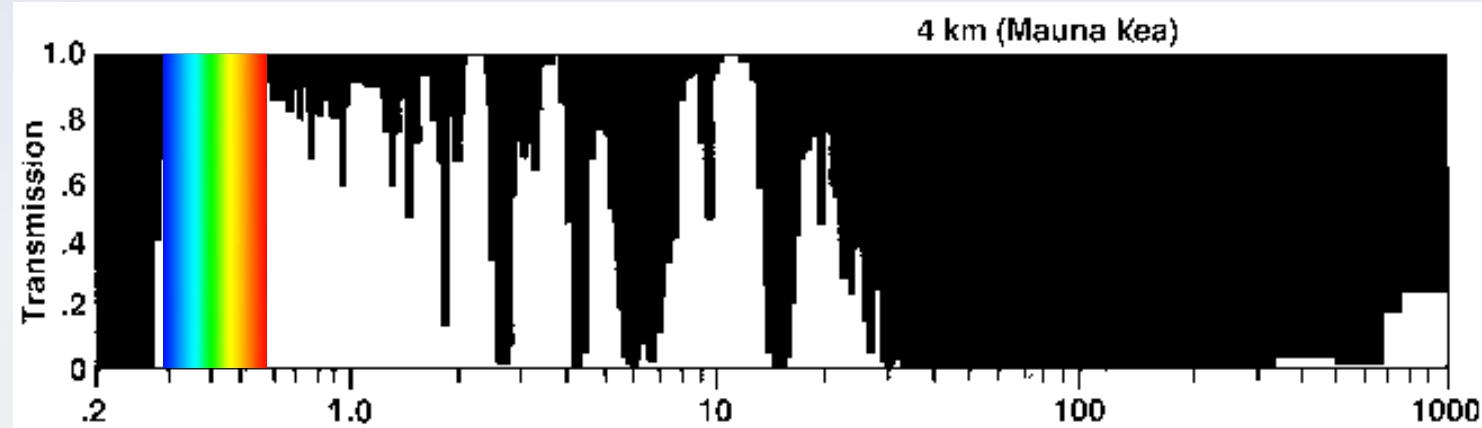


Courtesy of Dr. A. Dominic Fortes, Earth Sciences

# Stratosphären-Observatorium?

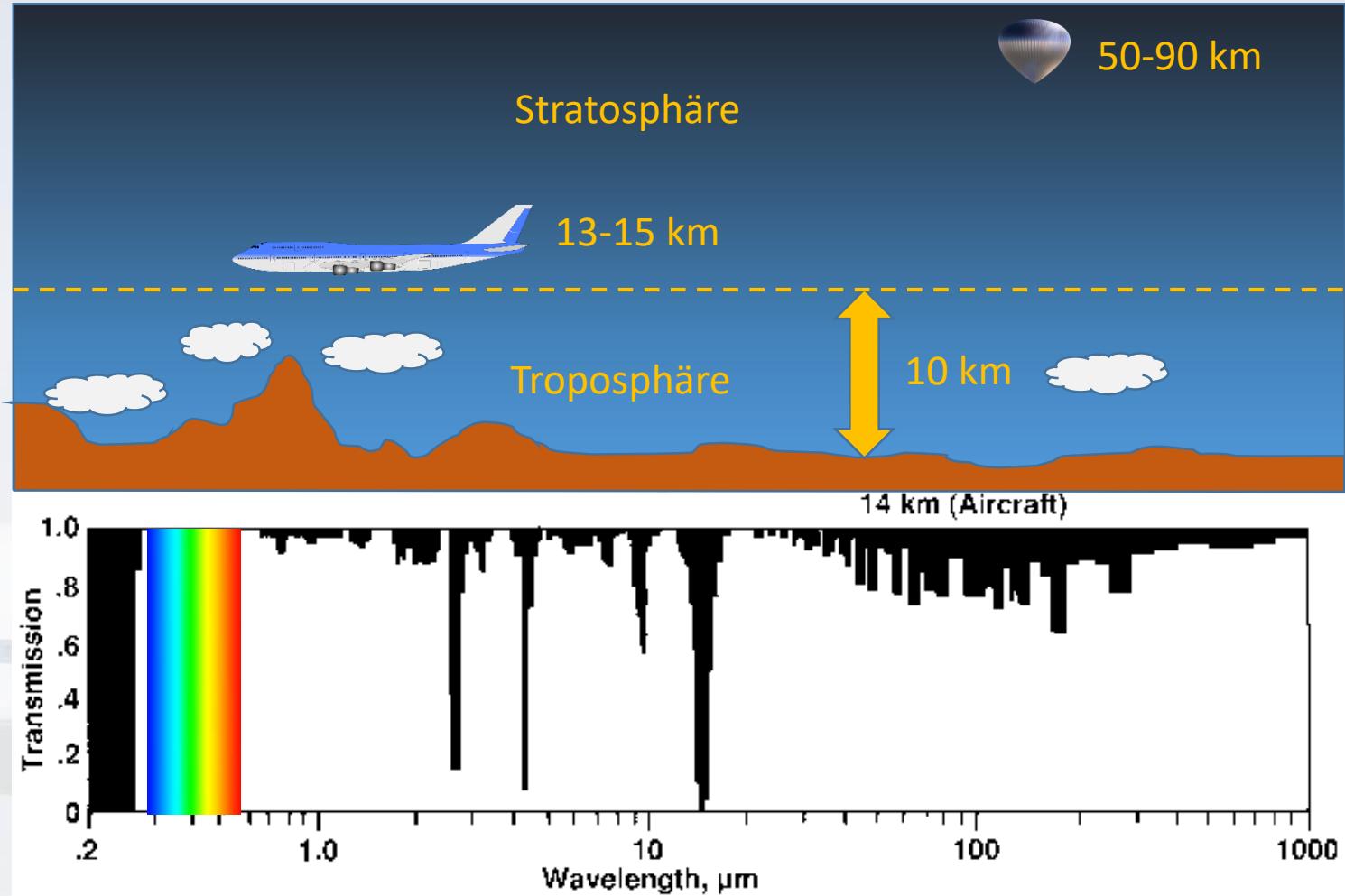
schwarz = undurchsichtig

- Atmosphäre ist nicht gleich durchsichtig bei allen Wellenlängen
- Hauptgrund Absorption durch atmosphärischen:
  - Wasserdampf
  - Ozon,  $O_2$
  - $CO_2$ ,  $CH_4$ , Stickoxide
- Konzentration nimmt mit der Höhe ab



# Stratosphären-Observatorium?

- Atmosphäre ist nicht gleich durchsichtig bei allen Wellenlängen
- Hauptgrund Absorption durch atmosphärischen:
  - Wasserdampf
  - Ozon,  $O_2$
  - $CO_2$ ,  $CH_4$ , Stickoxide
- Konzentration nimmt mit der Höhe ab



# Farbe = Wellenlänge

- Körper, die kälter als  $400^{\circ}\text{C}$  sind, strahlen nicht im optischen Spektralbereich sondern im Infraroten.



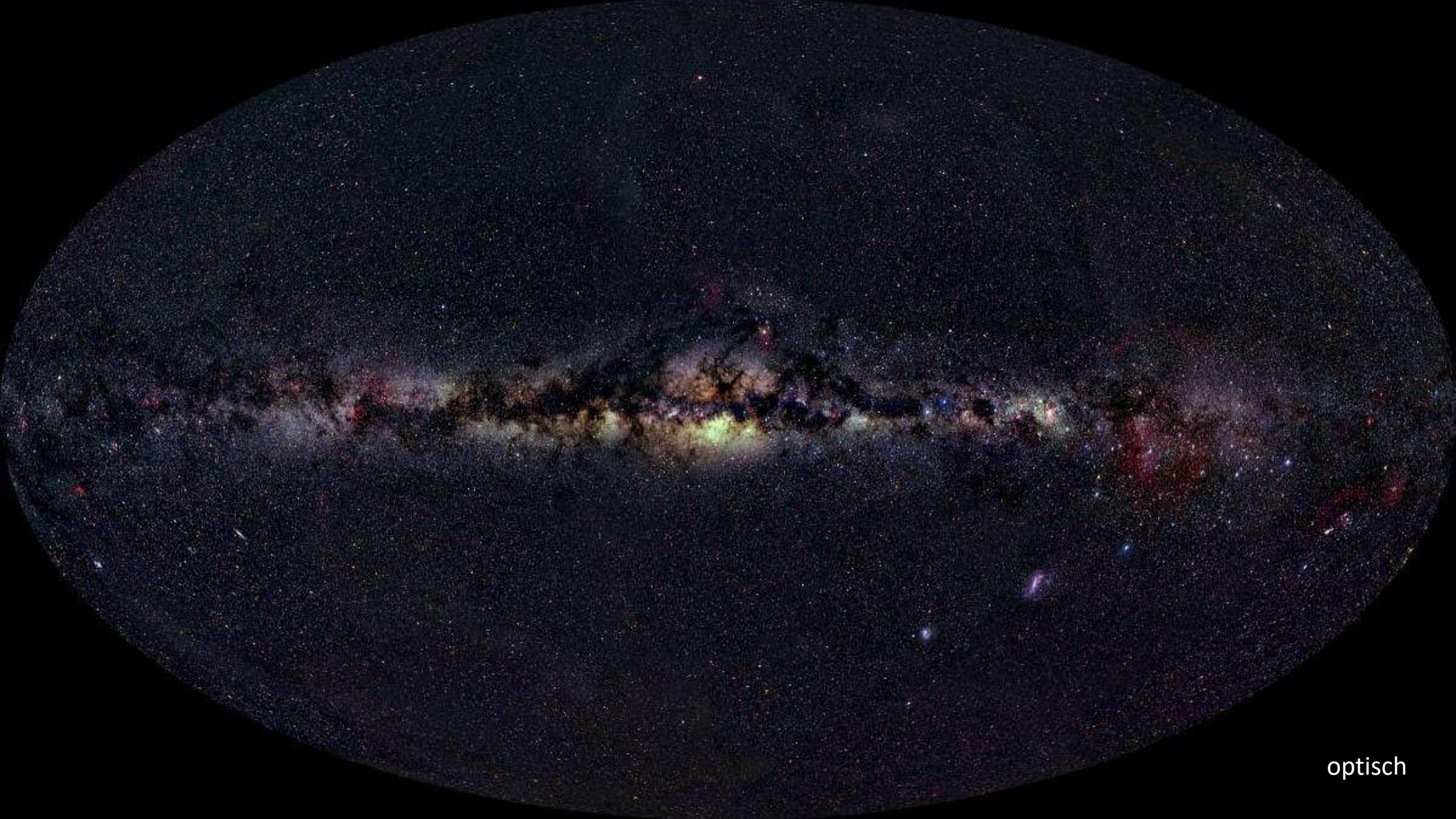
# Farbe = Wellenlänge

- Mit einer Infrarotkamera kann man die Wärmestrahlung eines Körpers aufnehmen, und damit seine Temperatur messen



# Sub-mm → Temperatur ?

- optische Strahlung 6000 K
- mittleres Infrarot 60-600 K
- fernes Infrarot 60-30 K
- sub-mm 3-20 K

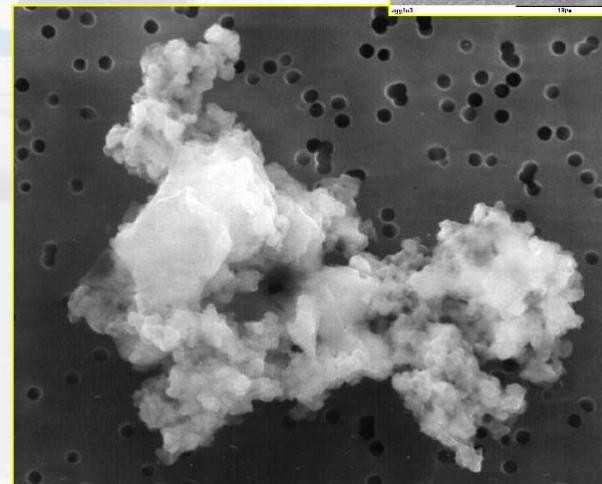
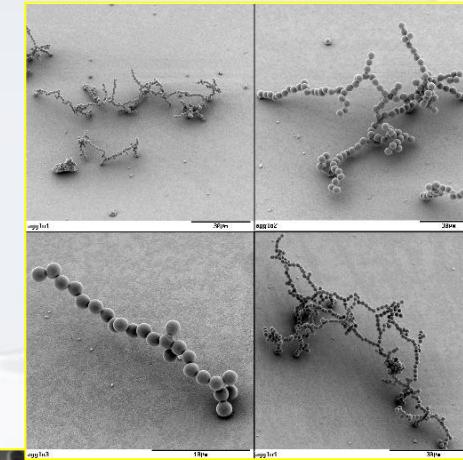
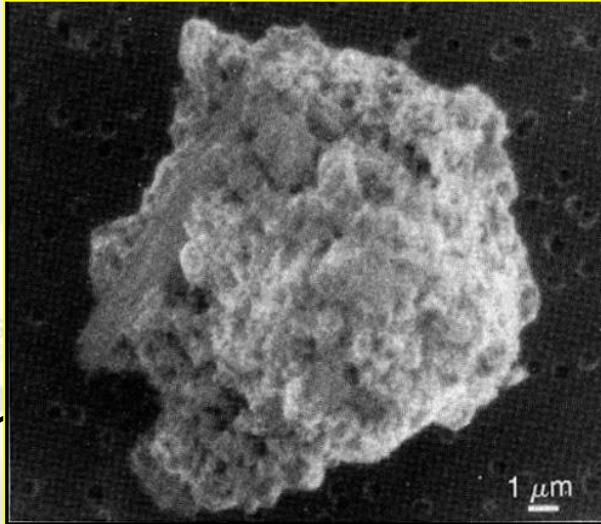


optisch

# ISM

- Atomares Gas (optische Teleskope)
- Moleküle (Radioteleskope)
- Staub

Wie kann

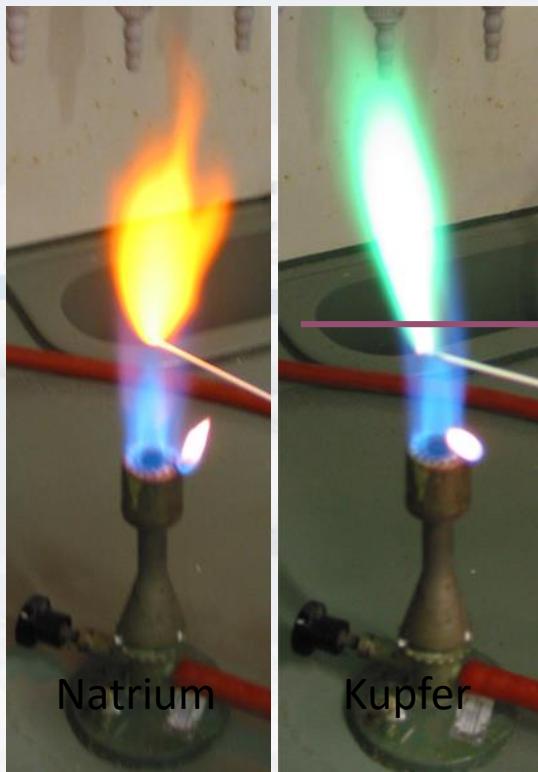


# Staub absorbiert kurzwellige Strahlung

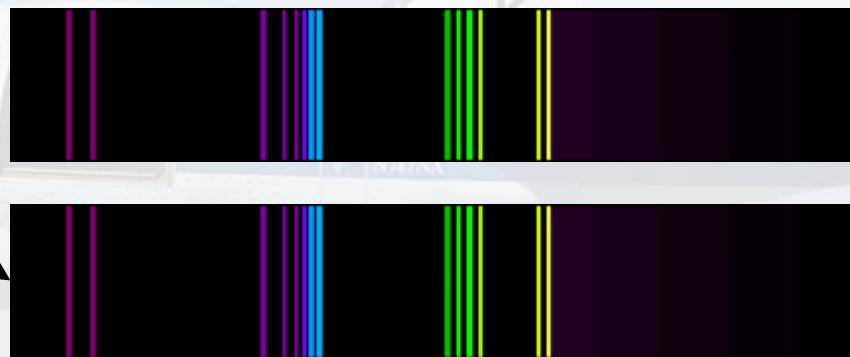


# Absorption und Emission

Führt man Atomen Energie zu, strahlen sie diese bei charakteristischen Wellenlängen wieder ab.

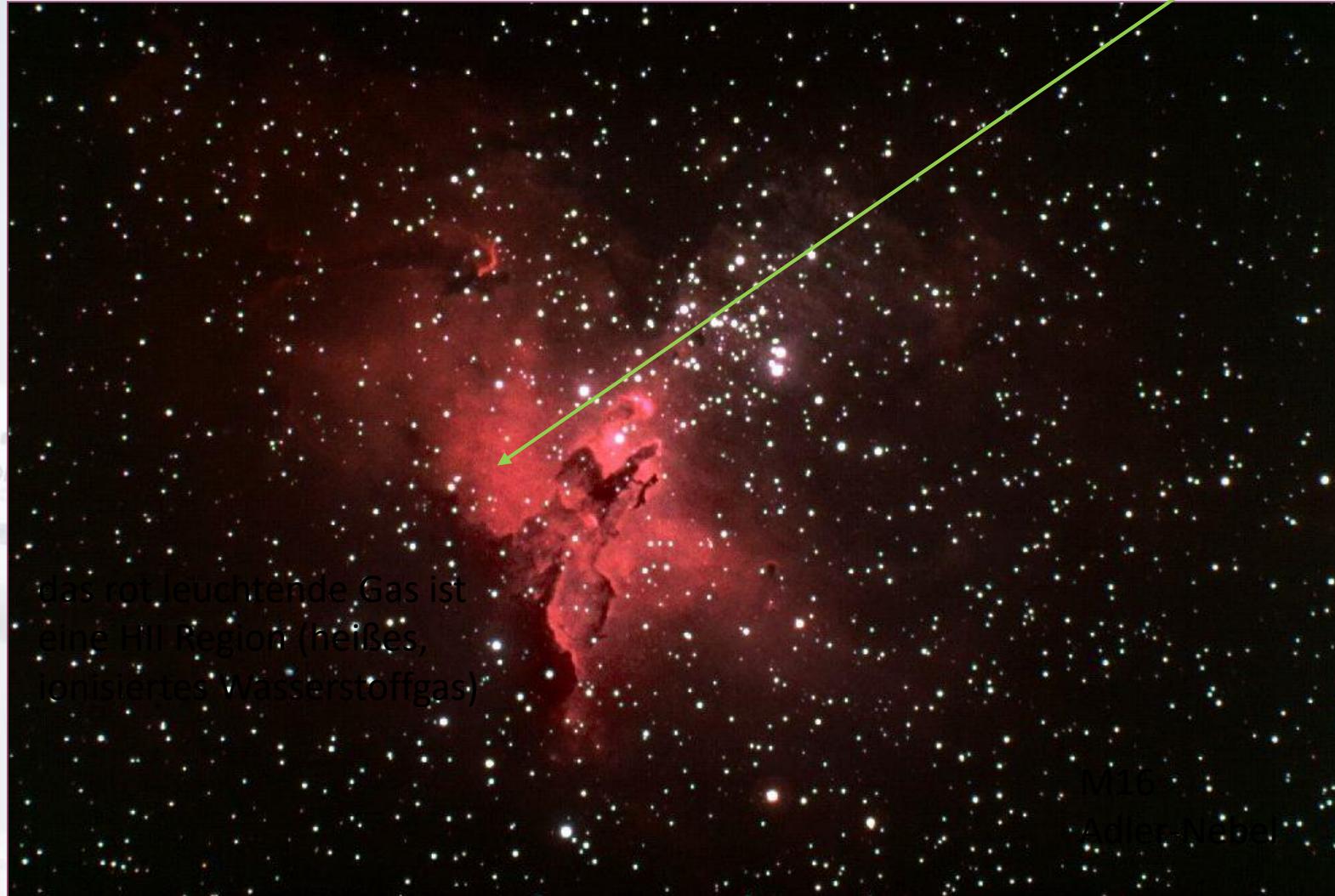


Jedes Element hat seinen ganz charakteristischen, spektralen Fingerabdruck.



# Emissionsspektren

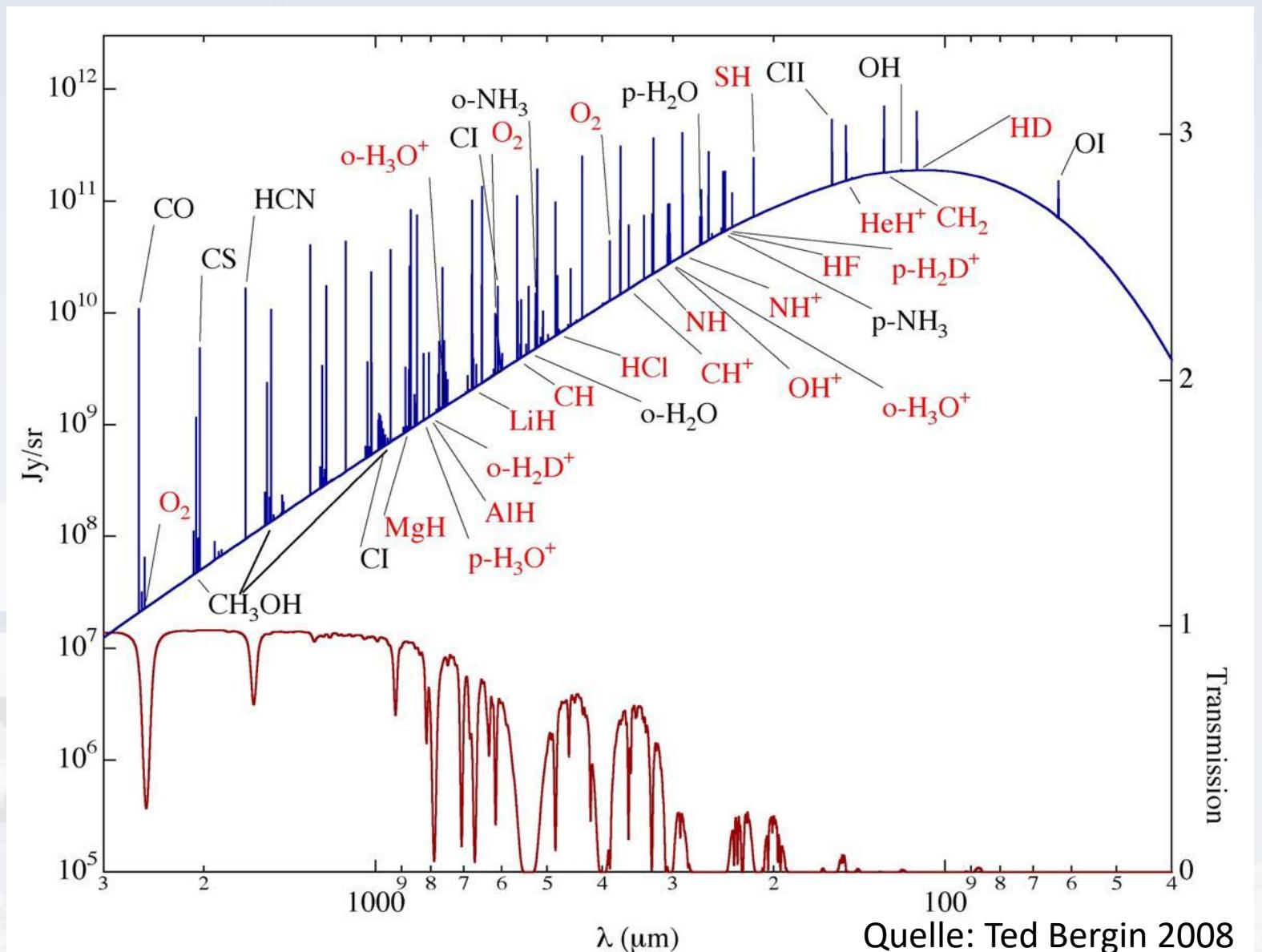
Wasserstoff



das rot leuchtende Gas ist  
eine HII Region (heißes,  
ionisiertes Wasserstoffgas)

