



M17 - Omega Nebel

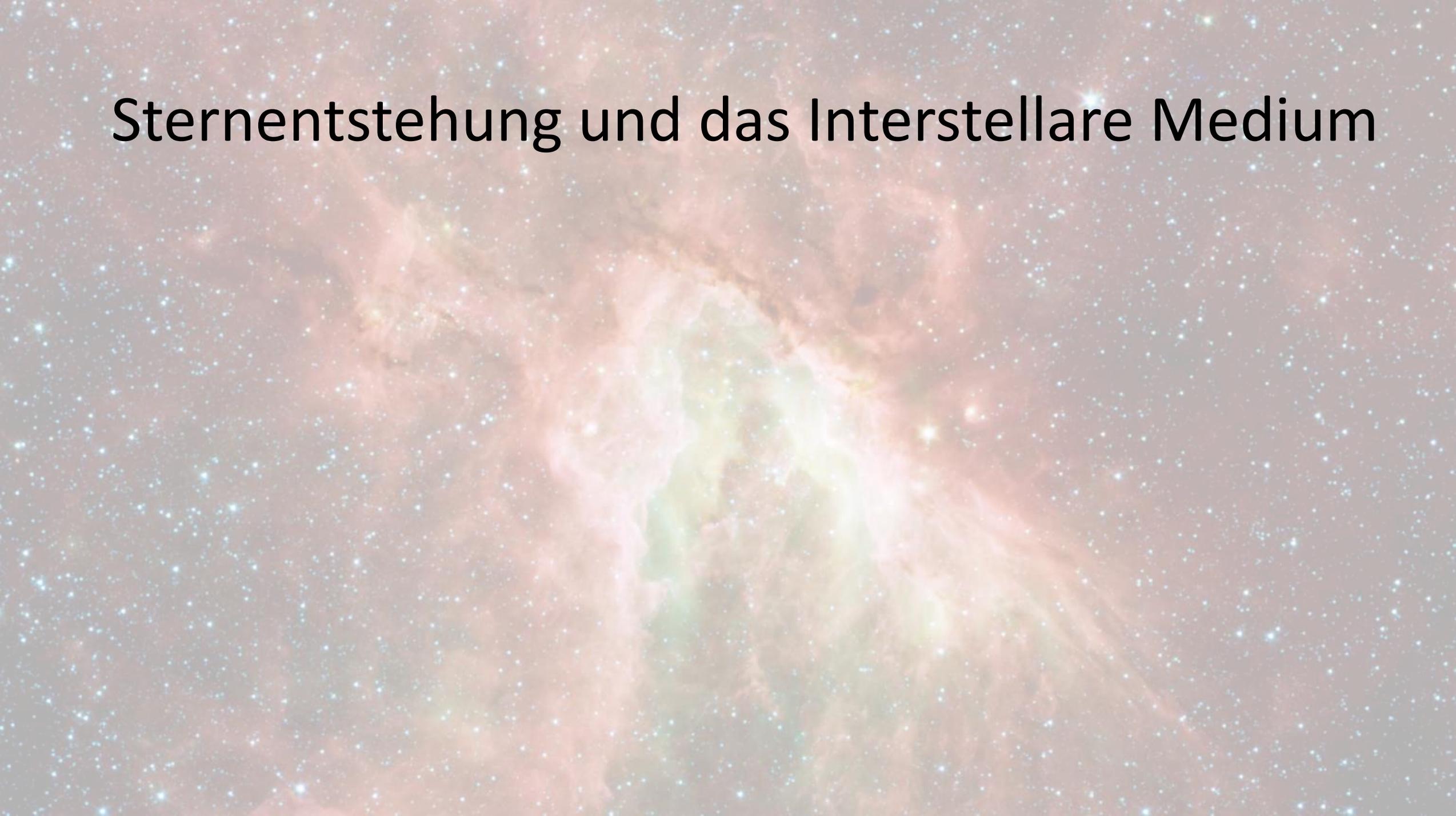


Den Gasen auf der Spur  
–  
Molekülspektroskopie mit dem  
SOFIA Observatorium

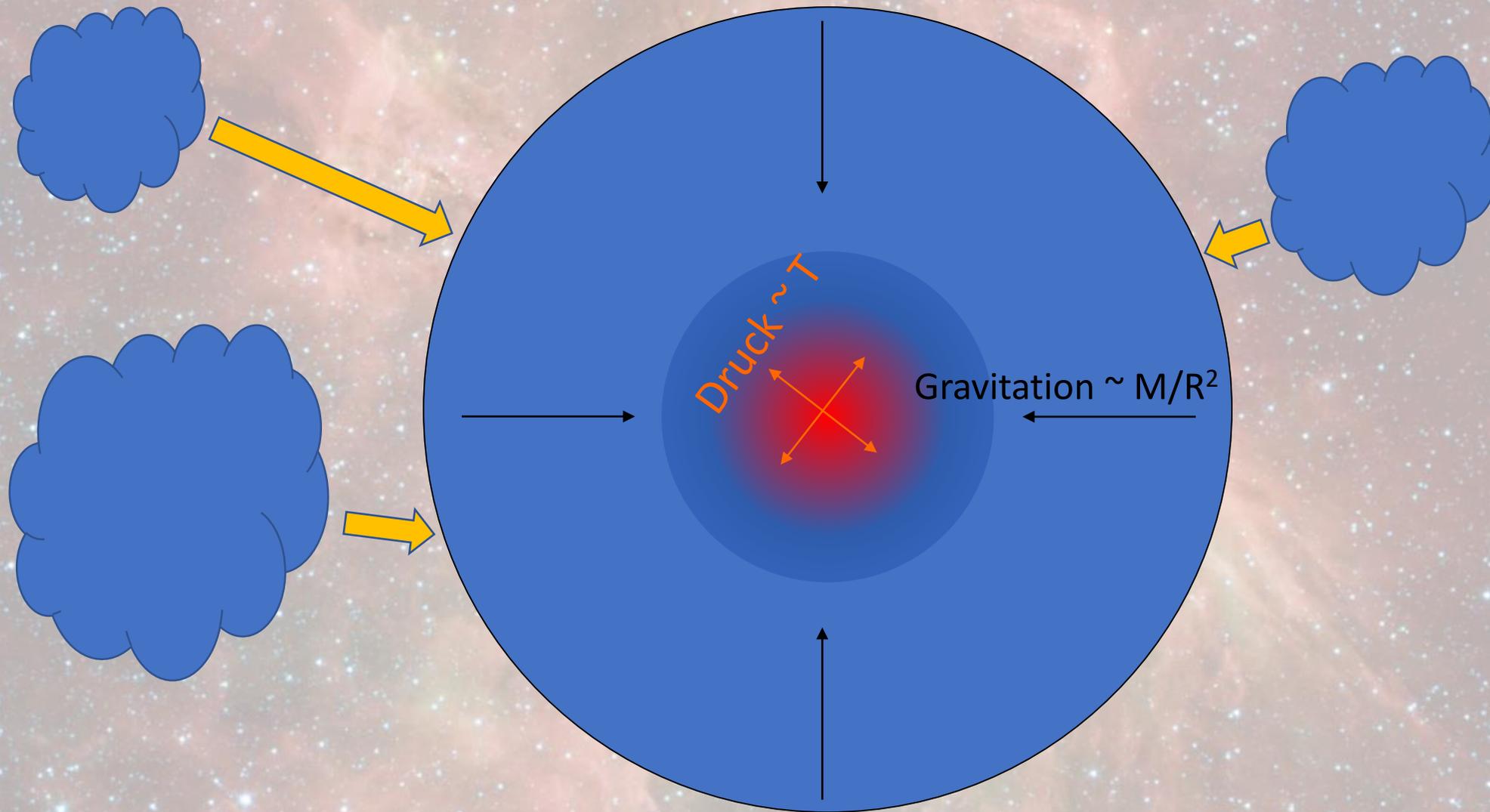
Dr. Markus Röllig  
Universität zu Köln



# Sternentstehung und das Interstellare Medium



# Eine Molekülwolke kollabiert



# Eine Molekülwolke kollabiert

Gravitation=Druck

stabil

Gravitation>Druck

kollabiert

Gravitation<Druck

zerstreut

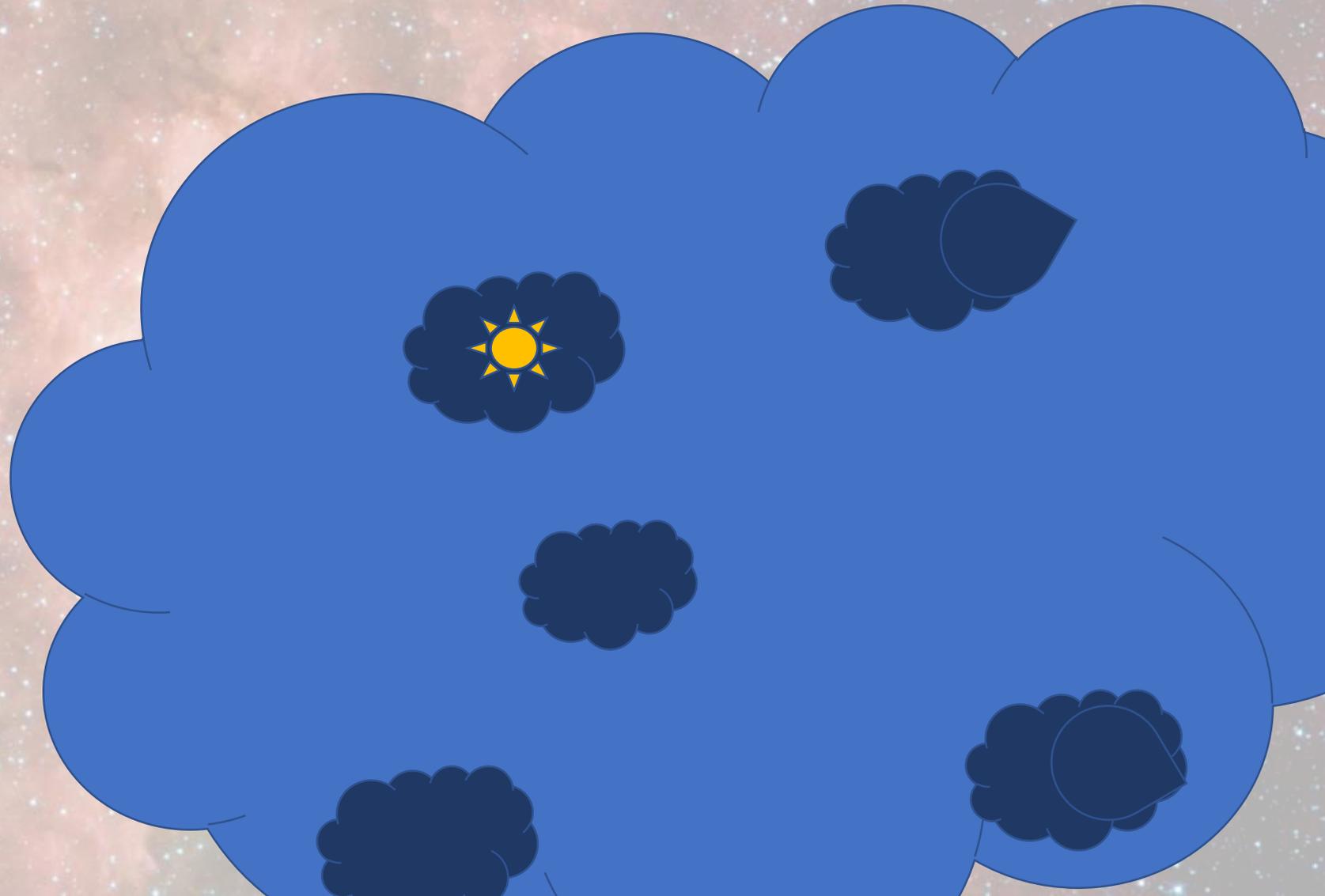


A large, irregular blue shape resembling a cloud or a nebula is centered on a background of a starry sky. The blue shape is composed of several overlapping rounded forms. The background is a light beige or tan color with numerous small, white, star-like specks scattered throughout.

Gravitativer Kollaps  
verwandelt Gas sehr  
effizient in Sterne

**VIEL ZU EFFIZIENT**

# Sternentstehung – animiert und verhindert



# Hubbles Blick auf M17

Heißes Wasserstoffgas (blau) expandiert

UV Strahlung





SOFIA   
STRATOSPHERIC OBSERVATORY  
FOR INFRARED ASTRONOMY

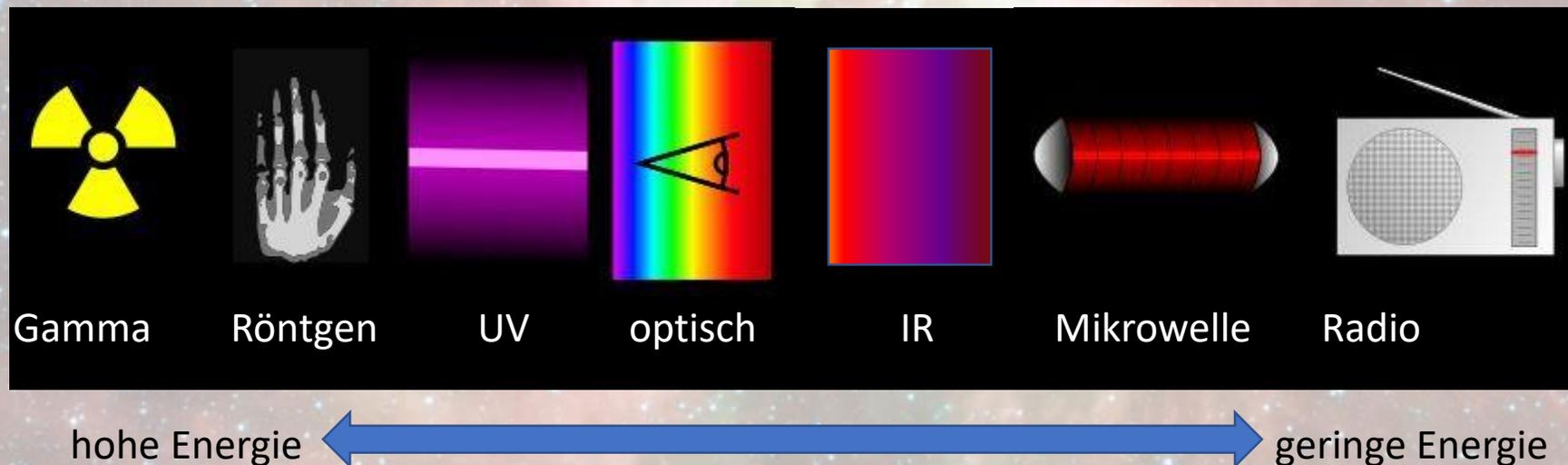
NASA 

  
DLR

N747NA

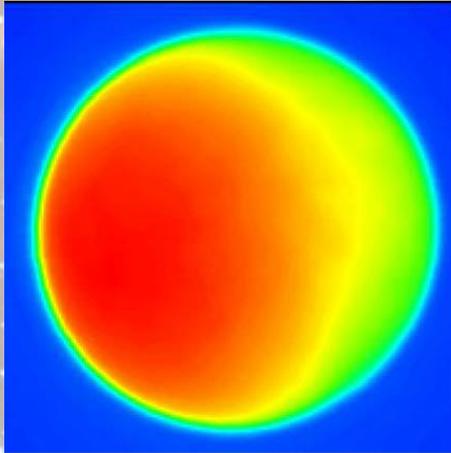
# Molekülspektroskopie – was ist das

- Klassische astronomische Beobachtungen detektieren „Licht“ astronomischer Objekte.
- Licht ist eine elektro-magnetische Welle
- Eine Eigenschaft von Wellen ist deren Frequenz bzw. Wellenlänge.

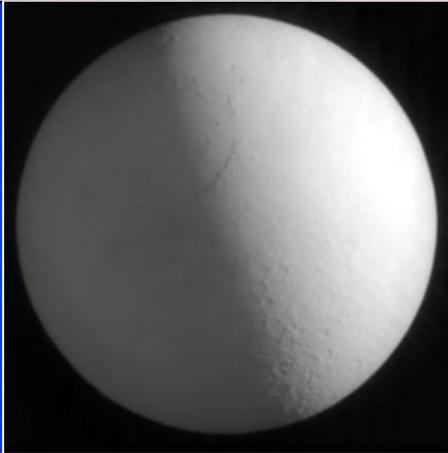


# Multi-Wellenlängenastronomie

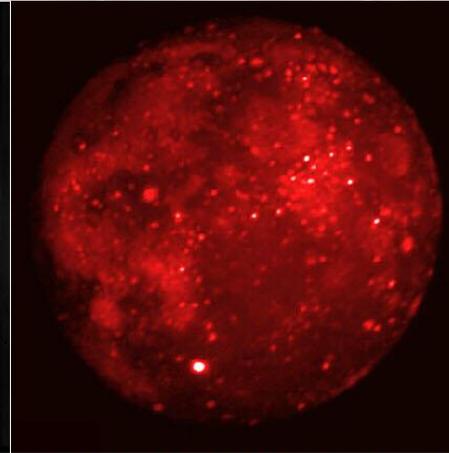
Radio



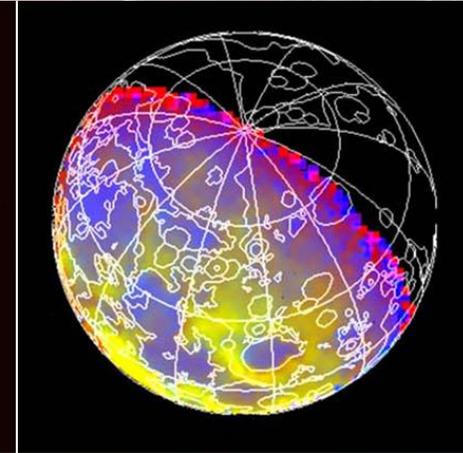
Submillimeter



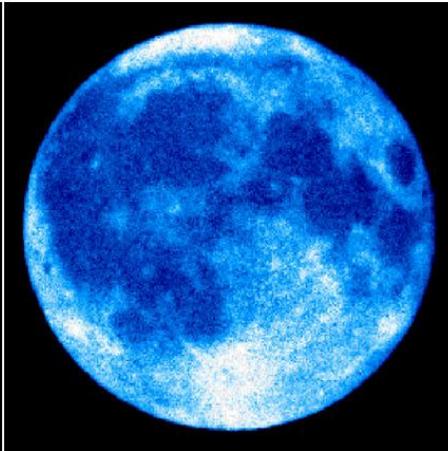
Mid-infrarot



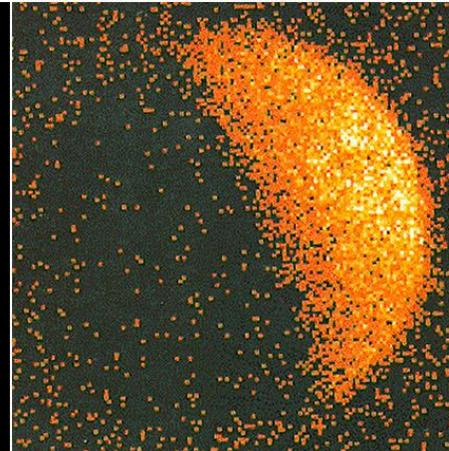
Nah-infrarot



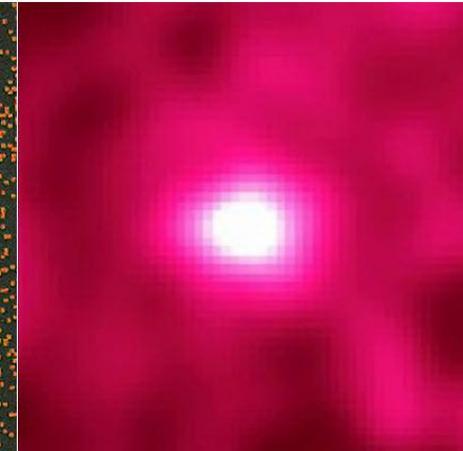
Optisch



ultraviolett

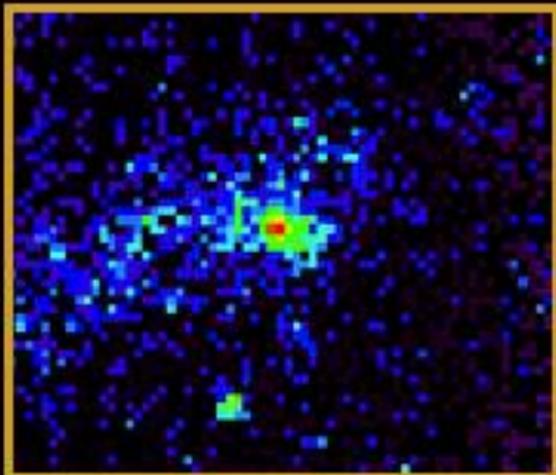


Röntgen



Gammastrahlung

# Multi-Wellenlängenastronomie



X-Ray: ROSAT



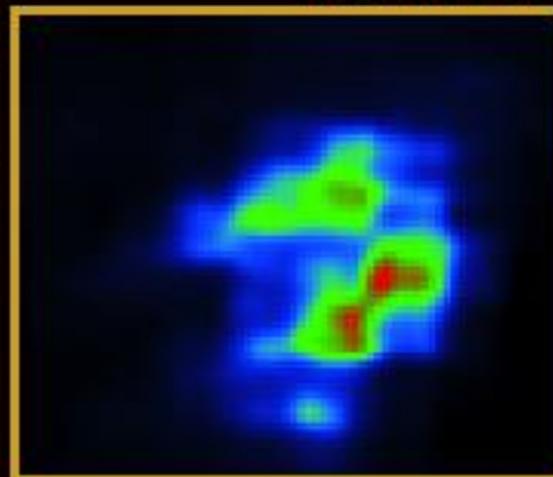
Visible: DSS



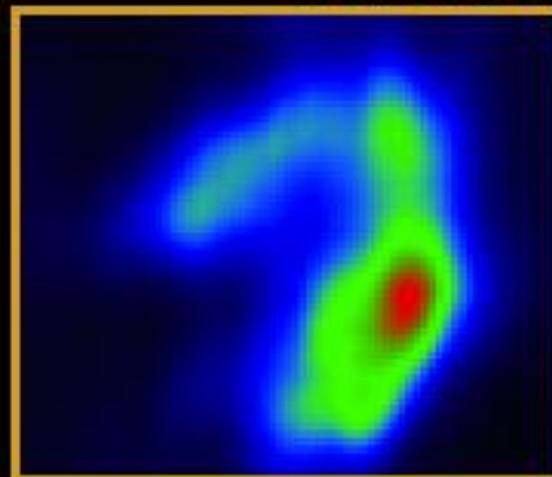
Visible: Color © AAO



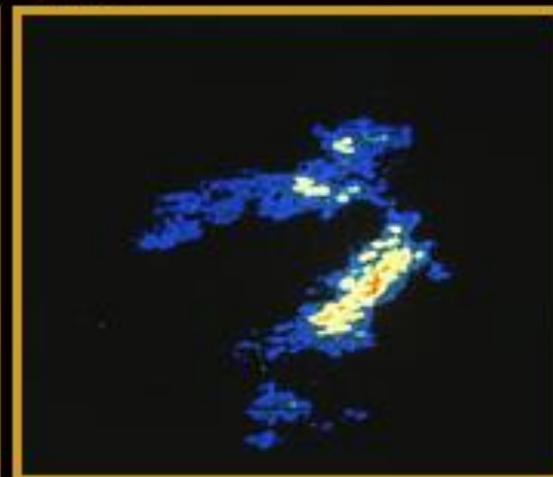
Near-Infrared: 2MASS



Mid-Infrared: IRAS



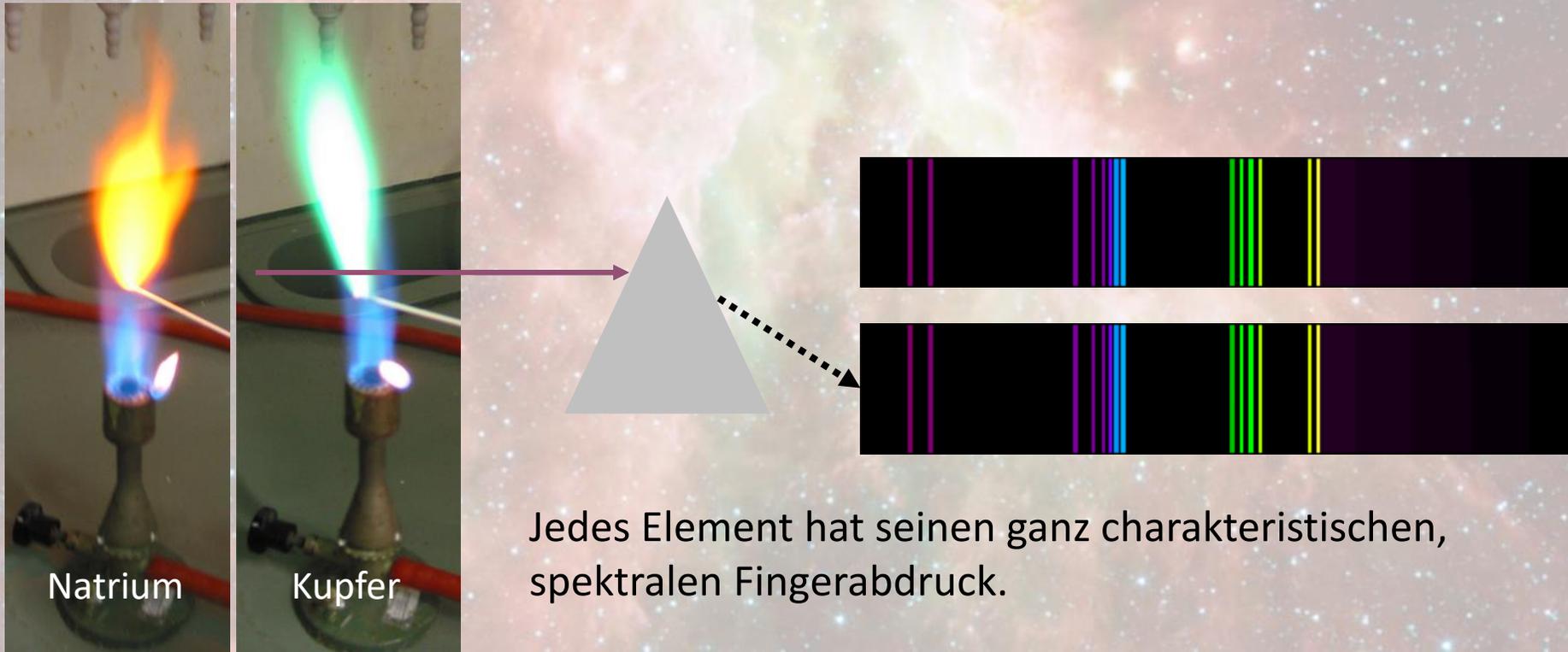
Far-Infrared: IRAS



Radio: VLA

# Absorption und Emission

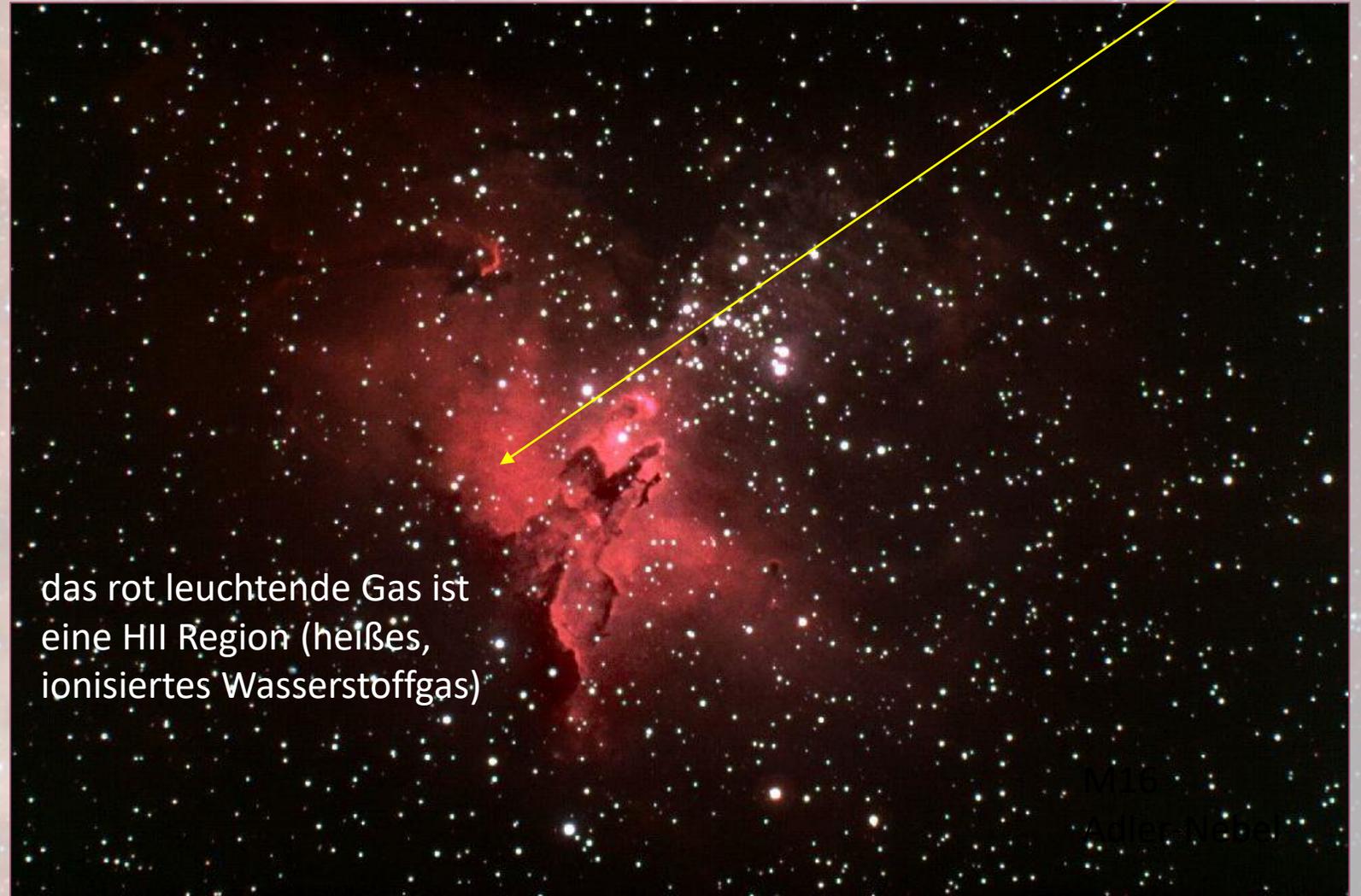
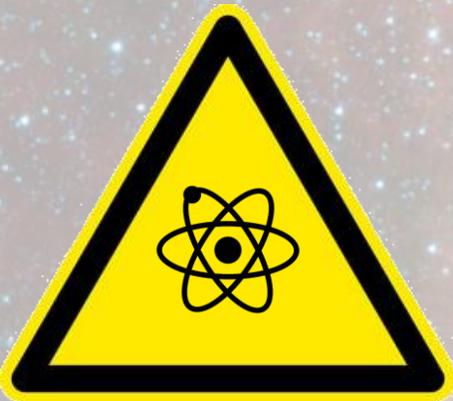
Führt man Atomen Energie zu, strahlen sie diese bei charakteristischen Wellenlängen wieder ab.



