



M17 - Omega Nebel



# Den Gasen auf der Spur

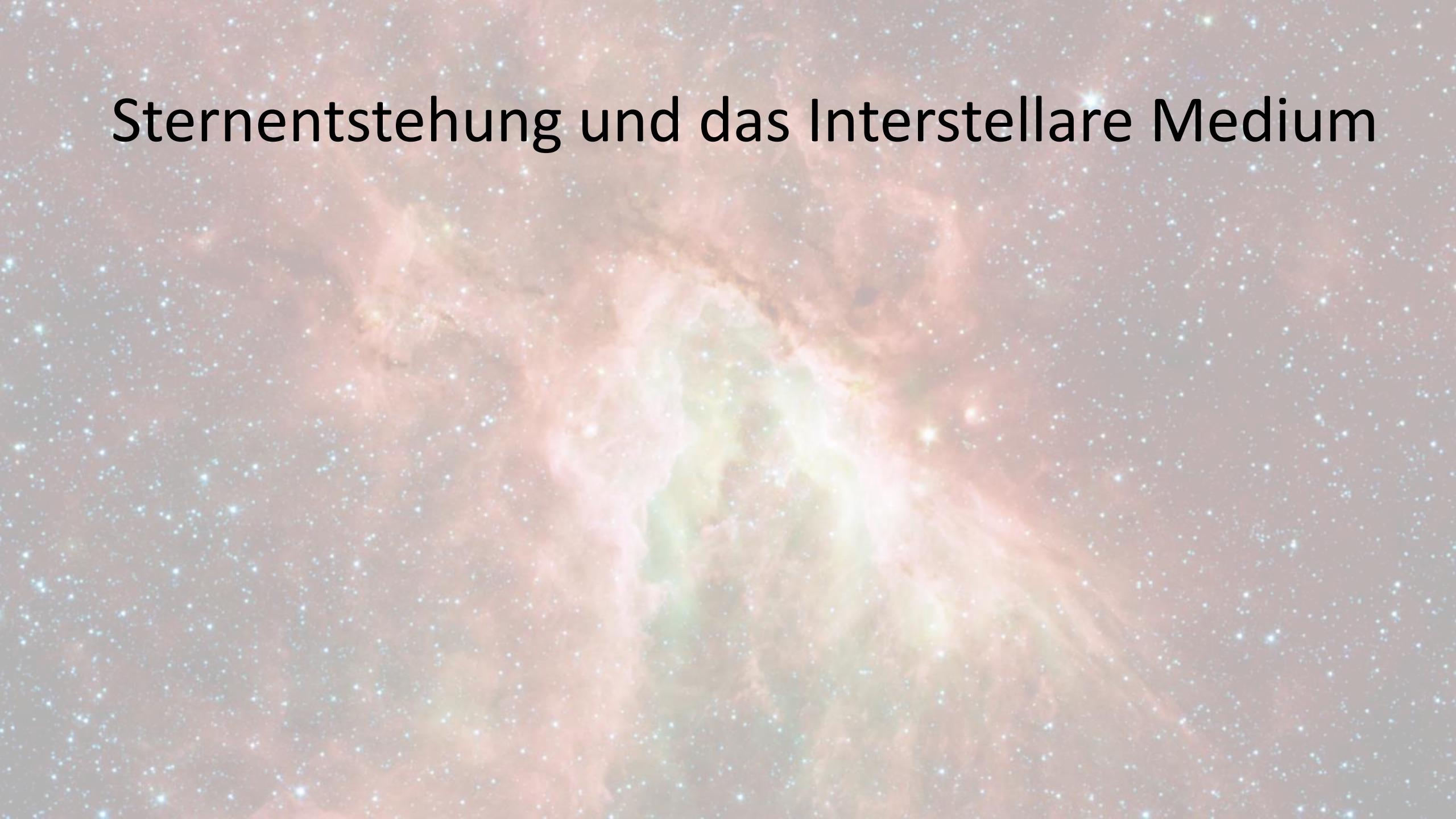
-

## Molekülspektroskopie mit dem SOFIA Observatorium

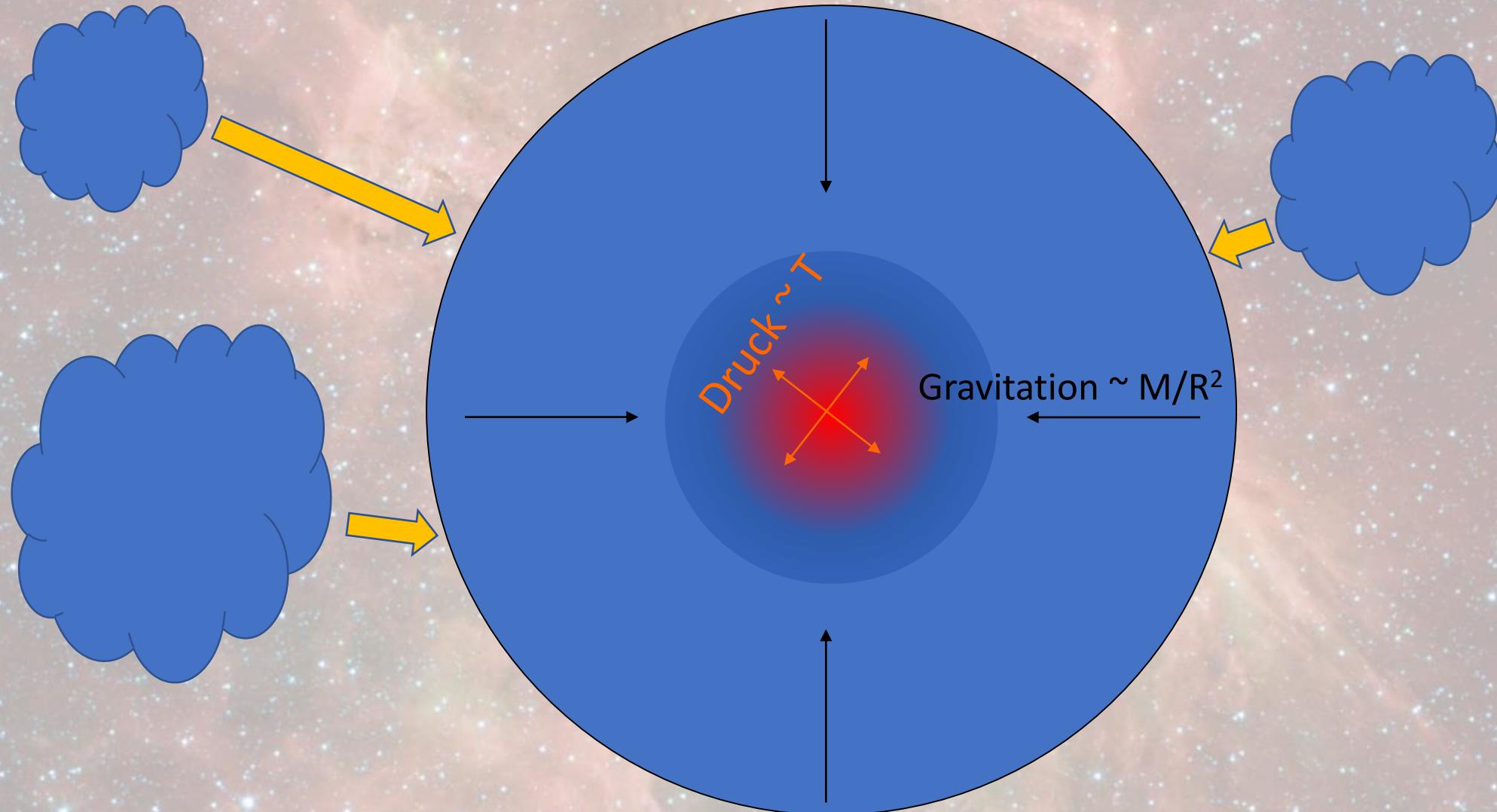
Dr. Markus Röllig  
Universität zu Köln



# Sternentstehung und das Interstellare Medium



# Eine Molekülwolke kollabiert



# Eine Molekülwolke kollabiert

Gravitation=Druck

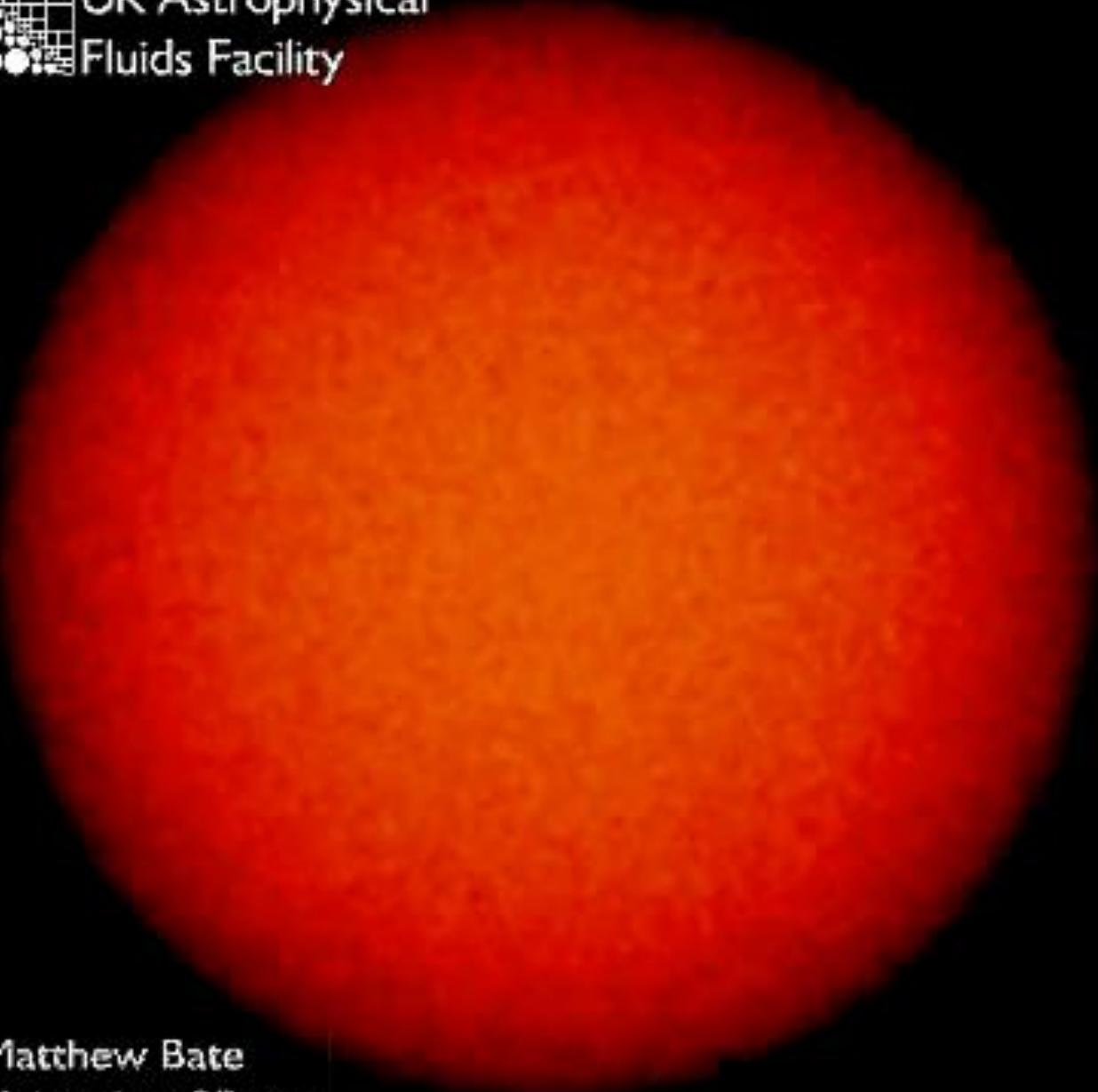
stabil

Gravitation>Druck

kollabiert

Gravitation<Druck

zerstreut



A large, bright orange sphere, likely representing the Sun or a star, is centered against a solid black background. The sphere has a visible granular texture and a slight gradient from yellow at the center to red at the edges.

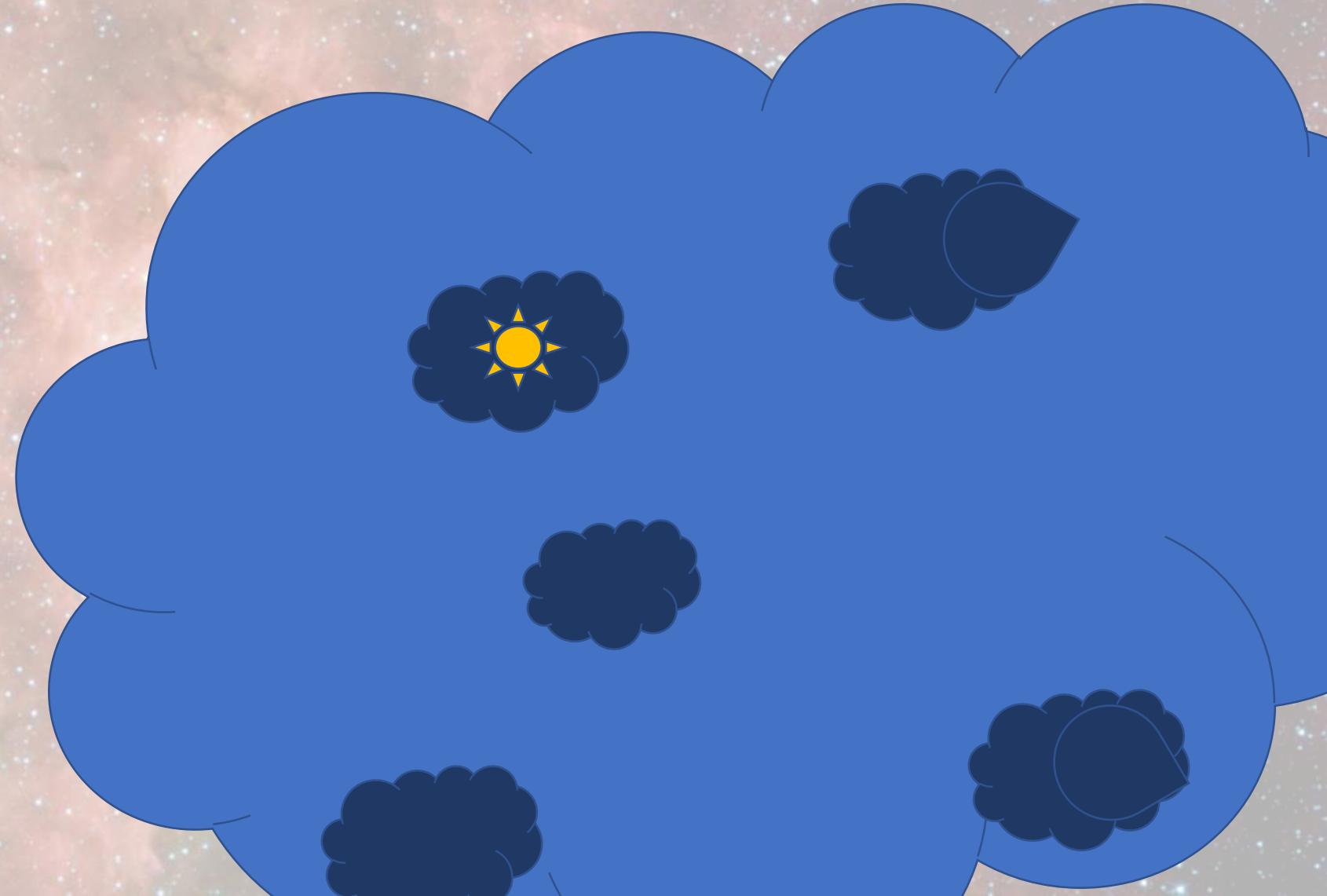
Matthew Bate  
*University of Exeter*



Gravitativer Kollaps  
verwandelt Gas sehr  
effizient in Sterne

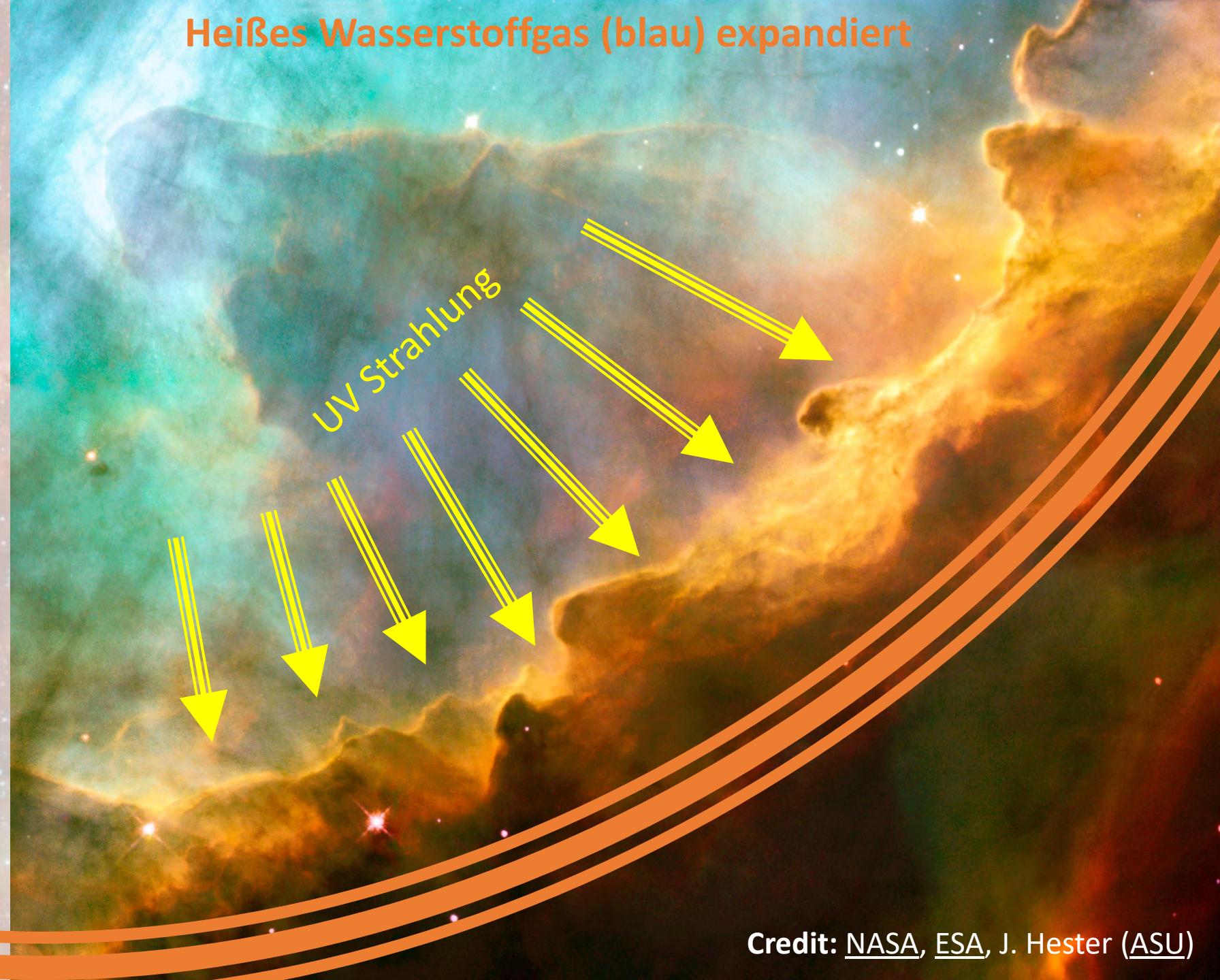
**VIEL ZU EFFIZIENT**

# Sternentstehung – animiert und verhindert



# Hubbles Blick auf M17

Heißes Wasserstoffgas (blau) expandiert

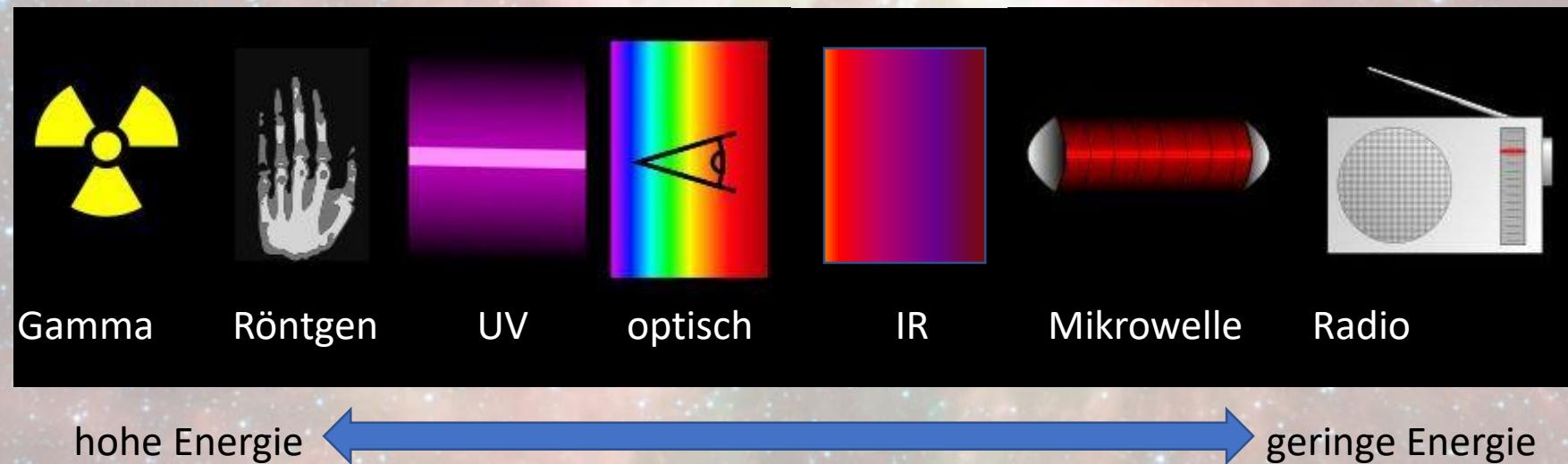


Credit: [NASA](#), [ESA](#), J. Hester ([ASU](#))

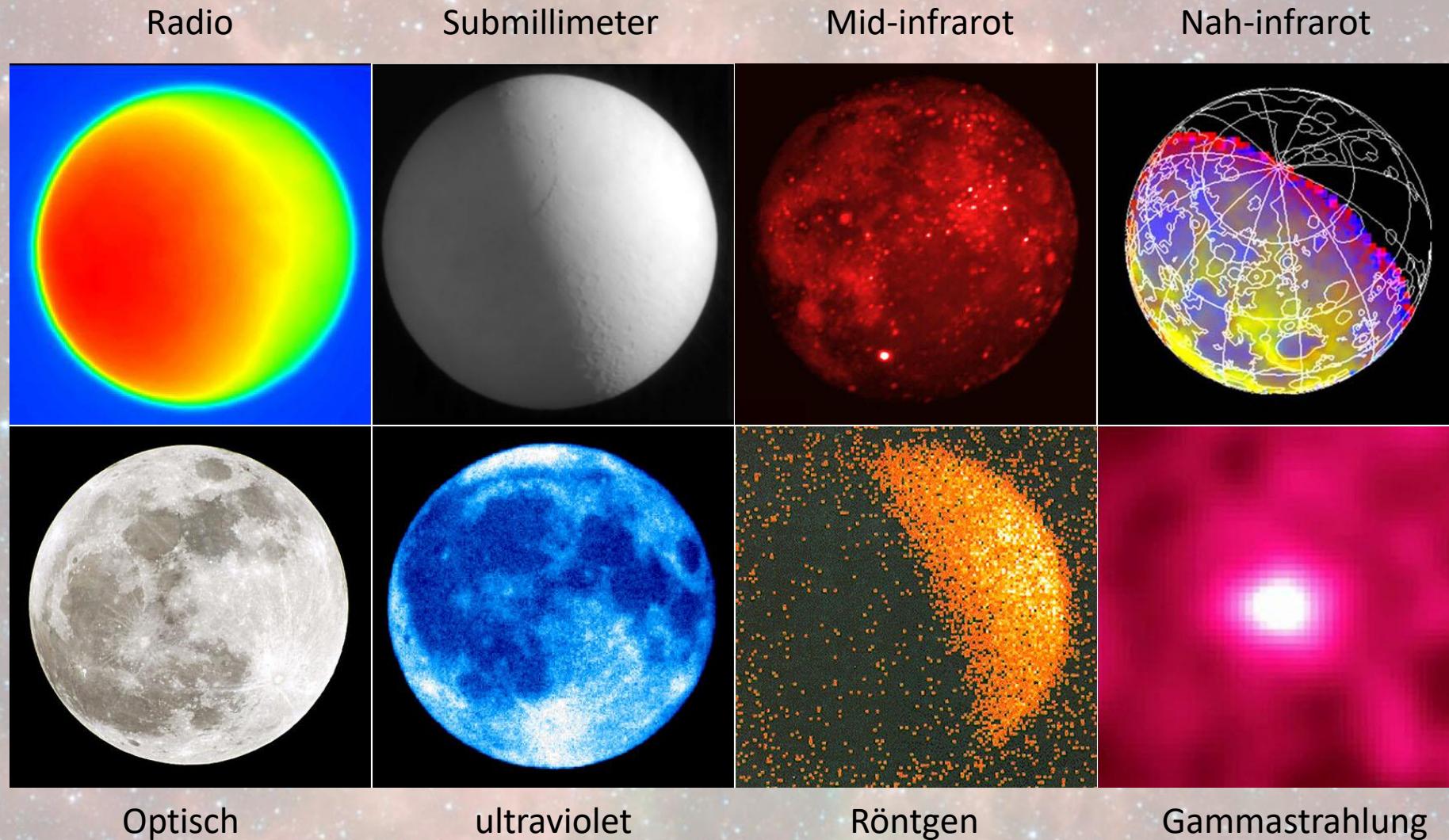


# Molekülspektroskopie – was ist das

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

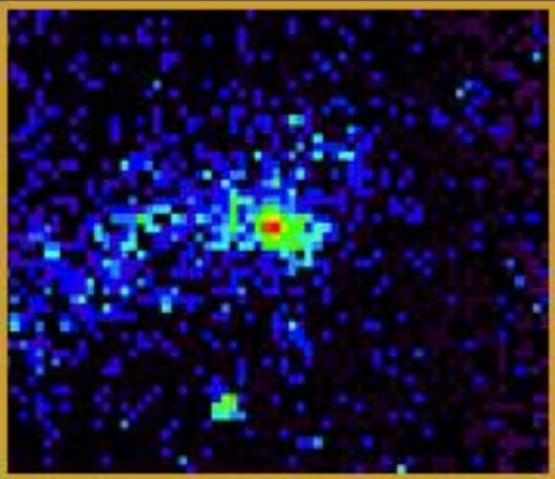


# Multi-Wellenlängenastronomie



Credits (top): NRAO-VLA/U. of British Columbia, Mike Kozubel/MSX Project/NASA-Galileo. Bottom: Bob King/Southwest Research Institute/NASA-ROSAT/Dave Thompson-NASA-GFSC