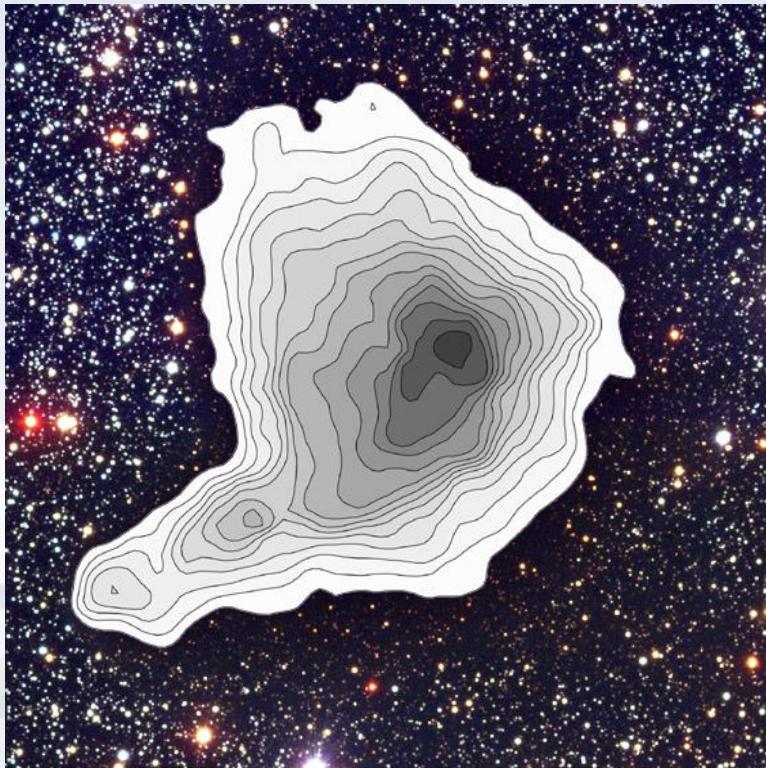
# Molekülwolken

- Spektrum einer Molekülwolke



# (Un)durchsichtiger Staub

optisch



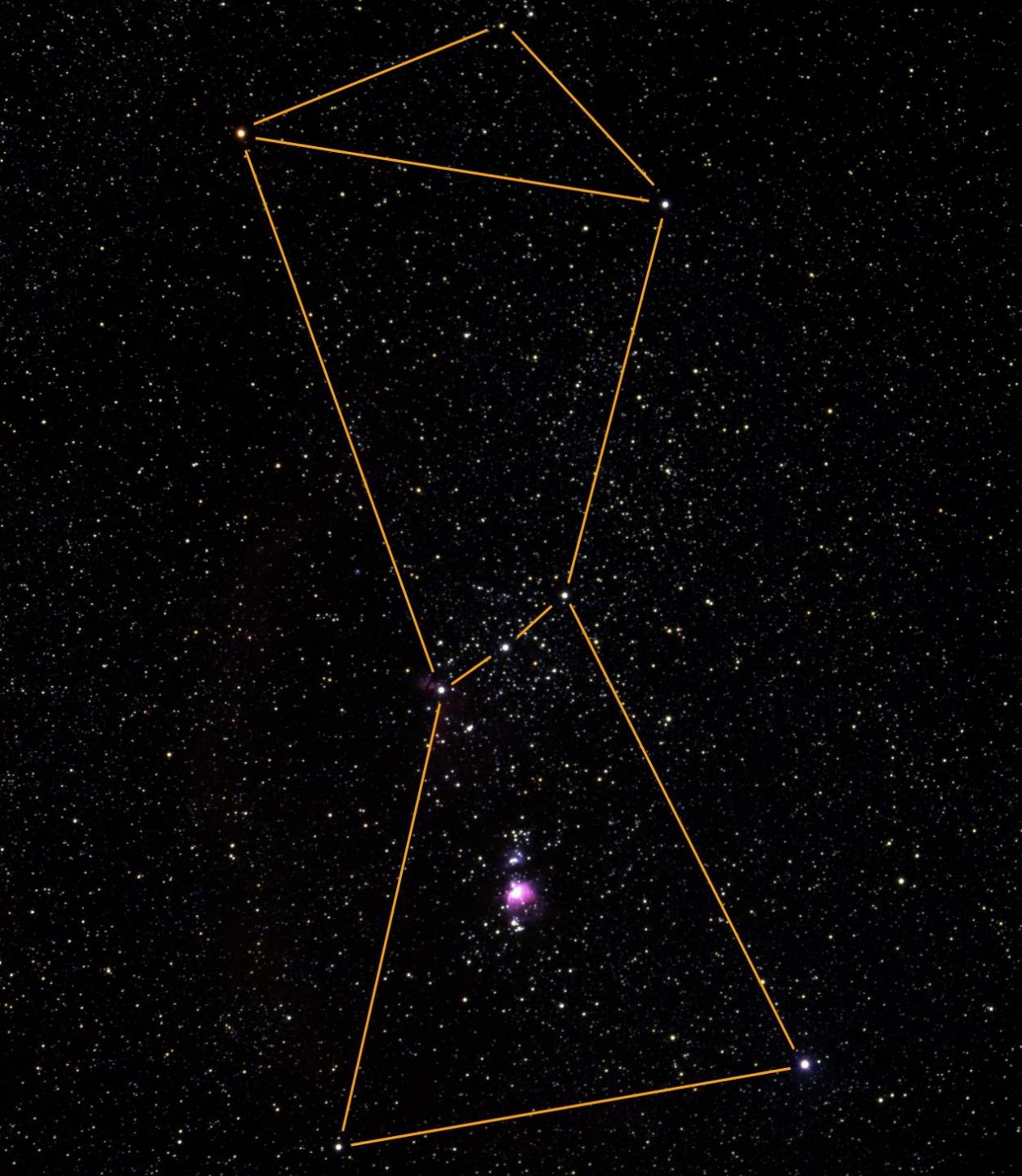
B, V, I

Radio

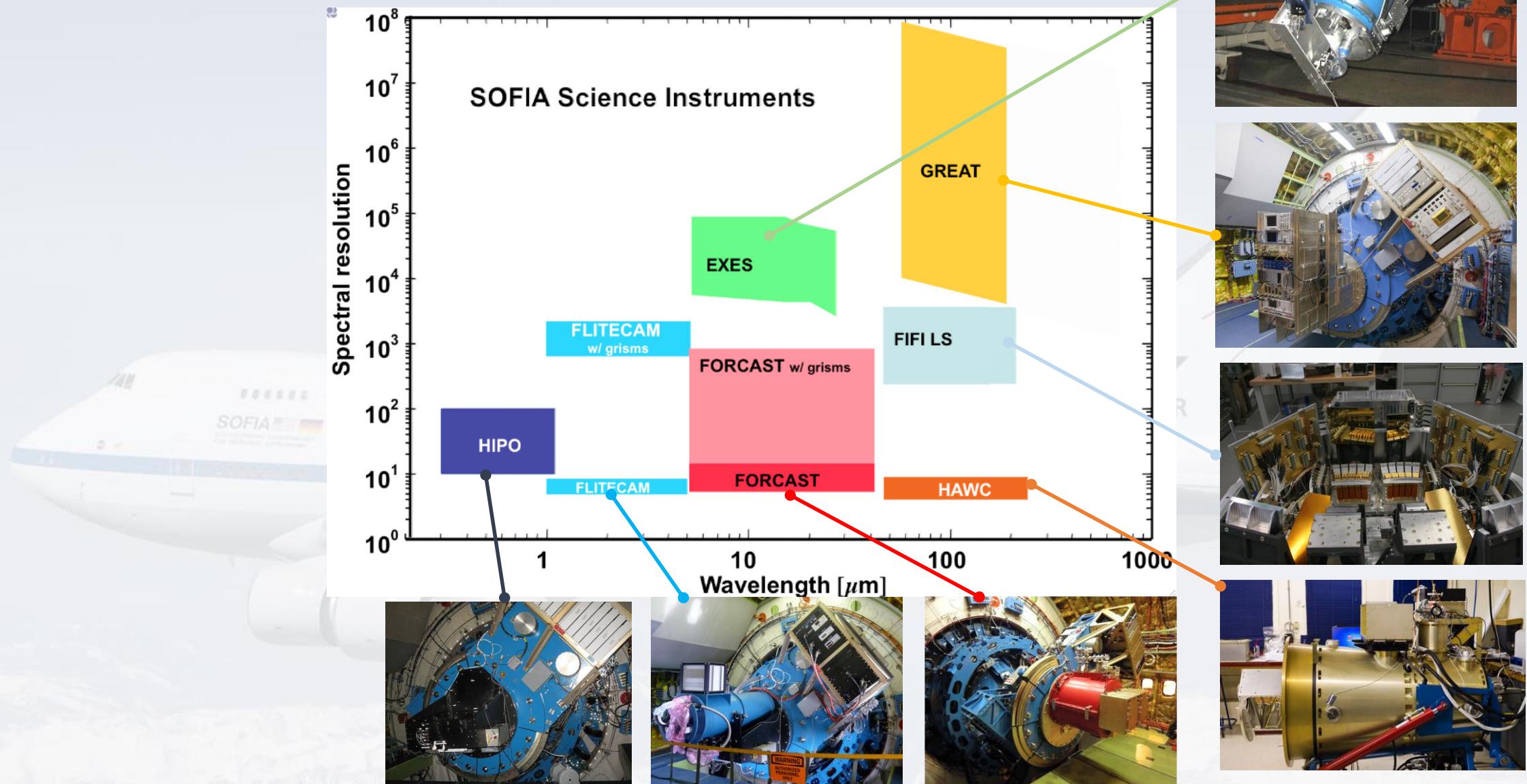


B, I, K

Pre-Collapse Black Cloud B68 (comparison)  
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)



# Instrumente auf SOFIA

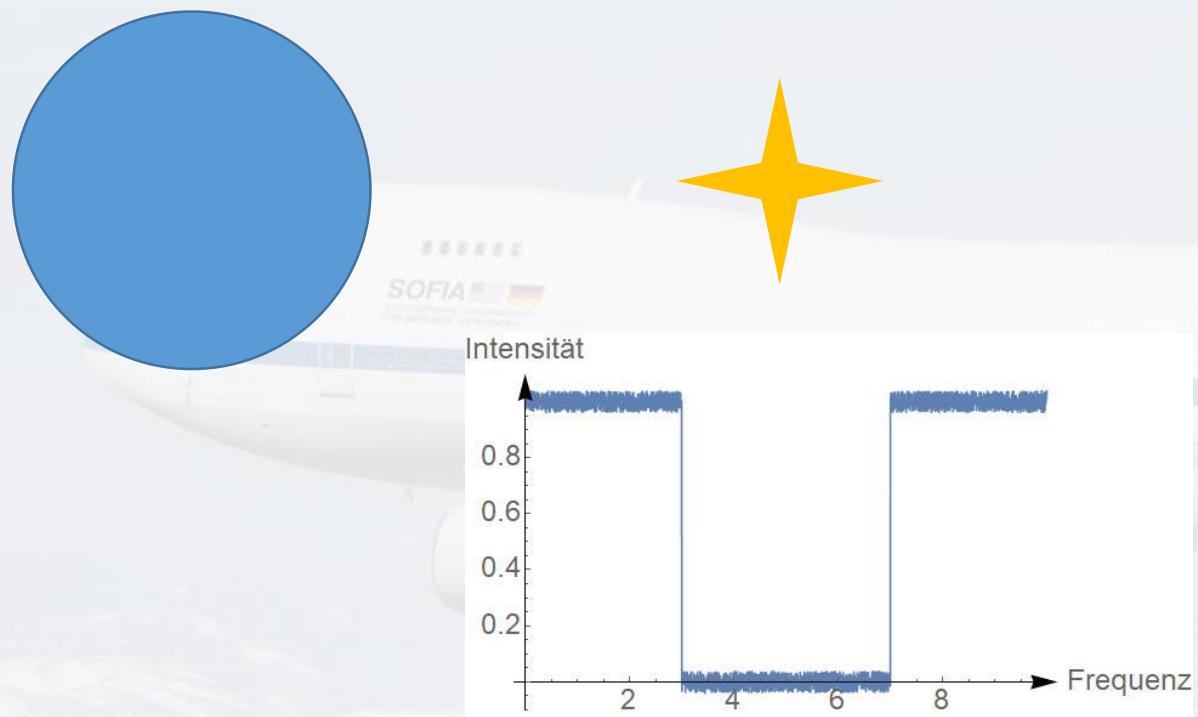


# SOFIA

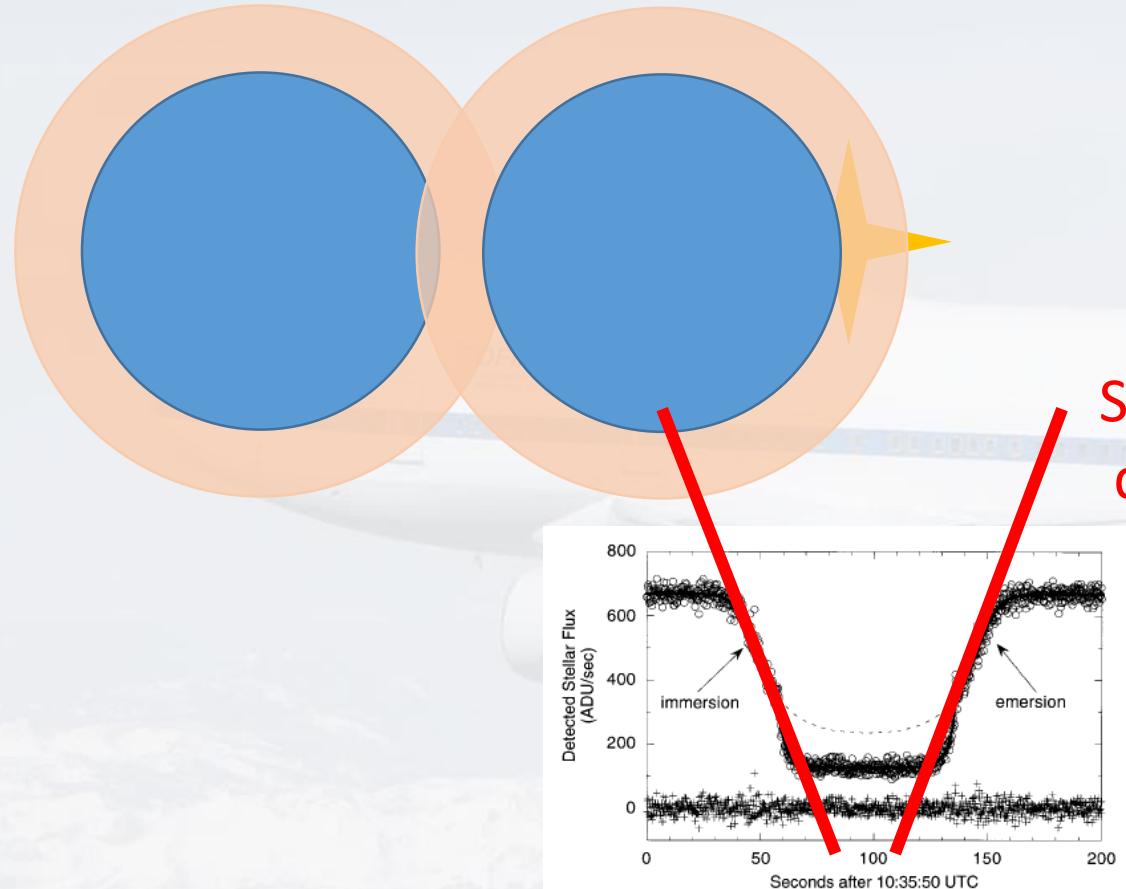
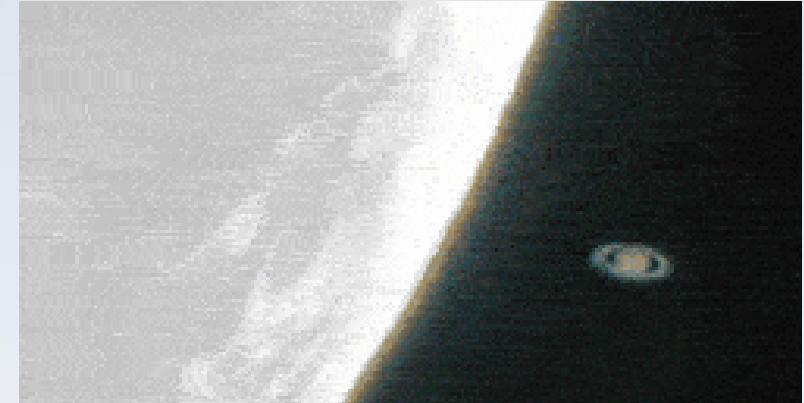
# Wissenschaftliche Highlights



# Okkultationen - Bedeckungen

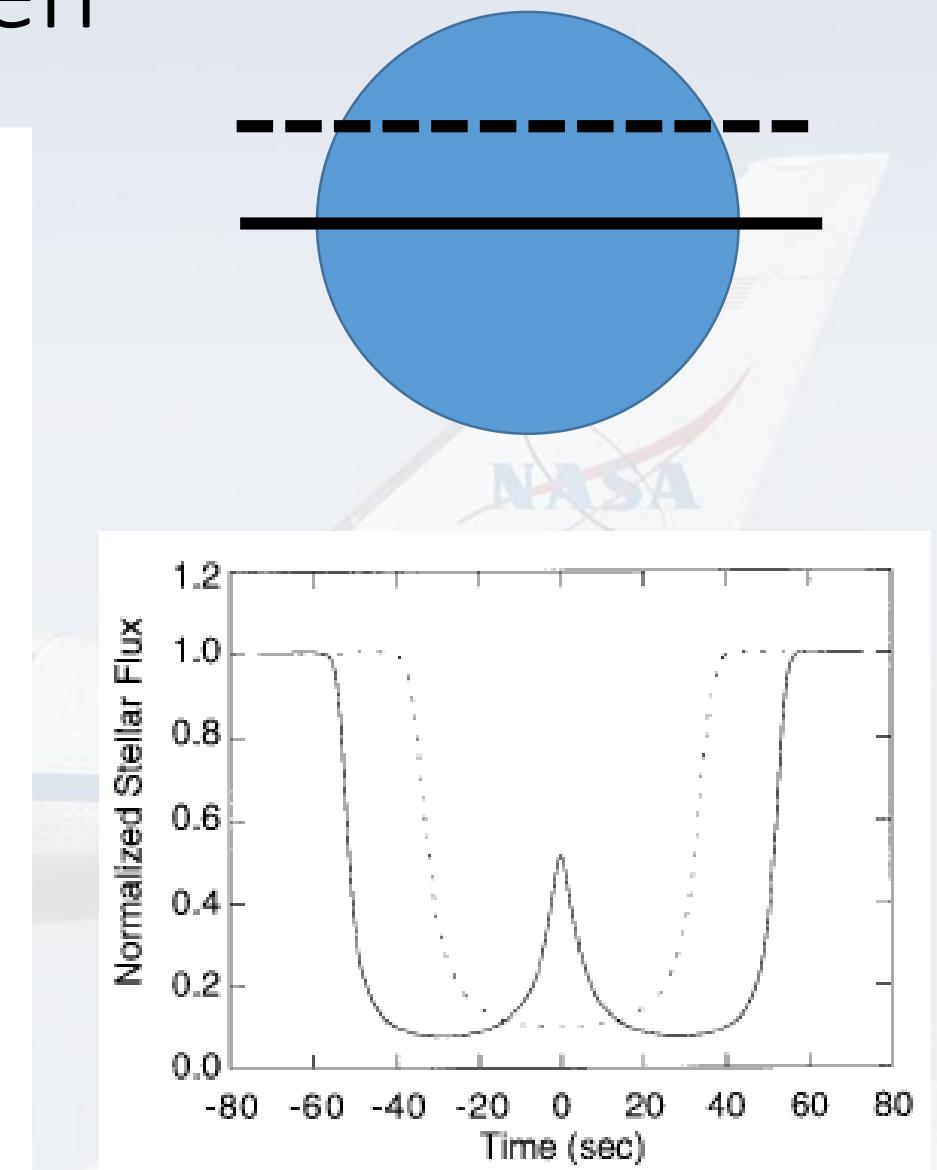
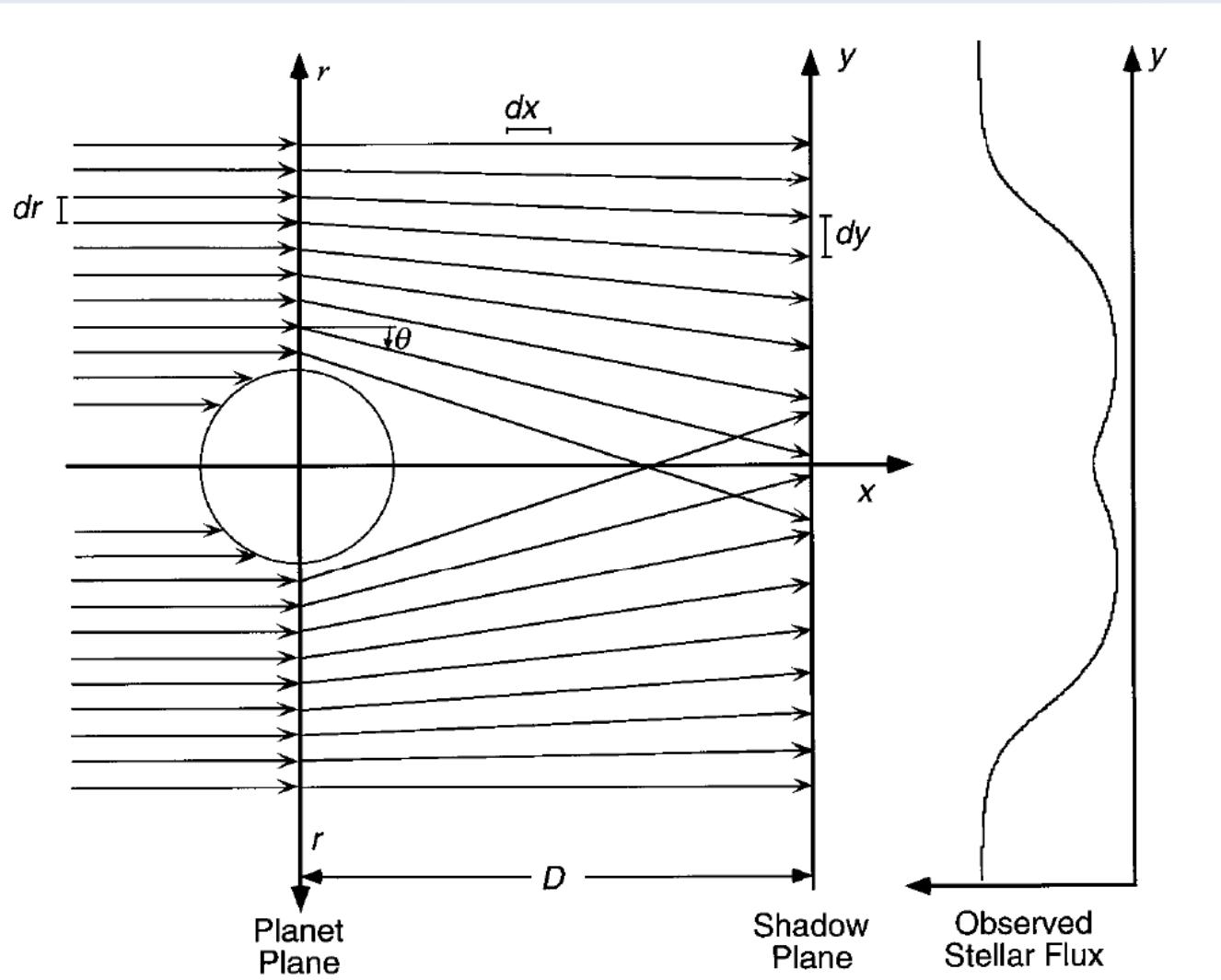


# Okkultationen - Bedeckungen

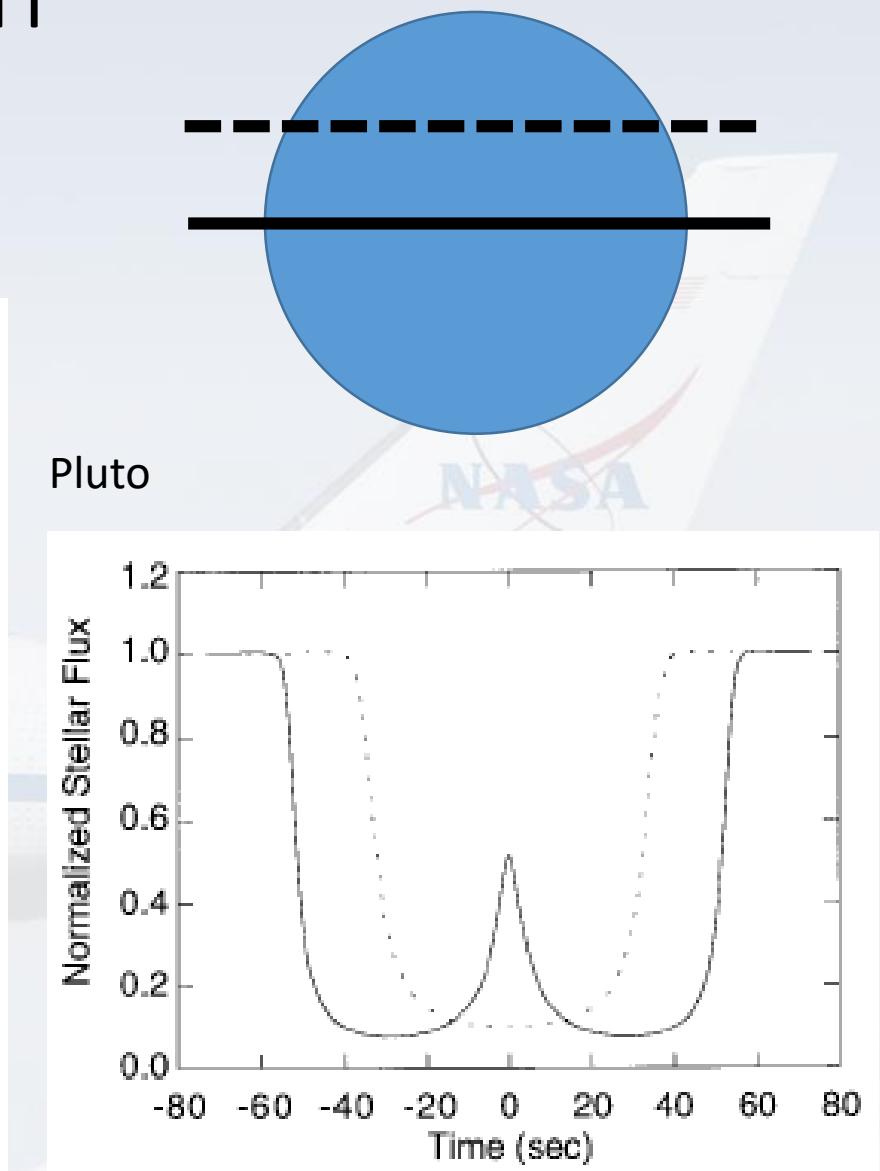
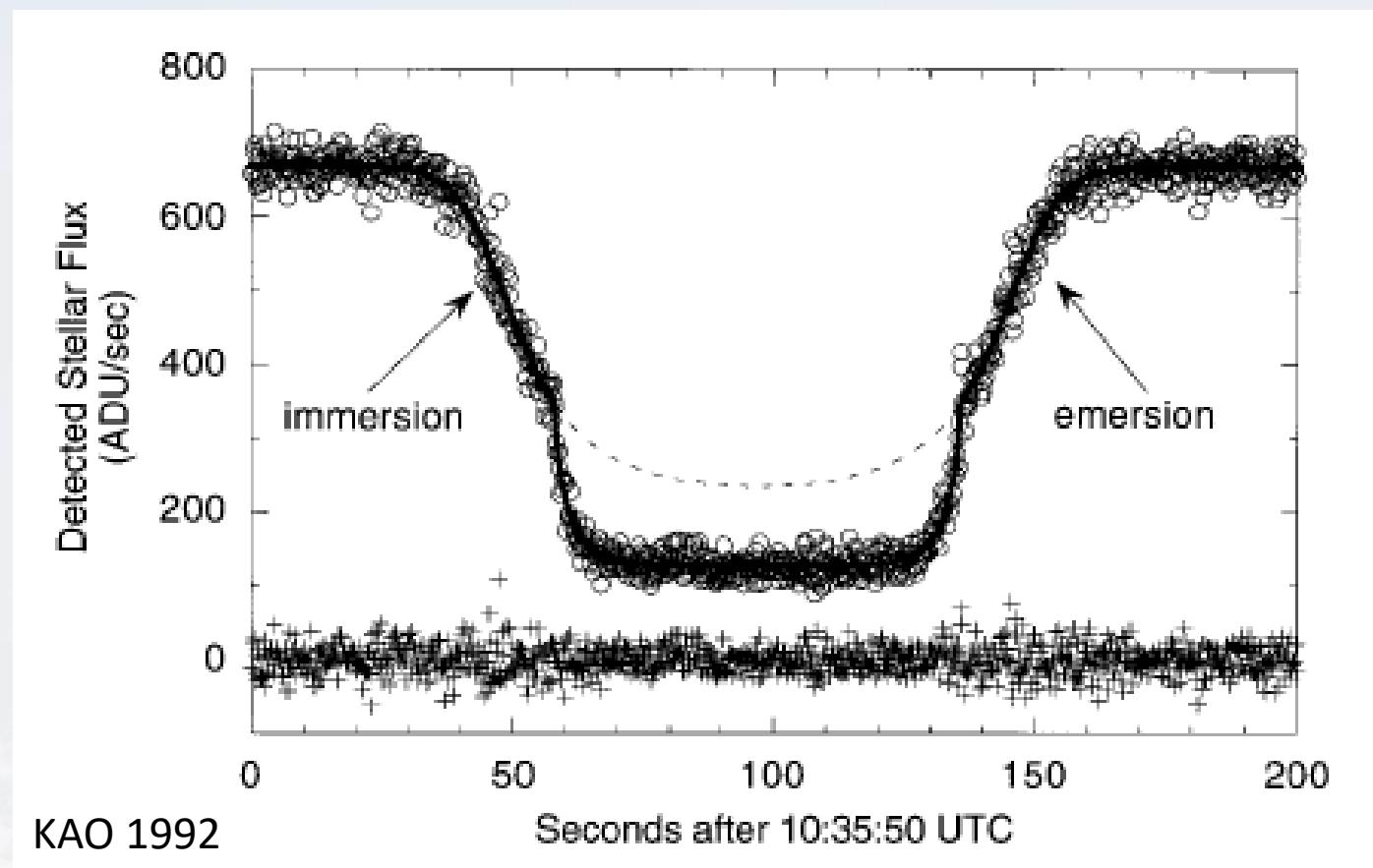


# Okkultationen - Bedeckungen

Lichtbrechung durch Atmosphäre

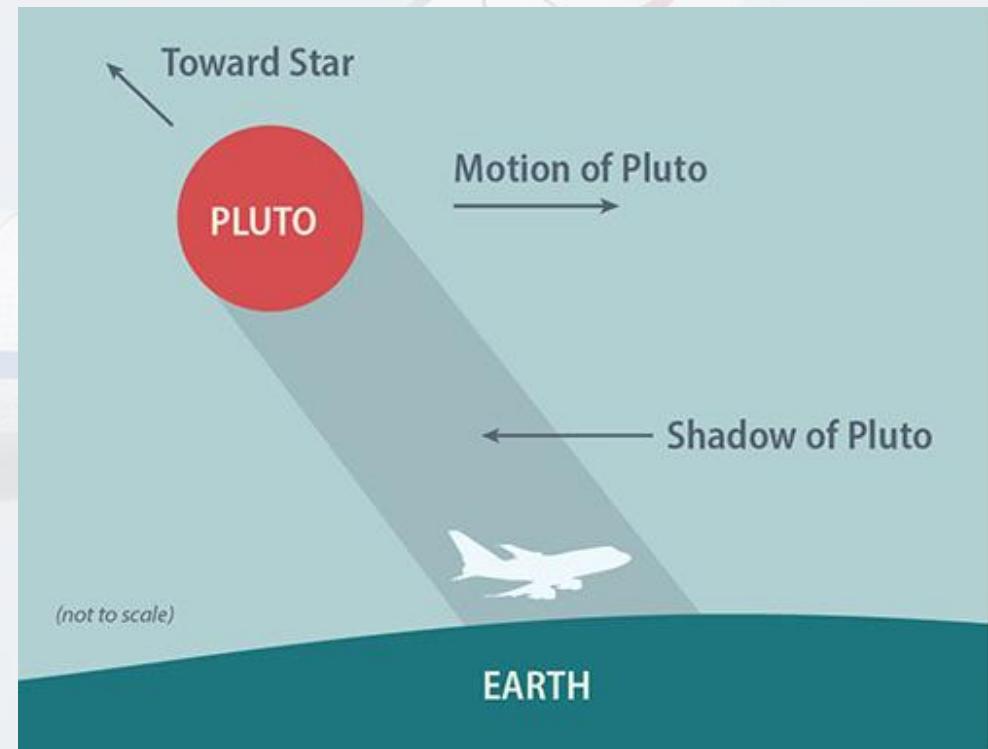


# Okkultationen - Bedeckungen

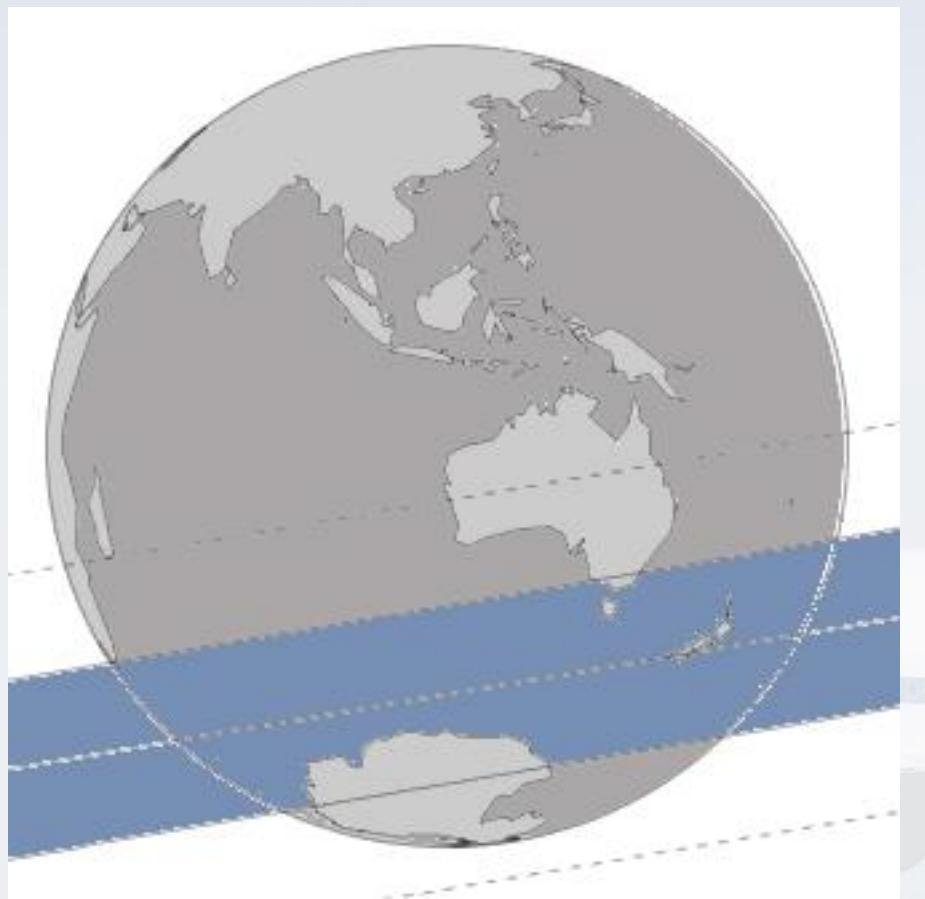


# Pluto Okkultation

- HIPO (High Speed Imaging Photometer for Occultations)
- Hochgeschwindigkeits-Kamera (0.3–1.1  $\mu\text{m}$ ) im sichtbaren Licht
- in Kombination mit FLITECAM
- Hauptanwendungen:  
Sternbedeckungen
- Oberflächenstruktur von Objekten innerhalb des Sonnensystems
  - Atmosphären von Planeten, Ringe, Kometen

