



Photonentorpedos aus dem All

-

Strahlungstransport und  
Astrophysikalische Maser

Dr. Markus Röllig  
Universität zu Köln





NGC 4258 / M106





W. H. Kegel (1936-2019)

**In Erinnerung an Prof. Dr. Wilhelm H. Kegel**

# L.A.S.E.R / M.A.S.E.R



- **LASER** steht für “**L**ight **A**mplification through **s**timulated **e**mission of **r**adiation”  
auf deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung
- Light = sichtbares Licht ( $\lambda=300\dots600$  nm)
- Microwave=Mikrowellen ( $\lambda =1\text{mm}\dots30$  cm)
- **MASER** steht für “**M**icrowave **A**mplification through **s**timulated **e**mission of **r**adiation”



# Astronomische Maser

- Maserstrahlung ist unglaublich intensiv. Teilweise strahlen sie bei nur einer Frequenz ein Vielfaches der gesamten Energie der Sonnenstrahlung ab.
- Typische Maser haben Strahlungstemperaturen von mehr als  $10^9$  K, d.h. eine Glühbirne müsste mehrere Mrd. K heiß sein um bei der gleichen Frequenz genauso hell zu sein.
- Sogenannte Megamaser sind eine Million mal heller als Maser in der Milchstraße.
- Wie kann das sein?



# Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

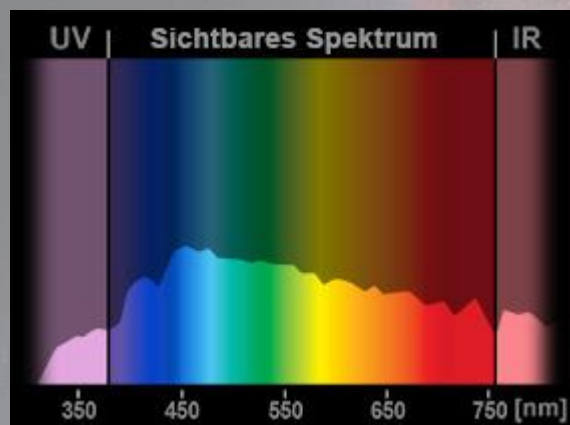
- Hohe Intensität



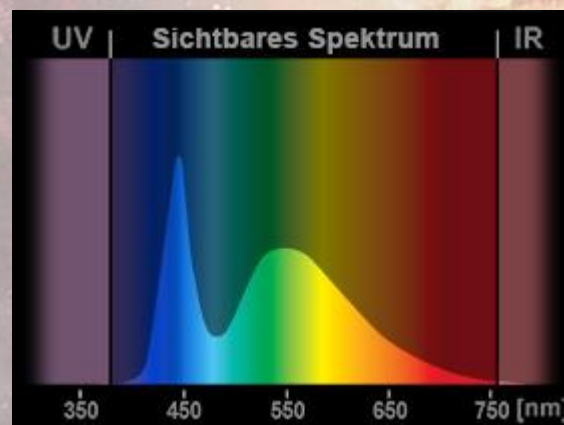


# Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

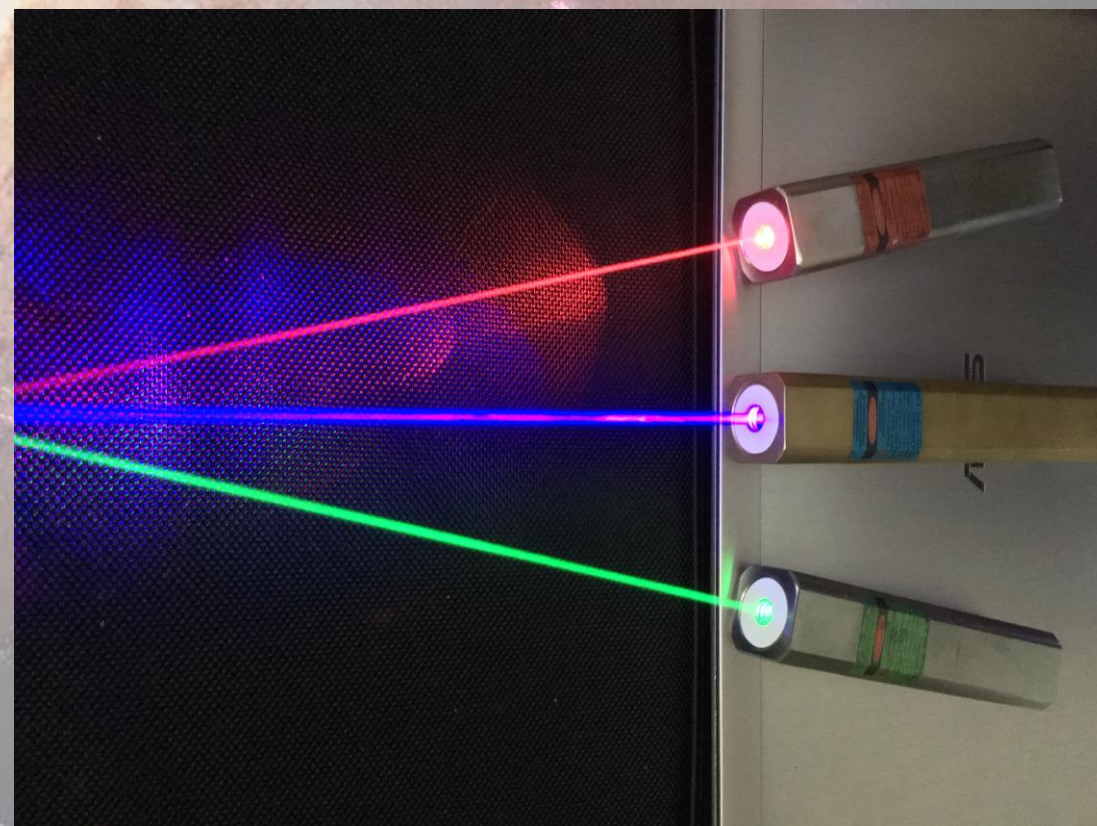
- Hohe Intensität
- Monochromatisch (besteht nur aus einer Wellenlänge/Farbe)



Sonnenspektrum  
zu Mittag



Lichtspektrum einer  
LED-Lampe "daylight"



# Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

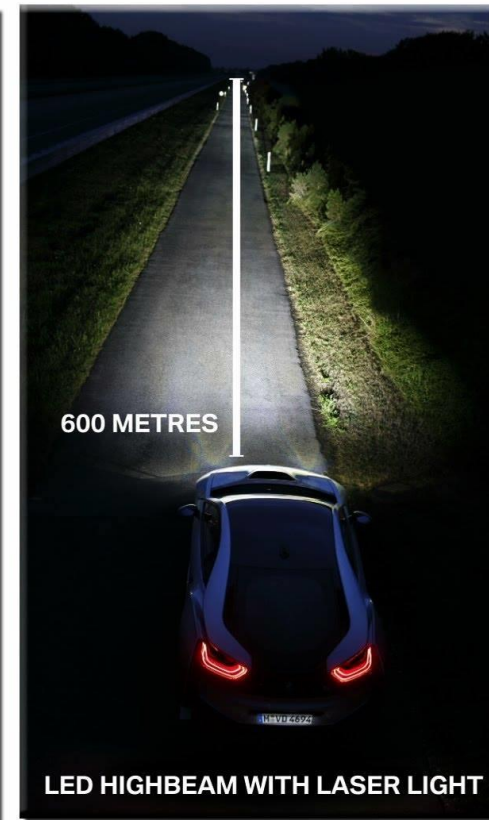
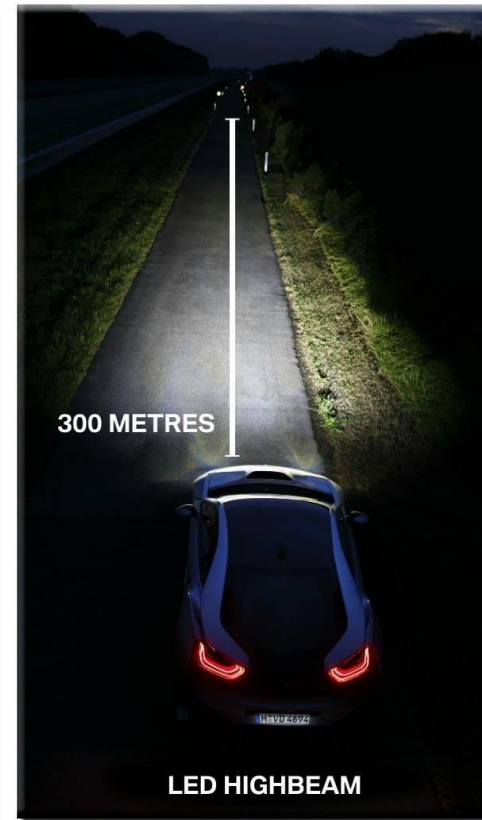
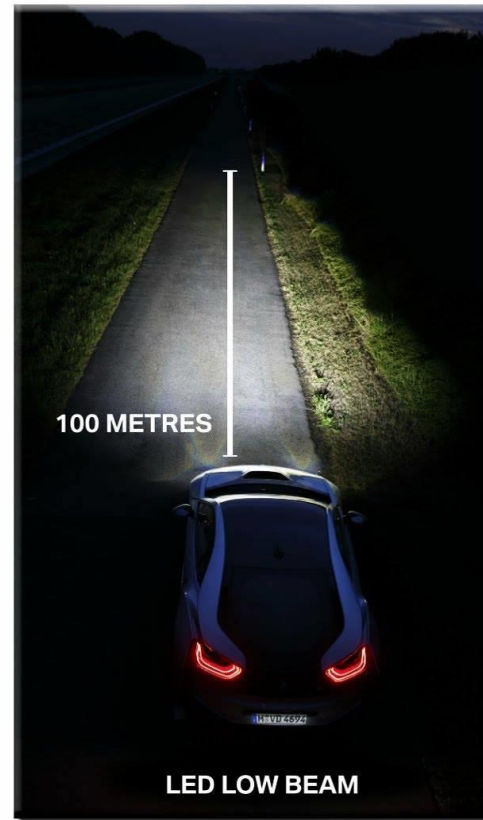
- Hohe Intensität
- Monochromatisch und kohärent





# Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

- Hohe Intensität
- Monochromatisch und kohärent
- Extrem gebündelt



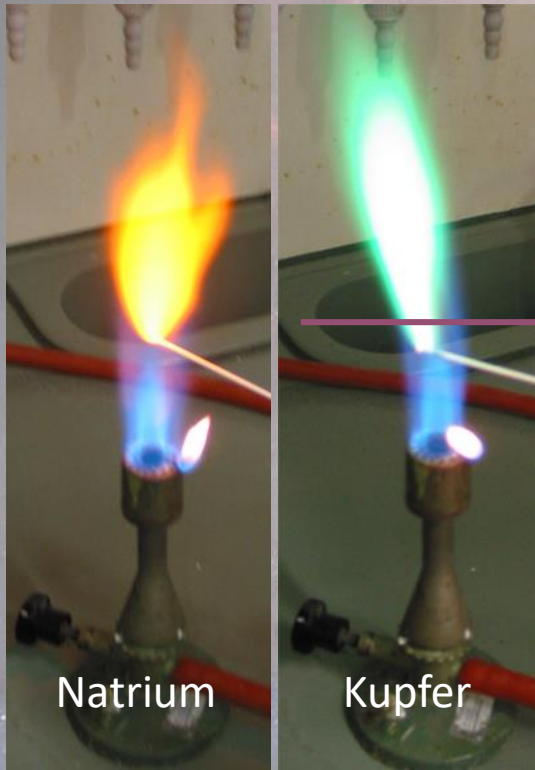






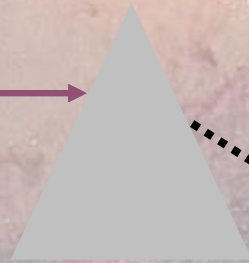
# Absorption und Emission

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



Natrium

Kupfer

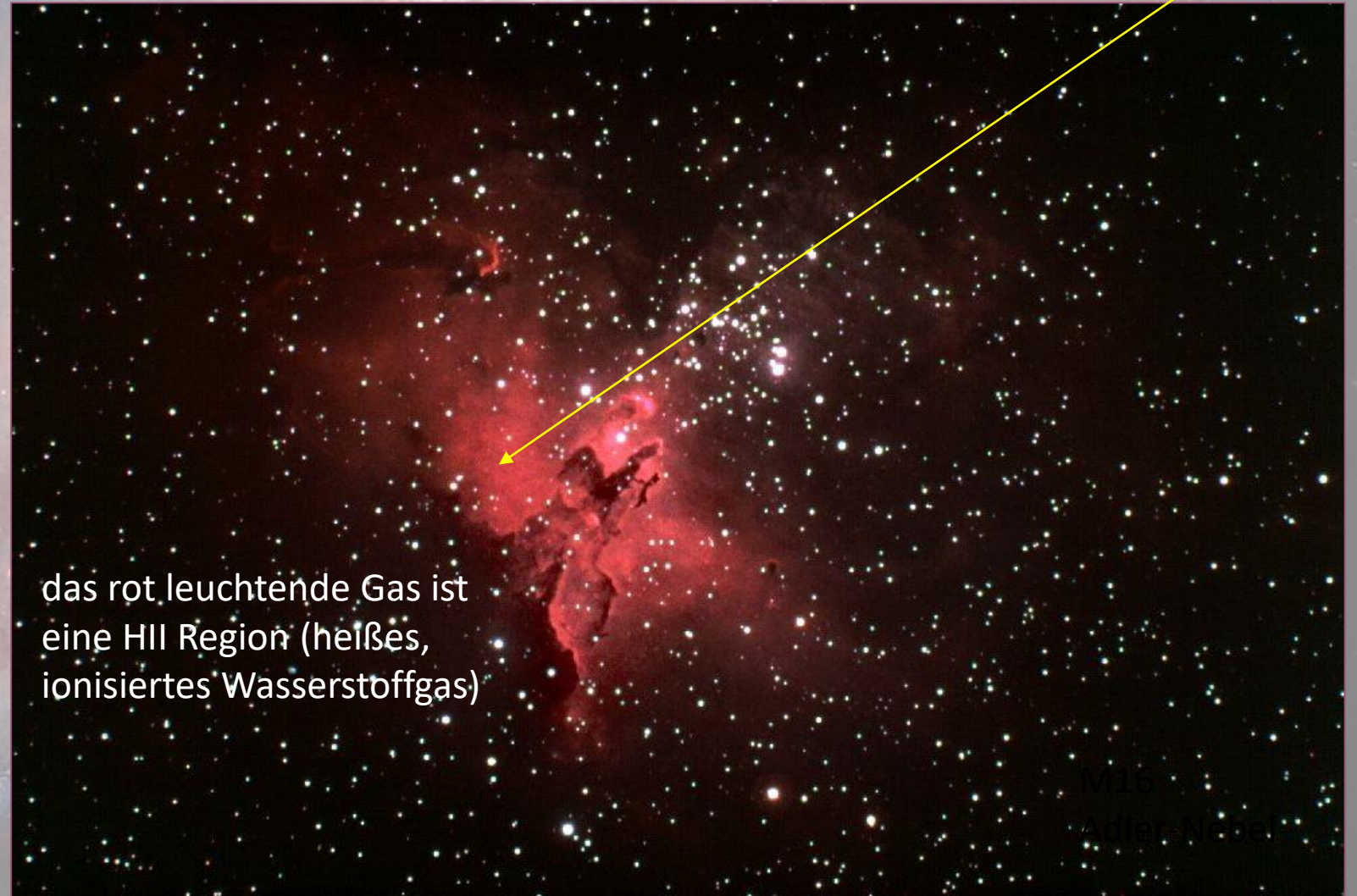


Jedes Element hat seinen ganz charakteristischen, spektralen Fingerabdruck.



# 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

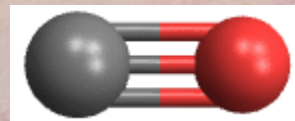
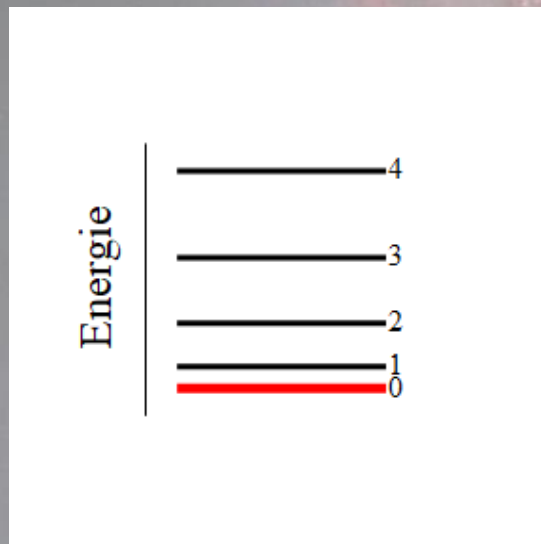
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration





# Quantenmechanik



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

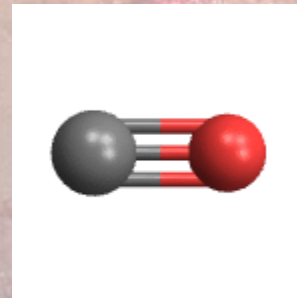
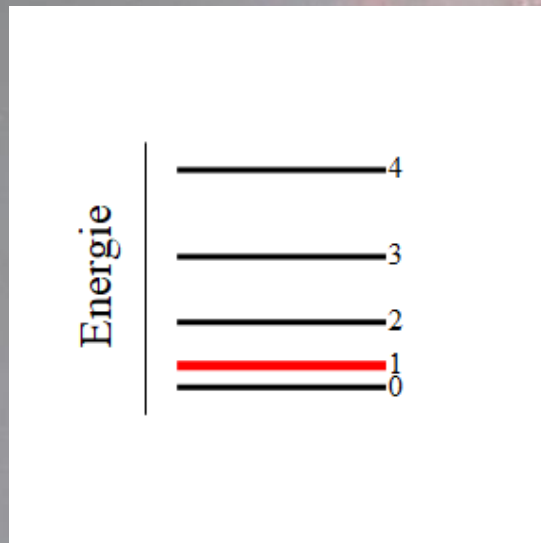
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration





# Quantenmechanik



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

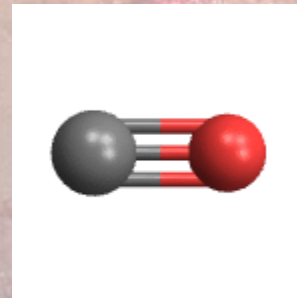
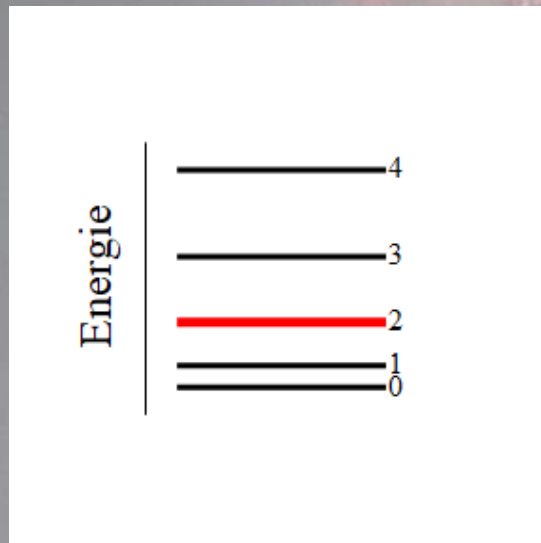
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration





# Quantenmechanik



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

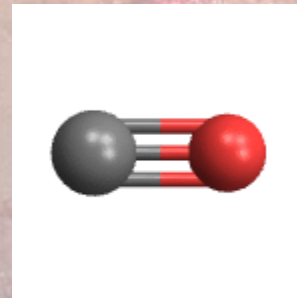
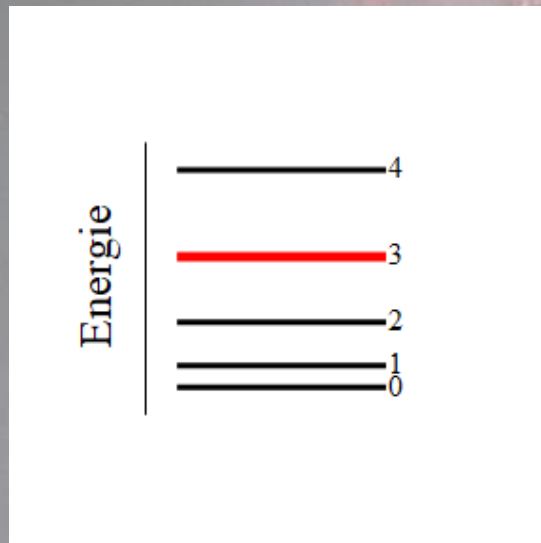
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration





# Quantenmechanik



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

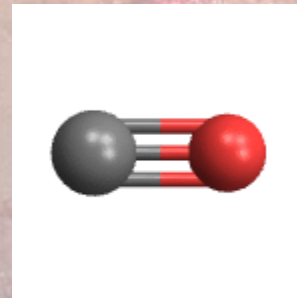
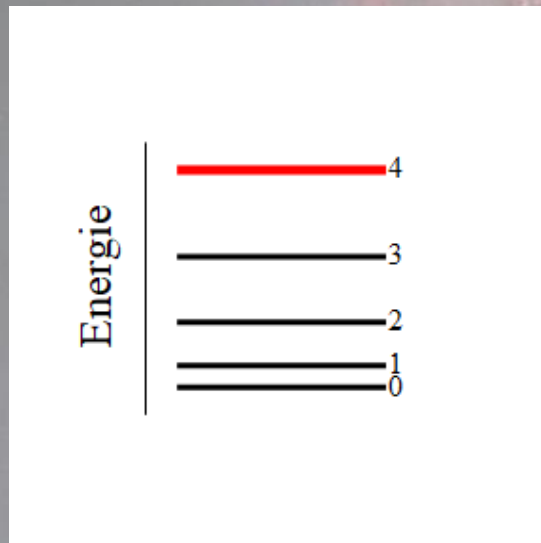
Energiezustand

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.