Jedes Element hat seinen ganz charakteristischen, spektralen Fingerabdruck.

# Emissionsspektren

Wasserstoff



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

Quantenmechanik



# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können nur bestimmte (innere) Energiezustände annehmen

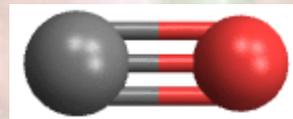
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können nur bestimmte (innere) Energiezustände annehmen

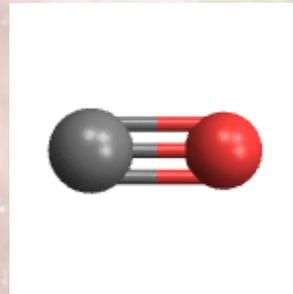
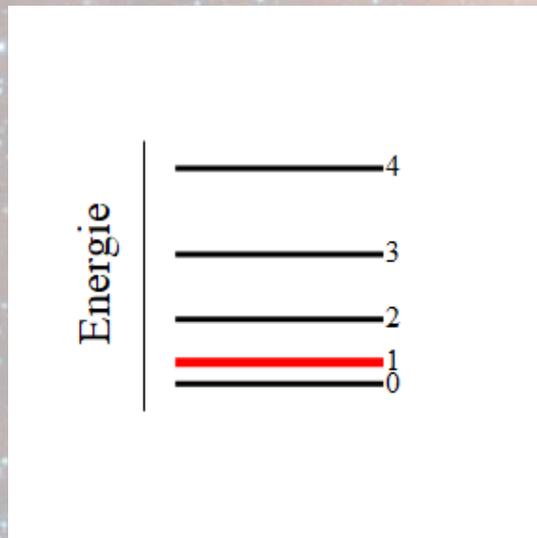
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können nur bestimmte (innere) Energiezustände annehmen

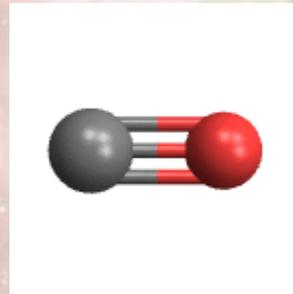
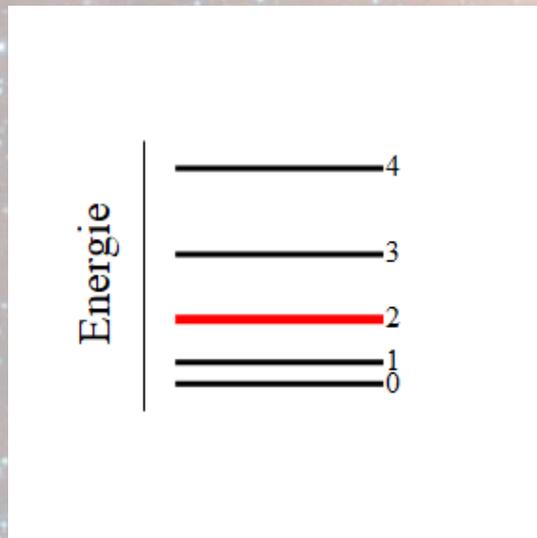
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können nur bestimmte (innere) Energiezustände annehmen

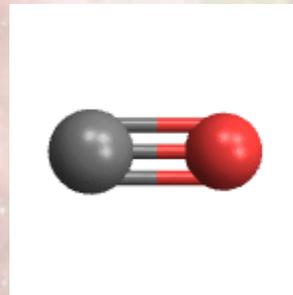
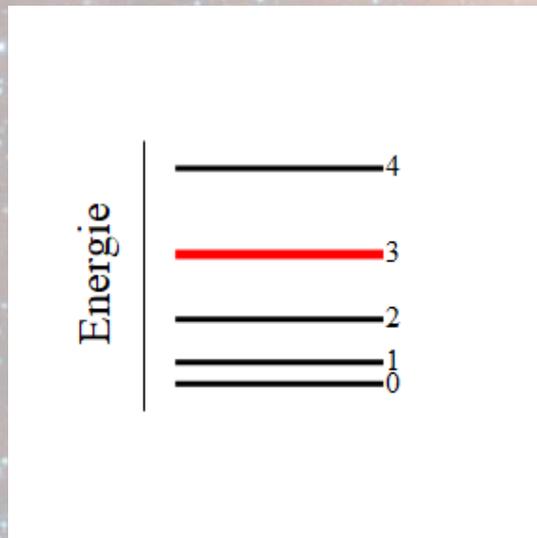
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können nur bestimmte (innere) Energiezustände annehmen

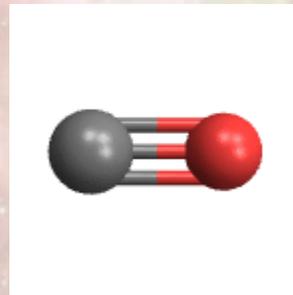
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



- Um zu einem **höheren** Energiezustand zu wechseln muss ein Molekül exakt die Differenz-Energie aufnehmen.



# Quantenmechanik



- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Molekül sie nicht aufnehmen.

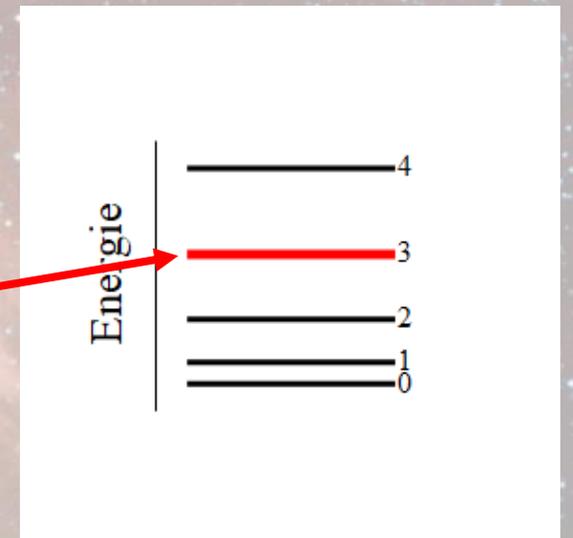
Niedrige Energie



Mittlere Energie



Hohe Energie



# Quantenmechanik



- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Molekül sie nicht aufnehmen.

Niedrige Energie



Das Medium ist **transparent** für diese Wellenlänge

Mittlere Energie



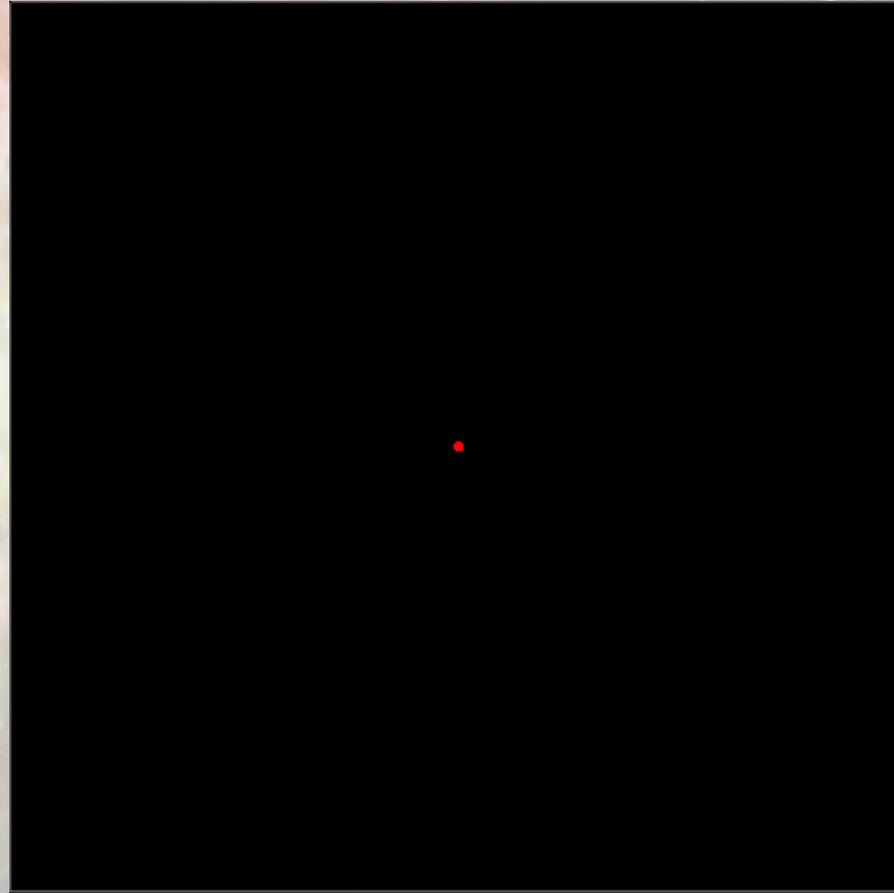
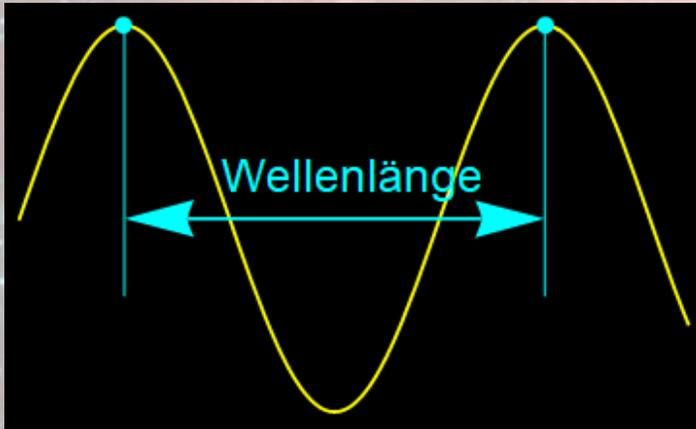
Das Medium ist **intransparent** für diese Wellenlänge

Hohe Energie

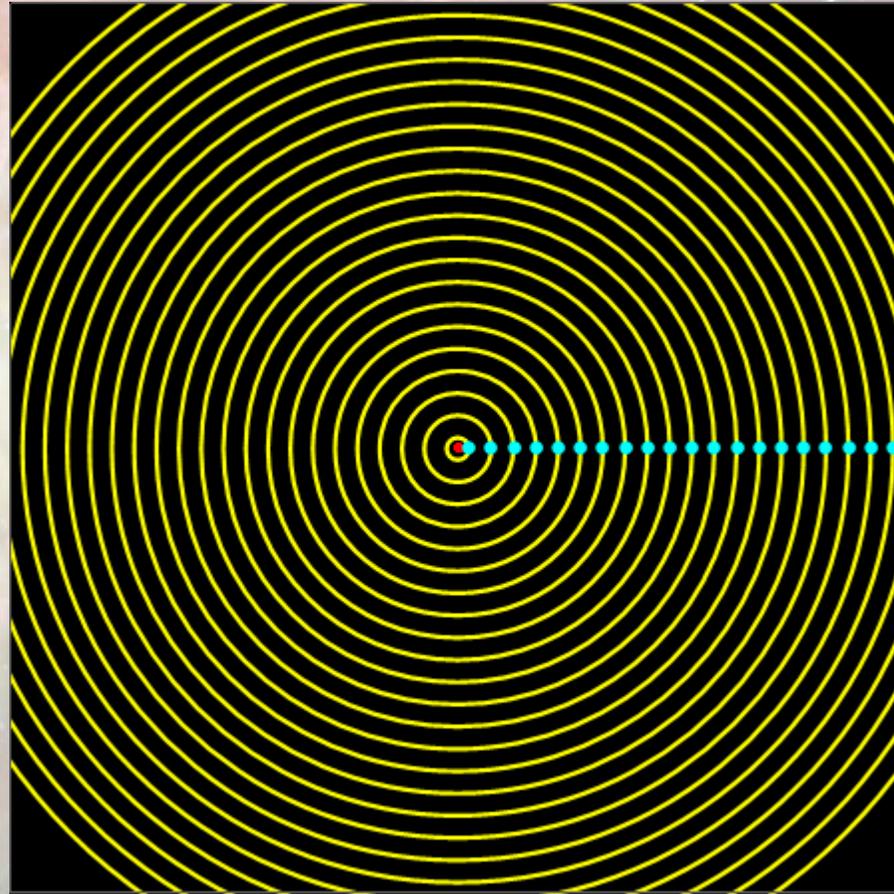
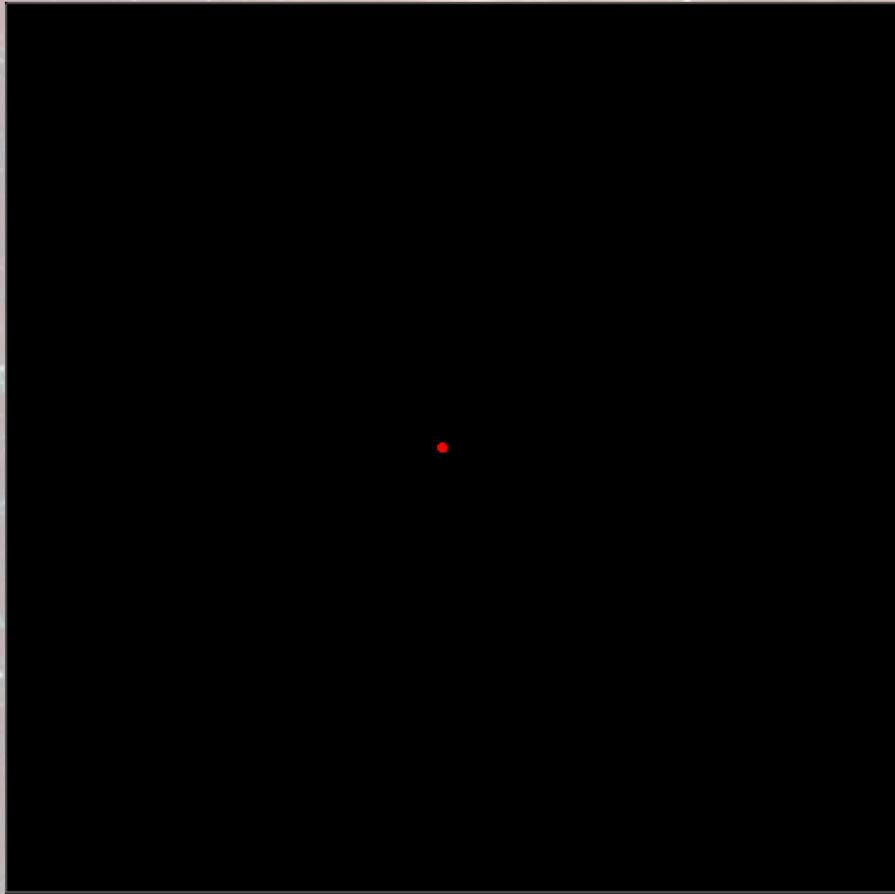


Das Medium ist **transparent** für diese Wellenlänge

# Wellenlänge und der Dopplereffekt



# Wellenlänge und der Dopplereffekt



# Wellenlänge und der Dopplereffekt

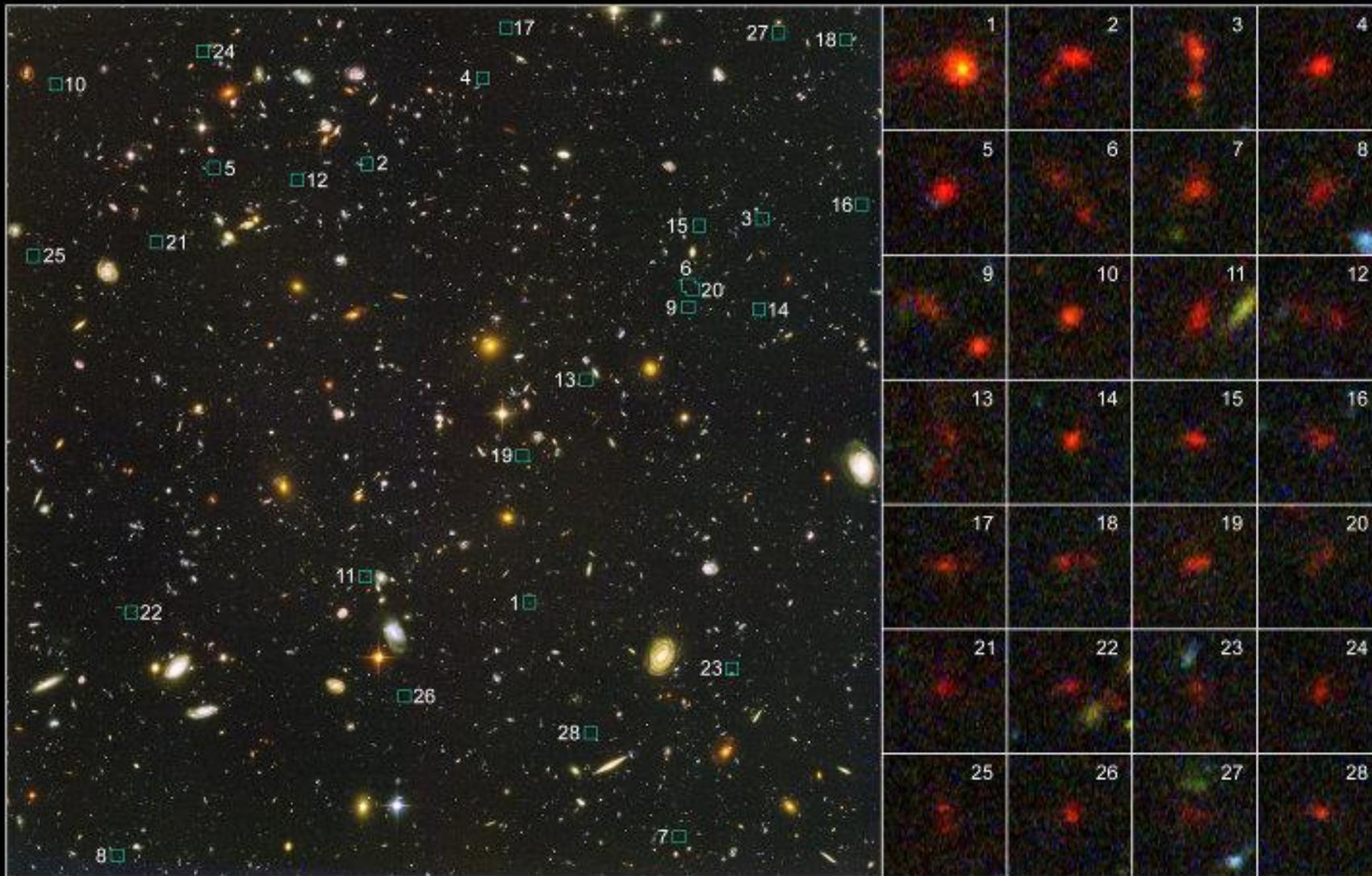
Der Dopplereffekt verschiebt die Wellenlänge einer Welle zu

- **längeren** Wellenlängen wenn sich der Sender und Empfänger **entfernen**.

„**Rotverschiebung**“

- **kürzeren** Wellenlängen wenn sich der Sender und Empfänger **nähern**.

„**Blauverschiebung**“



Das Licht all dieser Galaxien ist stark rotverschoben, da sie sich sehr schnell von uns entfernen

**Distant Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field**  
 Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

# Was nicht passt ...

- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Molekül sie nicht aufnehmen.
- Aber ...

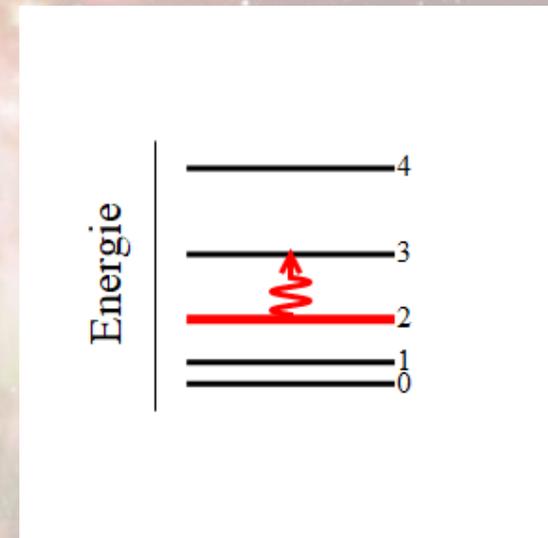
Niedrige Energie



Mittlere Energie



Hohe Energie



# Was nicht passt wird passend gemacht!

- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Molekül sie nicht aufnehmen.
- Aber Dopplerverschiebung der Wellenlängen

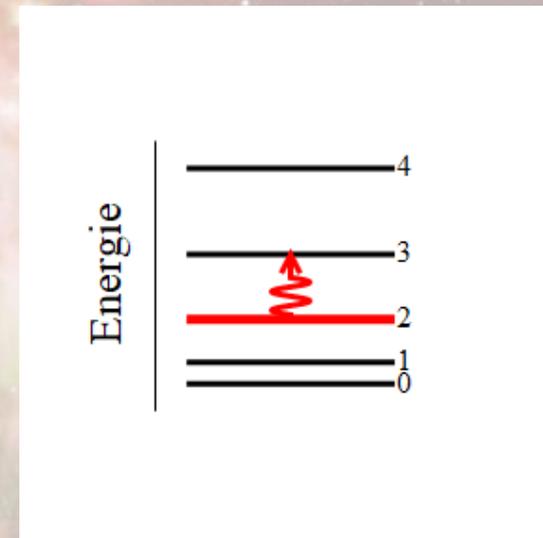
Niedrige Energie



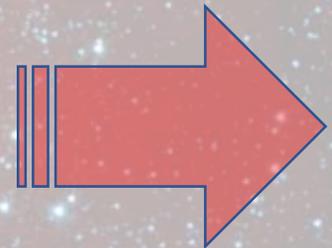
Mittlere Energie



Hohe Energie

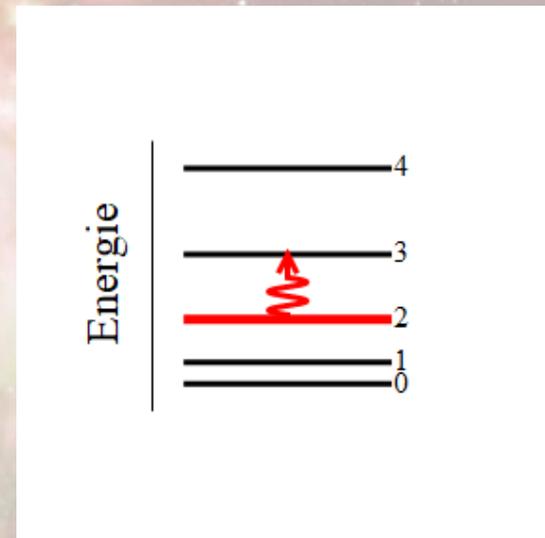


Relativbewegung



# Was nicht passt wird passend gemacht!

- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Molekül sie nicht aufnehmen.



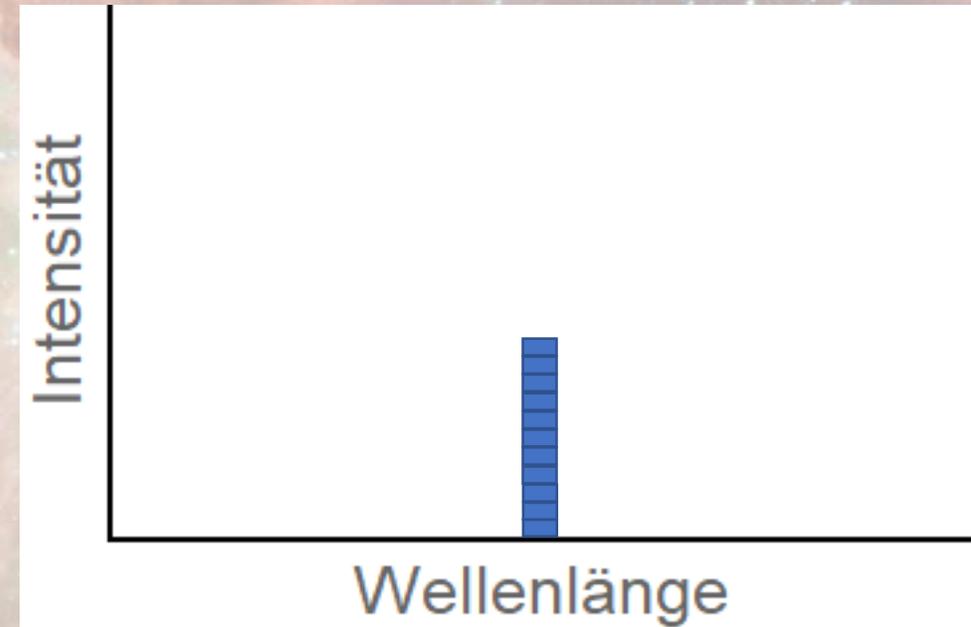
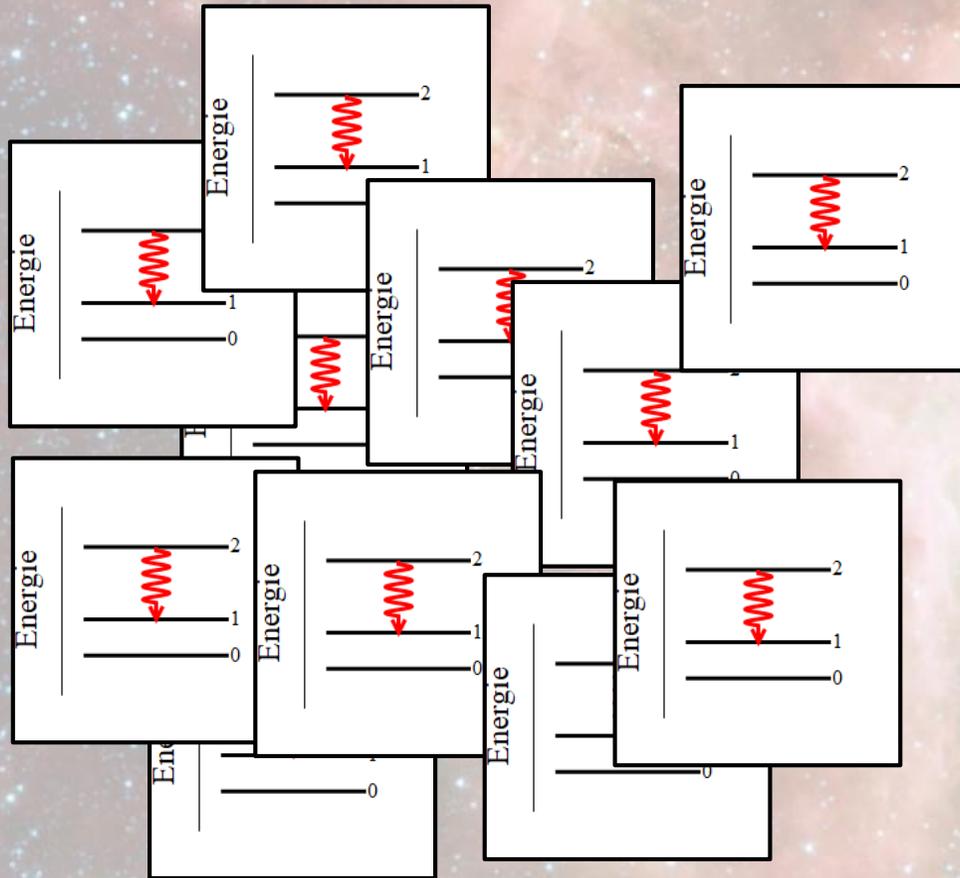
# Quantenmechanik



- Um zu einem **niedrigeren** Energiezustand zu wechseln muss ein Molekül exakt die Differenz-Energie abgeben.

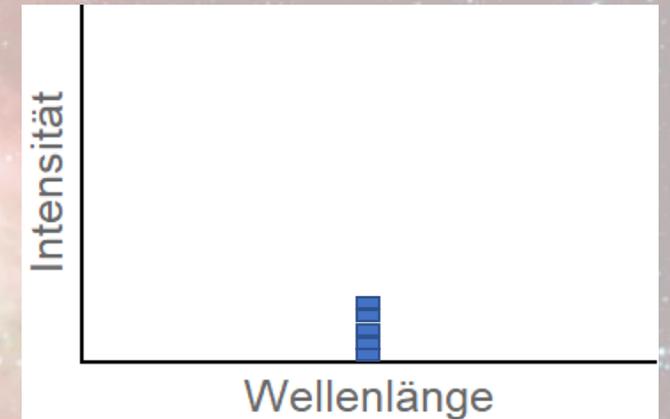
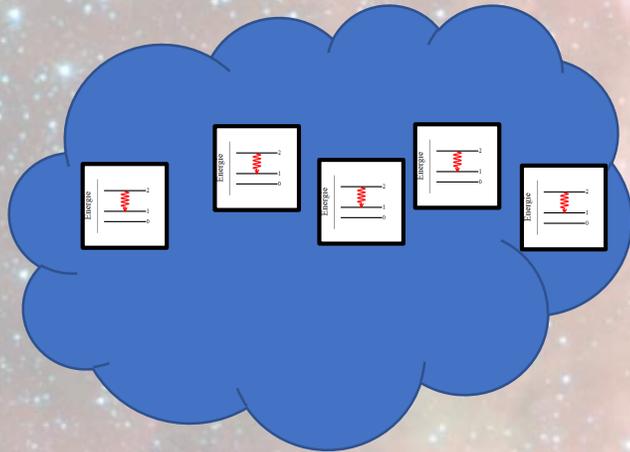
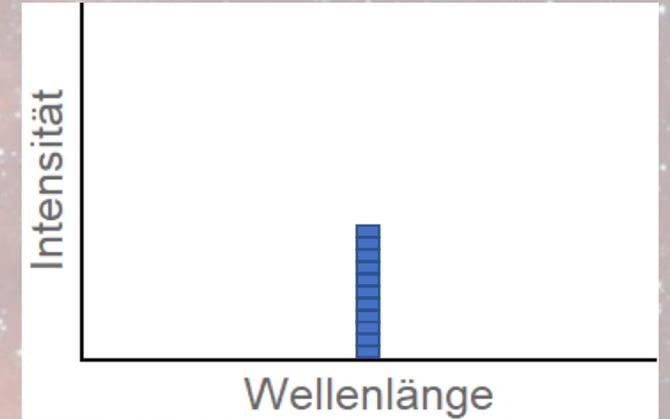
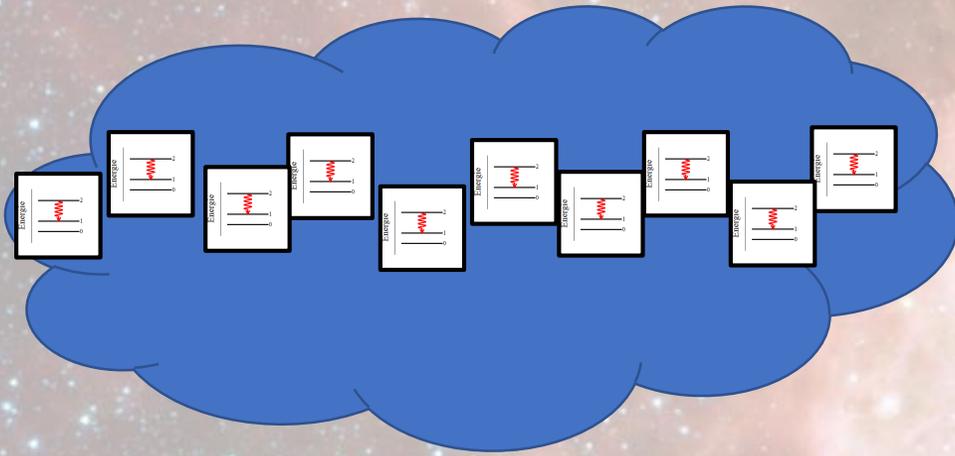


# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



In einem Spektrum zählen wir im Prinzip die Zahl der Emissionen/Absorptionen.