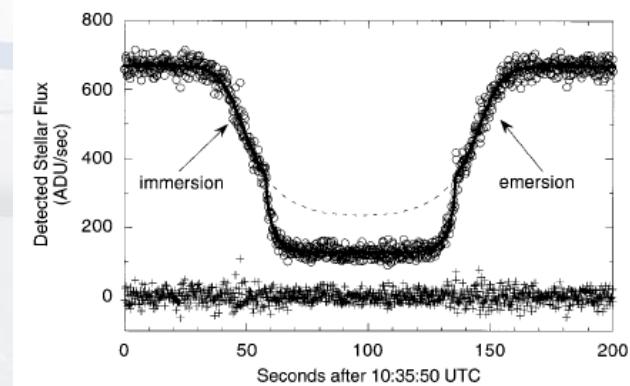


# Pluto Okkultation

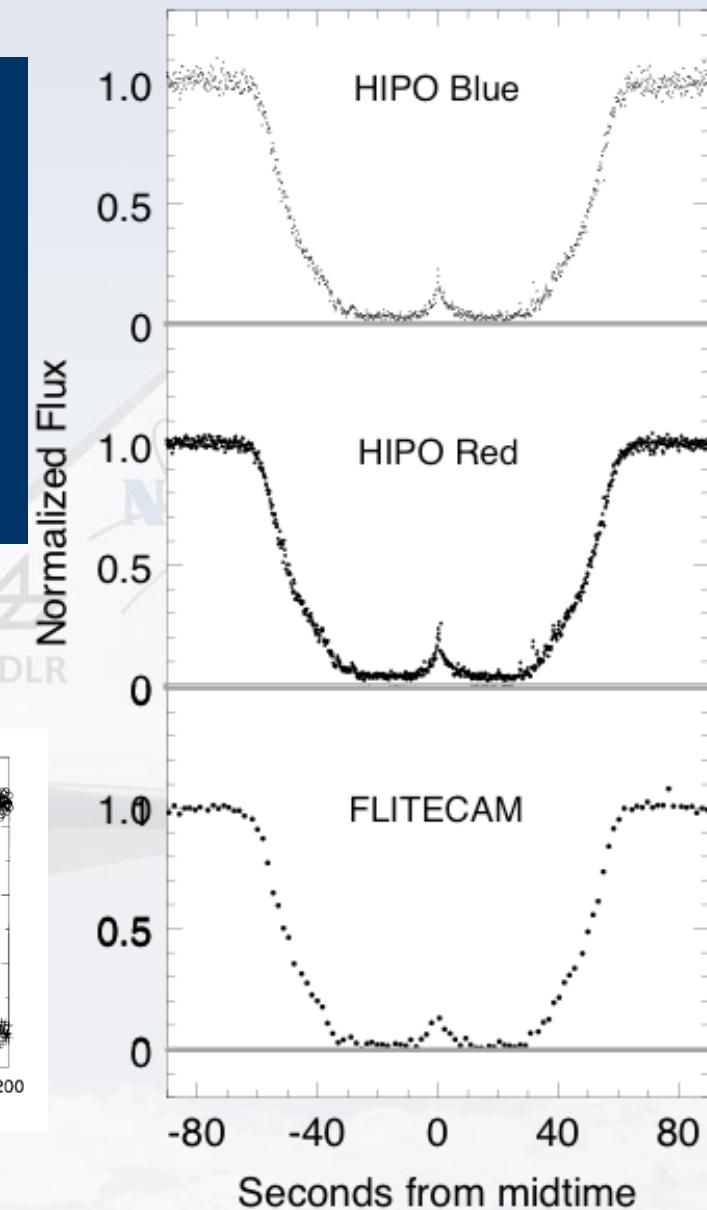


Geschwindigkeit des Pluto-Schattens: 90.000km/h !

Nur erklärbar wenn man Nebel/Schleier in Plutos Atmosphäre annimmt.



KAO 1992



Seconds from midtime

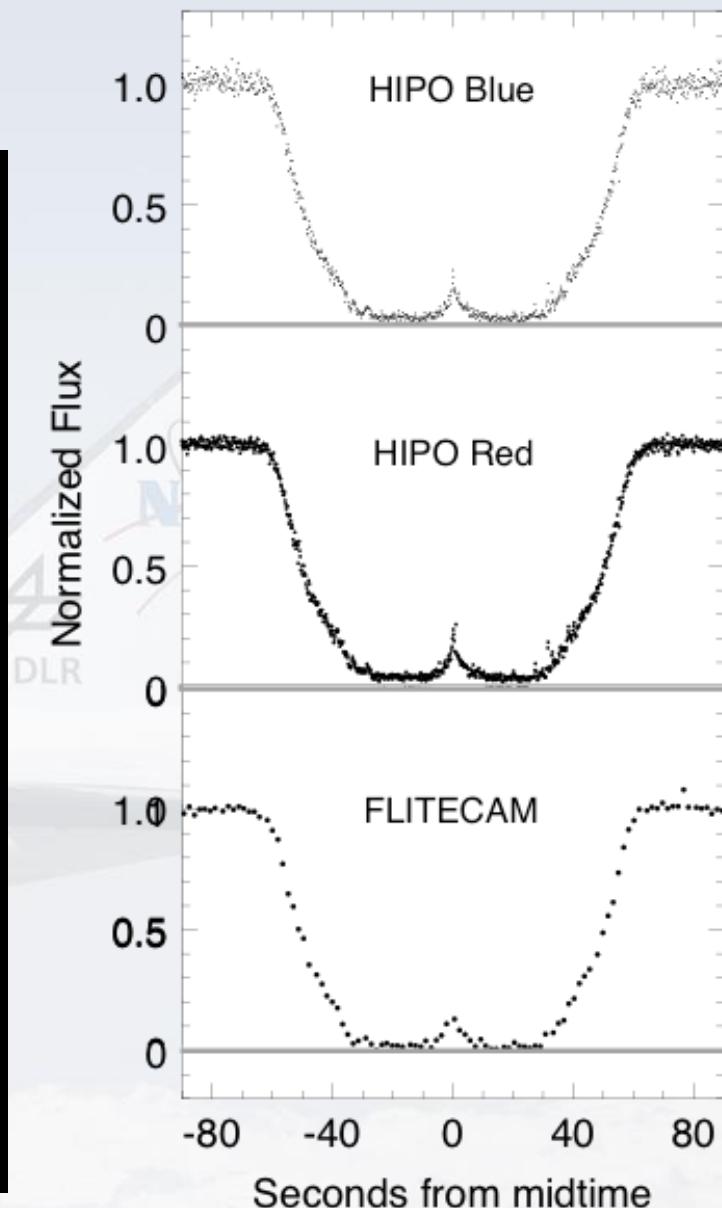
# Pluto Okkultation

Echte Aufnahme von Pluto durch die Sonde New Horizons.

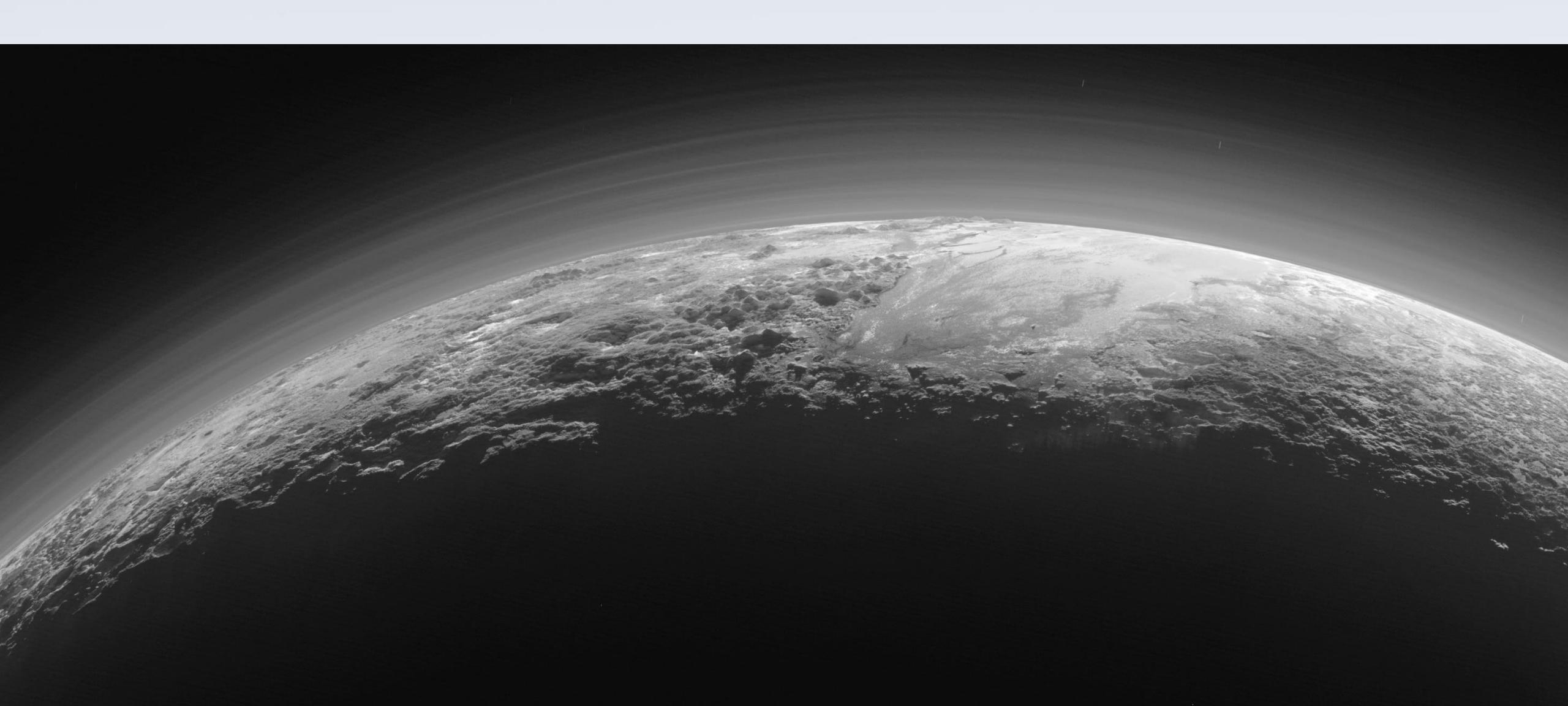
Pluto wird von hinten von der Sonne beleuchtet. Der blaue Ring wird durch Nebelschleier in Plutos Atmosphäre erzeugt.



Nur erklärbar wenn man Nebel/Schleier in Plutos Atmosphäre annimmt.



# Pluto Okkultation



# MU69 Okkultation – Juli 2017



- Kuiper Belt Object 2014MU69 soll von New Horizon eng angeflogen werden
- Evtl. Trümmer oder ein Staubring in der Umgebung wäre fatal für die Sonde
- Okkultationsbeobachtungen sollen die Umgebung von MU69 sondieren

Alex Parker/NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute

# MU69 Okkultation – Juli 2017

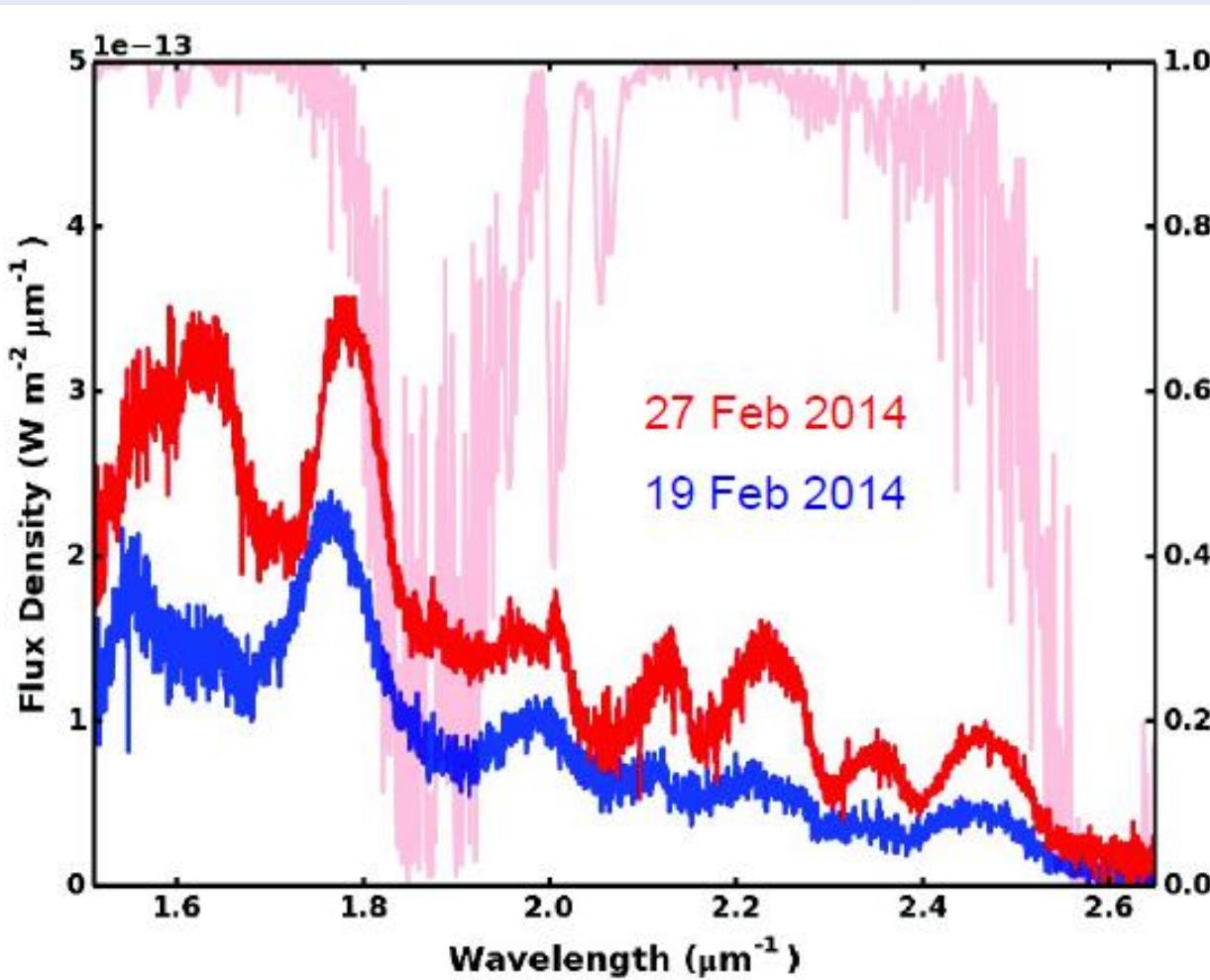


Alex Parker/NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute

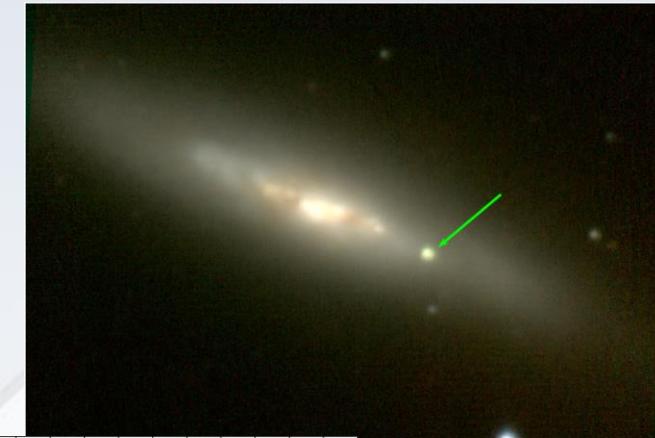
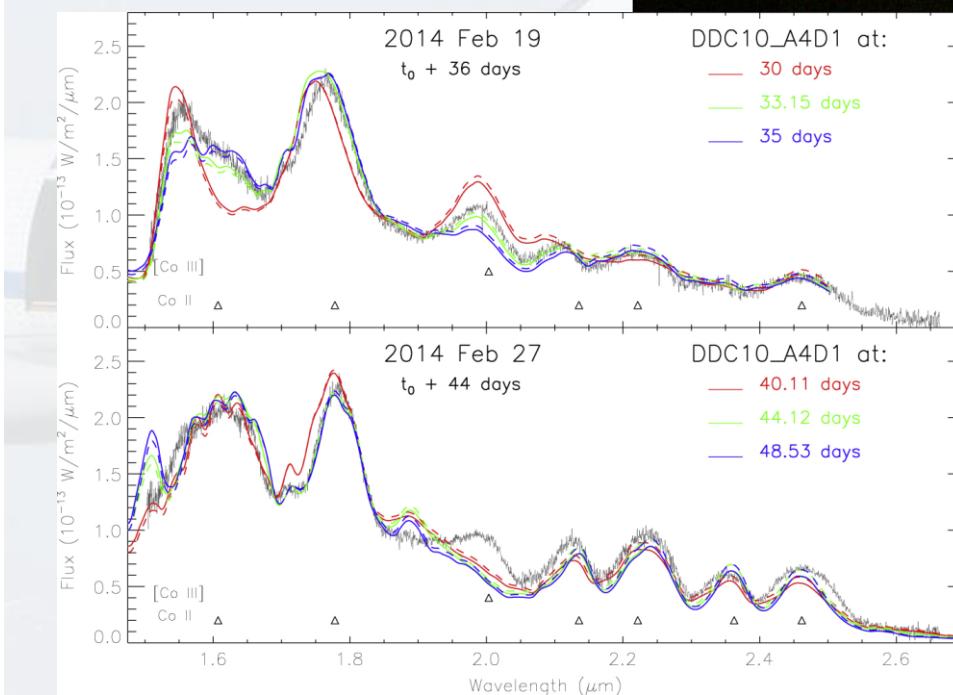
- Sehr schwierig!
  - MU69 ist viel kleiner als Pluto (20-40 km)
  - Der Schatten auf der Erde ist 100 mal kleiner im Vergleich zu Pluto
  - Nach einer Sekunde ! hat man den Schatten wieder verlassen.
- SOFIA muss mit einer Genauigkeit von  $\sim 10$  km auf die Sekunde genau an einer vorbestimmten Position über dem Pazifik sein.

Leider den Schatten verpasst.

# FLITECAM (First Light Infrared Camera)



• SN 2014J (M82)



# HAWC+

(High-Angular resolution Wideband Camera)

## Orion Molekülwolke



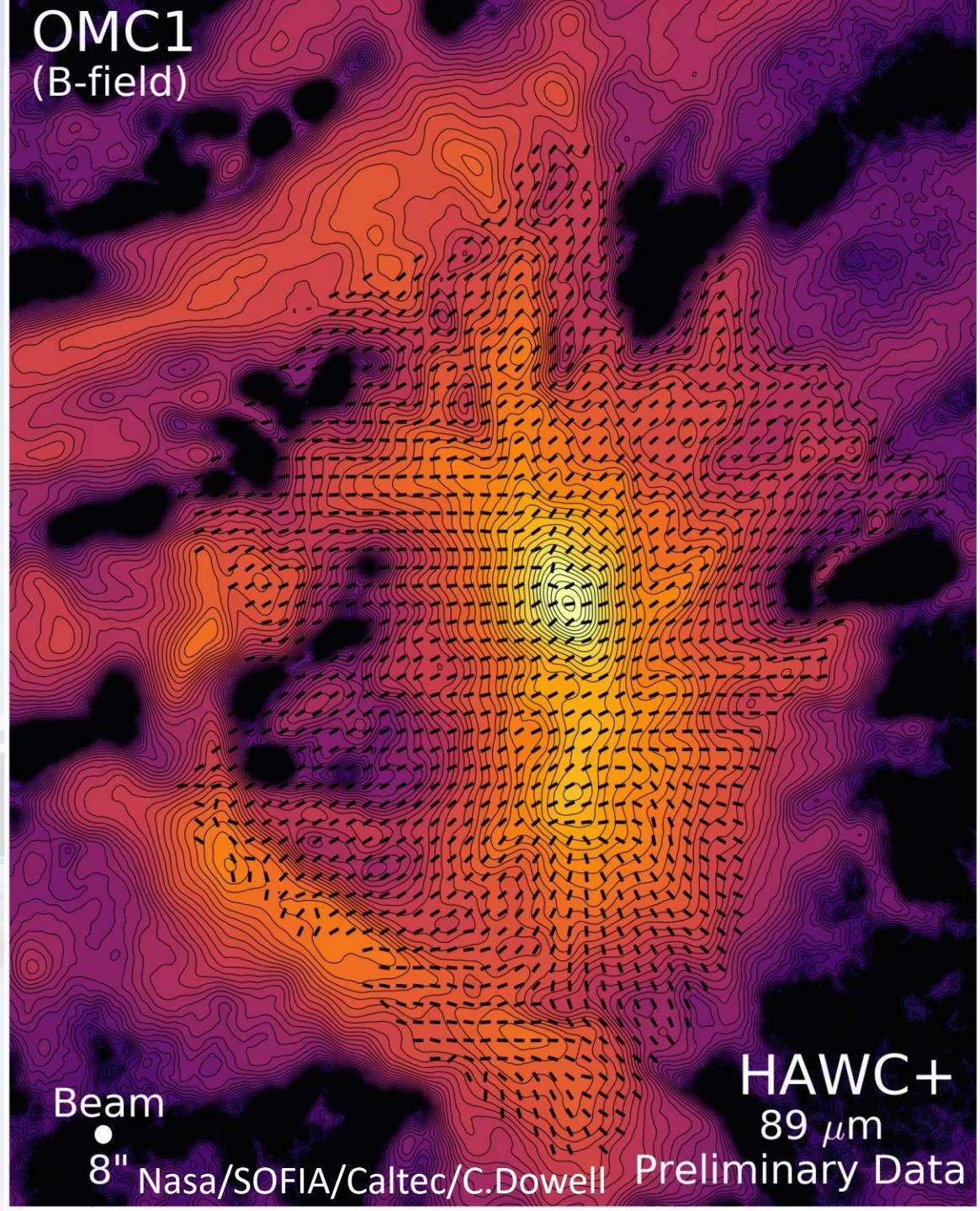
NASA/C. R. O'Dell & S. K. Wong

OMC1  
(B-field)

Beam  
•  
8"

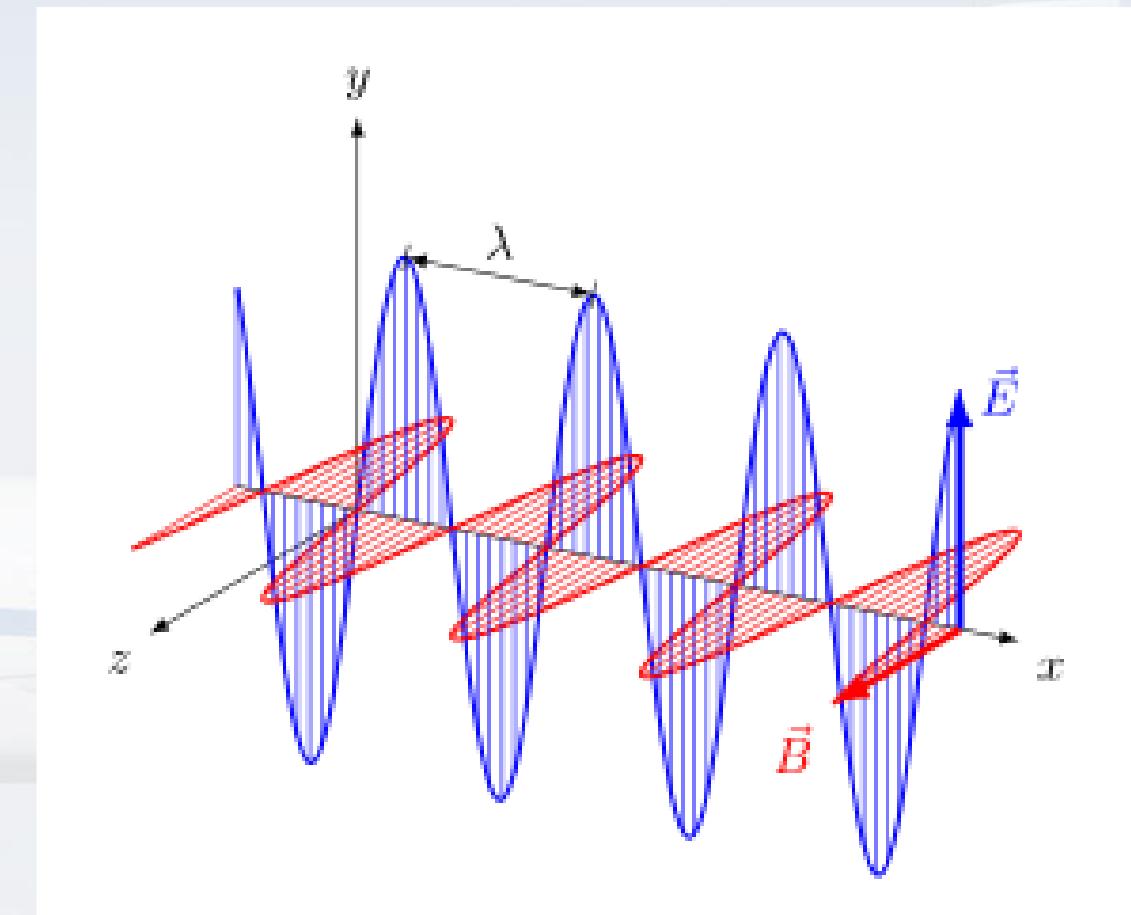
Nasa/SOFIA/Caltec/C.Dowell

HAWC+  
 $89\ \mu\text{m}$   
Preliminary Data



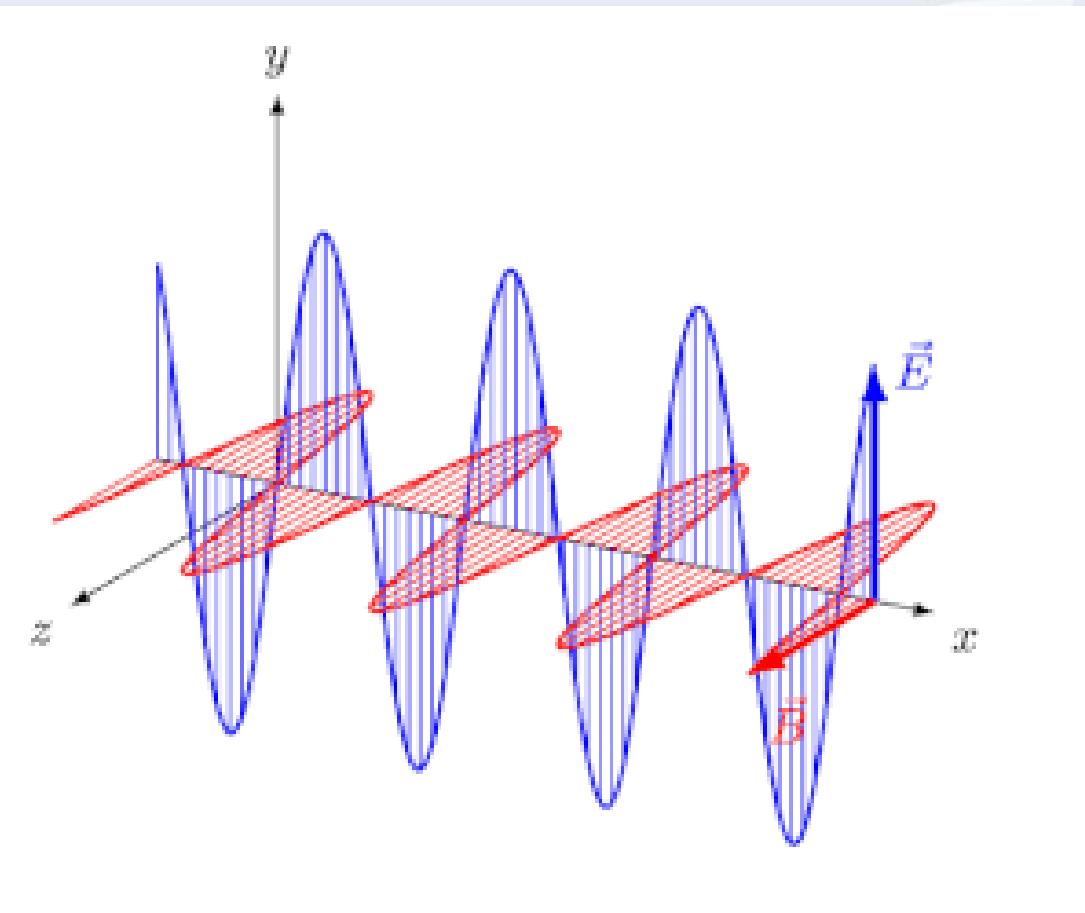
# Magnetfelder / Polarisation

- Licht ist eine elektromagnetische Welle
- gekoppelte elektrische ( $E$ ) und magnetische Felder ( $B$ )