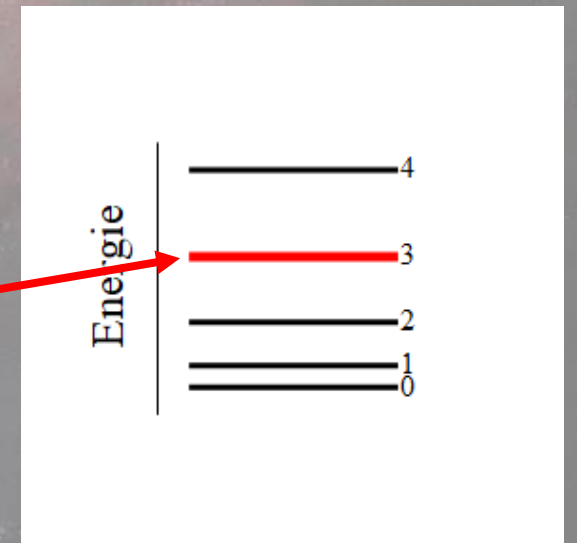
Niedrige Energie



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

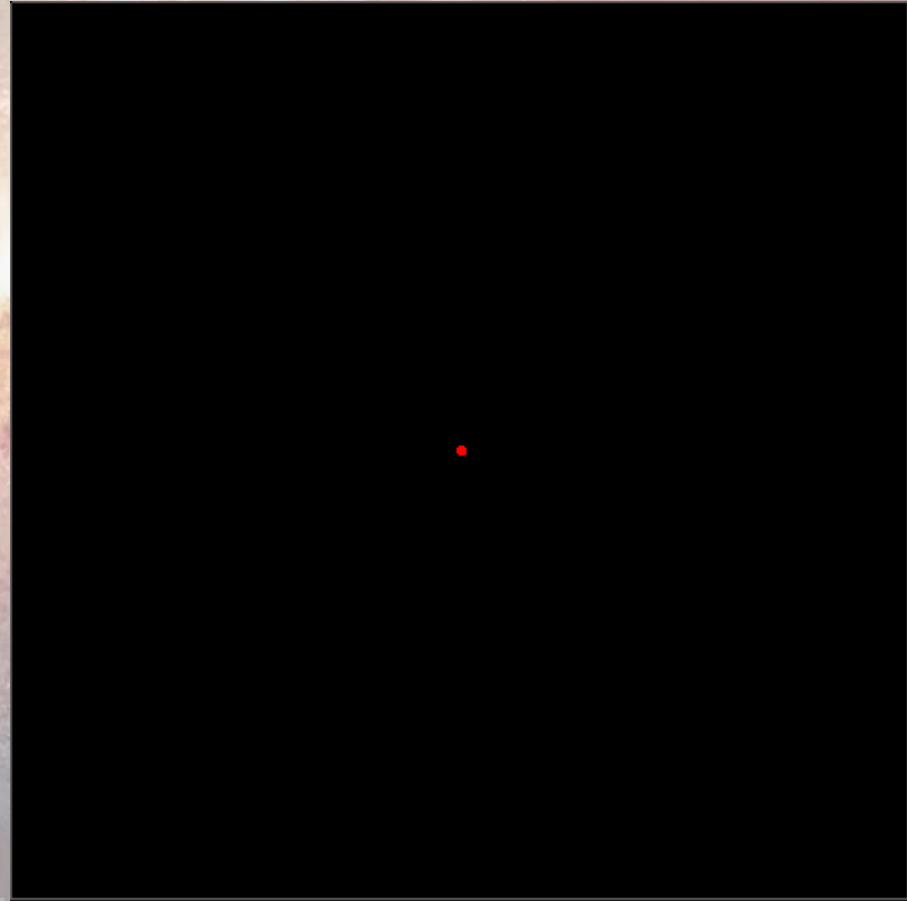
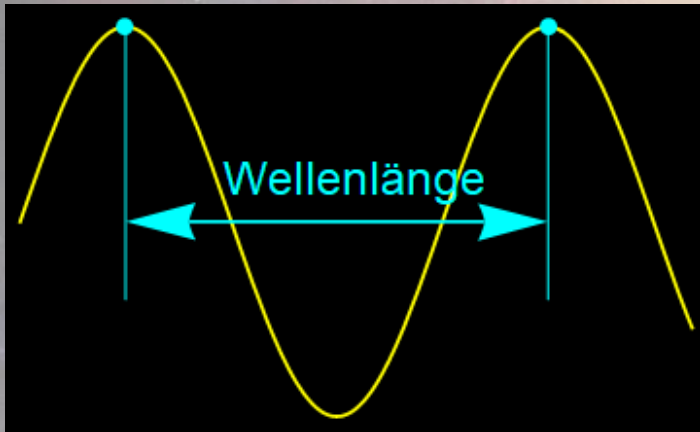
Hohe Energie



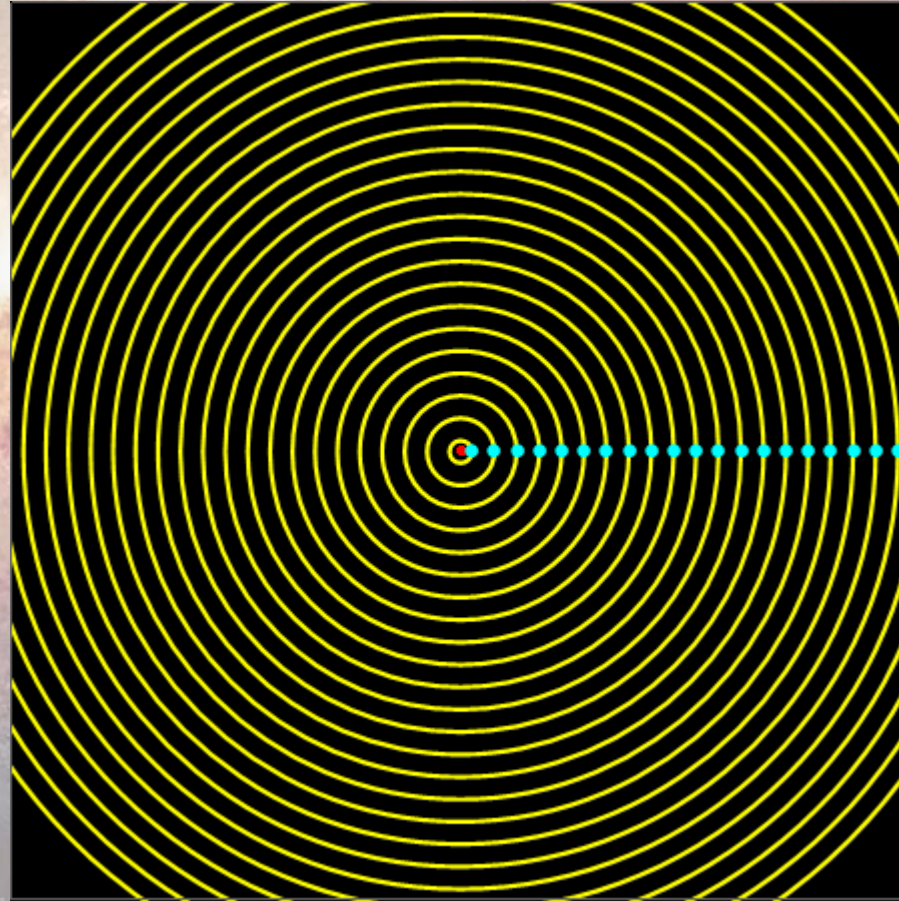
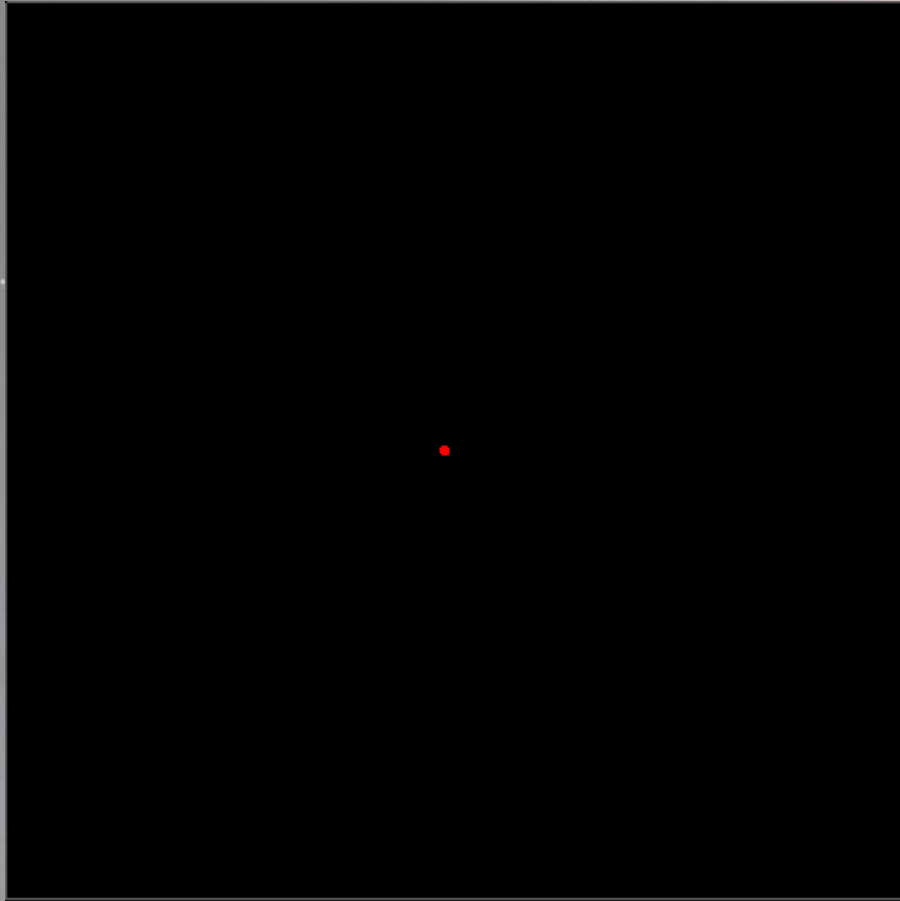
Das Medium ist **transparent** für diese Wellenlänge



# Wellenlänge und der Dopplereffekt



# Wellenlänge und der Dopplereffekt





# Wellenlänge und der Dopplereffekt

Der Dopplereffekt verschiebt die Wellenlänge einer Welle zu

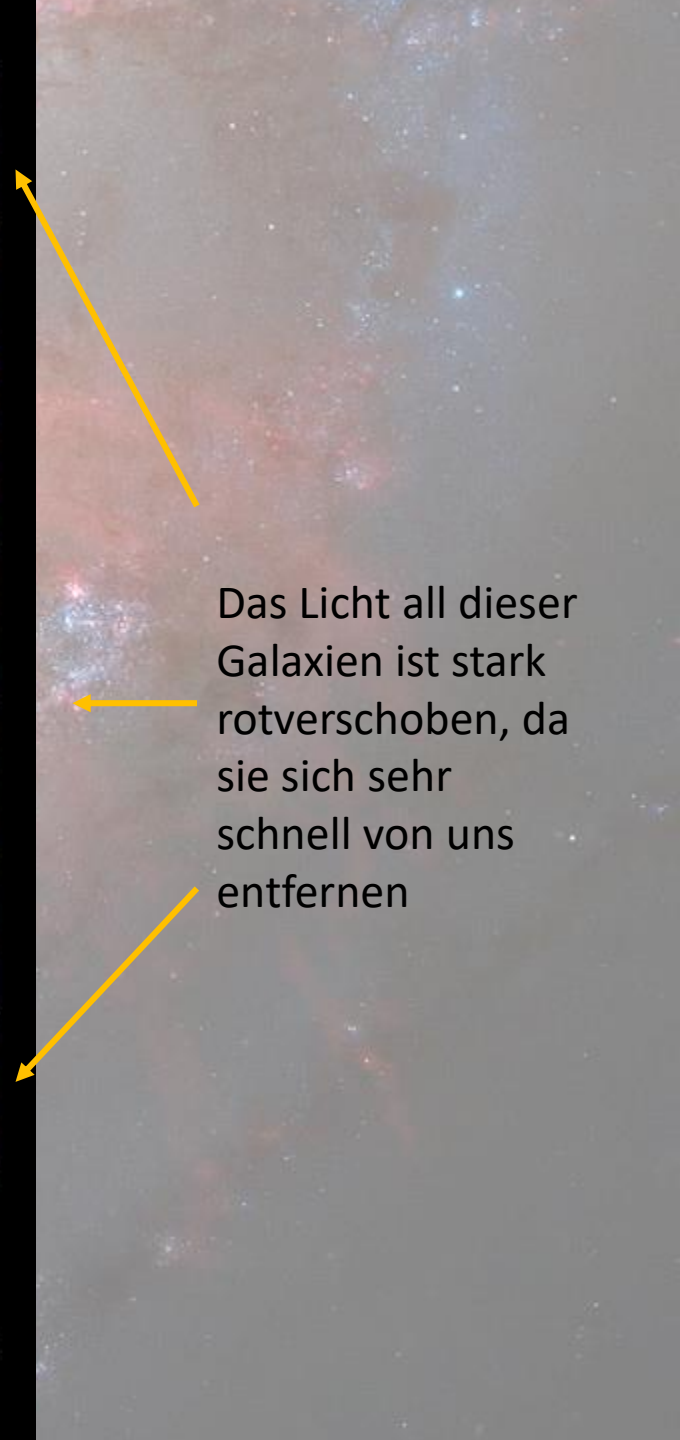
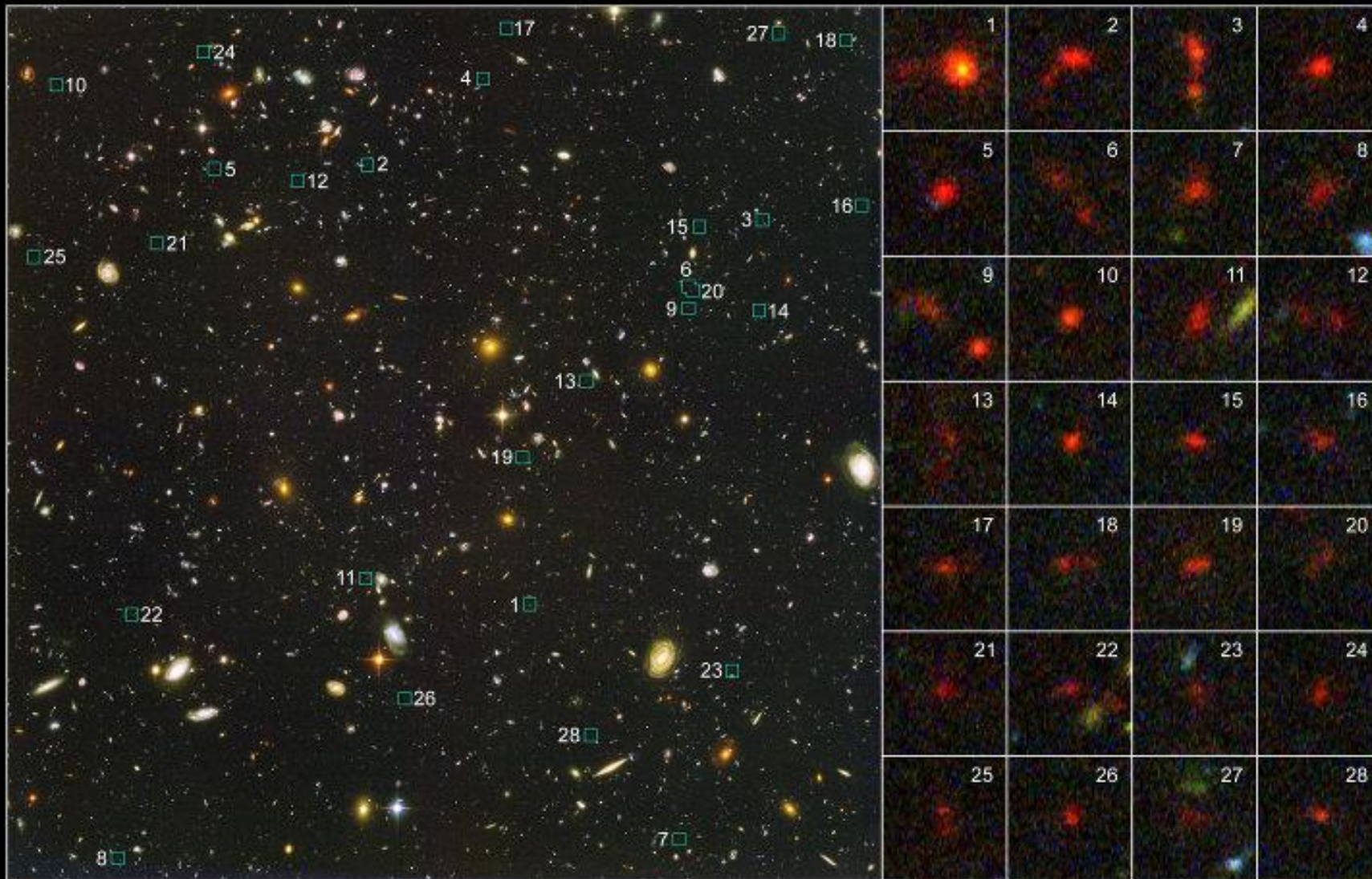
- **längeren** Wellenlängen wenn sich der Sender und Empfänger **entfernen**.

„**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 ...

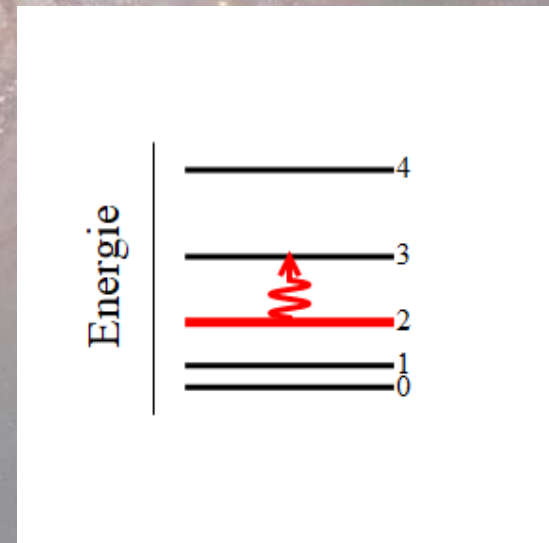
Niedrige Energie



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

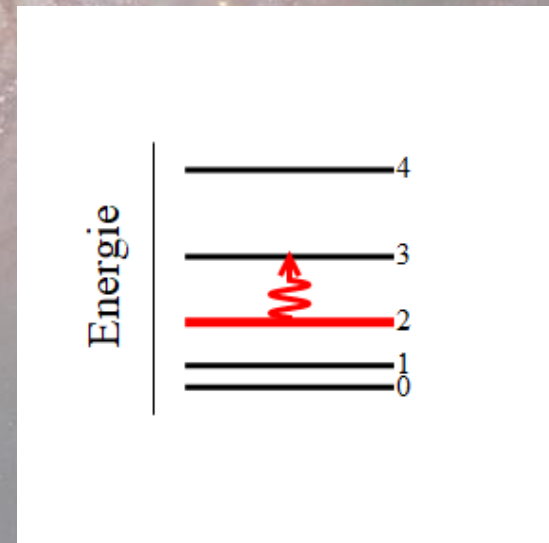
Niedrige Energie



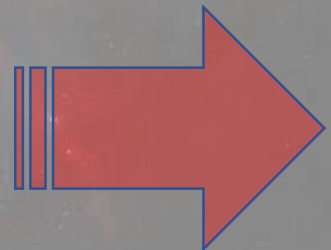
Mittlere Energie



Hohe Energie



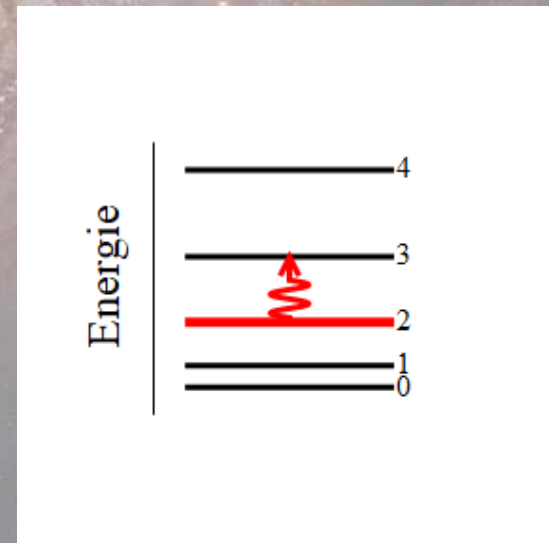
Relativbewegung





# 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

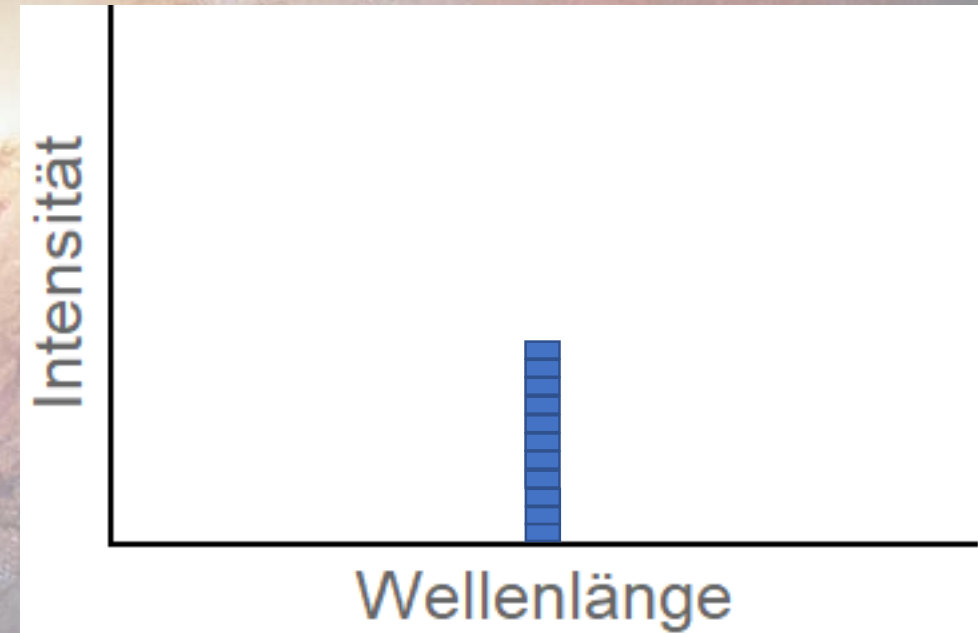


- Um zu einem **niedrigeren** Energiezustand zu wechseln muss ein Molekül exakt die Differenz-Energie abgeben.