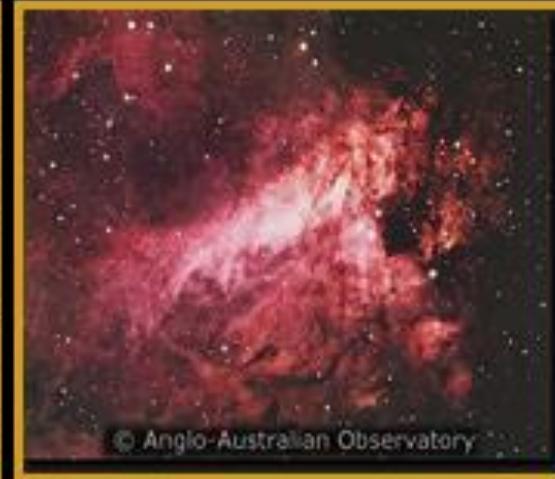
# Multi-Wellenlängenastronomie



X-Ray: ROSAT



Visible: DSS

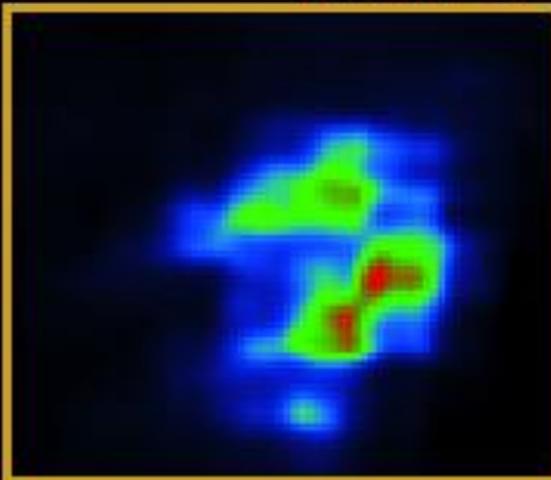


© Anglo-Australian Observatory

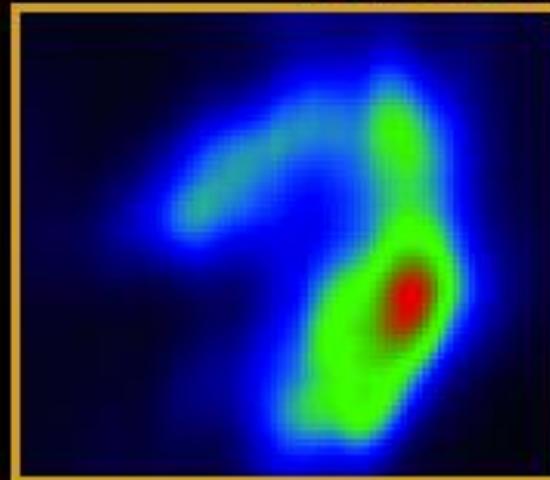
Visible: Color © AAO



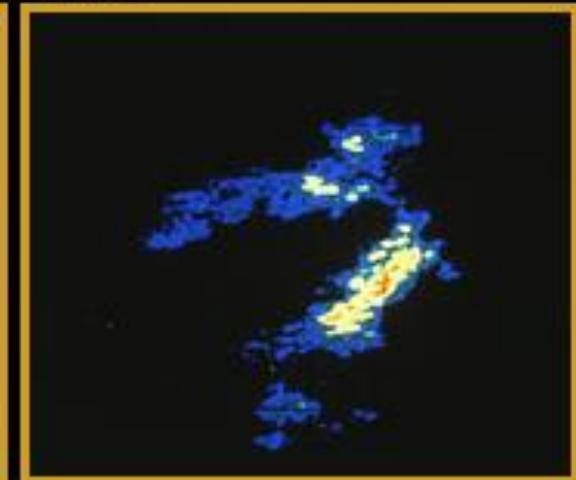
Near-Infrared: 2MASS



Mid-Infrared: IRAS



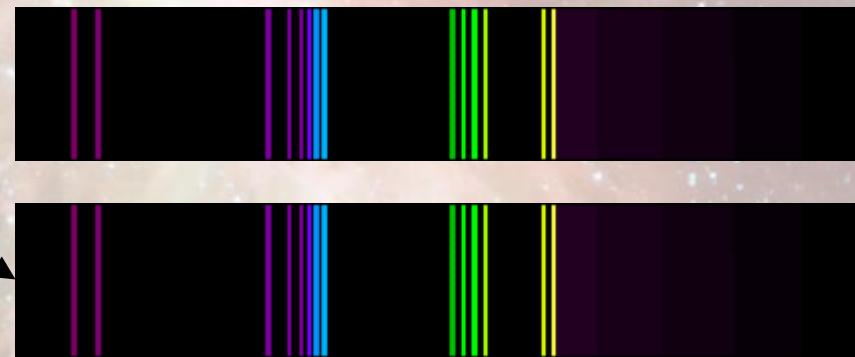
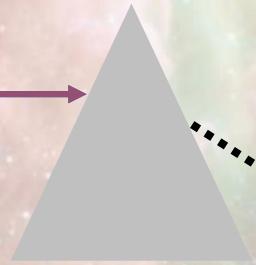
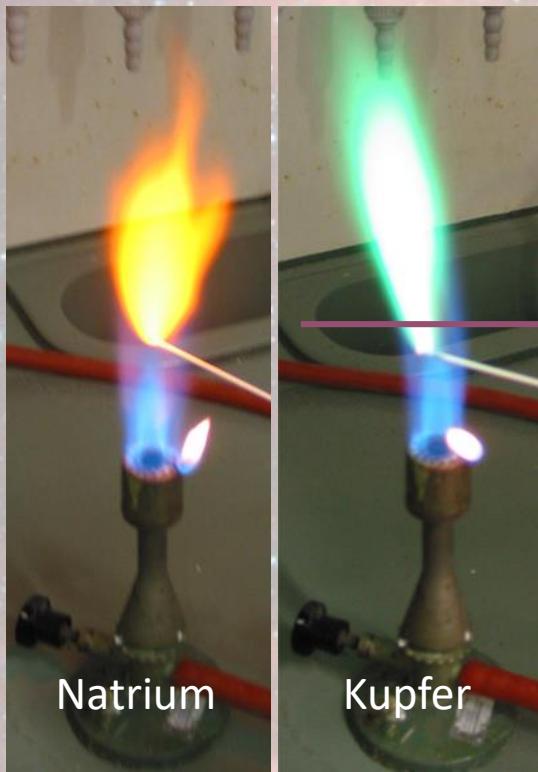
Far-Infrared: IRAS



Radio: VLA

# Absorption und Emission

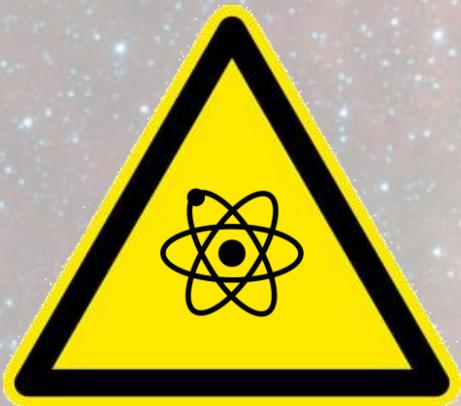
Führt man Atomen Energie zu, strahlen sie diese bei charakteristischen Wellenlängen wieder ab.



Jedes Element hat seinen ganz charakteristischen, spektralen Fingerabdruck.

# Emissionsspektren

Wasserstoff



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

M16  
Adler-Nebel

# Quantenmechanik



# Quantenmechanik



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

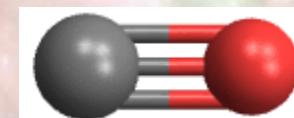
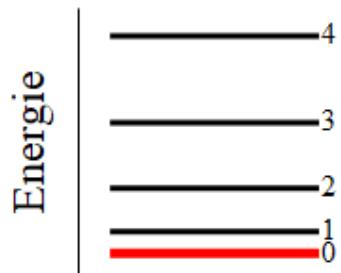
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



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

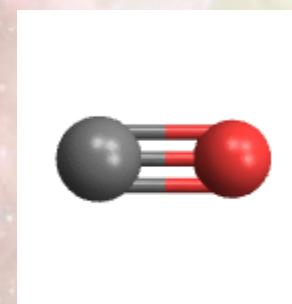
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



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

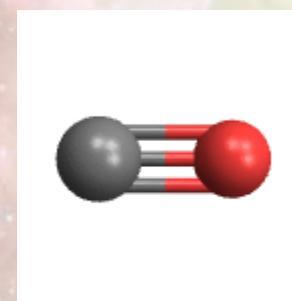
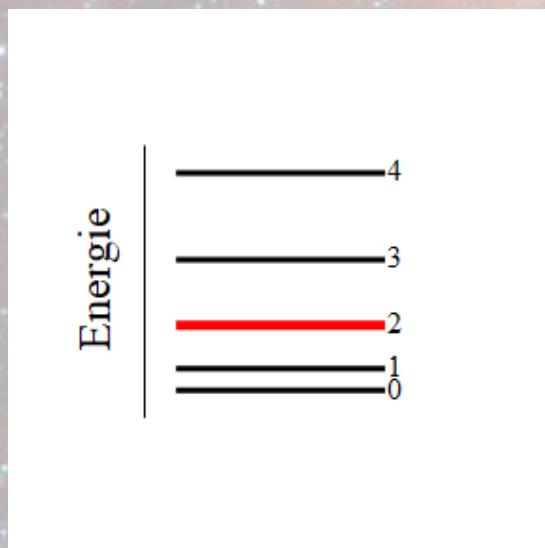
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



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

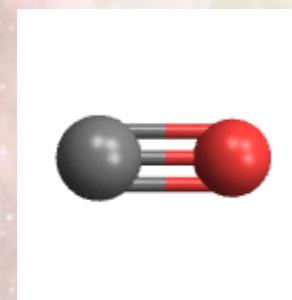
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



# Quantenmechanik



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

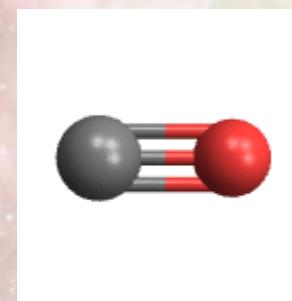
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

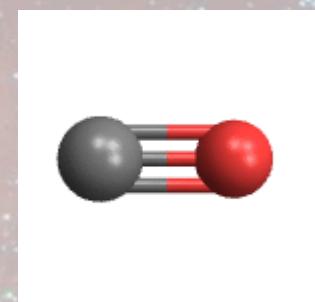
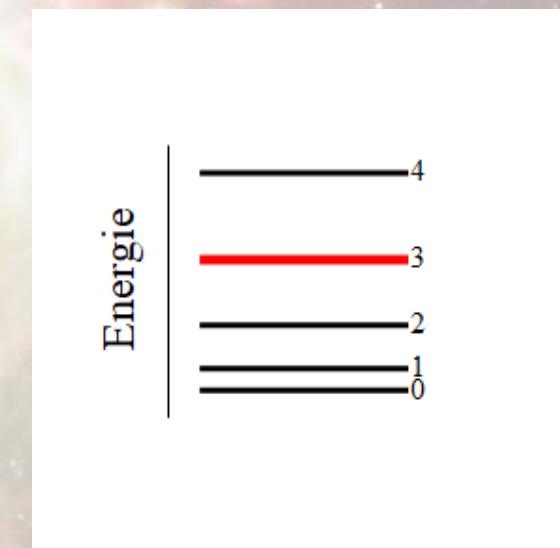
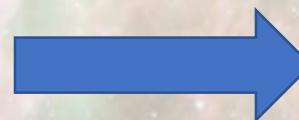
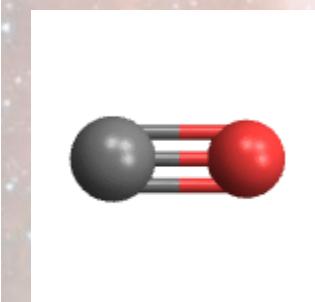
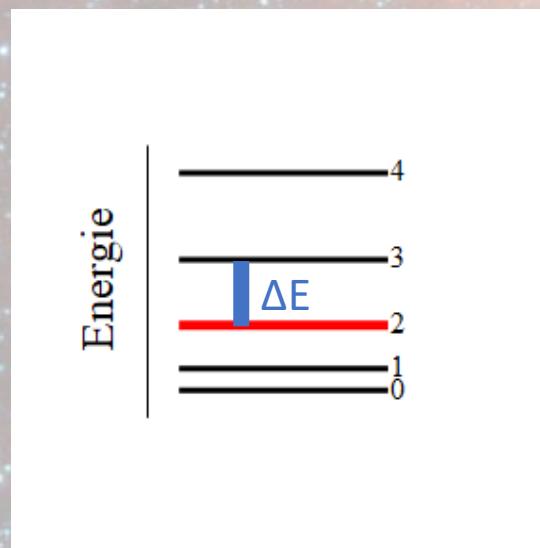
Vibration



# 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 Moleköl sie nicht aufnehmen.

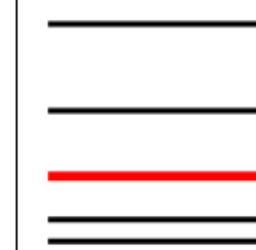
Niedrige Energie



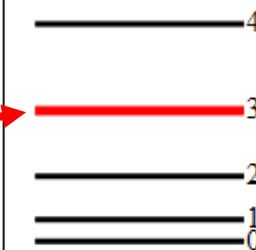
Mittlere Energie

Hohe Energie

Energie



Energie



# Quantenmechanik



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

Niedrige Energie



Das Medium ist **transparent** für diese Wellenlänge

Mittlere Energie



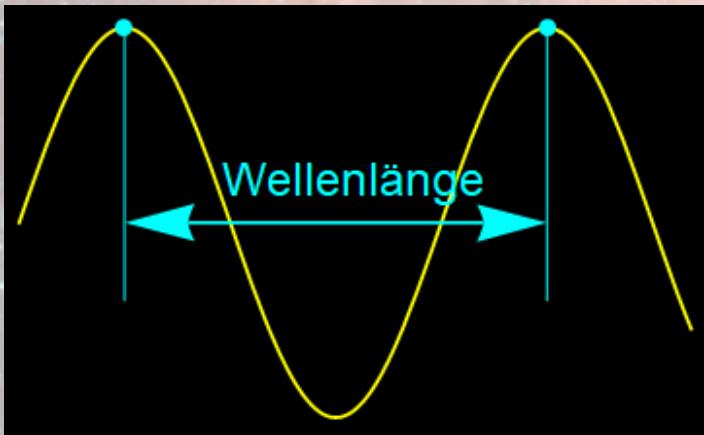
Das Medium ist **intransparent** für diese Wellenlänge

Hohe Energie

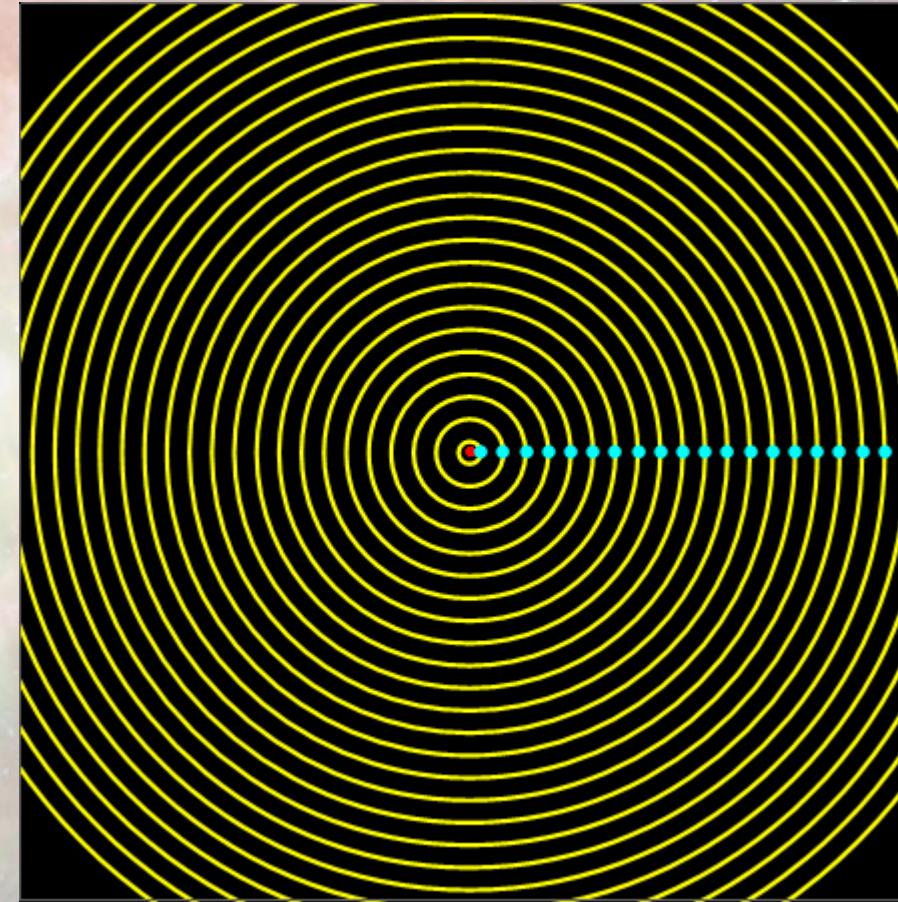
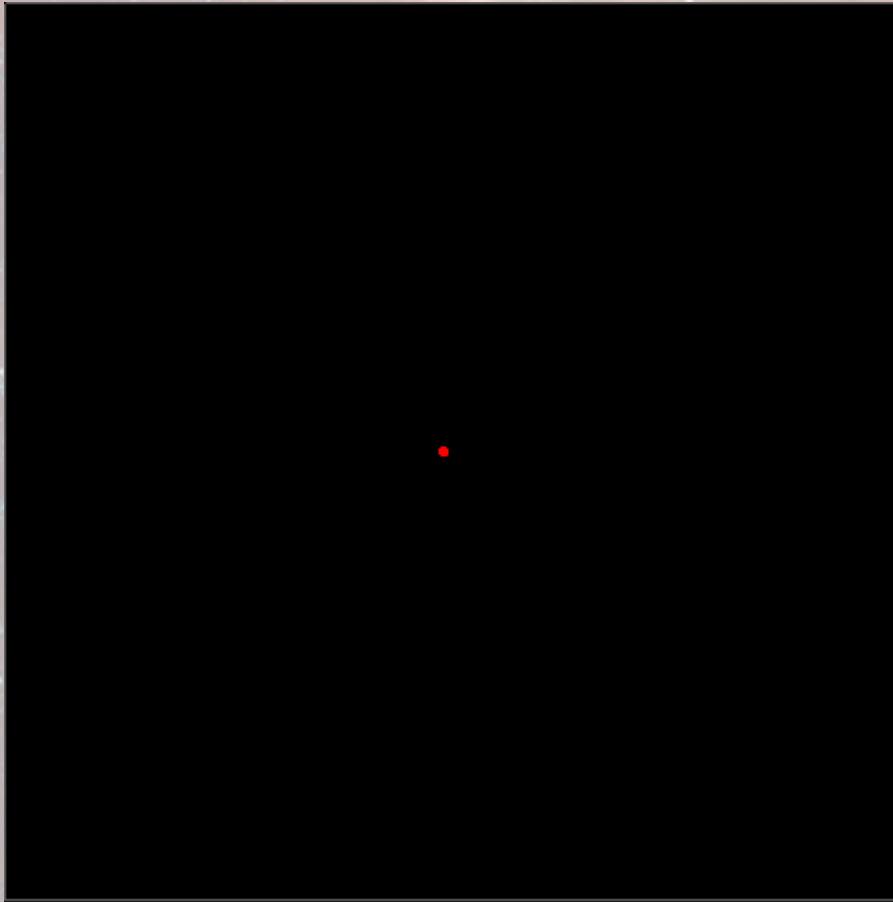


Das Medium ist **transparent** für diese Wellenlänge

# Wellenlänge und der Dopplereffekt



# Wellenlänge und der Dopplereffekt



# Wellenlänge und der Dopplereffekt

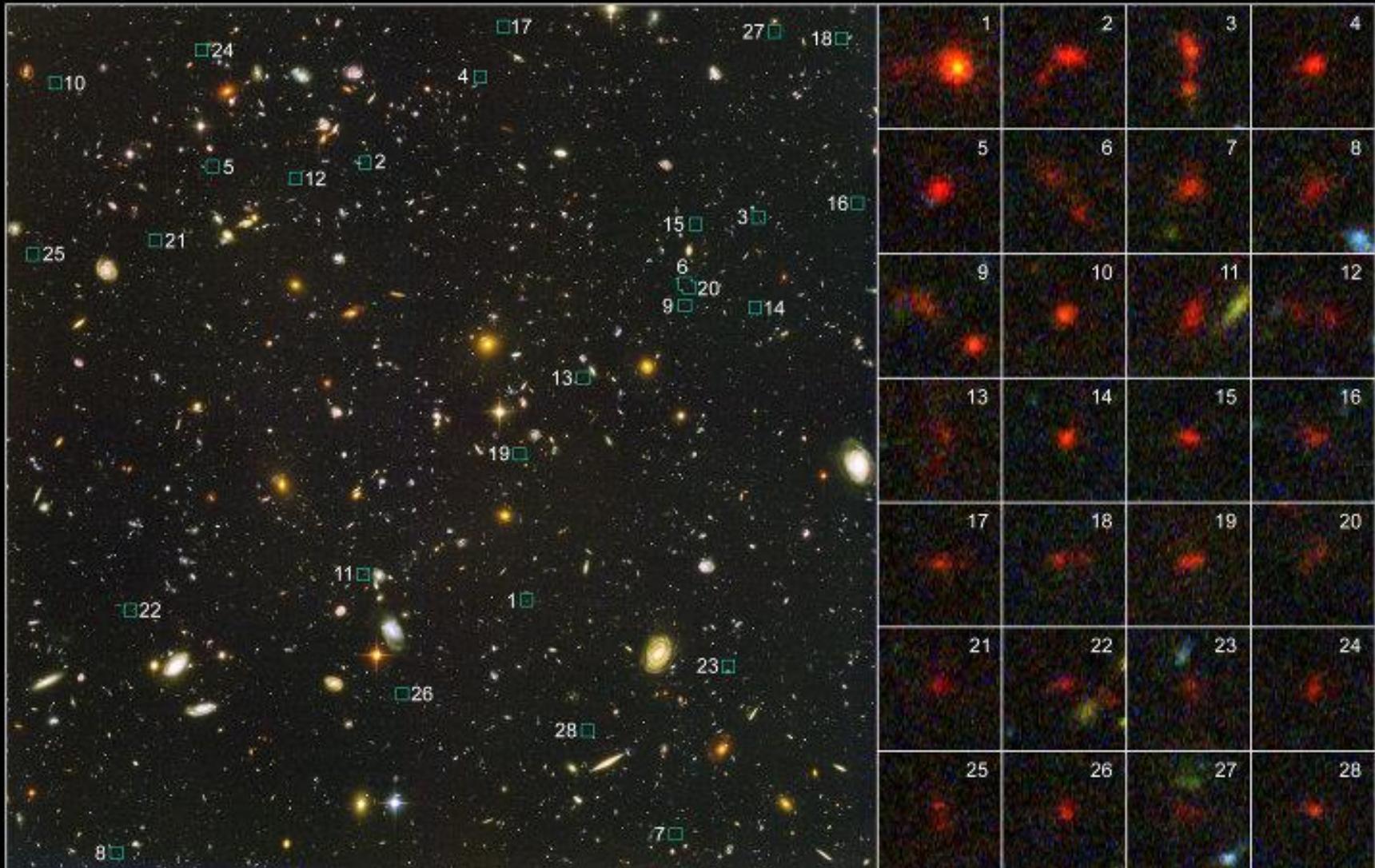
Der Dopplereffekt verschiebt die Wellenlänge einer Welle zu

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

„Rotverschiebung“

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

„Blauverschiebung“



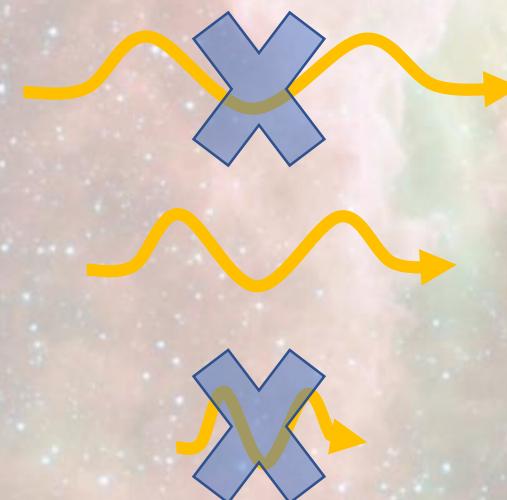
**Distant Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field**  
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

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

# Was nicht passt ...

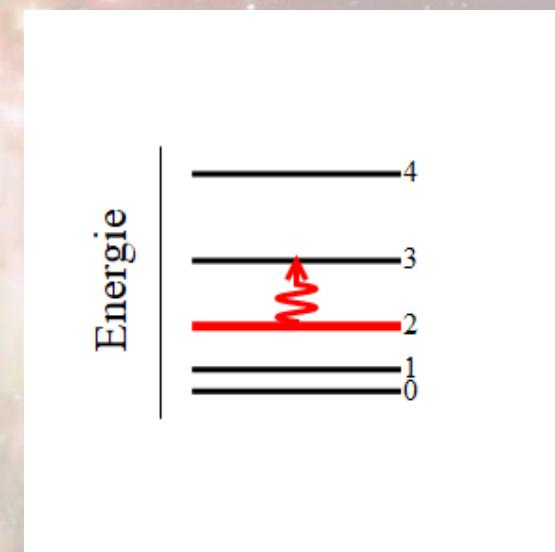
- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Moleköl sie nicht aufnehmen.
- Aber ...

Niedrige Energie



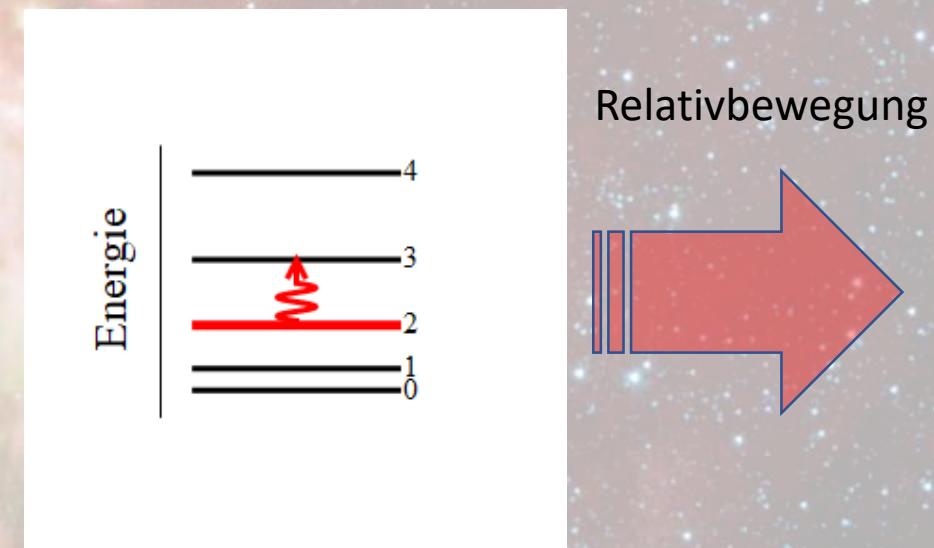
Mittlere Energie

Hohe Energie



# Was nicht passt wird passend gemacht!

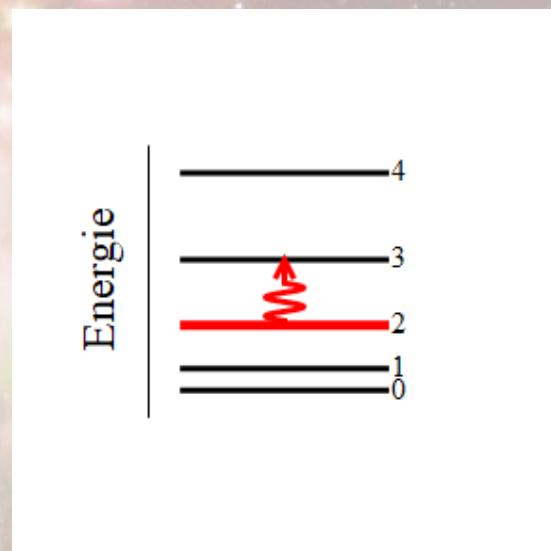
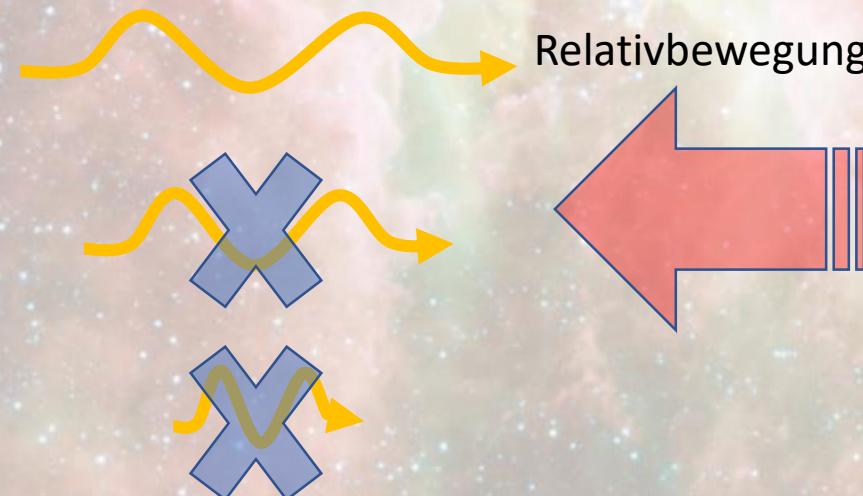
- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Moleköl sie nicht aufnehmen.
- Aber Dopplerverschiebung der Wellenlängen



# Was nicht passt wird passend gemacht!

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

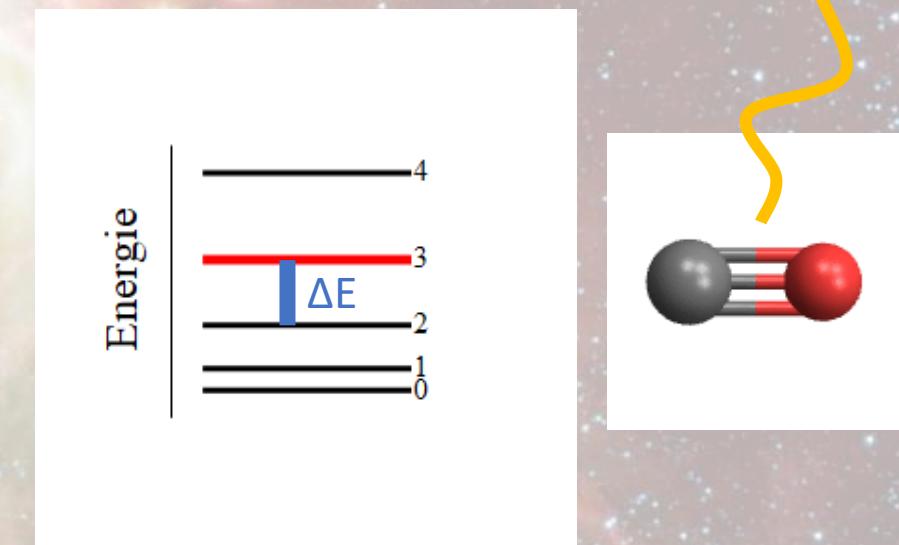
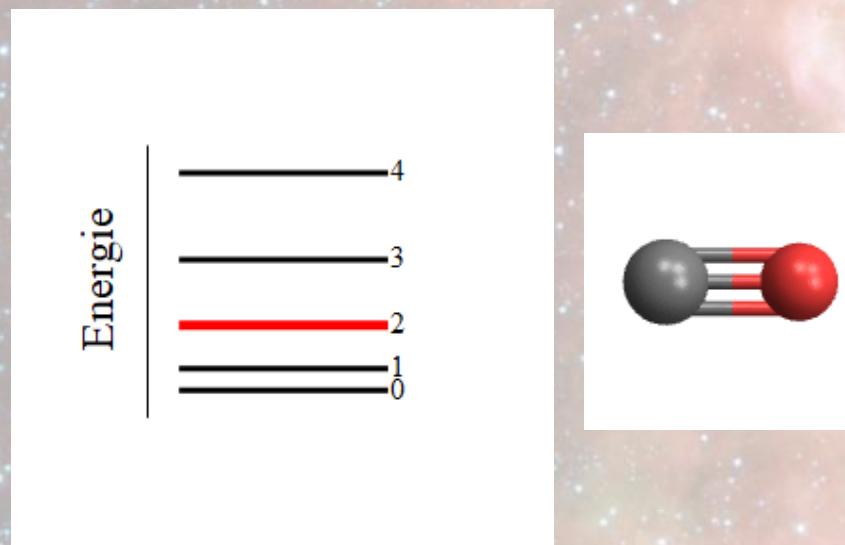
Niedrige Energie