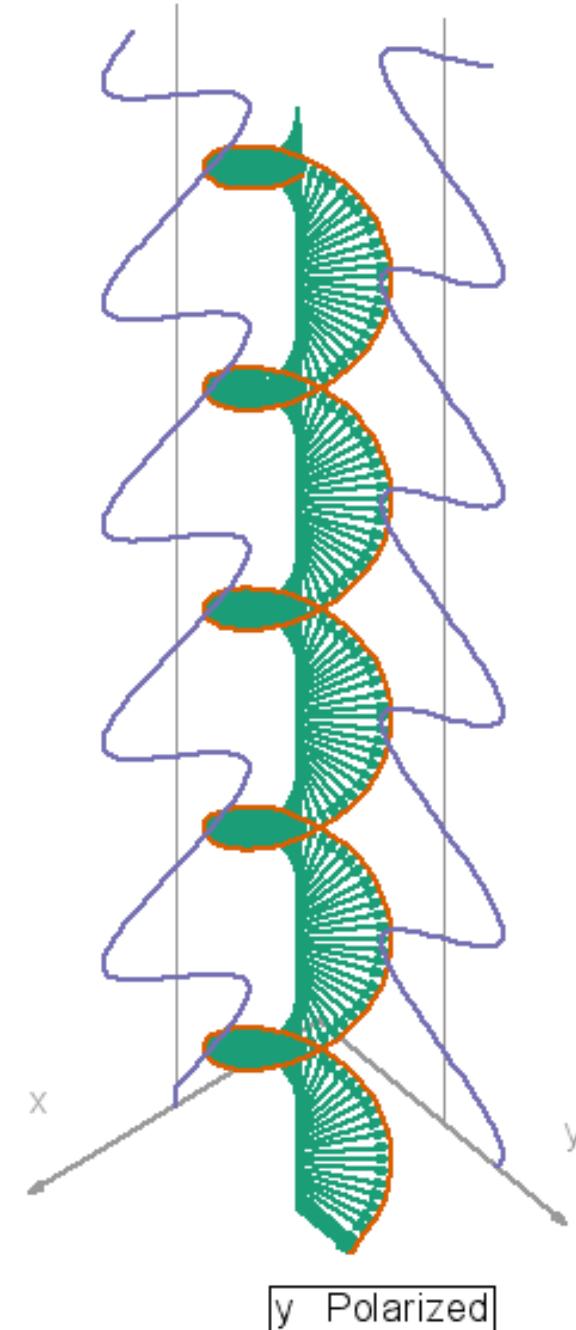
# Magnetfelder / Polarisation

- Licht ist eine elektromagnetische Welle
- gekoppelte elektrische (E) und magnetische Felder (B)
- Bei linear polarisiertem Licht liegen die E und B Felder immer in der gleichen Ebene



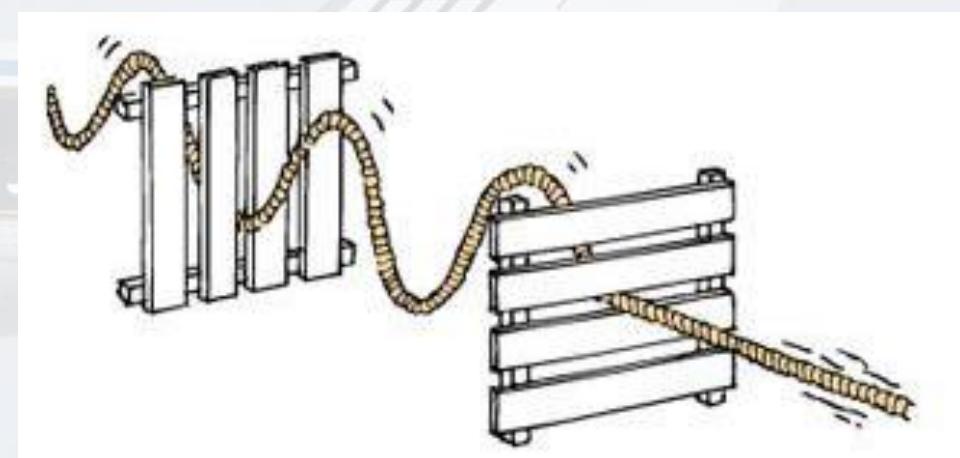
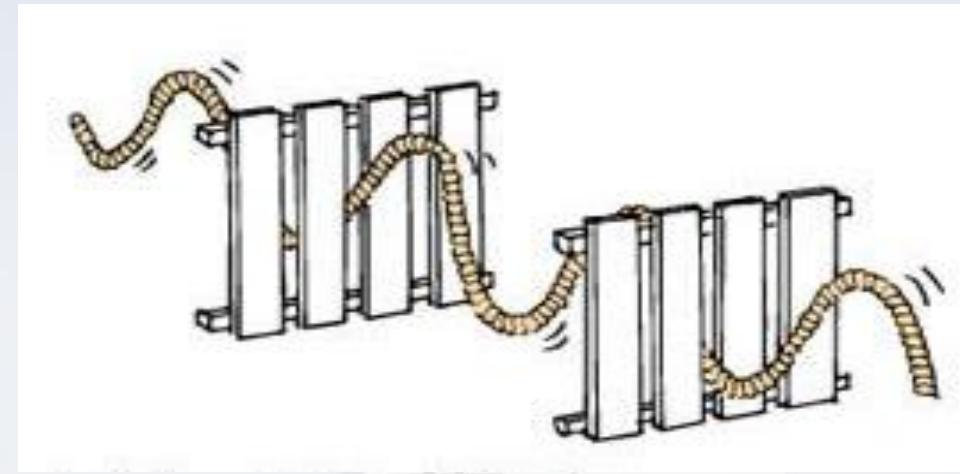
# Magnetfelder / Polarisation

- Licht ist eine elektromagnetische Welle
- gekoppelte elektrische (E) und magnetische Felder (B)
- Bei zirkular polarisiertem Licht ändert sich die Orientierung des E und B Feldes periodisch



# Magnetfelder / Polarisation

- Polarisierter Licht kann abhängig von seiner Polarisationsrichtung absorbiert werden.
  - Bsp. Polarisationsfilter in der Fotografie



# Polarisation im interstellaren Medium

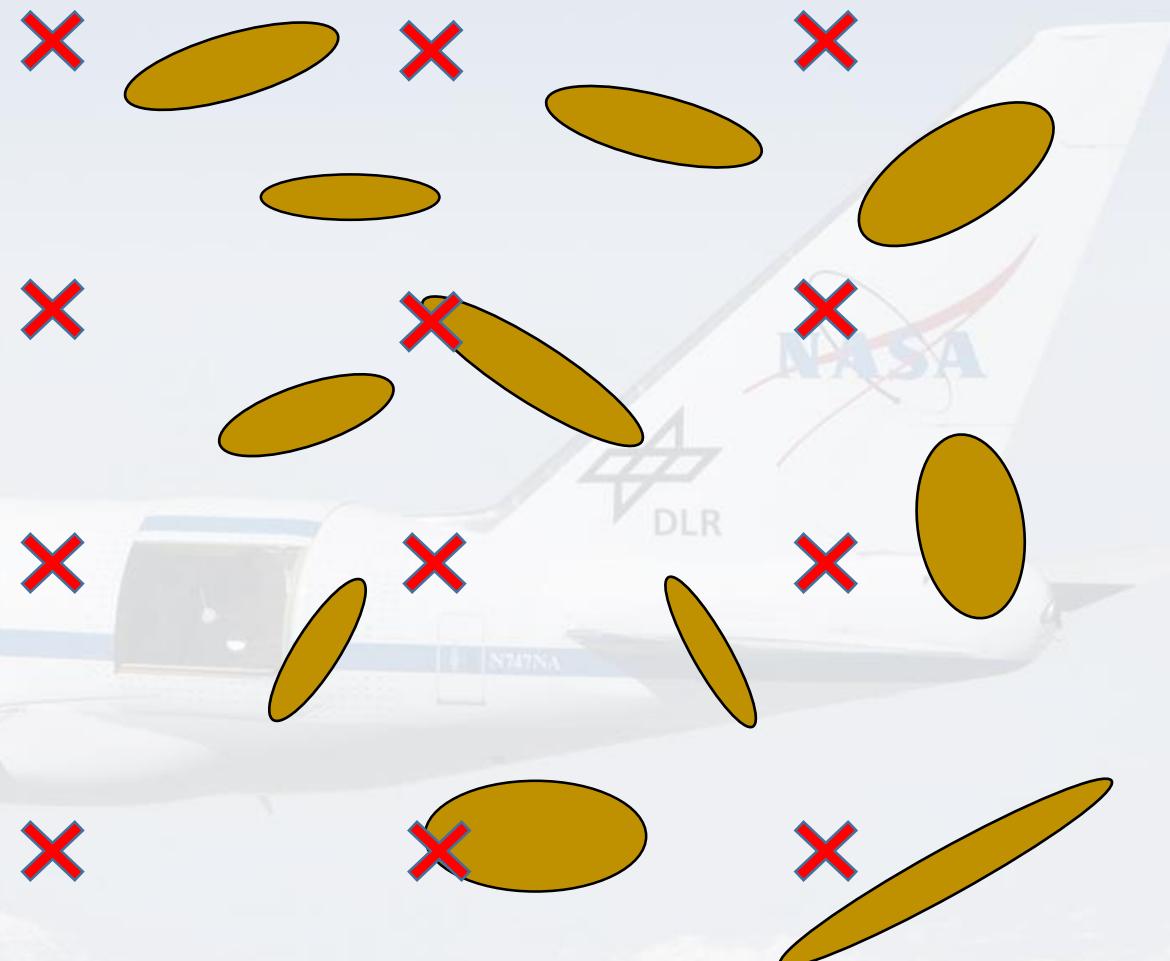
- Das interstellare Medium besteht aus Gas und Staub.
- Staubkörner sind irregulär geformt und paramagnetisch
- Licht, dass diese Staubwolke passiert wird sieht keine ausgezeichnete Absorptionsrichtung.
- Geringe oder keine Polarisation



# Polarisation im interstellaren Medium

Magnetfelder  
senkrecht zur  
Folie

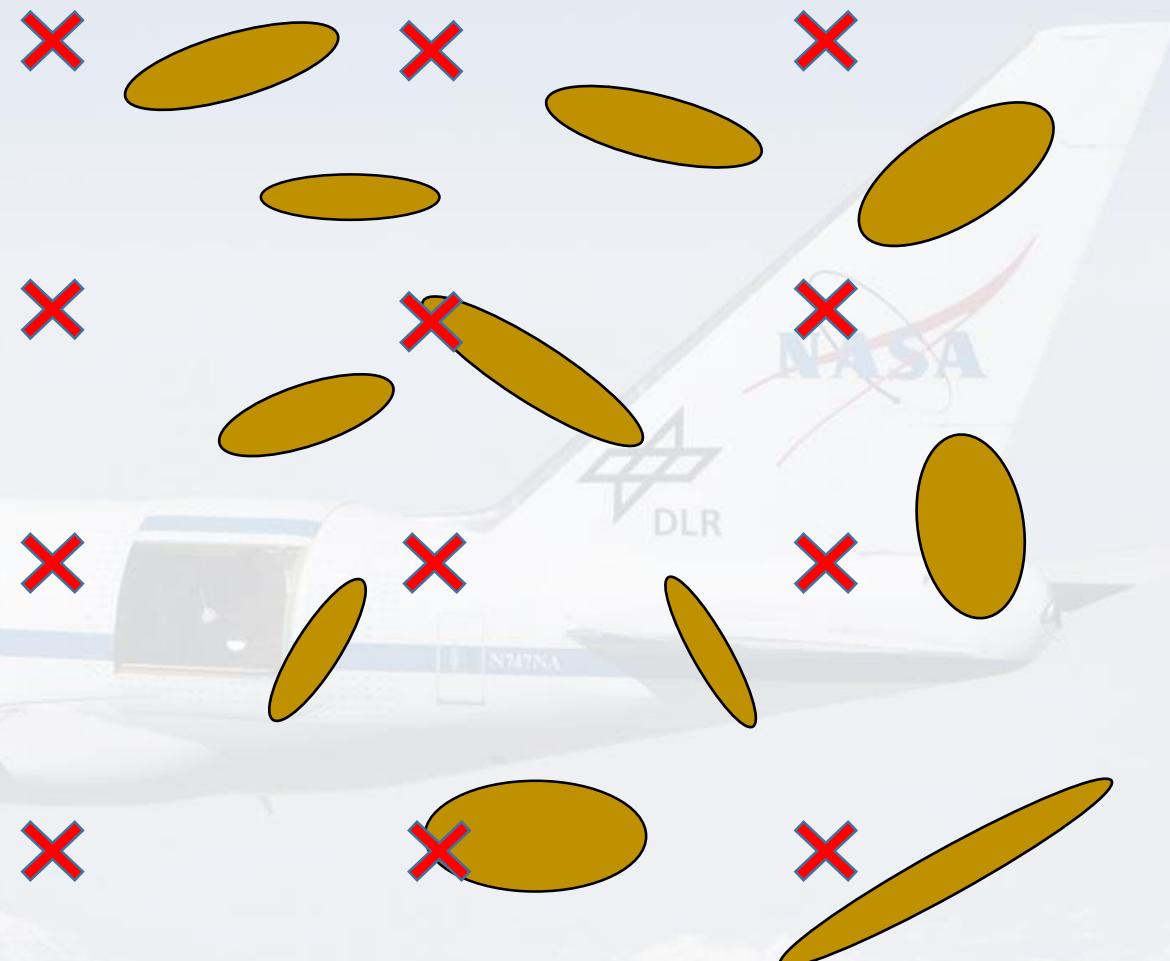
- Das interstellare Medium besteht aus Gas und Staub.
- Staubkörner sind irregulär geformt und paramagnetisch
- Licht, dass diese Staubwolke passiert wird sieht keine ausgezeichnete Absorptionsrichtung.
- Geringe oder keine Polarisation



# Polarisation im interstellaren Medium

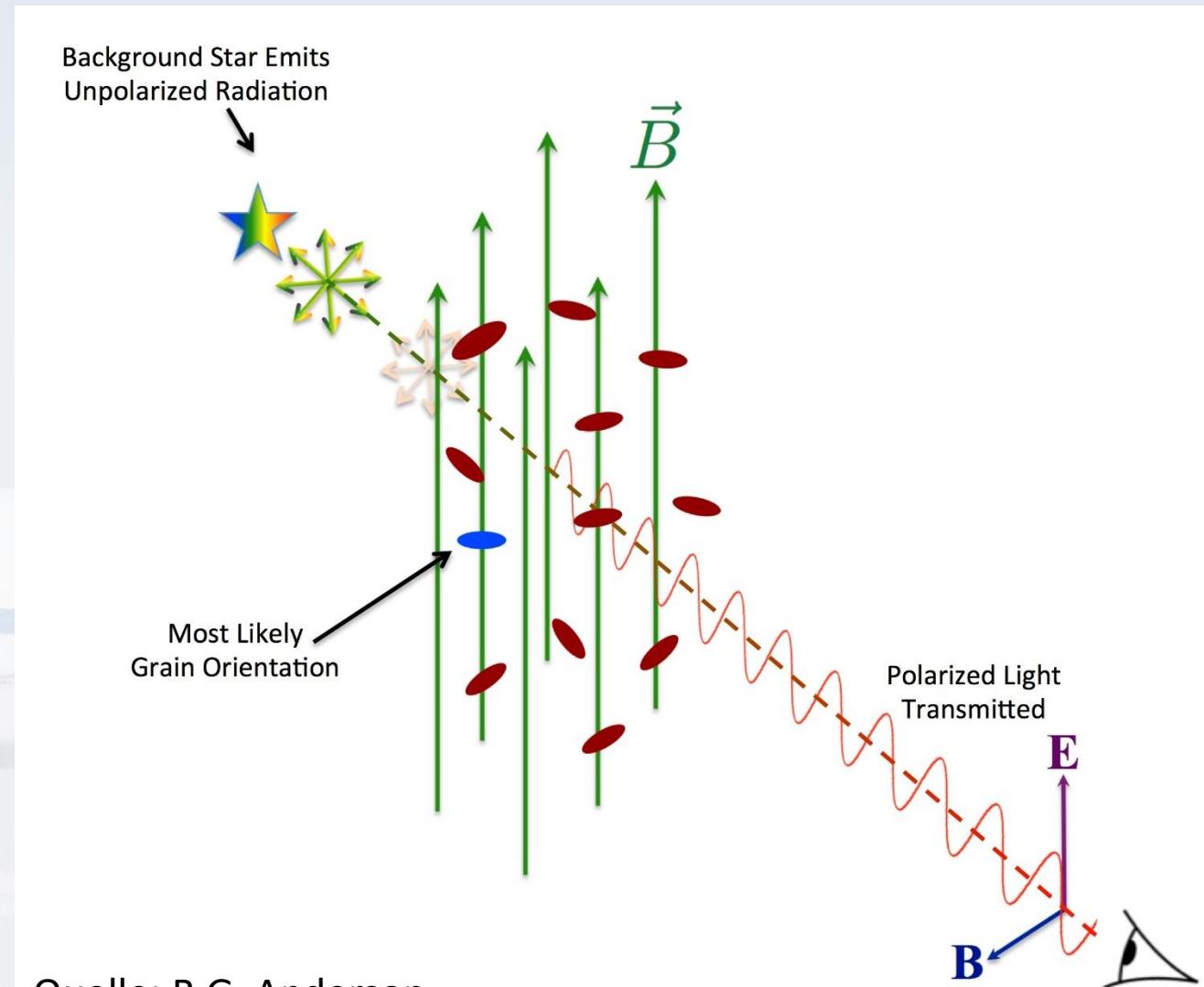
Magnetfelder  
senkrecht zur  
Folie

- Das interstellare Medium besteht aus Gas und Staub.
- Staubkörner sind irregulär geformt und paramagnetisch
- Licht, dass diese Staubwolke passiert wird sieht keine ausgezeichnete Absorptionsrichtung.
- Geringe oder keine Polarisation



# Polarisation im interstellaren Medium

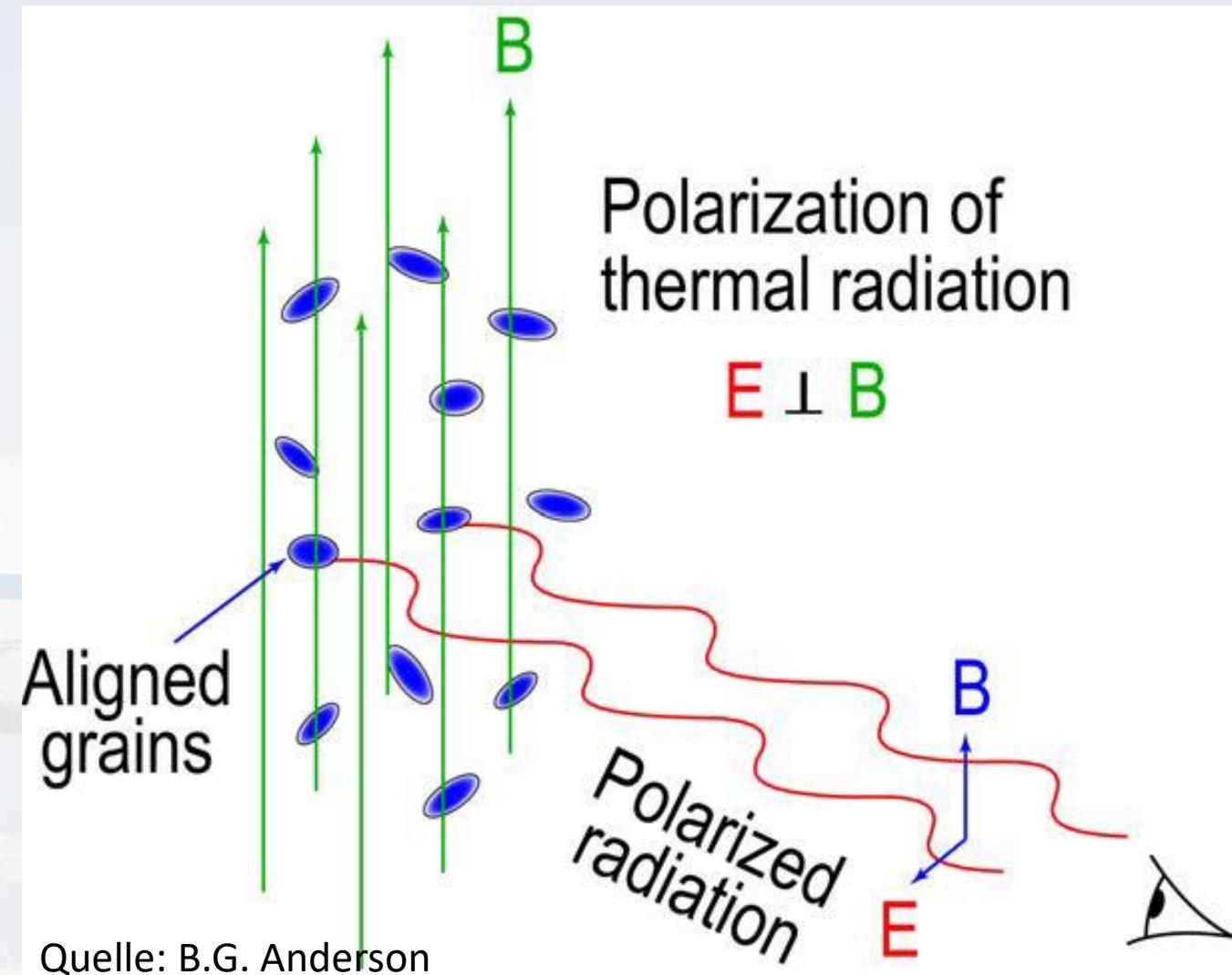
- Richten sich Staubkörner gleich aus, formen sie ein Polarisationsgitter.
- Magnetfelder in der Himmelsebene sorgen für eine ausgezeichnete Richtung
- Strahlung aus dem Hintergrund der Staubwolke kann nur passieren mit einer Polarisationsrichtung ( $E$ ) parallel zum Magnetfeld.



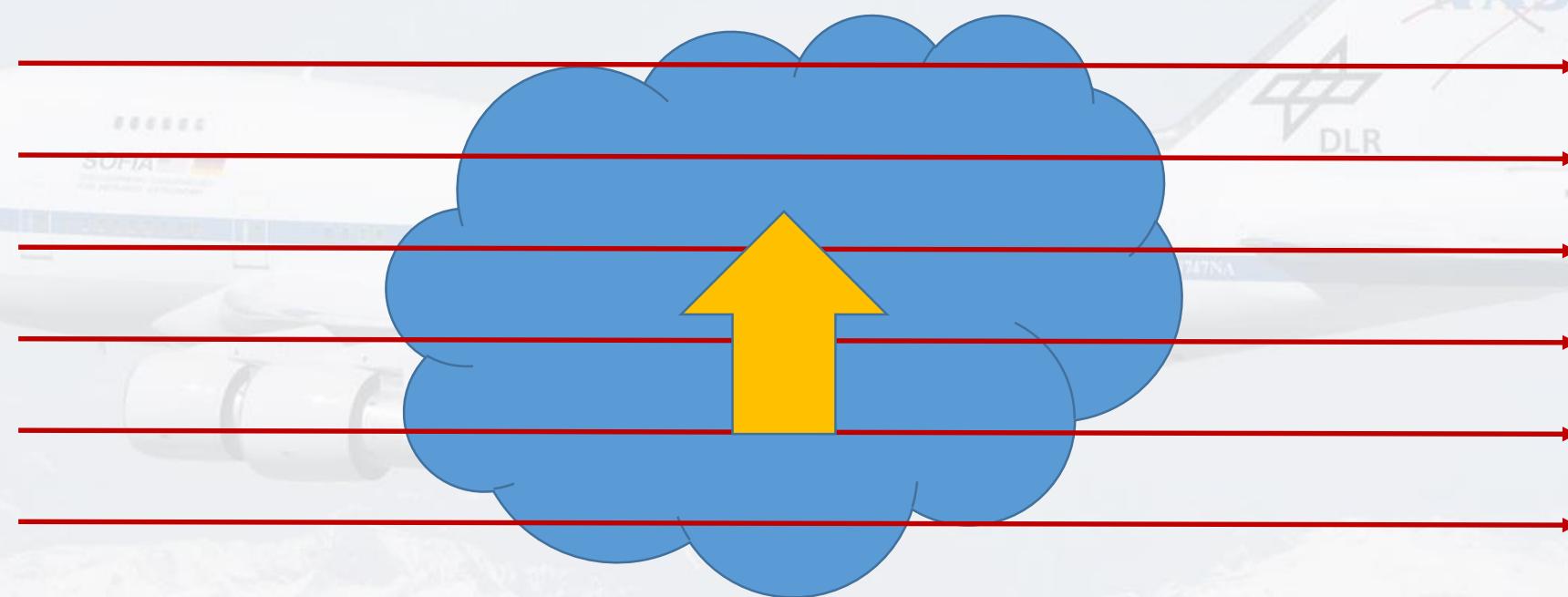
Quelle: B.G. Anderson

# Polarisation im interstellaren Medium

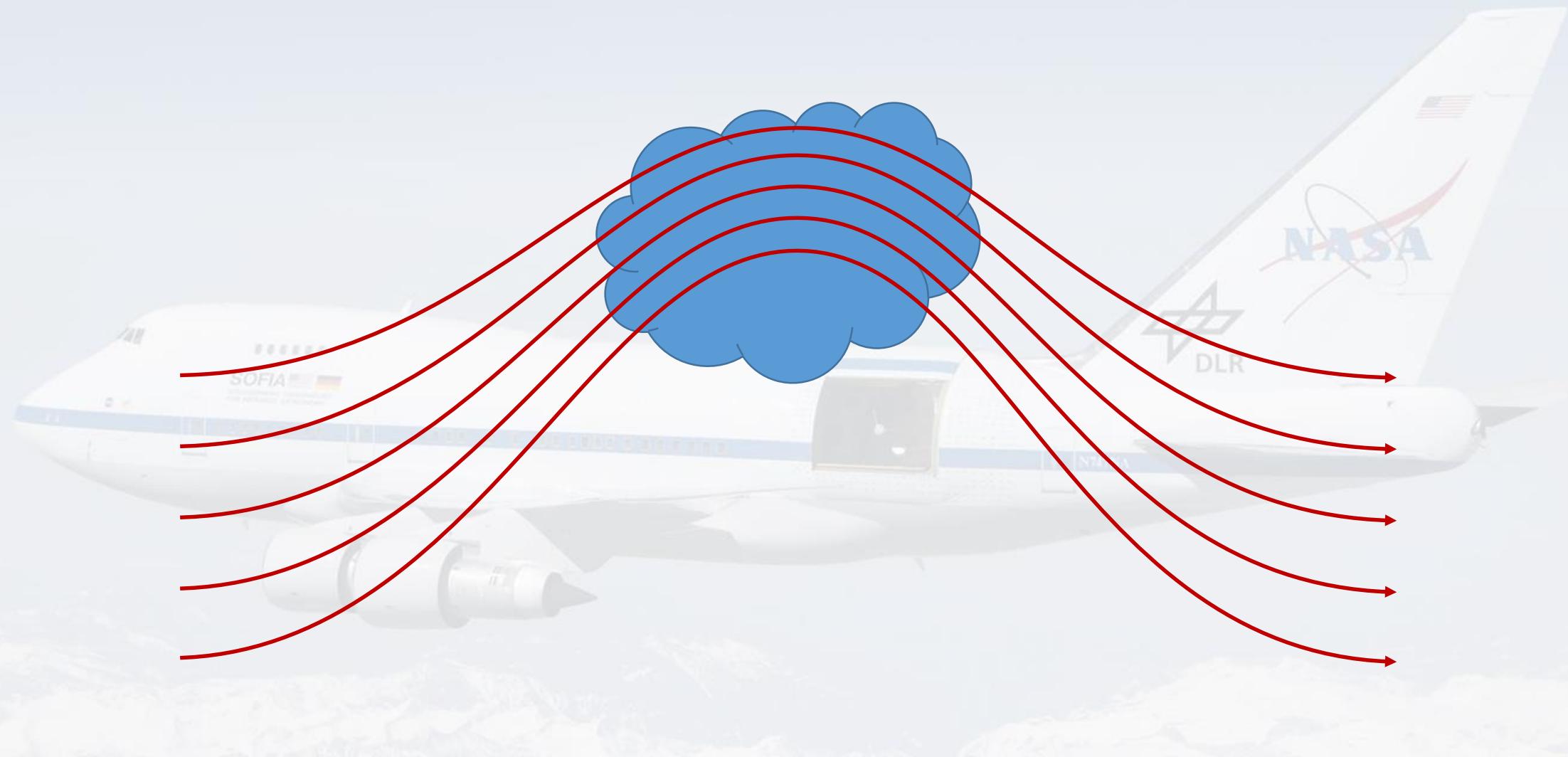
- Strahlung, die direkt von den Staubkörner abgestrahlt wird, ist senkrecht zum Magnetfeld ( $E$ ) polarisiert.
- Eine der wenigen Möglichkeiten, Magnetfelder über astronomische Entfernungen hinweg zu detektieren.