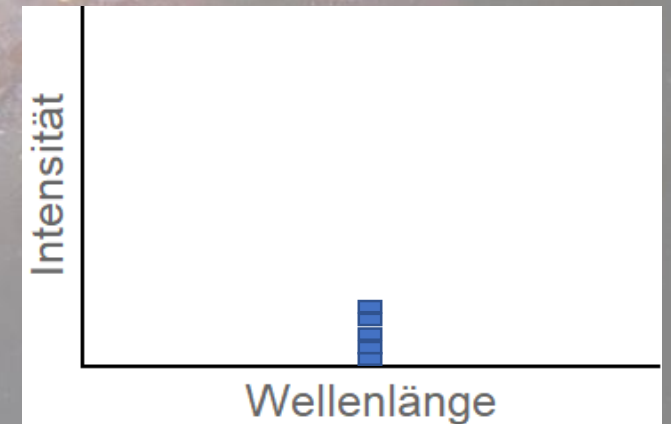
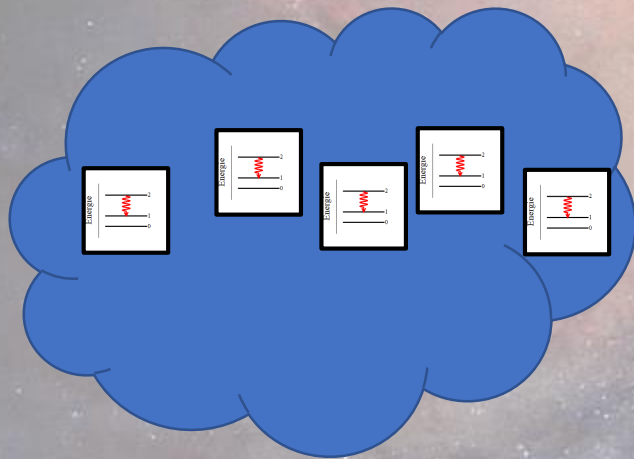
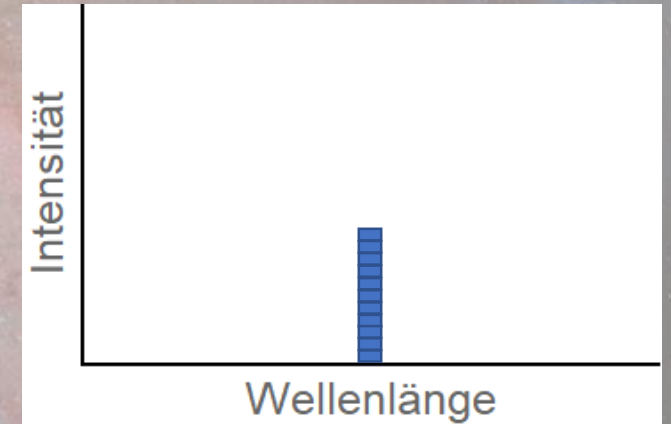
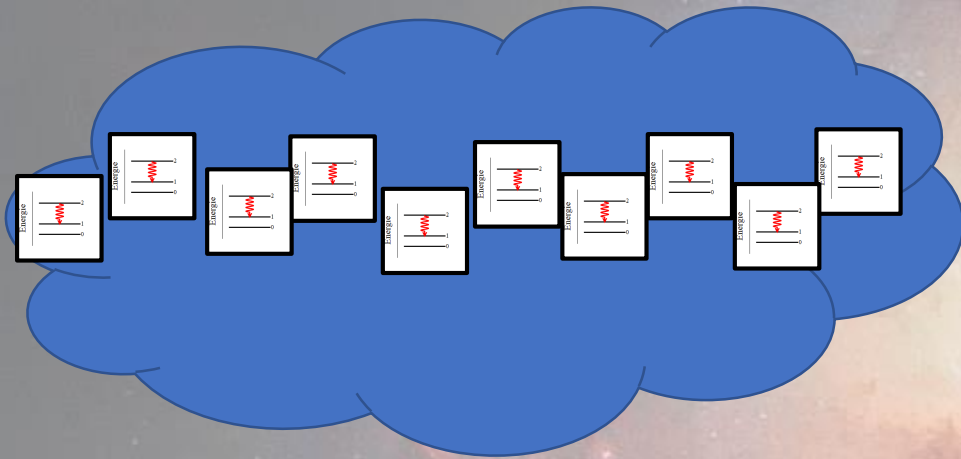


# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



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

# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

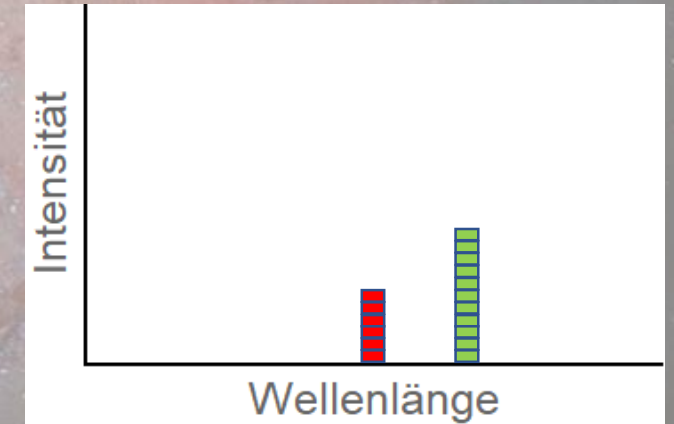
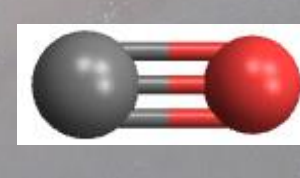
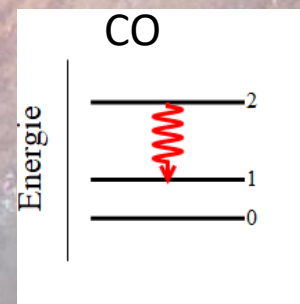
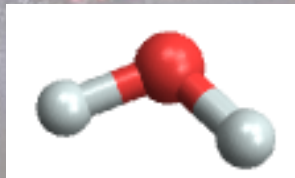
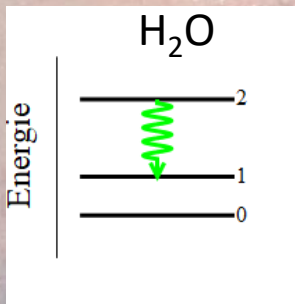
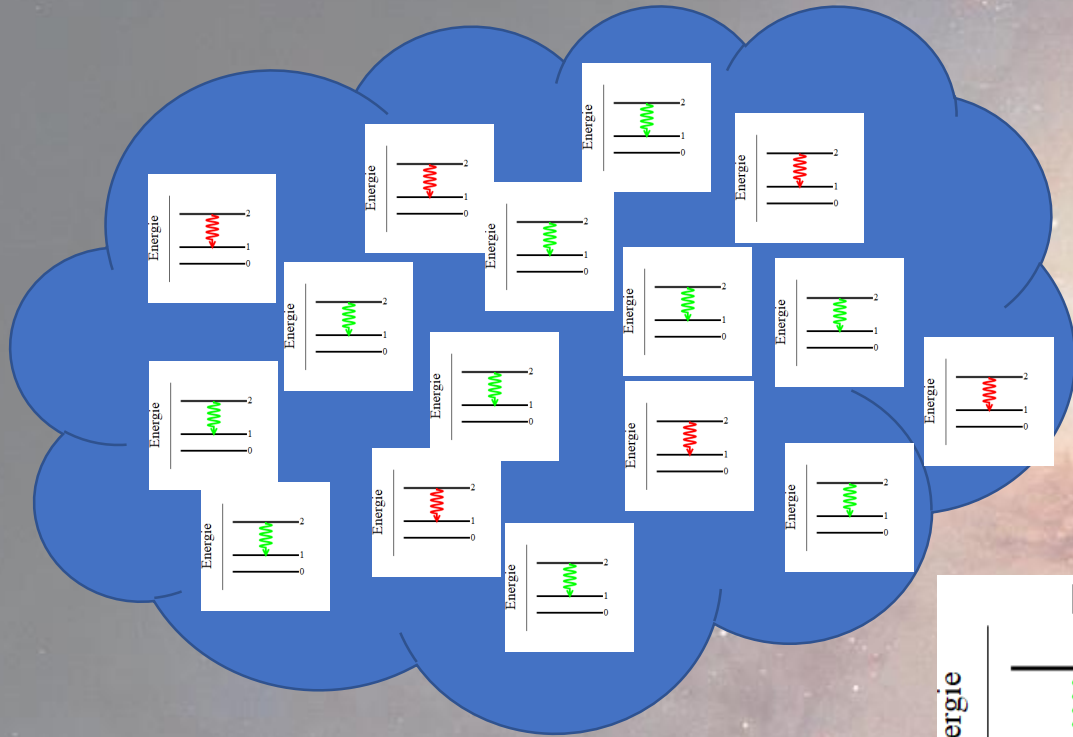


Die Intensität wird damit auch zu einem Maß für die Häufigkeit („Säulendichte“).

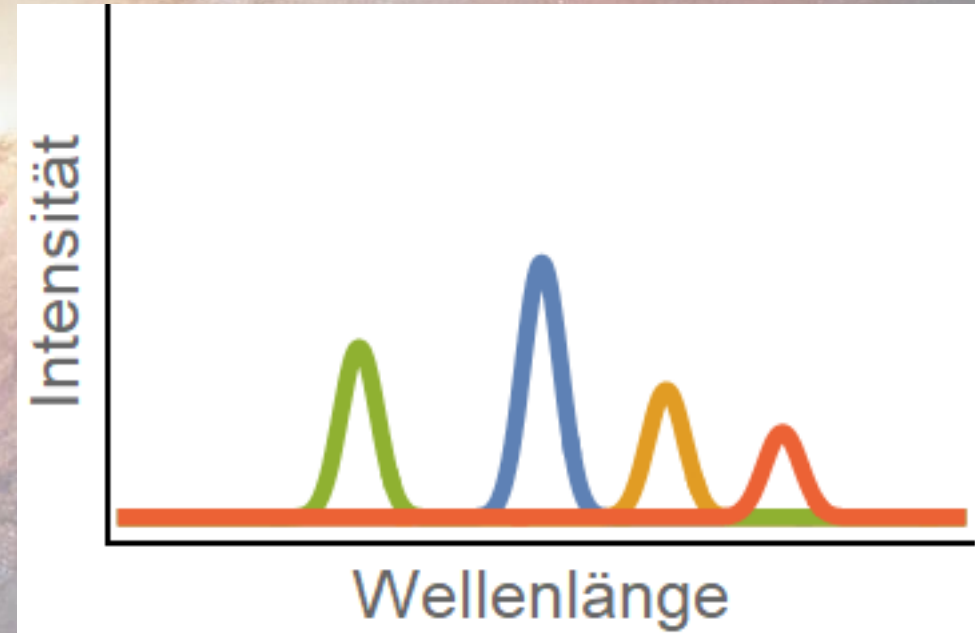


# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

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



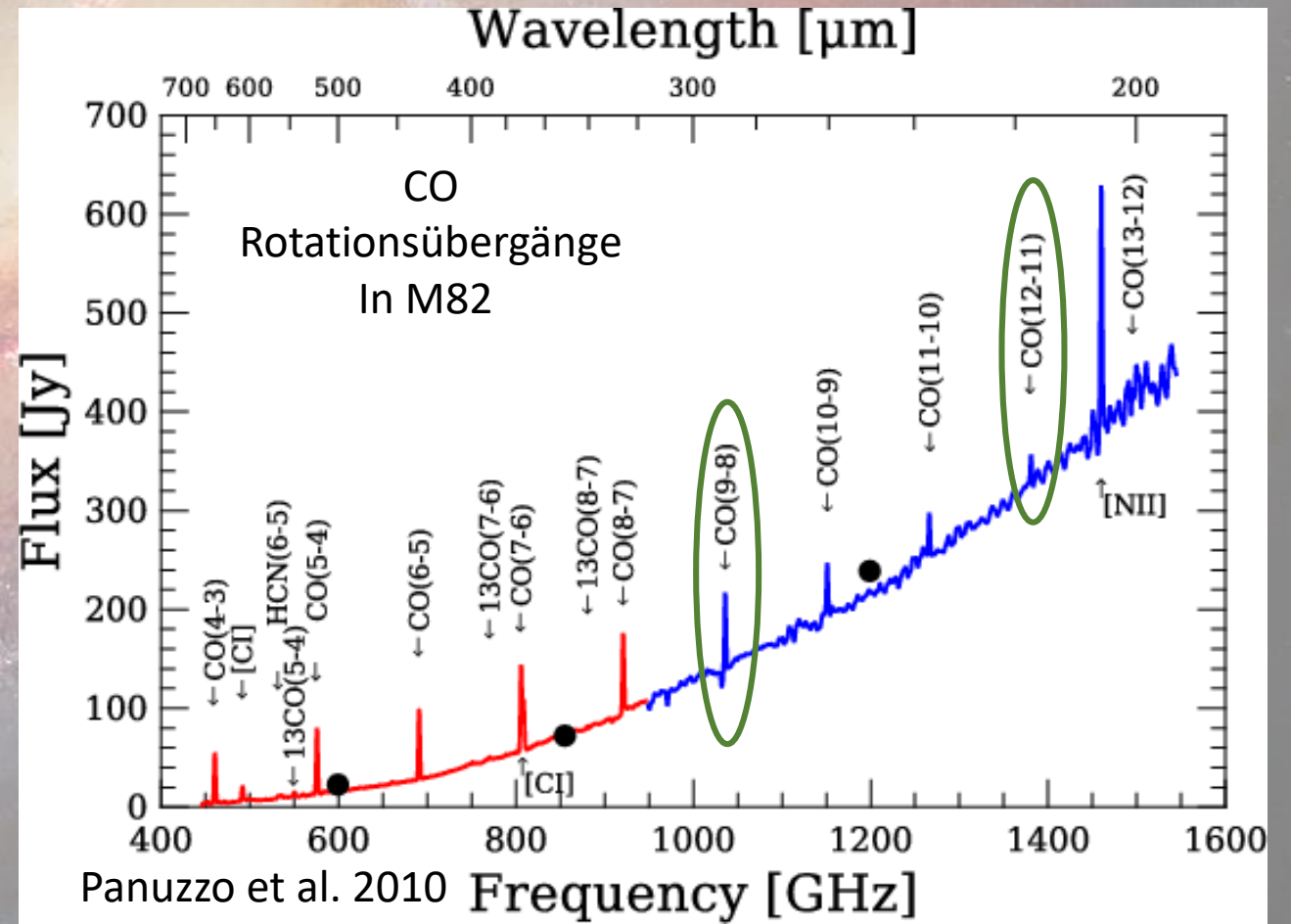
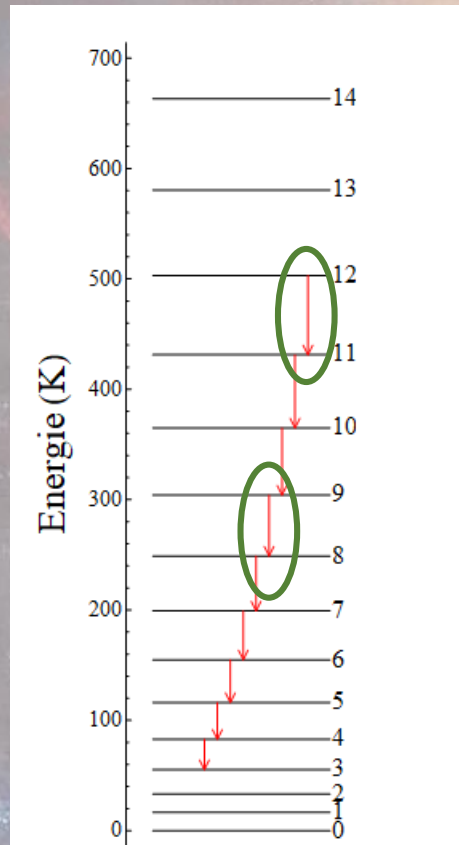
# Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



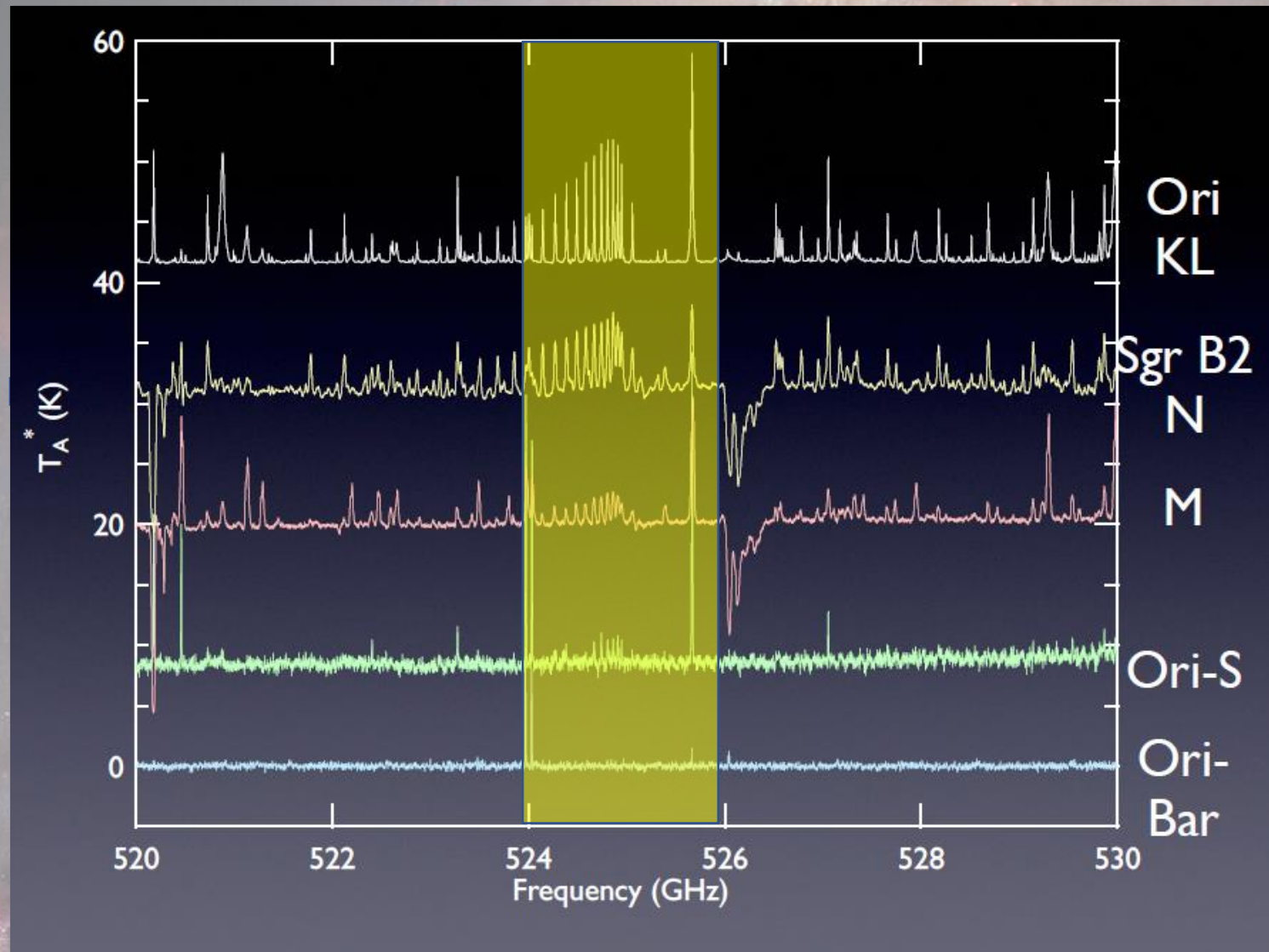


# Spektroskopie in der Astronomie

- Damit lassen sich hervorragend Moleküle im Weltall identifizieren!