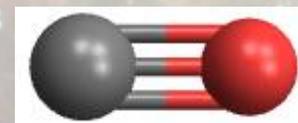
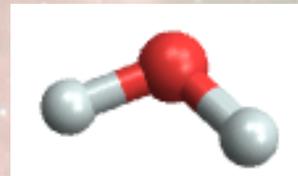
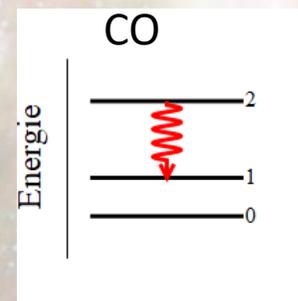
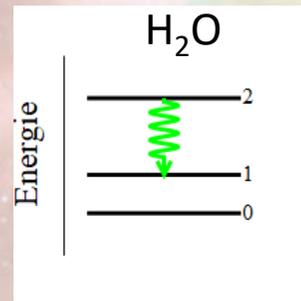
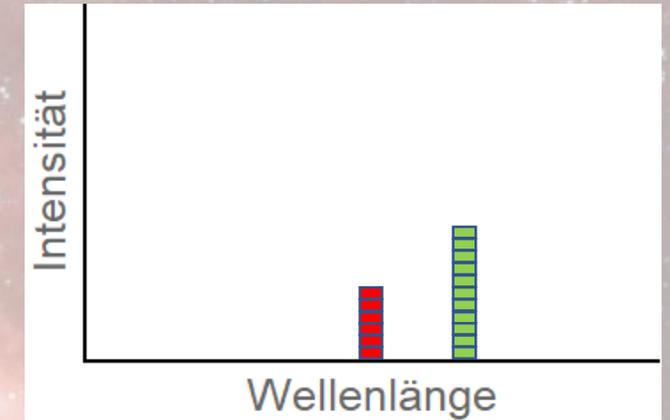
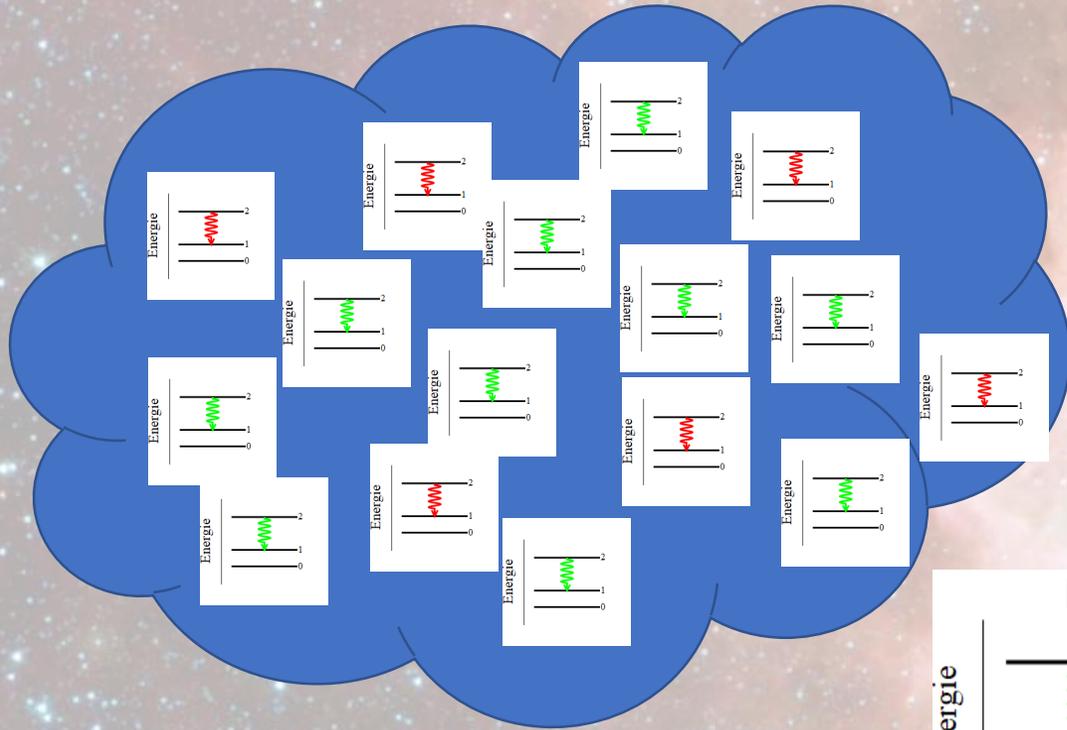
# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



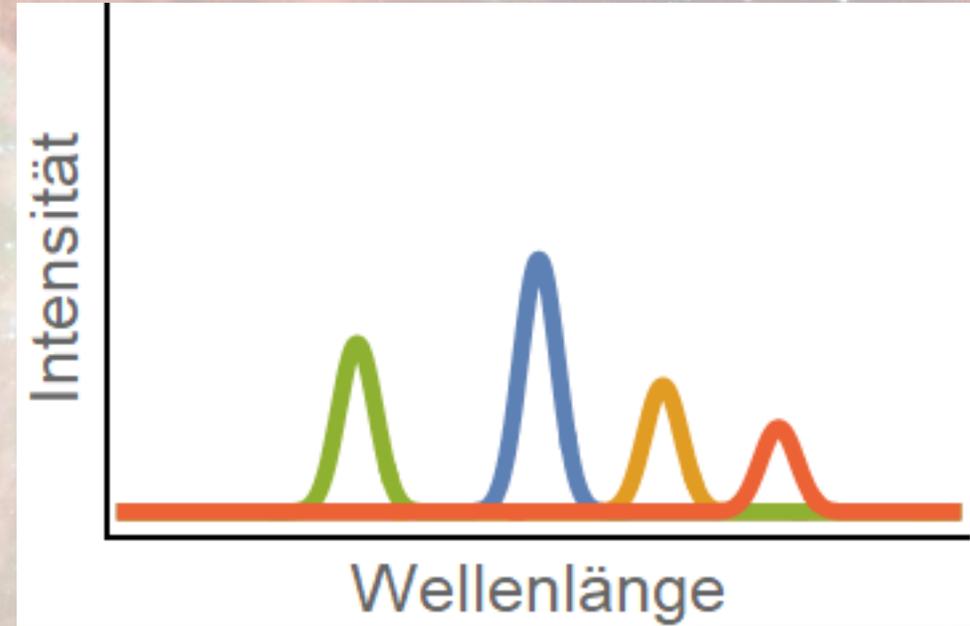
Die Intensität wird damit auch zu einem Maß für die Häufigkeit („Säulendichte“).

# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

Die Intensität wird damit auch zu einem Maß für chemische Zusammensetzung!.

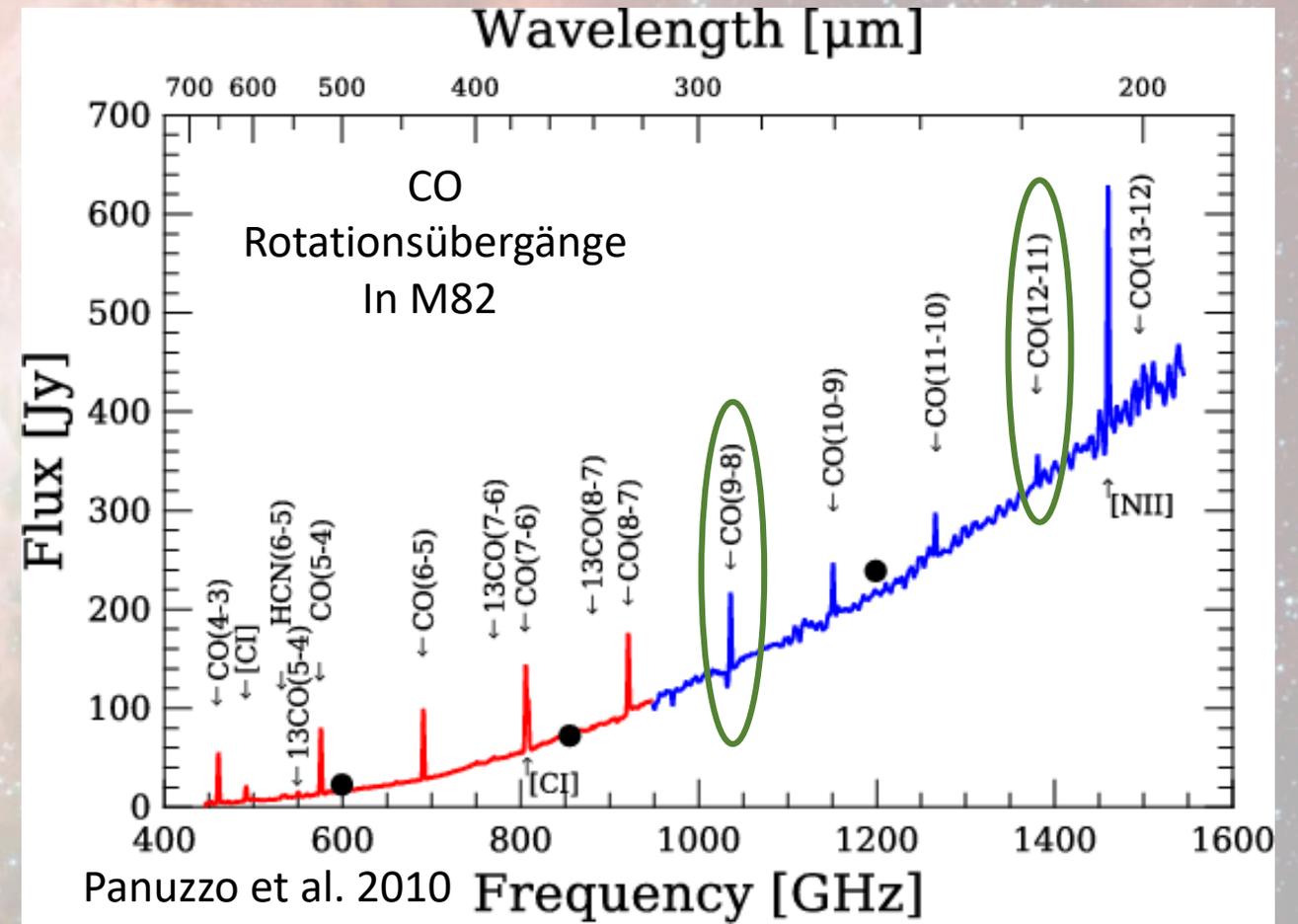
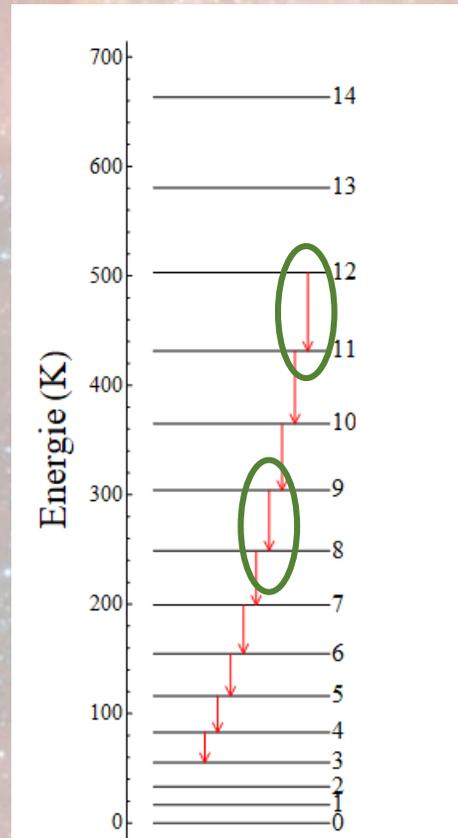


# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

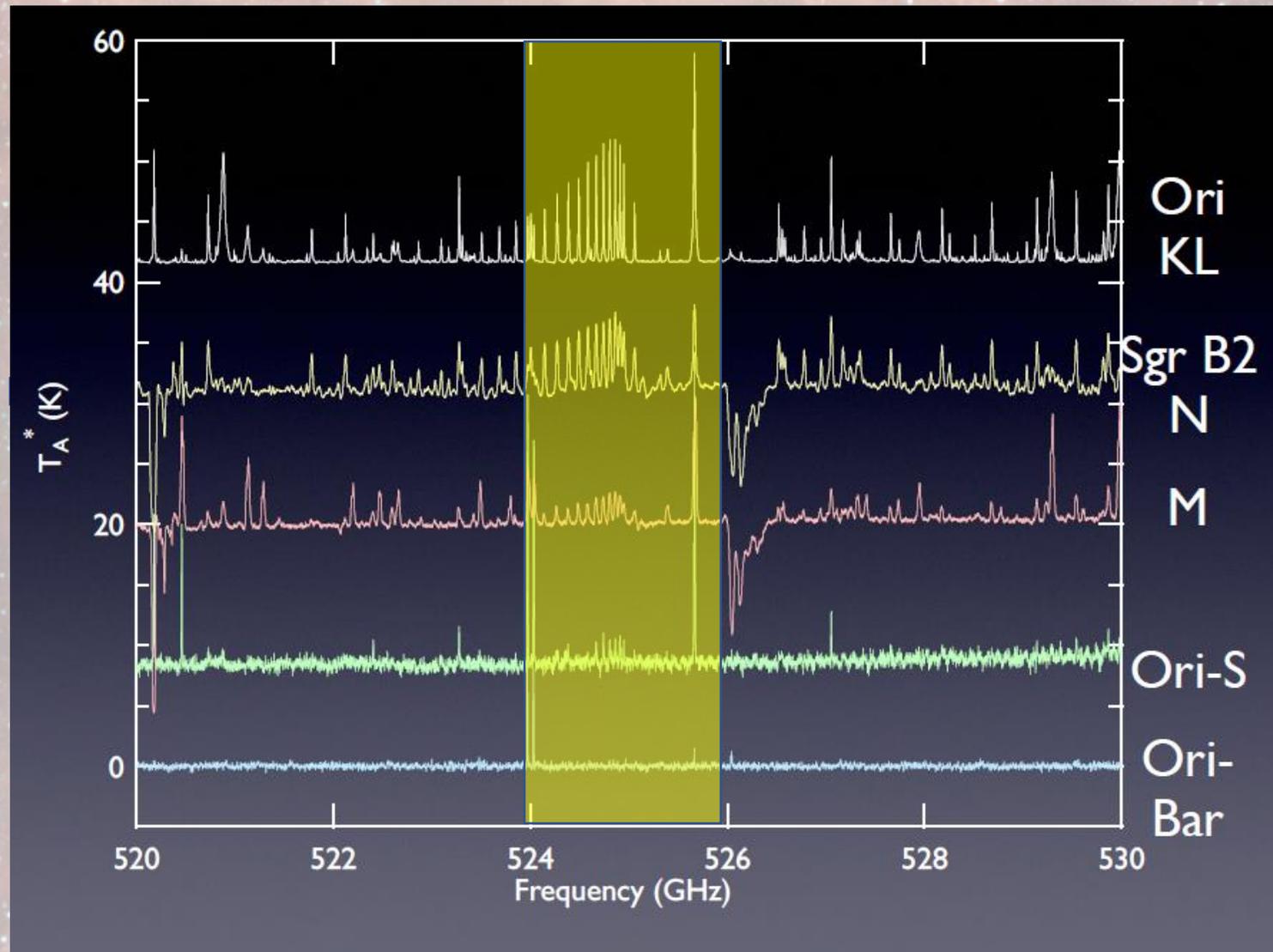


# Spektroskopie in der Astronomie

- Damit lassen sich hervorragend Moleküle im Weltall identifizieren!

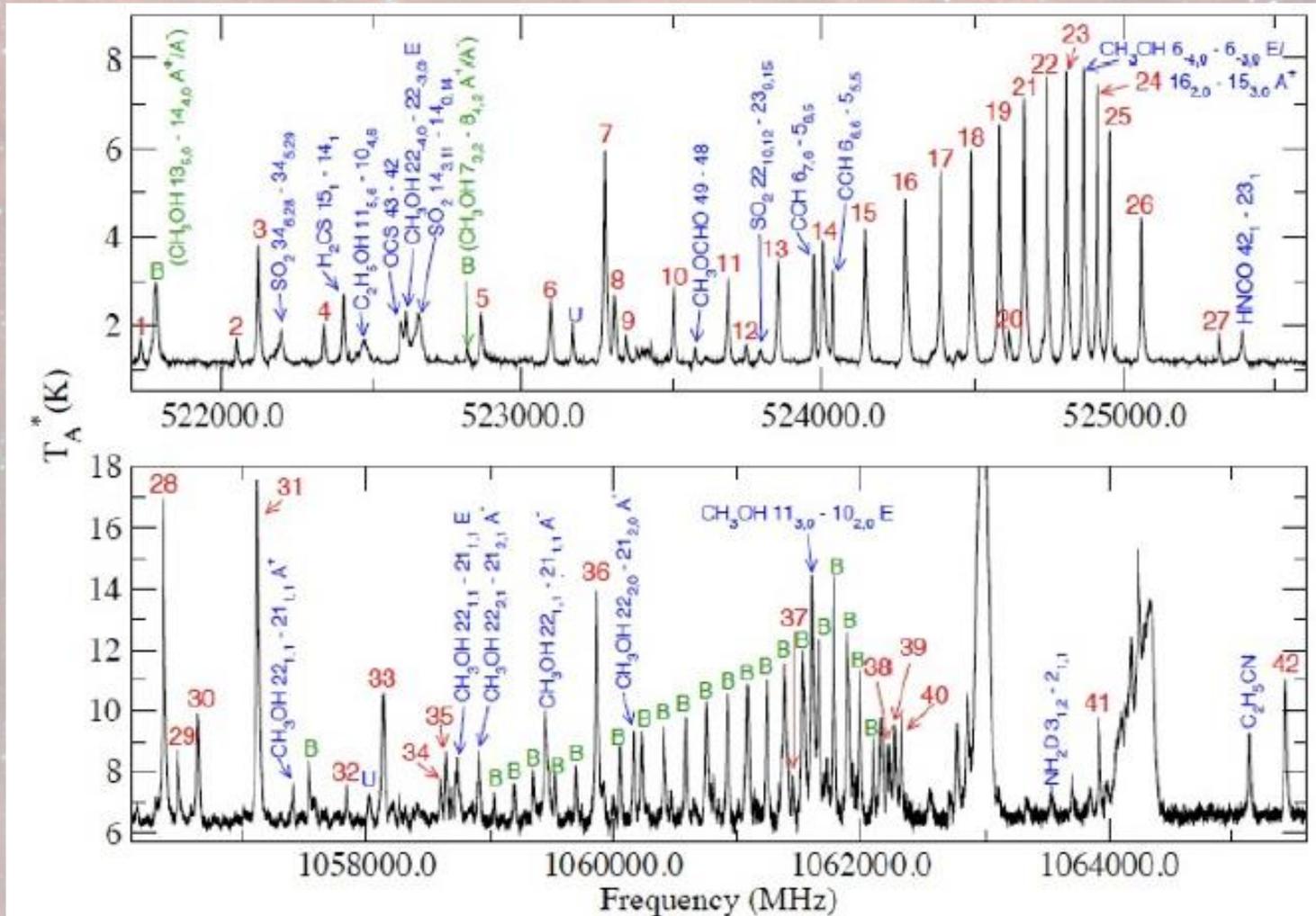


# Beispiel: Sternentstehung in Orion



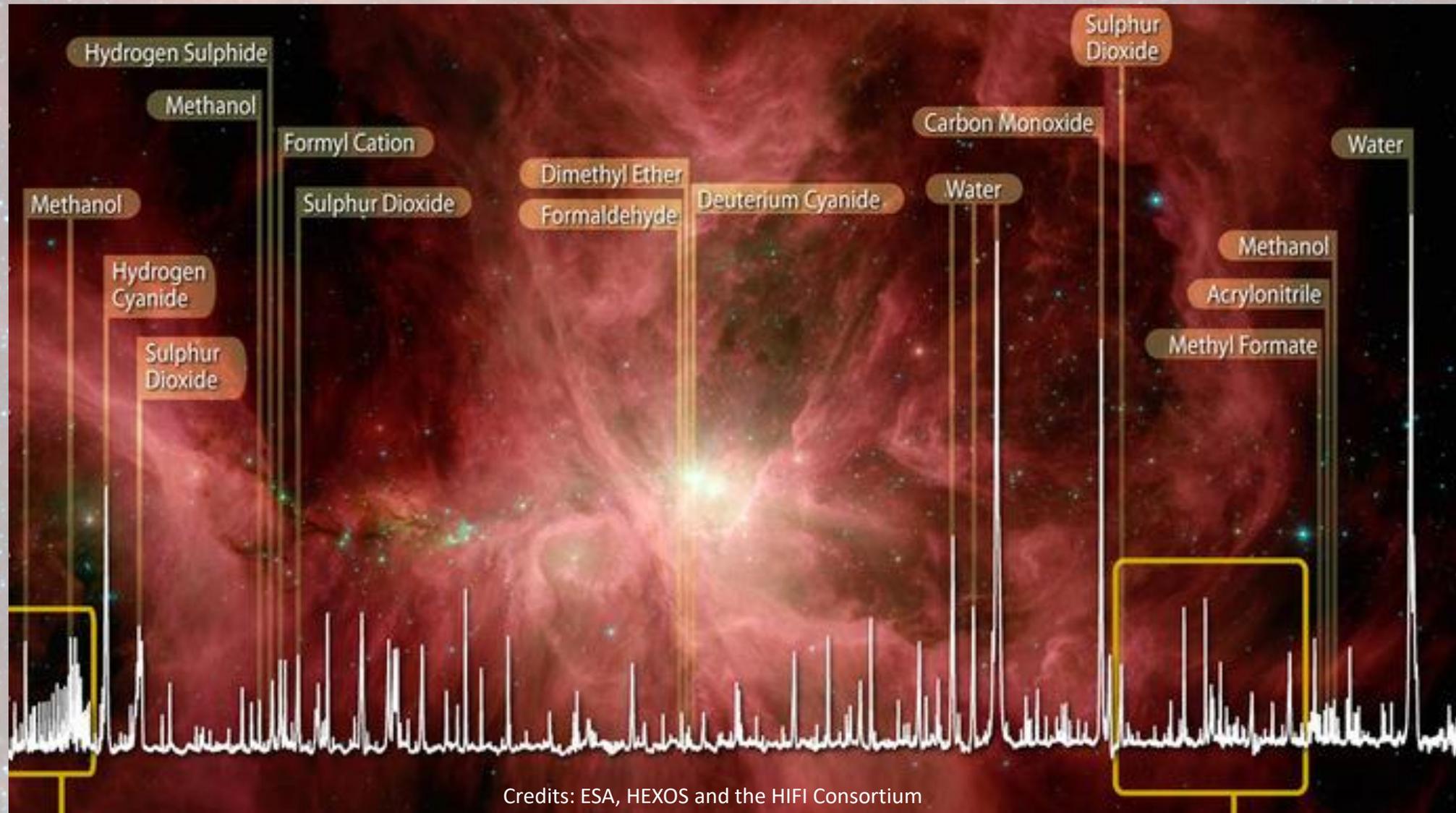
Source: E. Bergin  
(Univ. of Michigan)

# Beispiel: Sternentstehung in Orion



Wang et al. 2011

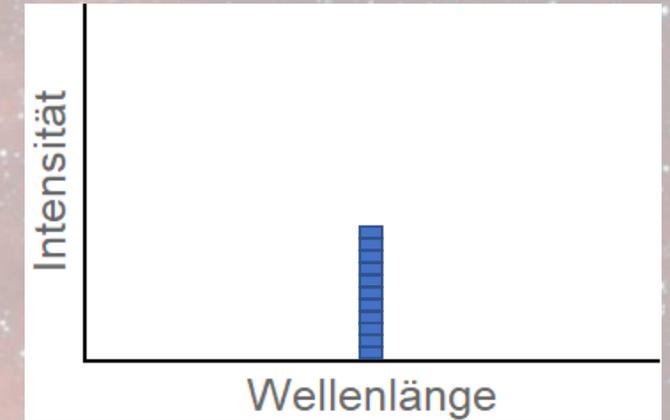
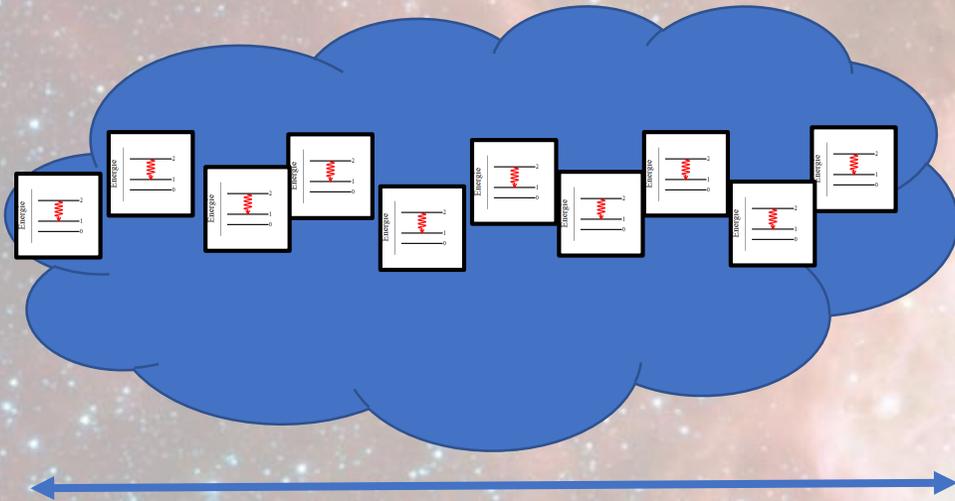
# Beispiel: Sternentstehung in Orion



# Kompliziert, kompliziert,...

- Die schiere Menge der verschiedenen Emissionslinien macht die Analyse bereits zu einem sehr komplexen Problem.
- Bisher sind bereits über 200 verschiedene Spezies im interstellaren Raum identifiziert worden.
- Es ist leider noch komplizierter...