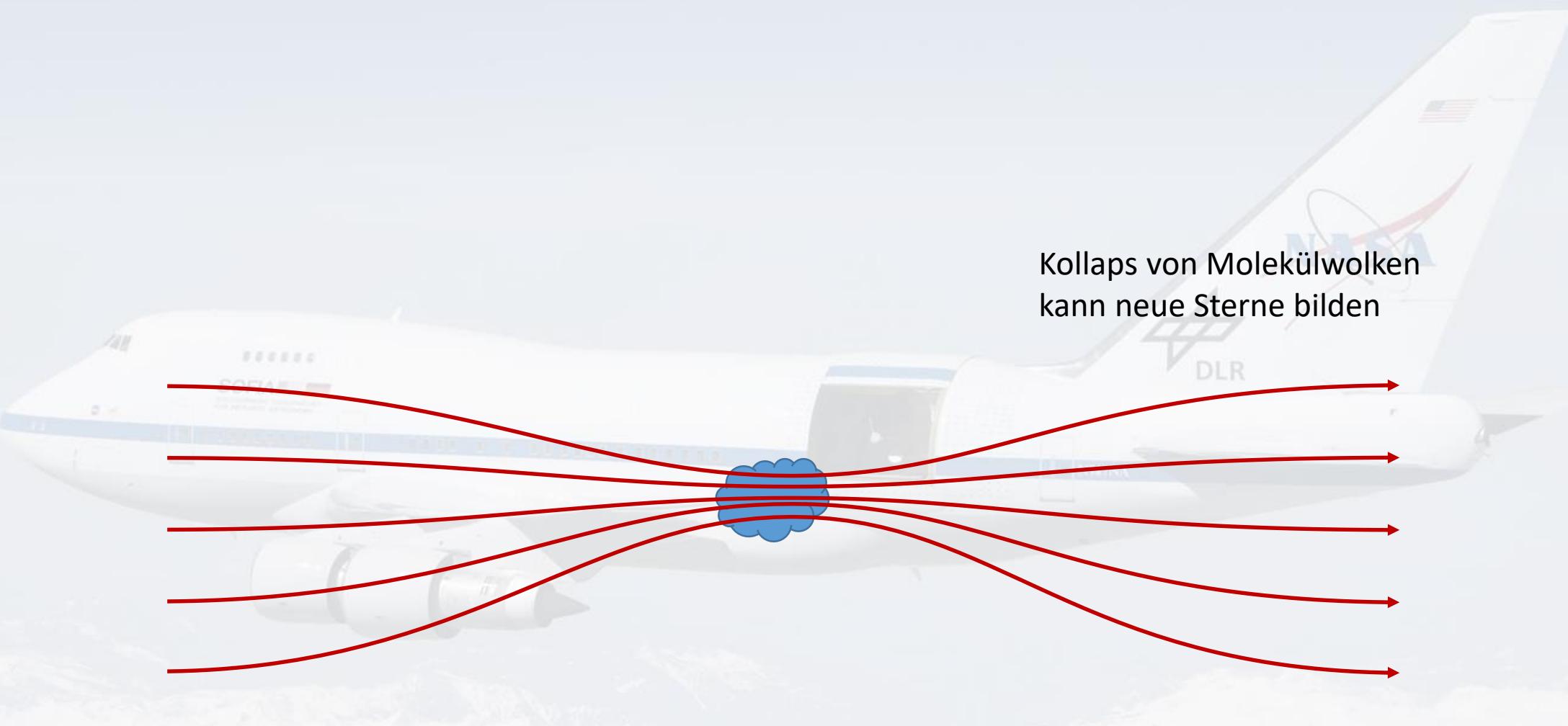
# „Eingefrorene“ Magnetfelder



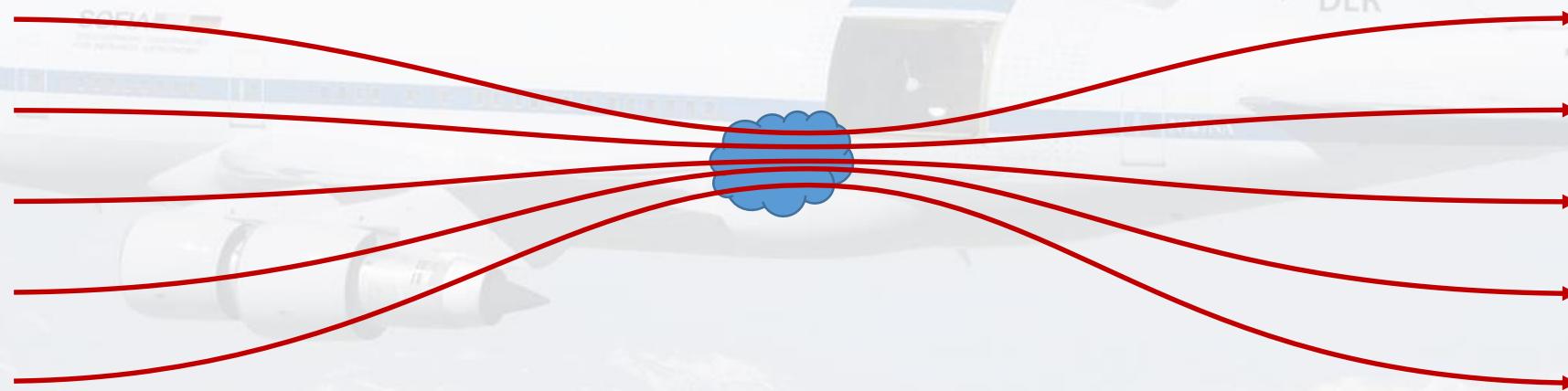
# „Eingefrorene“ Magnetfelder



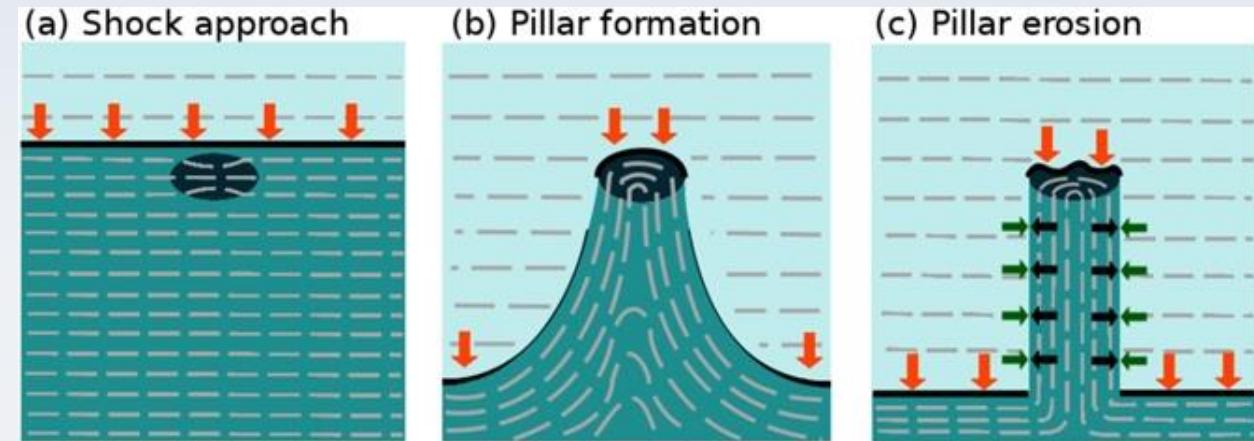
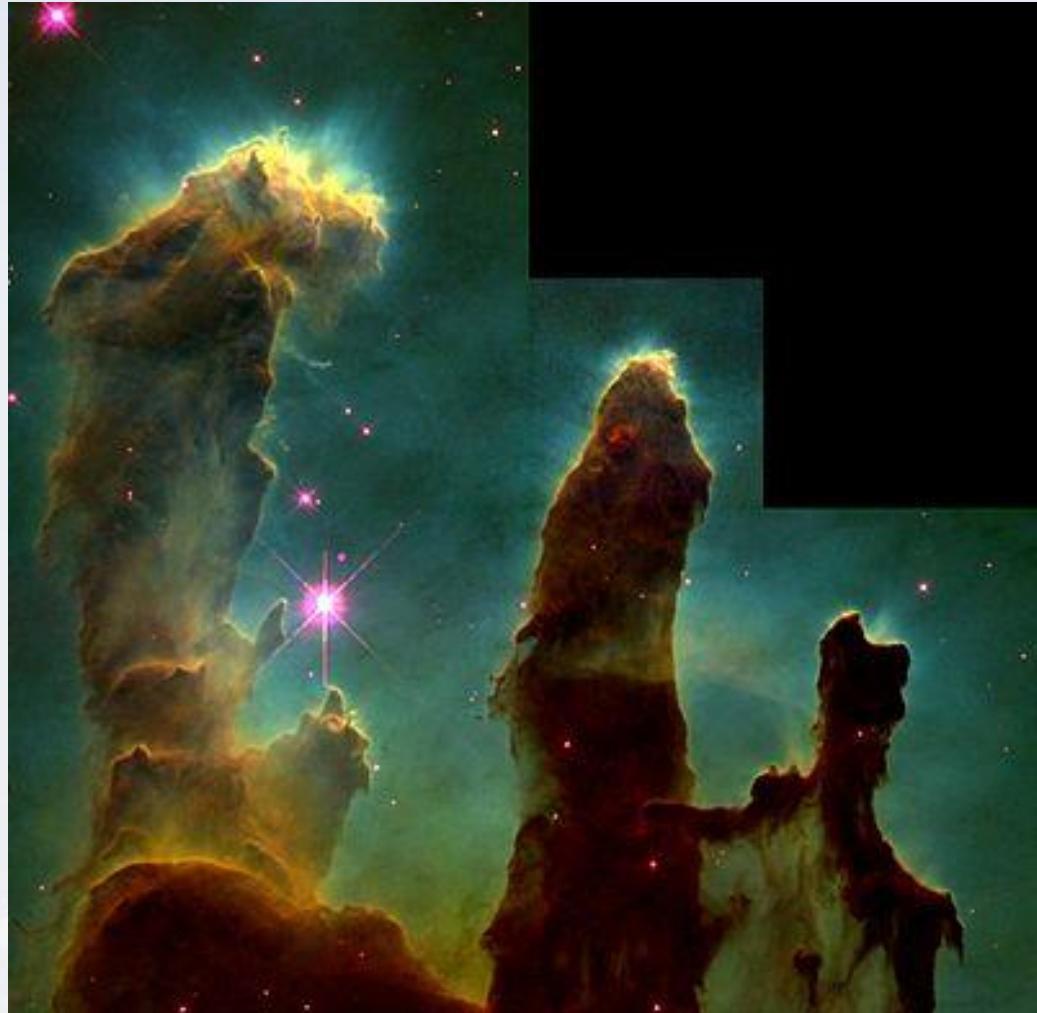
# „Eingefrorene“ Magnetfelder



Kollaps von Molekülwolken  
kann neue Sterne bilden



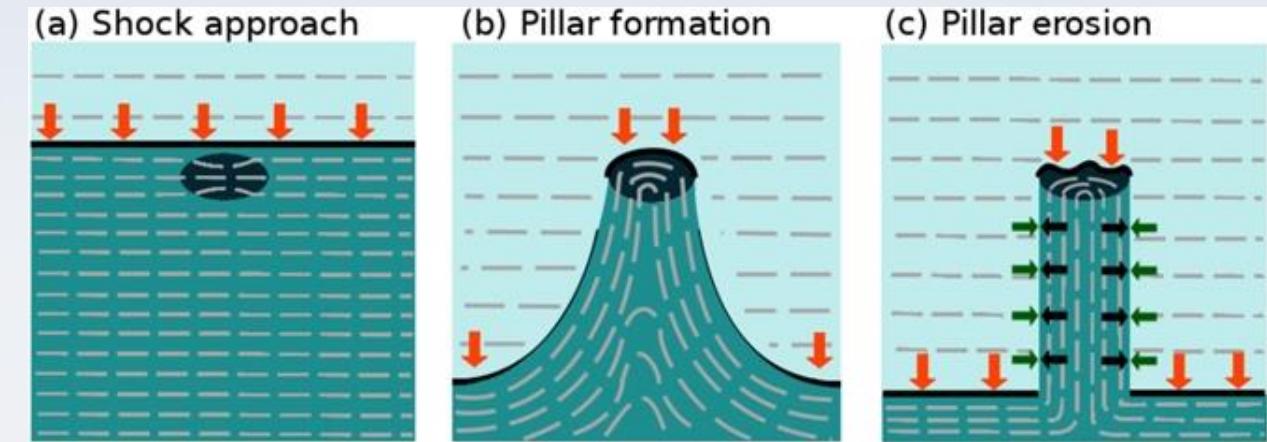
# Magnetfelder zeigen die Dynamische Geschichte des interstellaren Mediums



Pattle et al. 2018

Schockwellen, ausgelöst von jungen, massiven Sternen in der Umgebung, beeinflussen nahe Molekülwolken und können sogenannte „Pillars of Creation“ formen.

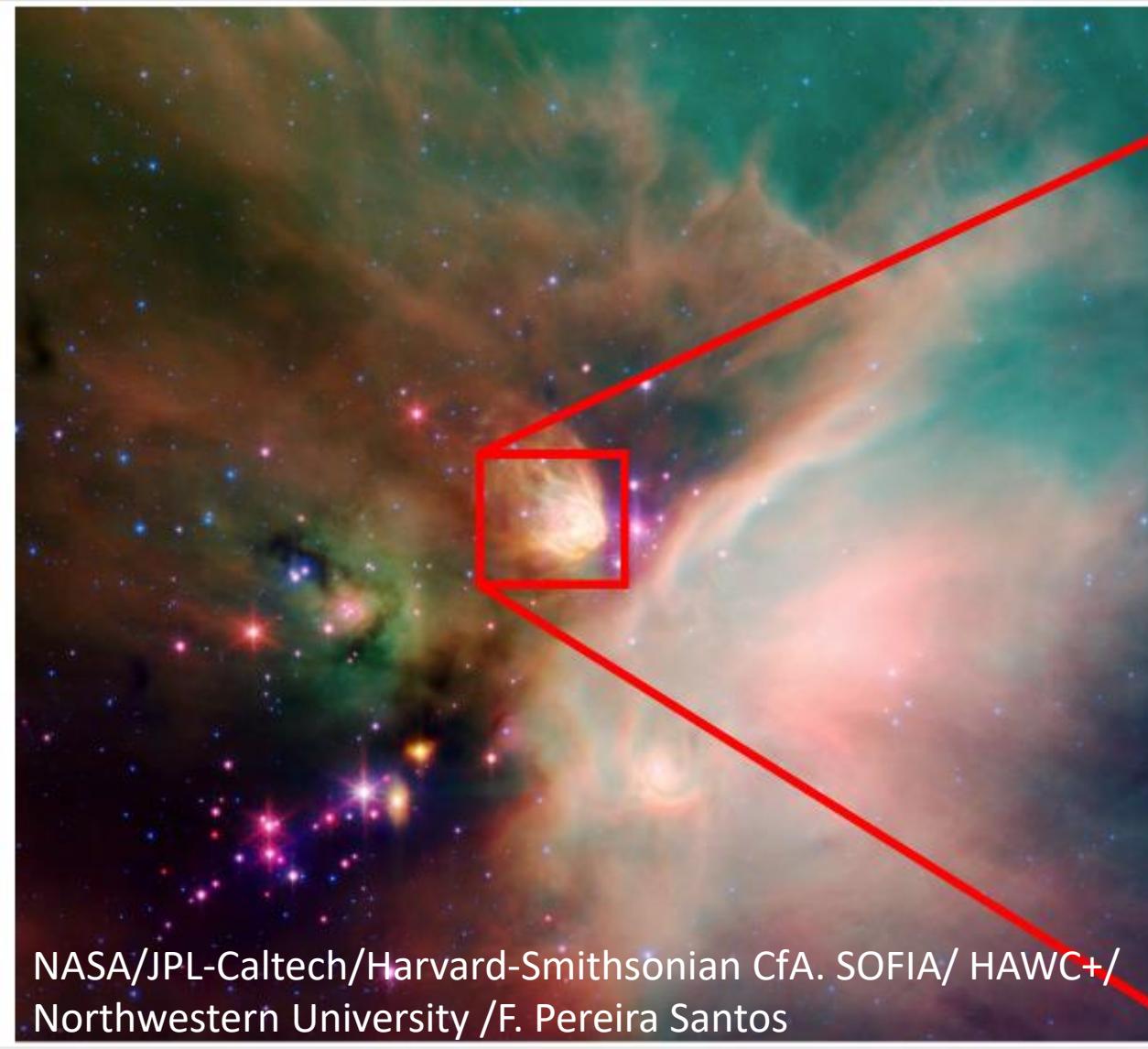
# Magnetfelder zeigen die Dynamische Geschichte des interstellaren Mediums



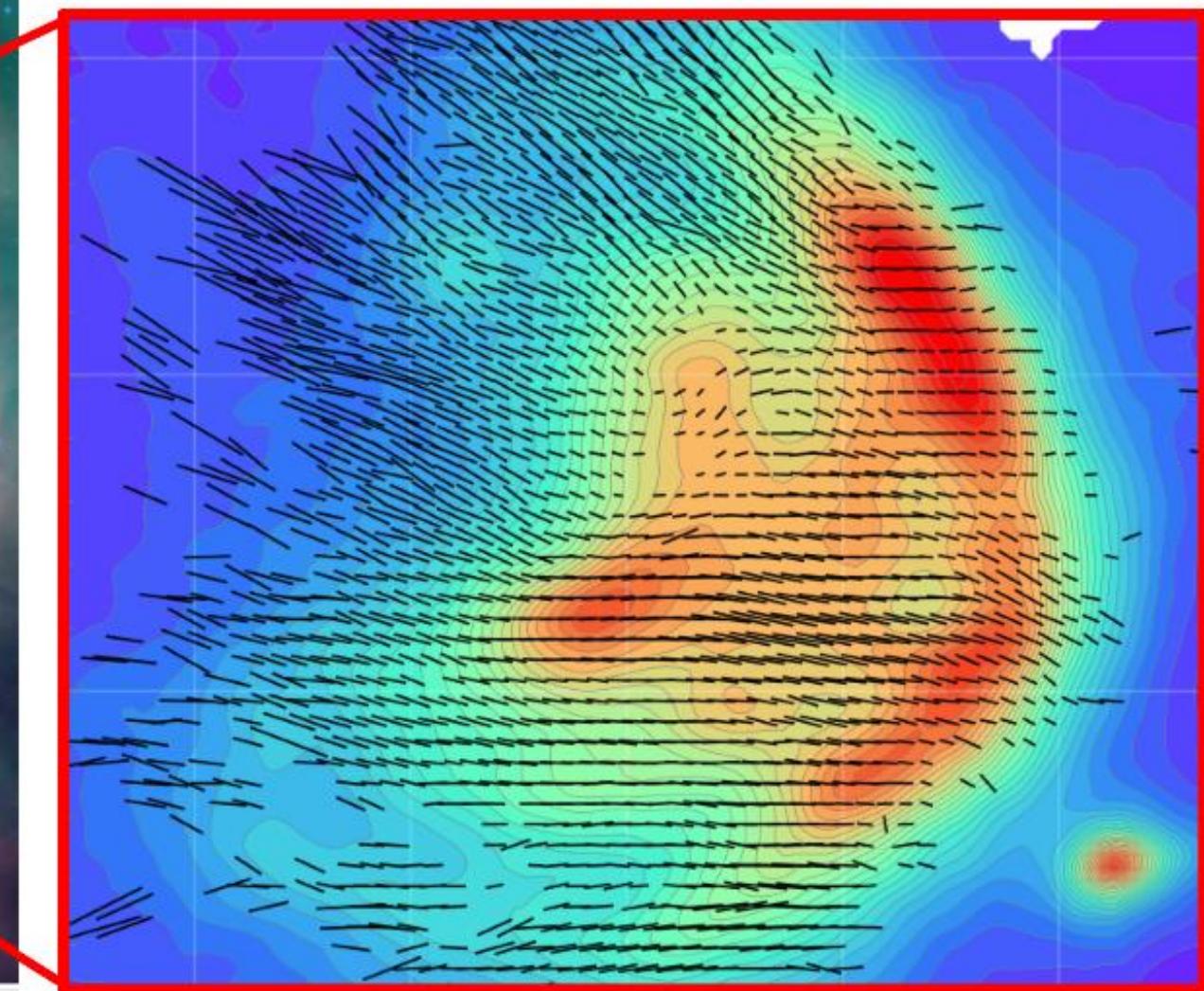
Pattle et al. 2018

Eingefrorene Magnetfelder  
dokumentieren die dynamische  
Geschichte der Wolke!

# SOFIA Beobachtung der Rho Oph Wolke



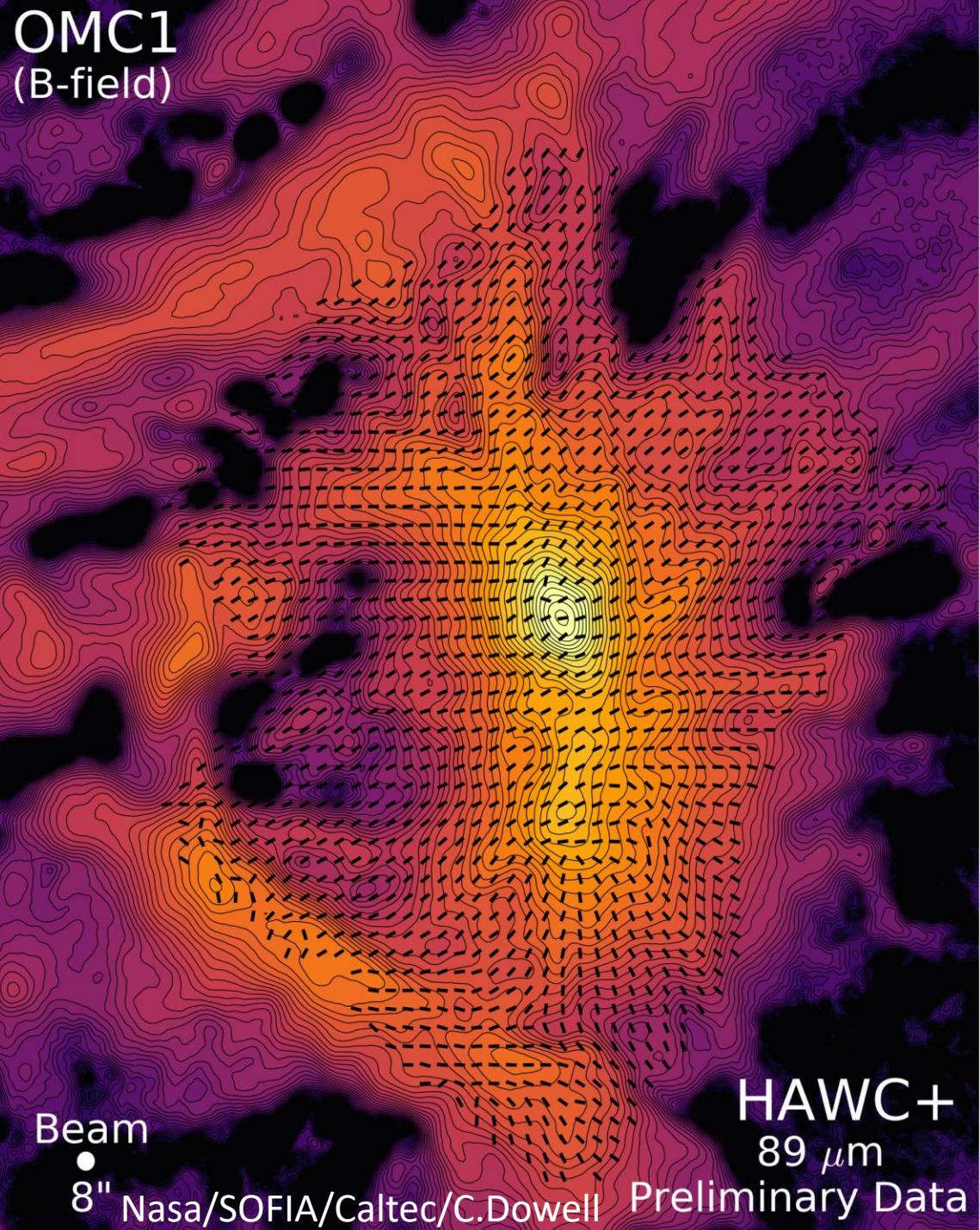
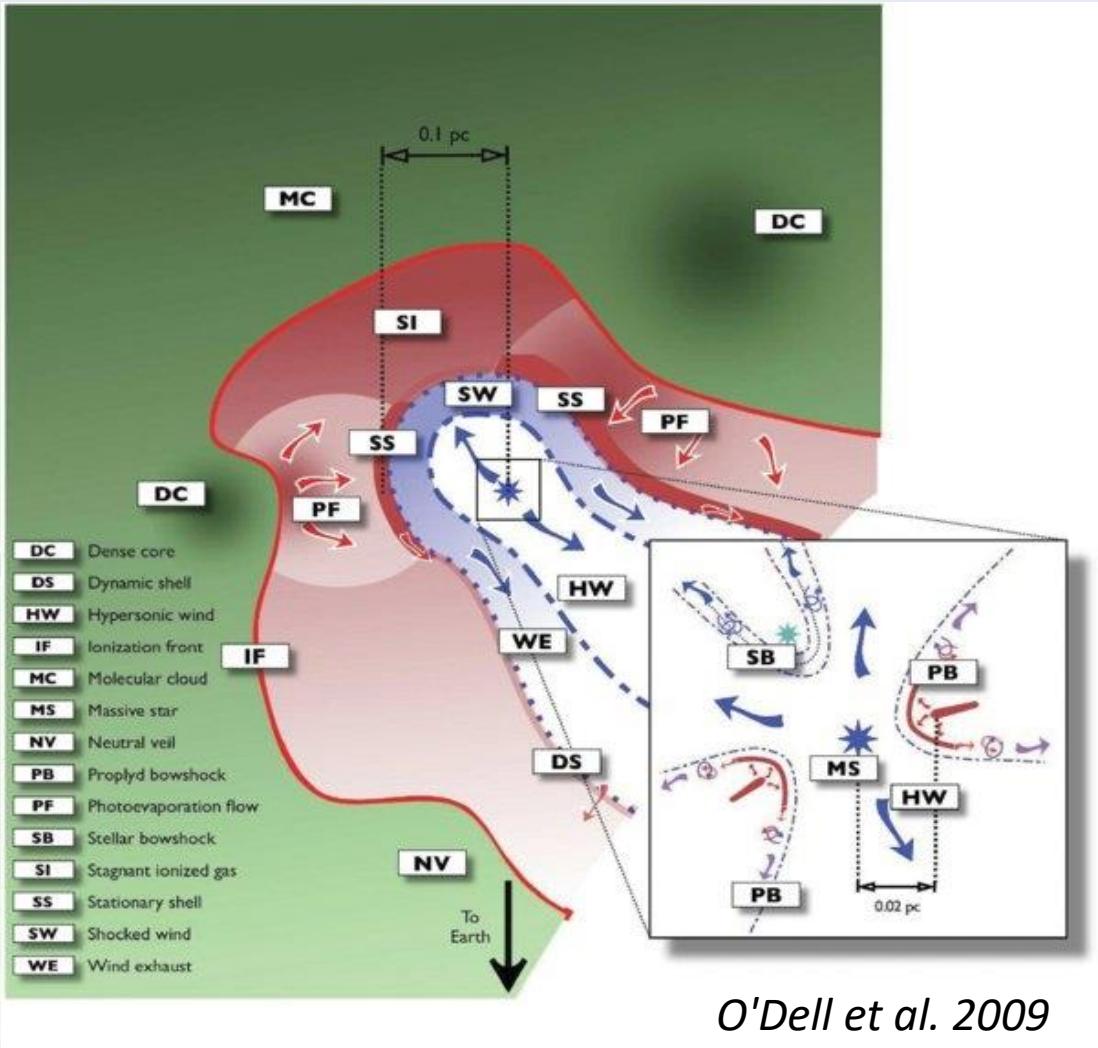
NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian CfA. SOFIA/ HAWC+/  
Northwestern University /F. Pereira Santos