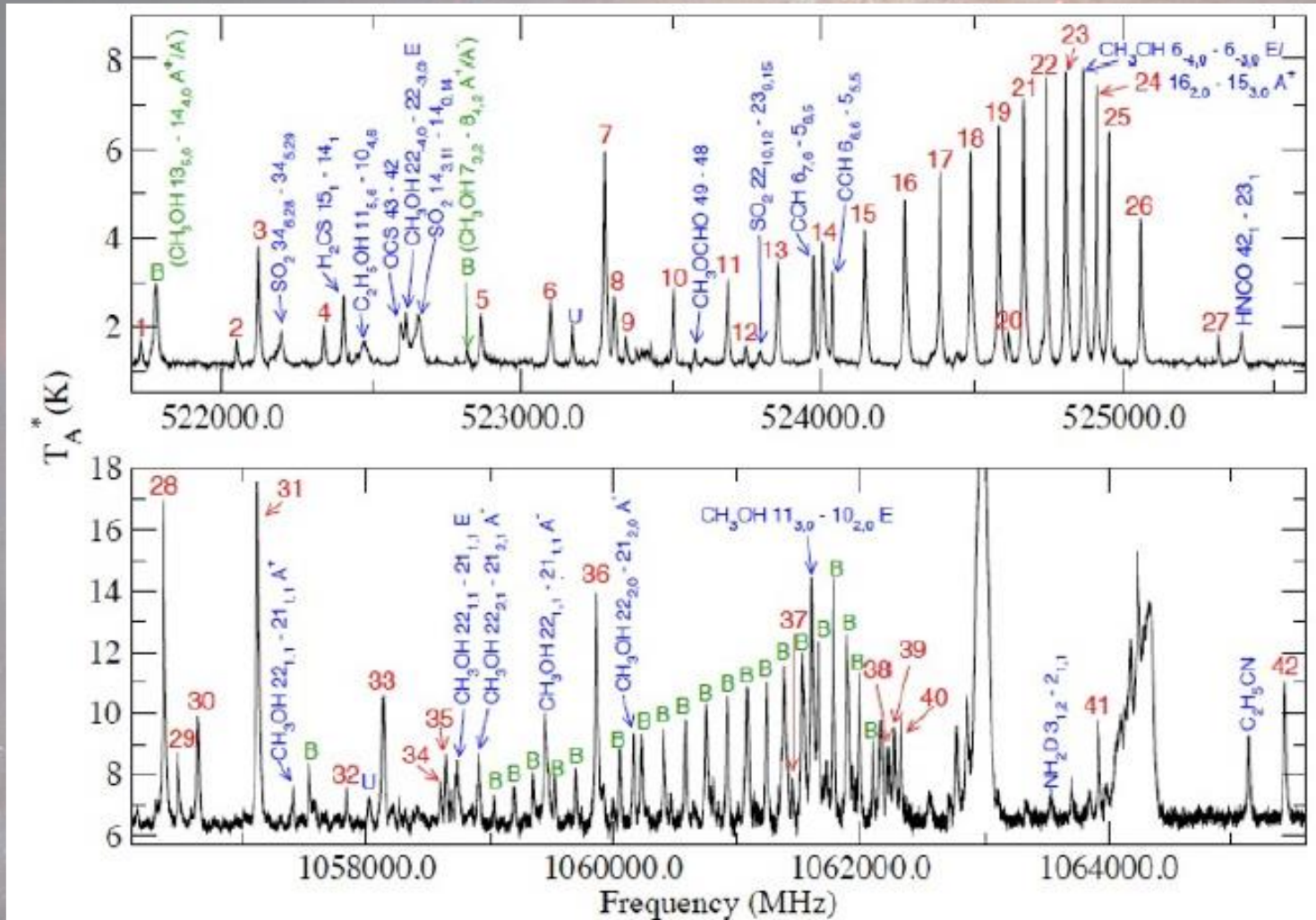
# Beispiel: Sternentstehung in Orion



Source: E. Bergin  
(Univ. of Michigan)

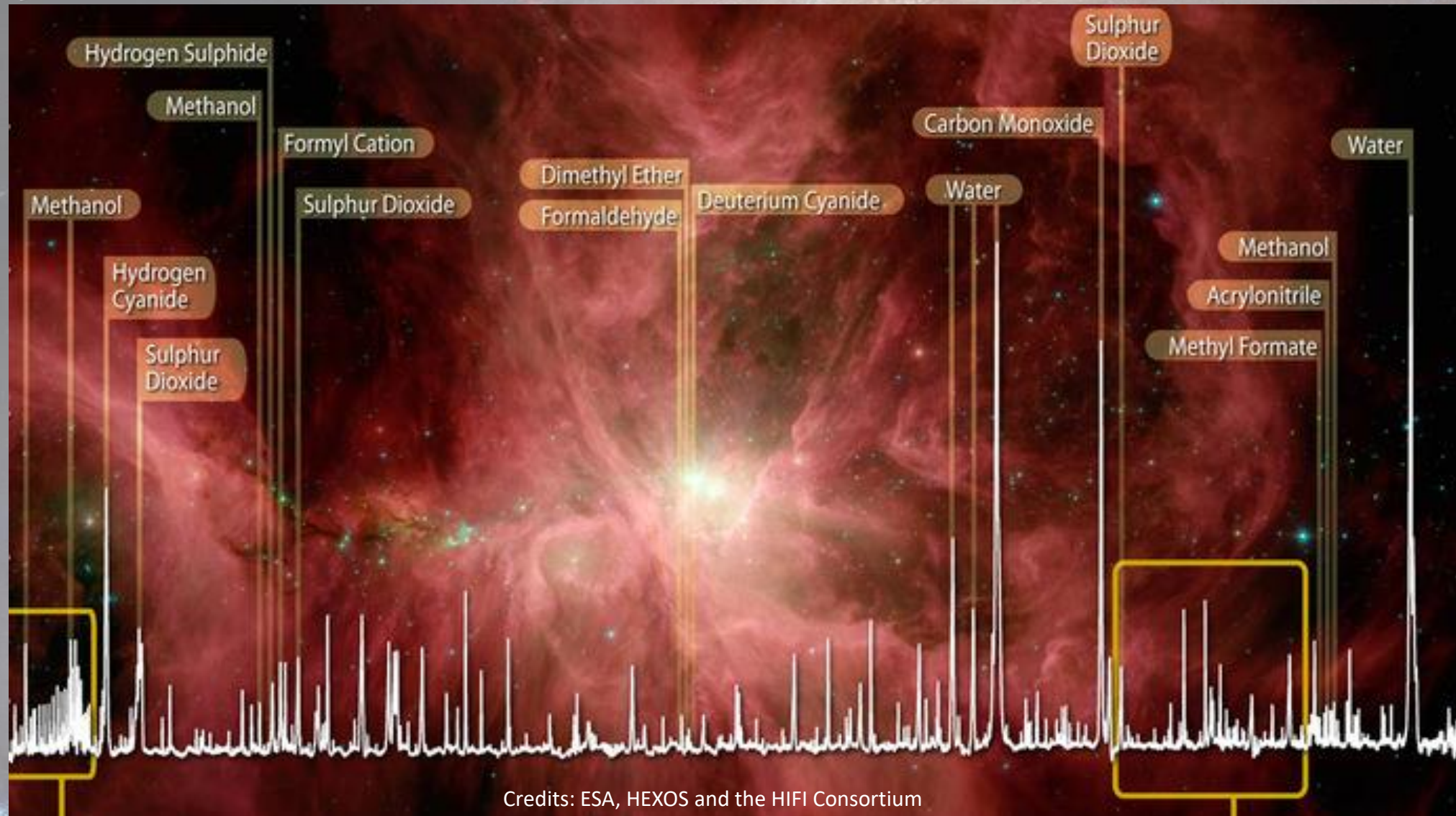


# Beispiel: Sternentstehung in Orion



Wang et al. 2011

# Beispiel: Sternentstehung in Orion



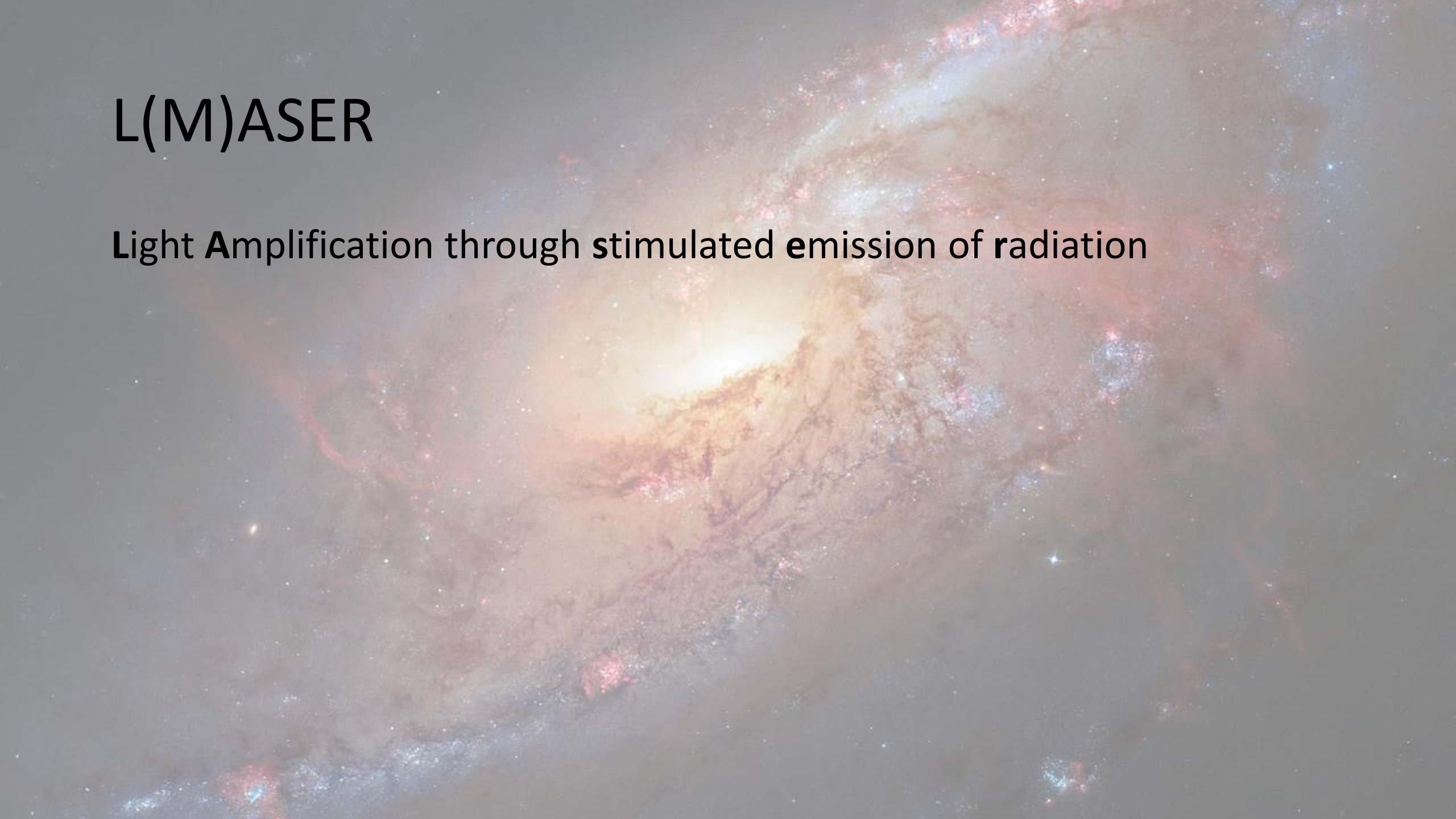


# Kompliziert, kompliziert,...

- 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...

# L(M)ASER

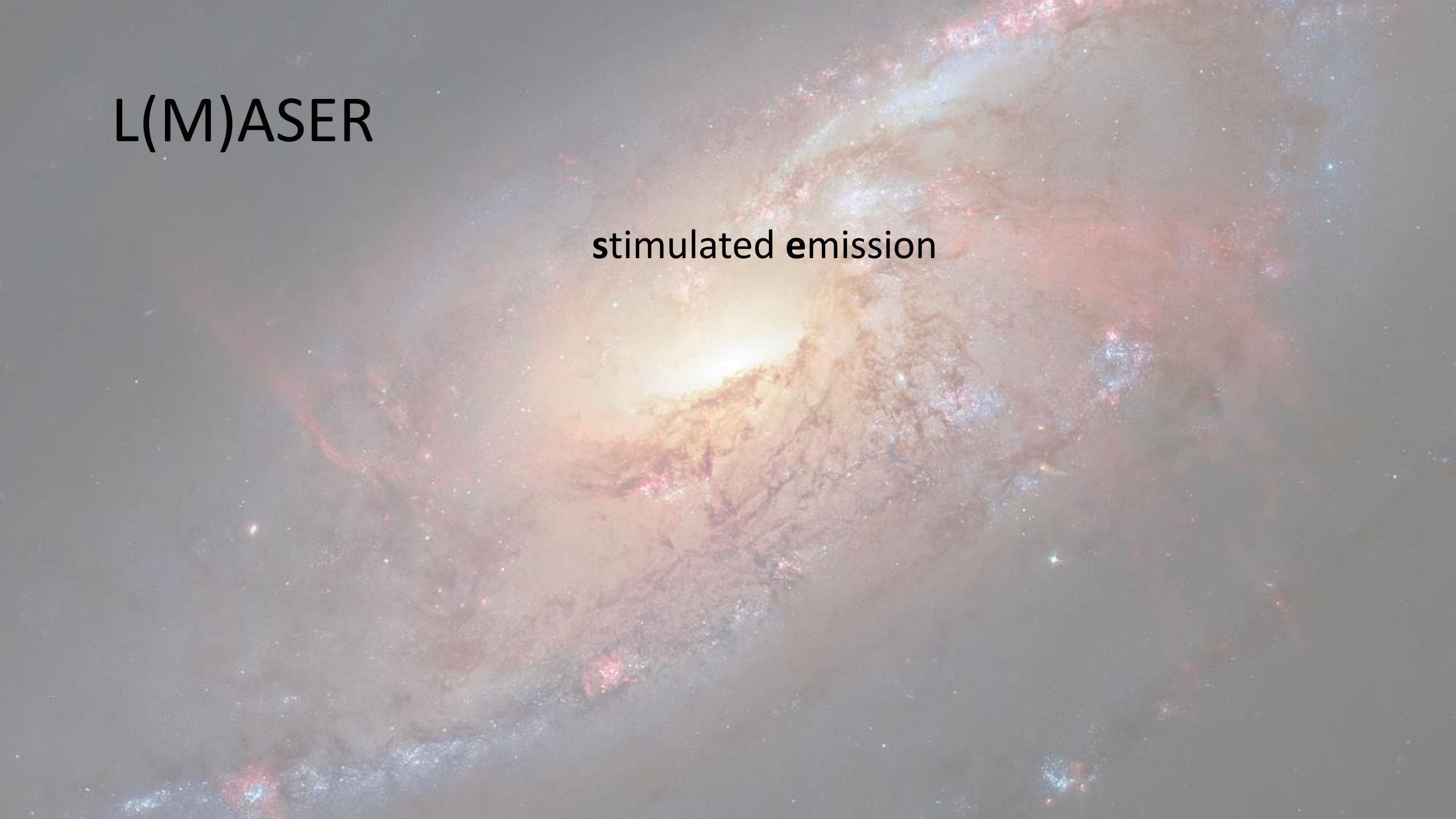
Light **A**mplification through **s**timulated **e**mission of **r**adiation





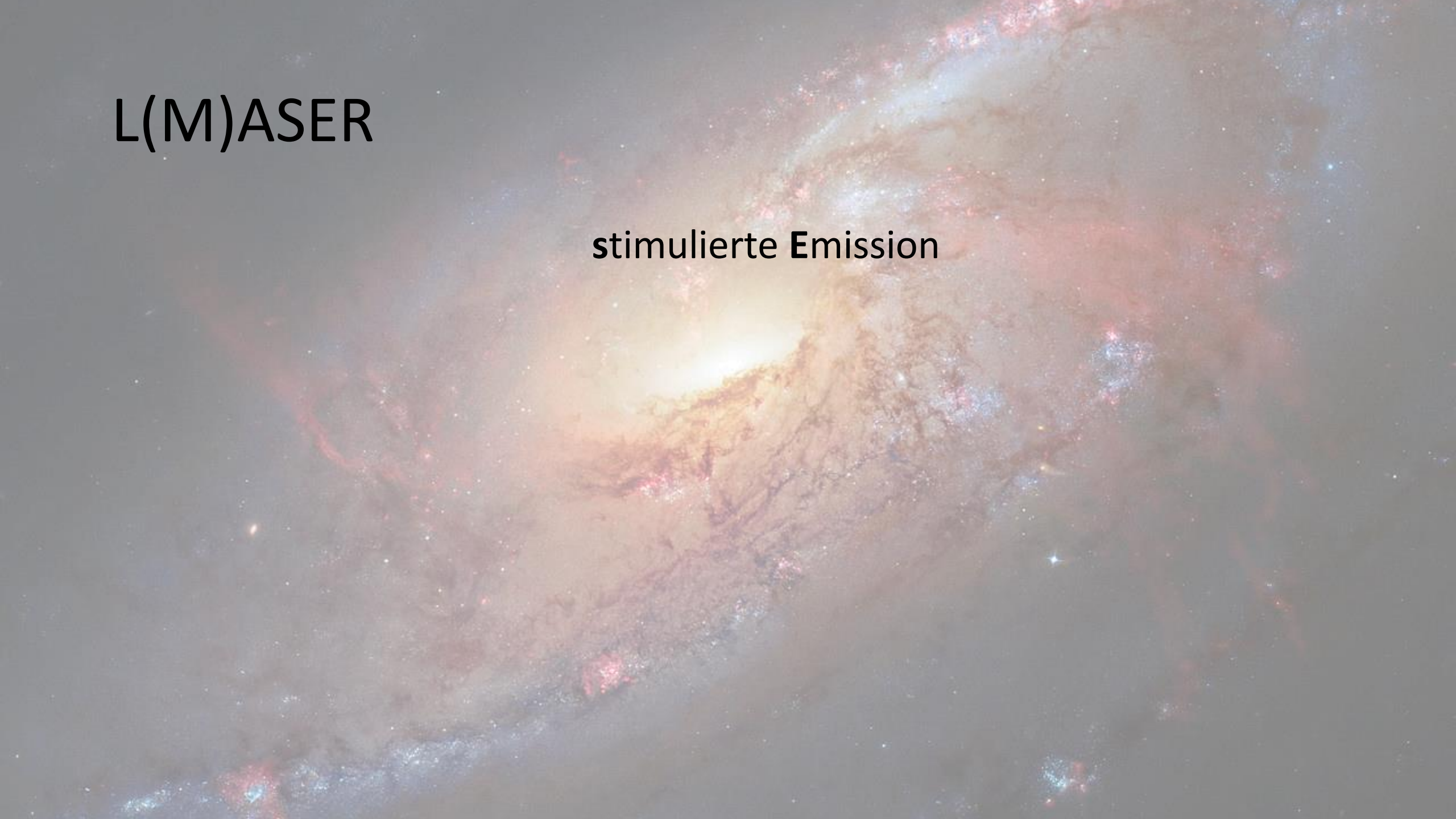
L(M)ASER

stimulated emission



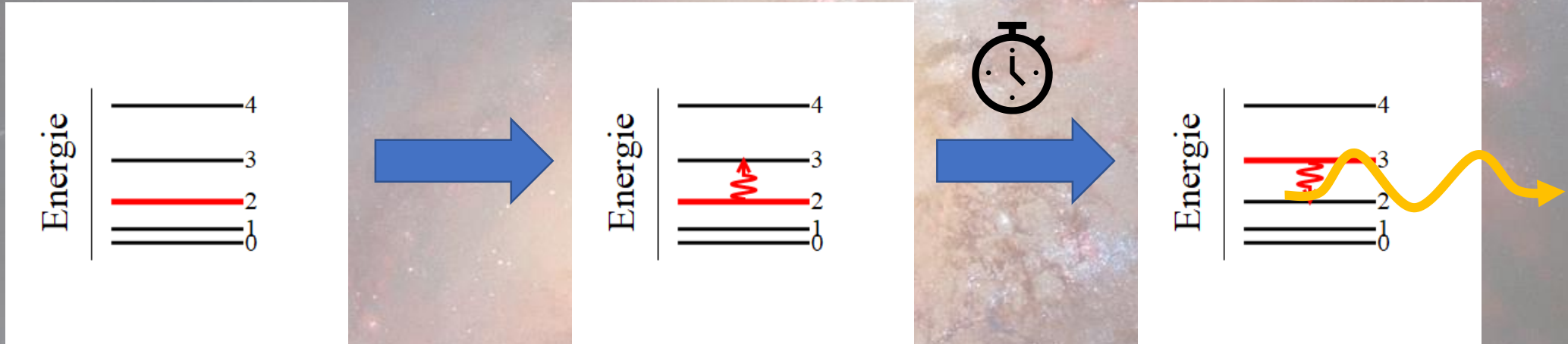
L(M)ASER

stimulierte Emission

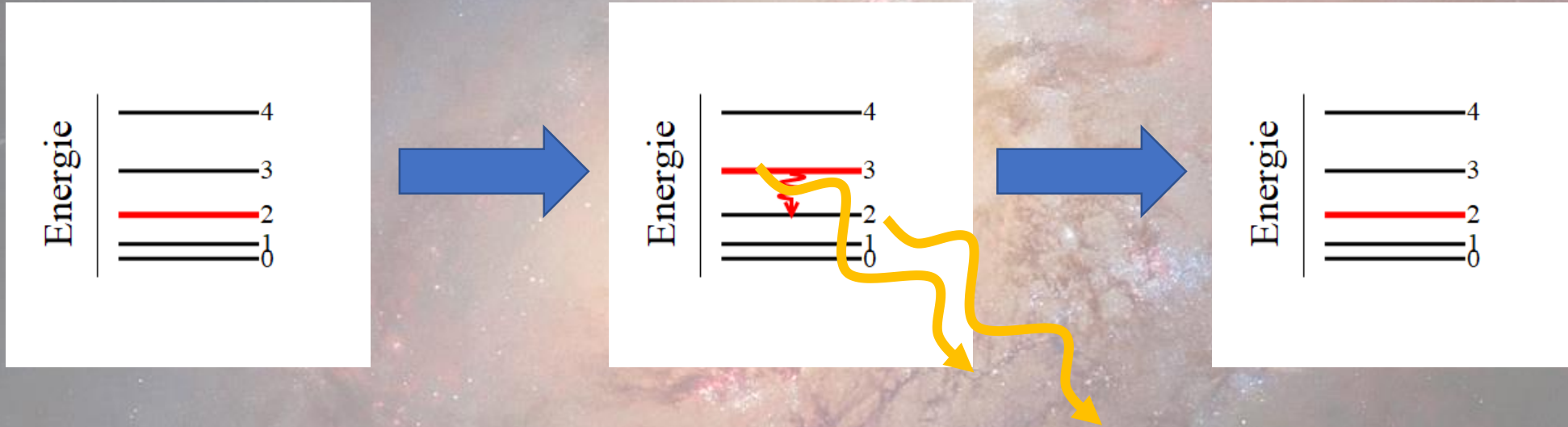




# Absorption, Emission, und ...



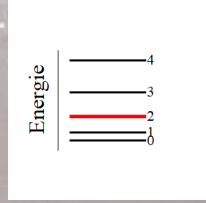
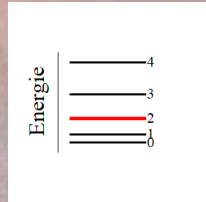
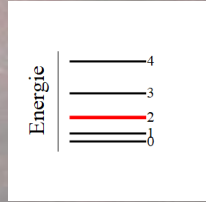
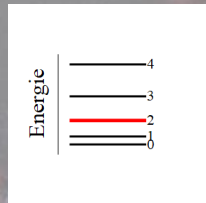
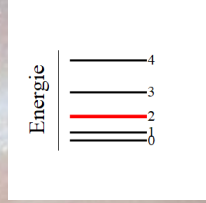
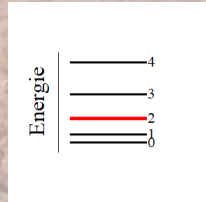
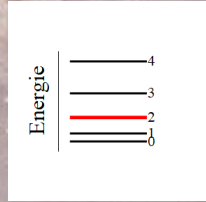
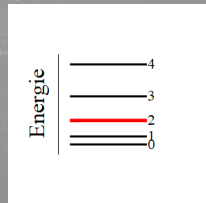
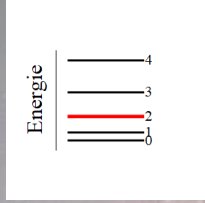
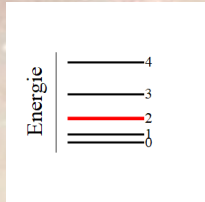
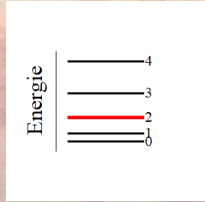
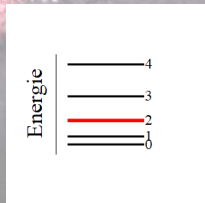
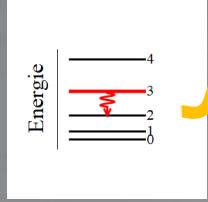
# Stimulierte Emission