# Dick, ....

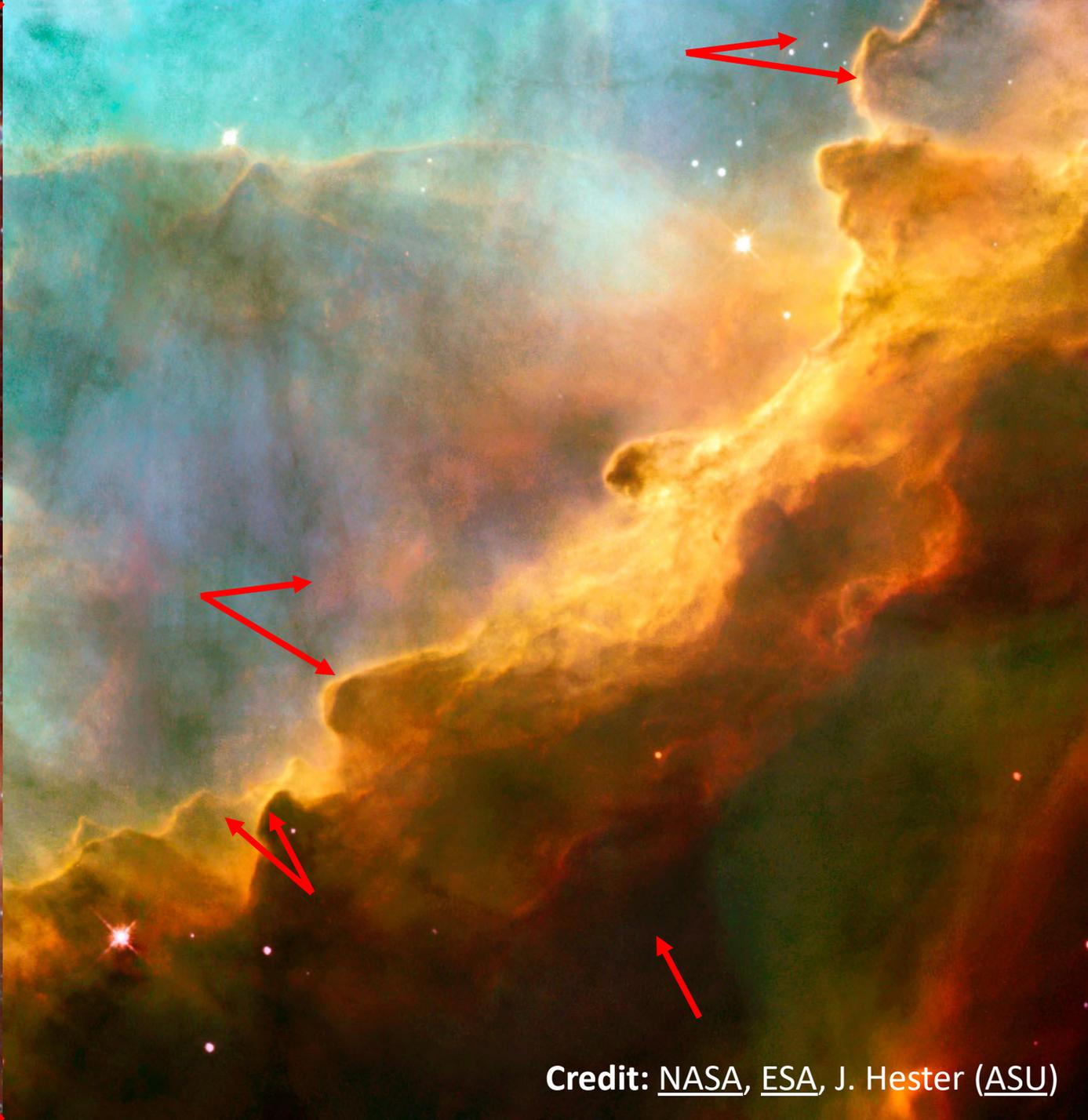
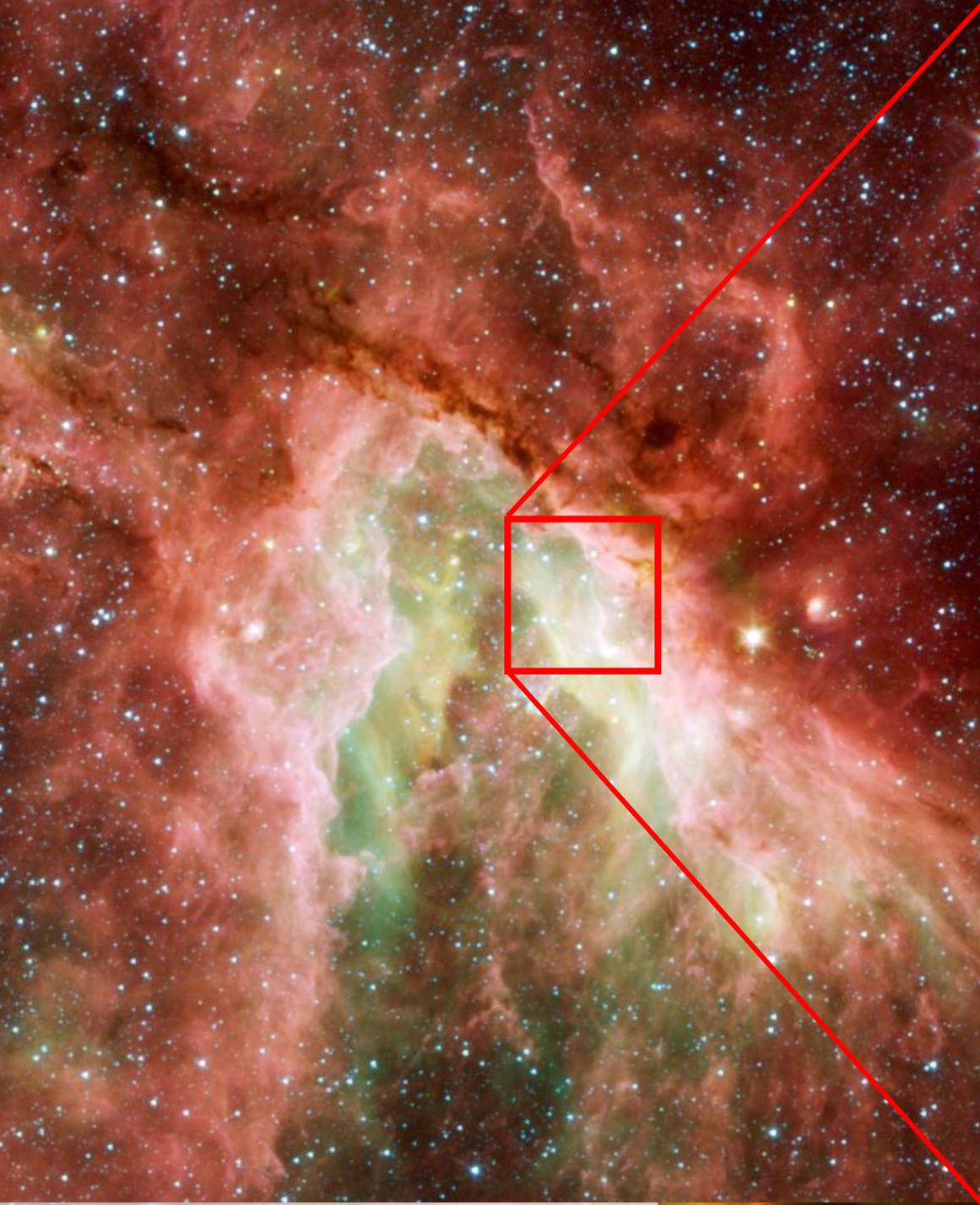


- Wenn wir die Häufigkeit der Teilchen in der Molekülwolke kennen, können wir aus ihrer Emission die Tiefe der Wolke abschätzen.

Es sei denn...

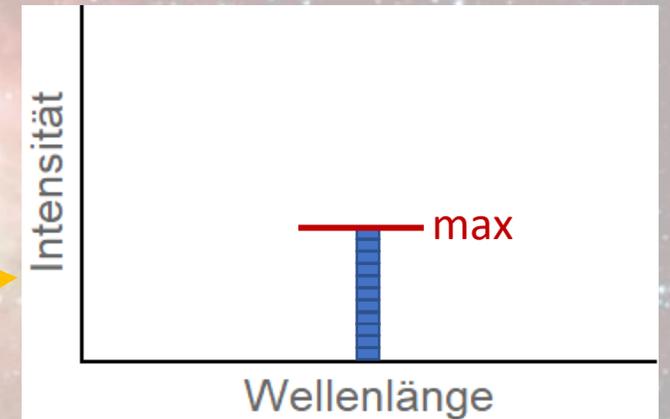
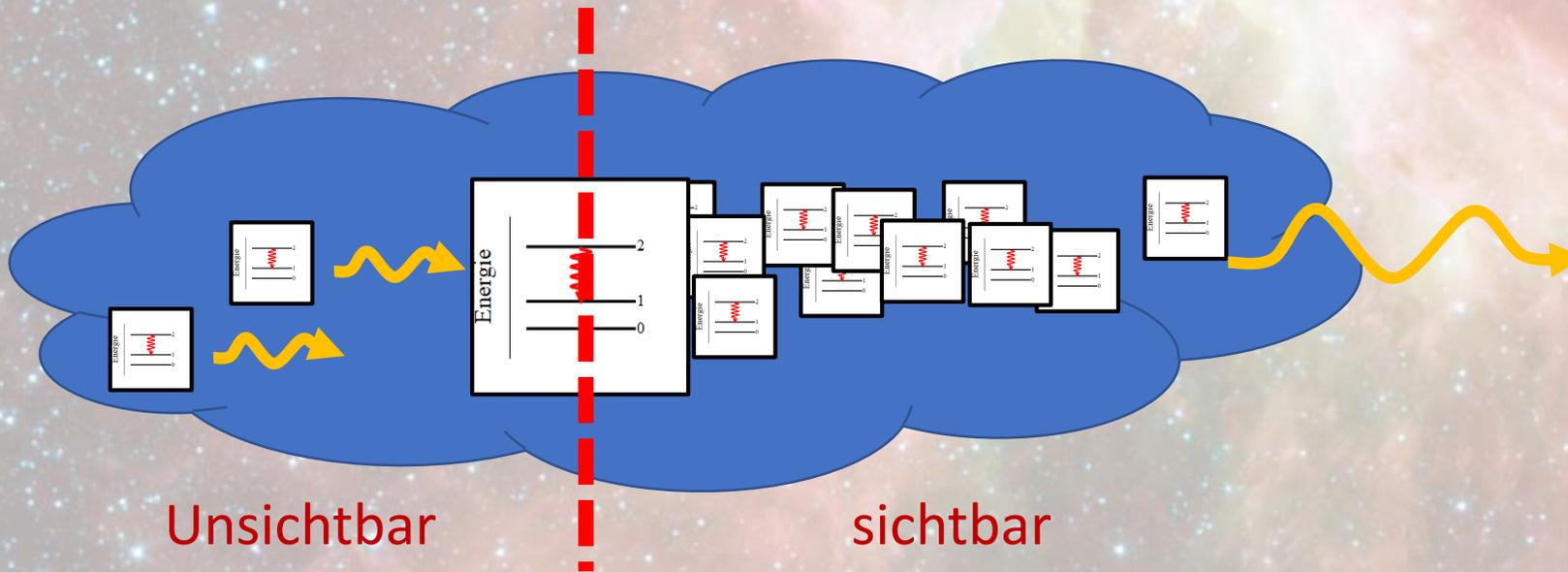
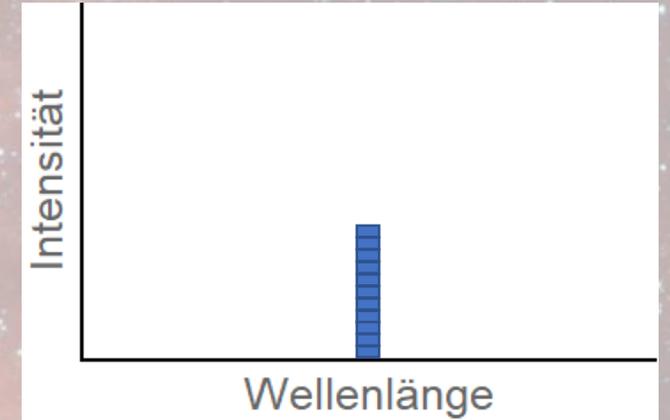
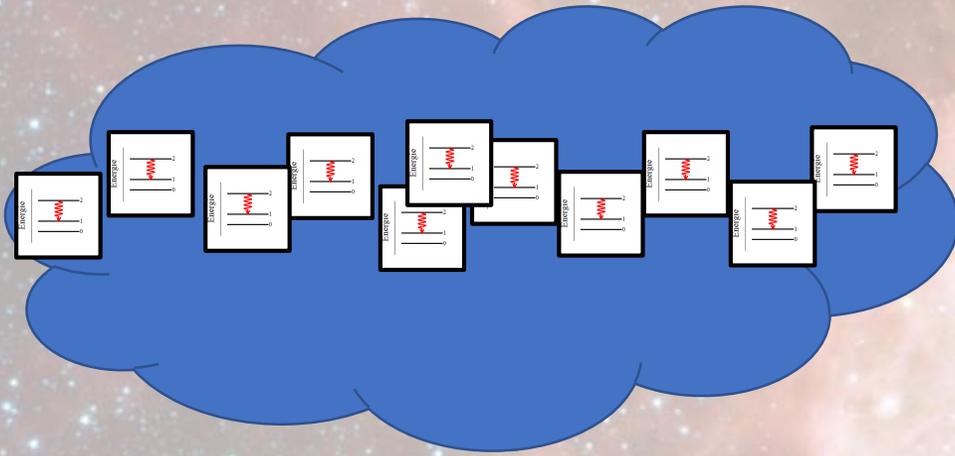
...man kann nicht beliebig tief hineinschauen.



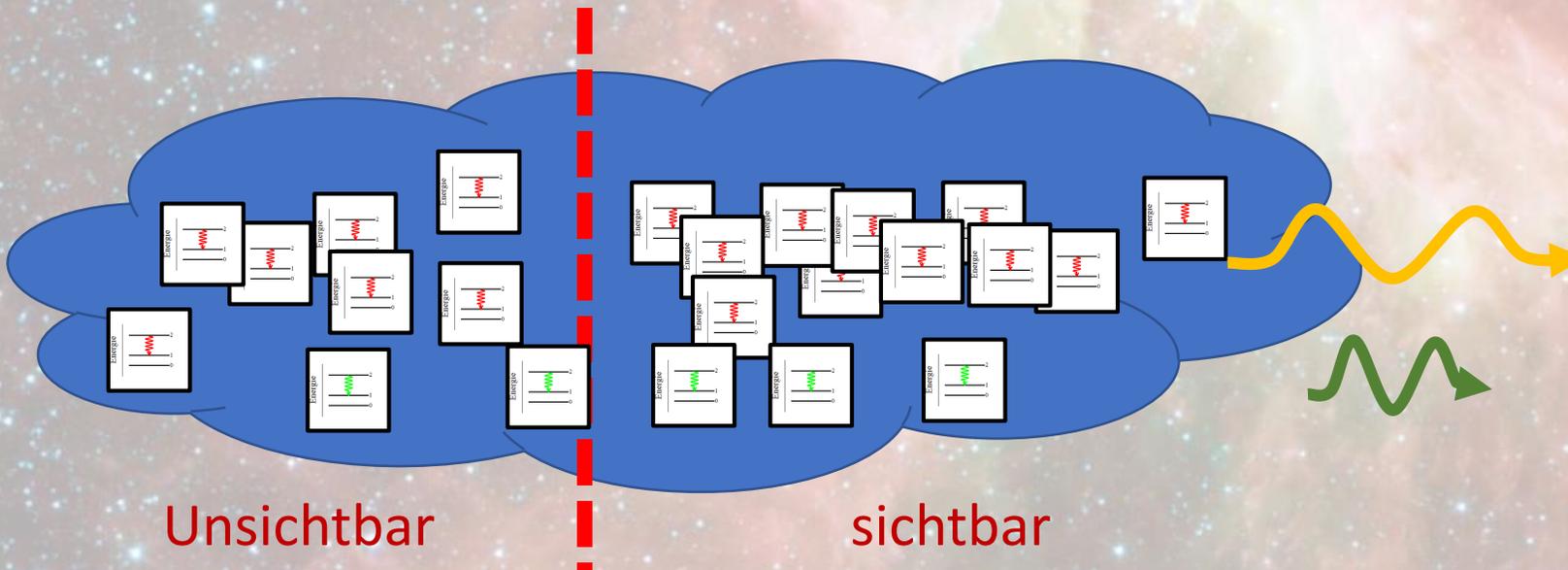
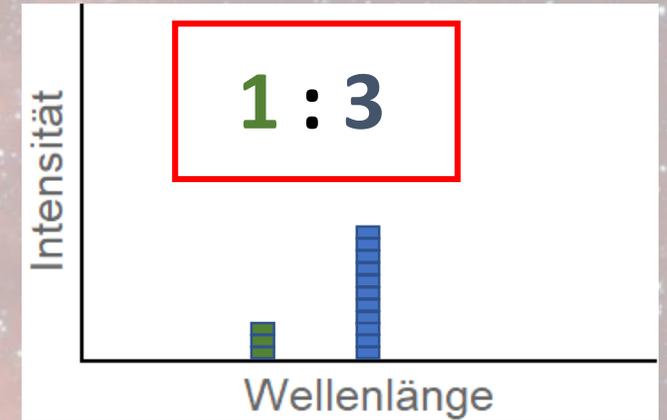
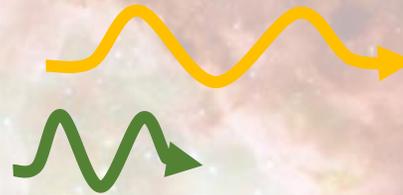
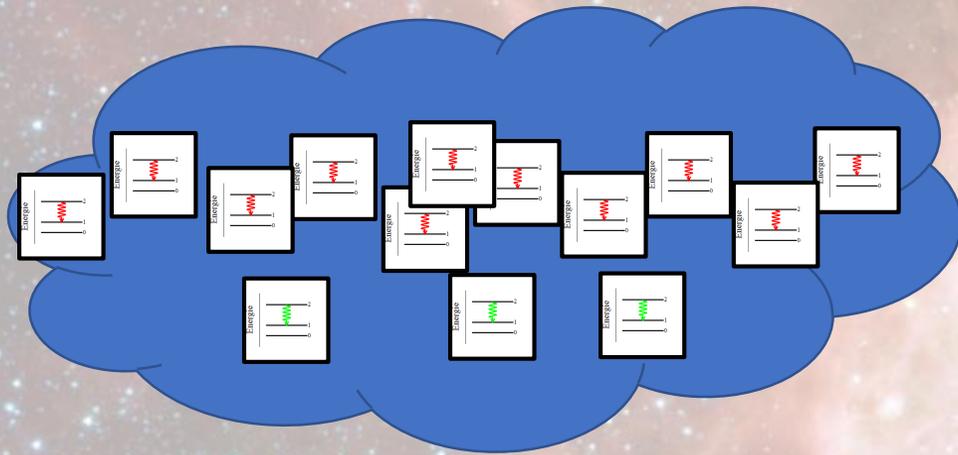


Credit: [NASA](#), [ESA](#), J. Hester ([ASU](#))

# Dick, .... optisch dick

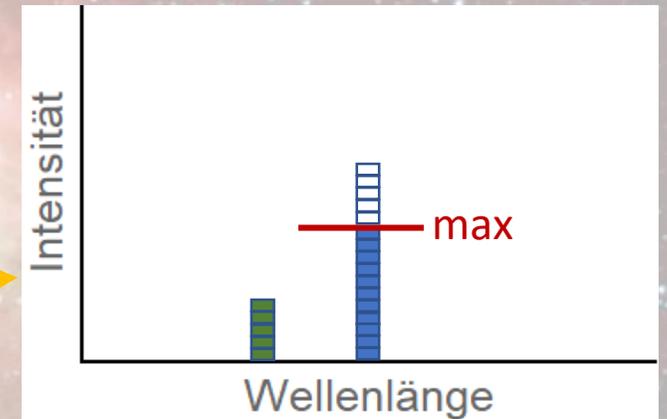


# Dick, .... optisch dick, aber es gibt einen Trick!



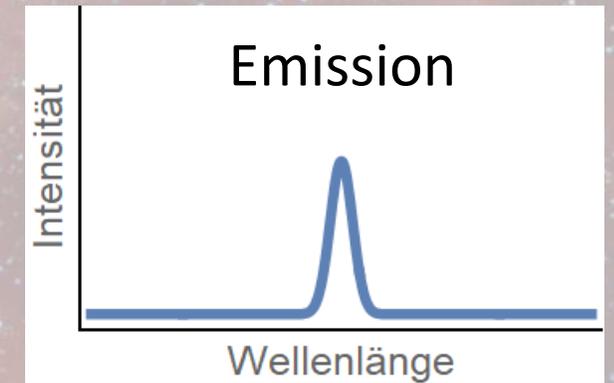
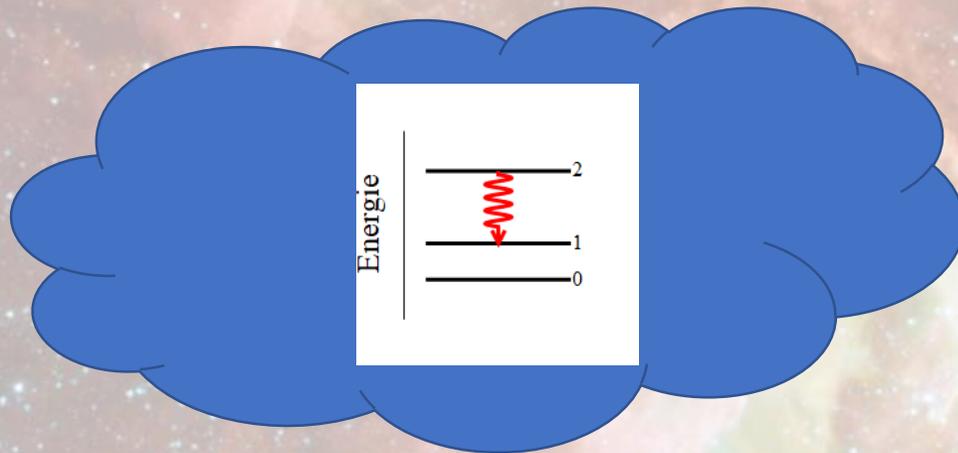
Unsichtbar

sichtbar

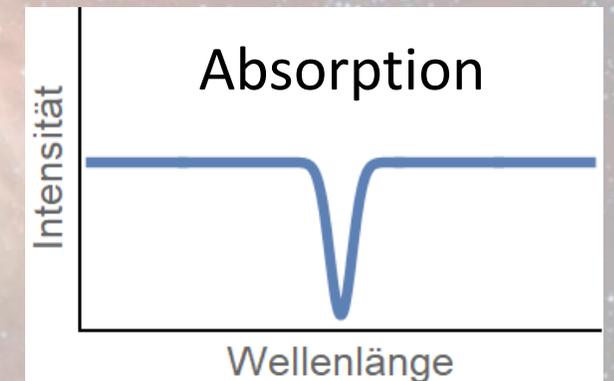
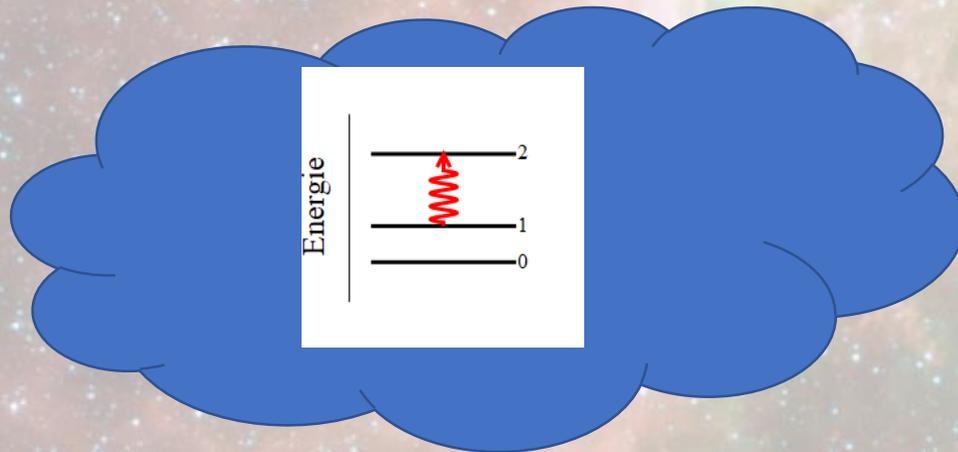


z.B.: [ $^{12}\text{C}$ ]: [ $^{13}\text{C}$ ] = 66:1

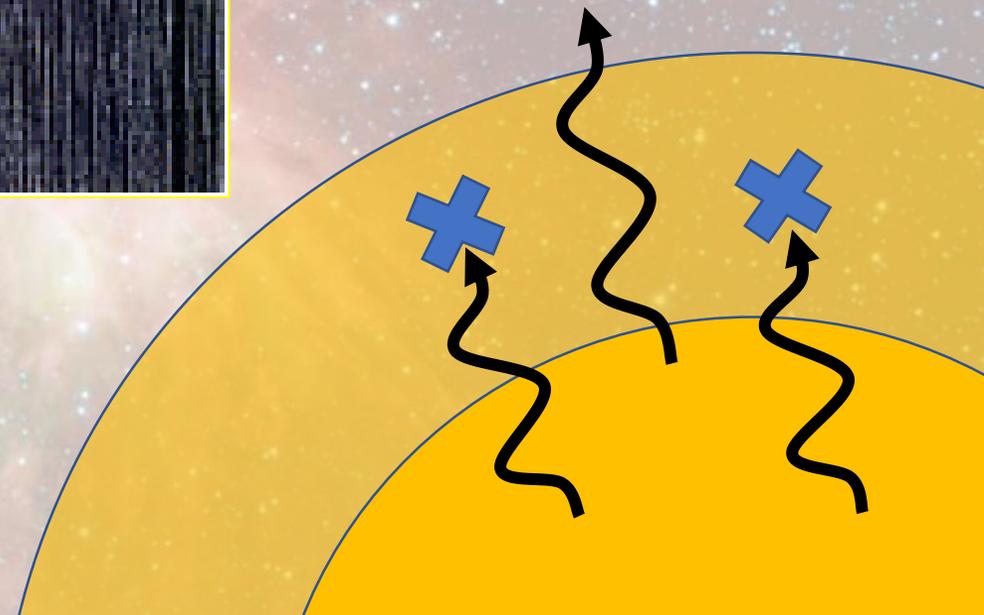
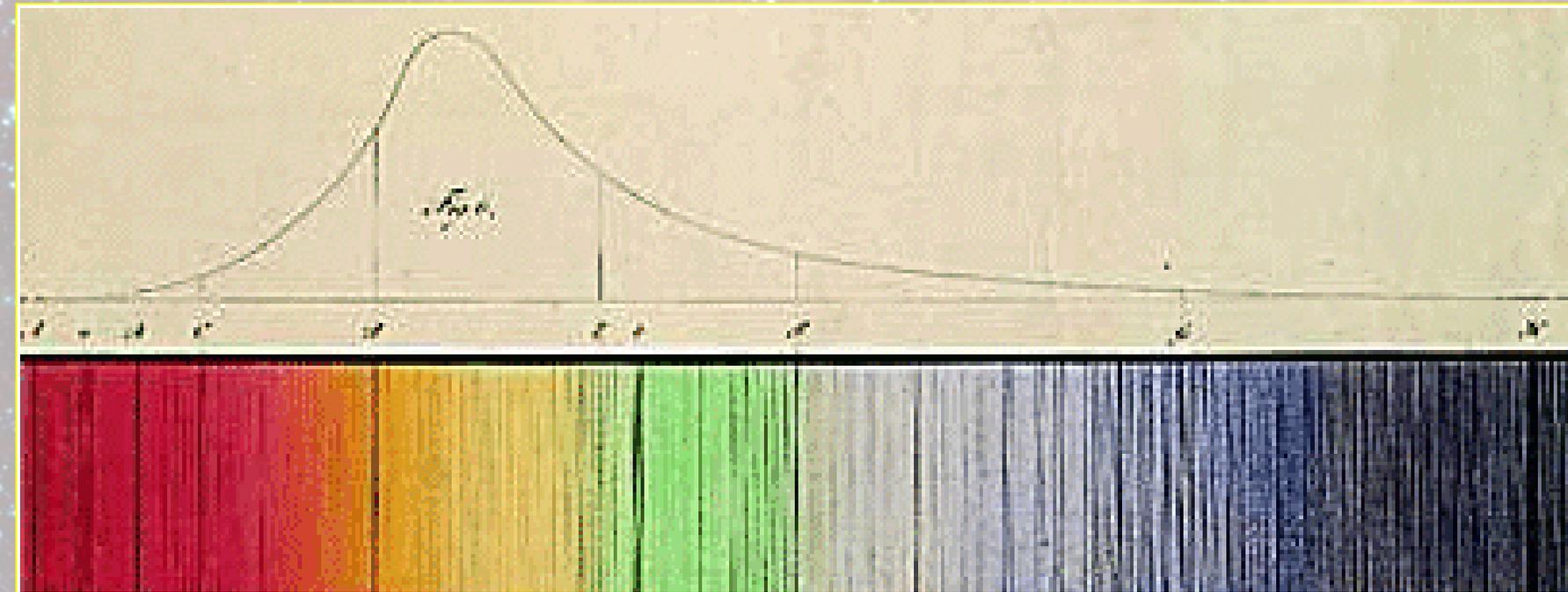
# Emission und Absorption



Heller  
Hintergrund

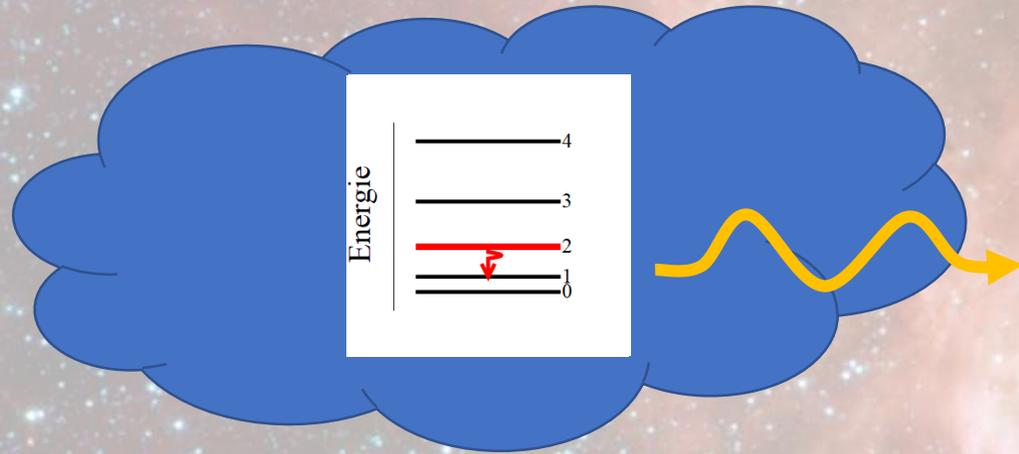


# Beispiel: Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum

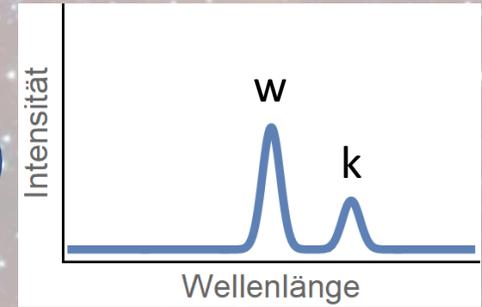
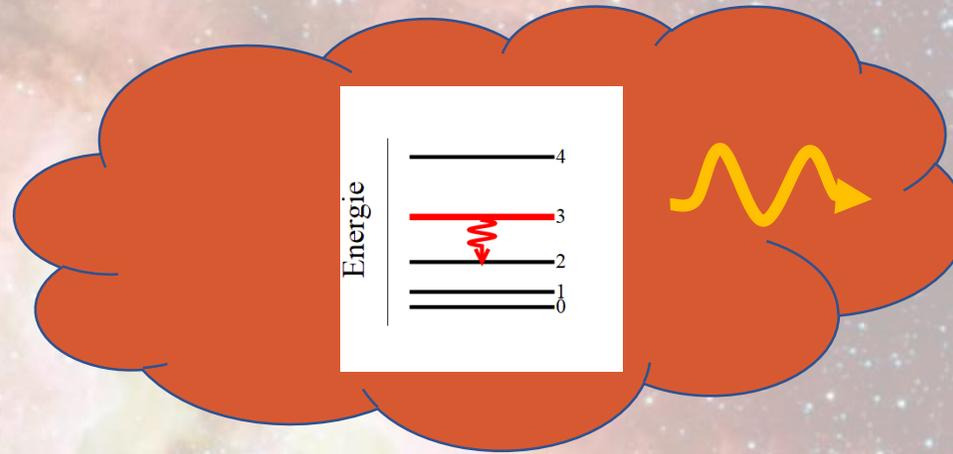


# Anregend....

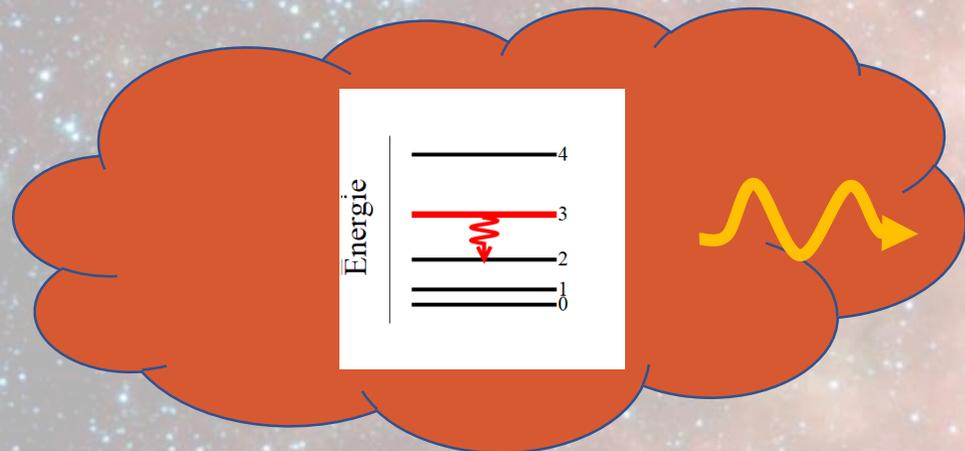
Kalte Wolke



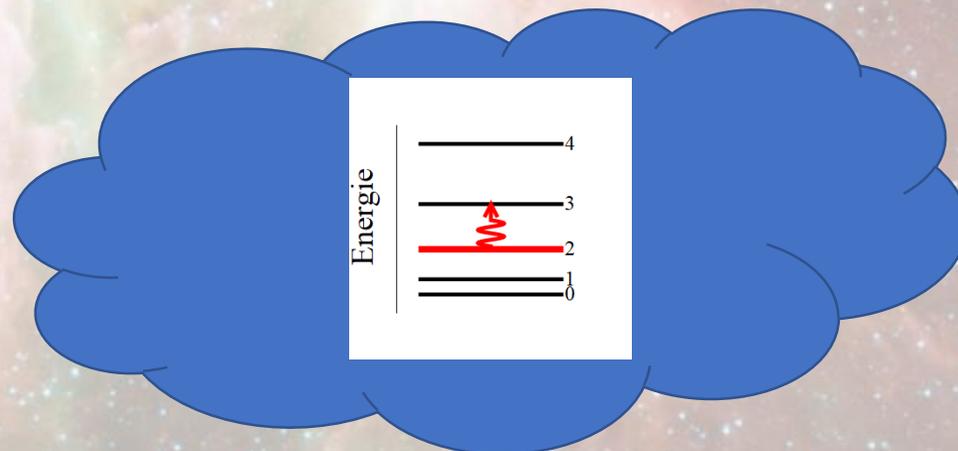
Warme Wolke



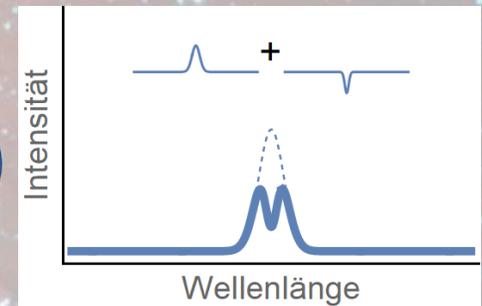
# Anregend....