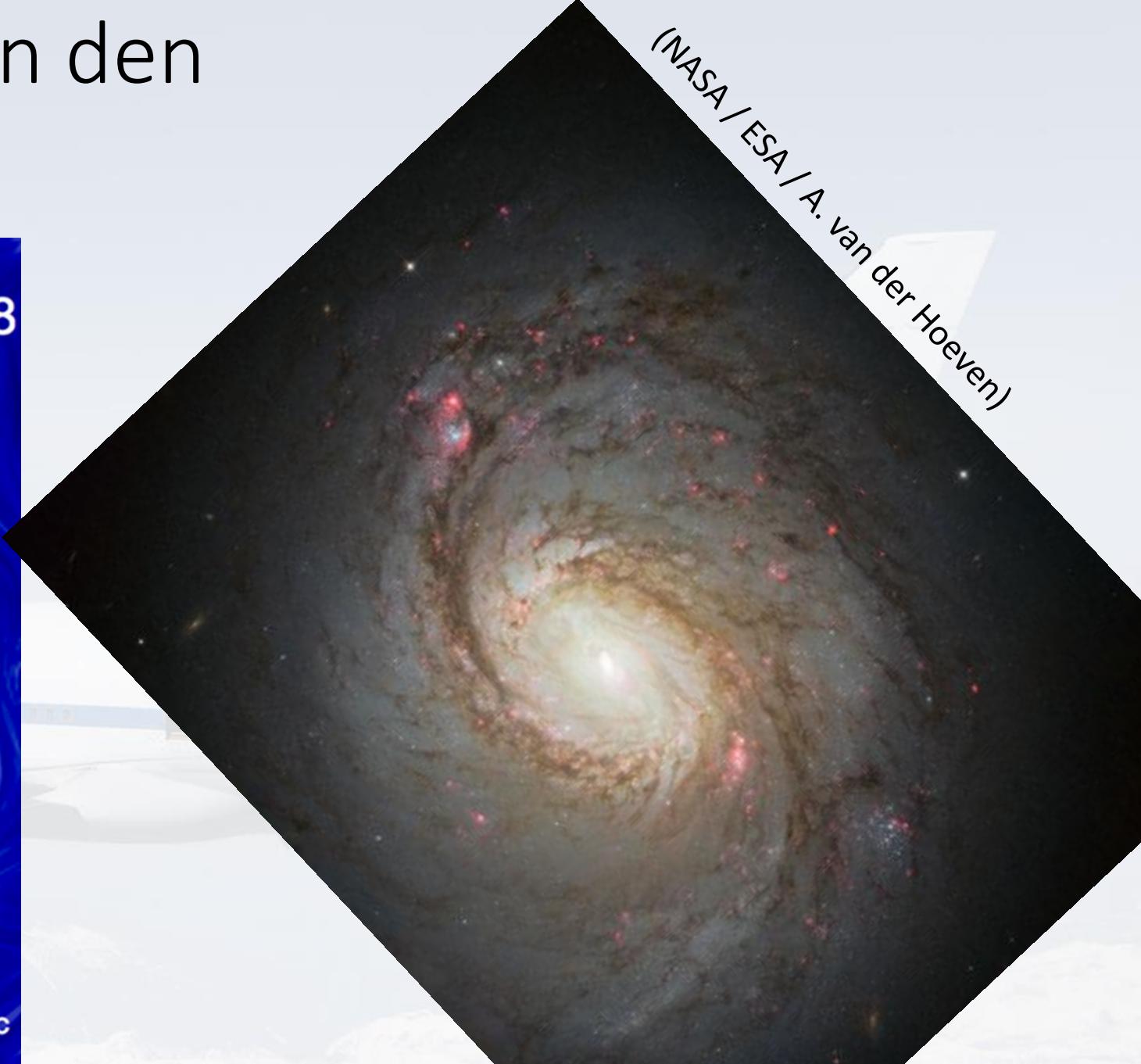
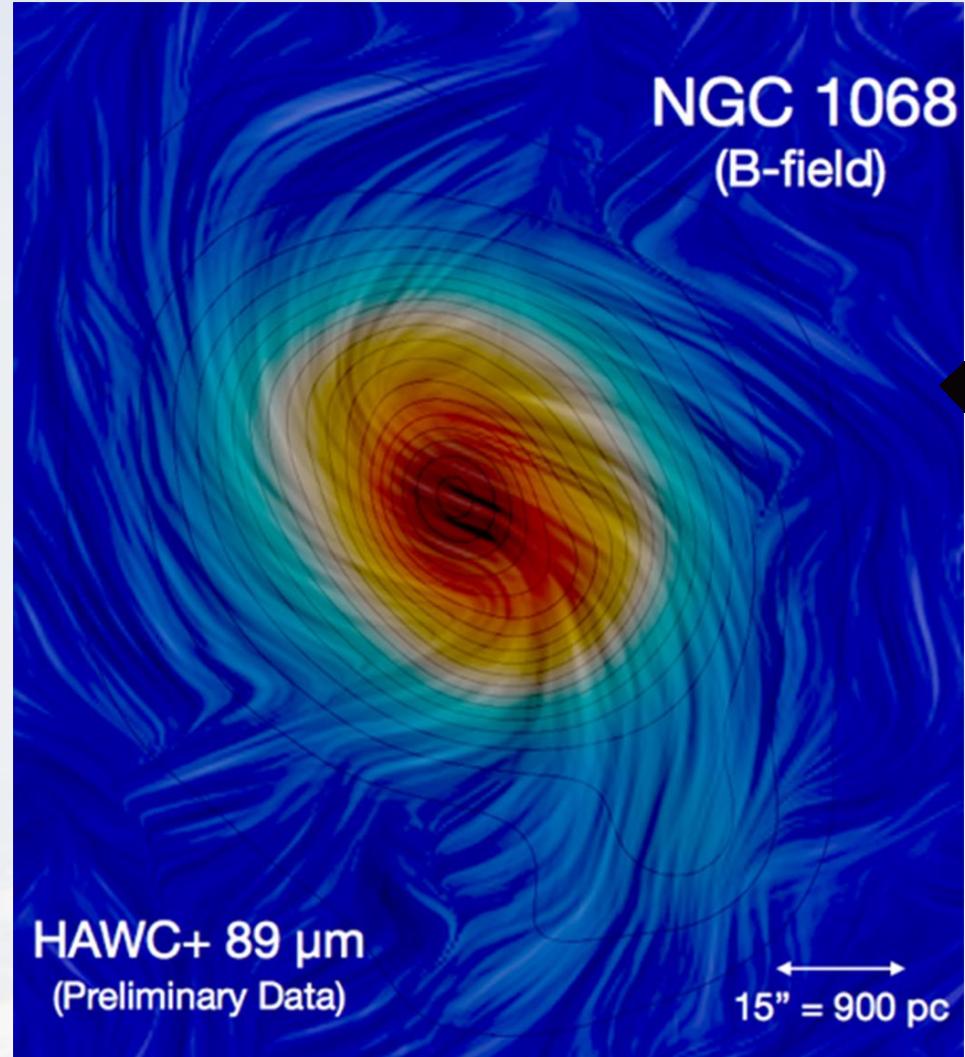
# HAWC+

(High-Angular resolution Wideband Camera)

## Orion Molekülwolke

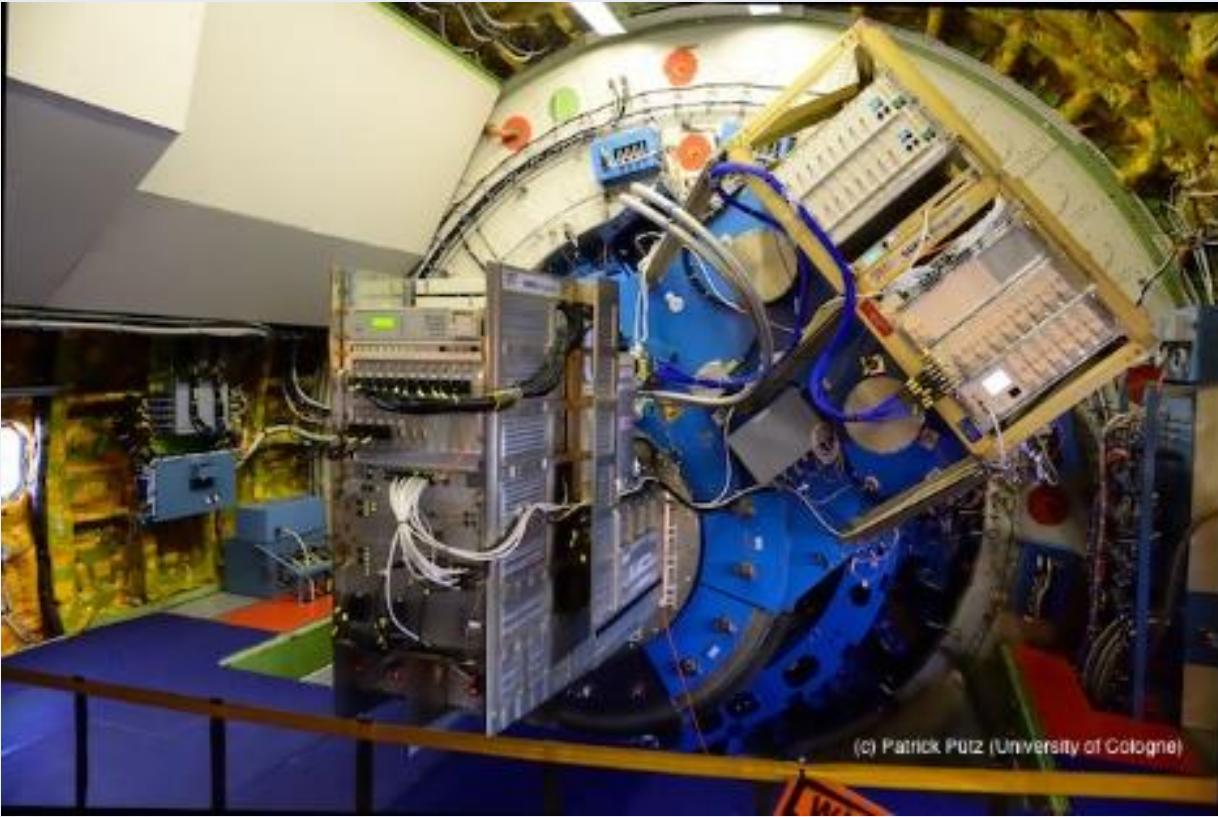


# Magnetfelder folgen den Spiralarmen

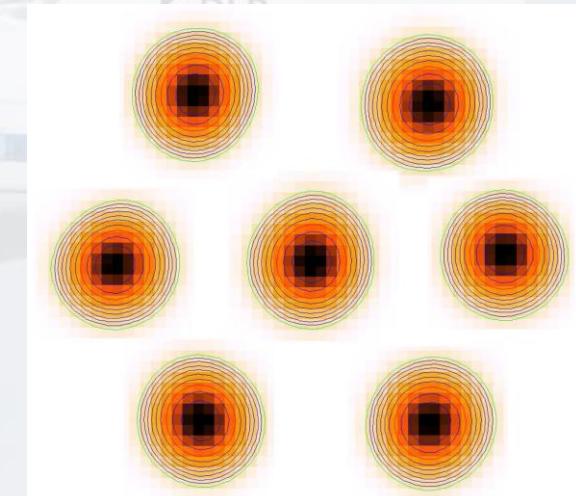


# upGREAT - Bonn/Kölner Empfänger

German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies

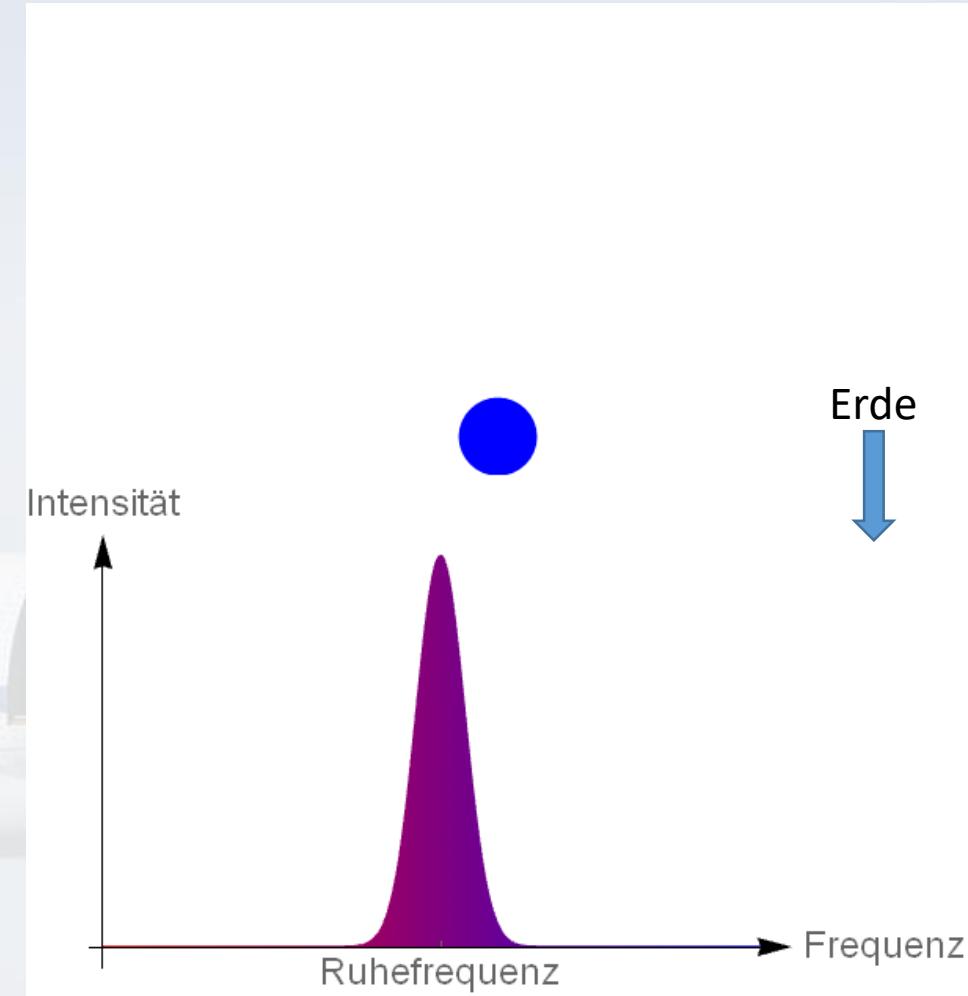
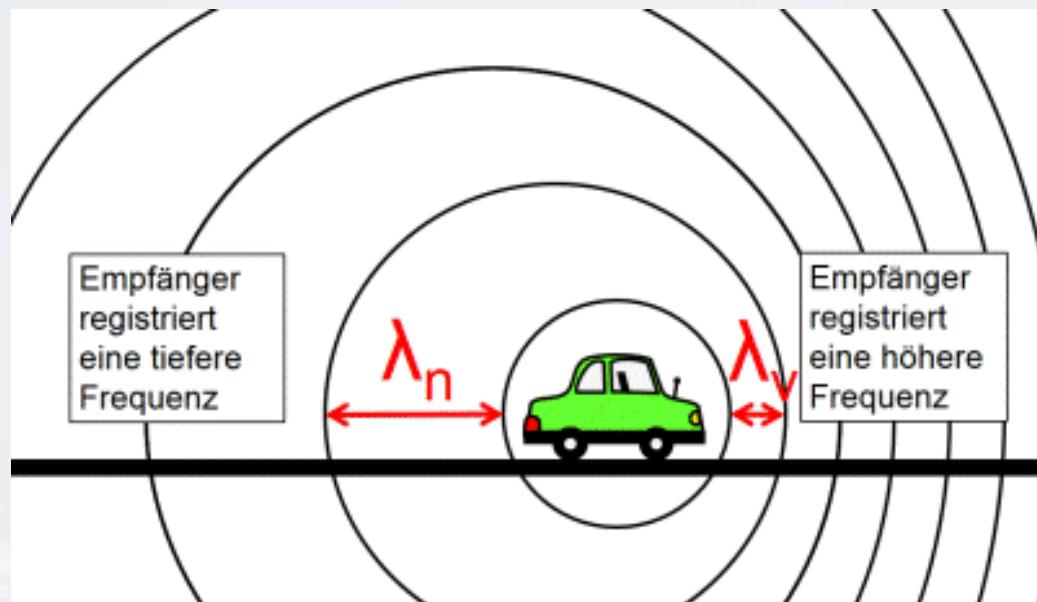


- Heterodyne Empfänger
- $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 10^8$
- Frequenzbereich:  
 $1.26 < f < 4.7 \text{ THz}$
- 7 Pixel



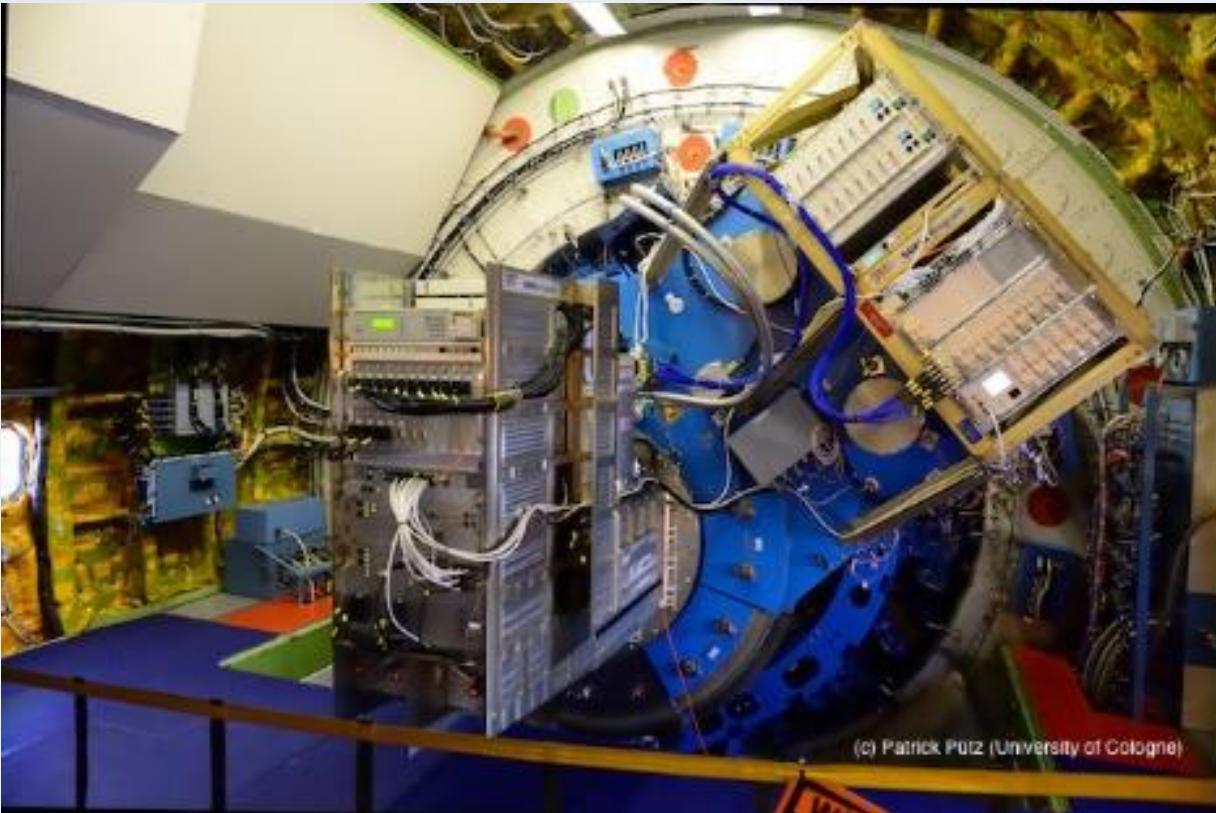
# Doppler-Effekt im interstellaren Medium

- Die Frequenz einer abgestrahlten Welle hängt von der Geschwindigkeit des Senders und des Empfängers ab.



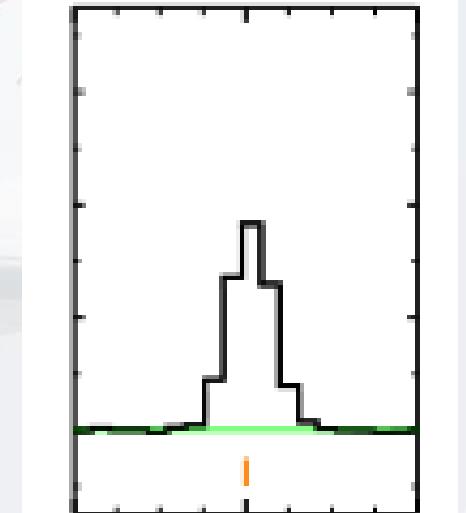
# upGREAT - Bonn/Kölner Empfänger

German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies



- Heterodyne Empfänger
- $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 10^8$
- Spektrale Form der Strahlung enthält Information über die lokale Dynamik

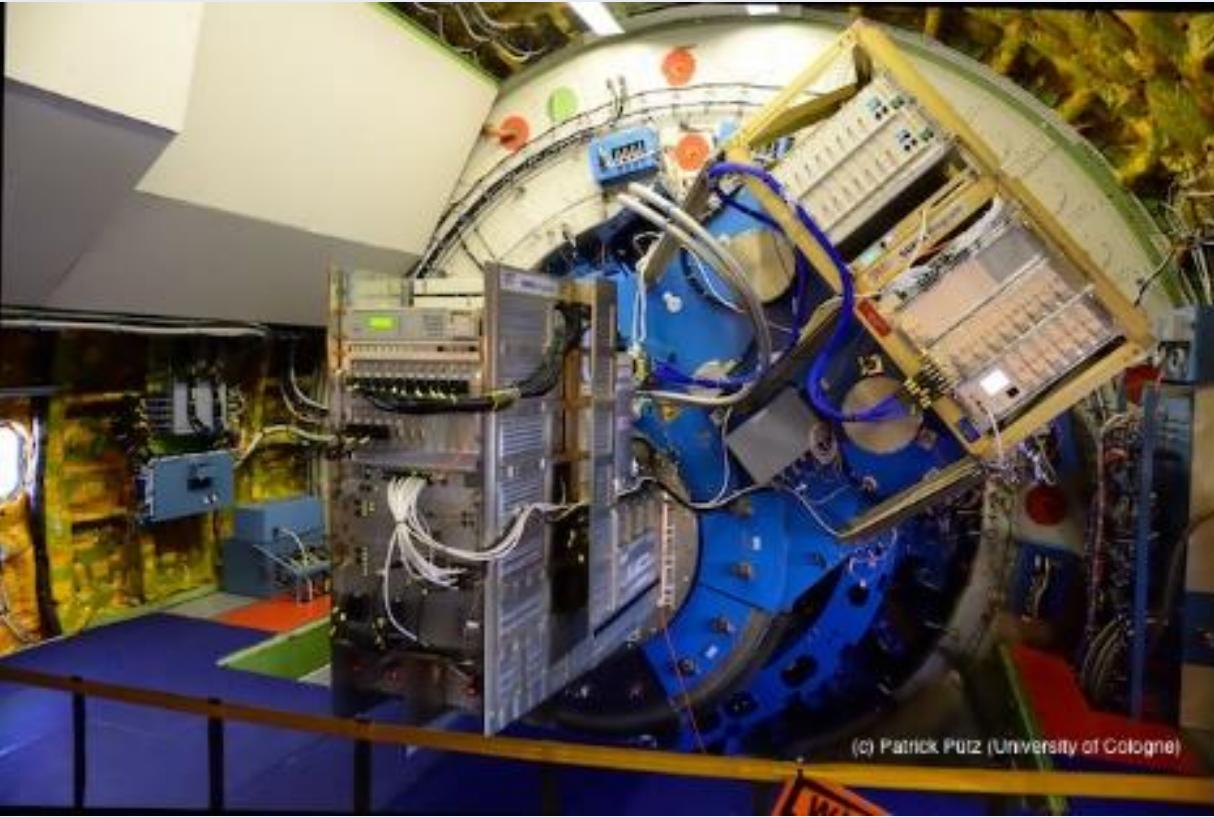
G5.89–0.39



Wellenlänge  
Herschel Spektrum

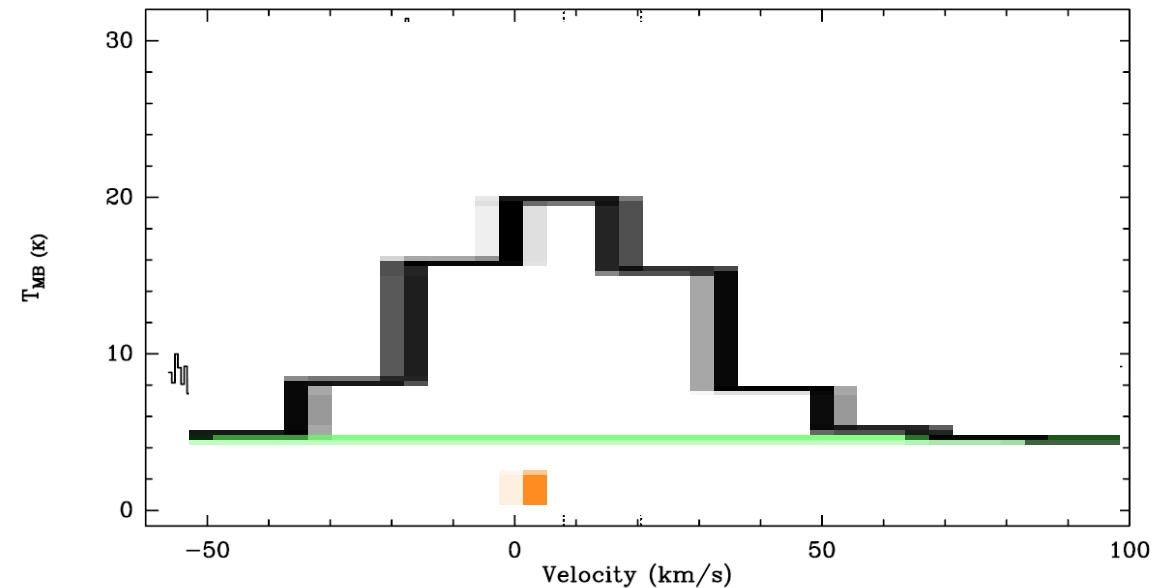
# upGREAT - Bonn/Kölner Empfänger

German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies



- Heterodyne Empfänger
- $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 10^8$