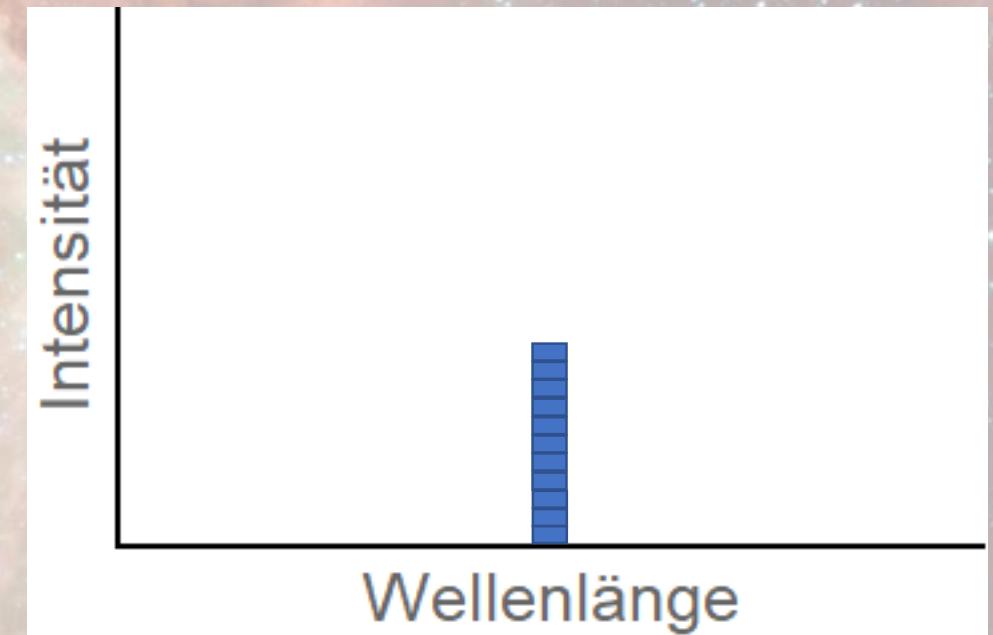
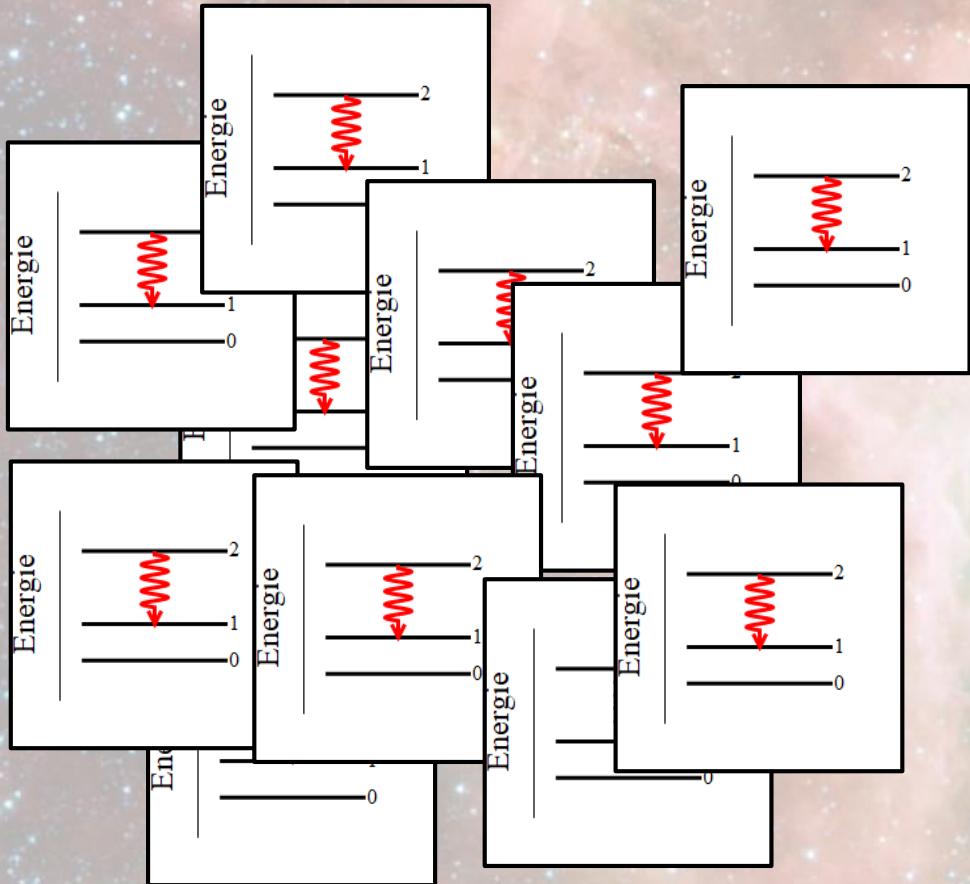
# Quantenmechanik



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

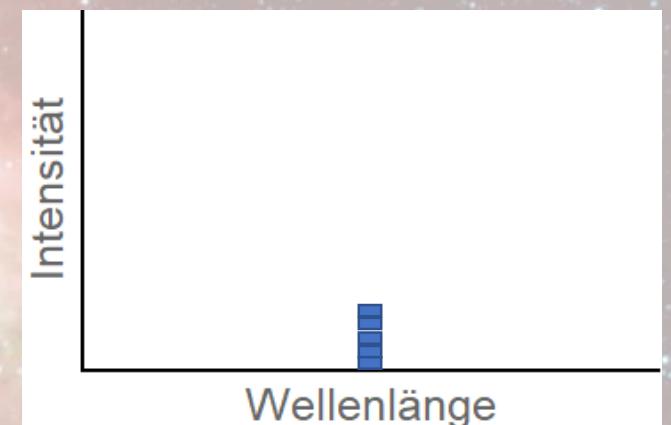
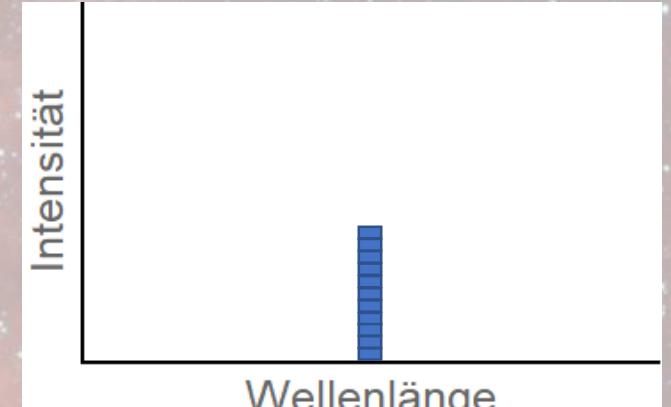
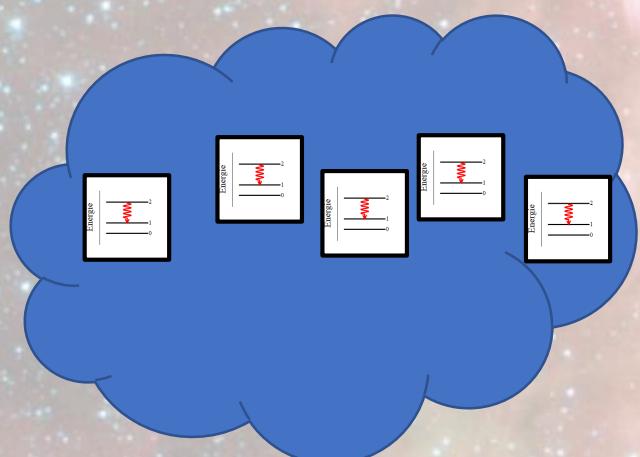
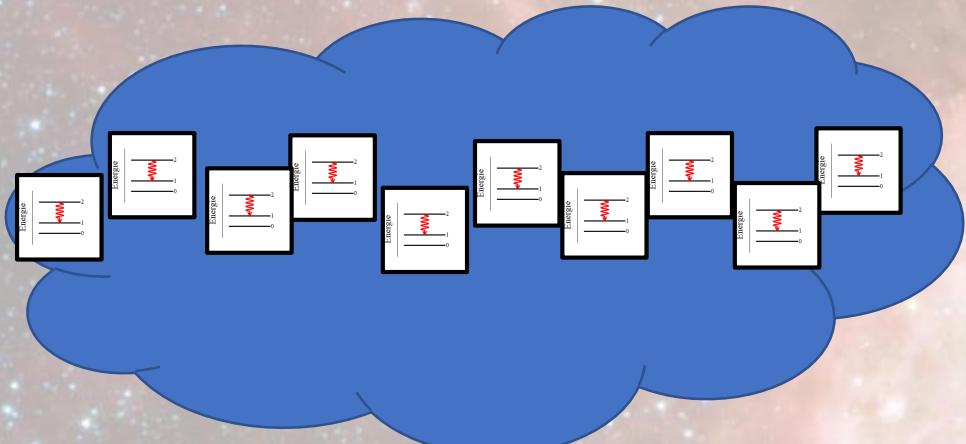


# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



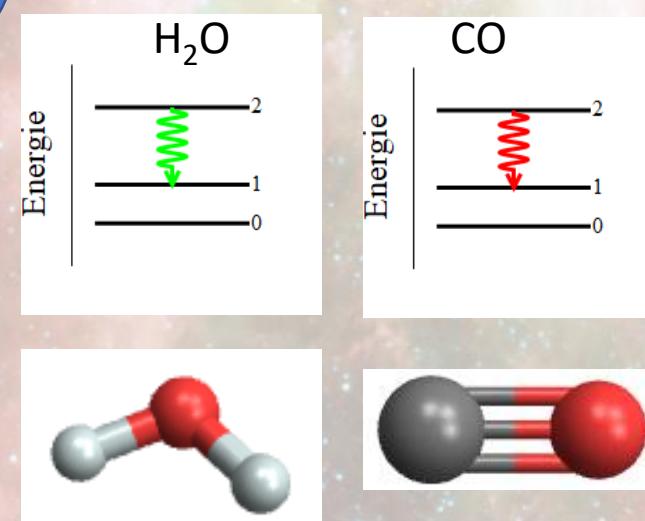
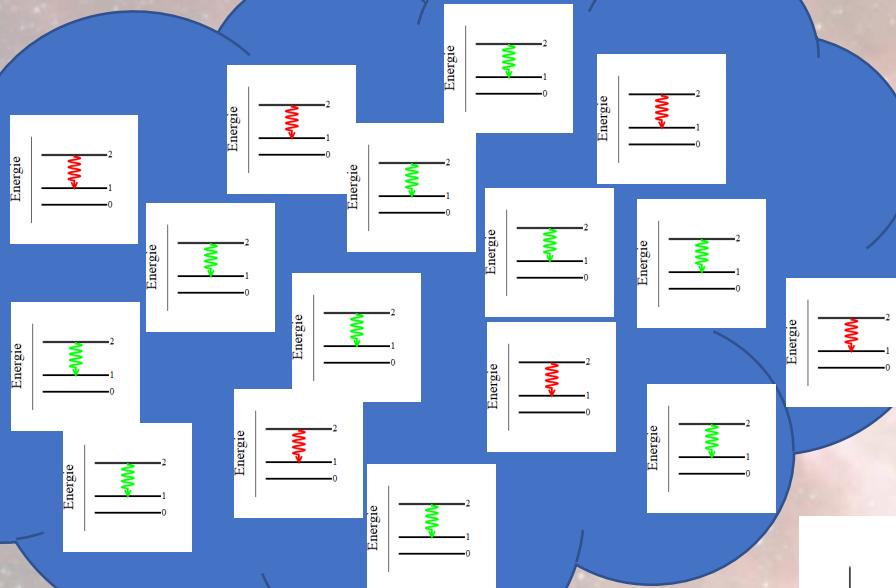
In einem Spektrum zählen wir im Prinzip die Zahl der Emissionen/Absorptionen.

# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



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

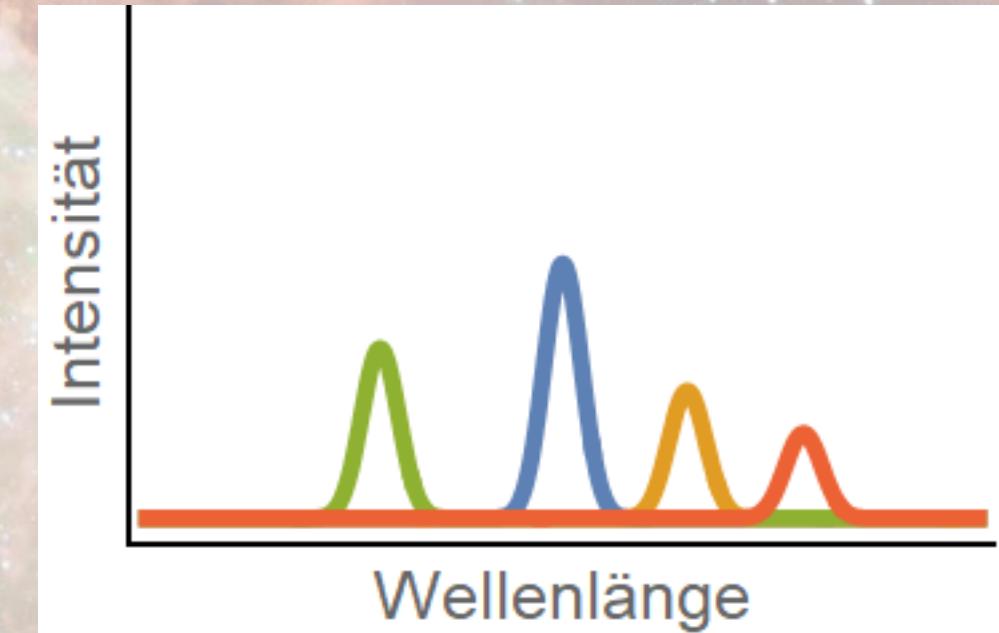
# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



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

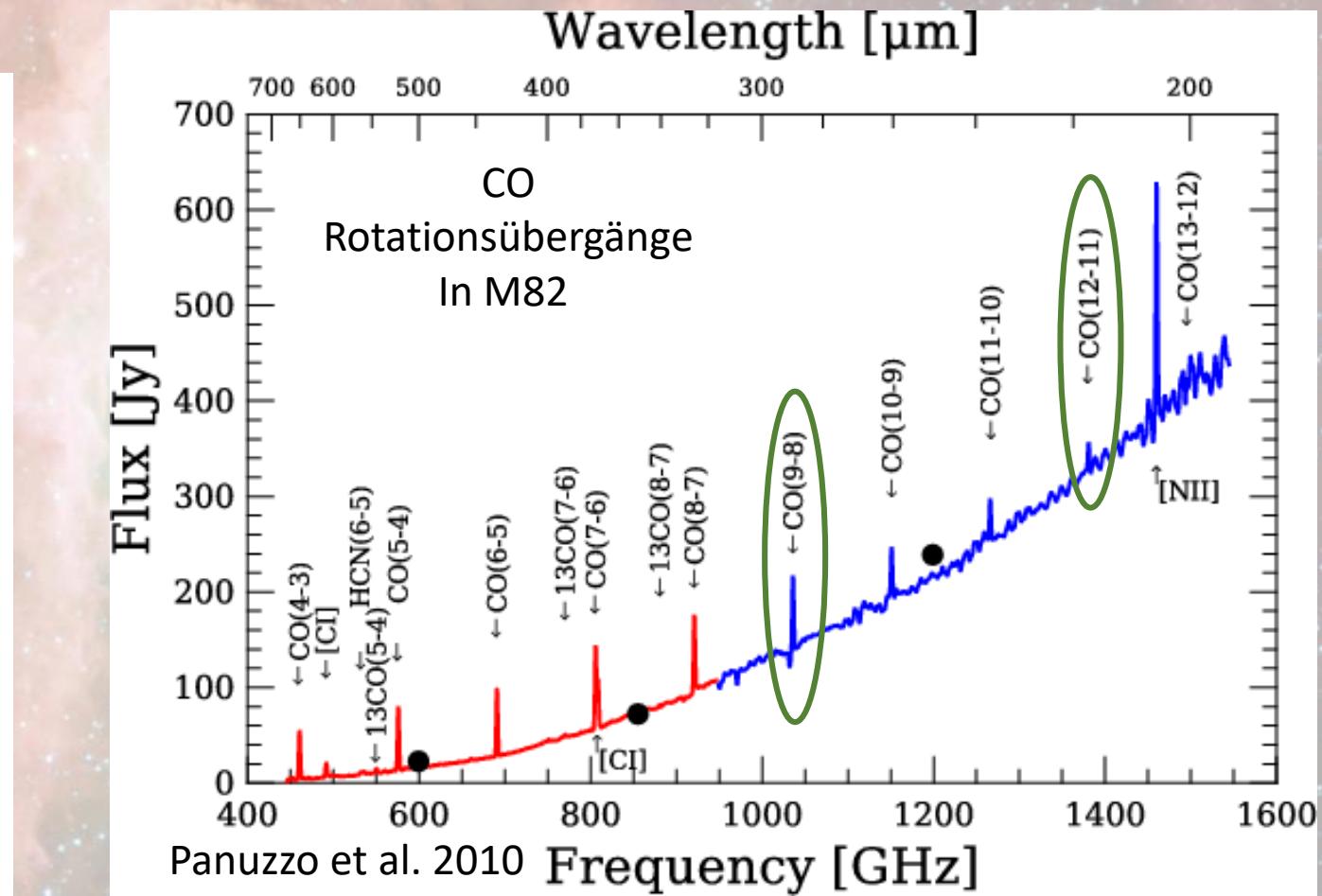
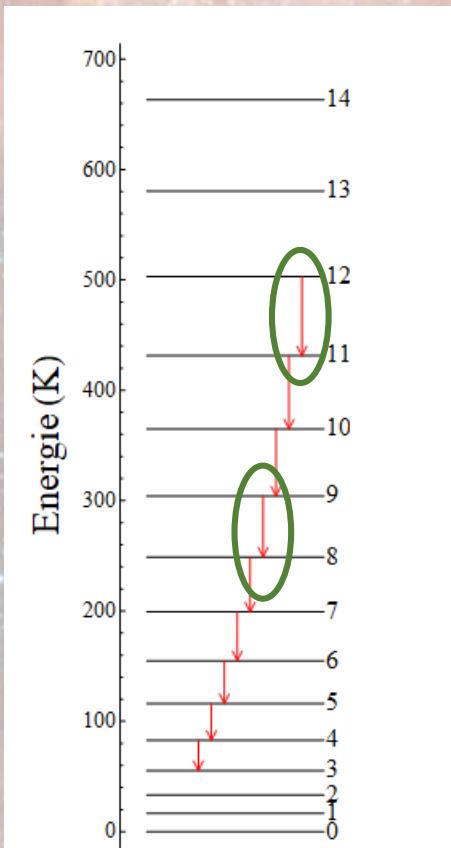


# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

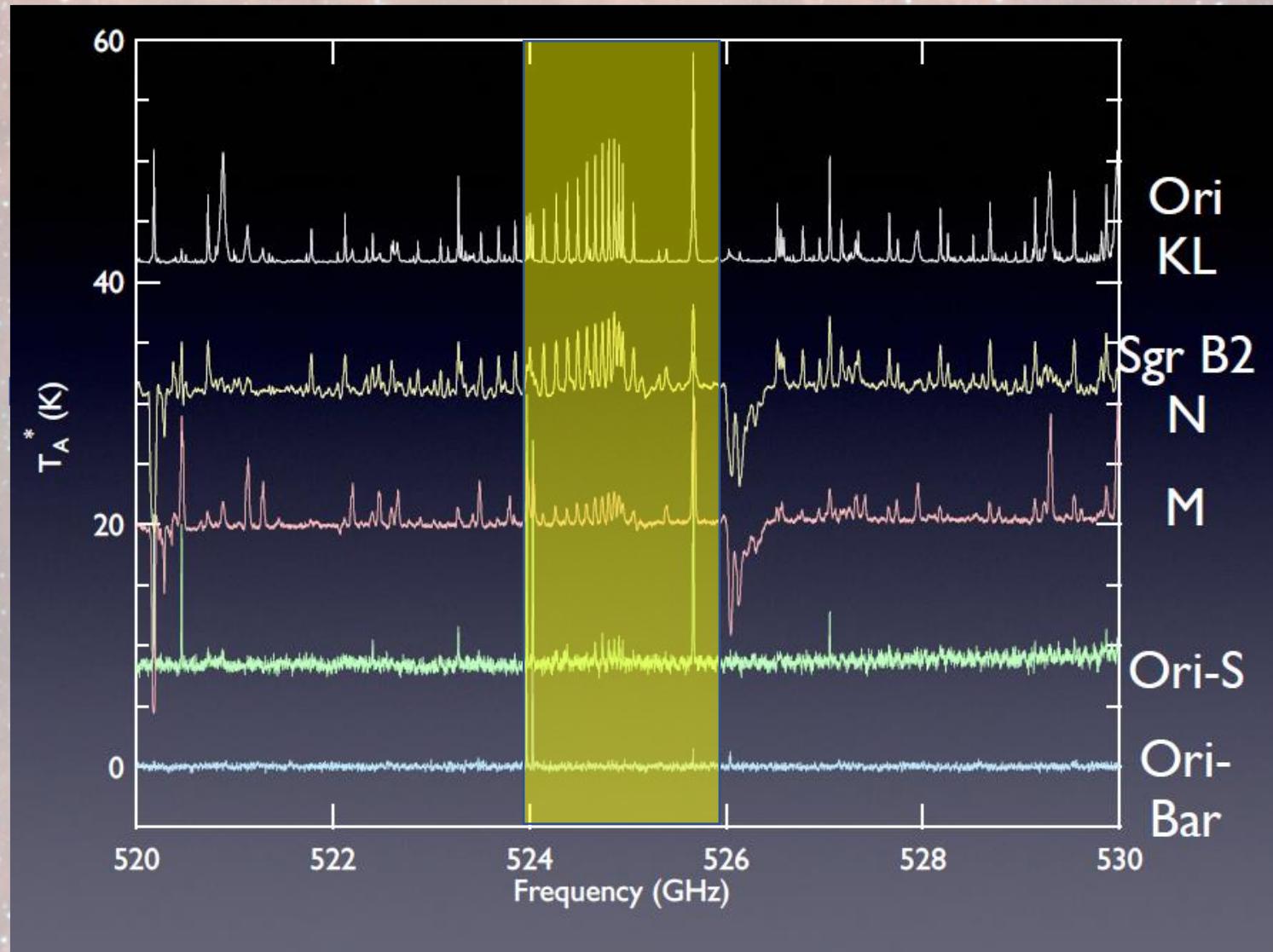


# Spetroskopie in der Astronomie

- Damit lassen sich hervorragend Moleküle im Weltall identifizieren!

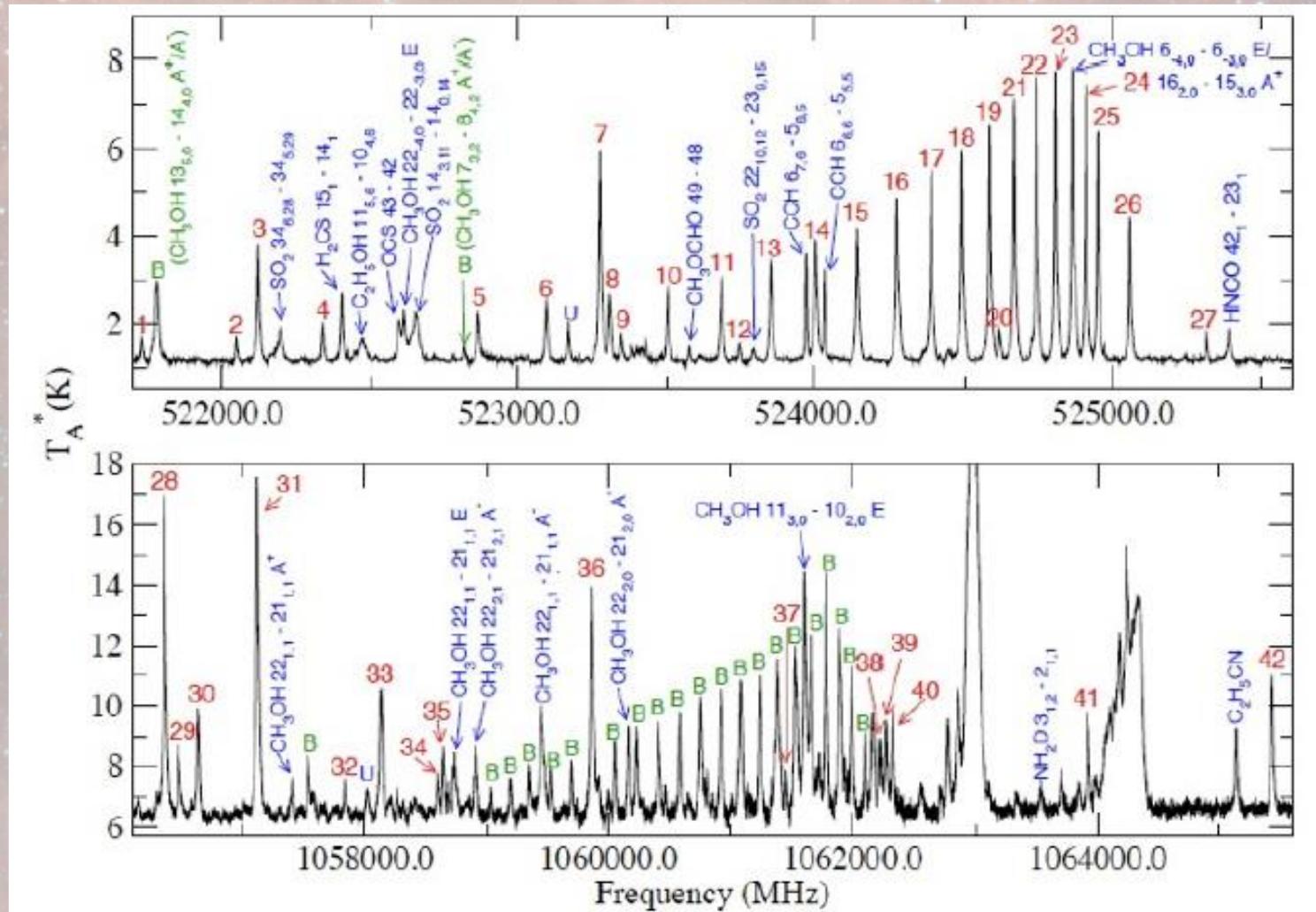


# Beispiel: Sternentstehung in Orion



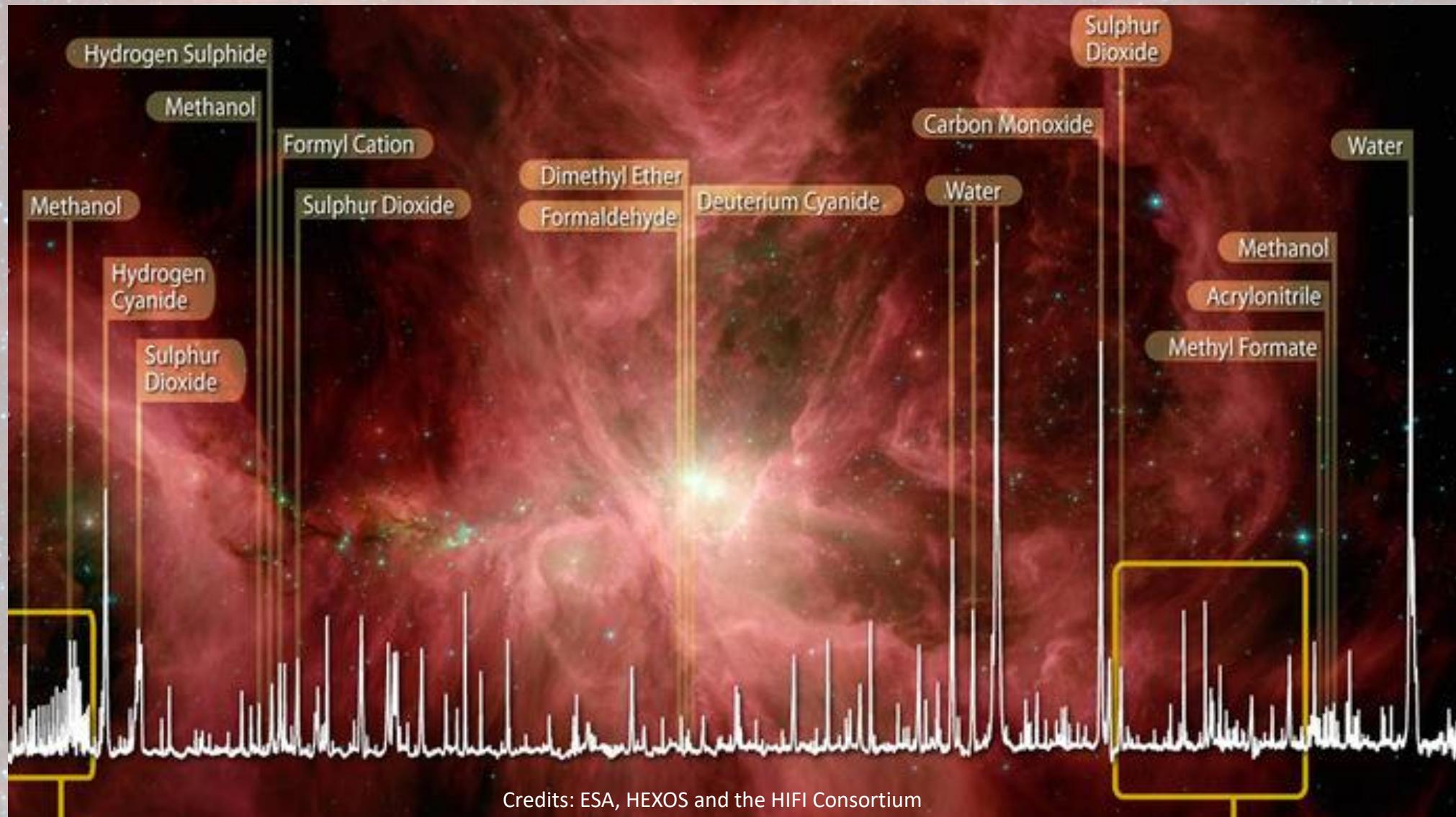
Source: E. Bergin  
(Univ. of Michigan)