Warme Wolke

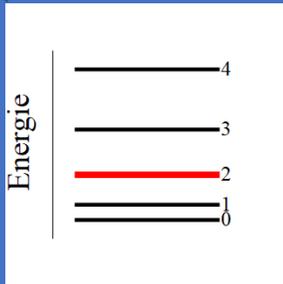


Kalte Wolke

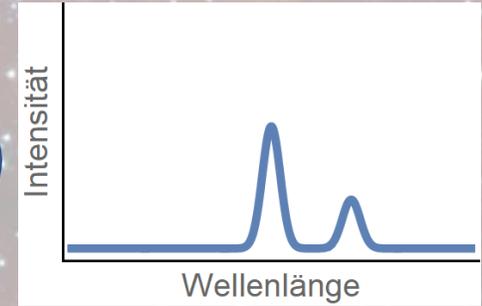
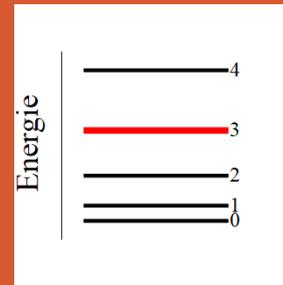


# Anregend....

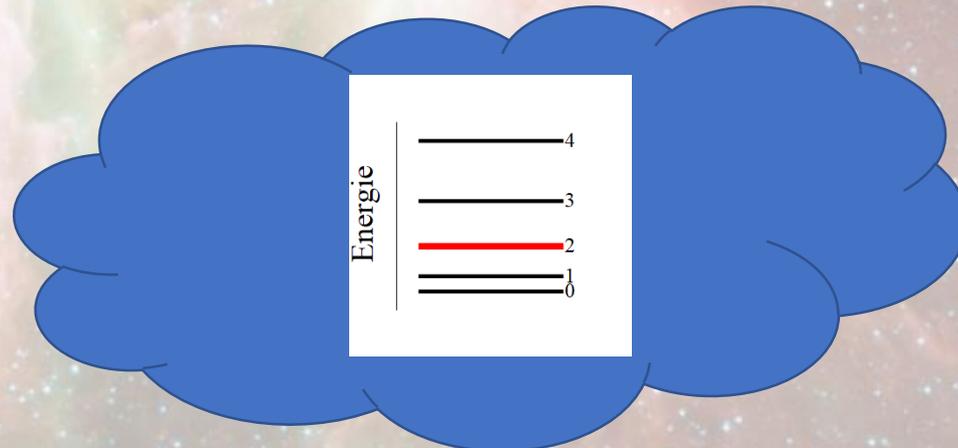
Kalte Wolke



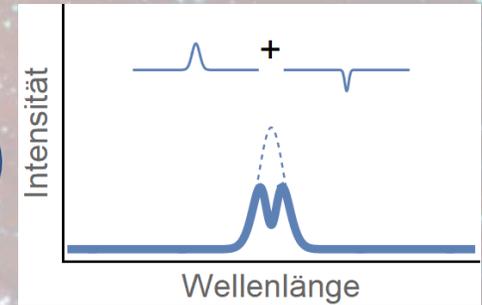
Warme Wolke



Warme Wolke



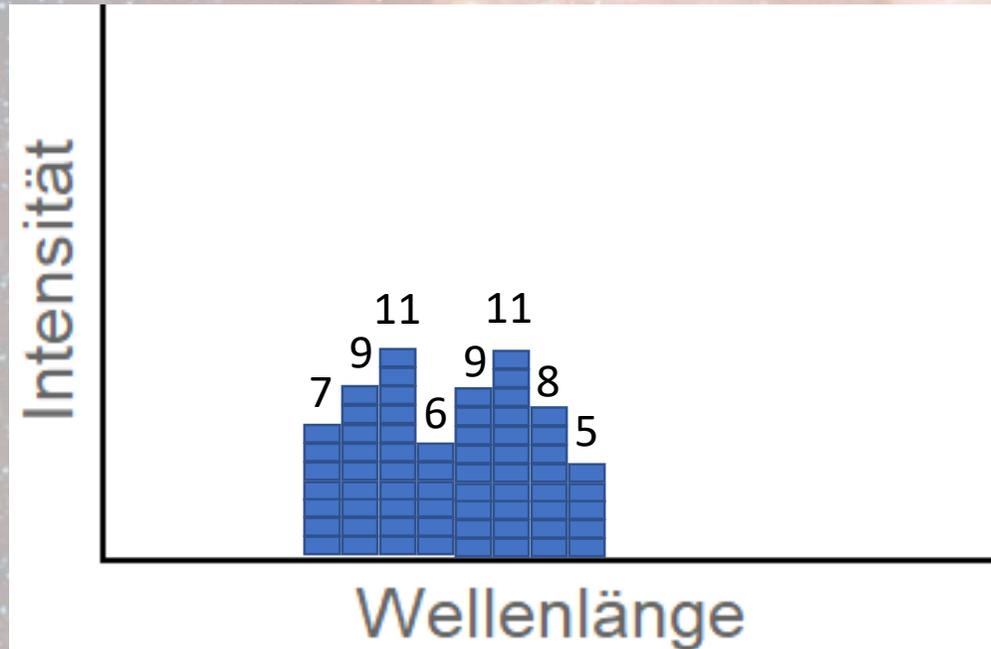
Kalte Wolke



# Spektrale vs. Bolometrische Beobachtung

Spektrale (Farb-) Information liefert Helligkeit je Wellenlänge

Bolometrische Beobachtung liefert gesamte Helligkeit



$$7+9+11+6+9+11+8+5=66$$

**VORTEIL: viel sensitiver!**

# Spektrale vs. Bolometrische Beobachtung

**Spektrale (Farb-) Information liefert  
Bewegungsrichtung**



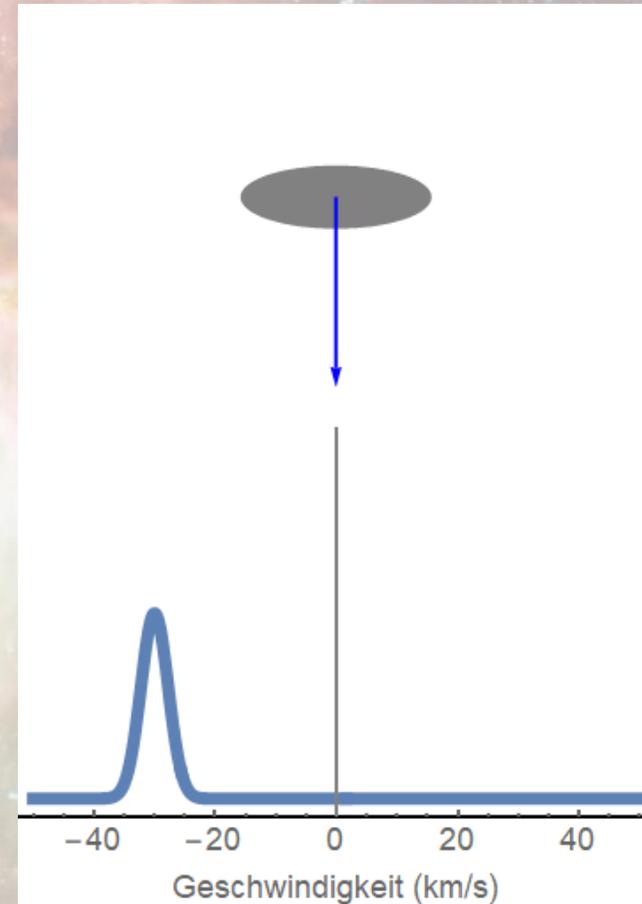
**Bolometrische Beobachtung liefert  
gesamte Helligkeit**



Photo by [Robin Pierre](#) on [Unsplash](#)

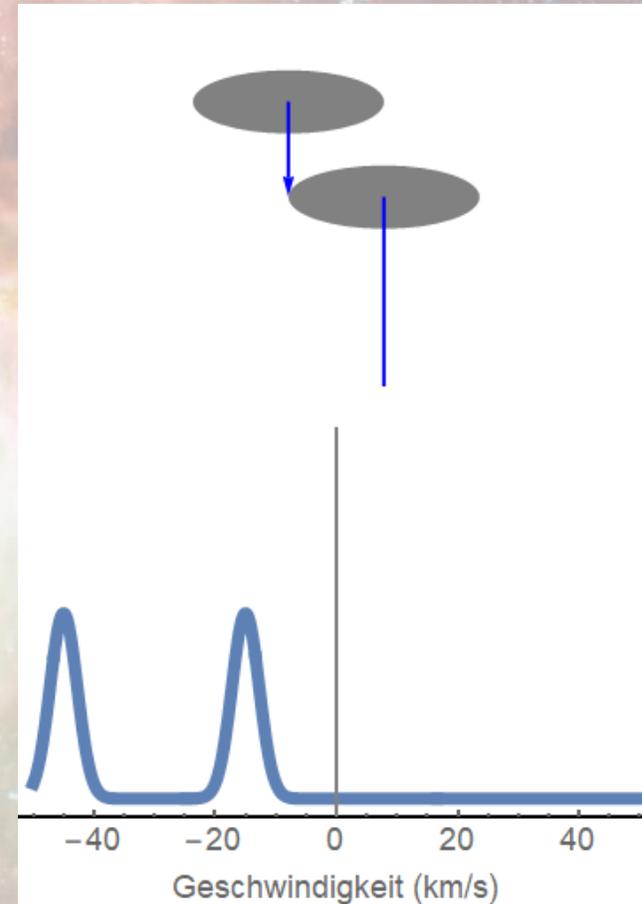
# Spektroskopische Beobachtungen

- Wir kennen die Wellenlänge genau, die einige Moleküle aussenden.
- Verschiebungen der Wellenlänge geben uns Informationen über die Dynamik der Moleküle und der Molekülwolken.

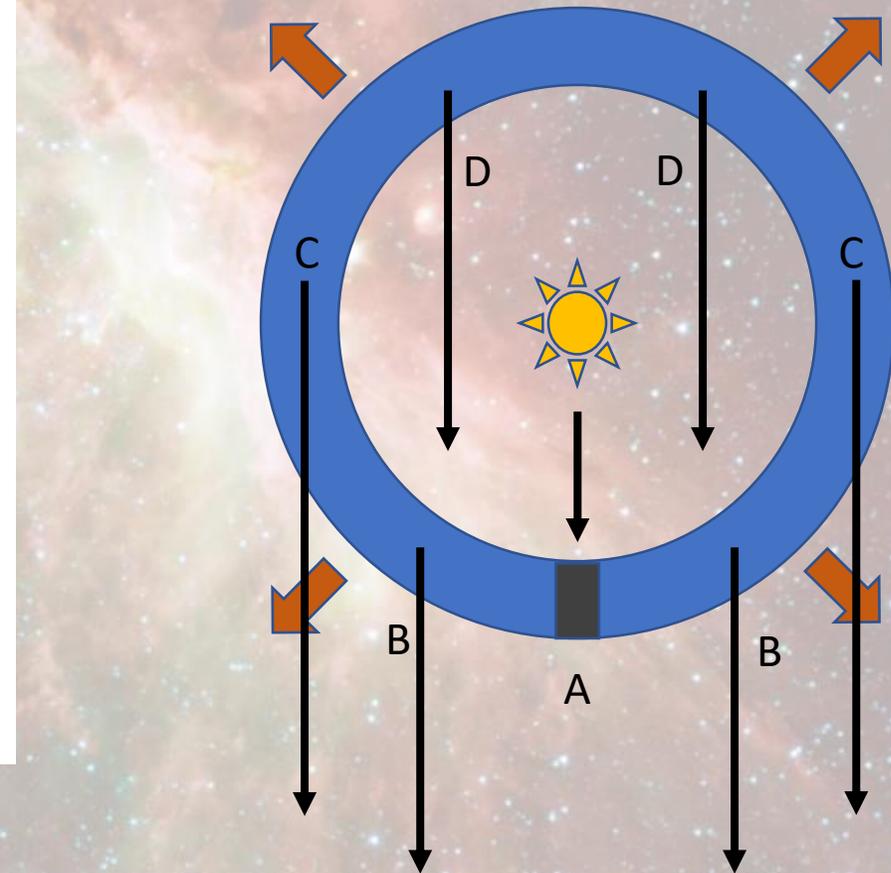
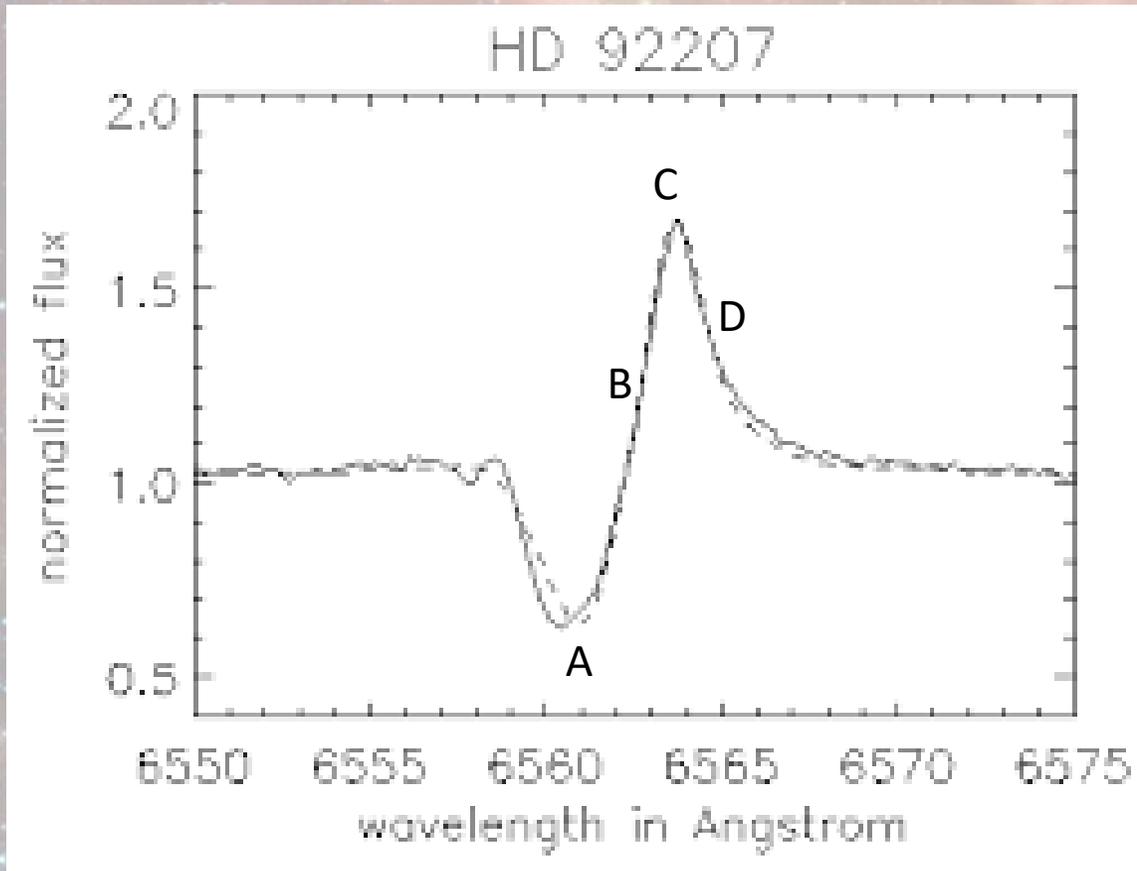


# Spektroskopische Beobachtungen

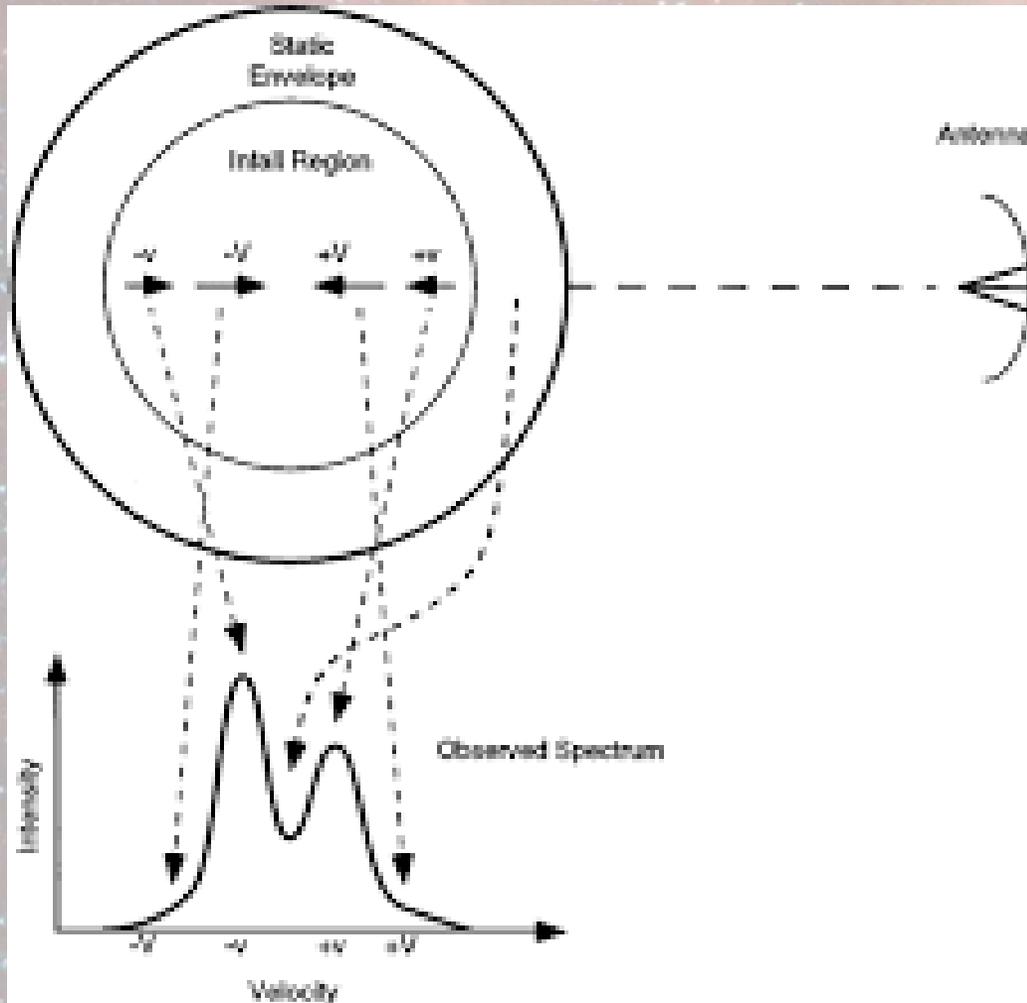
- Wir kennen die Wellenlänge genau, die einige Moleküle aussenden.
- Verschiebungen der Wellenlänge geben uns Informationen über die Dynamik der Moleküle und der Molekülwolken.
- Komplexe Strukturen spiegeln sich in ihrer spektralen Emission wieder.



# Beispiel: Expandierende Sternhüllen – P Cygni



# Beispiel: Kollaps einer Wolke

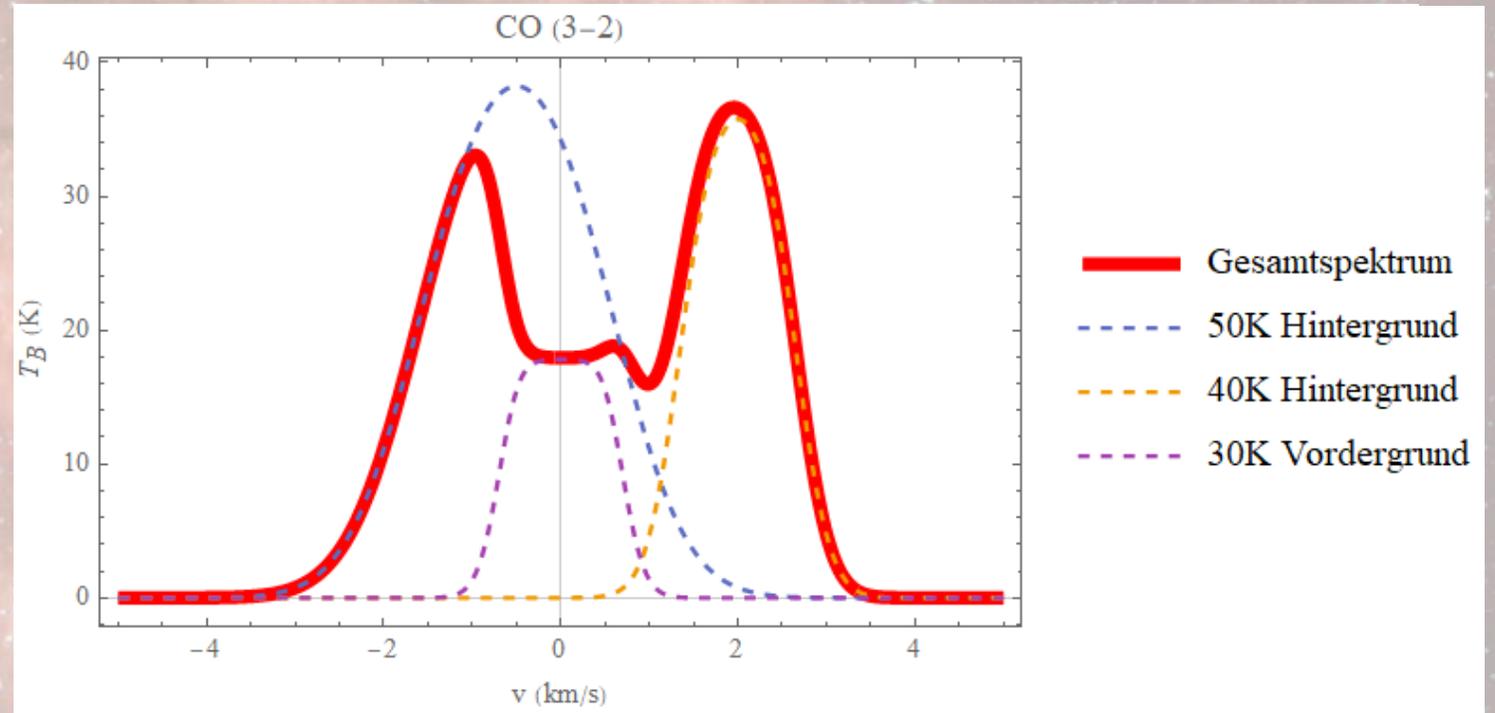
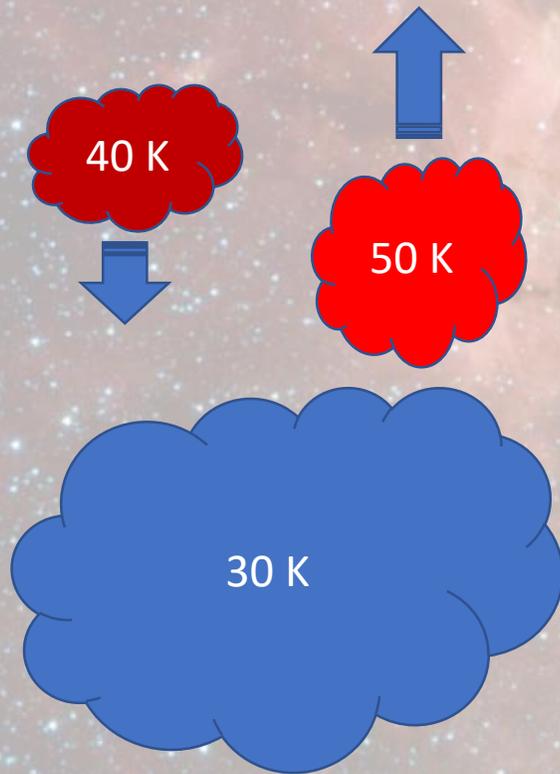


- Auch der Kollaps einer Wolke zeigt ein typisches Muster.

Andere Beispiele sind:

- Rotation
- Kollisionen
- Schockwellen

# Spektroskopische Beobachtungen

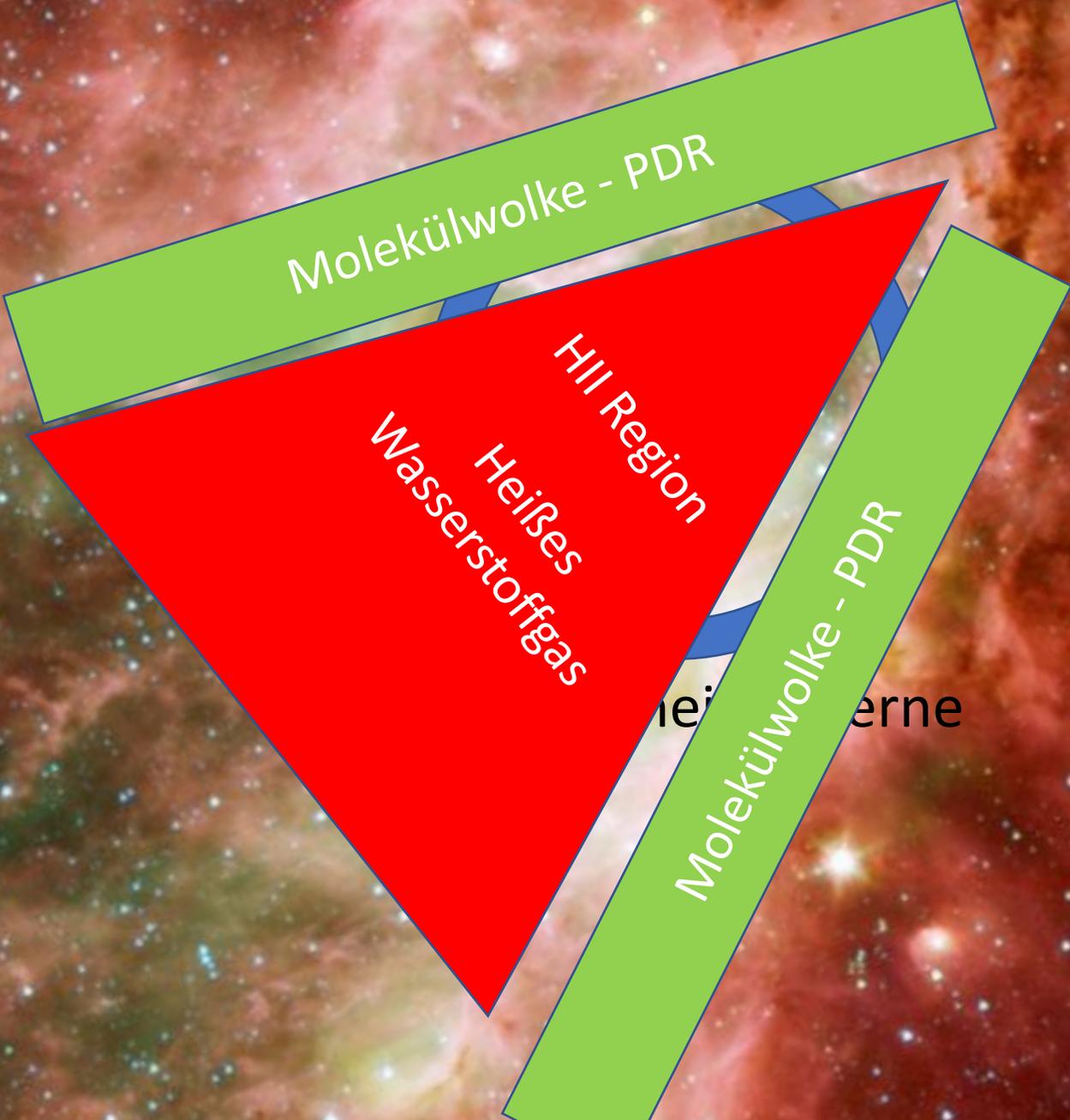


— — — — — Gestrichelte Linien: Spektrum falls man die Wolken einzeln beobachten würde.