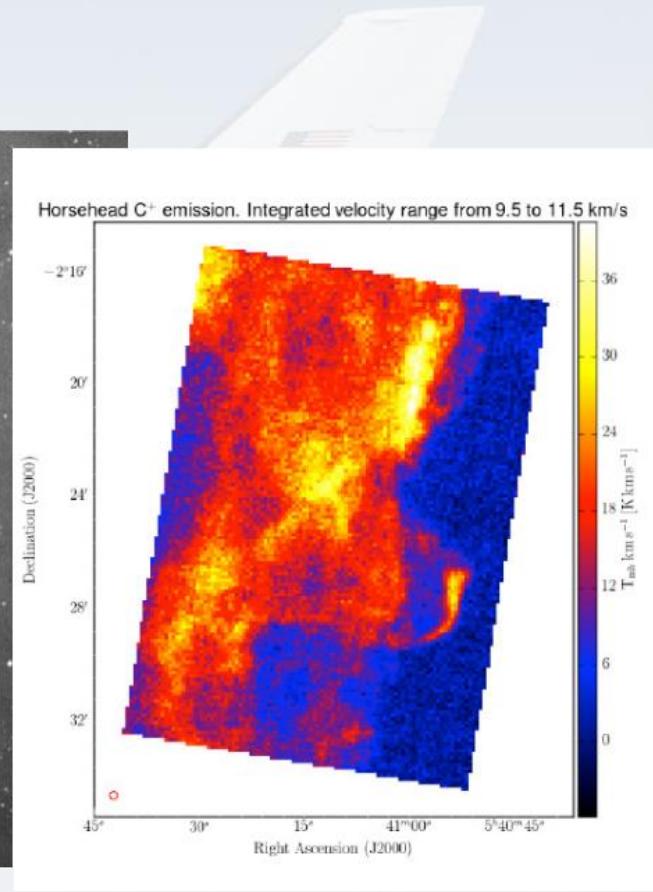
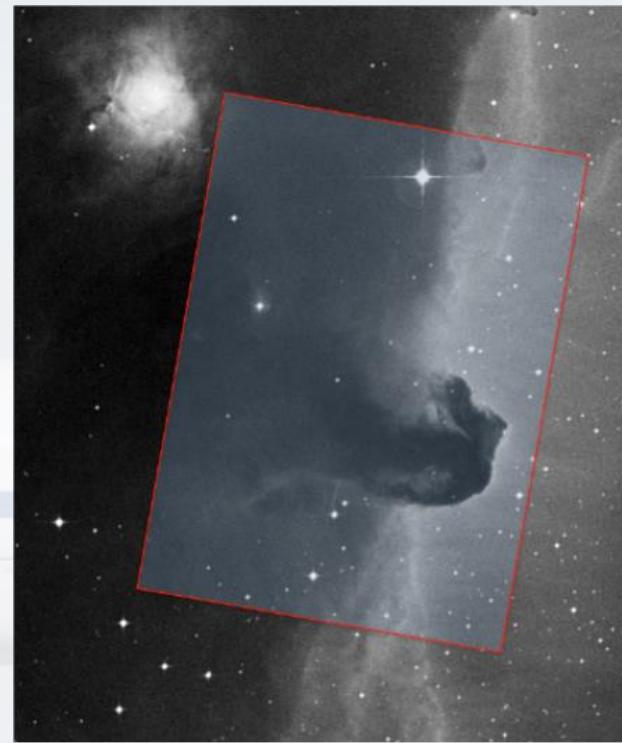
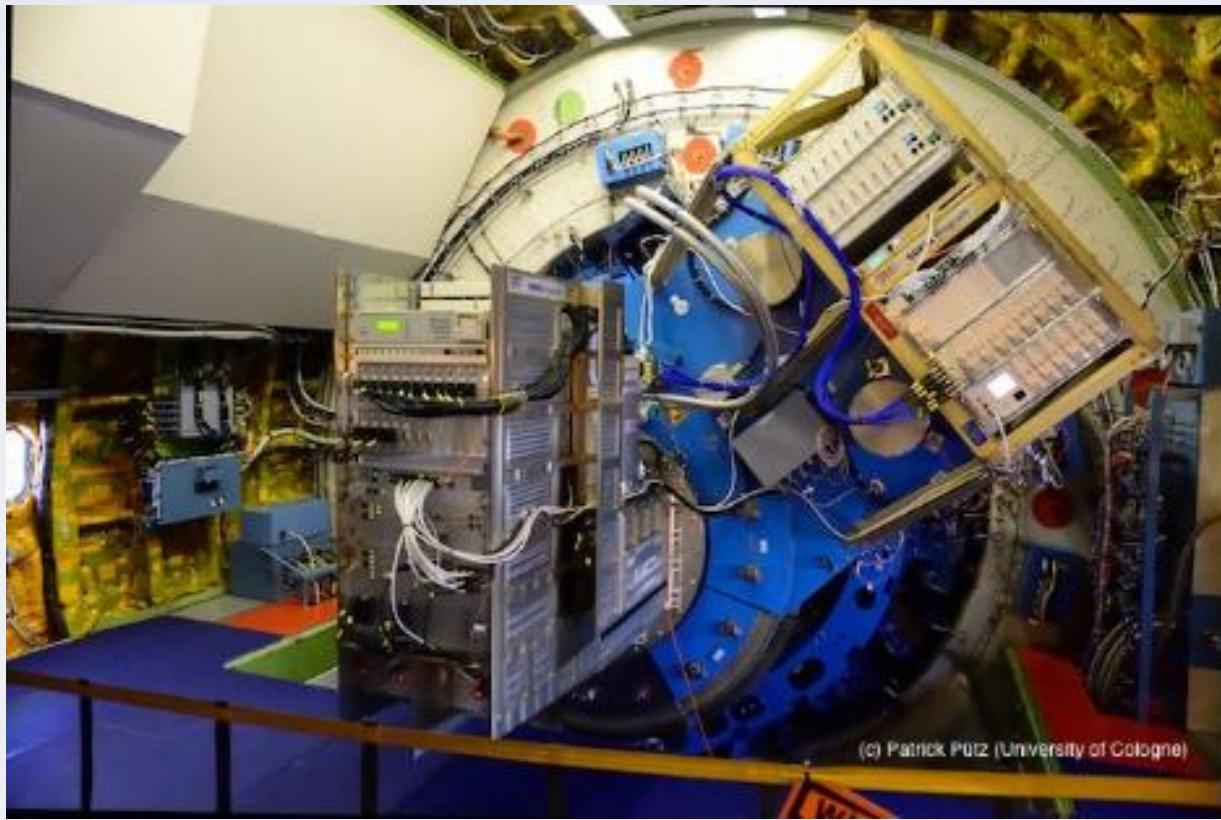
Emission von Sauerstoffatomen



Wellenlänge  
SOFIA/Great Spektrum

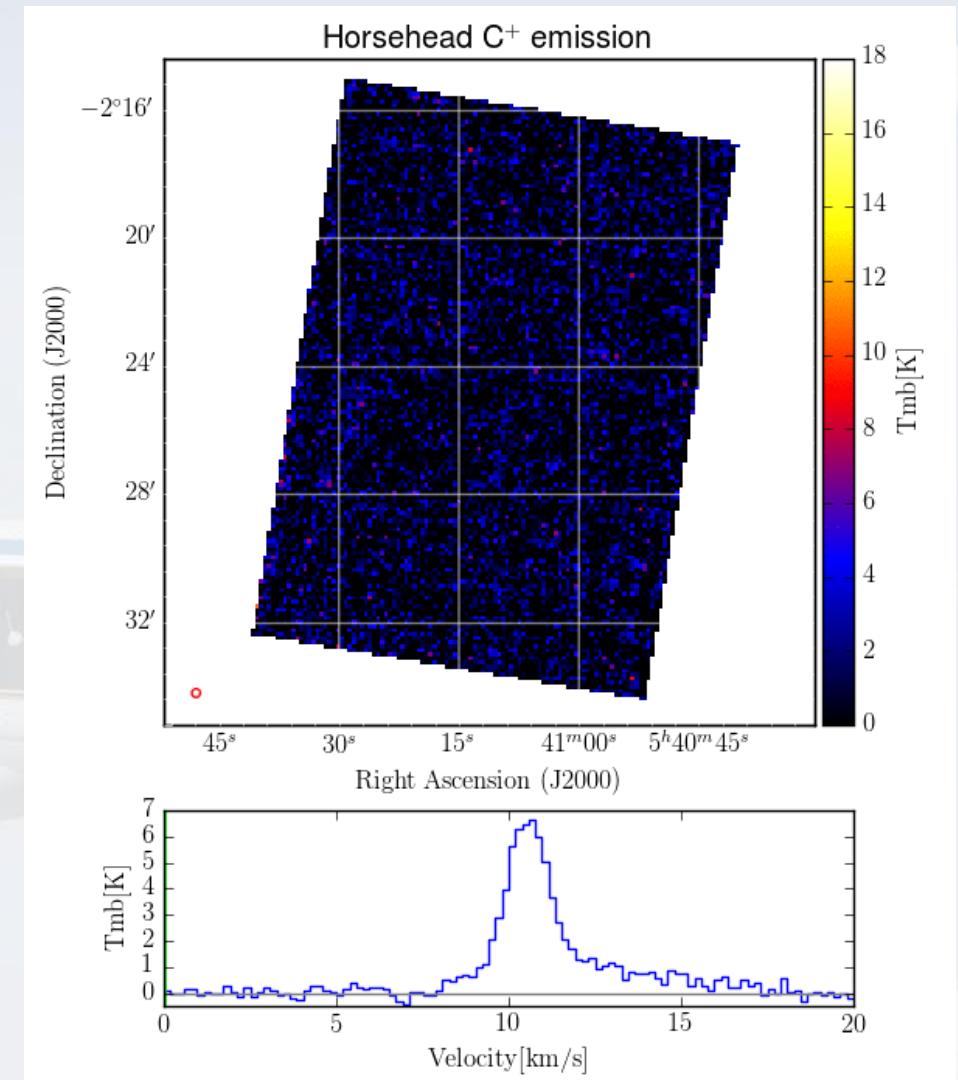
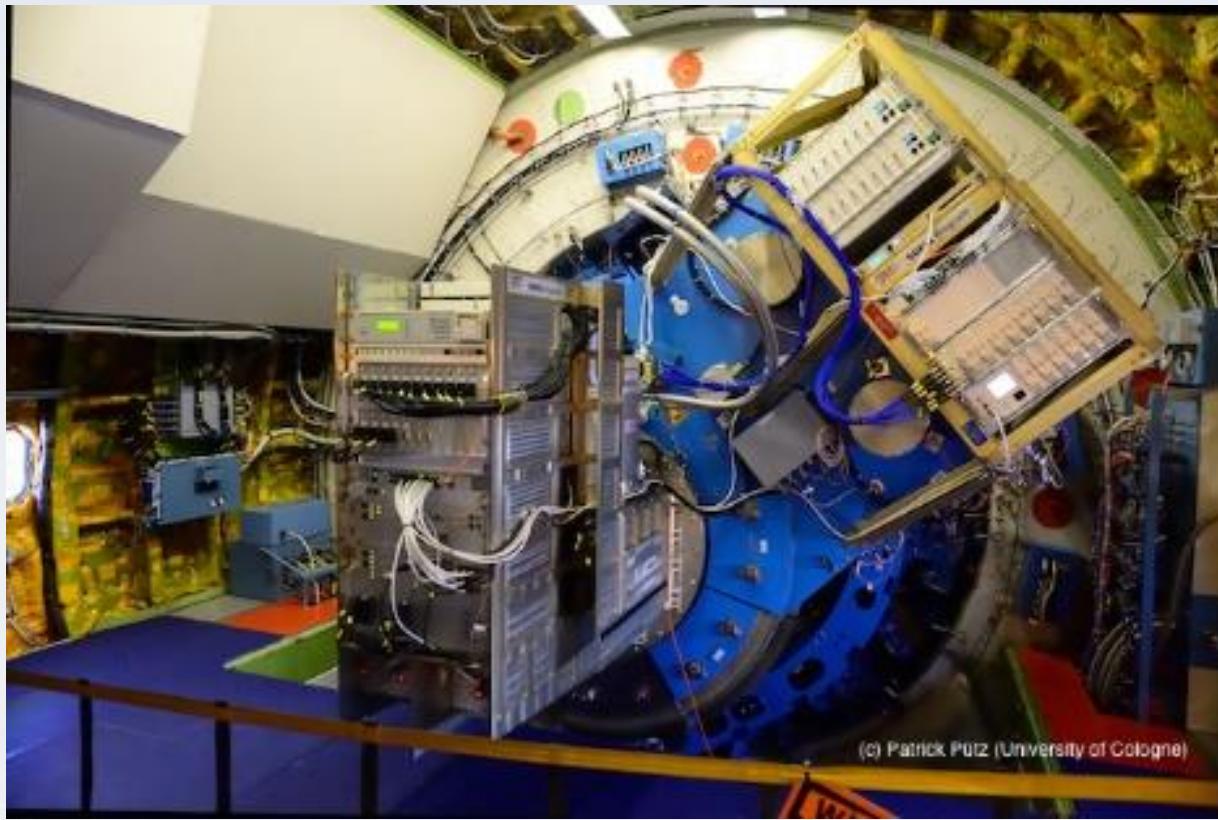
# upGREAT - Bonn/Kölner Empfänger

## German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies

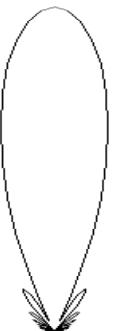
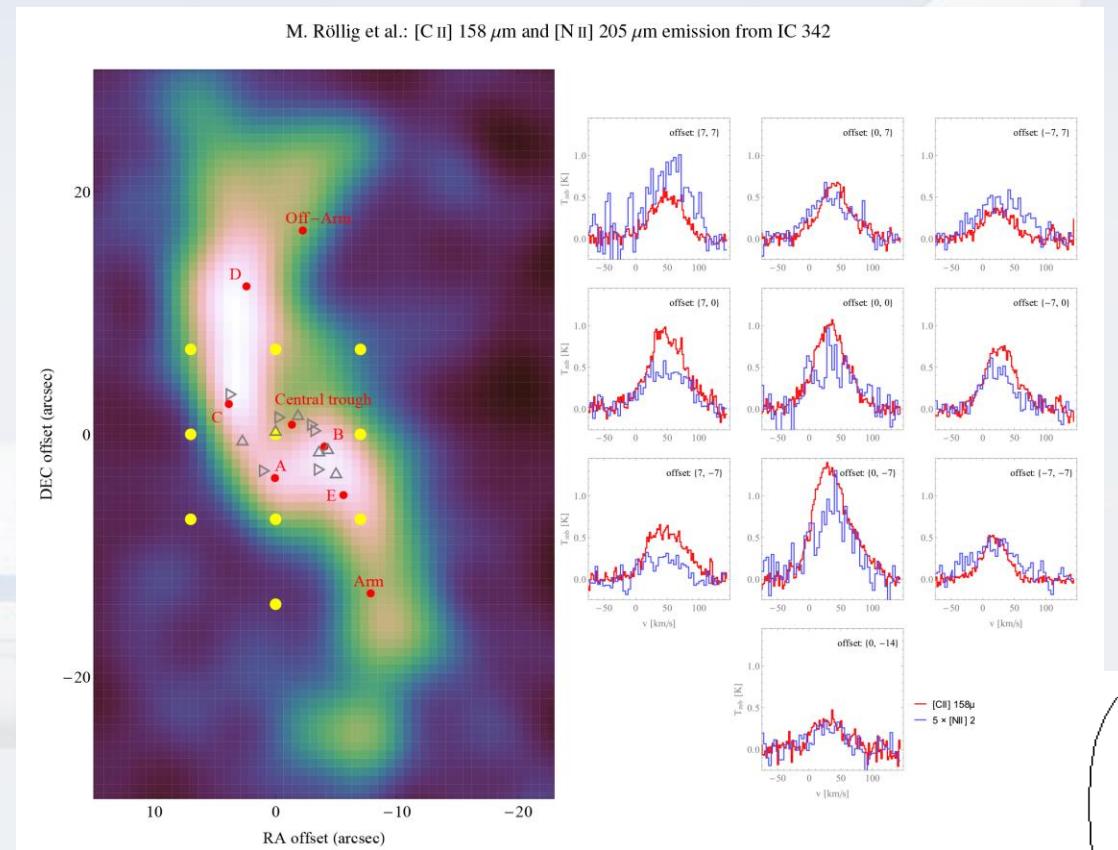
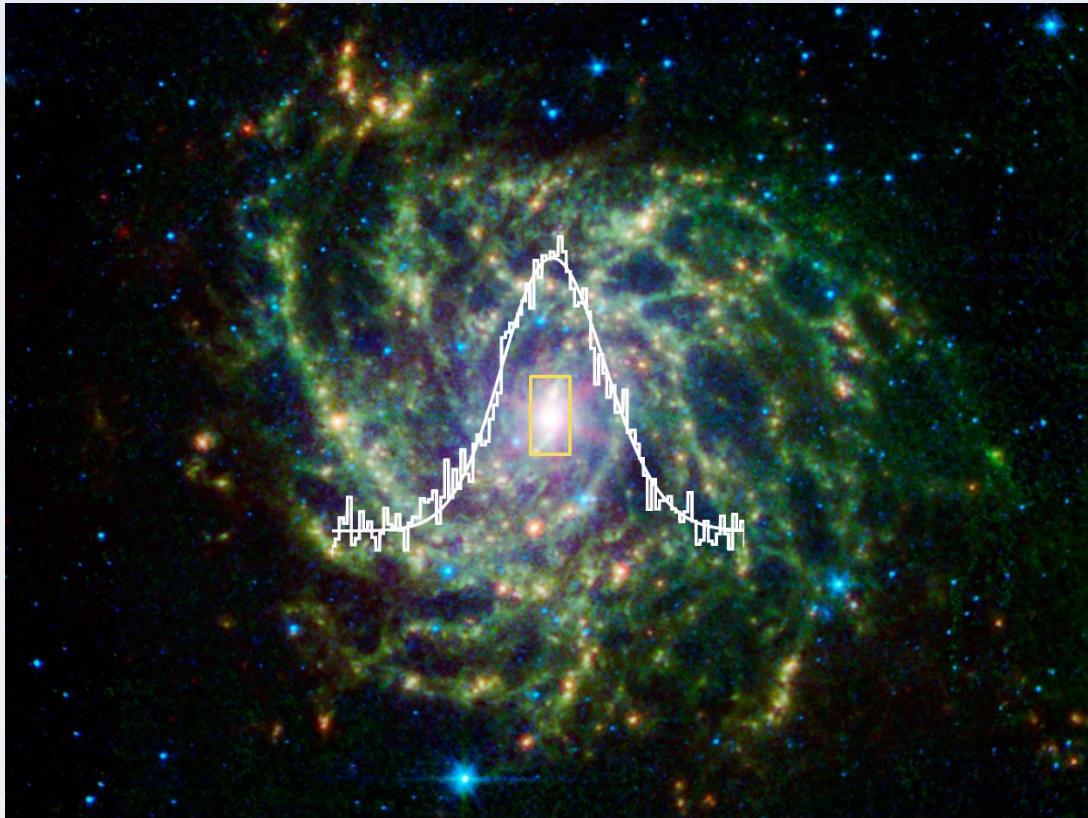


# upGREAT - Bonn/Kölner Empfänger

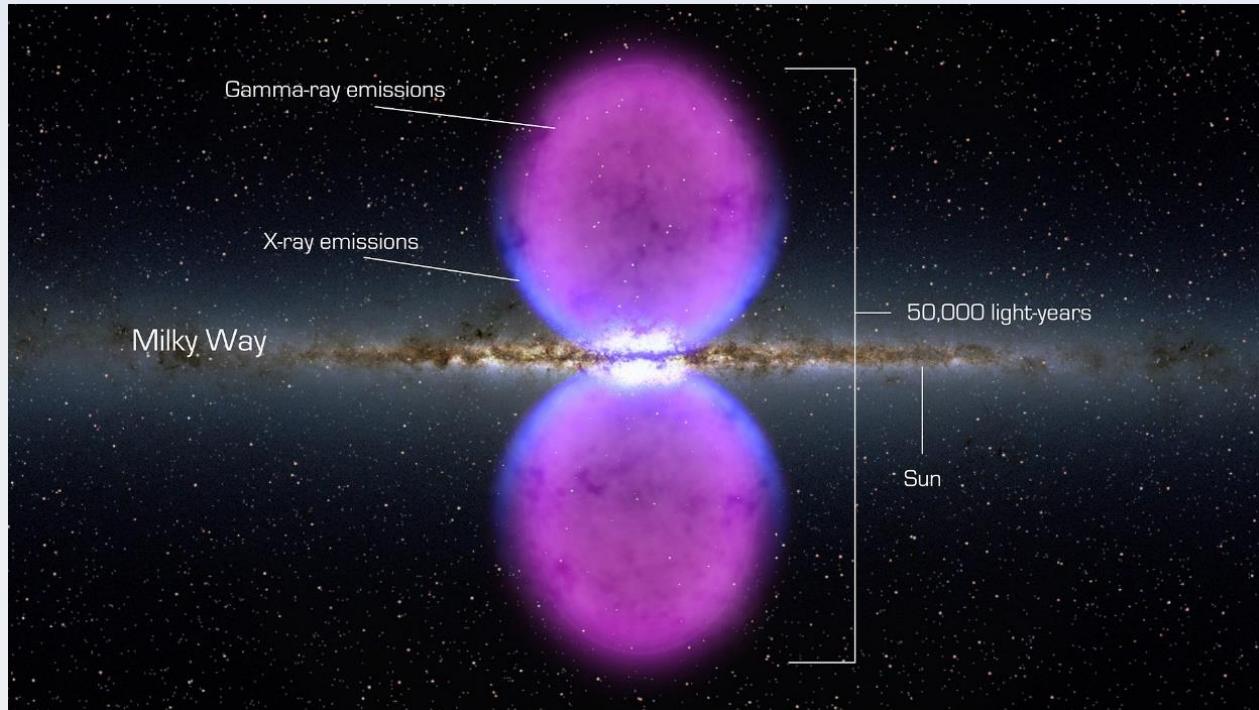
## German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies



# IC 342 – in den Kern einer Galaxie



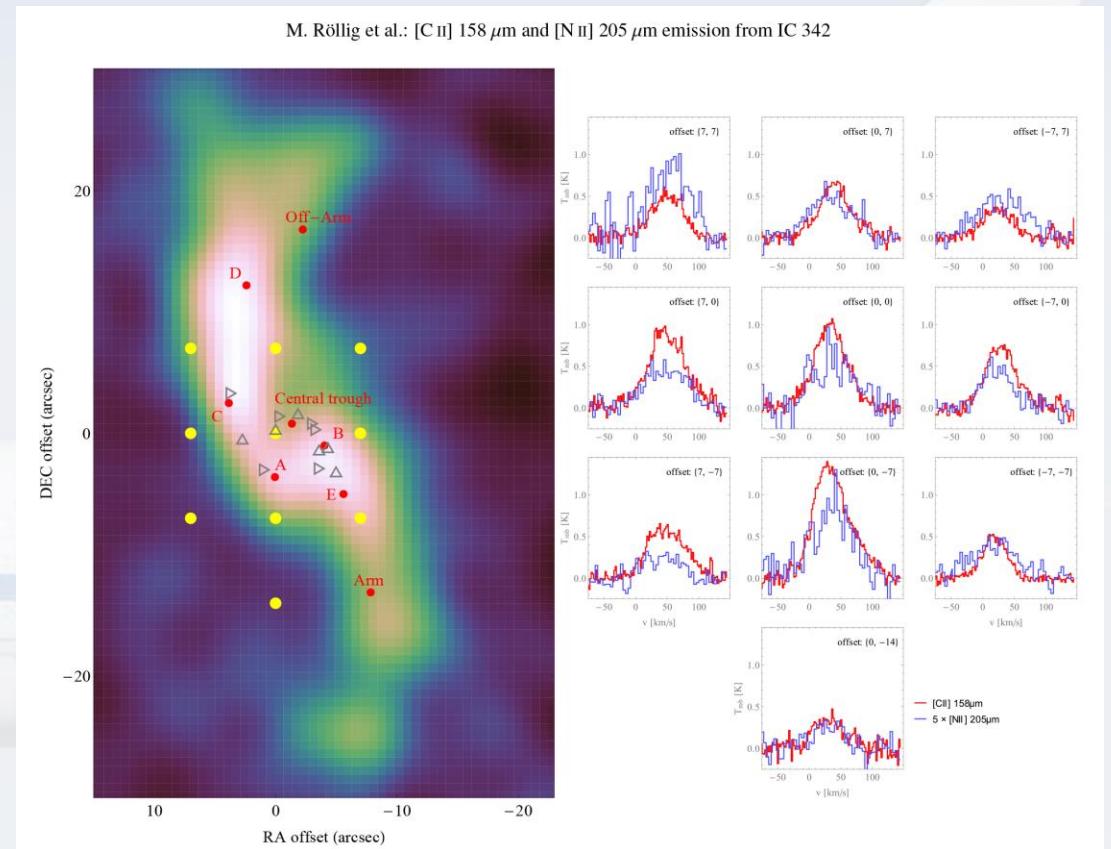
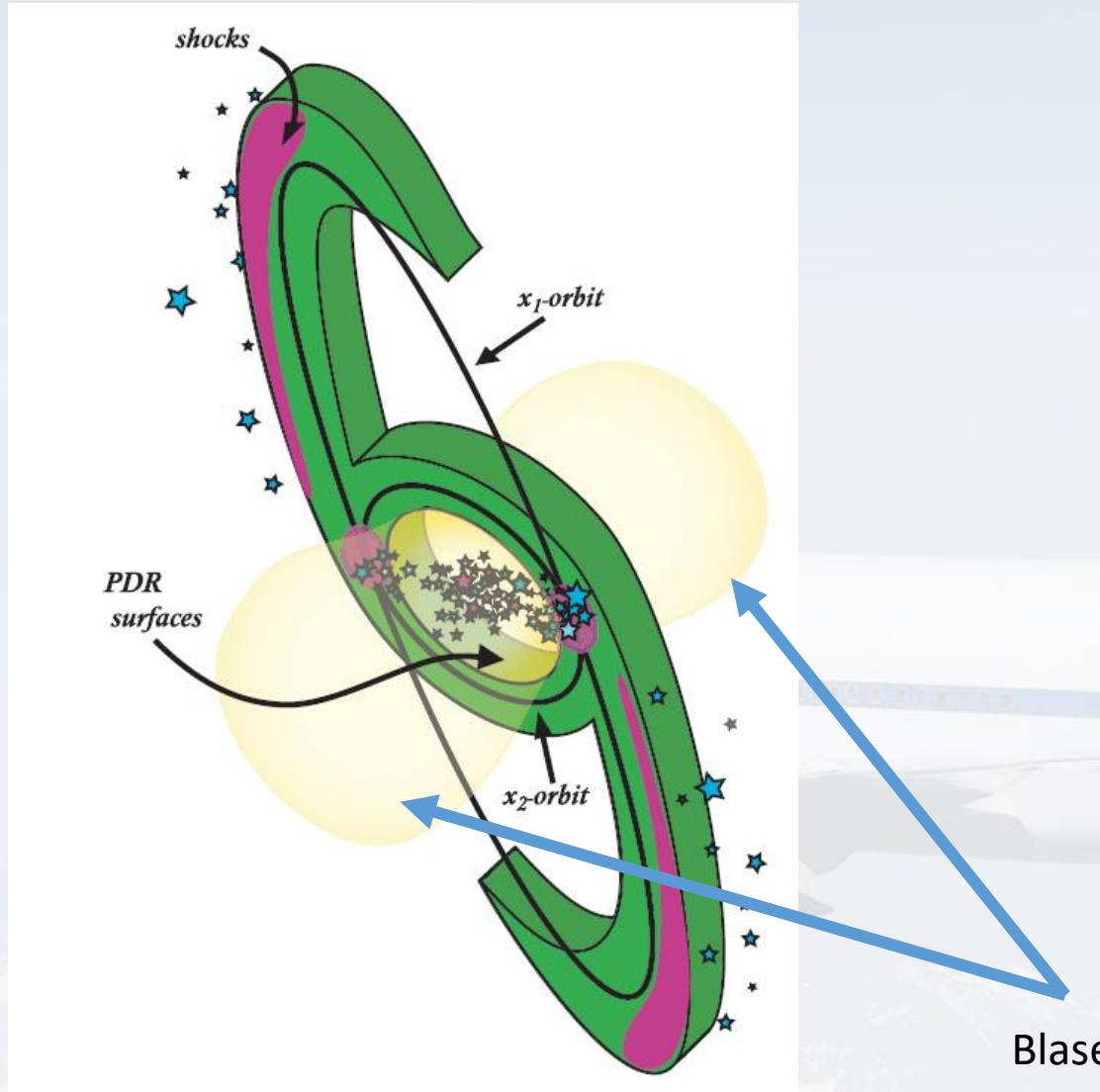
# „Fermi-Blasen“