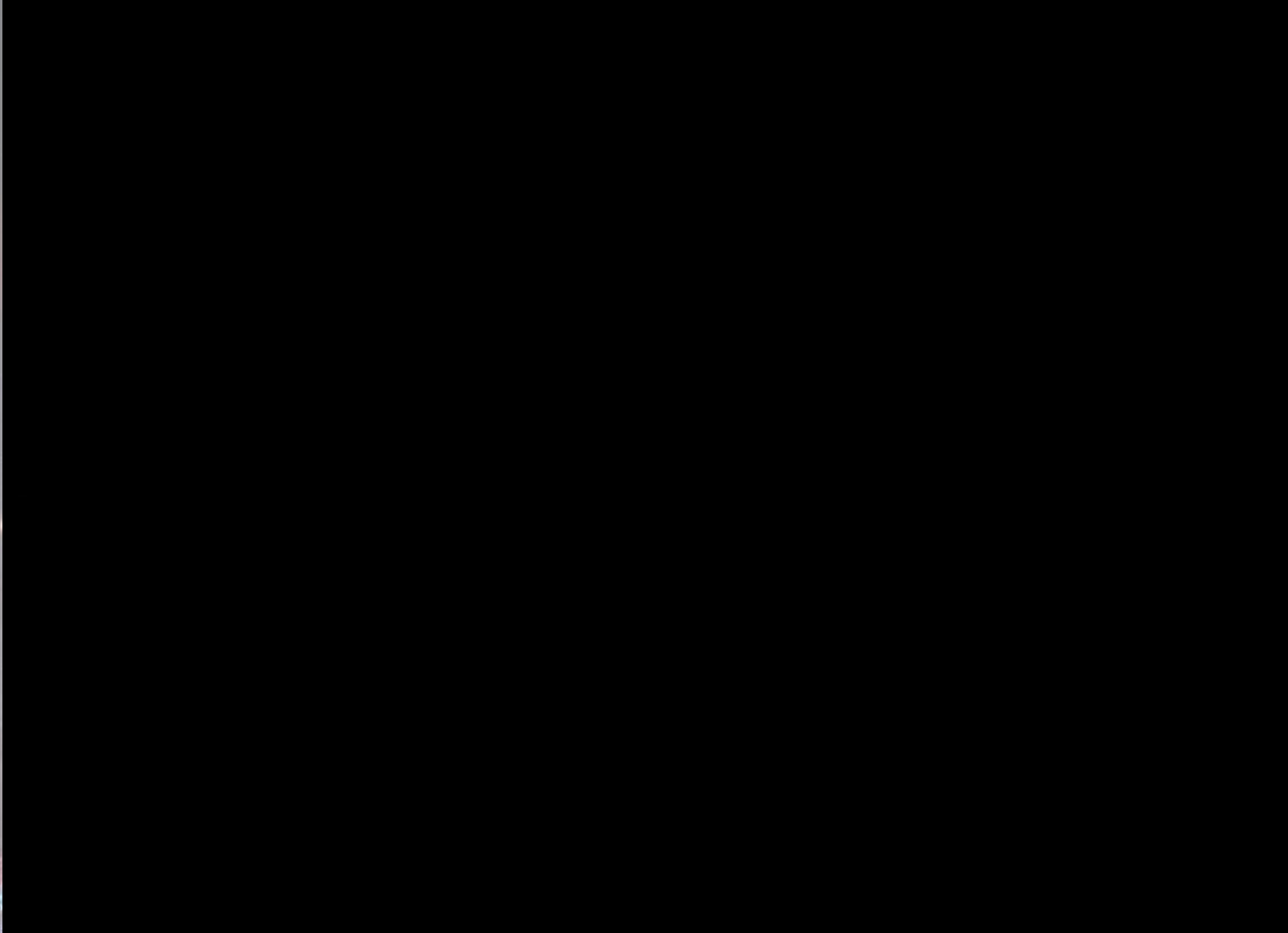
Der Unterschied?

2 Photonen statt 1





# Exponentielles Wachstum der Intensität



Youtube Channel:  
Harvard  
Natural  
Science  
Lecture  
Demonstrations



# Warum passiert das nicht ständig und überall?

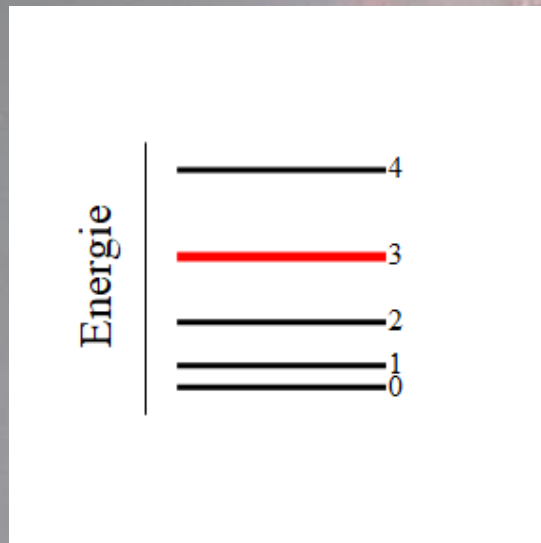
- Um die exponentielle Vervielfachung der Intensität zu erzeugen benötigt man viele Atome im angeregten Energiezustand.
- Aber: im thermischen Gleichgewicht befinden sich immer mehr Teilchen in niedrigeren als in höheren Energiezuständen.
- Man braucht einen Prozess, der Teilchen aus dem unteren Energieniveau ins obere befördert, einen sogenannten Pumpprozess.
- Das erzeugt eine sogenannte **Besetzungsinversion**.
- Dieser Zustand ist nur stabil wenn das Pumpen andauert.

# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können Energie durch Strahlung aufnehmen

Energiezustand

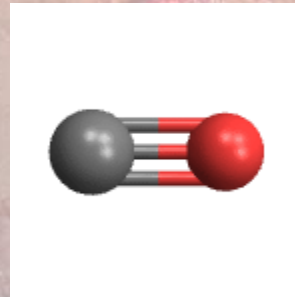


z.B:

Rotation

oder

Vibration

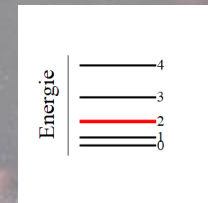
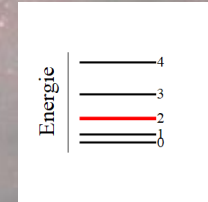
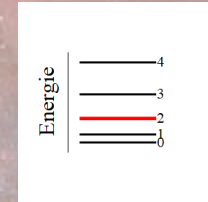
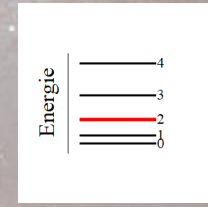
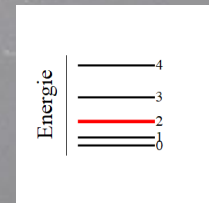
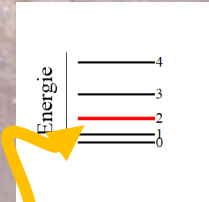
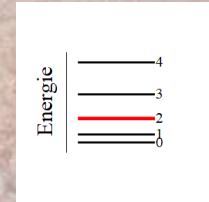
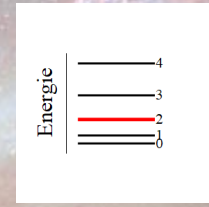
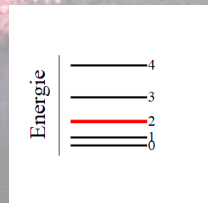
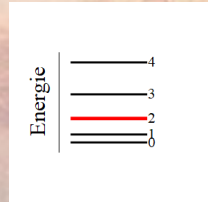
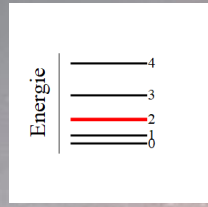
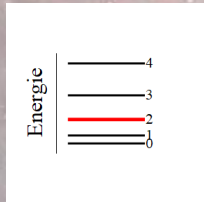
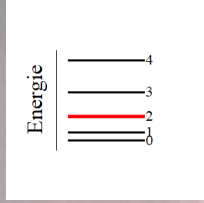
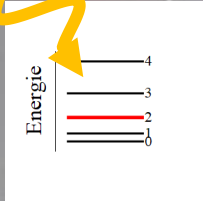
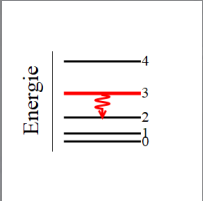




„Mausefallen neu spannen“

=

Pumpen

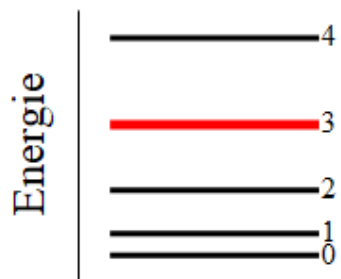


# Quantenmechanik



- Teilchen (Atome und Moleküle) können Energie durch Stöße aufnehmen

Energiezustand

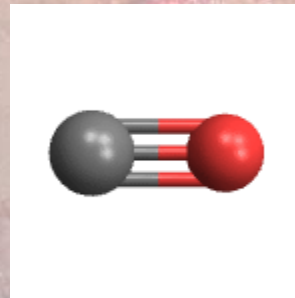


z.B:

Rotation

oder

Vibration

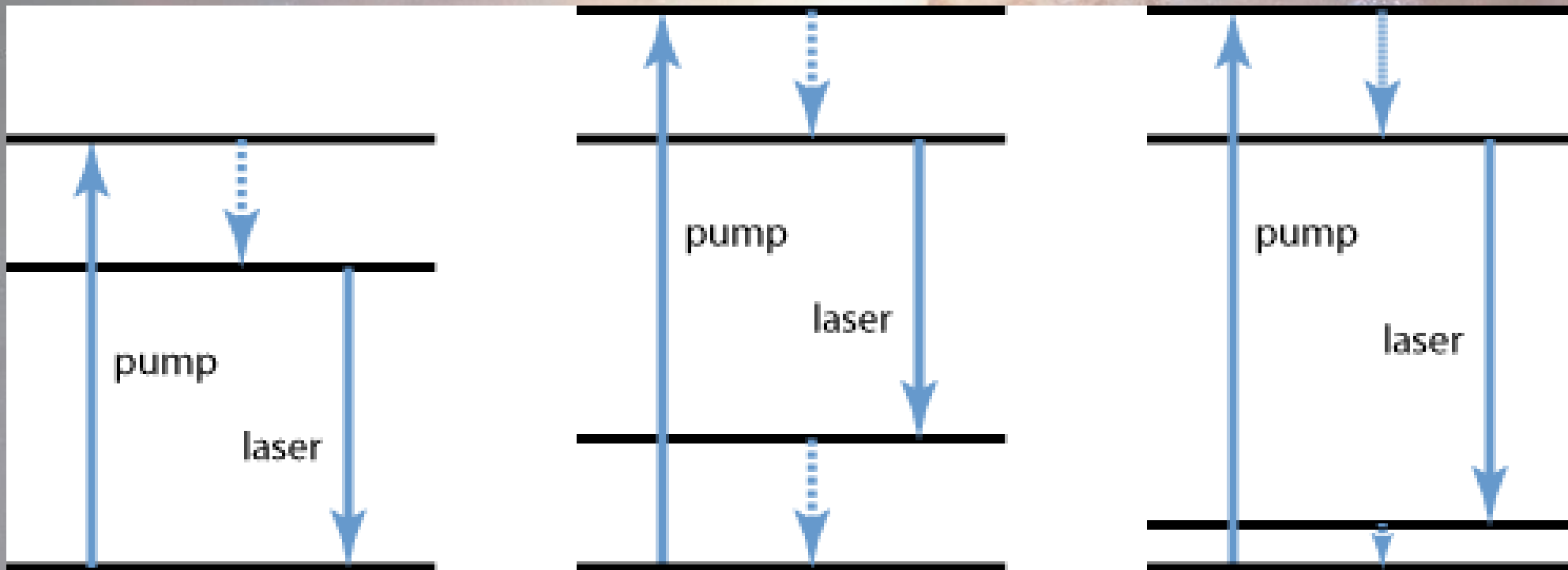




# Quantenmechanik

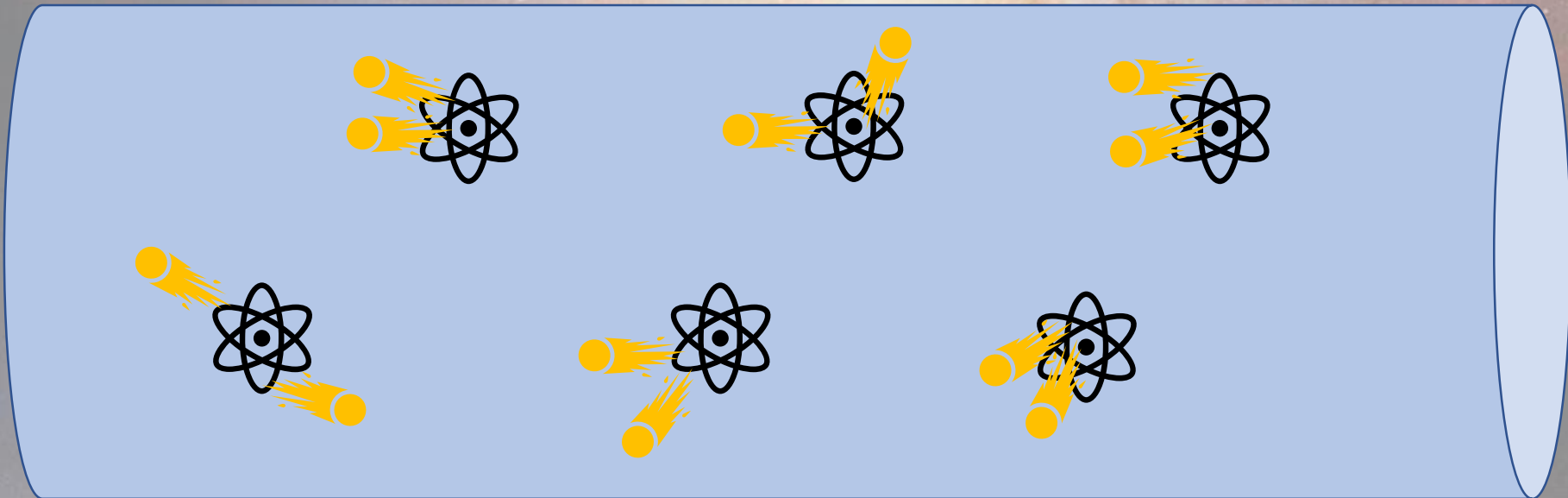


- Tatsächlich pumpt man über einen „Umweg“ über einen höheren Energiezustand





# Wie baut man einen LASER?

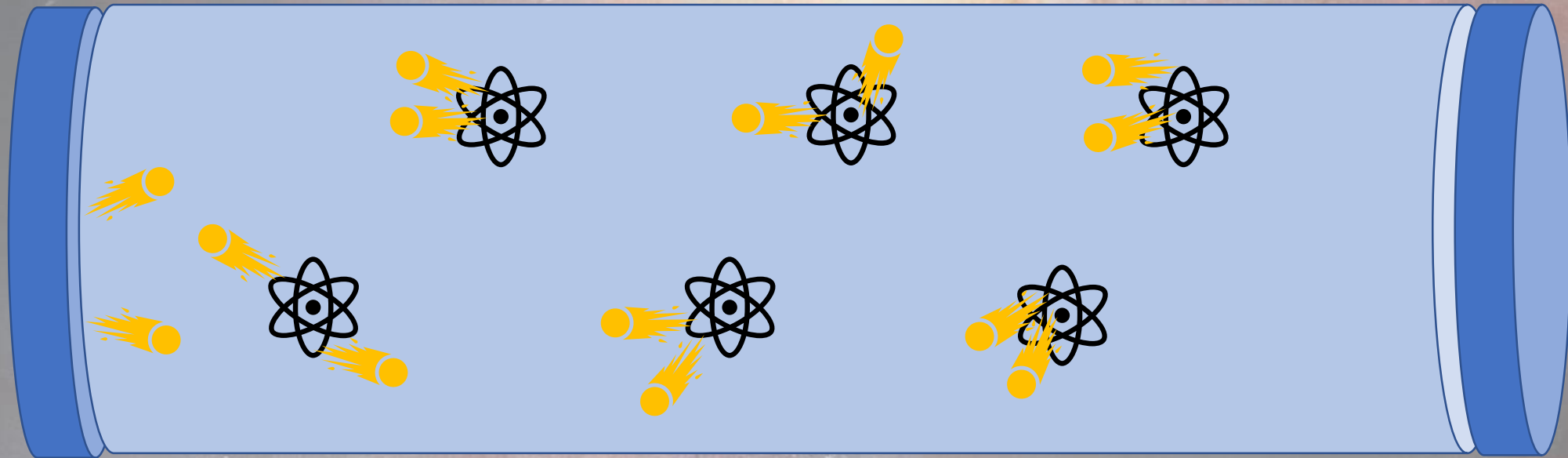




# Wie baut man einen LASER?

Spiegel

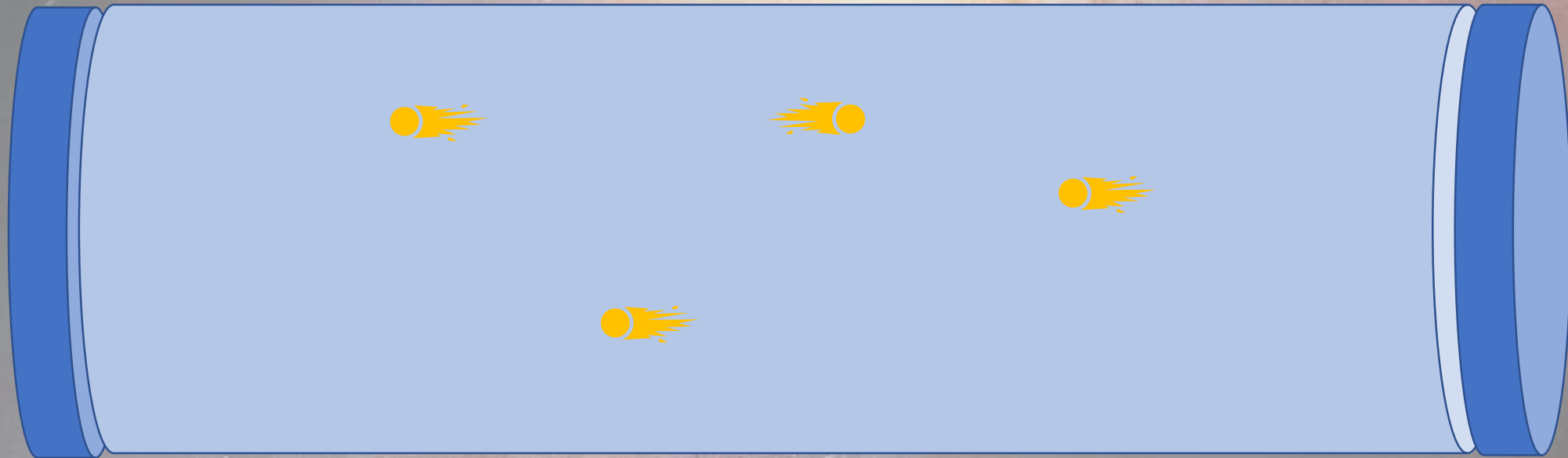
Spiegel



# Wie baut man einen LASER?

Spiegel

Spiegel

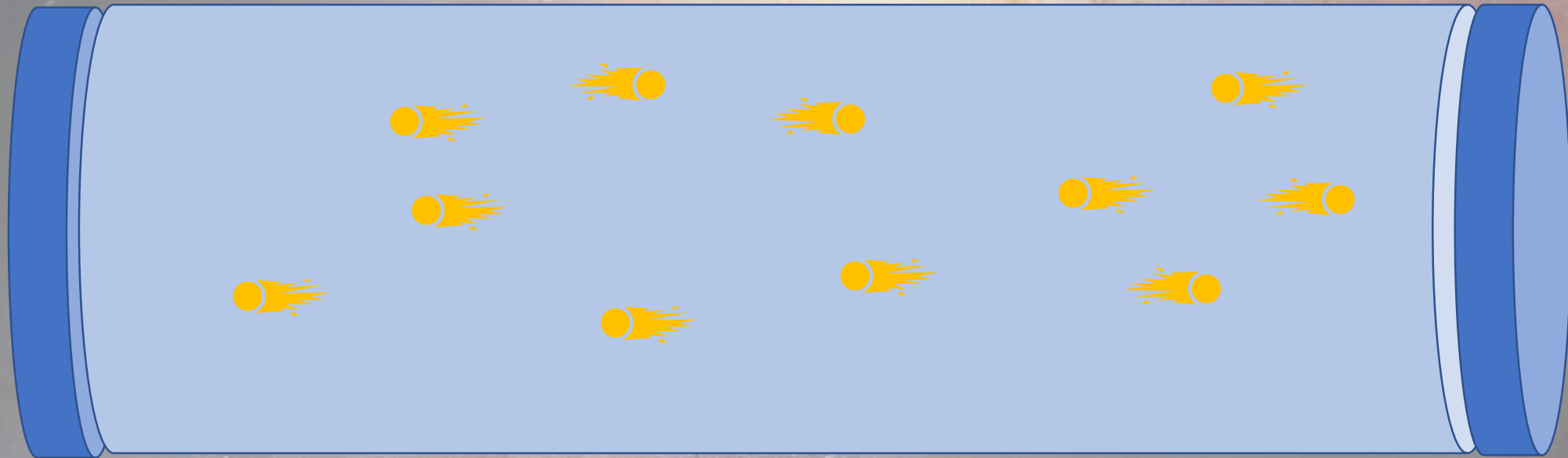




# Wie baut man einen LASER?

Spiegel

Spiegel



# Wie baut man einen LASER?

Spiegel



Teildurchlässiger Spiegel

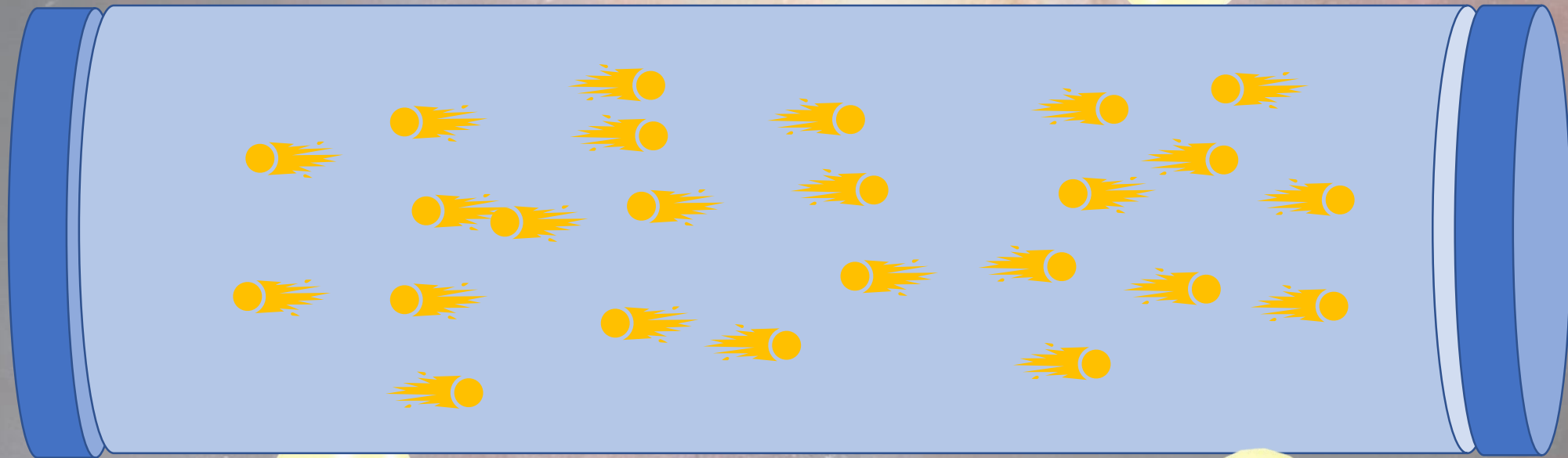






Foto: R. Wengenmayr, Physik in unserer Zeit

# Maser im Weltall



## Voraussetzungen

- Das passende optische Medium
- Der passende Pumpprozess
- Die passende Geometrie

Nur wenn alle drei Punkte zusammen kommen kann Maserstrahlung entstehen.