# Beispiel: Sternentstehung in Orion



Wang et al. 2011

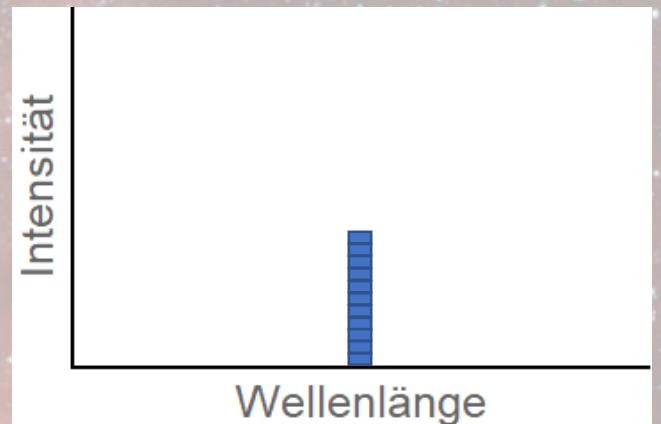
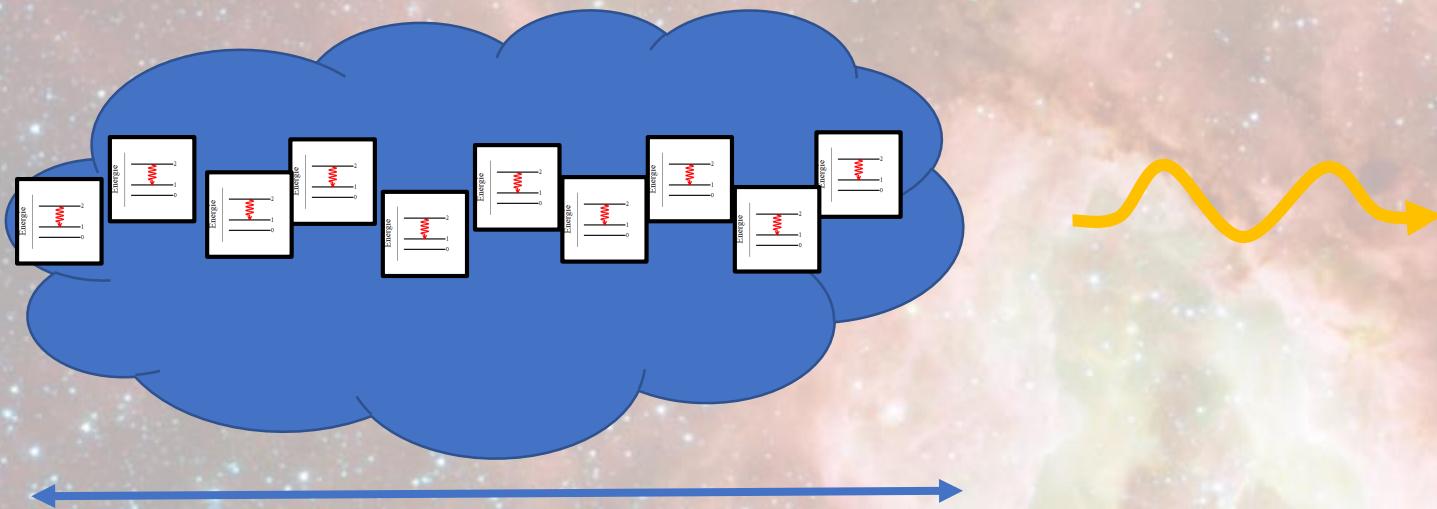
# Beispiel: Sternentstehung in Orion



# 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, ....

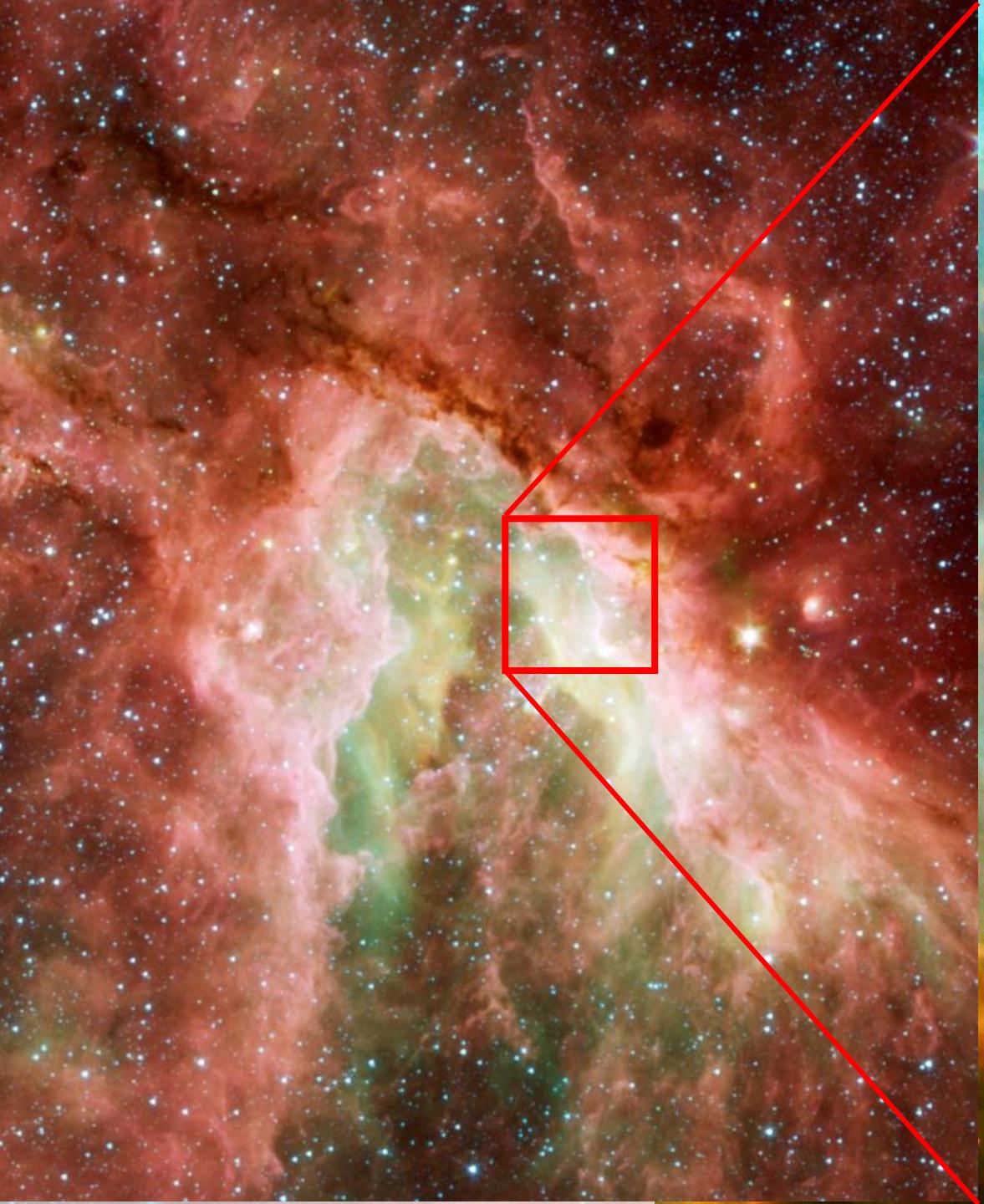


- Wenn wir die Häufigkeit der Teilchen in der Molekülwolke kennen, können wir aus ihrer Emission die Tiefe der Wolke abschätzen.

Es sei denn...

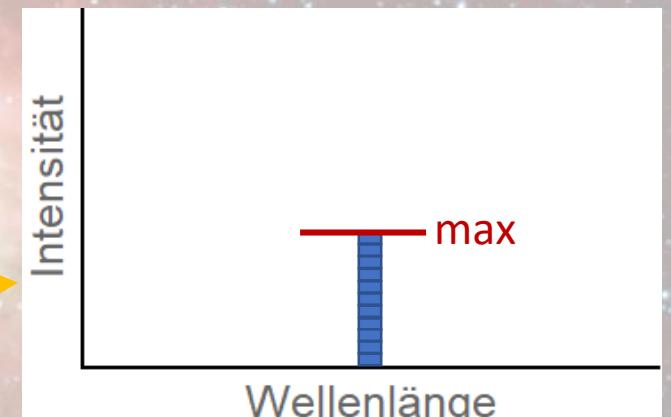
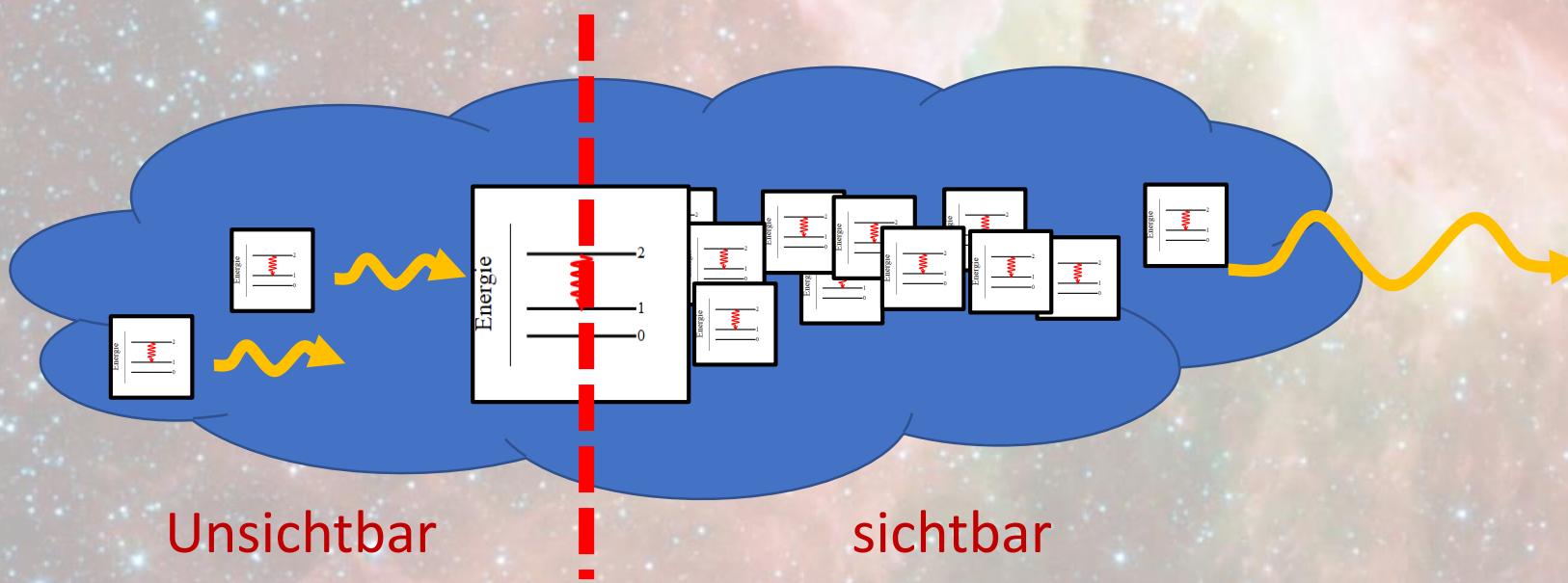
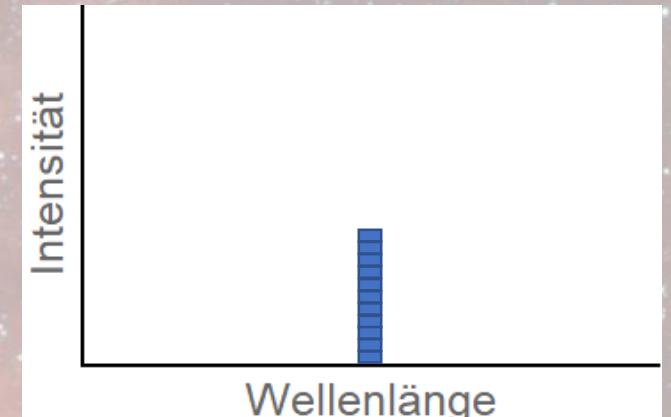
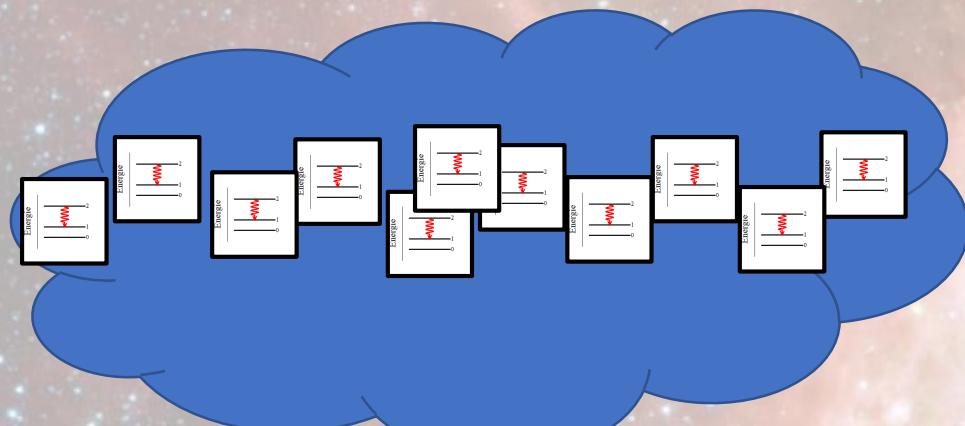
...man kann nicht beliebig tief hineinschauen.



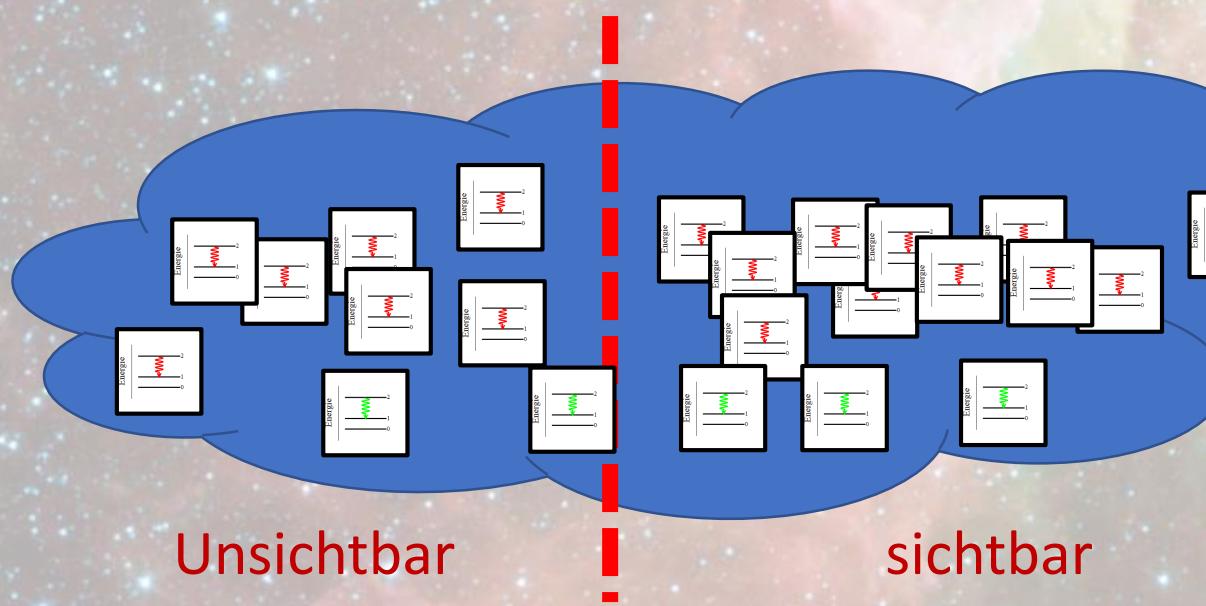
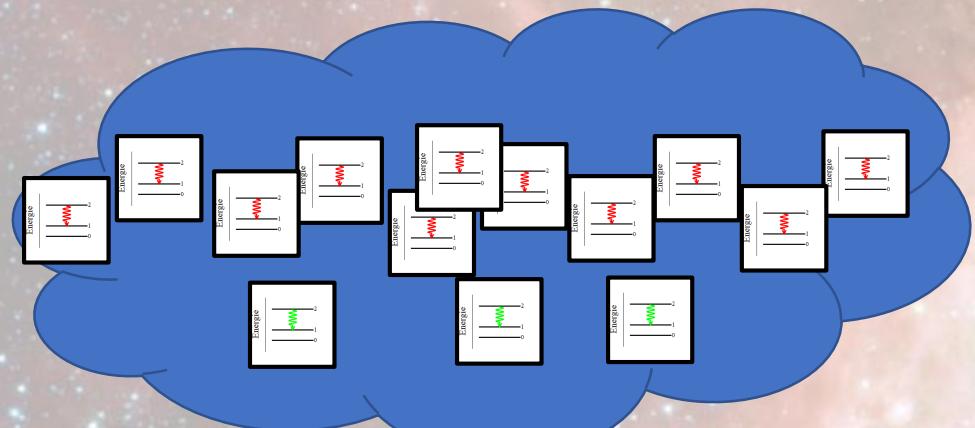


Credit: [NASA](#), [ESA](#), J. Hester ([ASU](#))

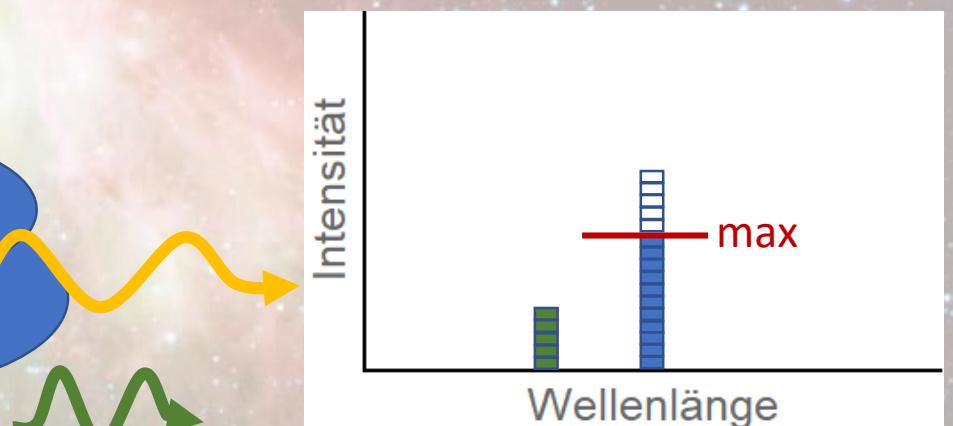
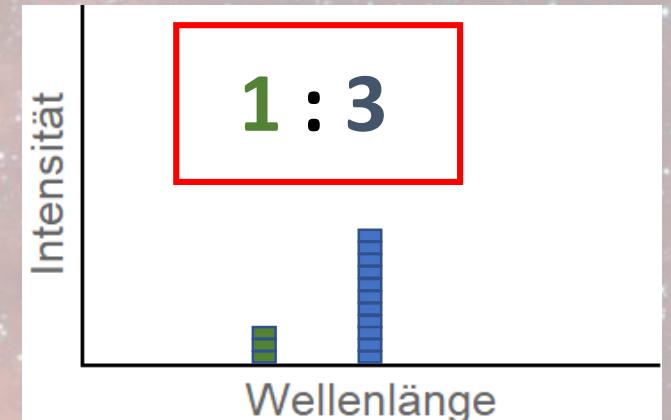
# Dick, .... optisch dick



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



sichtbar

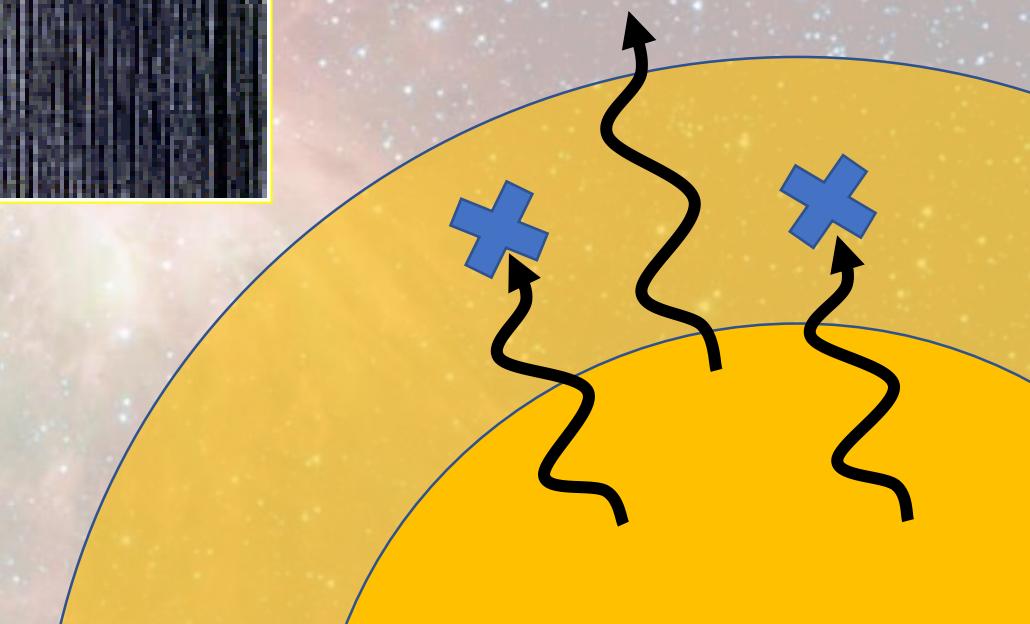
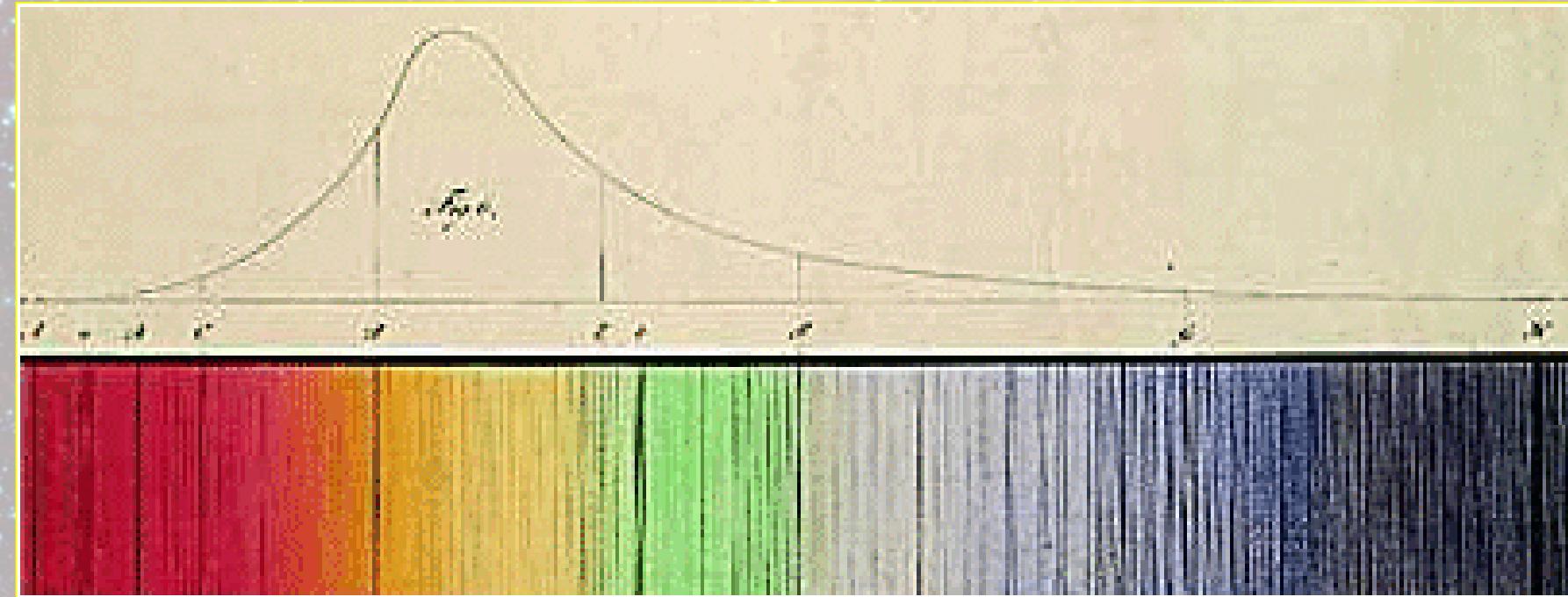


z.B.:  $[^{12}\text{C}]:[^{13}\text{C}] = 66:1$

# Emission und Absorption

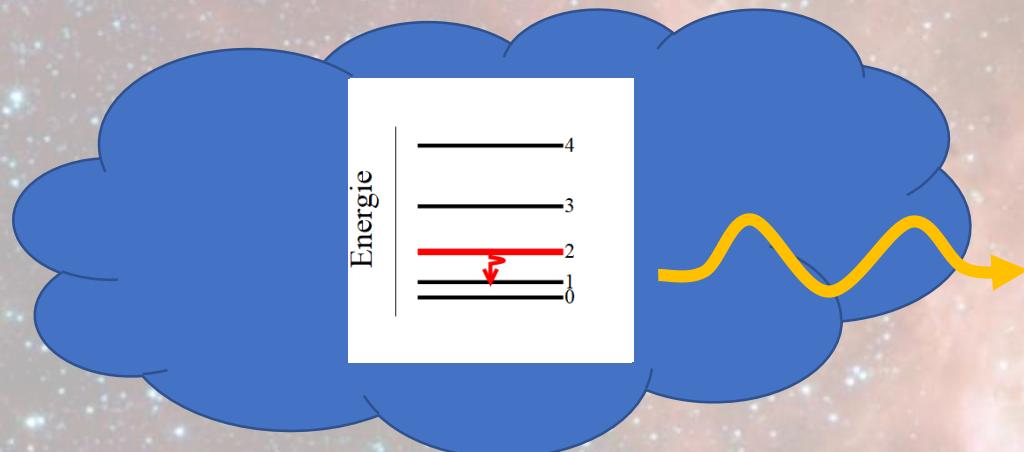


# Beispiel: Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum

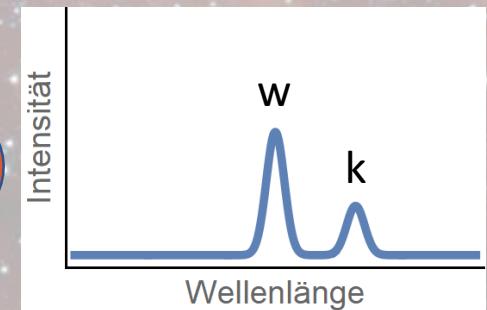
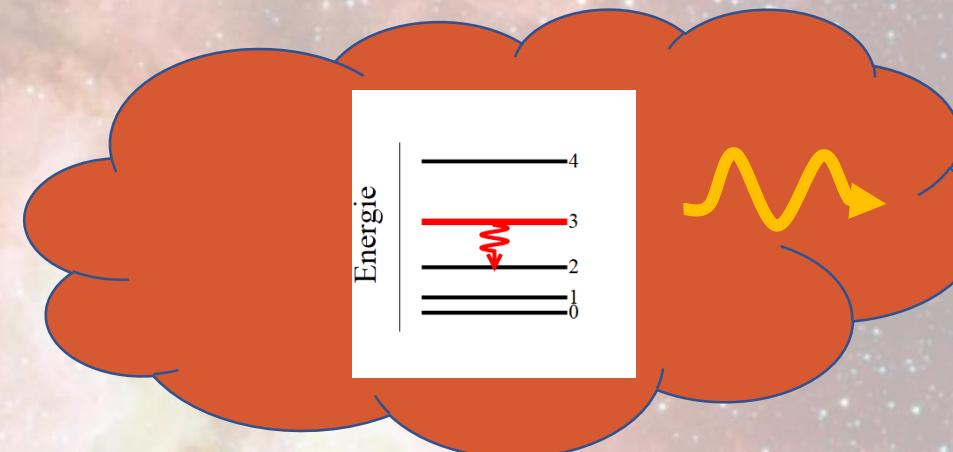