- Fermi-Blasen

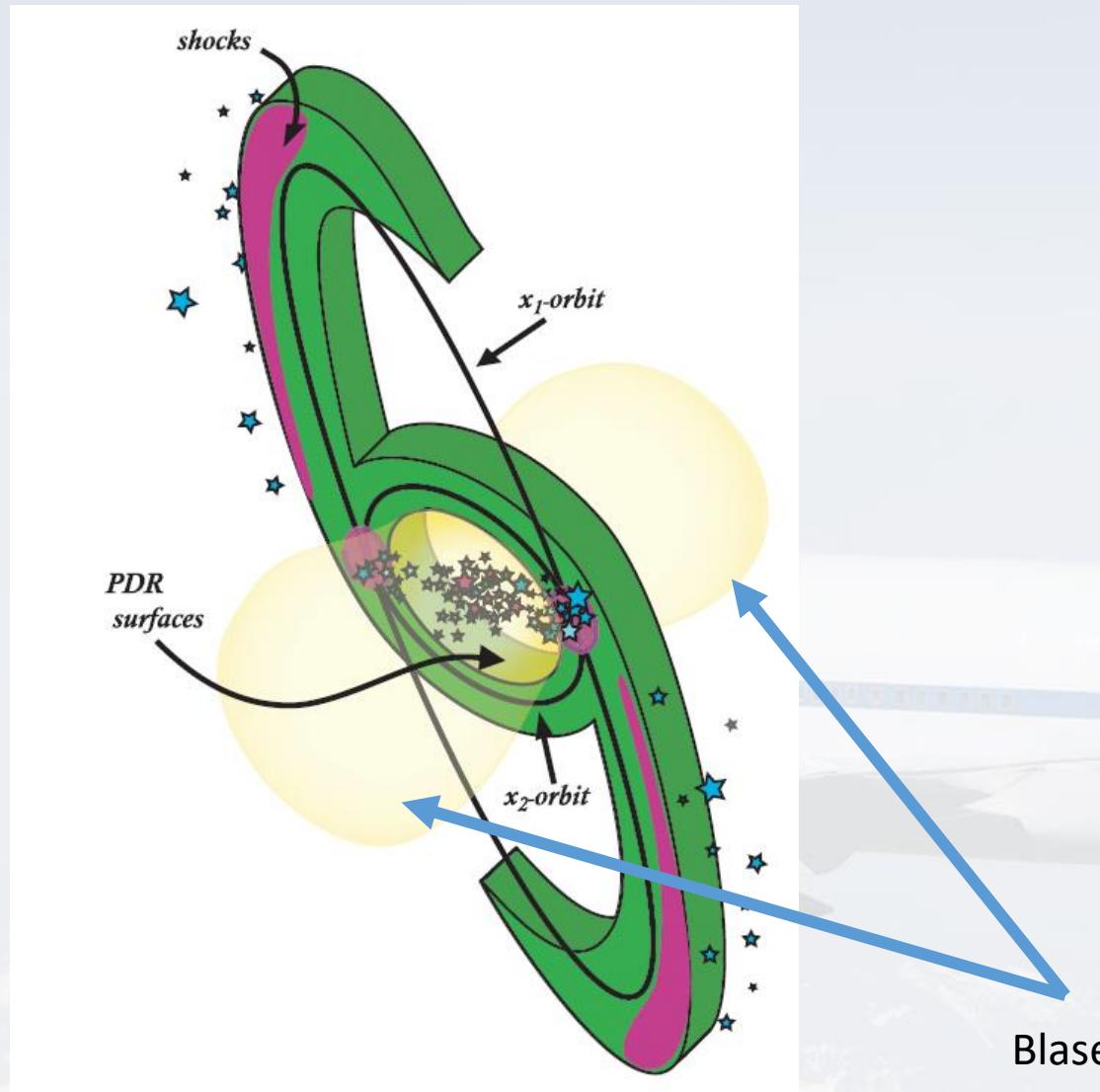
- Blasen heißen, ionisierten Gases
- Expansion senkrecht aus der Ebene der Milchstraße heraus

# IC 342 – in den Kern einer Galaxie

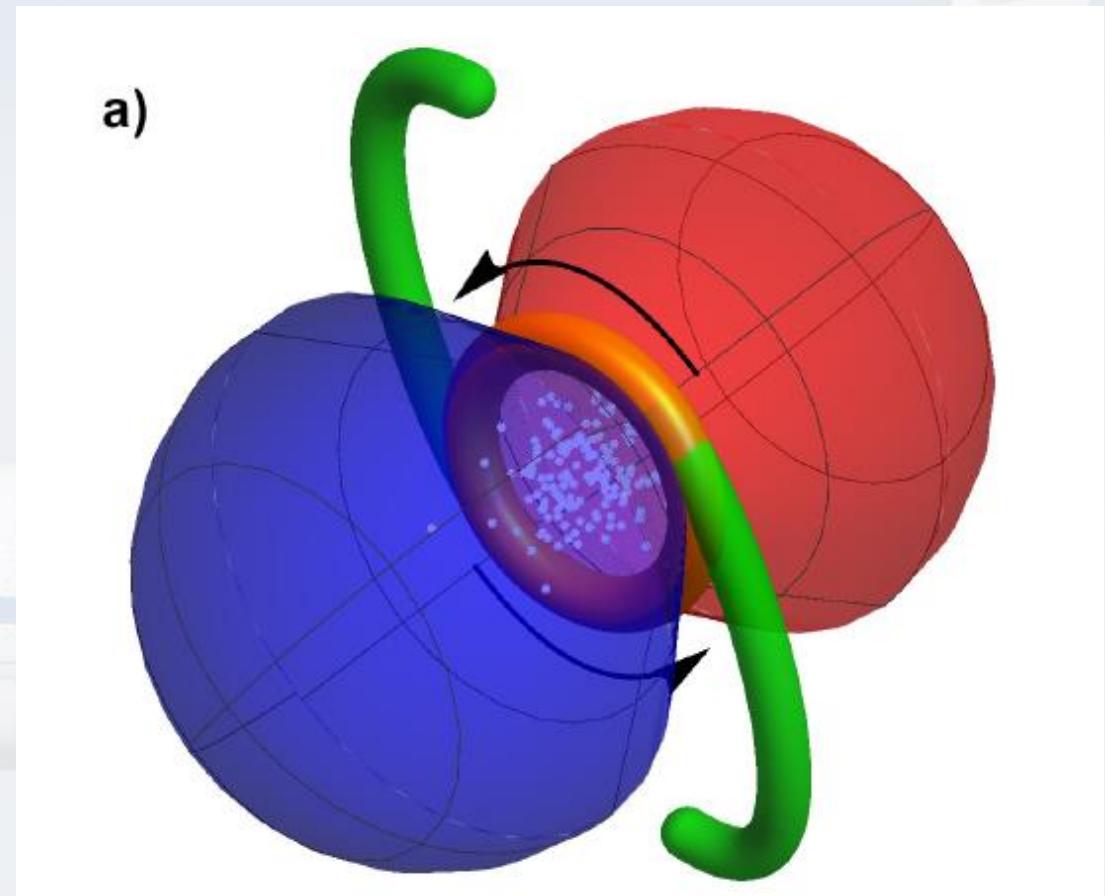


Blasen heißen H<sup>+</sup> Gases

# IC 342 – in den Kern einer Galaxie



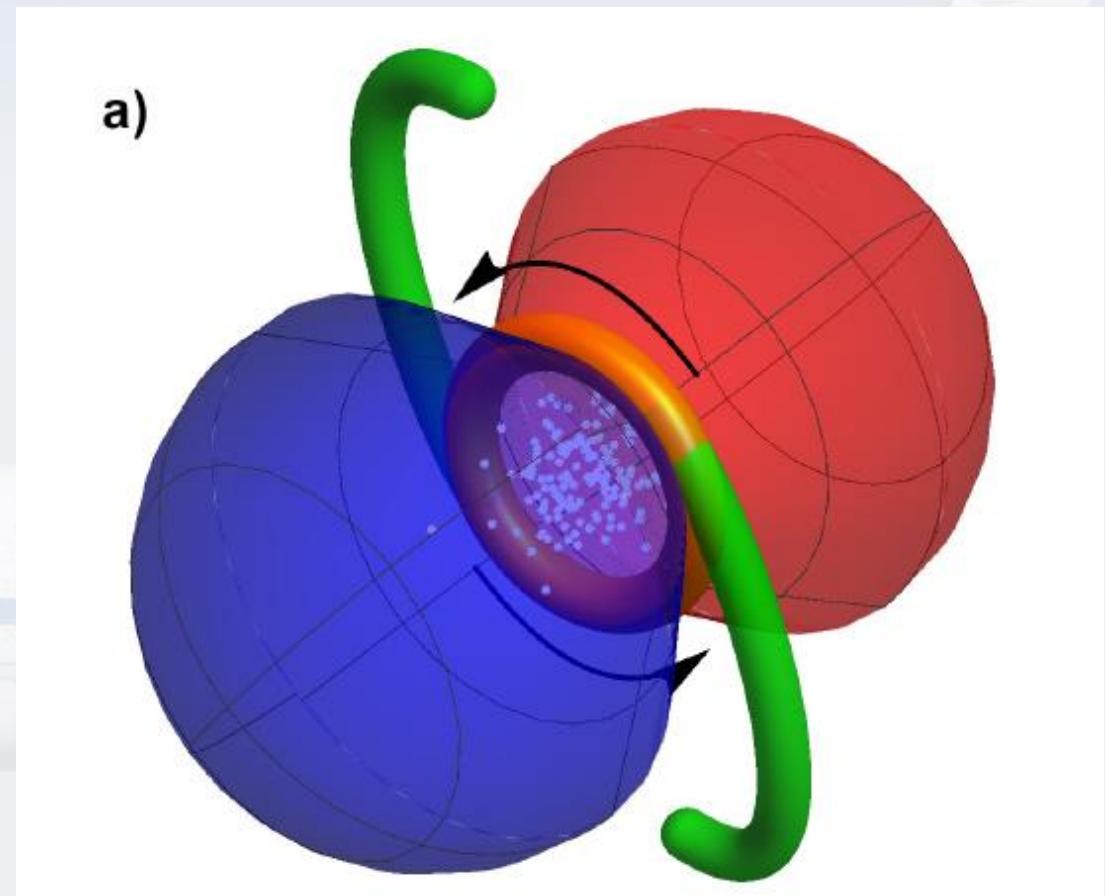
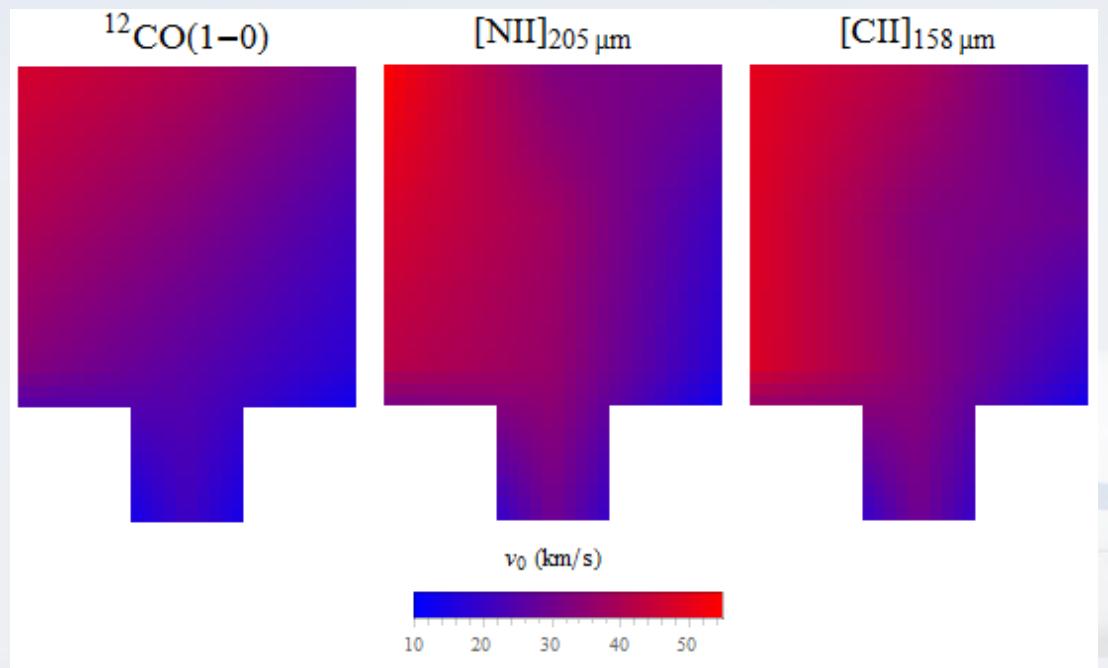
Falls die Vorstellung links stimmt, erwarten wir folgende Doppler-Verschiebung der Frequenzen



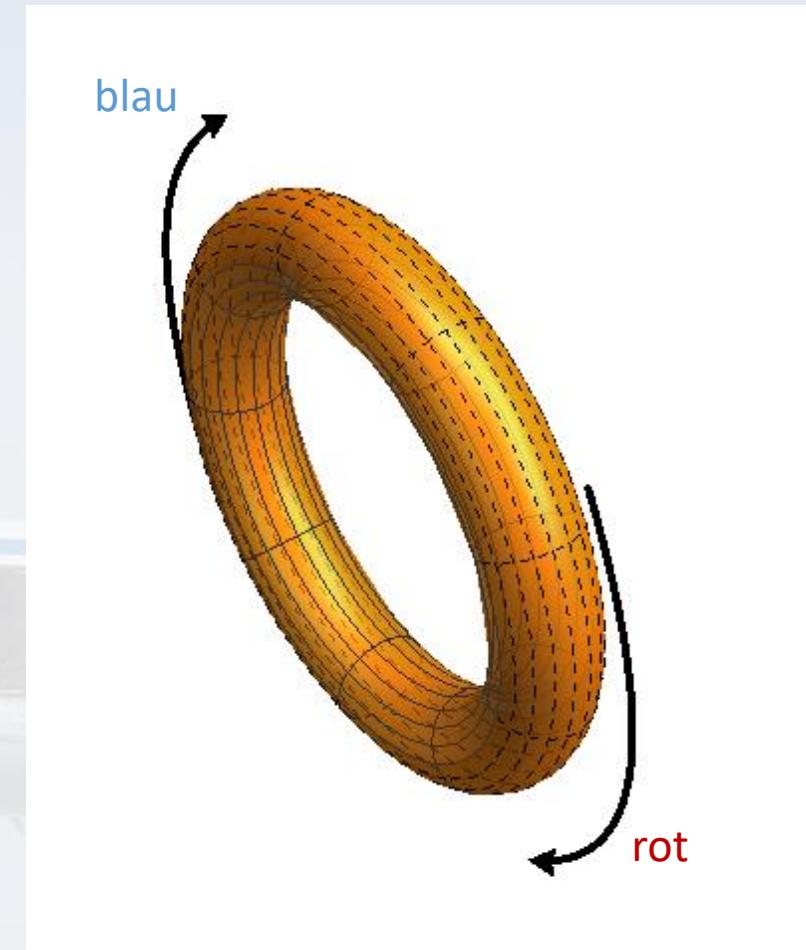
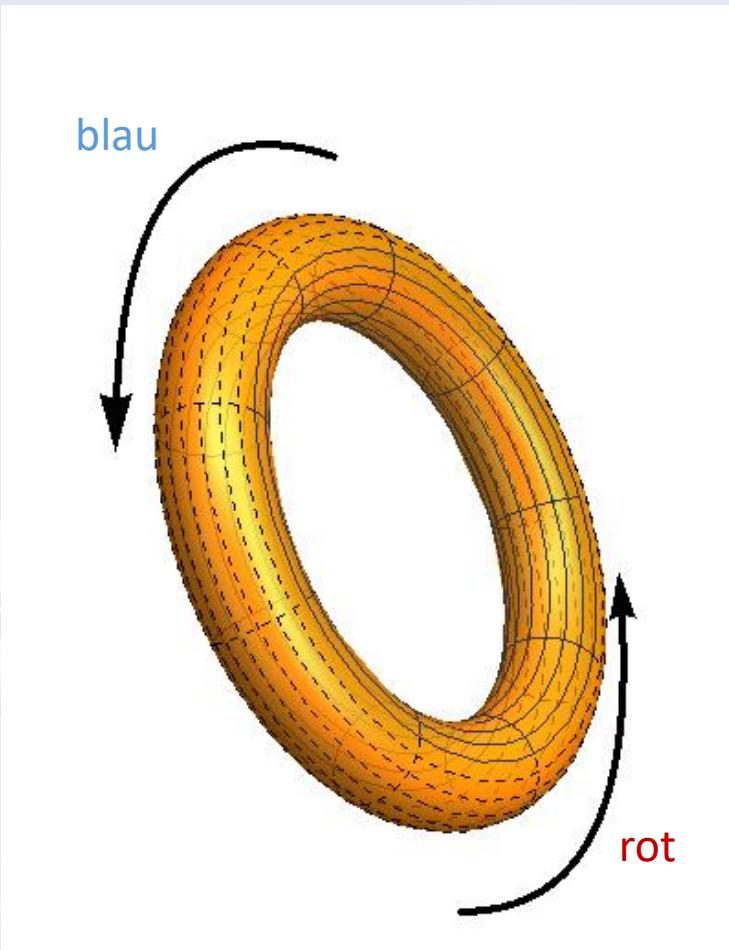
Blasen heißen H<sup>+</sup> Gases

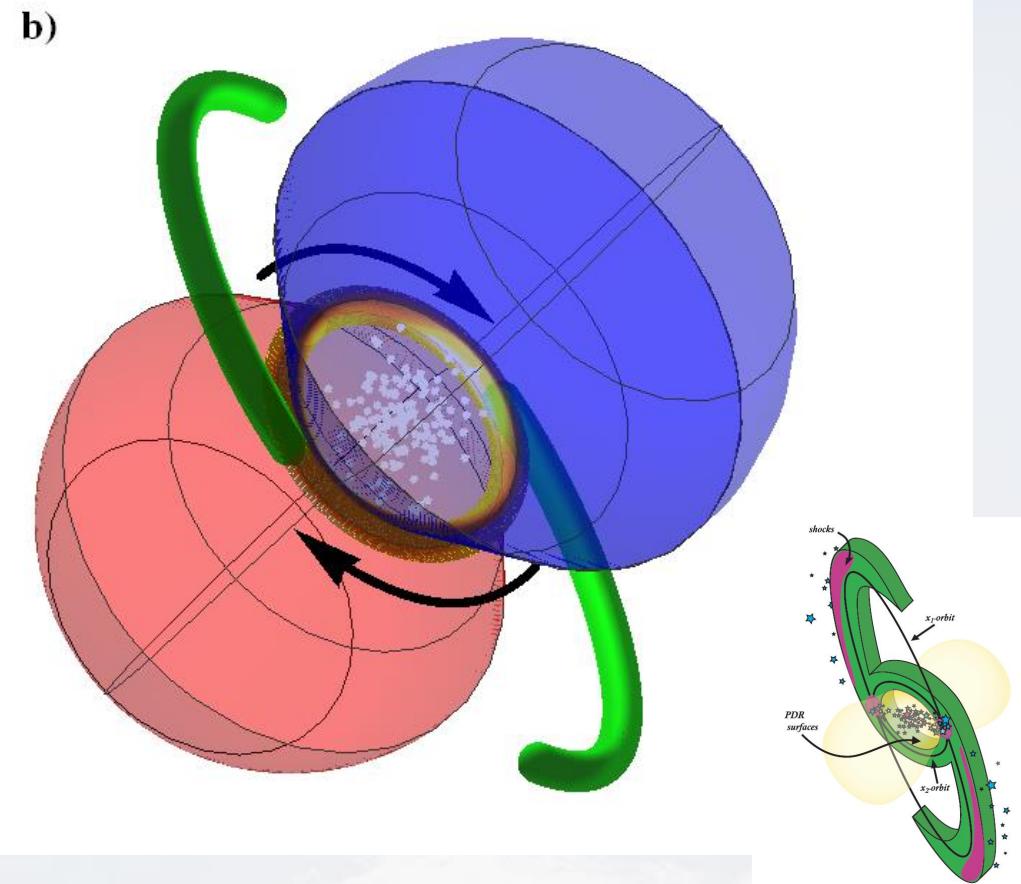
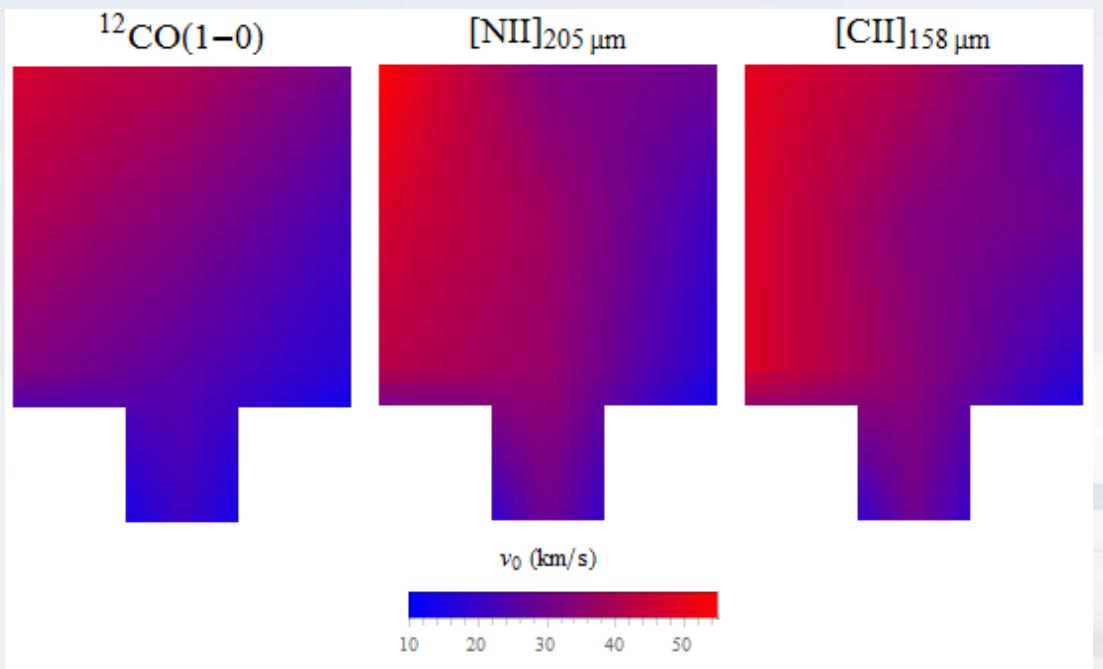
# IC 342 – in den Kern einer Galaxie

Falls die Vorstellung links stimmt, erwarten wir folgende Doppler-Verschiebung der Frequenzen

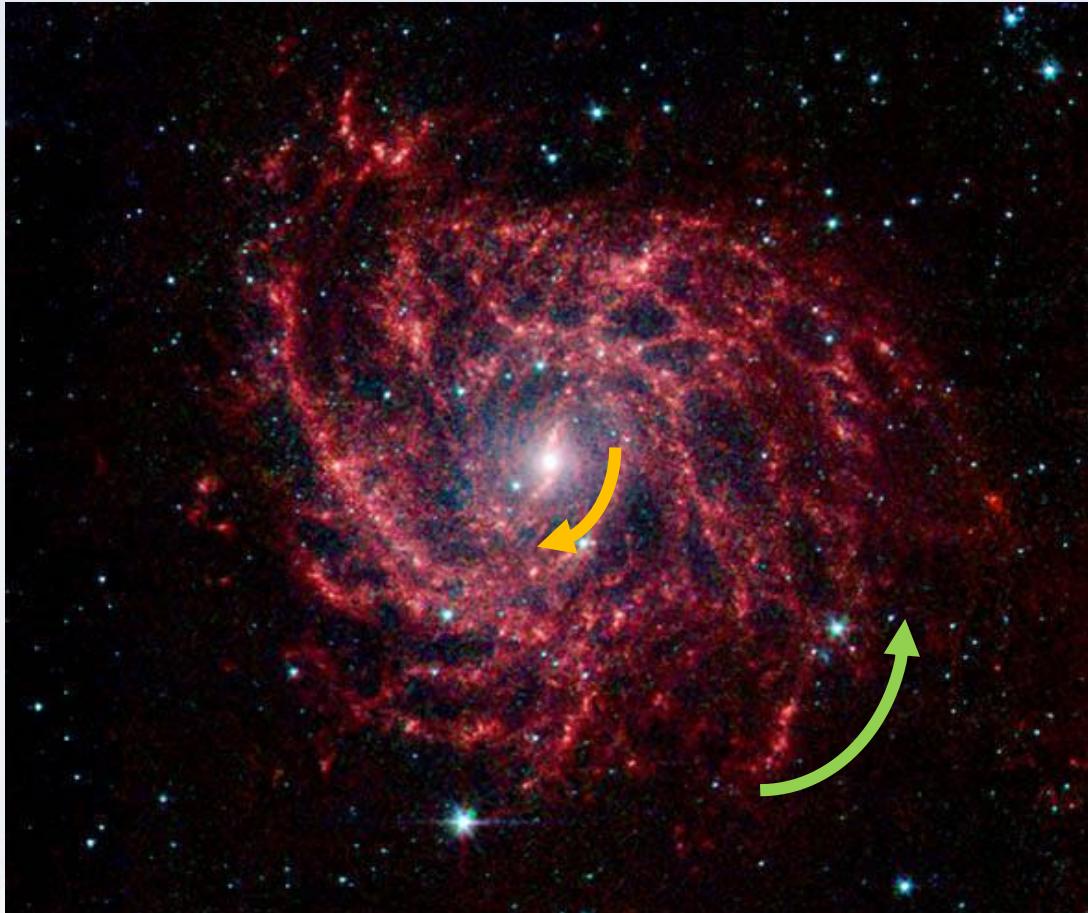


# Mehrdeutigkeit im Dopplereffekt

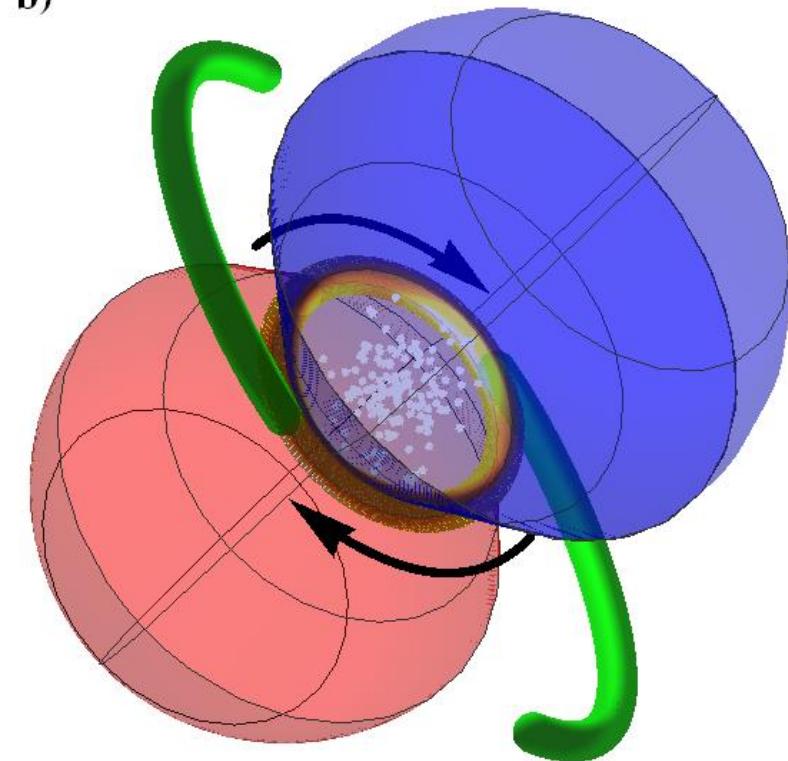




# Ungewöhnliche Rotation



b)



„Leading Arm“ Spirale

# SOFIA

- Infrarotastronomie vom Flugzeug
  - technisch extrem aufwendig
  - organisatorisch sehr komplex
  - teuer (Jahresbudget ca. 80-100 Mio \$)  
1 Minute Beobachtungszeit ~ 2000 \$
- Warum dieser Aufwand?

# Warum dieser Aufwand?

- Flüge in der Stratosphäre erlauben Beobachtungen, die sonst gar nicht möglich wären.
- Ausnahme: Satellitenmissionen
- Bsp: Herschel Weltraumteleskop
  - Missionsdauer ~ 4 Jahre
  - Gesamtkosten: 1100 Mio €
  - Nachteil: Technik bei Start schon veraltet
- Wissenschaftliche Instrumente auf SOFIA werden ständig erneuert und verbessert.
- Über 20 Jahre Laufzeit entwickelt sich auch der Stand der Forschung



Quelle: ESA

# Warum dieser Aufwand?

- Faszinierende neue Erkenntnisse über
  - unser Sonnensystem
  - den Aufbau unsere Milchstraße und anderer Galaxien
  - die lokalen physikalischen und chemischen Vorgänge im interstellaren Medium
  - die sonst verborgenen, innersten Details bei der Entstehung von Sternen und Planeten
- Wir erweitern unser Verständnis vom Universum
- Wir lernen zu verstehen woher „wir“ kommen und wieso unser Sonnensystem die Eigenschaften hat, die zu Leben geführt haben.

The background of the slide features a vibrant, abstract design composed of swirling, organic patterns in shades of orange, yellow, and blue. These colors transition smoothly from one another, creating a sense of depth and movement across the entire frame.

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!