# Das passende optische Medium

- Das interstellare Medium hat eine reiche chemische Zusammensetzung (209 identifizierte Spezies, Stand 2018)

**Table 2**  
List of Detected Interstellar Molecules with Two to Seven Atoms, Categorized by Number of Atoms, and Vertically Ordered by Detection Year

2 Atoms		3 Atoms		4 Atoms		5 Atoms		6 Atoms		7 Atoms	
CH	CP	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> CHO				
CN	NH	HCO <sup>+</sup>	MgCN	H <sub>2</sub> CO	HCOOH	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> CCH				
CH <sup>+</sup>	SiN	HCN	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	HNCO	CH <sub>2</sub> NH	NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>				
OH	SO <sup>+</sup>	OCS	SiCN	H <sub>2</sub> CS	NH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> SH	CH <sub>2</sub> CHCN				
CO	CO <sup>+</sup>	HNC	AlNC	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CCO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	HC <sub>5</sub> N				
H <sub>2</sub>	HF	H <sub>2</sub> S	SiNC	C <sub>3</sub> N	C <sub>4</sub> H	C <sub>5</sub> H	C <sub>6</sub> H				
SiO	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	HCP	HNCS	SiH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> NC	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O				
CS	CF <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> H	CCP	HOCO <sup>+</sup>	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	HC <sub>2</sub> CHO	CH <sub>2</sub> CHOH				
SO	PO	SO <sub>2</sub>	AlOH	C <sub>3</sub> O	CH <sub>2</sub> CN	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> H <sup>-</sup>				
SiS	O <sub>2</sub>	HCO	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	l-C <sub>3</sub> H	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub> S	CH <sub>3</sub> NCO				
NS	AlO	HNO	H <sub>2</sub> Cl <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	SiC <sub>4</sub>	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	HC <sub>5</sub> O				
C <sub>2</sub>	CN <sup>-</sup>	HCS <sup>+</sup>	KCN	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> CCC	C <sub>5</sub> N					
NO	OH <sup>+</sup>	HOC <sup>+</sup>	FeCN	C <sub>3</sub> S	CH <sub>4</sub>	HC <sub>4</sub> H					
HCl	SH <sup>+</sup>	SiC <sub>2</sub>	HO <sub>2</sub>	c-C <sub>3</sub> H	HCCNC	HC <sub>4</sub> N					
NaCl	HCl <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> S	TiO <sub>2</sub>	HC <sub>2</sub> N	HNCCC	c-H <sub>2</sub> C <sub>3</sub> O					
AlCl	SH	C <sub>3</sub>	CCN	H <sub>2</sub> CN	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>	CH <sub>2</sub> CNH					
KCl	TiO	CO <sub>2</sub>	SiCSi	SiC <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sup>-</sup>	C <sub>5</sub> N <sup>-</sup>					
AlF	ArH <sup>+</sup>	CH <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub>	CNCHO	HNCHCN					
PN	NS <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> O	HCS	C <sub>3</sub> N <sup>-</sup>	HNCNH	SiH <sub>3</sub> CN					
SiC		MgNC	HSC	PH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> O						
		NH <sub>2</sub>	NCO	HCNO	NH <sub>3</sub> D <sup>+</sup>						
		NaCN		HOCN	H <sub>2</sub> NCO <sup>+</sup>						
				HSCN	NCCNH <sup>+</sup>						
				HOOH	CH <sub>3</sub> Cl						
				l-C <sub>3</sub> H <sup>+</sup>							
				HMgNC							
				HCCO							
				CNCN							

**Table 3**  
List of Detected Interstellar Molecules with Eight or More Atoms, Categorized by Number of Atoms, and Vertically Ordered by Detection Year

8 Atoms	9 Atoms	10 Atoms	11 Atoms	12 Atoms	13 Atoms	Fullerenes
HCOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	HC <sub>9</sub> N	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	c-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CN	C <sub>60</sub>
CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	HO(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> OH	CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H	n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CN		C <sub>60</sub> <sup>+</sup>
C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCHO	i-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CN		C <sub>70</sub>
CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>7</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> COOCH <sub>3</sub>			
H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> CHCH <sub>2</sub> O				
CH <sub>2</sub> OHCHO	C <sub>8</sub> H	CH <sub>3</sub> OCH <sub>2</sub> OH				
HC <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>					
CH <sub>2</sub> CHCHO	C <sub>8</sub> H <sup>-</sup>					
CH <sub>2</sub> CCHCN	CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>					
NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> SH					
CH <sub>3</sub> CHNH	HC <sub>7</sub> O					
CH <sub>3</sub> SiH <sub>3</sub>						

Note. Column headers and molecule formulas are in-document hyperlinks in most PDF viewers.

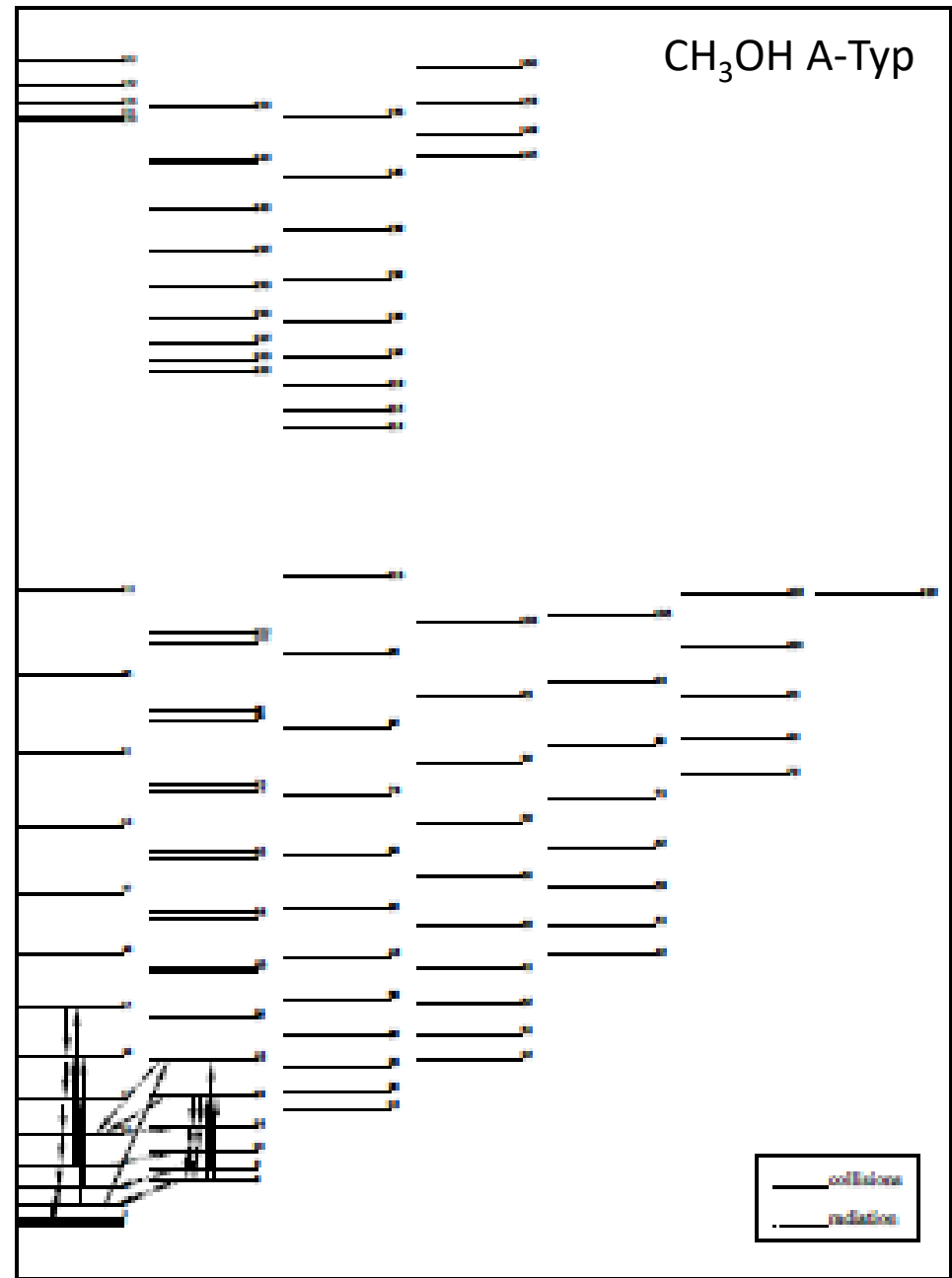
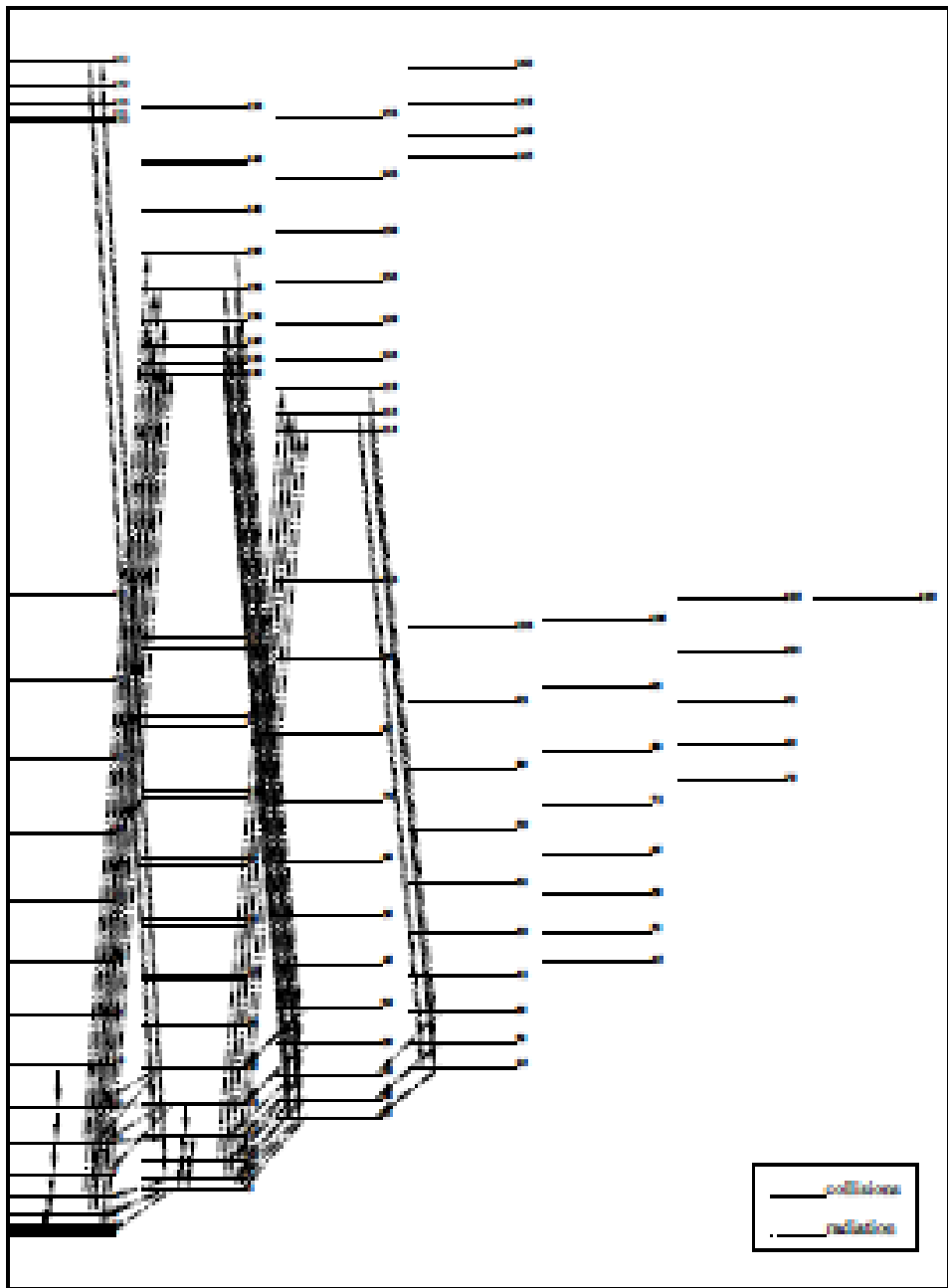
Note. Column headers and molecule formulas are in-document hyperlinks in most PDF viewers.

# Das passende optische Medium

- Das interstellare Medium hat eine reiche chemische Zusammensetzung (209 identifizierte Spezies, Stand 2018)
- Maserstrahlung wurde gefunden bei:
  - OH
  - SiO
  - H<sub>2</sub>O
  - CH<sub>3</sub>OH









# Das passende optische Medium

- Das interstellare Medium hat eine reiche chemische Zusammensetzung (209 identifizierte Spezies, Stand 2018)
- Maserstrahlung wurde gefunden bei:
  - OH
  - SiO
  - H<sub>2</sub>O
  - CH<sub>3</sub>OH
  - + ca. 10 Weitere
- Wo und unter welchen Bedingungen können diese Moleküle in ausreichenden Mengen vorkommen?  
→ ASTROCHEMIE

# Der passende Pumpprozess

- Stoß-Pumpen:
  - In einem Gas hängt die Zahl der Stöße sowie deren Energie ab von:
    - Teilchendichte
    - Temperatur (kinetischen Energie der Teilchen)
  - Stöße sorgen meistens für den gegenteiligen Effekt: die Aufhebung der Besetzungsinversion
- Strahlungs-Pumpen:
  - Eine passende Strahlungsquelle muss sich in unmittelbarer Nähe befinden
  - Die Pump-Strahlung muss alle Bereiche, die Maserstrahlung abgeben ungestört erreichen können

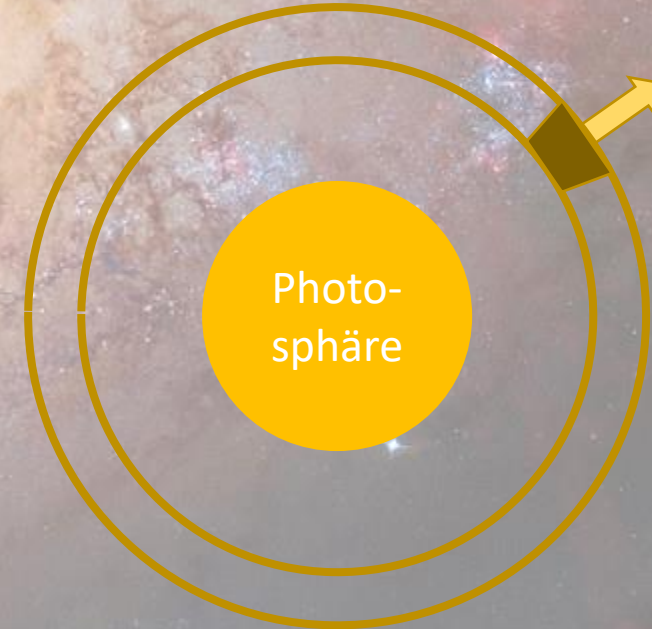


# Die passende Geometrie

- Im Labor sorgen die Spiegel dafür, dass die Strahlung eine genügend lange Strecke durch das optische Medium zurück legt.
- Ohne Spiegel braucht man sehr lange, zusammenhängende Sichtlinien durch das Medium (Spoiler:  $\sim 10^{10}$ - $10^{15}$  cm =  $1000 R_{\odot}$  - 0.001 pc)
- **Die Moleküle in diesem zusammenhängenden Stück müssen sich alle mit der gleichen Geschwindigkeit in die gleiche Richtung bewegen!**

# Die passende Geometrie: expandierende Sternhüllen

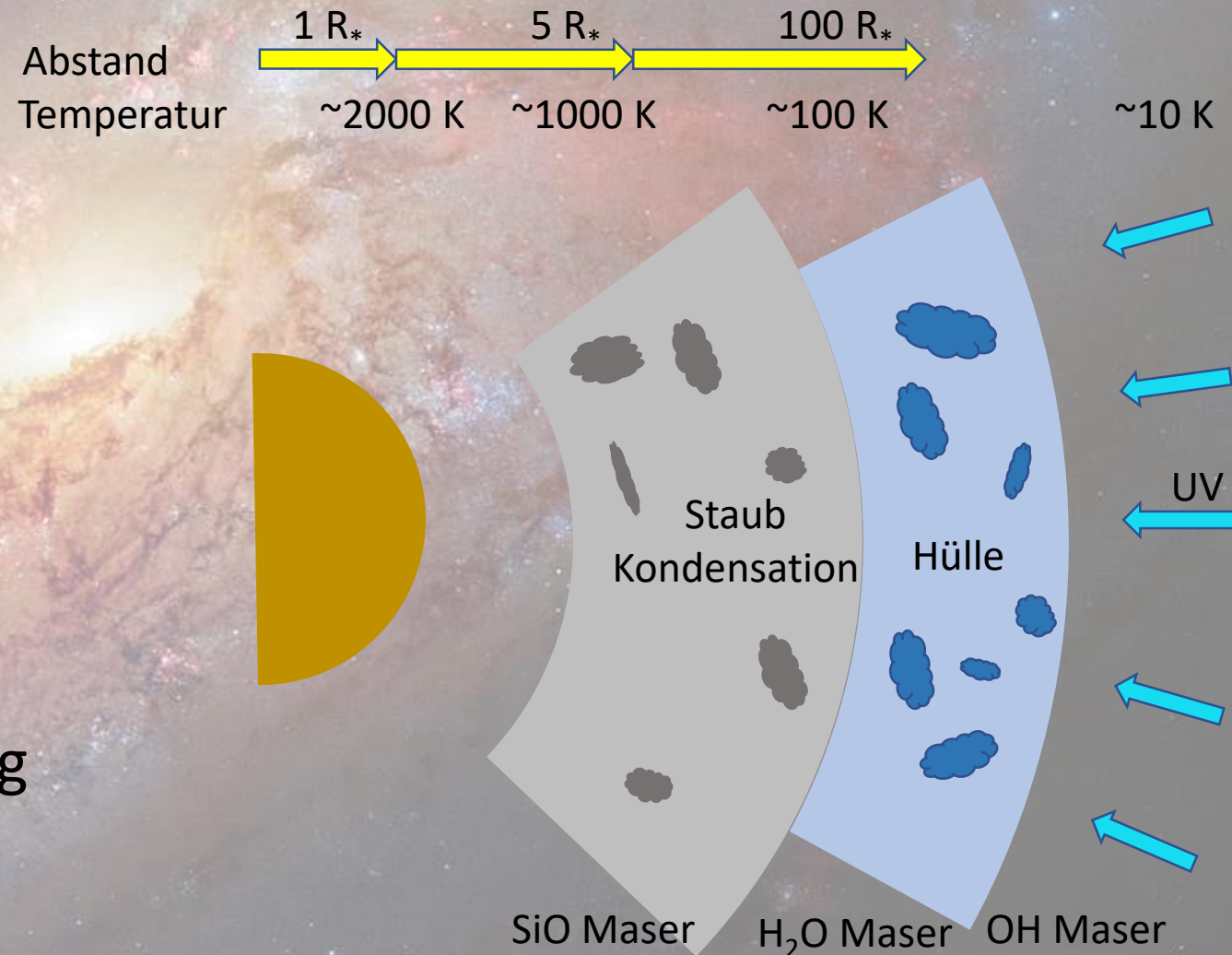
- Späte Riesensterne haben intensive stellare Winde und pulsieren
- Expandierende Gas- und Staubhülle um den Stern
- Beispiel:
  - AGB Sterne, Radien: 0.5-3 Astronomische Einheiten (AE), Masse: 0.5-10  $M_{\odot}$
  - Rote Superriesen, Radien: 5-50 AE, Masse:  $> 8 M_{\odot}$
- Beide haben geringe Oberflächentemperaturen  $\sim 3000$  K