# Anregend....

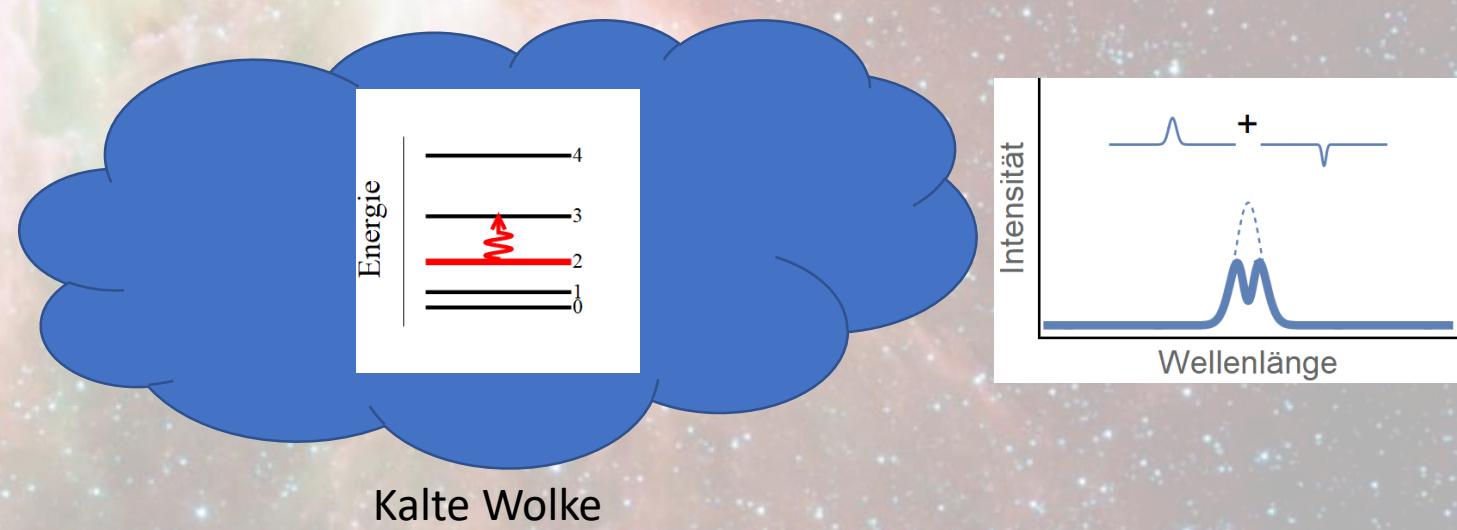
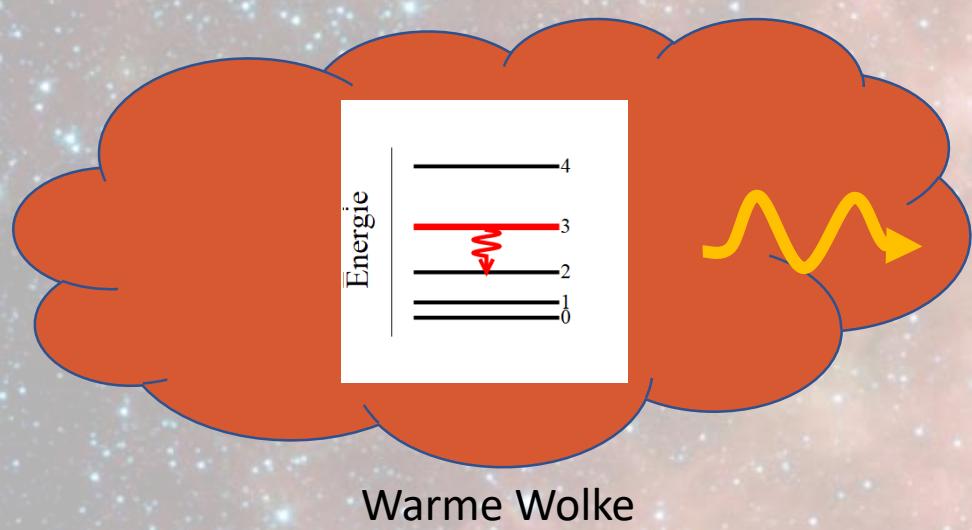
Kalte Wolke



Warmer Wolke

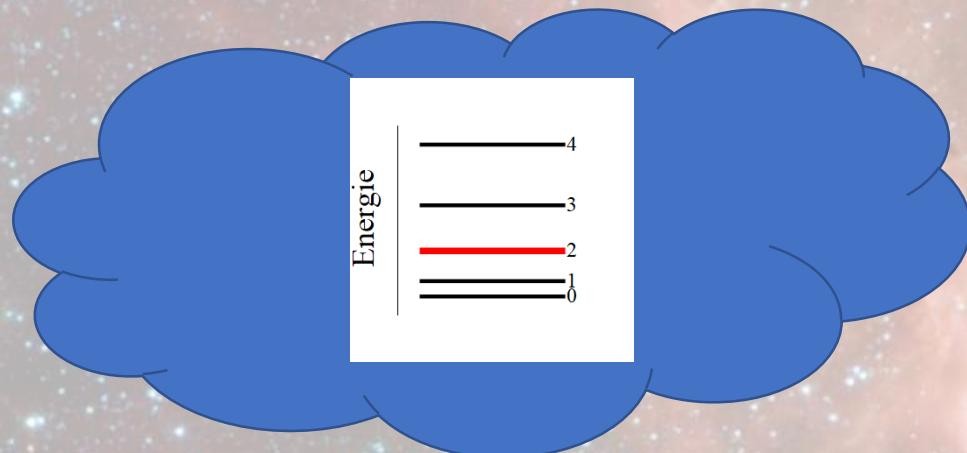


# Anregend....

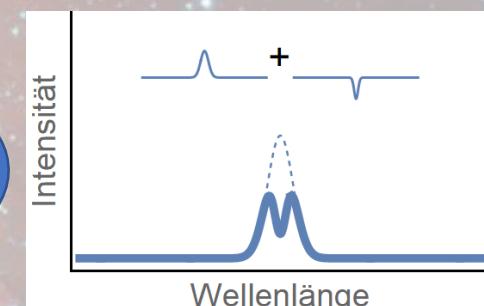
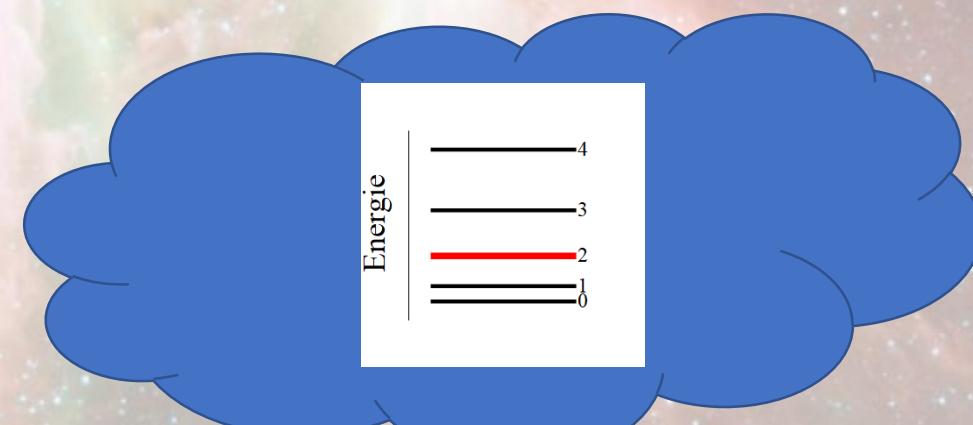
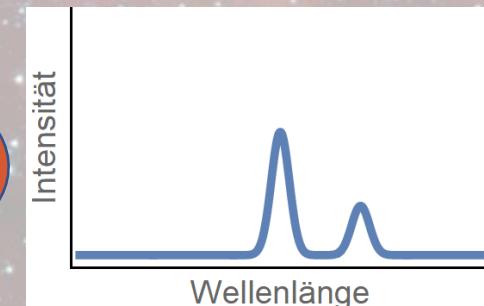
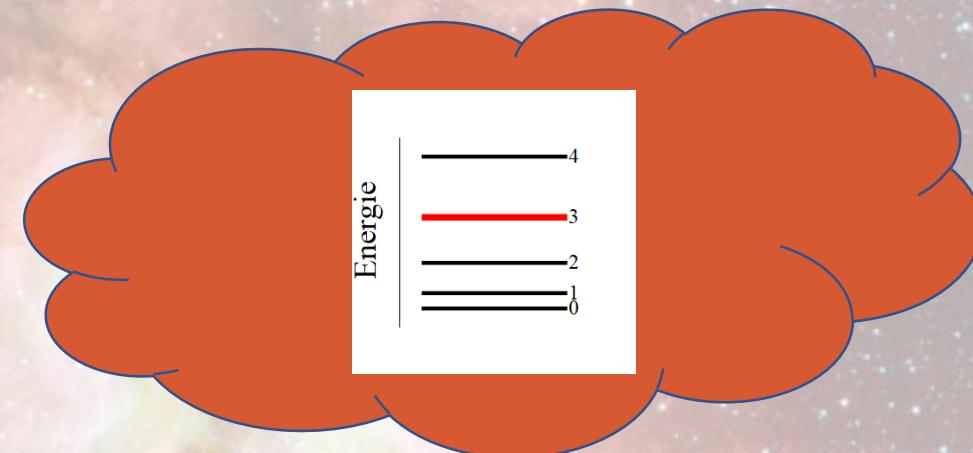


# Anregend....

Kalte Wolke



Warmer Wolke

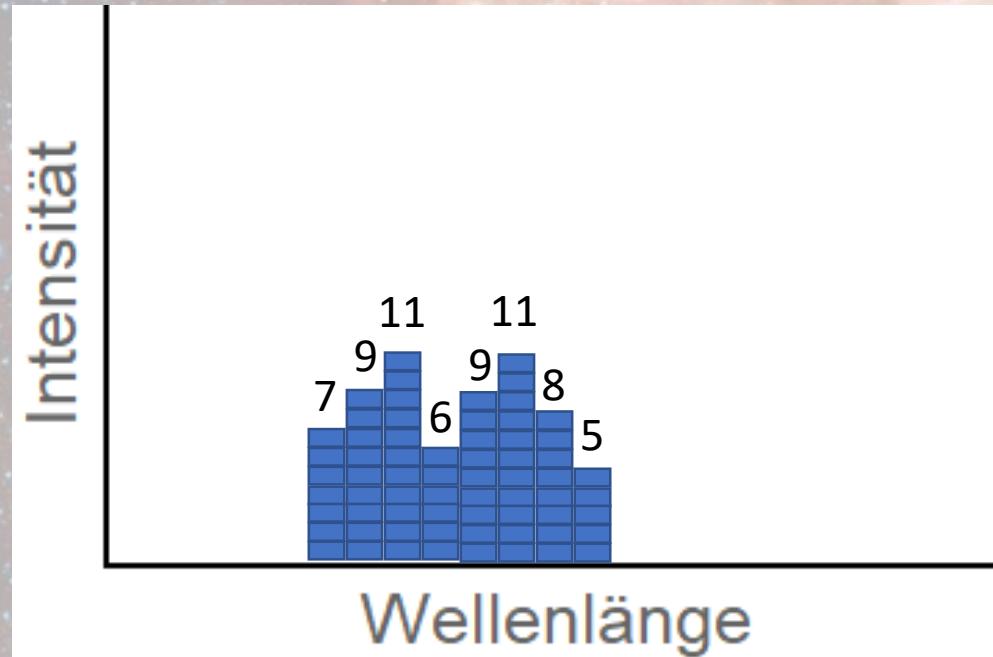


Warmer Wolke

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**



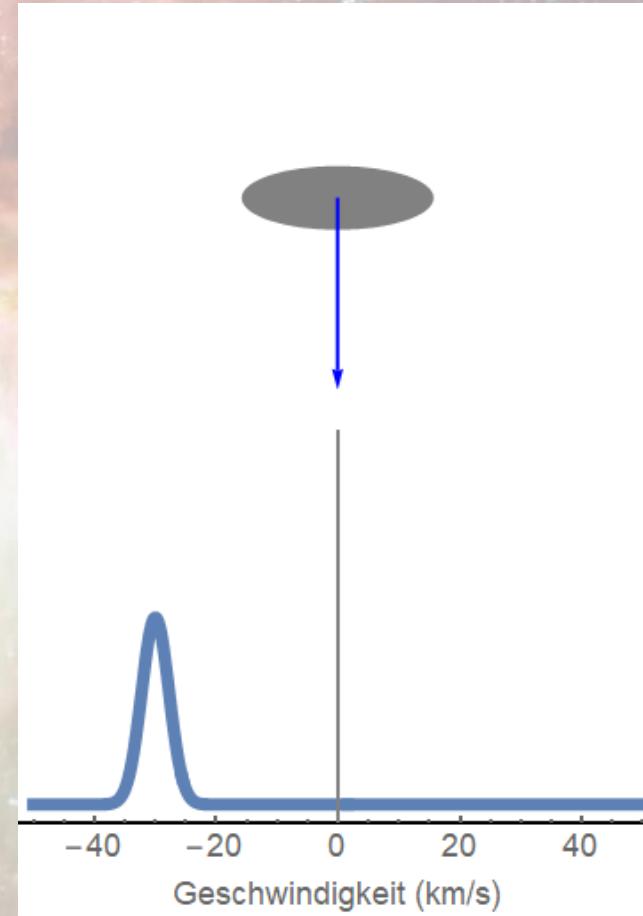
Photo by [Robin Pierre](#) on [Unsplash](#)

**Bolometrische Beobachtung liefert  
gesamte Helligkeit**



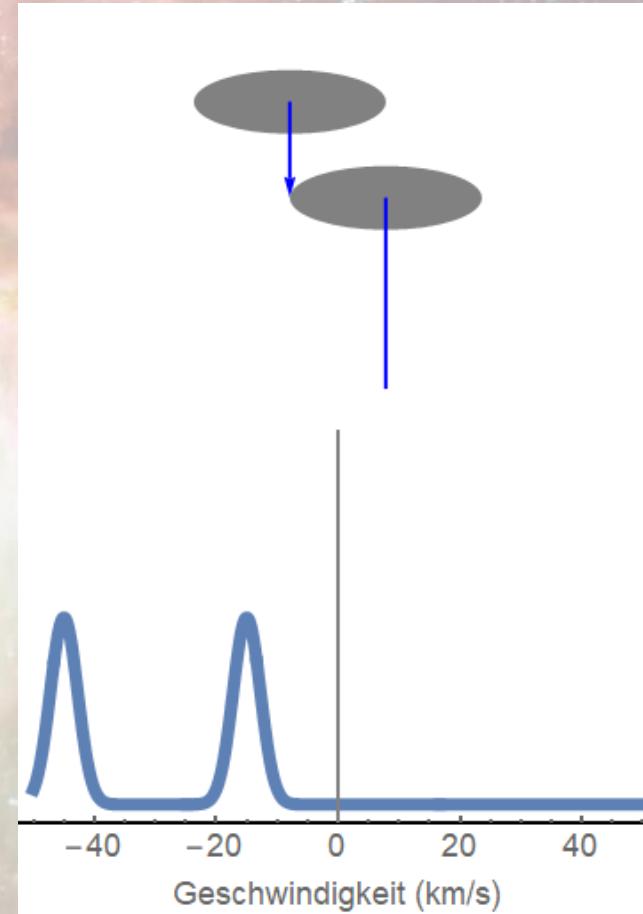
# Spektroskopische Beobachtungen

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

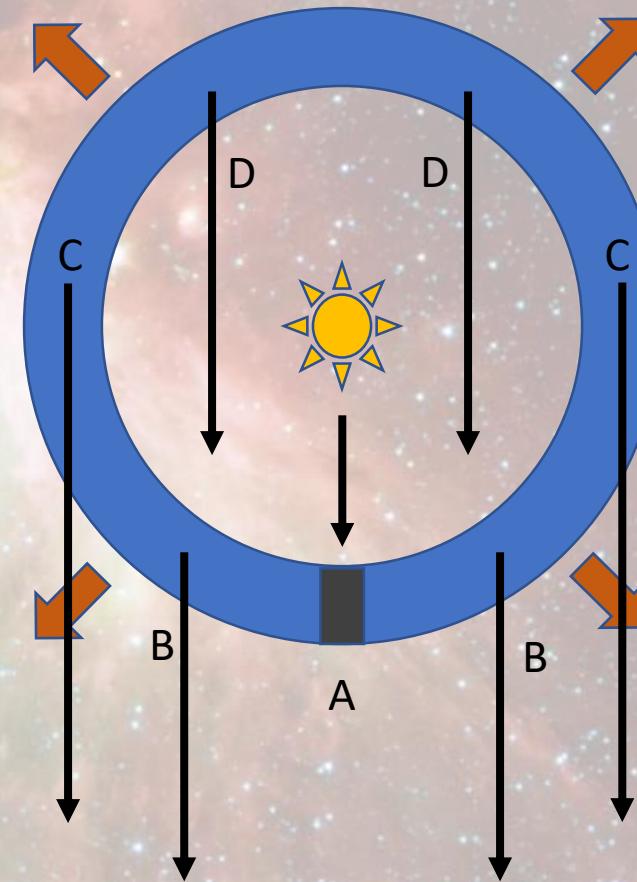
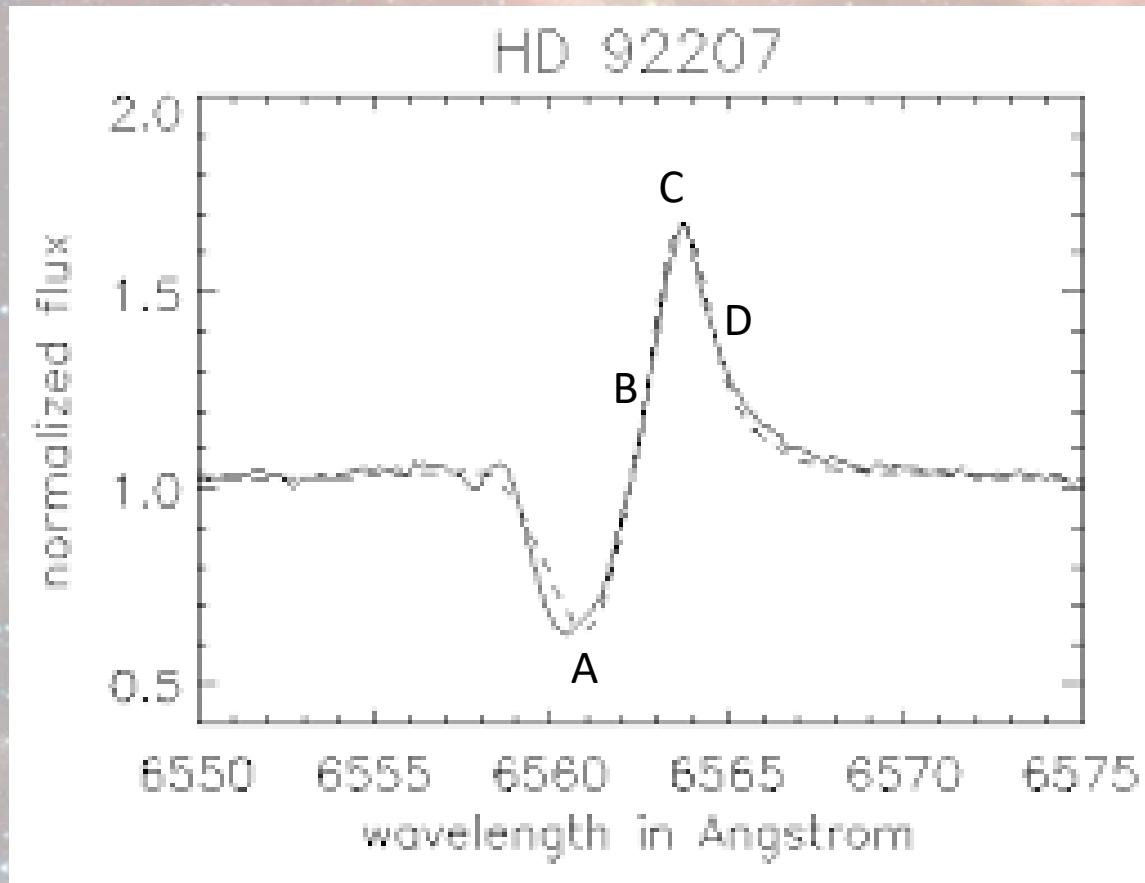


# Spektroskopische Beobachtungen

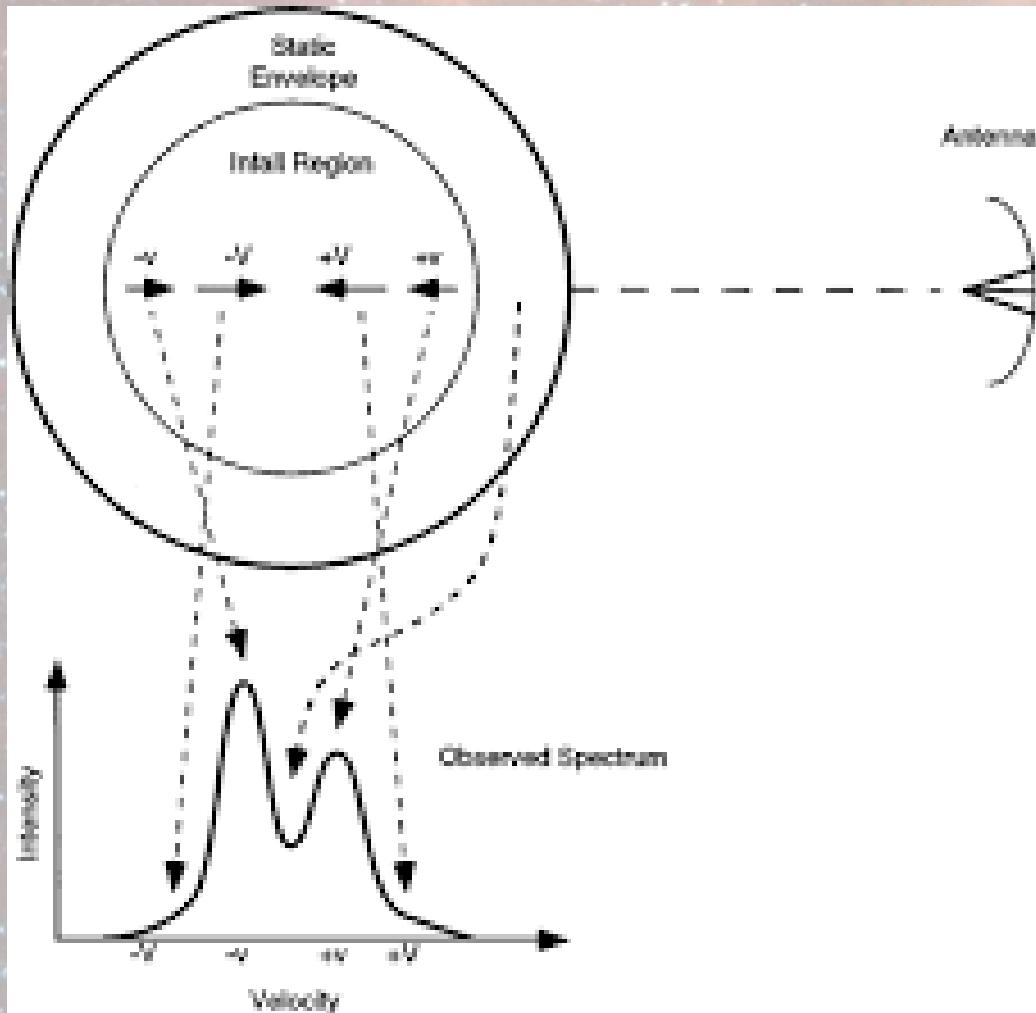
- Wir kennen die Wellenlänge genau, die einige Moleküle aussenden.
- Verschiebungen der Wellenlänge geben uns Informationen über die Dynamik der Moleküle und der Molekülwolken.
- Komplexe Strukturen spiegeln sich in ihrer spektralen Emission wieder.



# Beispiel: Expandiere Sternhüllen – P Cygni



# Beispiel: Kollaps einer Wolke

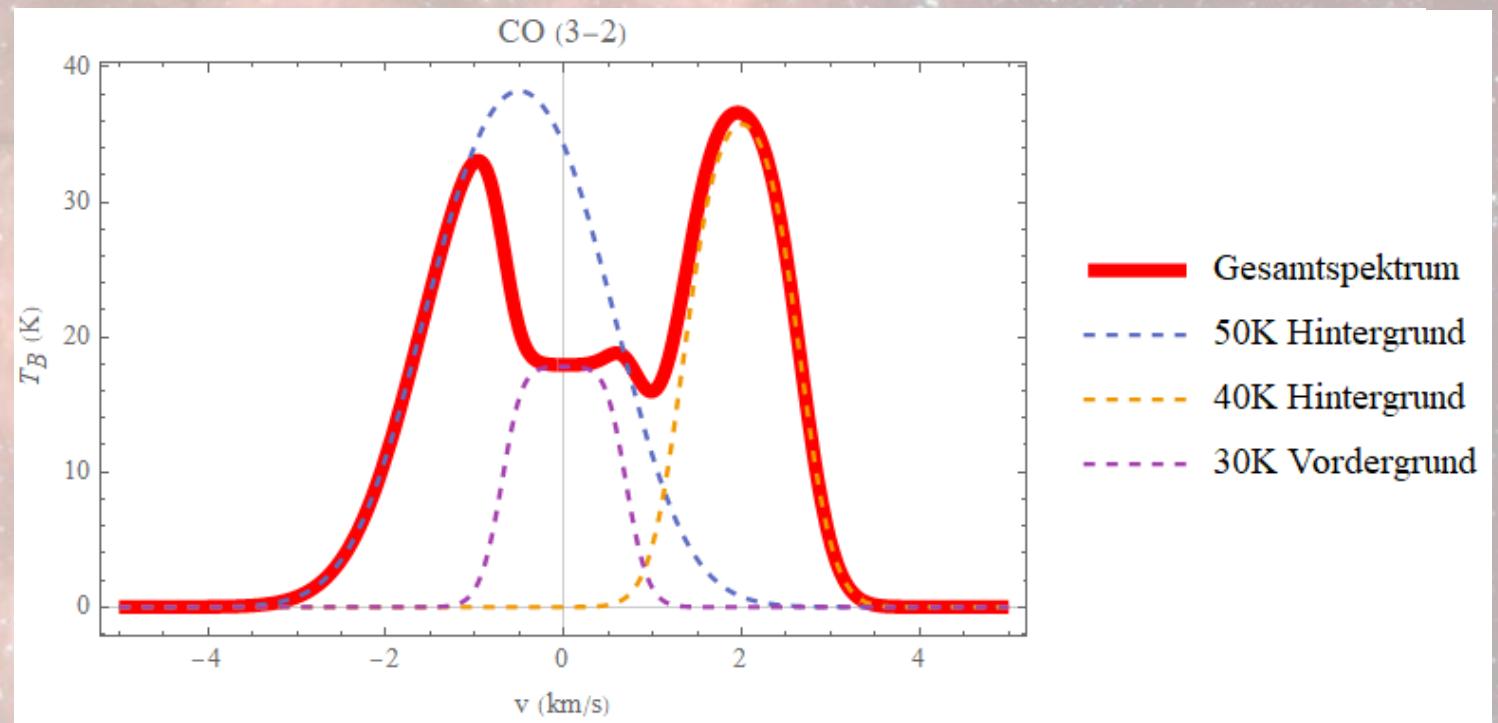
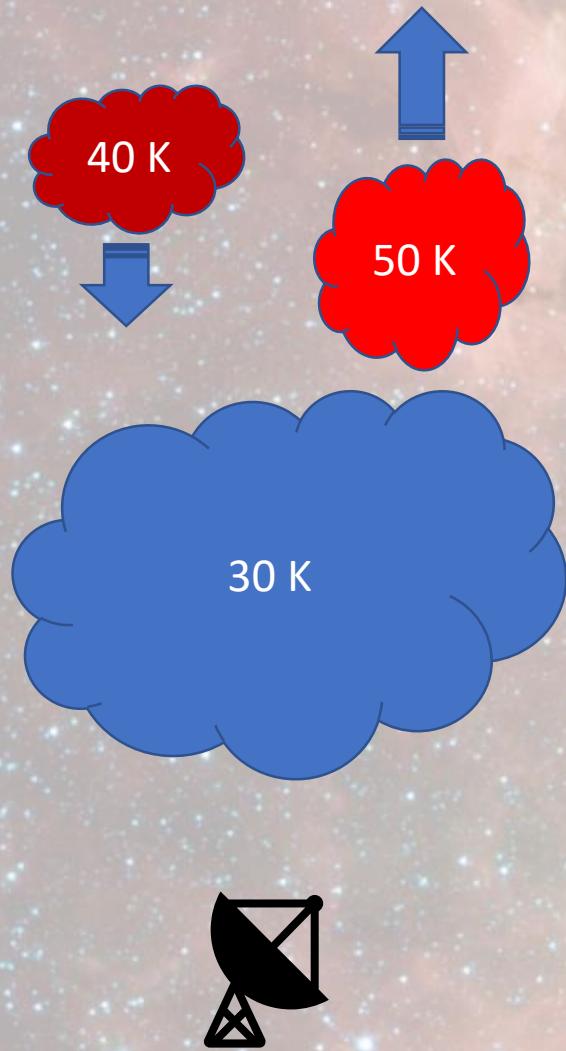


- Auch der Kollaps einer Wolke zeigt ein typisches Muster.