M17

~5000 Lichtjahre entfernt



Molekülwolke - PDR

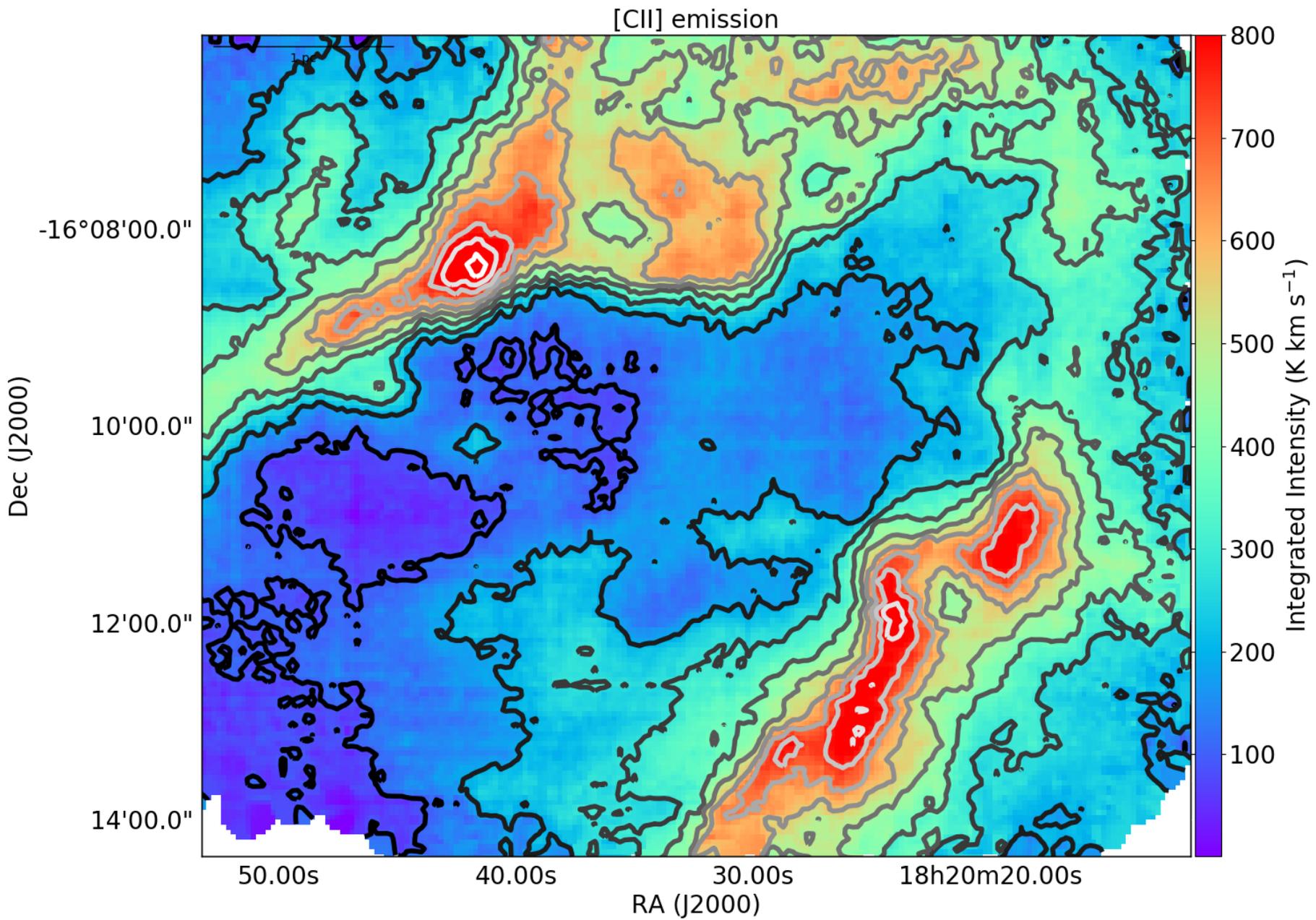
HII Region

Heißes  
Wasserstoffgas

Molekülwolke - PDR

hei ße Kerne

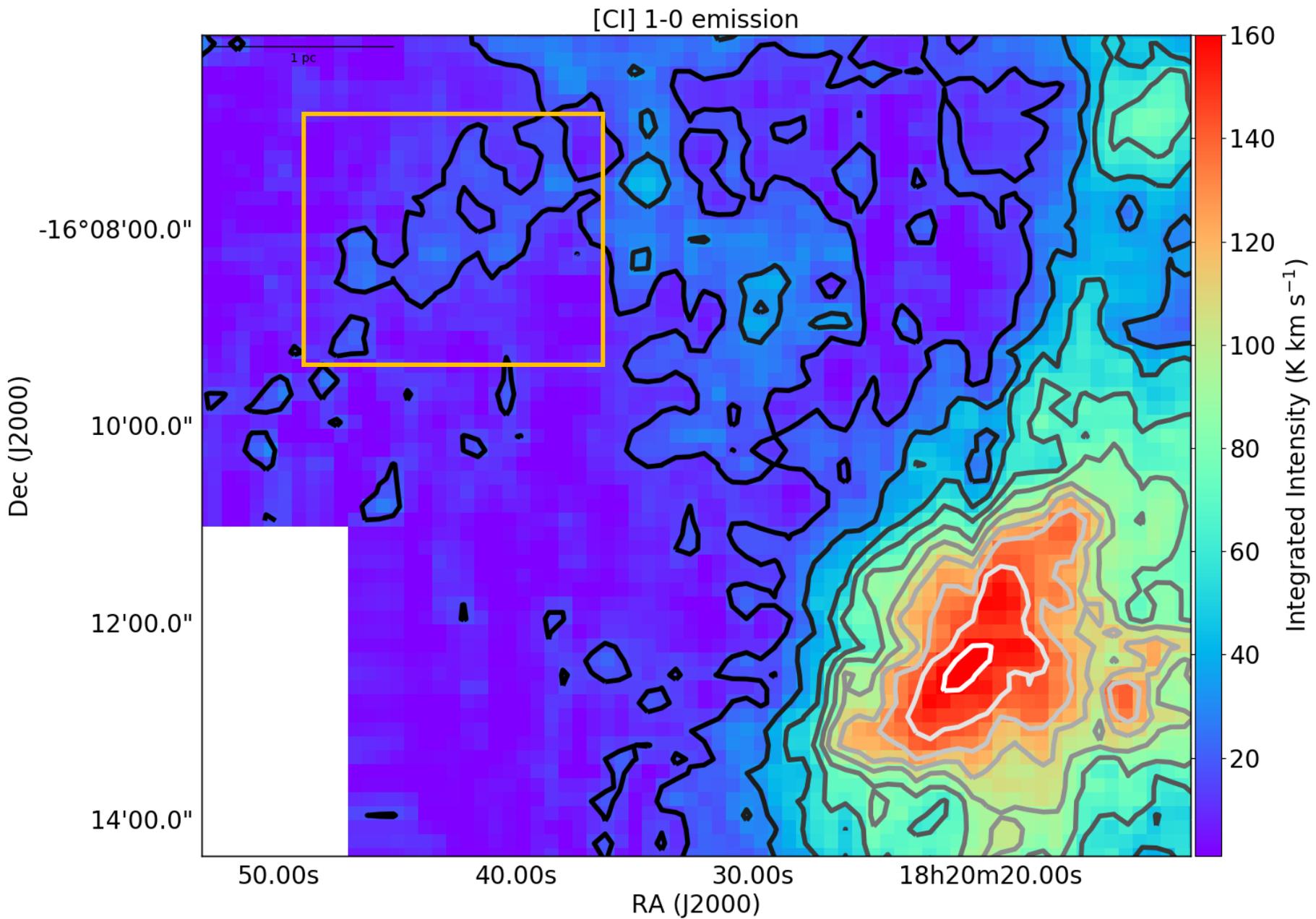




SOFIA Beobachtung:

Karte der Emission  
von  $\text{C}^+$

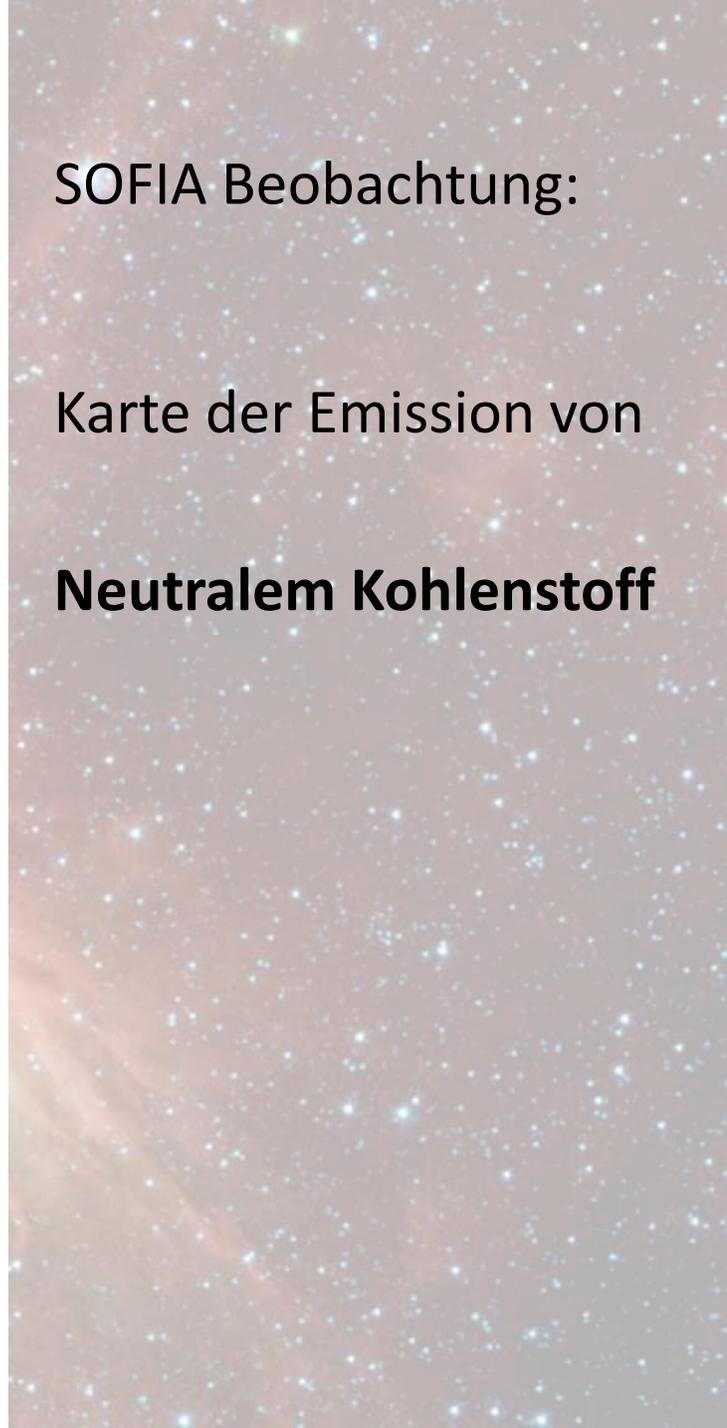


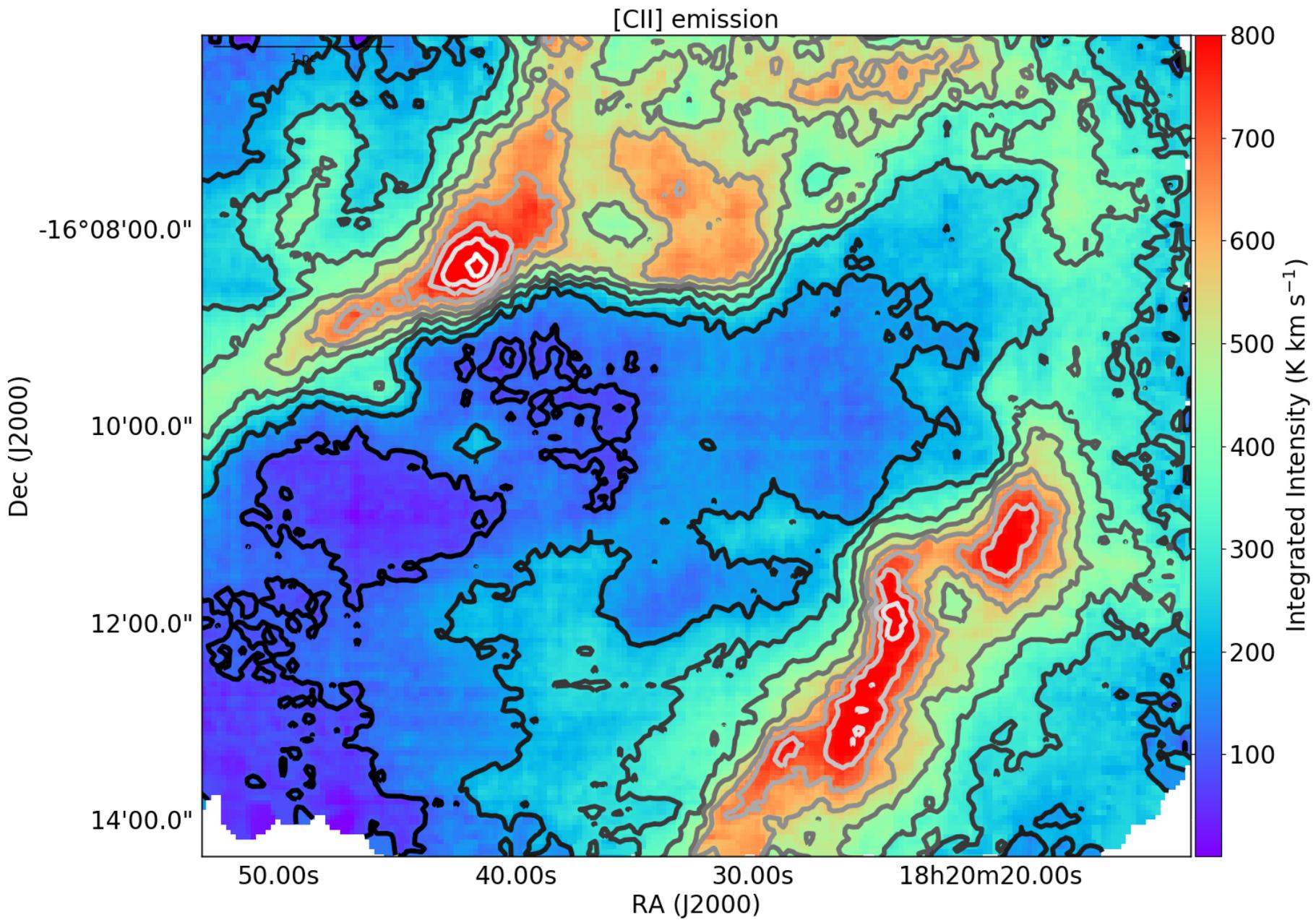


SOFIA Beobachtung:

Karte der Emission von

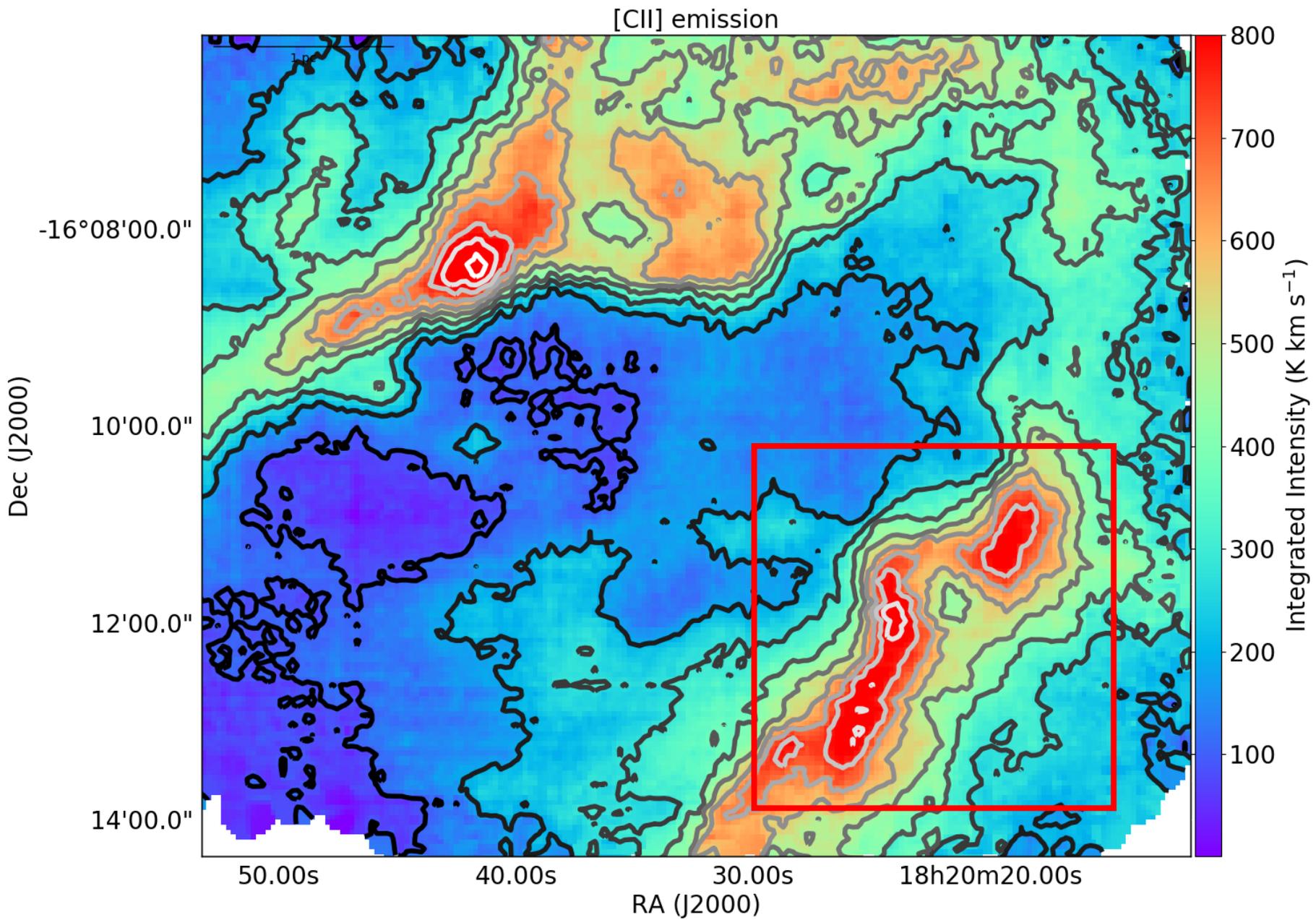
**Neutralem Kohlenstoff**





SOFIA Beobachtung:

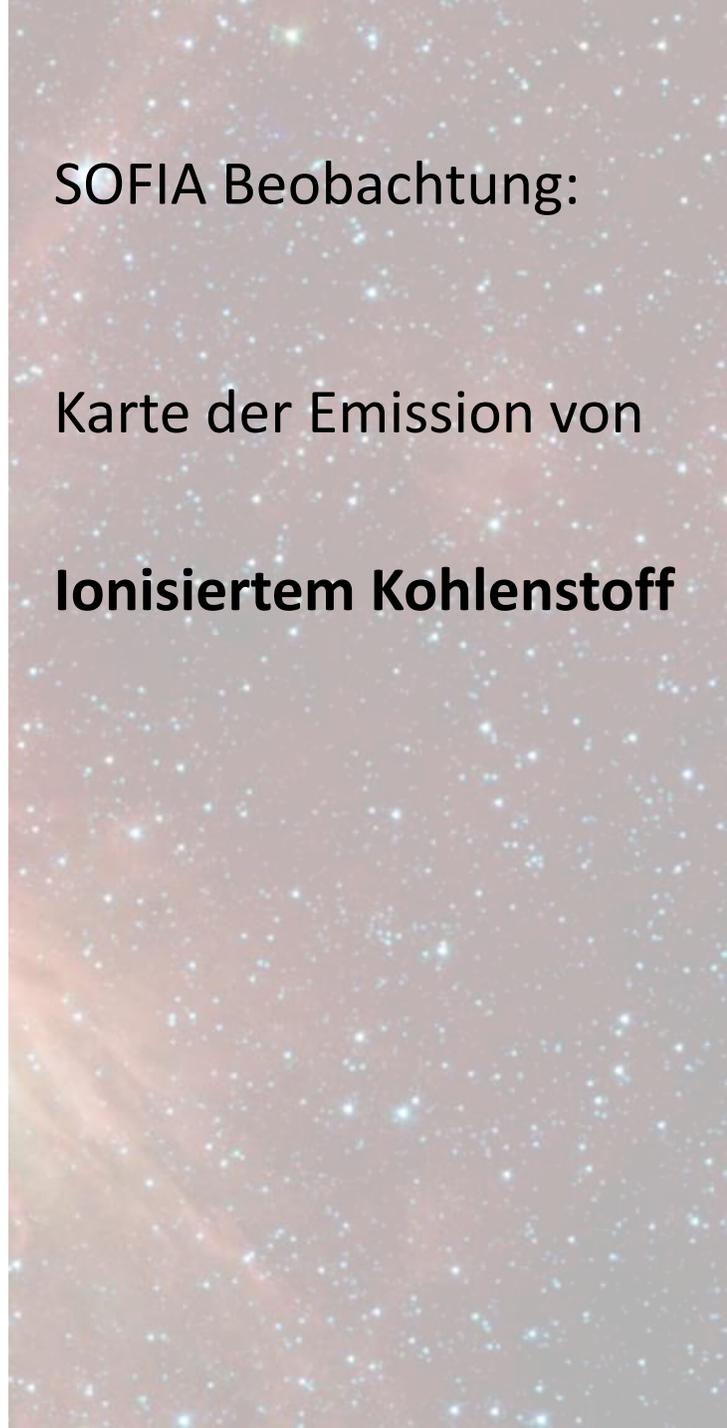
Karte der Emission  
von  $\text{C}^+$



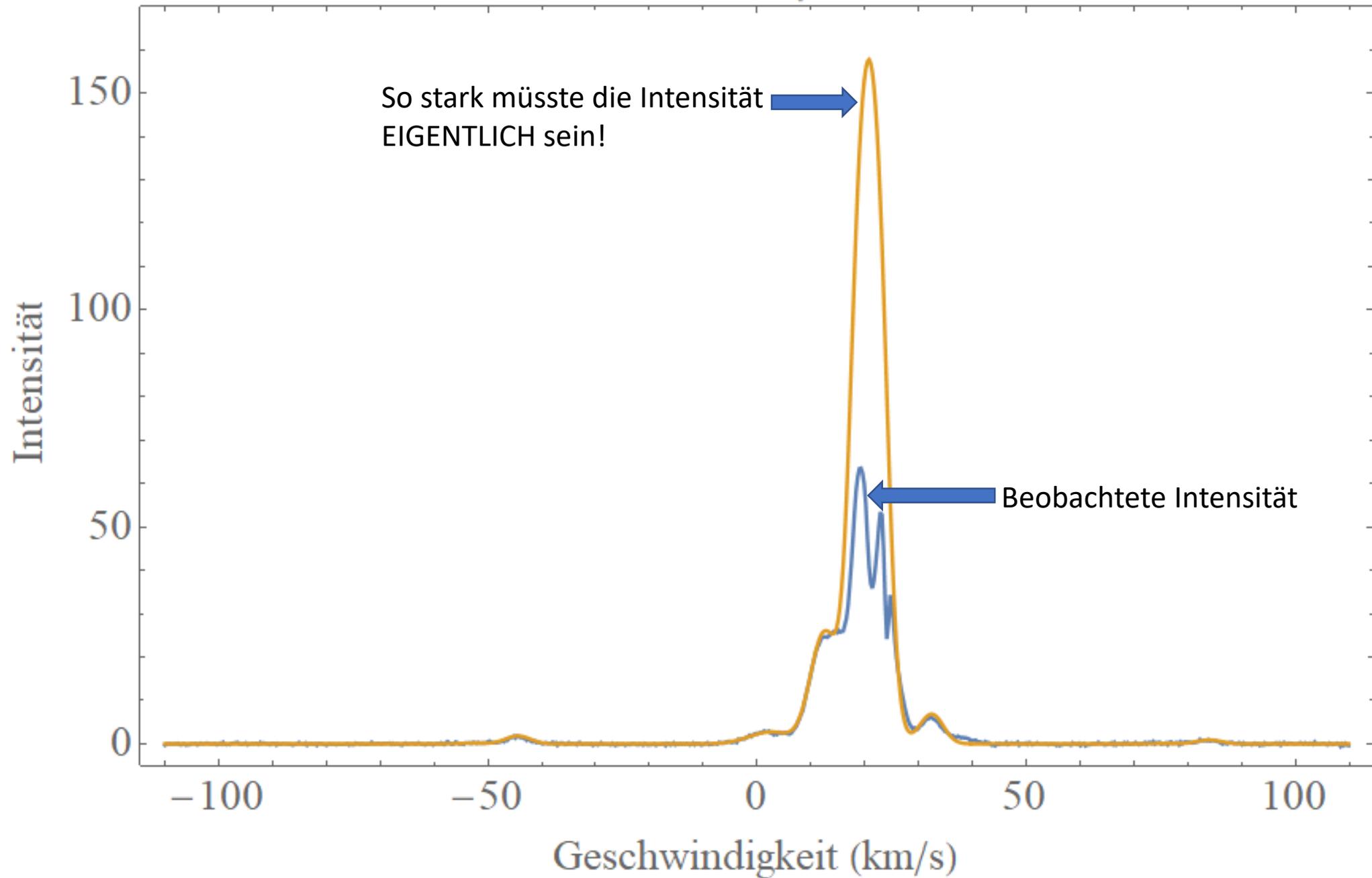
SOFIA Beobachtung:

Karte der Emission von

**Ionisiertem Kohlenstoff**



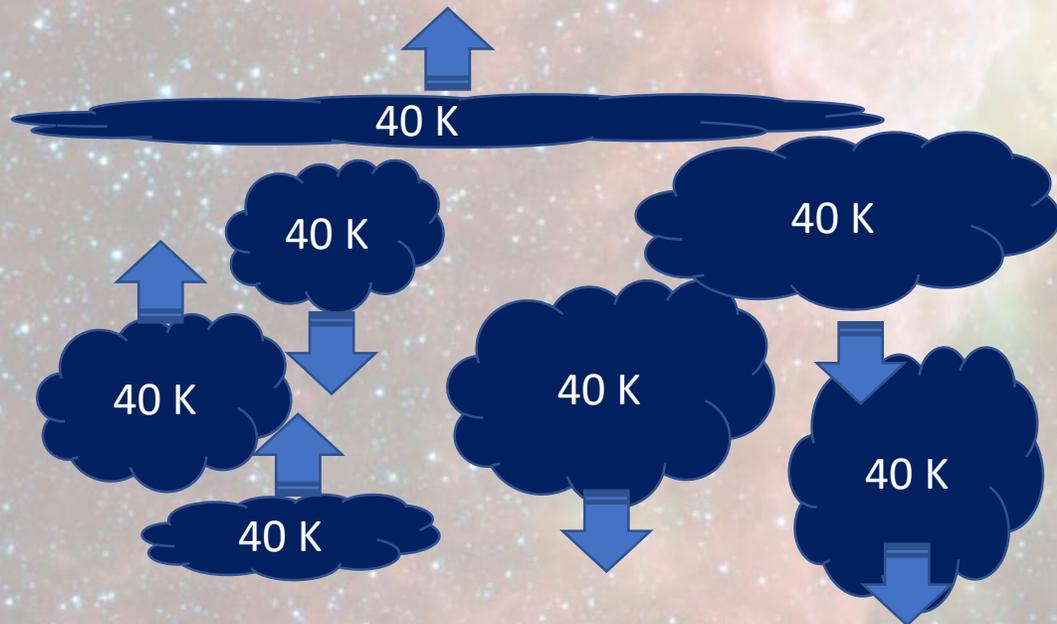
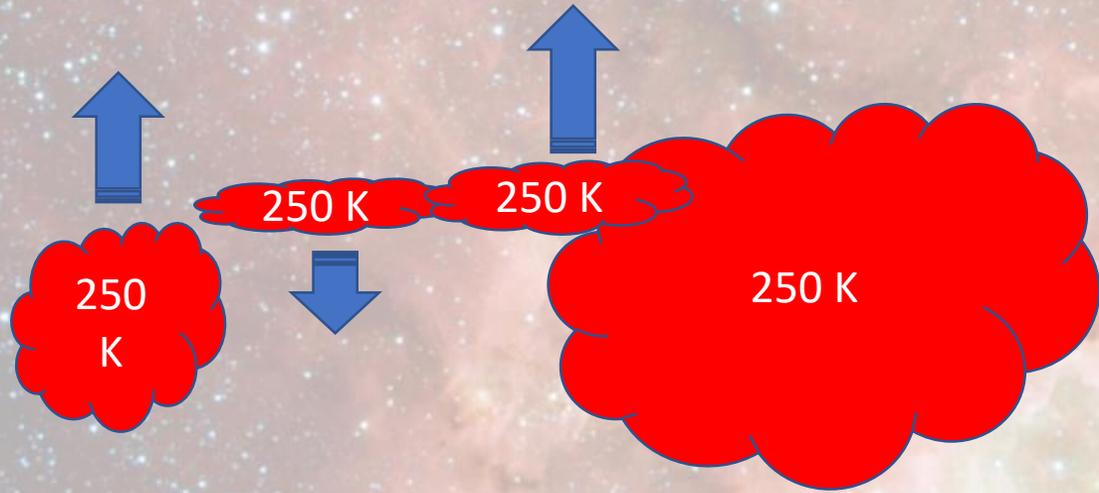
# M17 – [CII] 158 $\mu$ m Emission



# Da fehlt doch was...

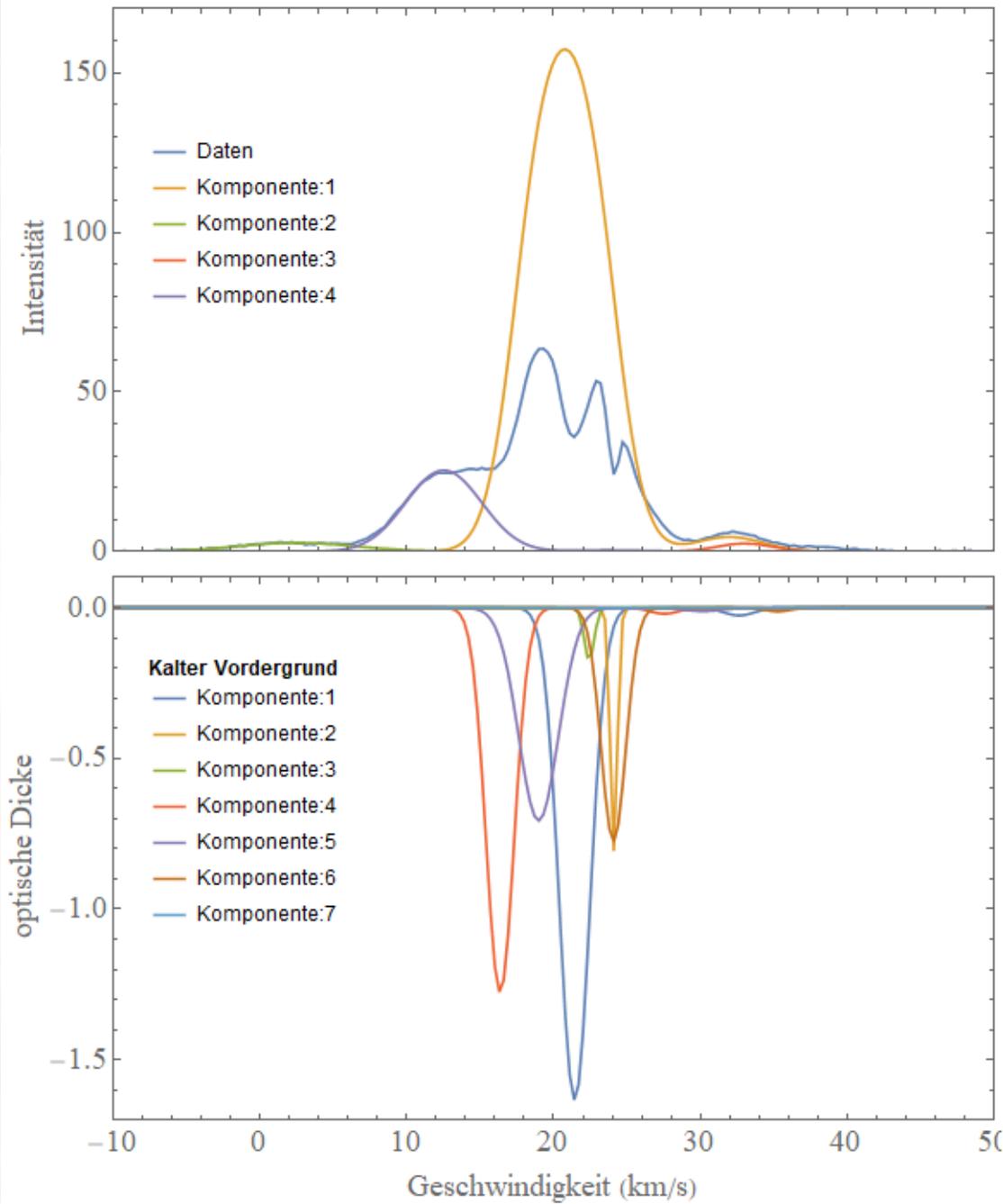
- Die Intensität des Kohlenstoff-Ions  $^{12}\text{C}^+$  zeigt, dass mehrere Wolken-Komponenten an der Abstrahlung beteiligt sind.  
→ nicht verwunderlich. M17 hat eine komplexe Struktur.
- Die Intensität des Kohlenstoff-Isotops  $^{13}\text{C}^+$  zeigt aber, dass uns ein großer Teil der tatsächlich ausgestrahlten Intensität nicht erreicht.