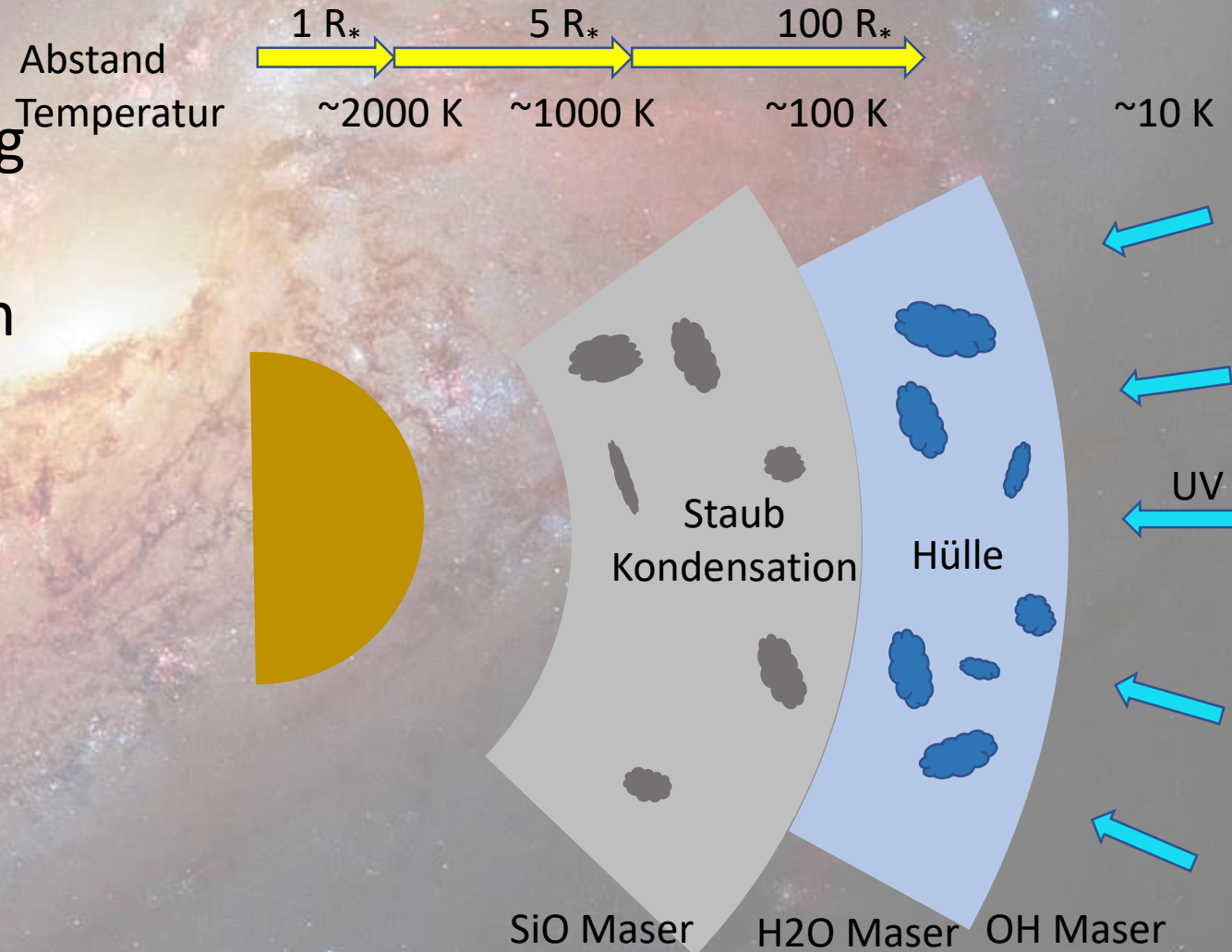
# Die passende Geometrie: expandierende Sternhüllen

- Die expandierende Hülle kühlt nach Außen hin ab
- Die Gasdichten sind vergleichsweise hoch
- Ab ca. 1500 K können sich SiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und TiO Moleküle bilden
- Weiter außen kann sich bei ca. 100 K H<sub>2</sub>O bilden
- Die UV Strahlung der Umgebung zerstört H<sub>2</sub>O zu OH



# Die passende Geometrie: expandierende Sternhüllen

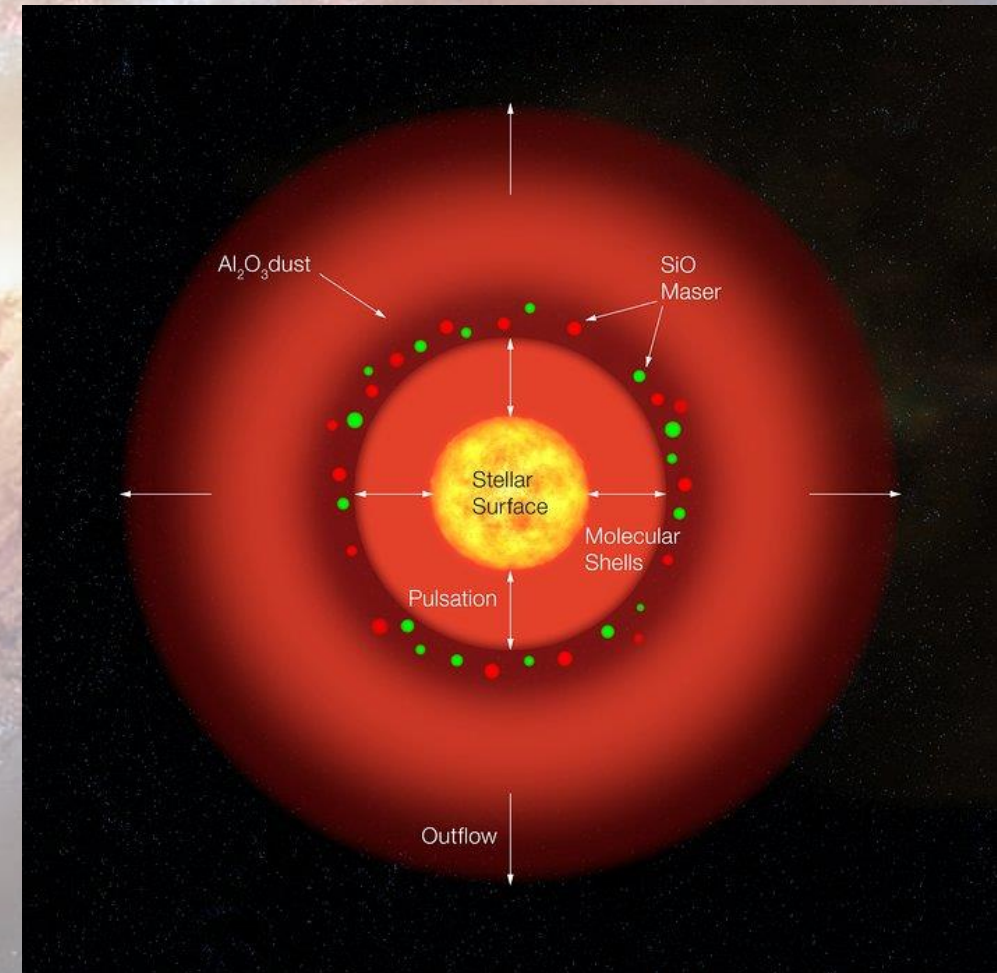
- Die UV Strahlung der Umgebung zerstört  $\text{H}_2\text{O}$  zu OH
- Daher findet man SiO Maser am nächsten um den Stern gefolgt von  $\text{H}_2\text{O}$  Masern und weiter außen OH Maser.





# S Ori

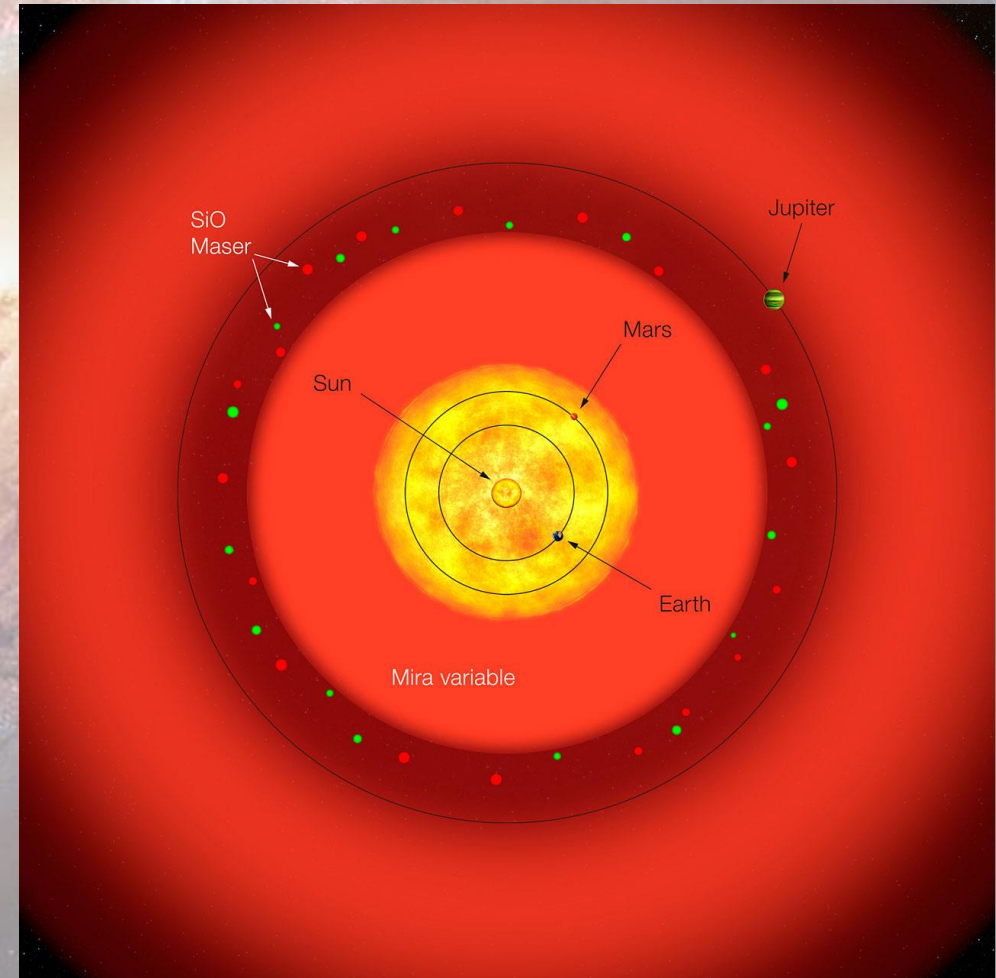
- S Orionis ist ein Roter Riese vom Typ Mira (Entfernung: 1000 Lj)
- Extreme Massenverluste: 1 Erdmasse pro Jahr
- Pulsiert mit einer Periode von 420 Tagen
- Die Helligkeit variiert dabei um den Faktor 500



Quelle: ESO

# S Ori

- S Orionis ist ein Roter Riese vom Typ Mira (Entfernung: 1000 Lj)
- Extreme Massenverluste: 1 Erdmasse pro Jahr
- Pulsiert mit einer Periode von 420 Tagen
- Die Helligkeit variiert dabei um den Faktor 500

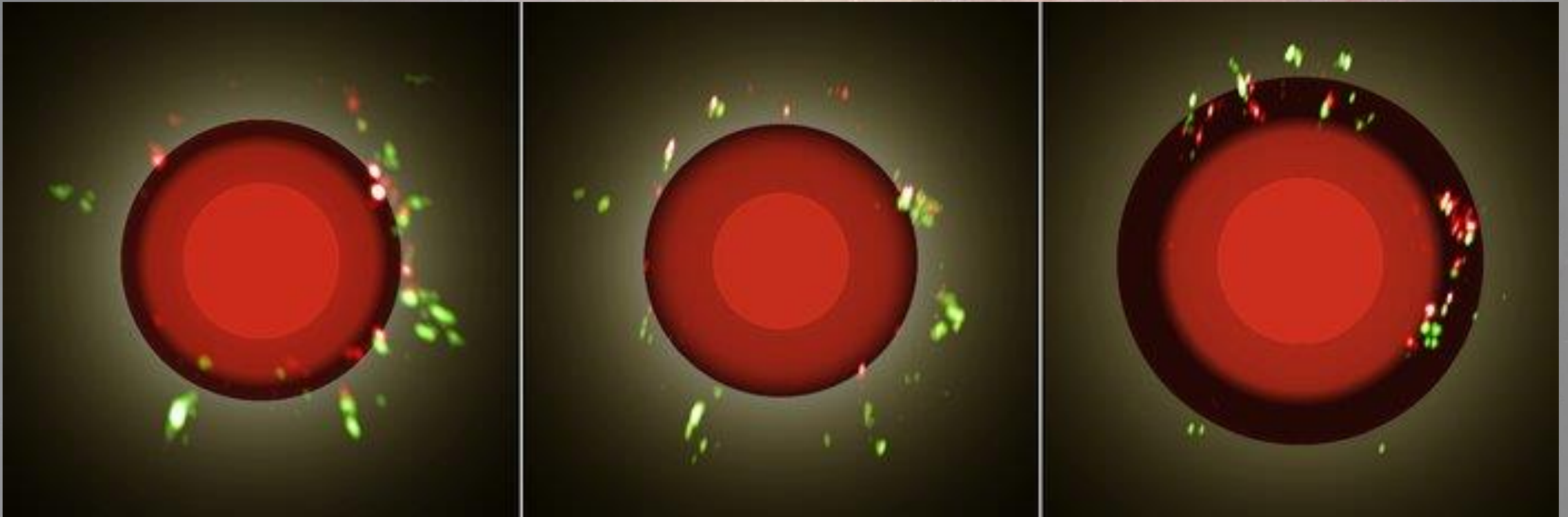


Quelle: ESO



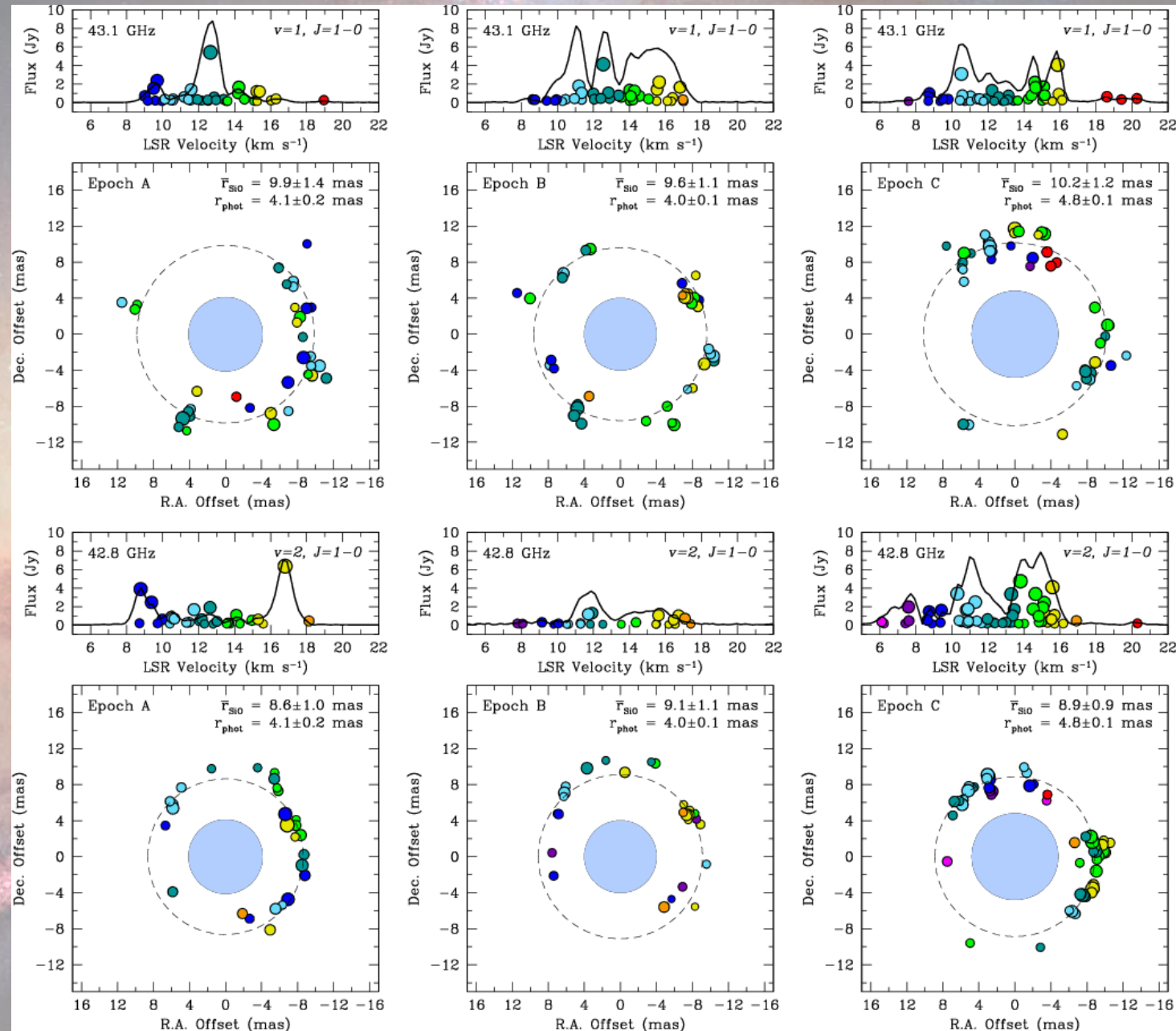
# S Ori

Sternoberfläche (rot) pulsiert periodisch. Jeder rote und grüne Fleck ist ein Gasklumpen mit Maserstrahlung



# S Ori

- Der Bereich in dem SiO Maser existieren können variiert mit der Periode der Sternpulsation





# Die passende Geometrie: Scheiben und Ausflüsse

- Bei der Entstehung von Sternen bilden sich Scheiben aus Gas und Staub
- Bilden sich Sterne nicht zu hoher Masse, entstehen auch Bipolare Ausflüsse
- In diesen Ausflüssen: große Gasvolumina fließen kohärent in die gleiche Richtung und werden intensiv beleuchtet → MASER

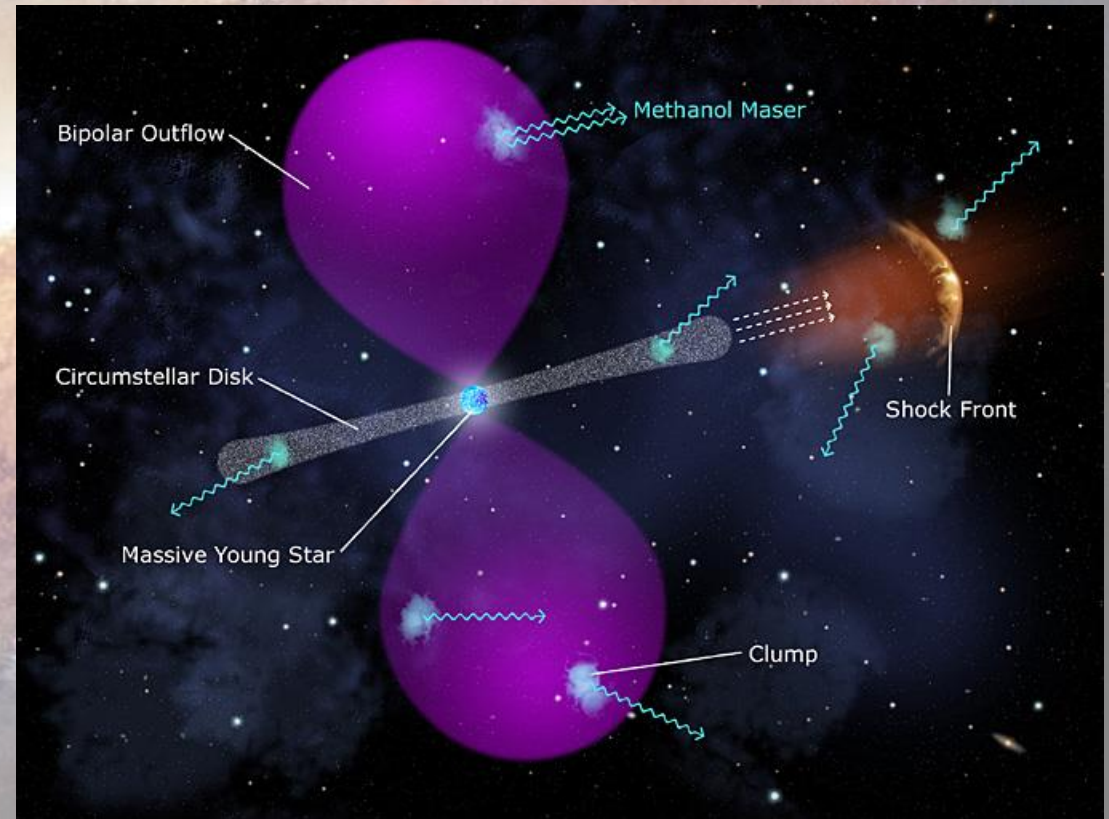


Keine echten Daten!