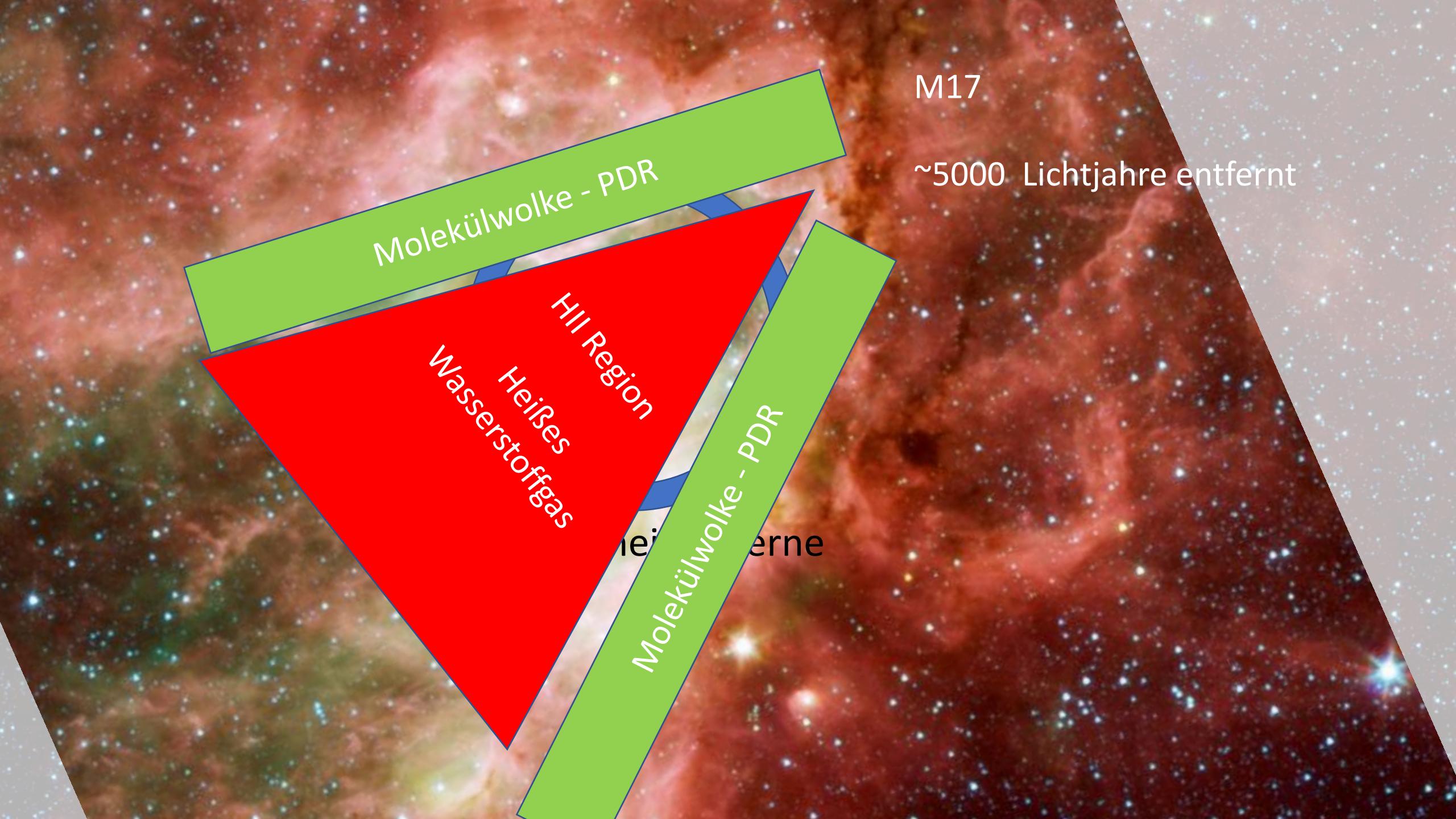
Andere Beispiele sind:

- Rotation
- Kollisionen
- Schockwellen

# Spektroskopische Beobachtungen



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



M17

~5000 Lichtjahre entfernt

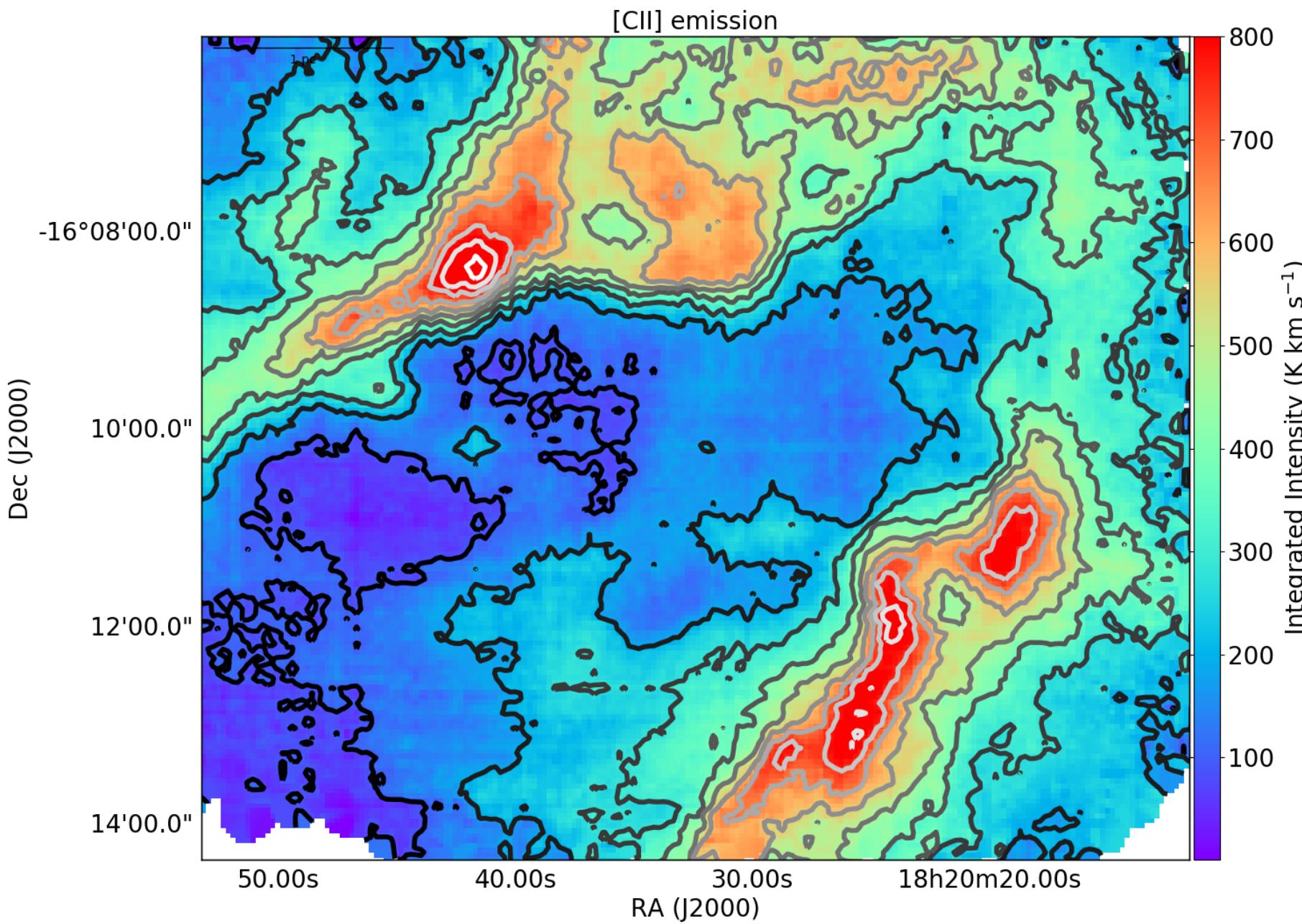
Molekülwolke - PDR

HII Region

Heißes  
Wasserstoffgas

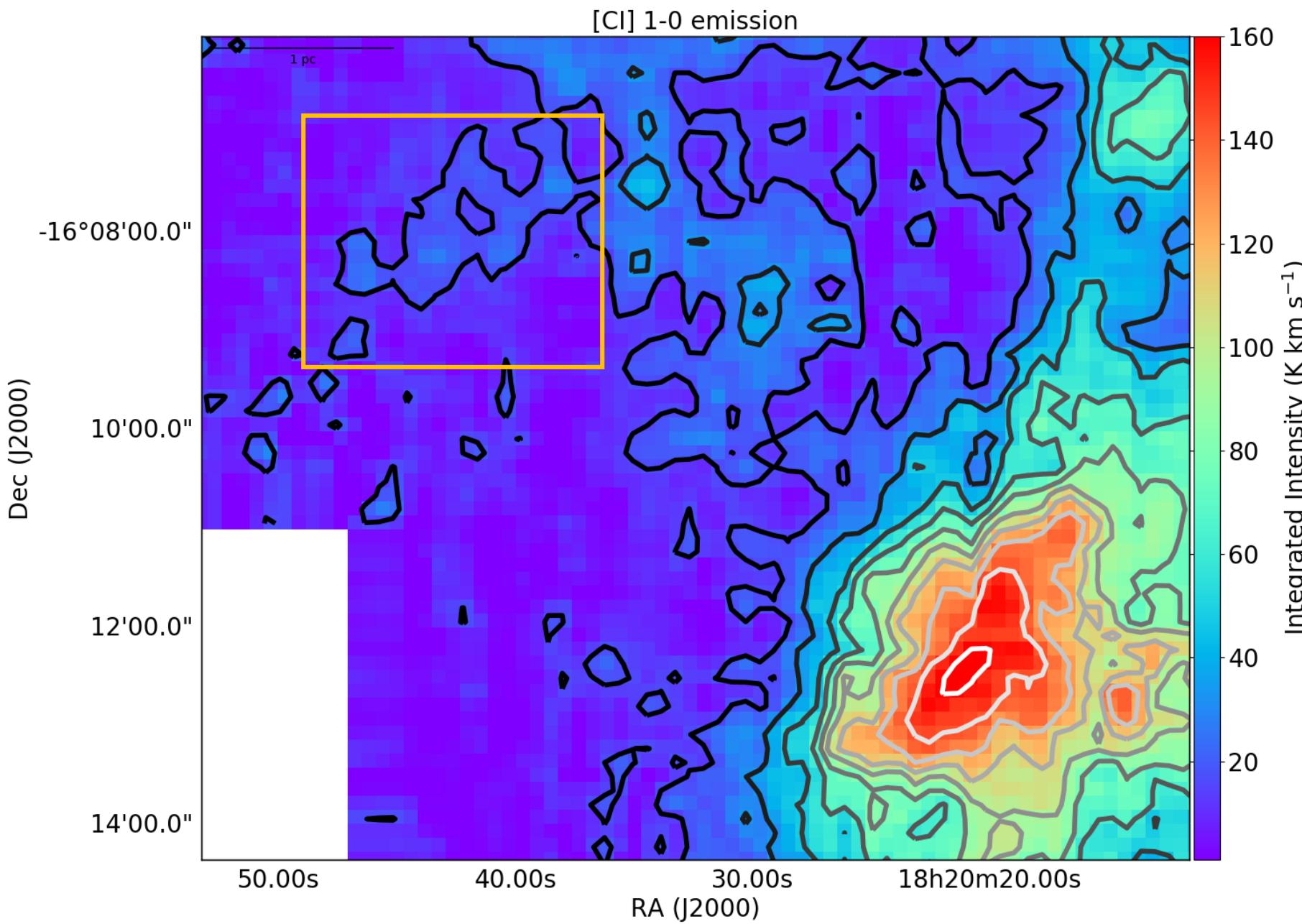
Molekülwolke - PDR



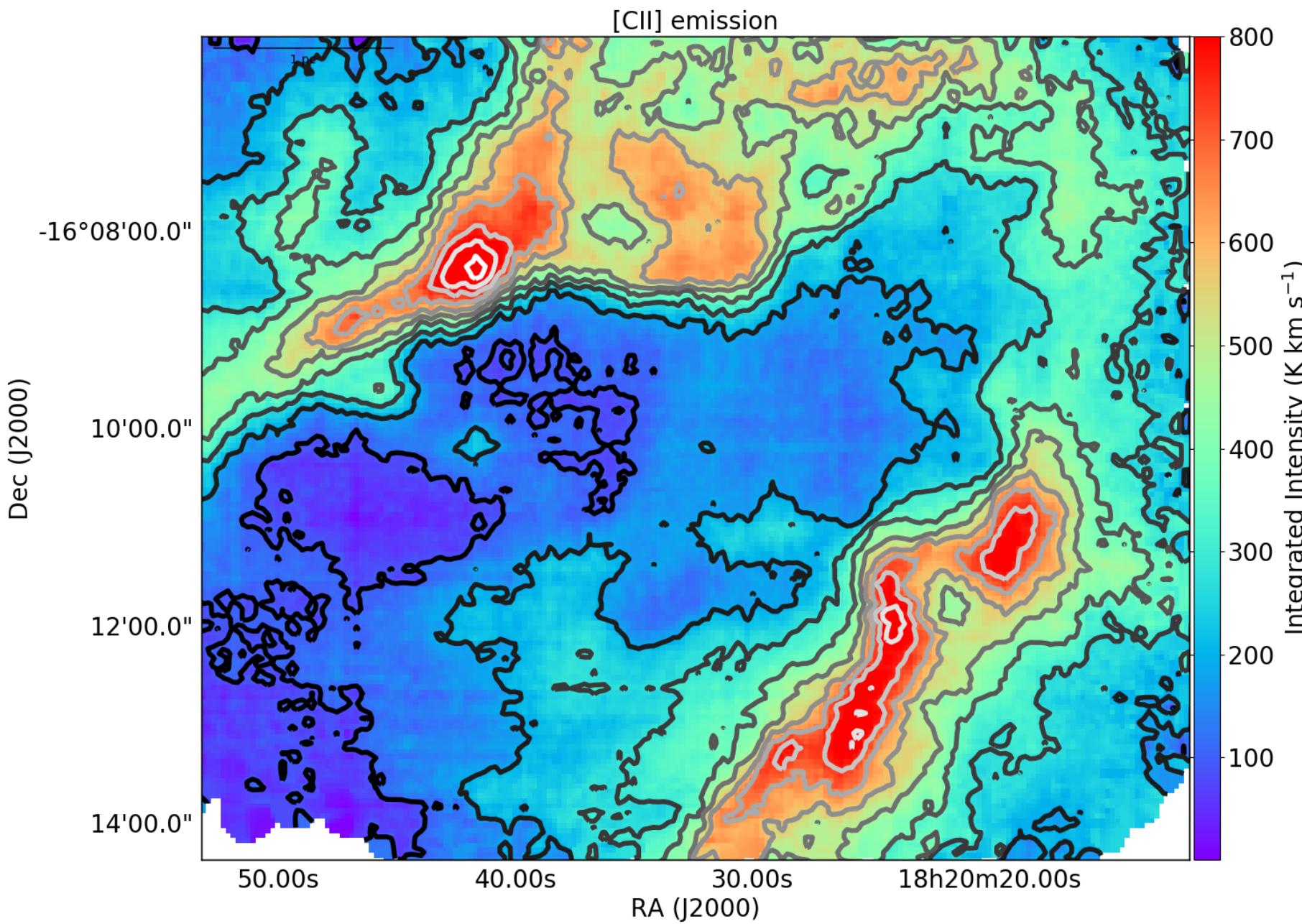


SOFIA Beobachtung:  
Karte der Emission  
von  $\text{C}^+$

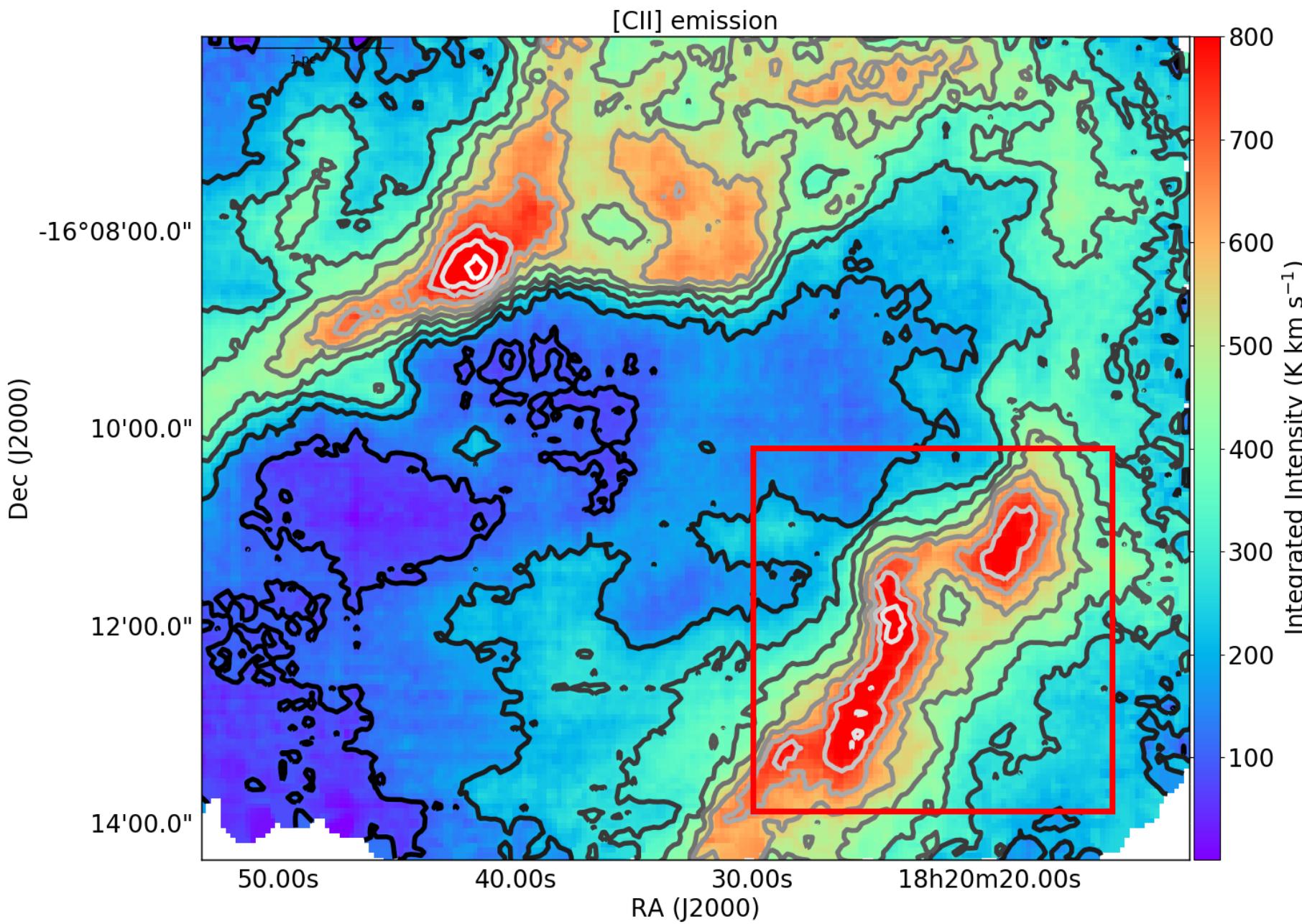




SOFIA Beobachtung:  
Karte der Emission von  
**Neutralem Kohlenstoff**

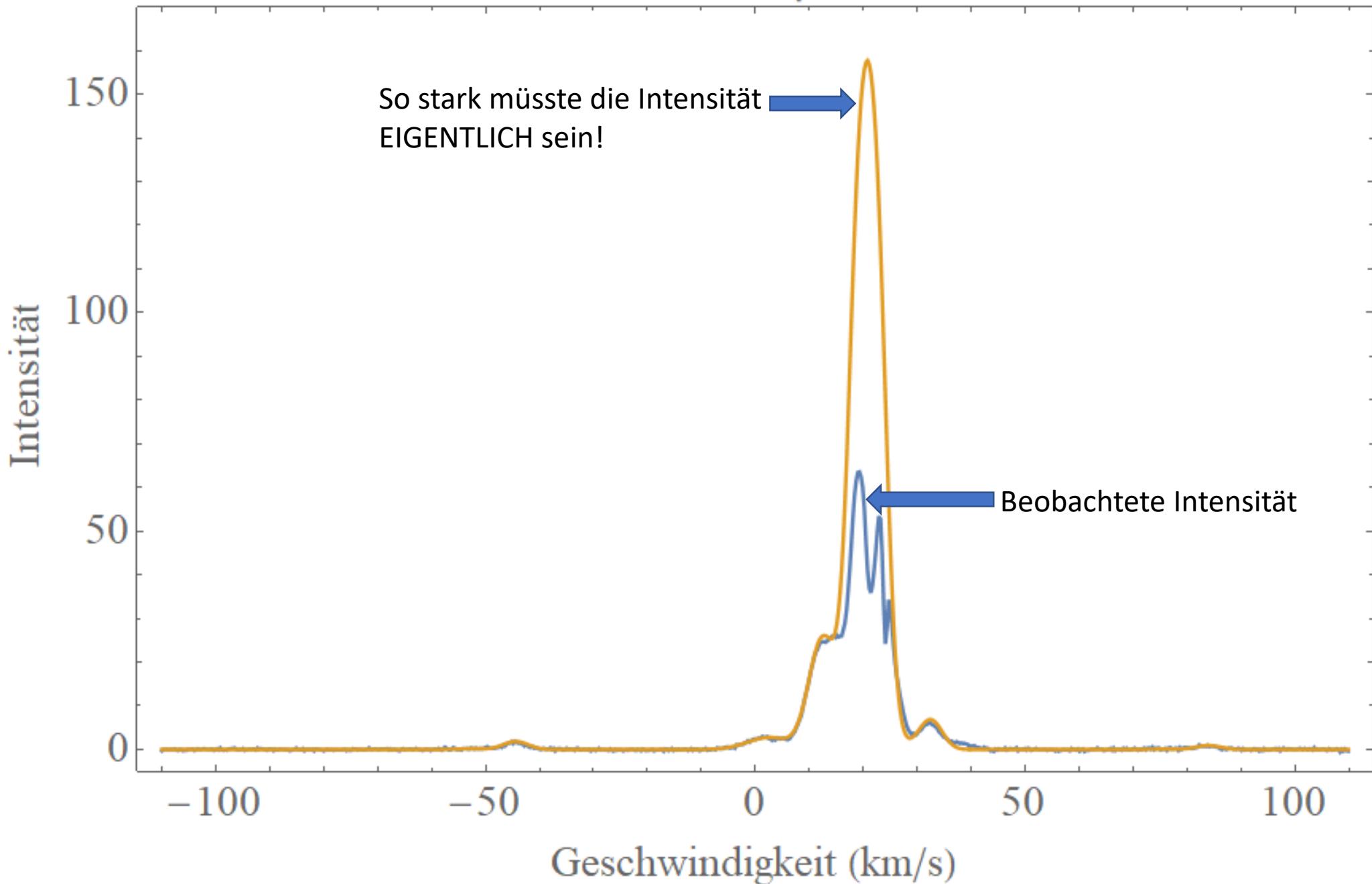


SOFIA Beobachtung:  
Karte der Emission  
von  $\text{C}^+$



SOFIA Beobachtung:  
Karte der Emission von  
**Ionisiertem Kohlenstoff**

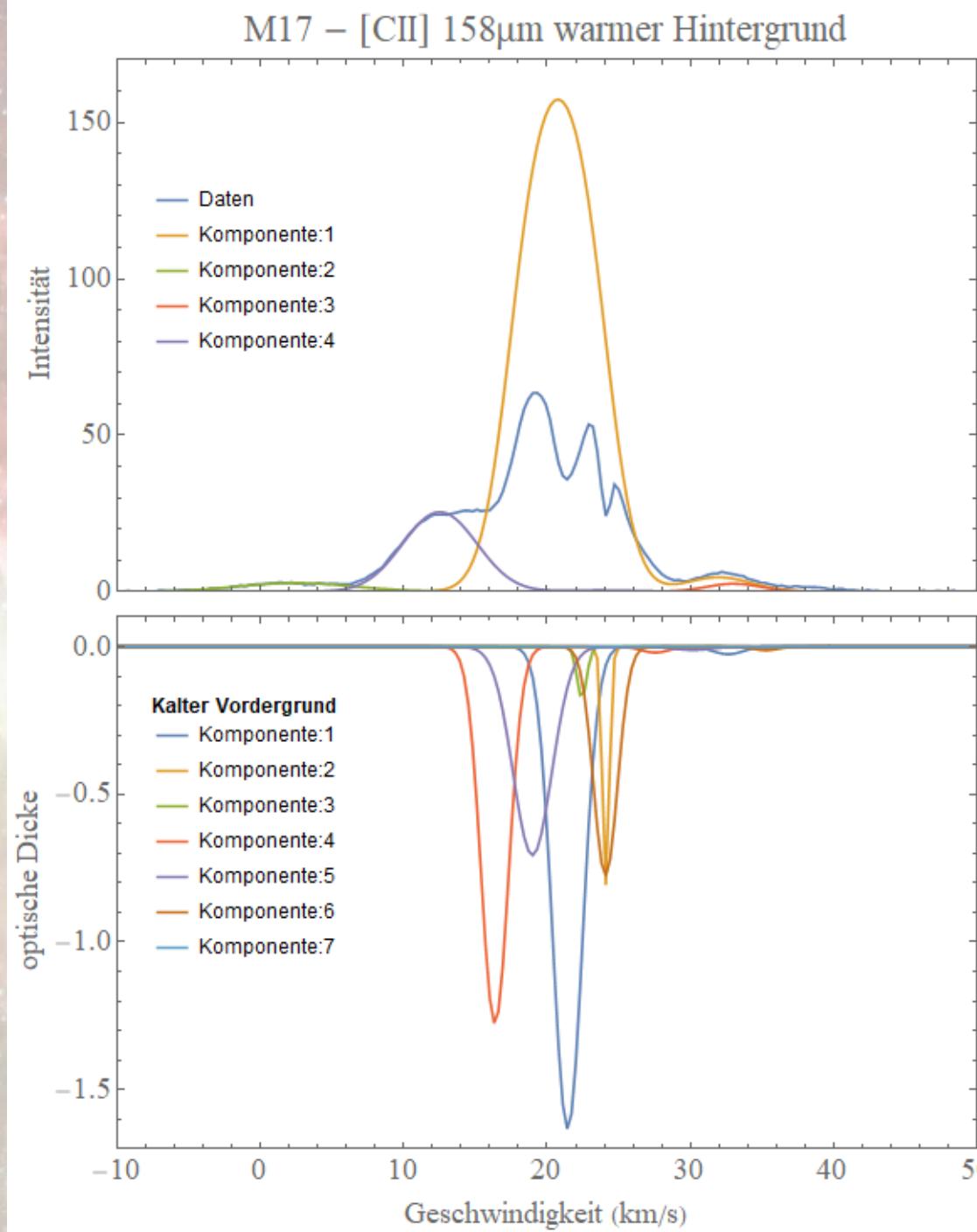
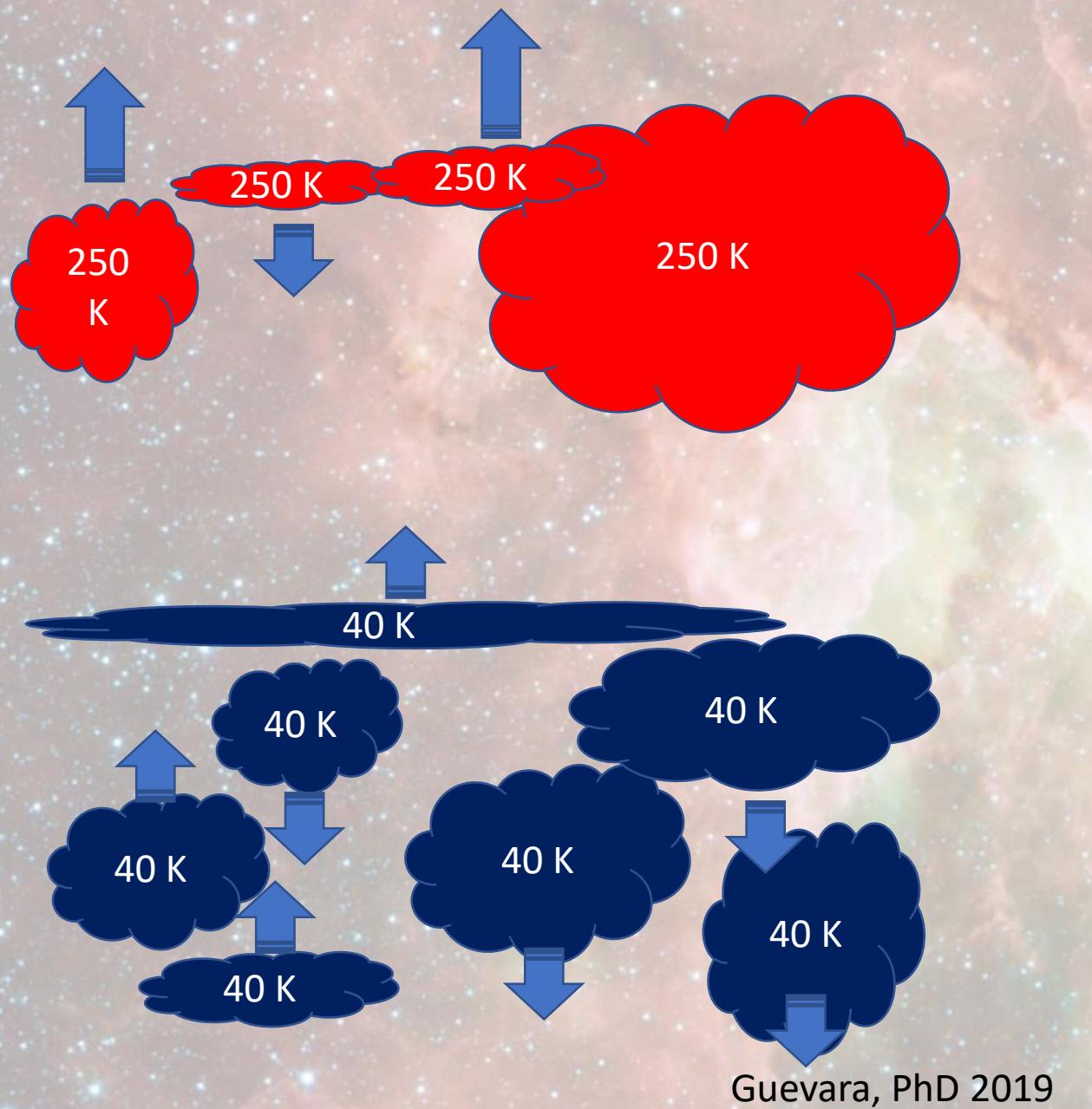
# M17 – [CII] 158 $\mu$ m Emission