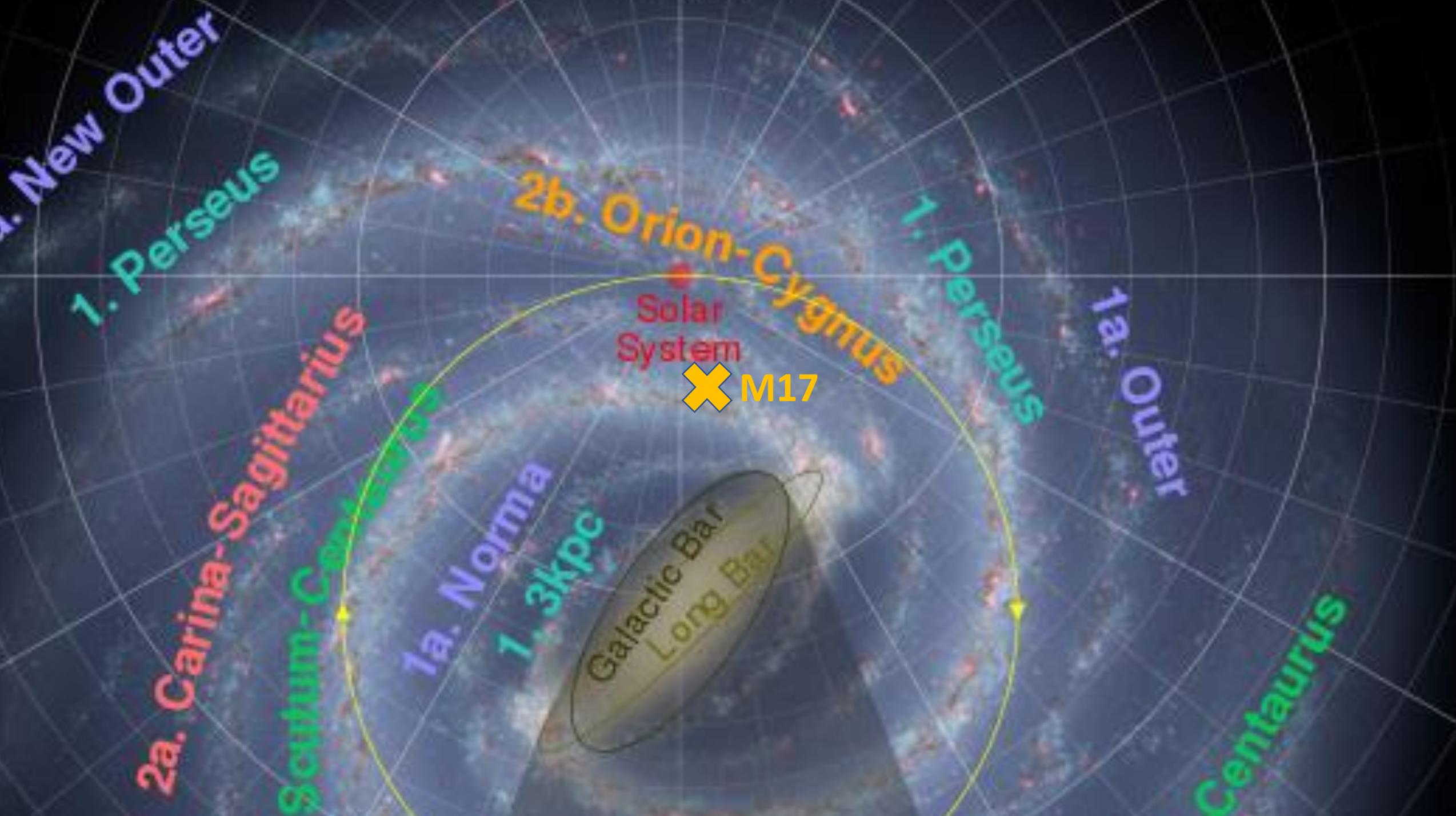
# M17 – Ein neues Bild



Guevara, PhD 2019

M17 – [CII] 158 $\mu$ m warmer Hintergrund





2b. Orion-Cygnus

Solar System

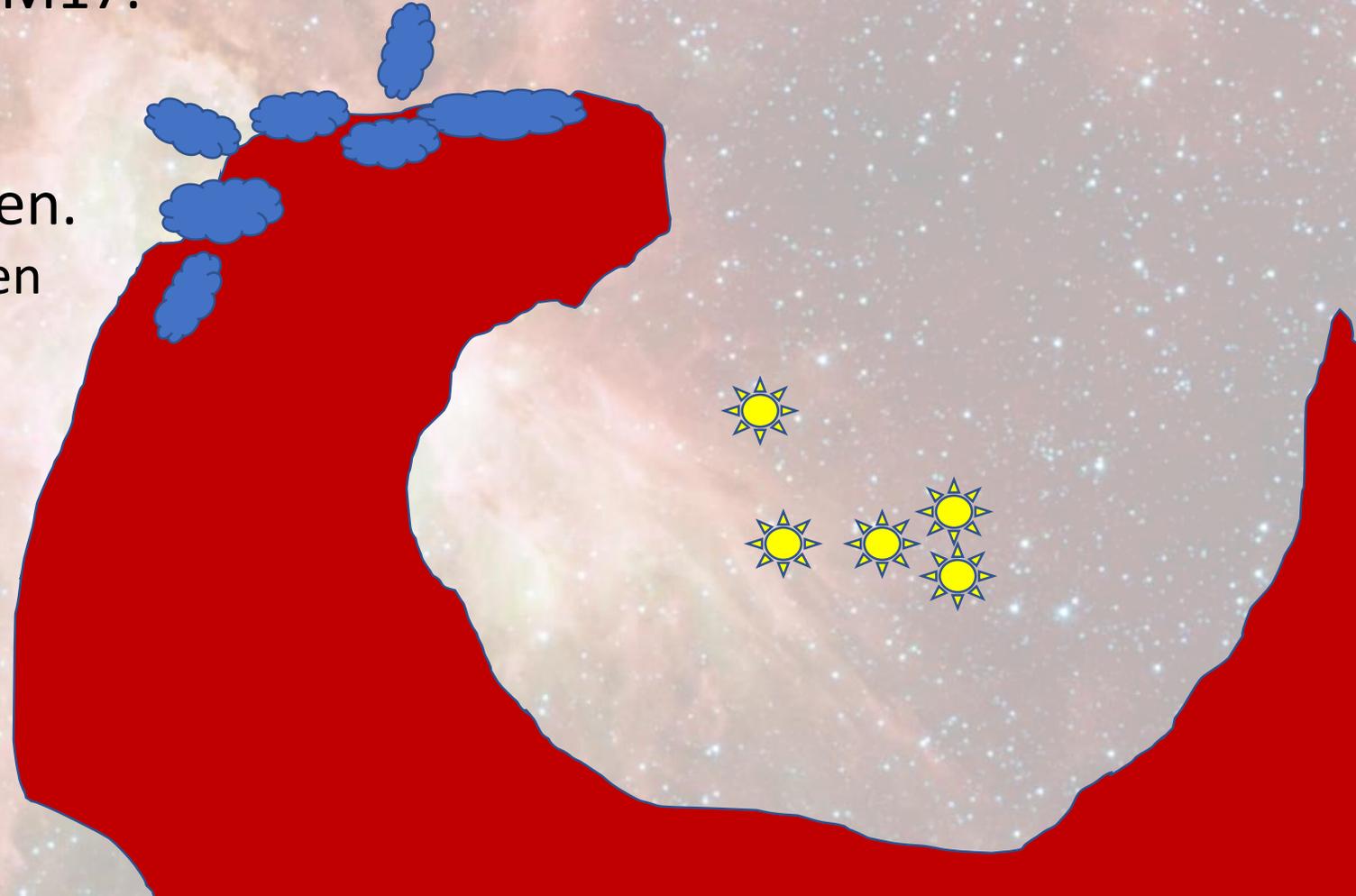
perseus





# Alternative Erklärung

- Kalten Wolken gehören zu M17.
- Komplexe Geometrische Konfiguration könnte das Spektrum evtl. auch erklären.
  - Abgeschirmt vor den Sternen
  - Im Vordergrundaber
  - Warum kalt?
- Darf nicht zu kompliziert sein, da wir so etwas oft beobachten!



# Die Beobachtungen sind ein Rätsel

## THEORIE

- Molekülwolken sind entlang der Spiralarme angesiedelt
  - Sternentstehung
- Der Raum zwischen den Wolken und den Spiralarmen ist angefüllt mit diffusem Gas
  - Sehr geringe Dichten  $< 100$  Teilchen/cm<sup>-3</sup>
  - Sehr geringe Säulendichten
  - Warm/heiß (70-5000 Kelvin)
- Ionisierter Kohlenstoff emittiert anstatt zu absorbieren

## BEOBACHTUNG

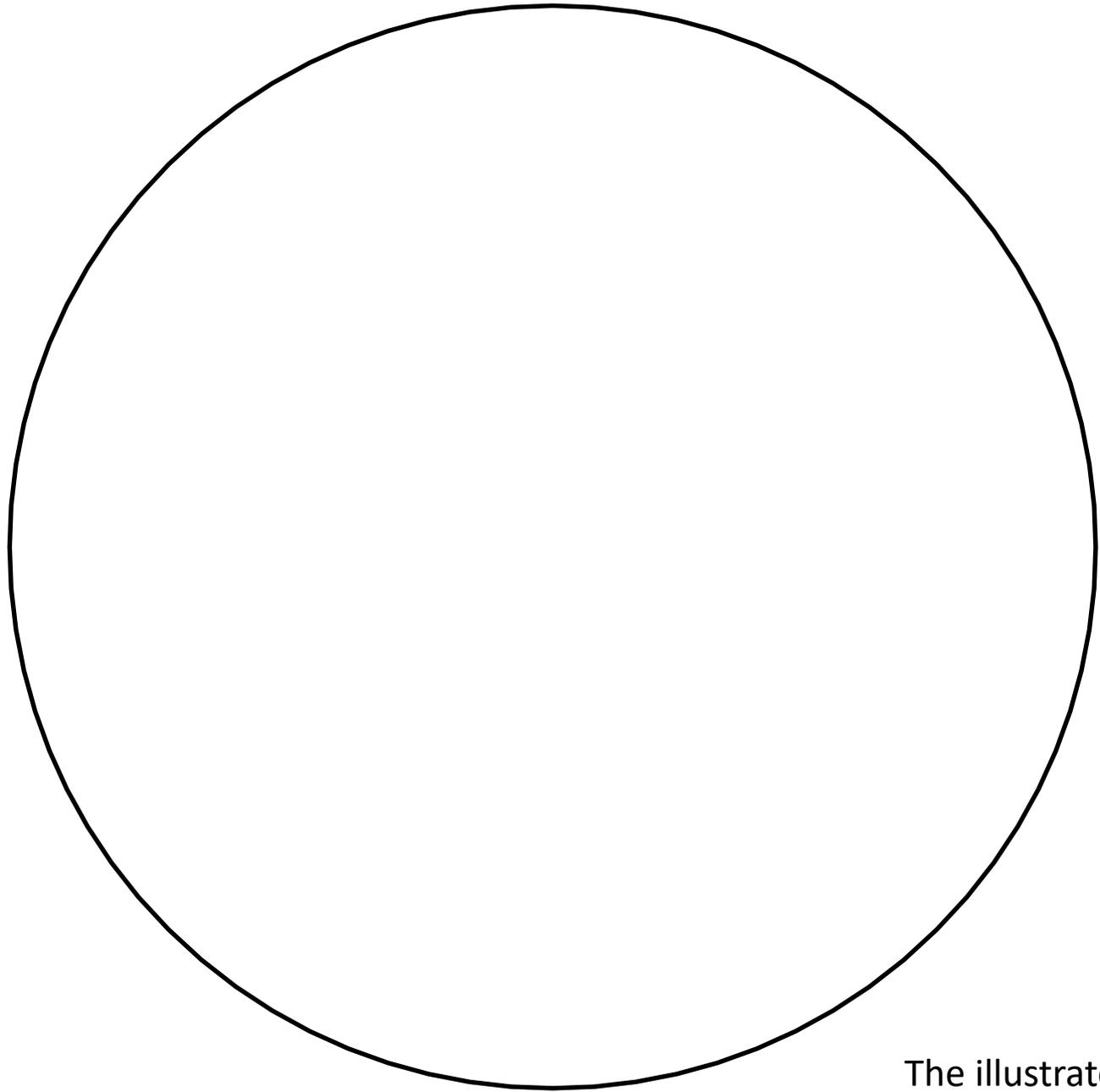
- Zwischen uns und M17 befinden sich Gaswolken die Strahlung von C<sup>+</sup> absorbieren:
  - ‚Hohe Dichten‘  $\sim 10000$  Teilchen/cm<sup>-3</sup>
  - Hohen Säulendichten (ausgedehnt)
  - **Kalt** (40 Kelvin)
  - Wie weit im Vordergrund von M17 ?
- **Die dürfte es da nicht geben!**
  - In kalten Dichten Wolken wird aus C<sup>+</sup>  $\rightarrow$  C
  - Wenn es C<sup>+</sup> gibt sollte die Wolke viel wärmer sein.
  - Evtl. Heizung durch Röntgen- oder Kosmische Strahlung?

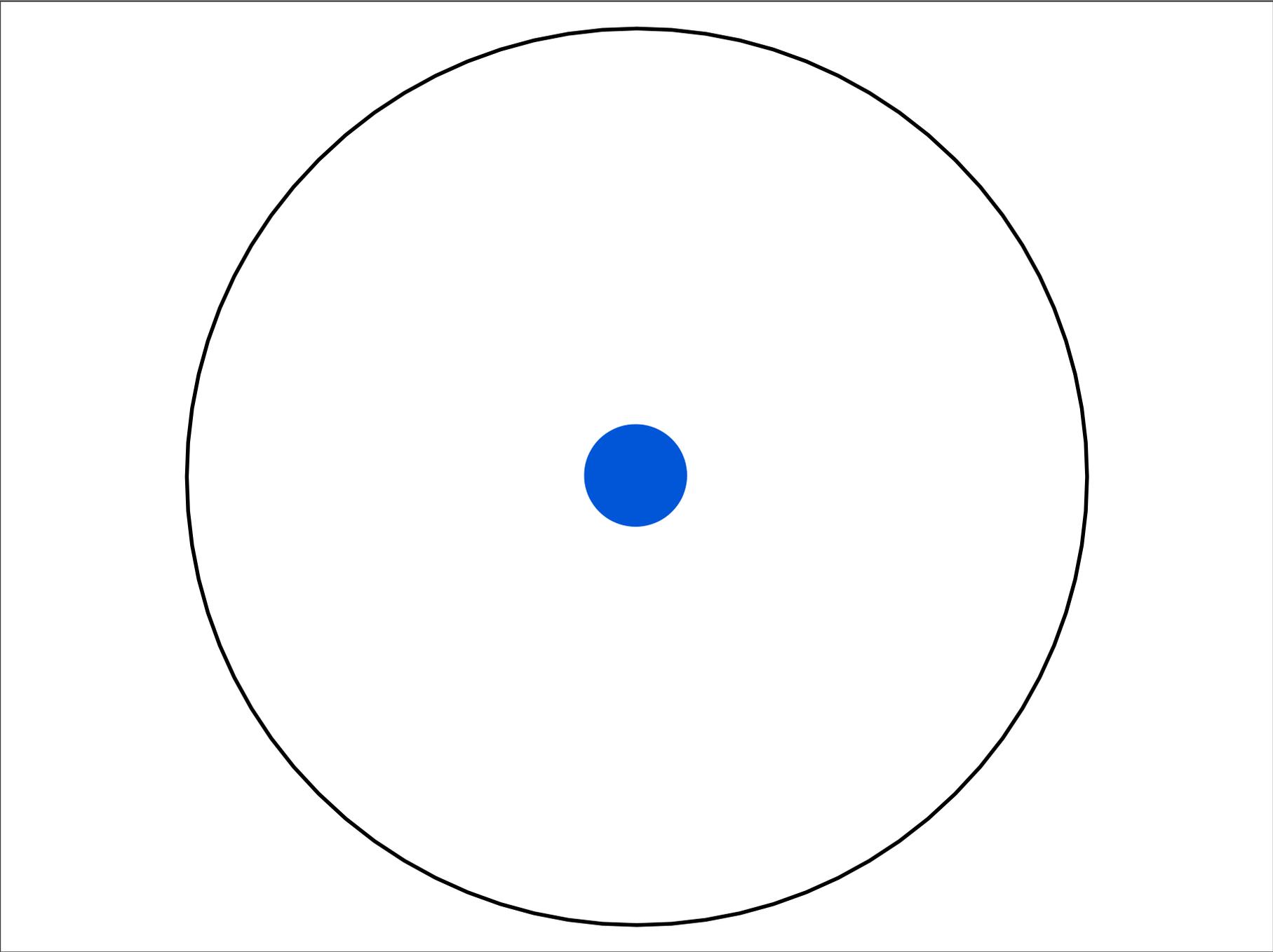
# aber Rätsel sind gut, denn

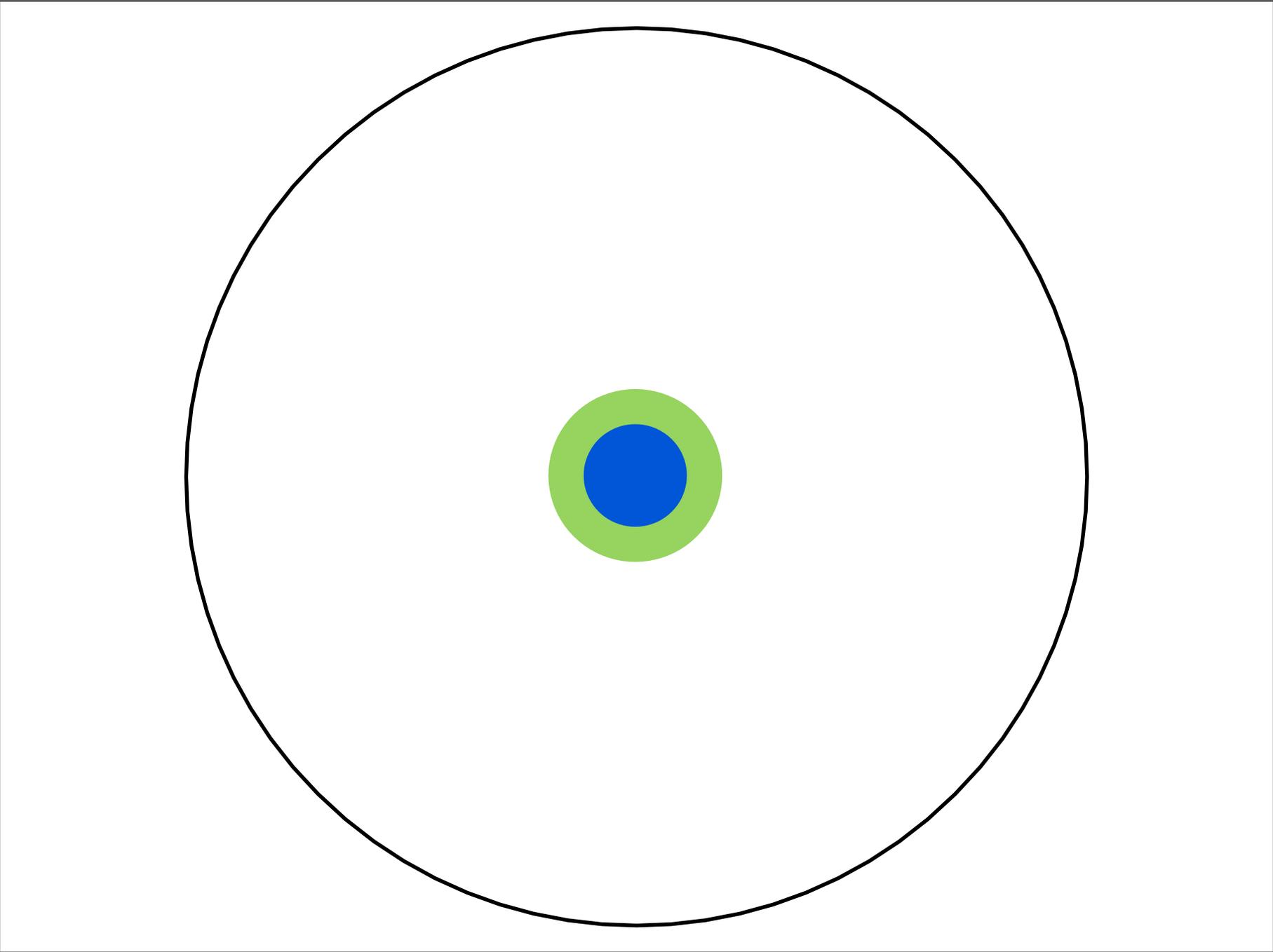
- Schritt für Schritt entschlüsseln wir das Bild des Kosmos.
- Beobachtungen mit SOFIA helfen uns dabei die Galaxie immer besser zu verstehen.
- Damit verstehen wir auch immer besser wie die Sonne und unsere Planeten entstehen konnten.
- Wir lernen immer besser, unter welchen Bedingungen Leben entstehen konnte.

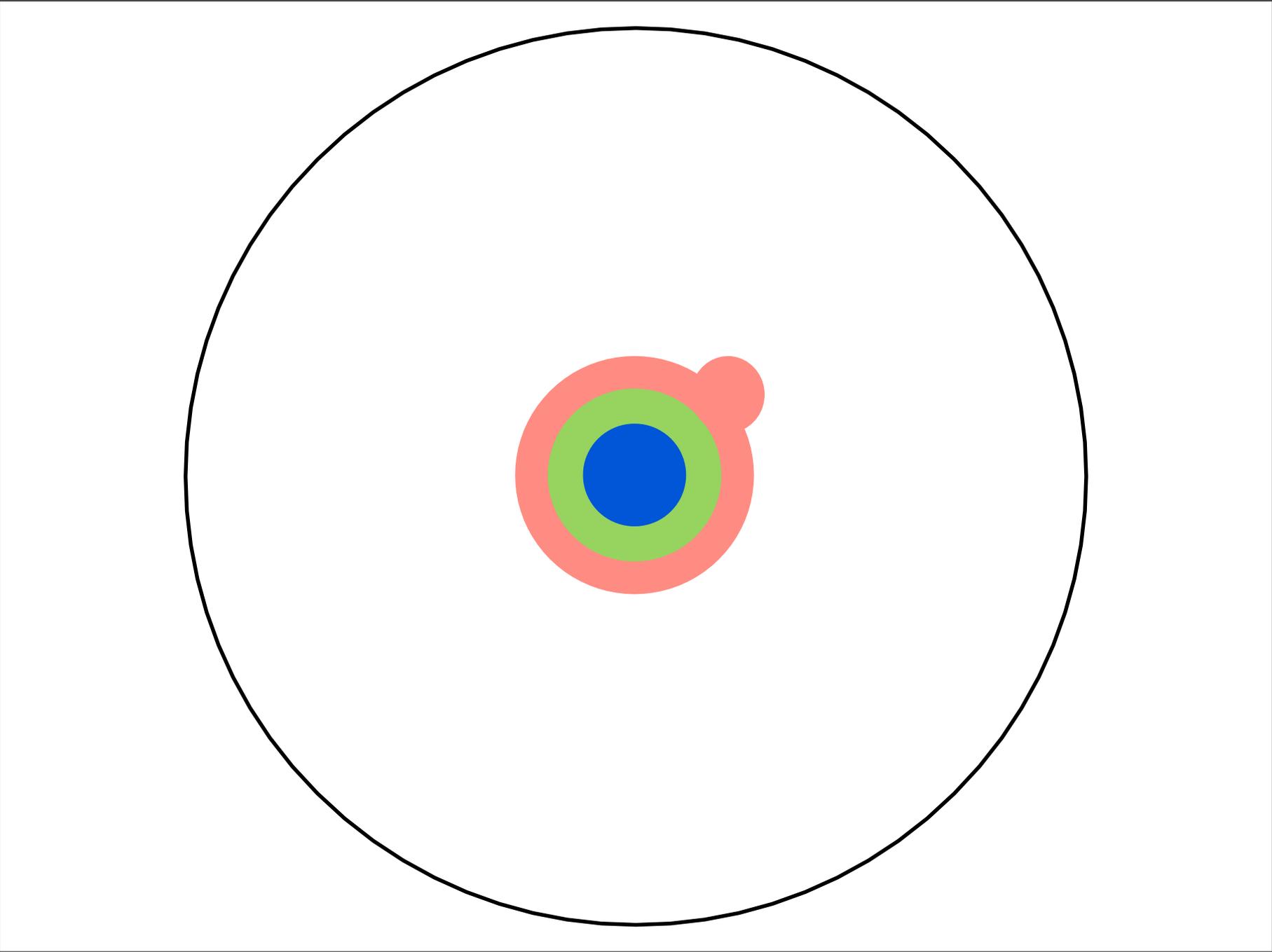
# Gar nicht Post-Faktisch

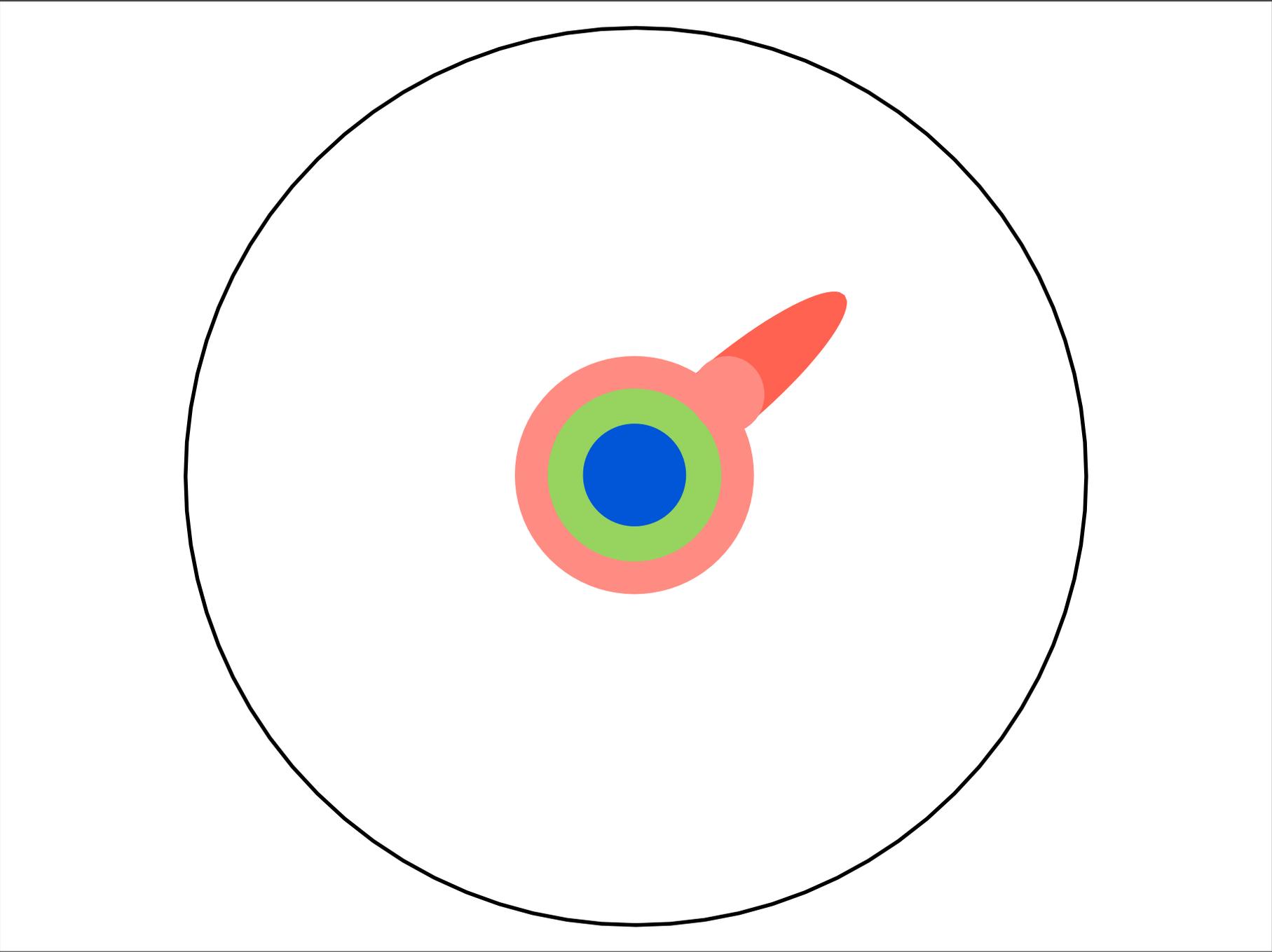
- Wie stellt sich die Wissenschaft ständig selbst in Frage.
- Wieso „wissen“ wir eigentlich was wir „wissen“?
- Gibt es unnützes Wissen?