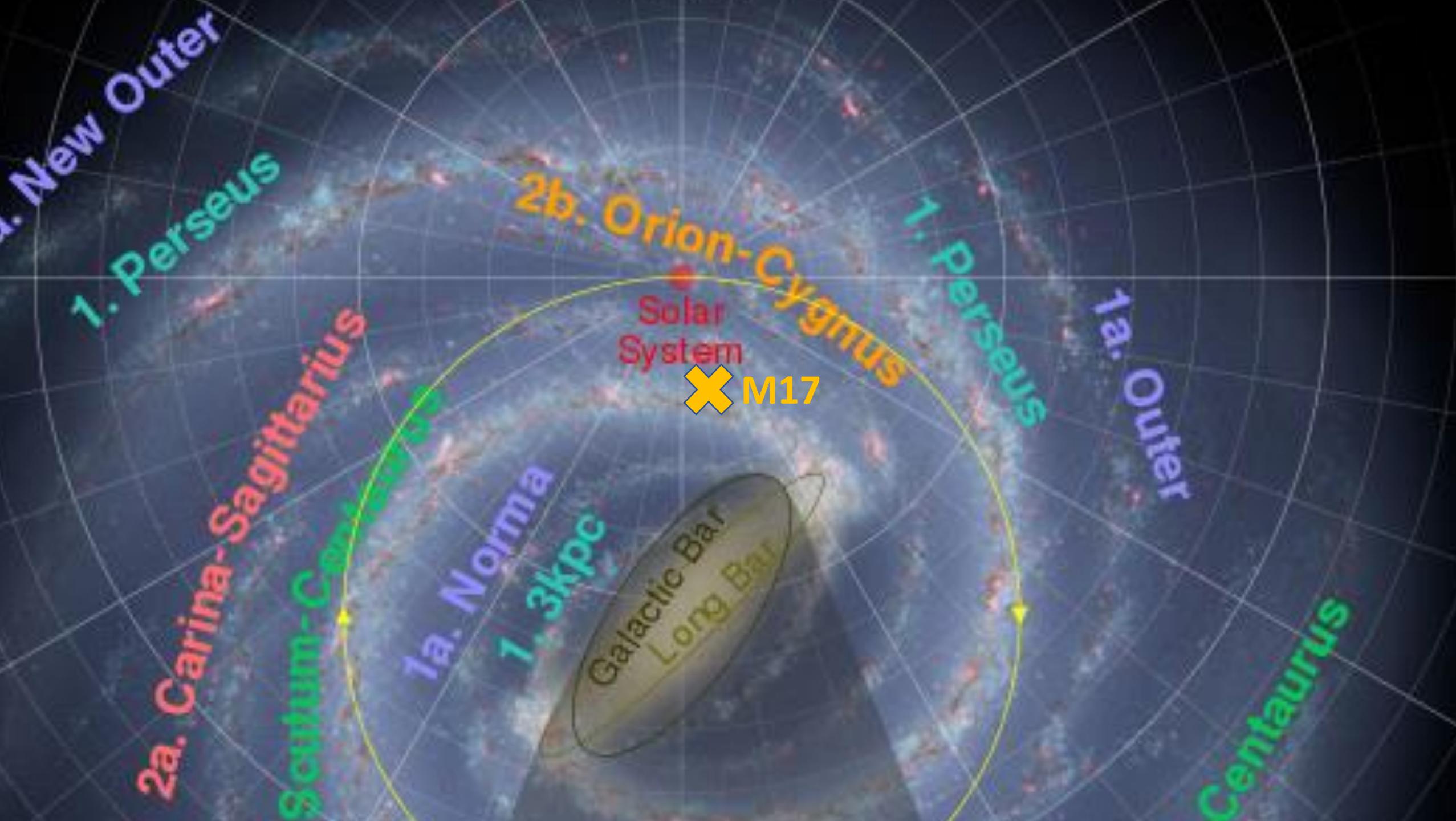


# Da fehlt doch was...

- 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





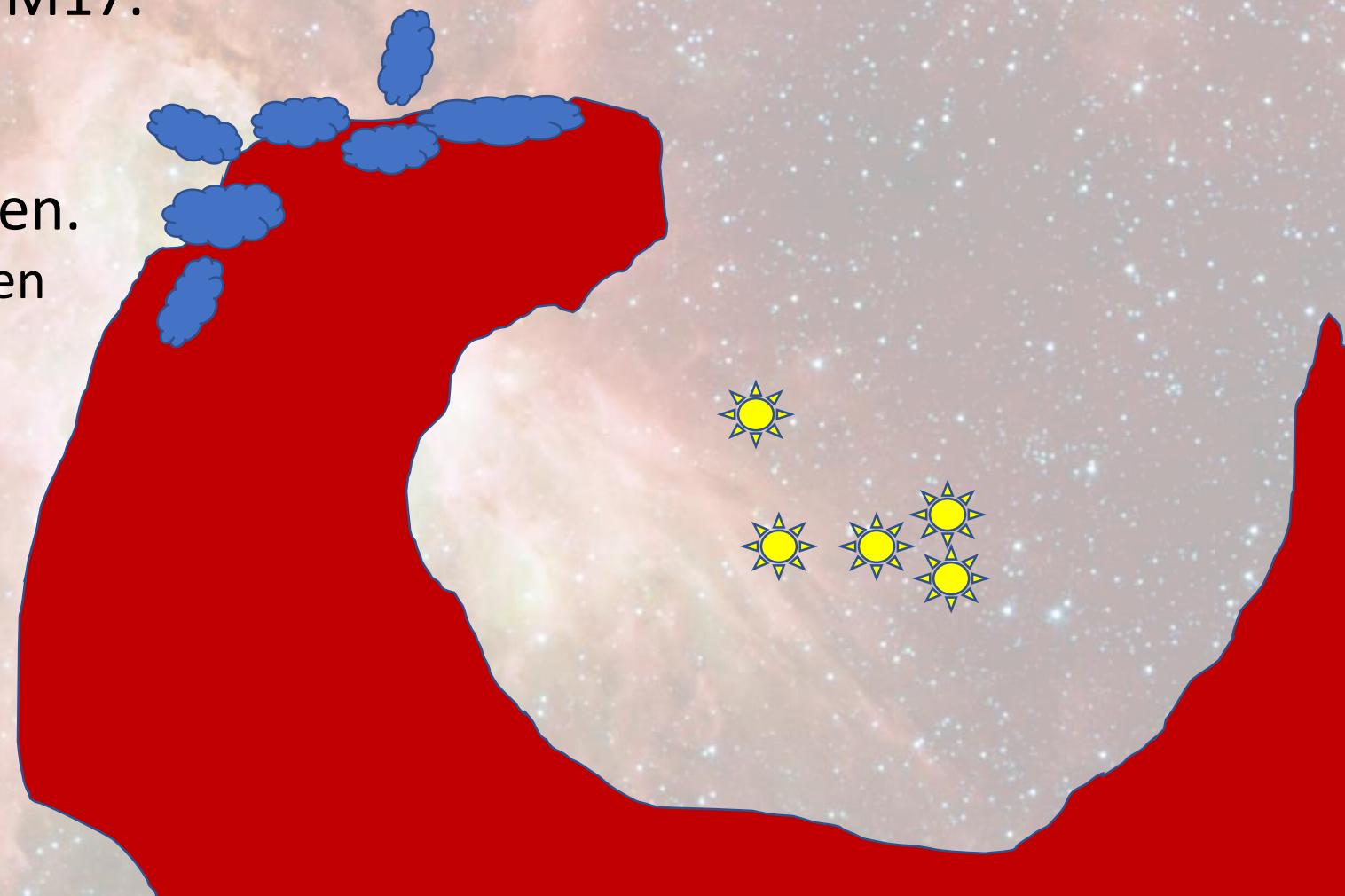
26. Orion-Cygnus





# Alternative Erklärung

- Kalten Wolken gehören zu M17.
- Komplexe Geometrische Konfiguration könnte das Spektrum evtl. auch erklären.
  - Abgeschirmt vor den Sternen
  - Im Vordergrund aber
  - 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  $< 100 \text{ Teilchen/cm}^{-3}$
  - Sehr geringe Säulendichten
  - Warm/heiß (70-5000 Kelvin)
- Ionisierter Kohlenstoff emittiert anstatt zu absorbieren

## BEOBACHTUNG

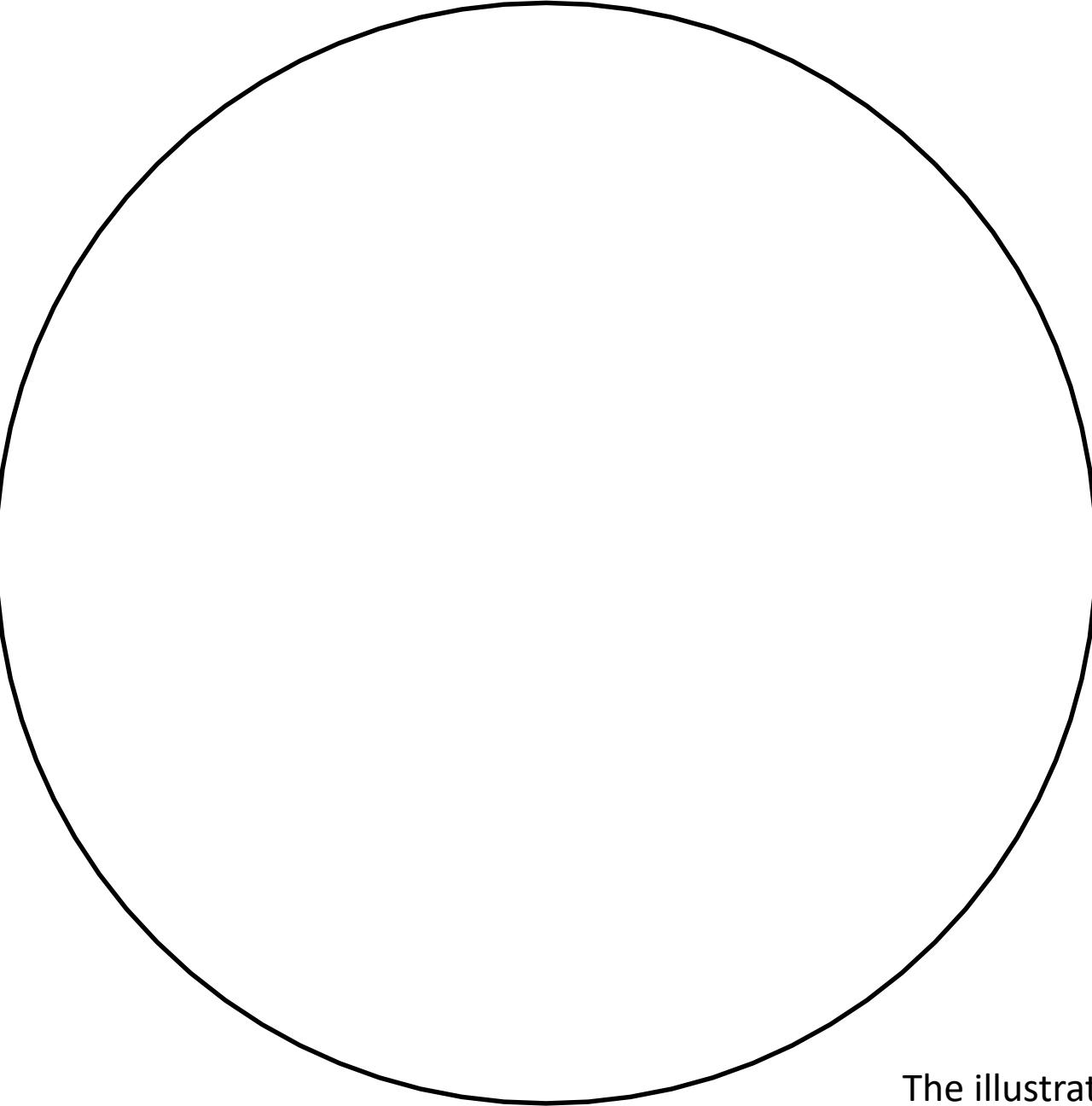
- Zwischen uns und M17 befinden sich Gaswolken die Strahlung von C<sup>+</sup> absorbieren:
  - ,**Hohe Dichten**'  $\sim 10000 \text{ Teilchen/cm}^{-3}$
  - Hohen Säulendichten (ausgedehnt)
  - **Kalt** (40 Kelvin)
  - Wie weit im Vordergrund von M17 ?
- **Die dürfte es da nicht geben!**
  - In kalten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

# aber Rätsel sind gut, denn

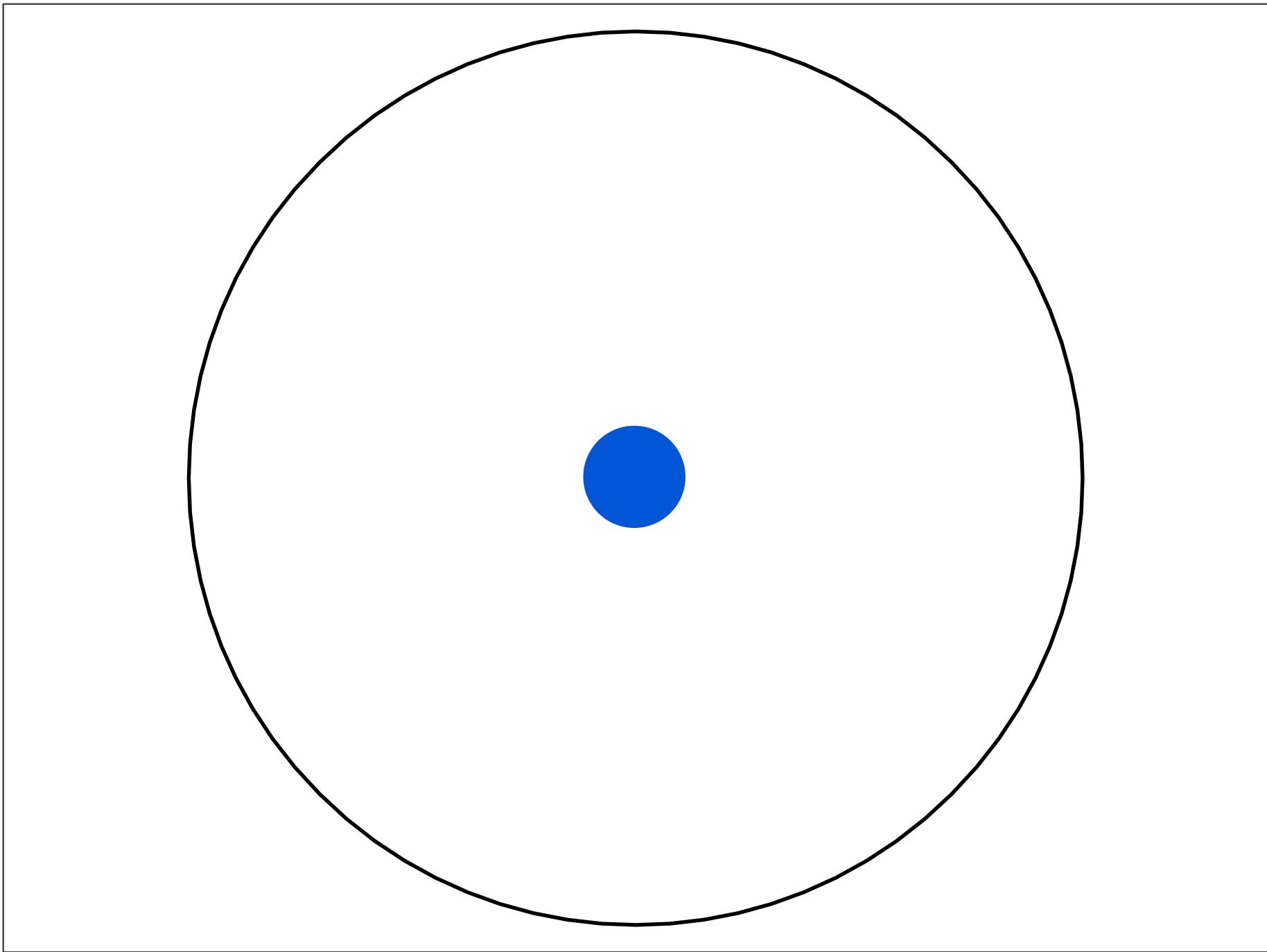
- Schritt für Schritt entschlüsseln wir das Bild des Kosmos.
- Beobachtungen mit SOFIA helfen uns dabei die Galaxie immer besser zu verstehen.
- Damit verstehen wir auch immer besser wie die Sonne und unsere Planeten entstehen konnten.
- Wir lernen immer besser, unter welchen Bedingungen Leben entstehen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

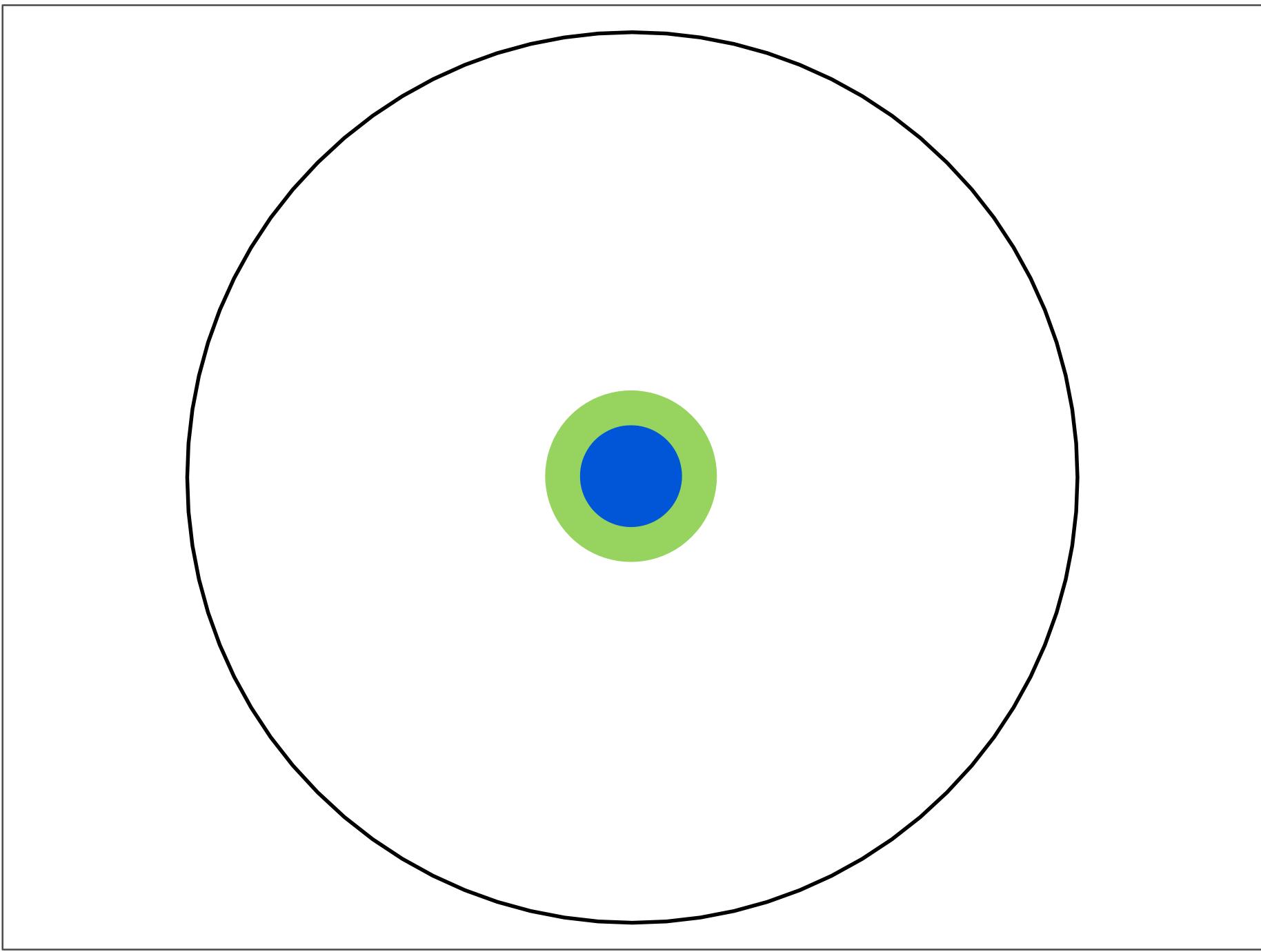
# Gar nicht Post-Faktisch

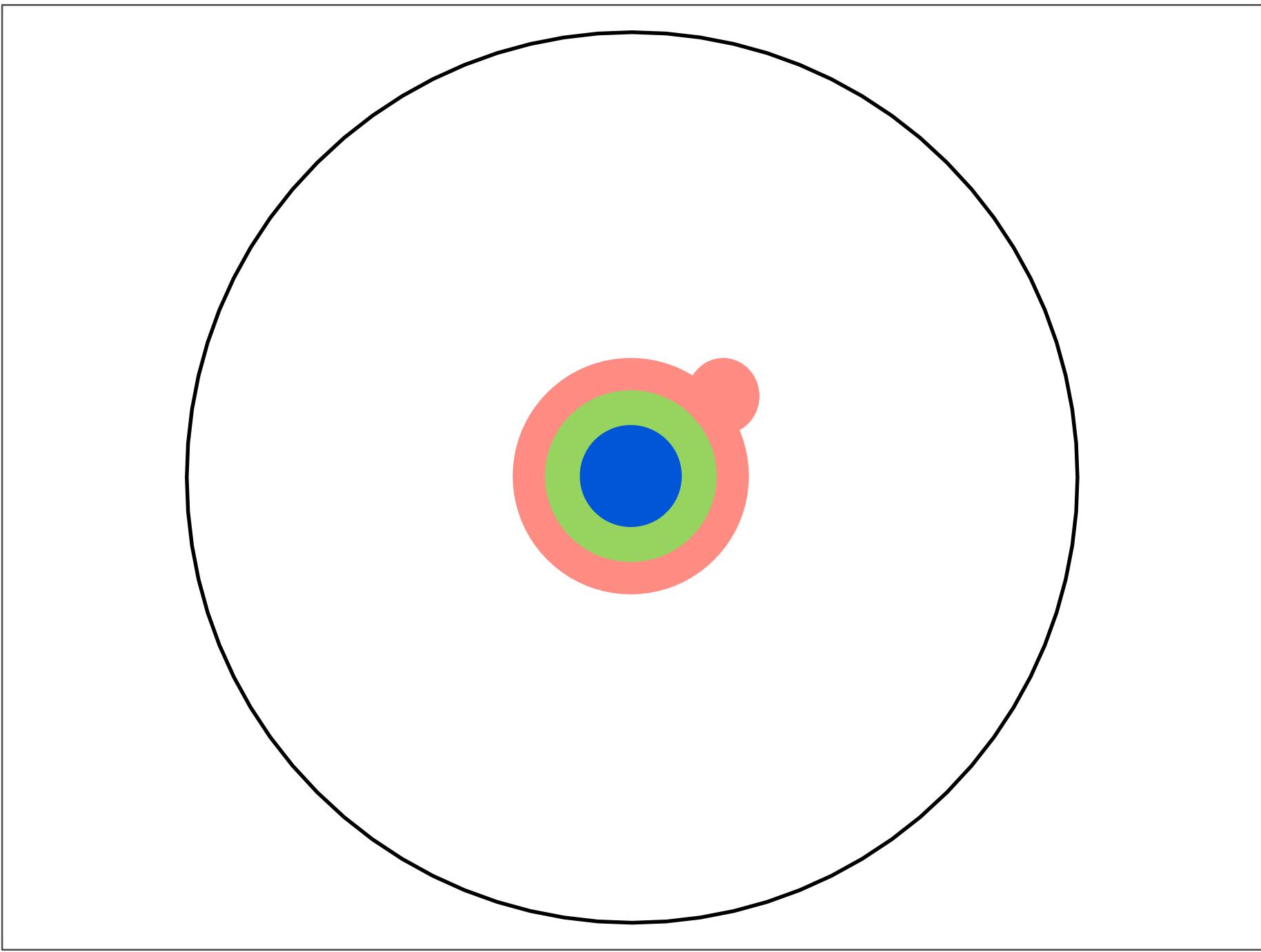
- Wie stellt sich die Wissenschaft ständig selbst in Frage.
- Wieso „wissen“ wir eigentlich was wir „wissen“?
- Gibt es unnützes Wissen?

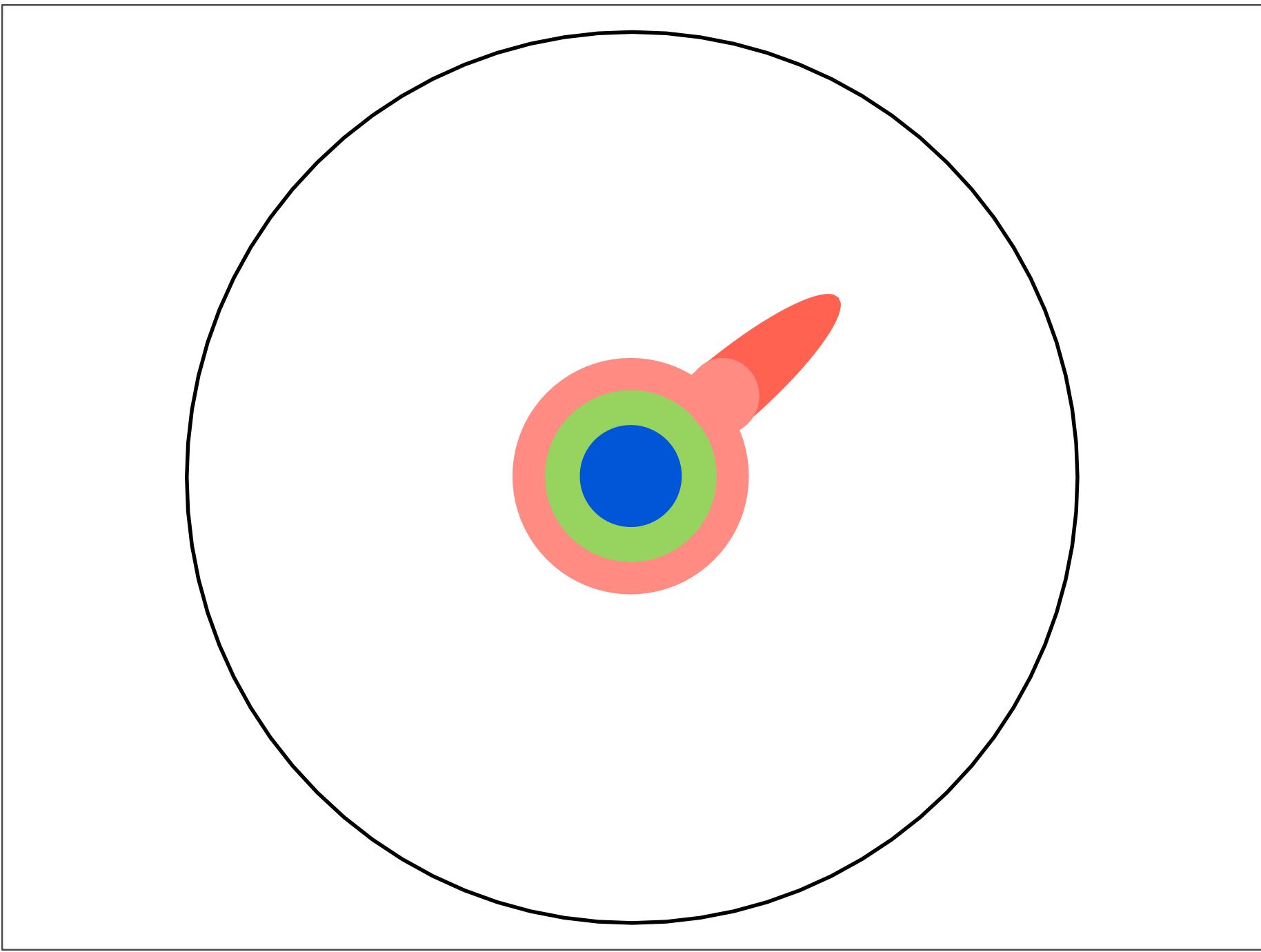


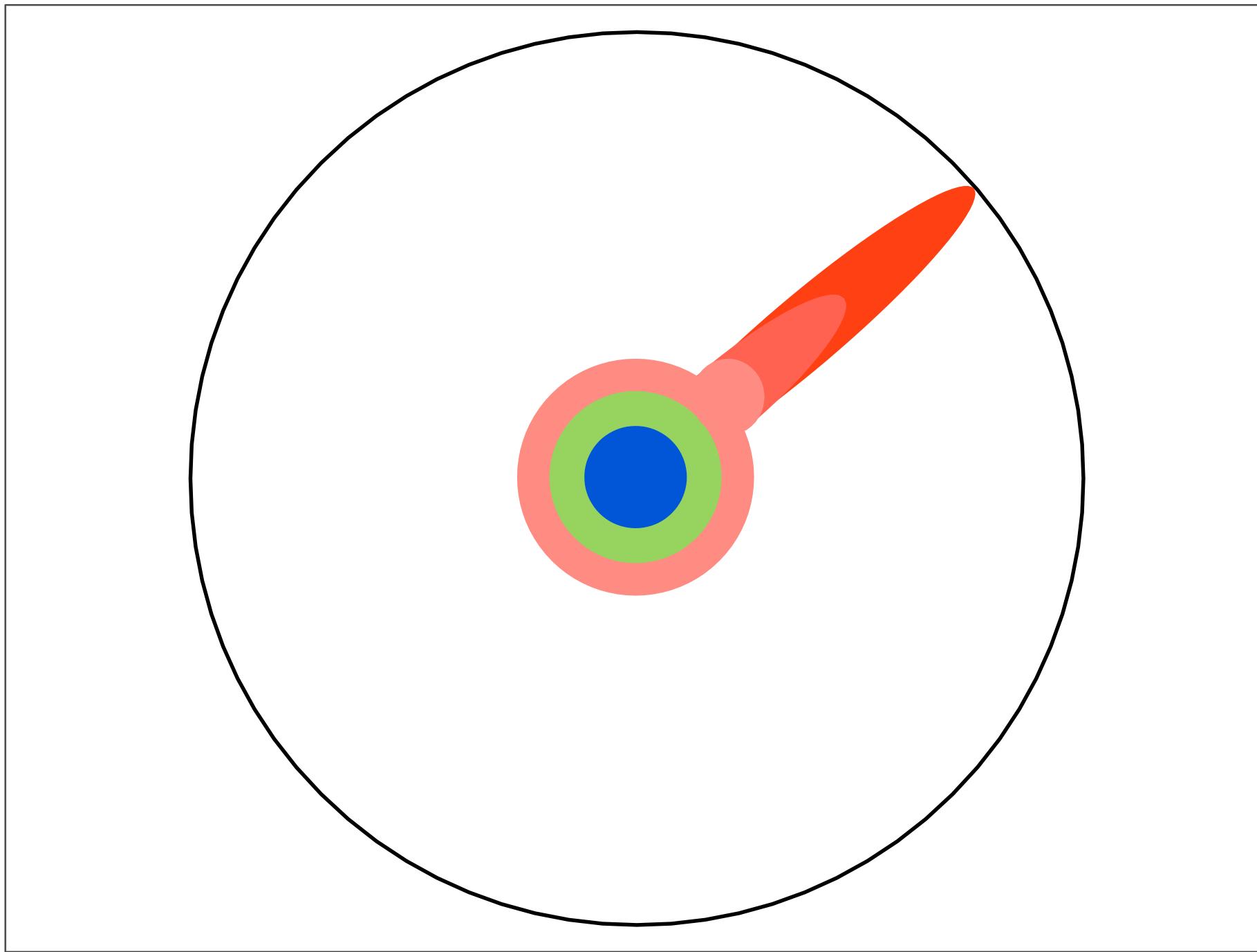
The illustrated guide to a PhD – Matt Might

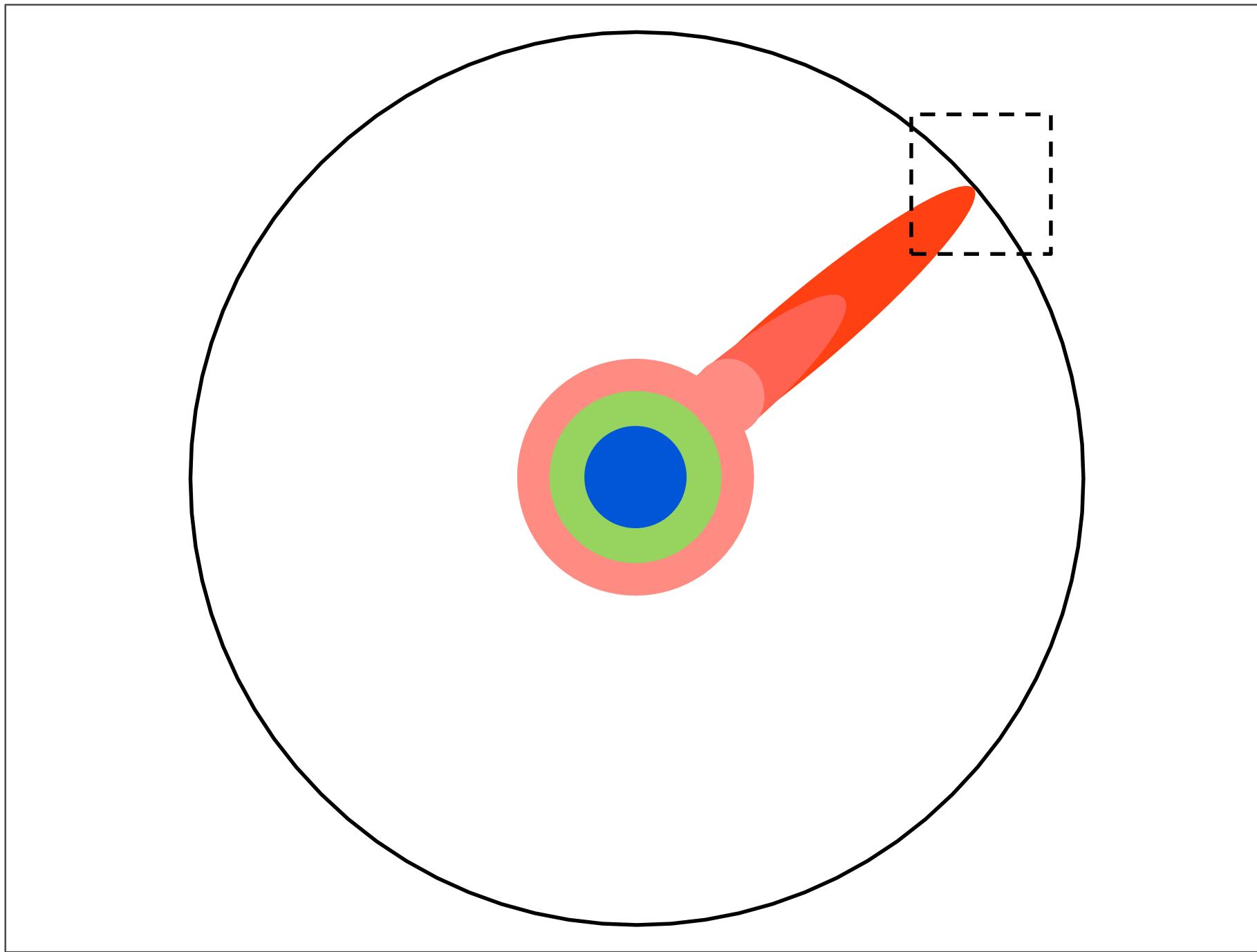


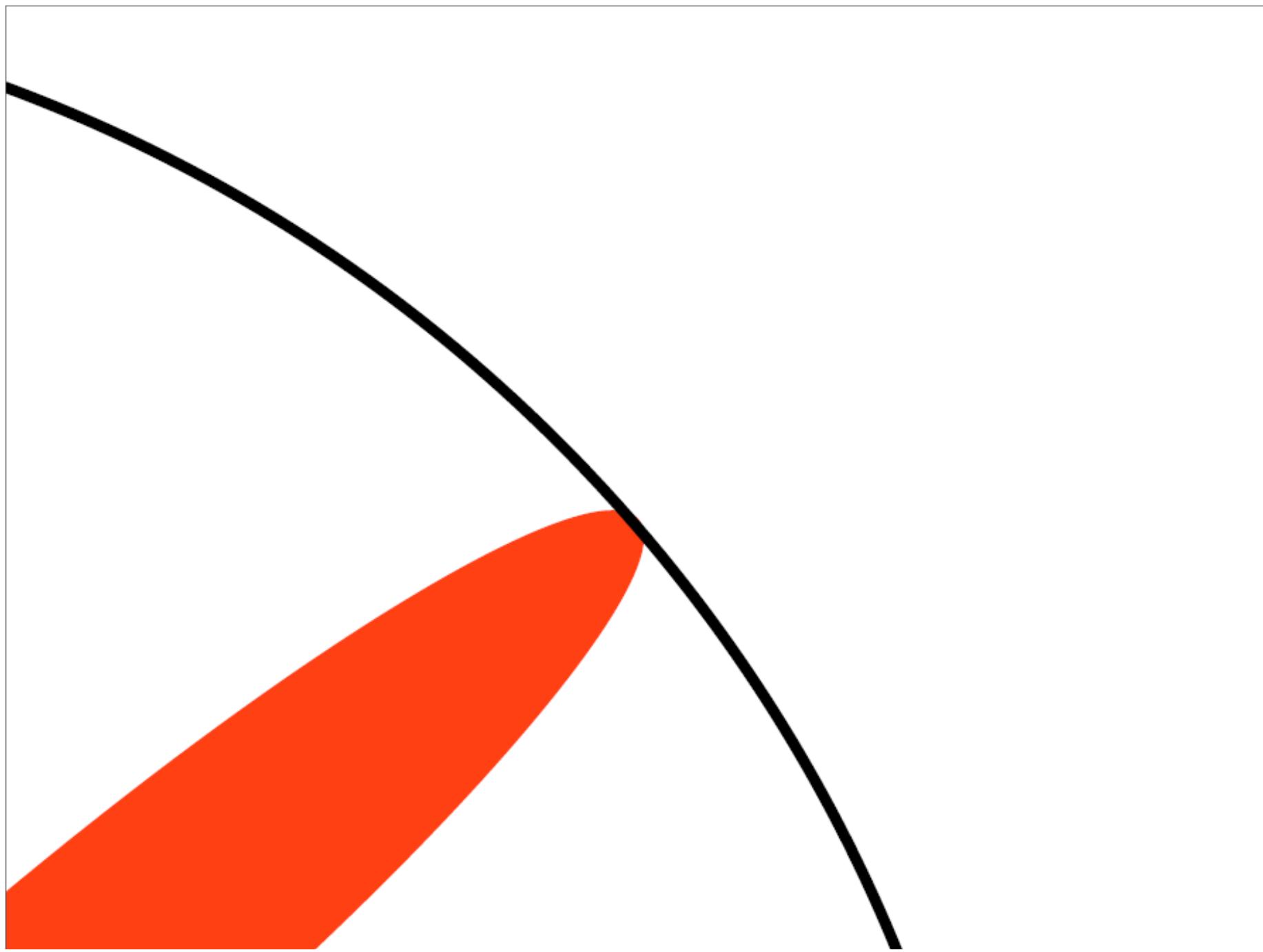


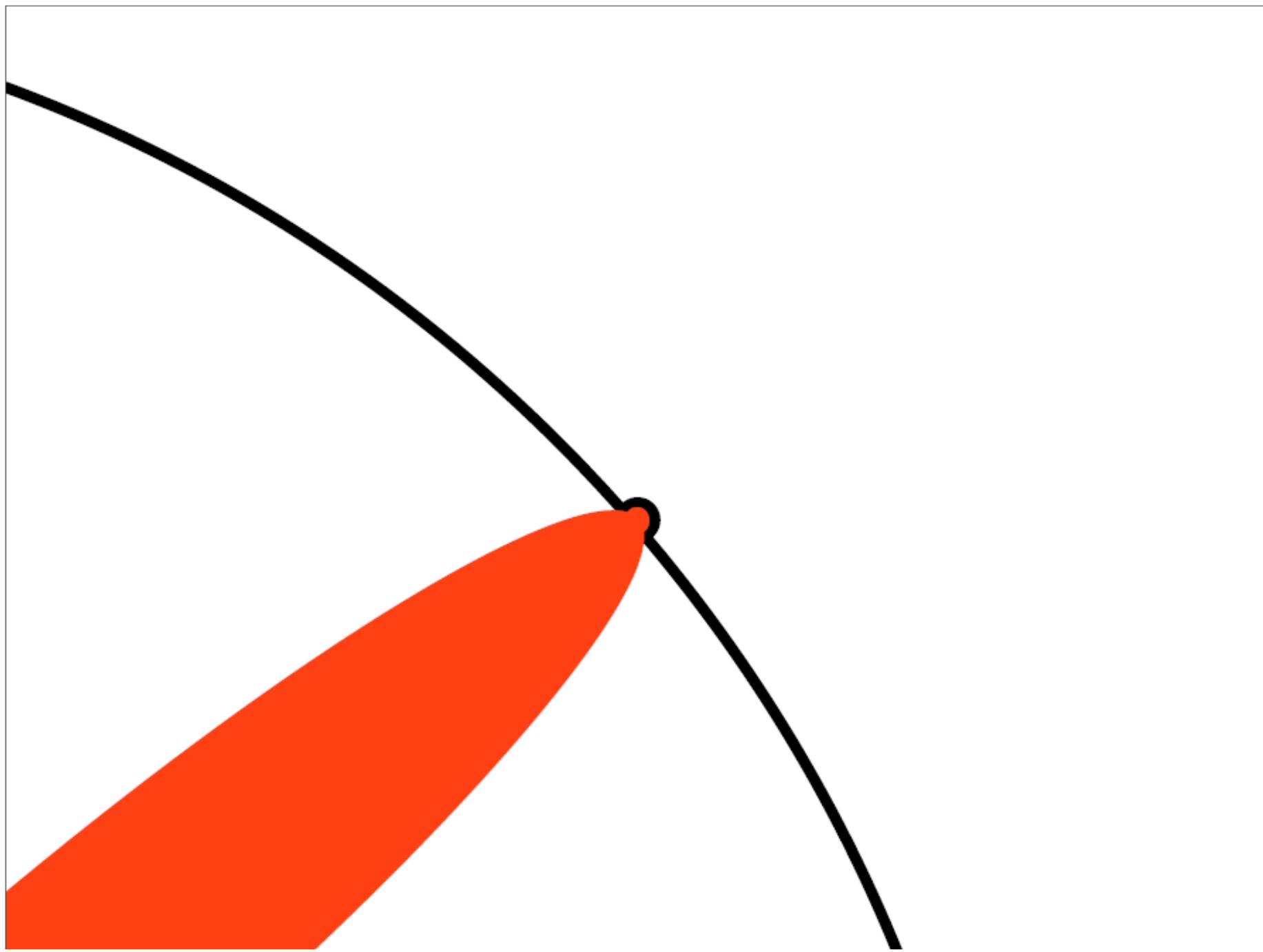


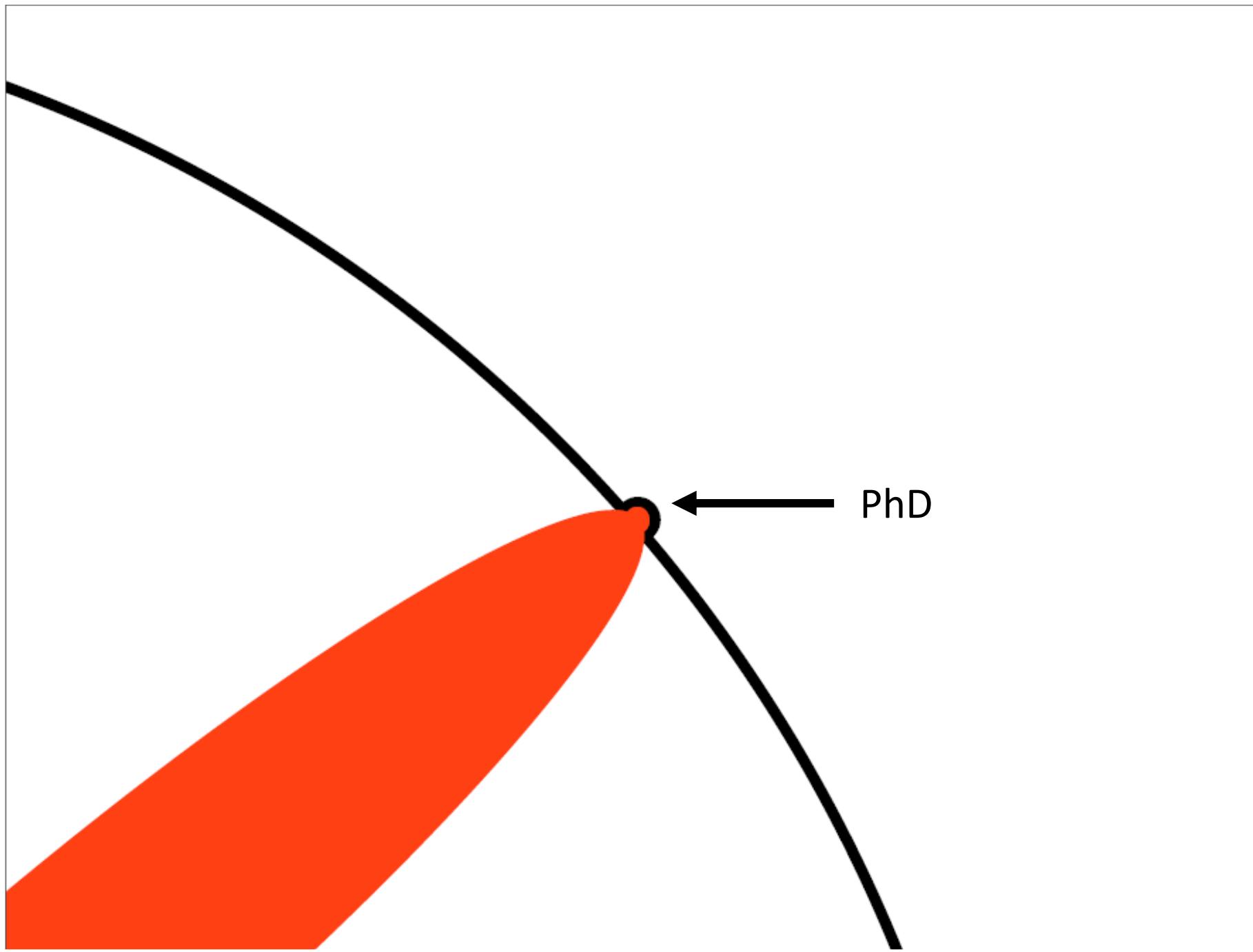






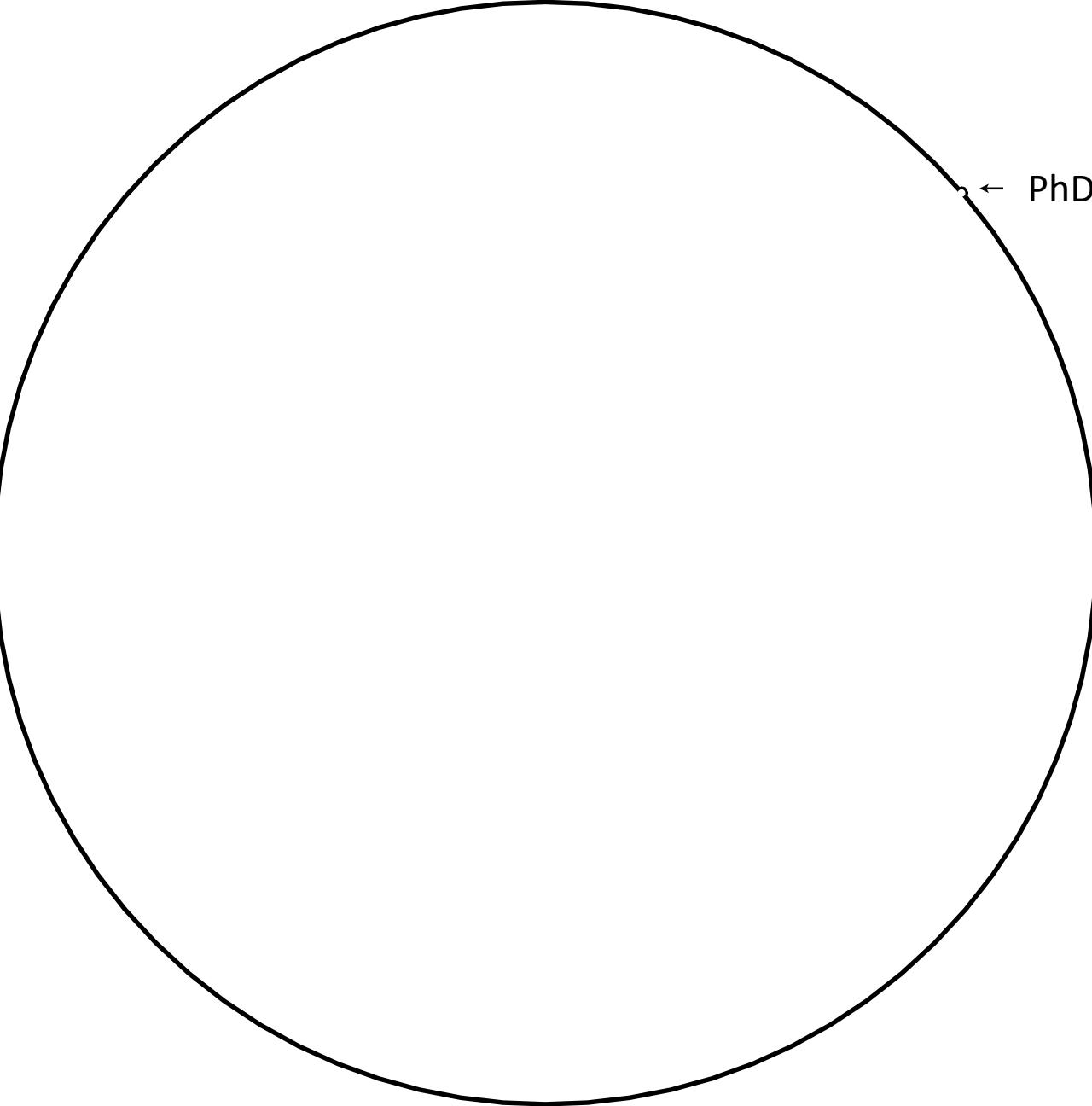






PhD



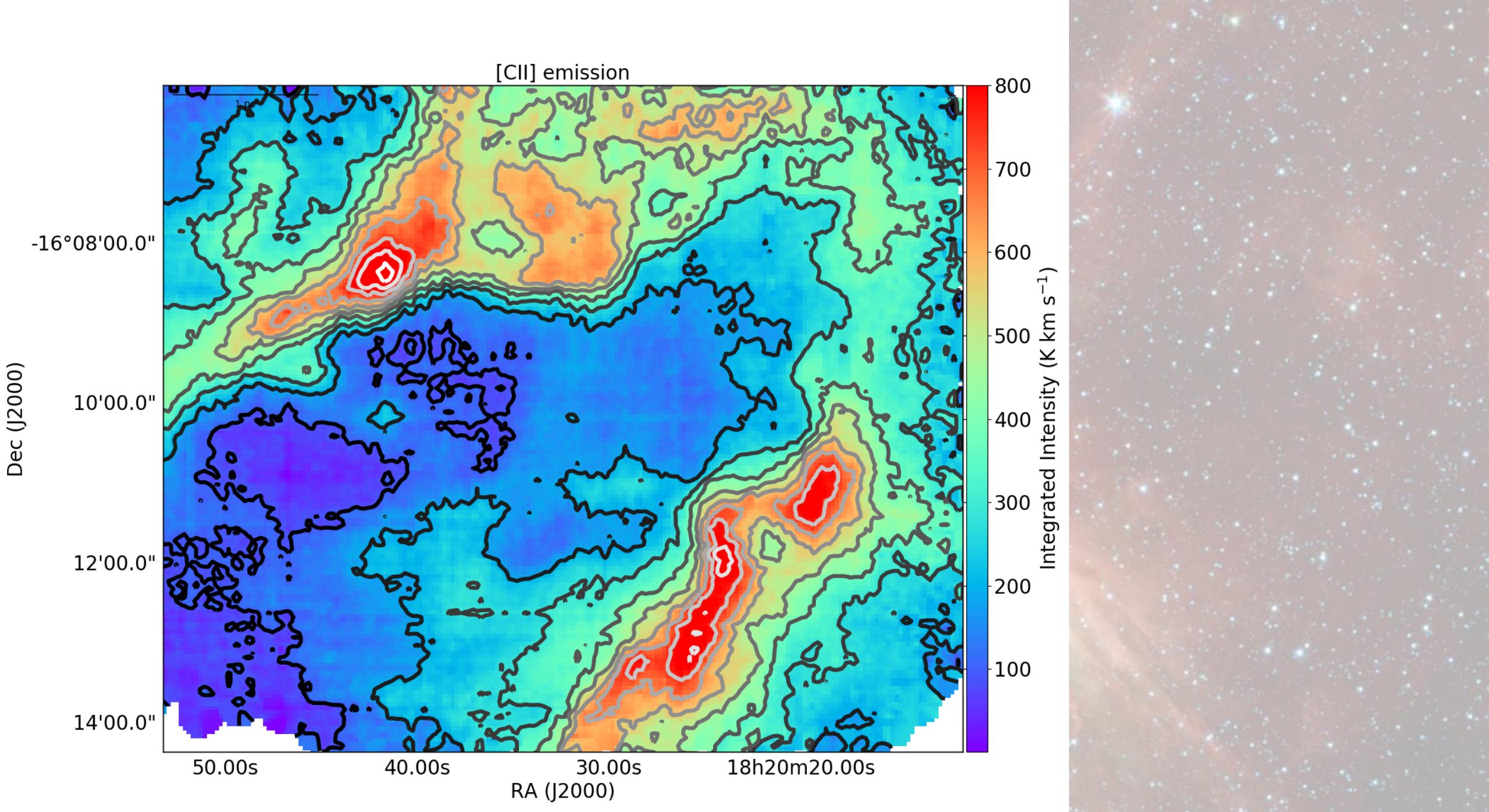


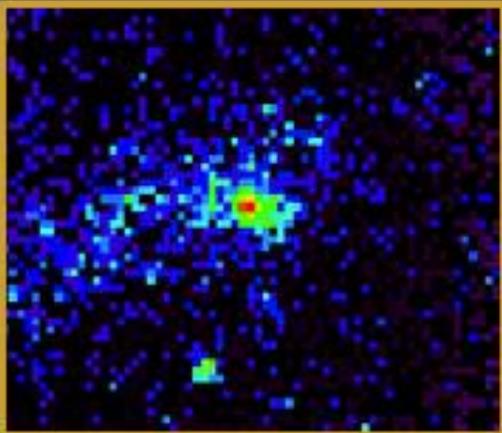
← PhD

A detailed image of a nebula, likely the Lagoon Nebula (M8), showing intricate patterns of red, orange, yellow, and green gas clouds against a dark, speckled background of distant stars.

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit



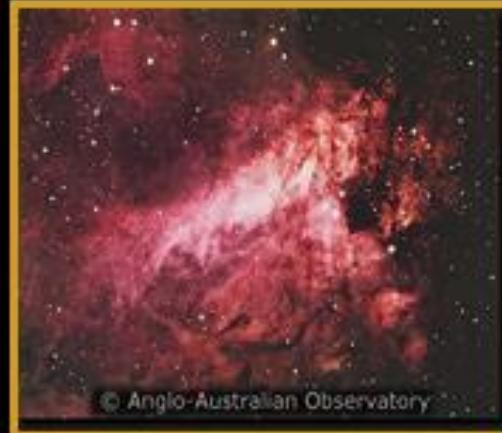




X-Ray: ROSAT



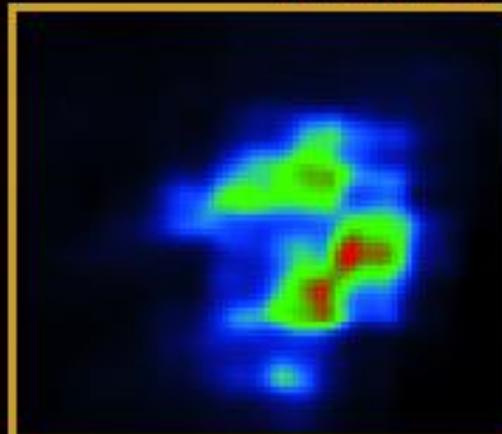
Visible: DSS



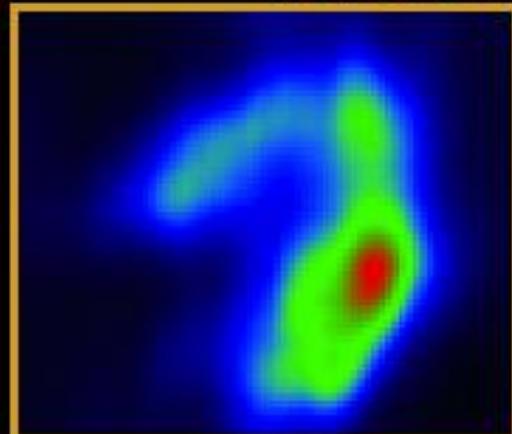
Visible: Color © AAO



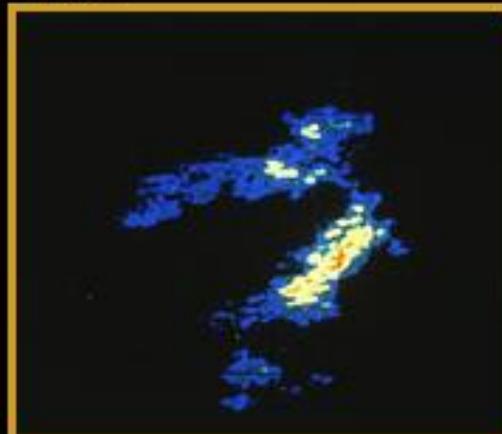
Near-Infrared: 2MASS



Mid-Infrared: IRAS



Far-Infrared: IRAS



Radio: VLA

# M17