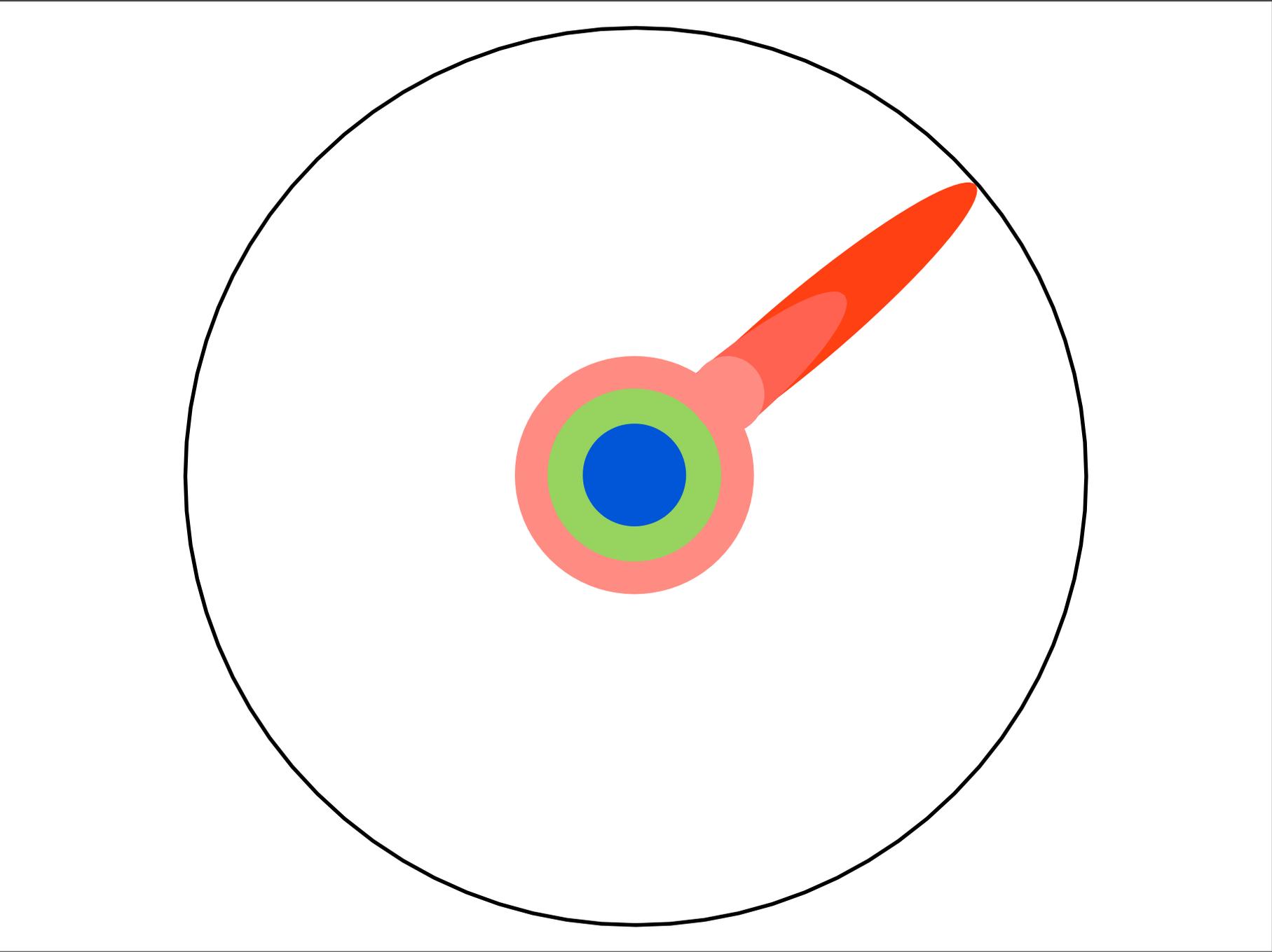


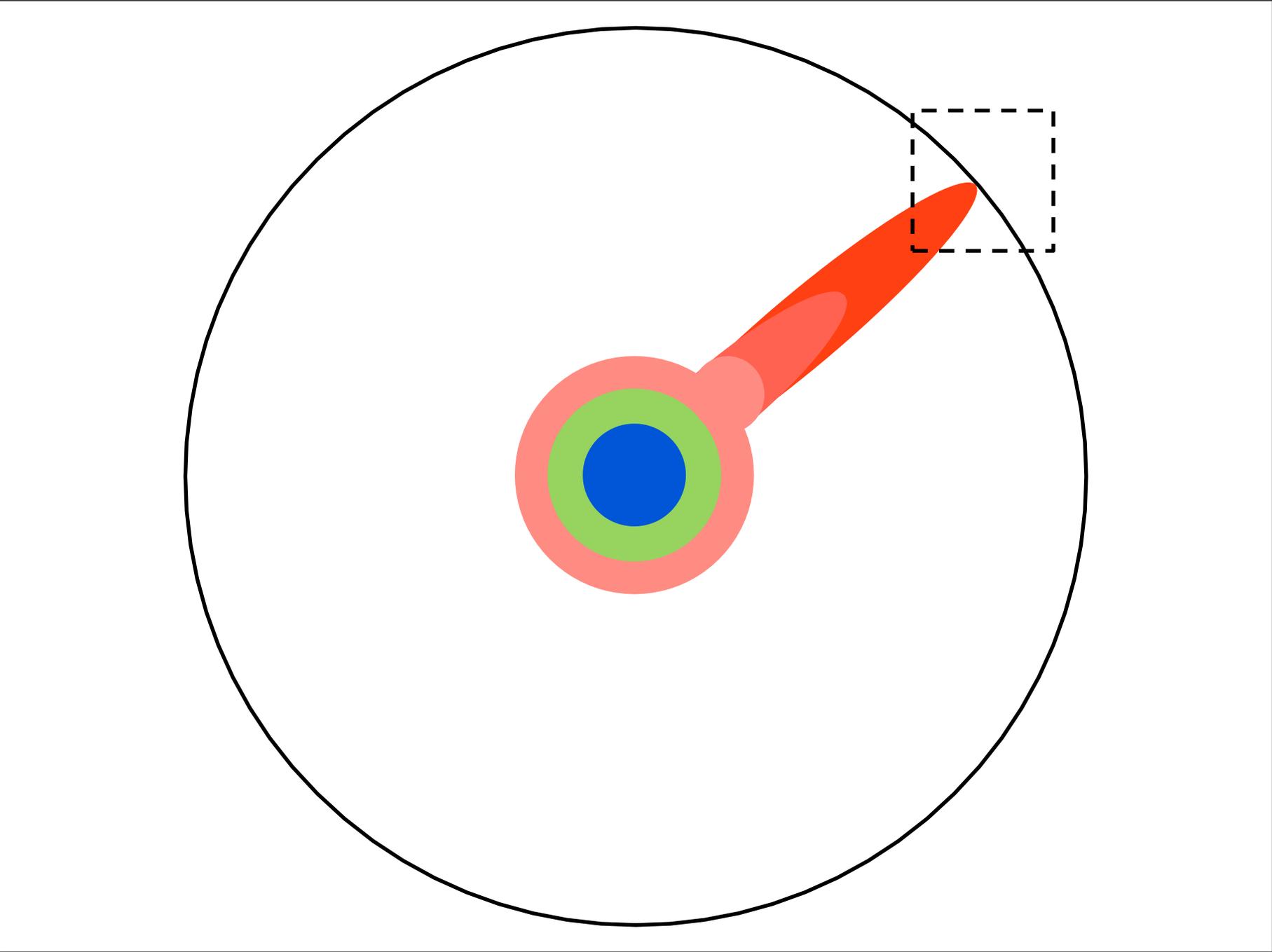


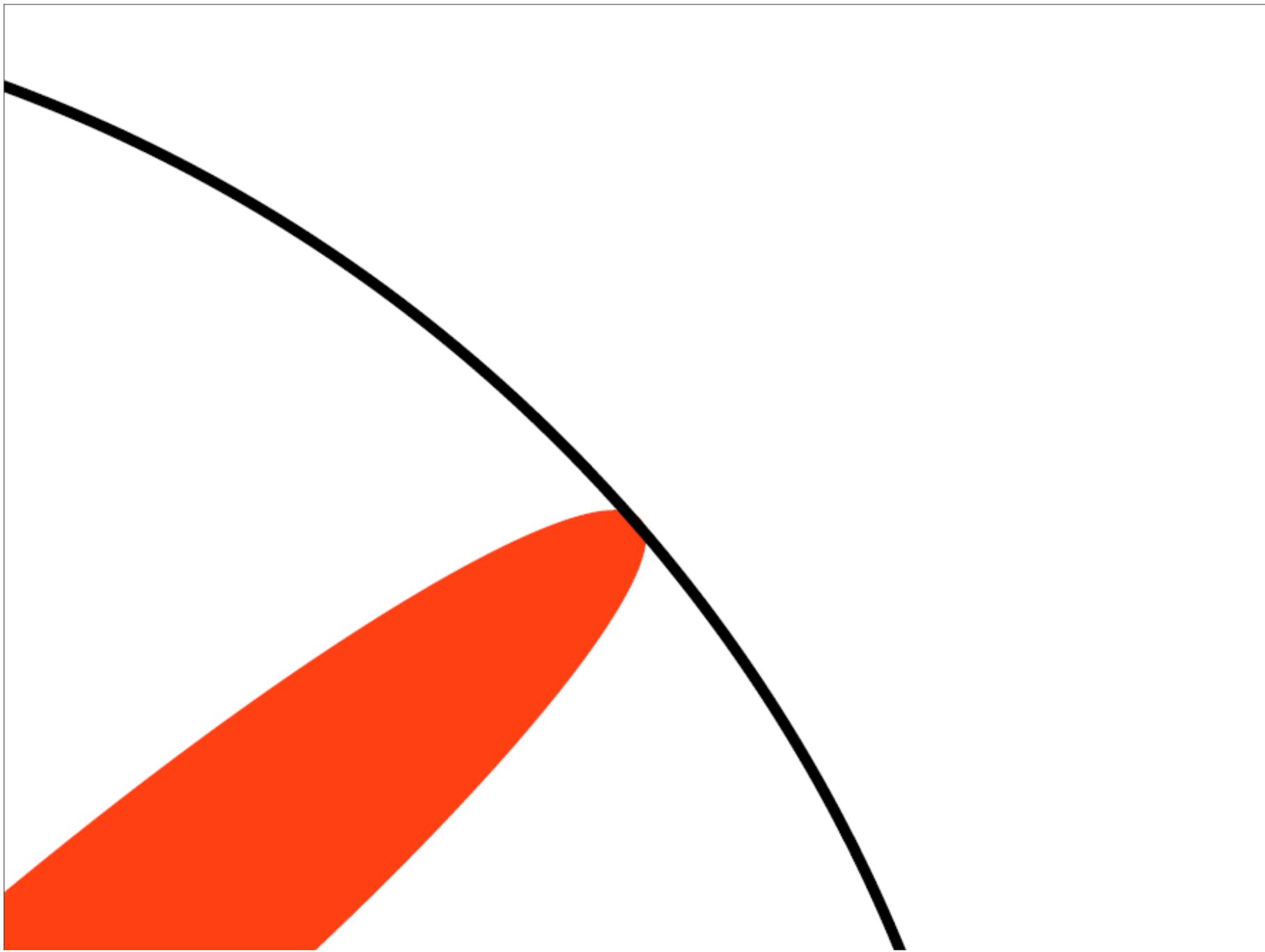


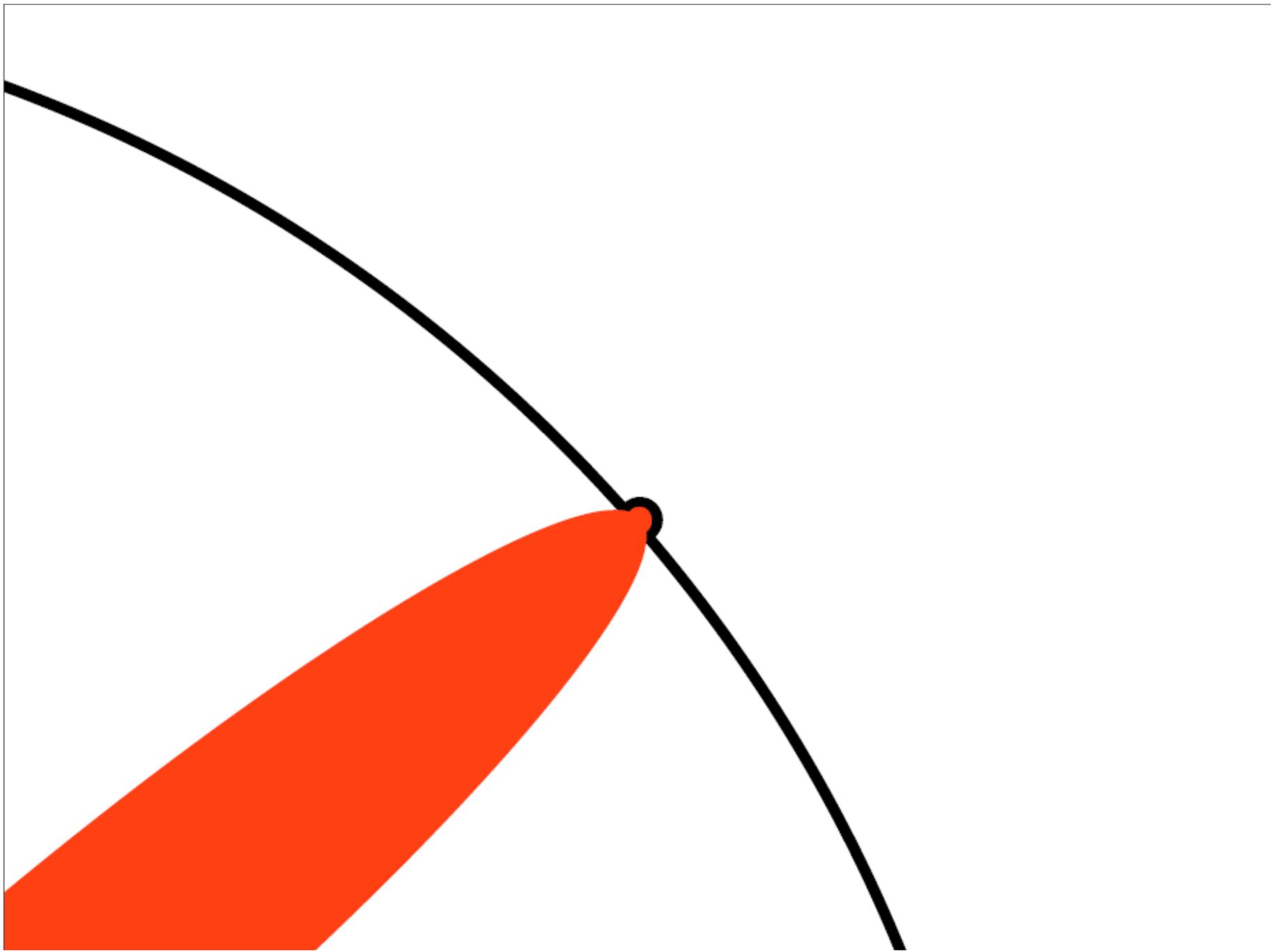


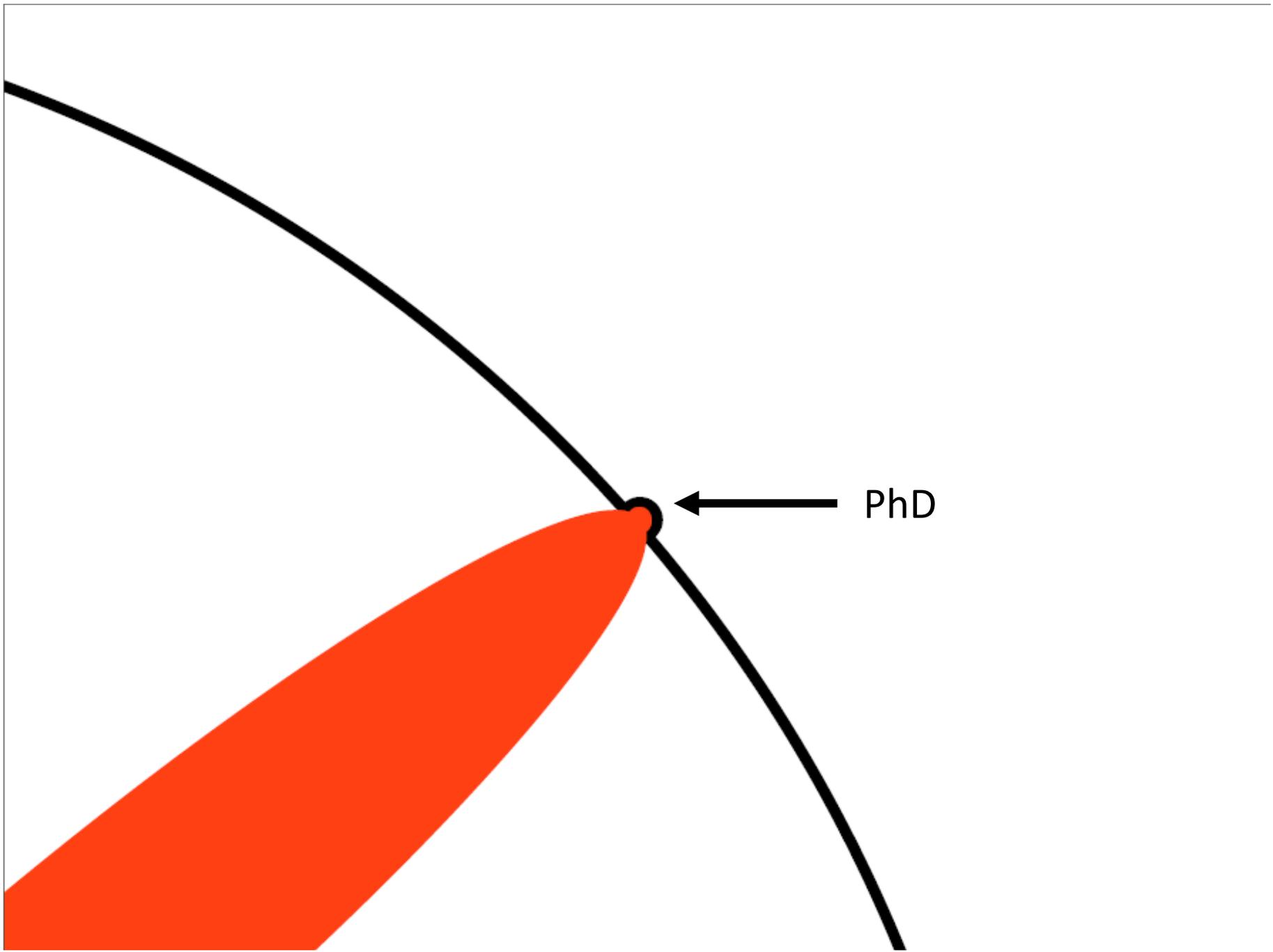




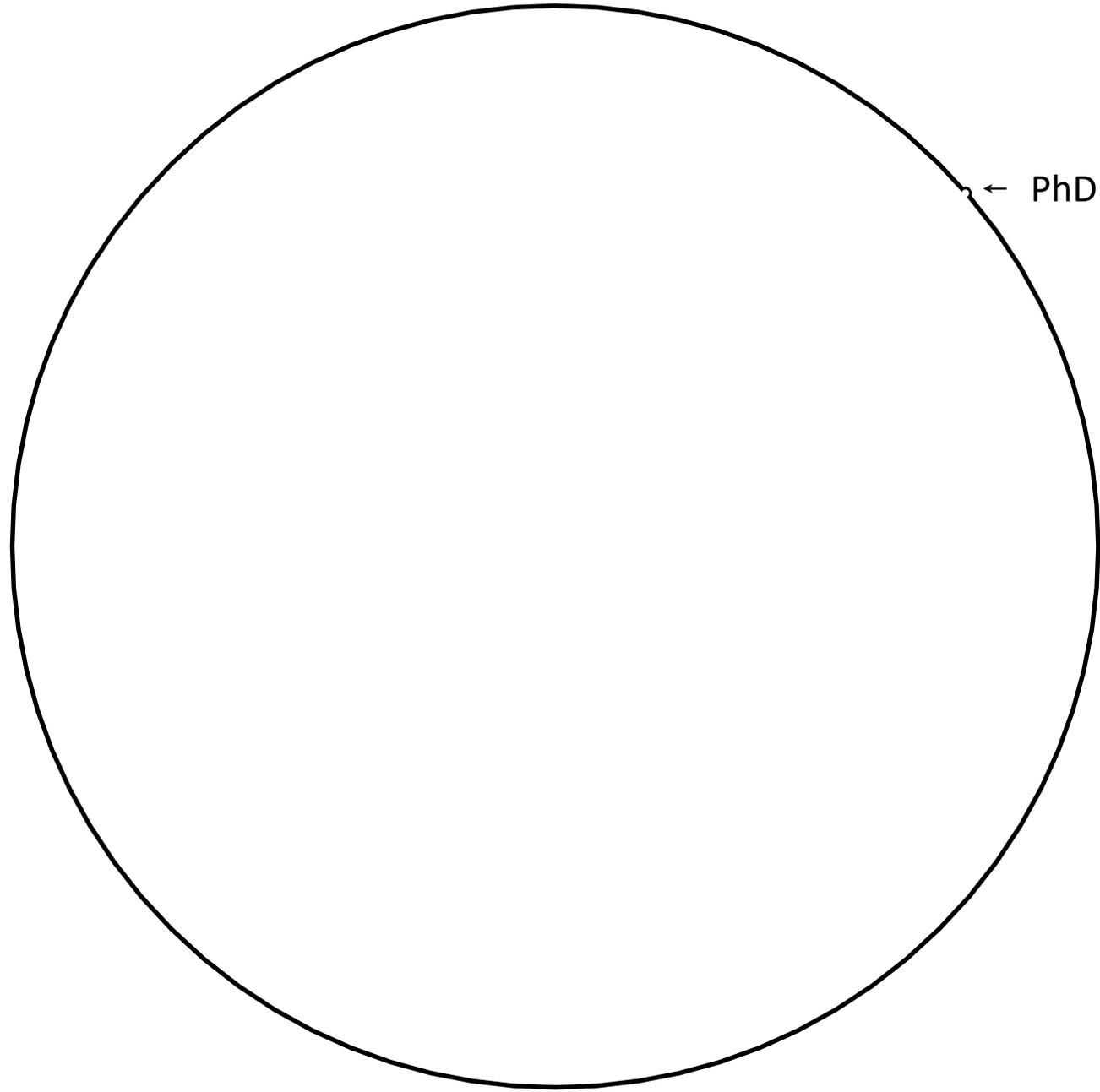










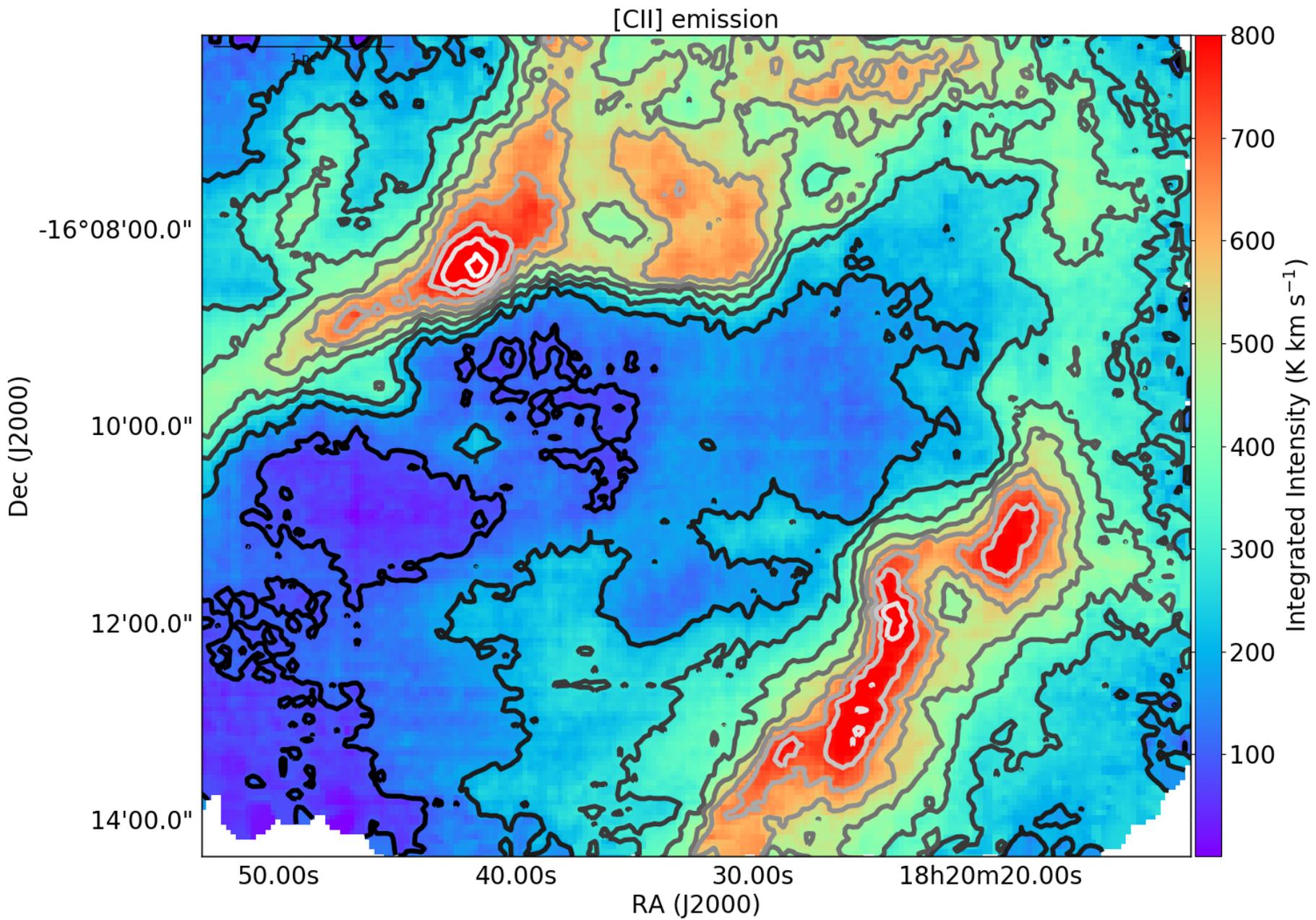


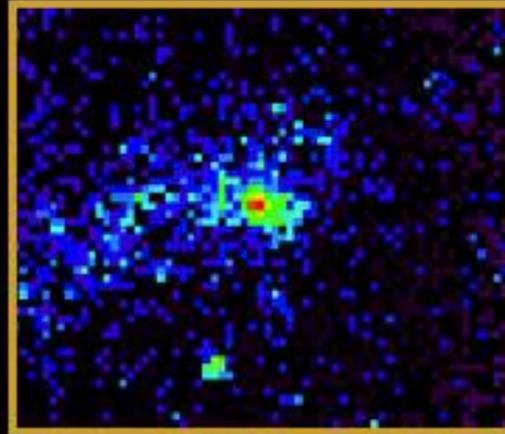
← PhD

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**









X-Ray: ROSAT



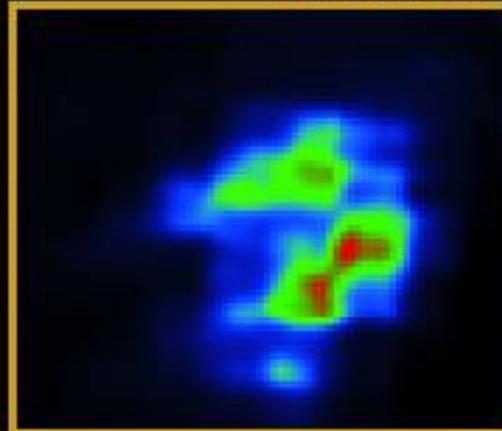
Visible: DSS



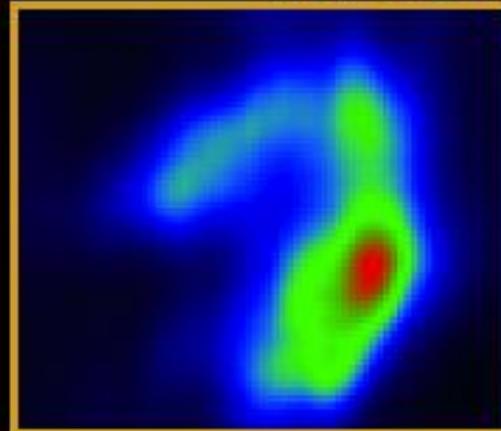
Visible: Color © AAO



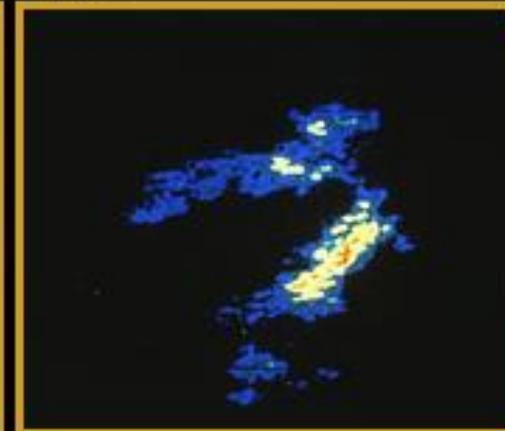
Near-Infrared: 2MASS



Mid-Infrared: IRAS



Far-Infrared: IRAS



Radio: VLA

# M17