Quelle: Wolfgang Steffen, Instituto de Astronomía, UNAM

# Die passende Geometrie: Scheiben und Ausflüsse

- Bei der Entstehung von Sternen bilden sich Scheiben aus Gas und Staub
- Bilden sich Sterne nicht zu hoher Masse, entstehen auch Bipolare Ausflüsse
- In diesen Ausflüssen: große Gasvolumina fließen kohärent in die gleiche Richtung und werden intensiv beleuchtet → MASER
- OH, H<sub>2</sub>O, SiO, CH<sub>3</sub>OH

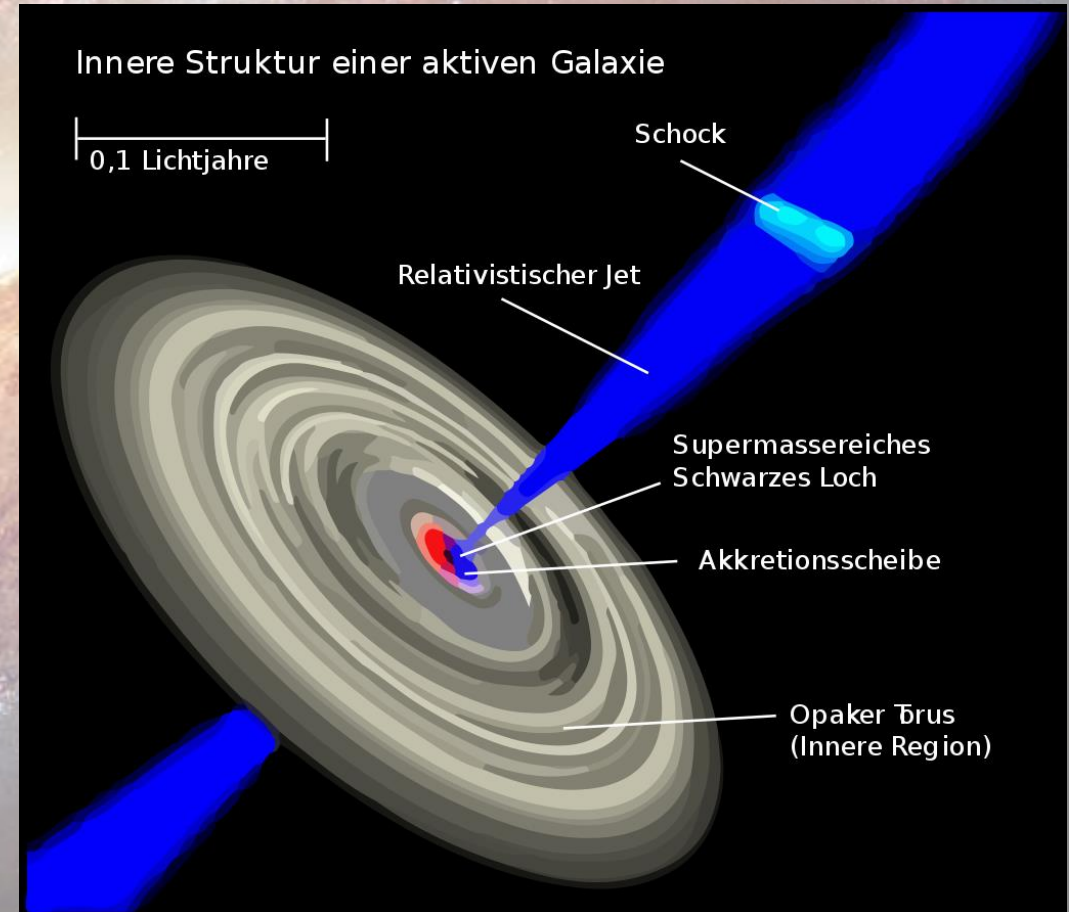


Quelle: Lisa Harvey-Smith, University of Sydney



# Extragalaktische Maser

- Spiralgalaxien mit aktiven galaktischen Kernregionen (AGN) sind zeigen eine ungewöhnliche hohe Helligkeit, die nicht von Sternen produziert wird.
- Ursache: Akkretion von Materie durch ein supermassives Schwarzes Loch im Zentrum
- Beispiele: NGC 1068, Cygnus A, M87



# NGC 4258 / M106

- Spiralgalaxie
- Entfernung ca. 23 Mio. Lj.
- Starburst Phase
- Zentrales Schwarzes Loch mit ca. 40 Mio. Sonnenmassen





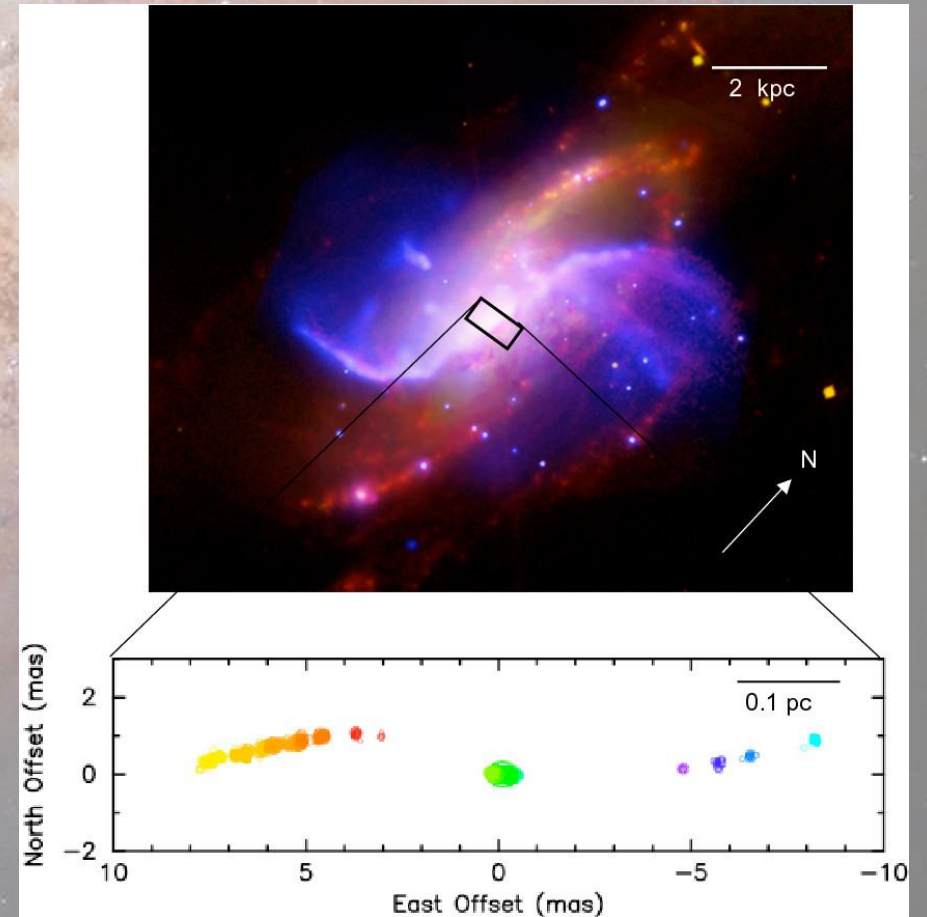
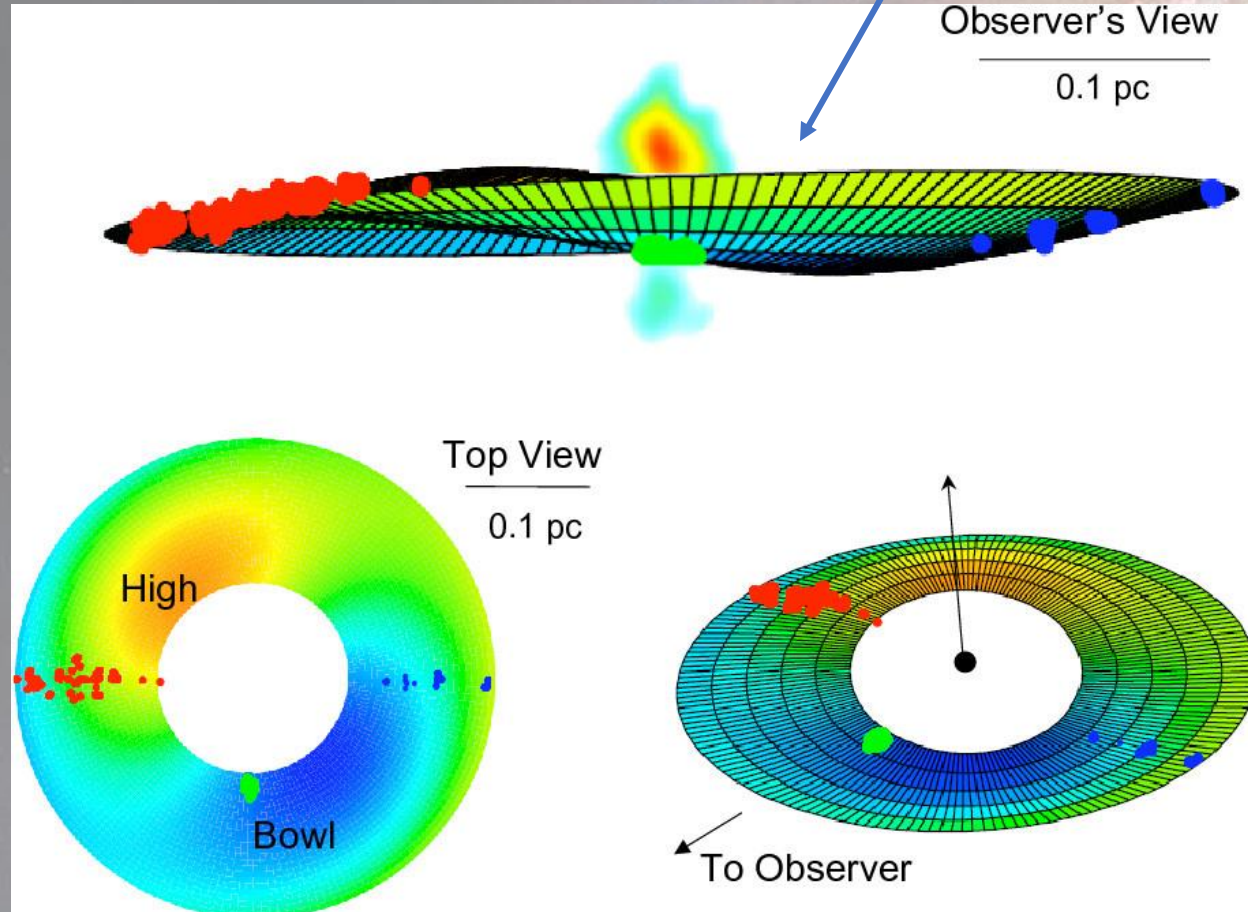


NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), and R. Gendler (for the Hubble Heritage Team)



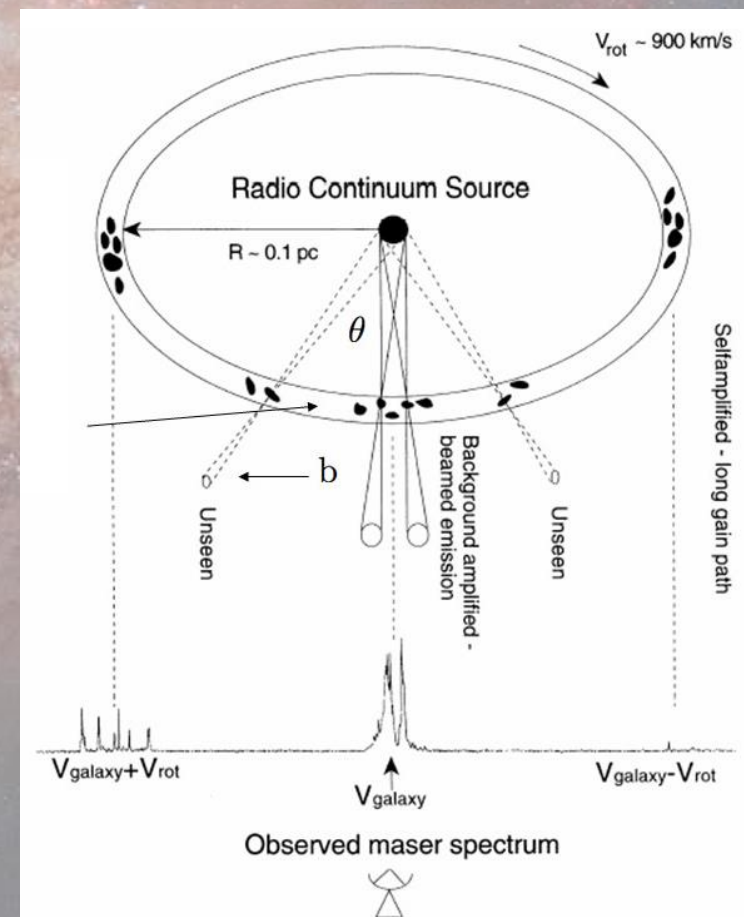
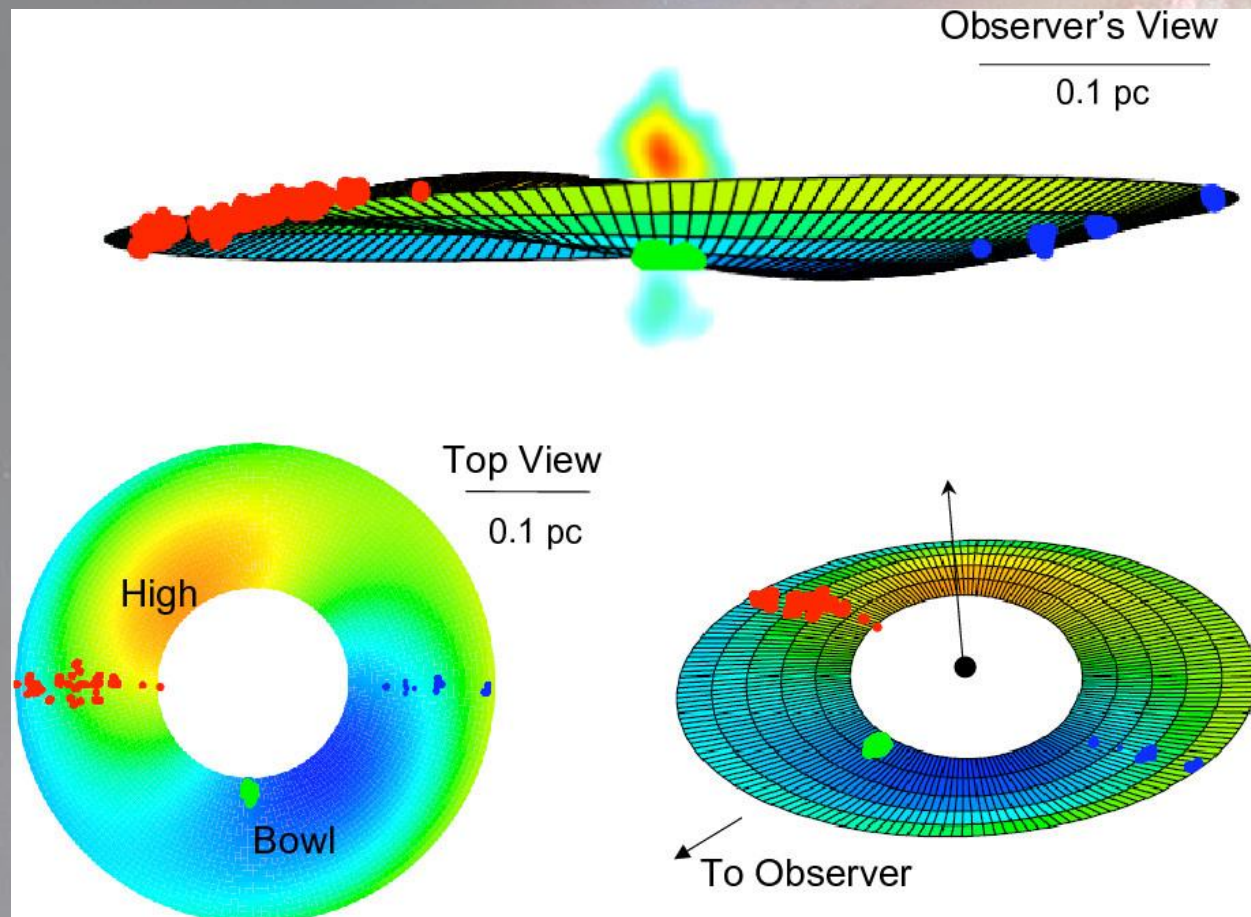
# NGC 4258

Scheibe aus Gas und Staub um zentrales schwarzes Loch



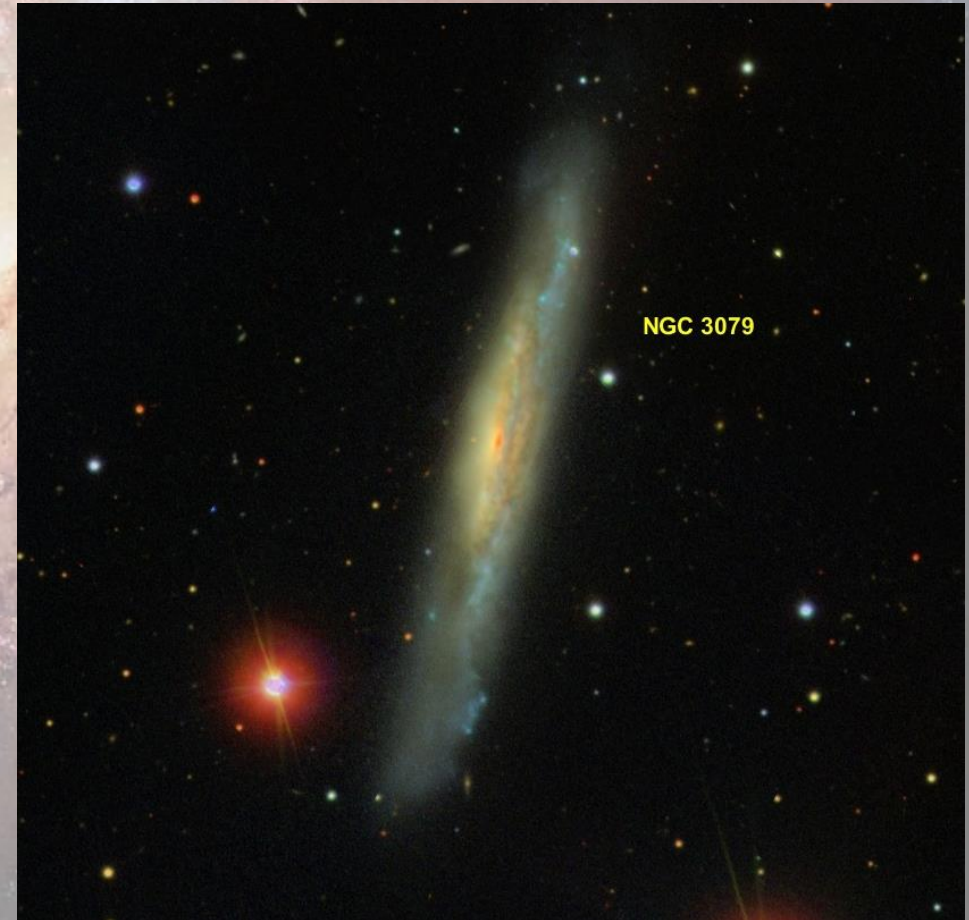


# NGC 4258

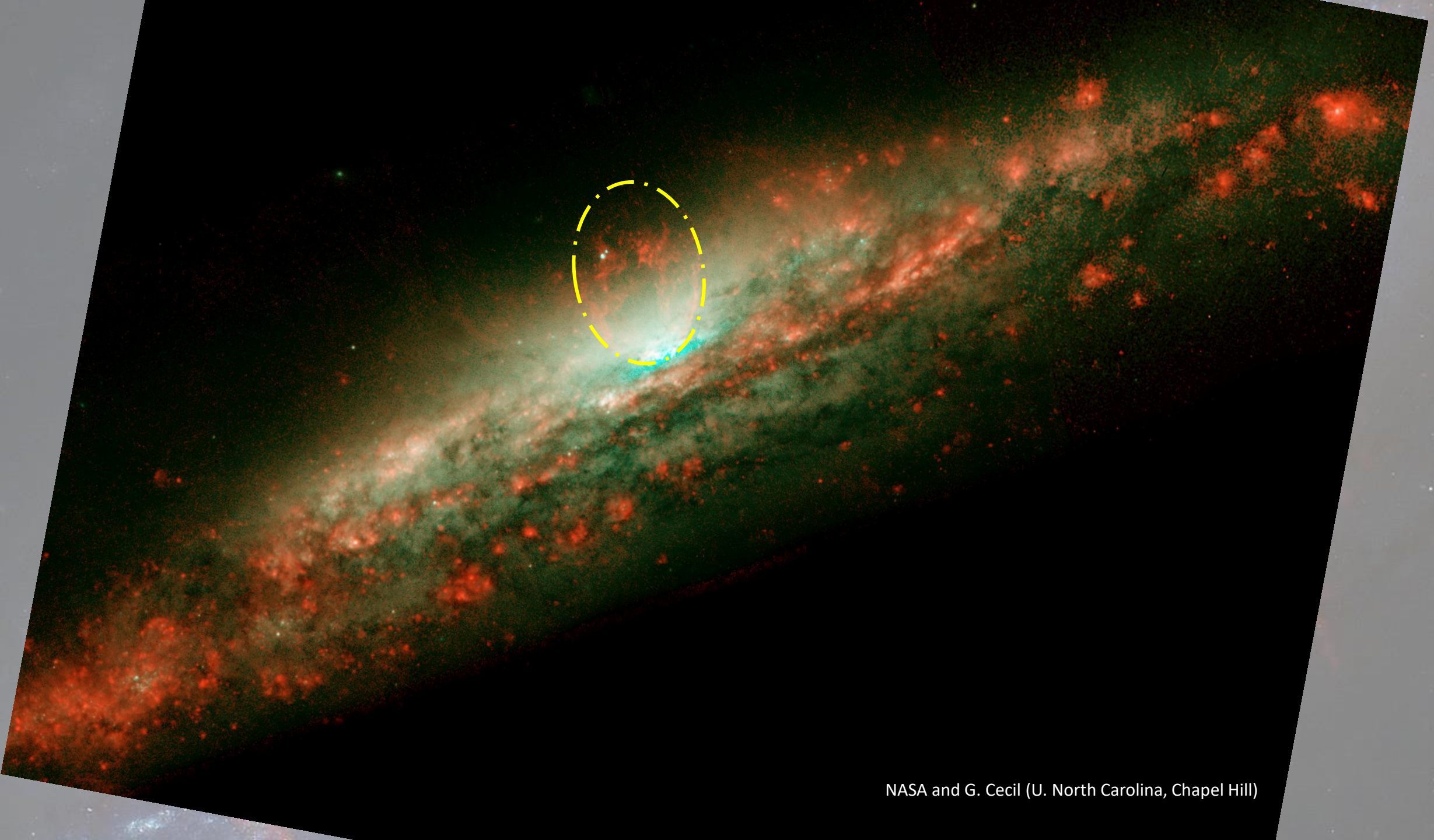


# NGC 3079

- Spiralgalaxie
- Entfernung ca. 50-65 Mio. Lj.
- Durchmesser 120000 Lj.
- Starburst
- Seyfert 2 / LINER Galaxie
- Zentrales Schwarzes Loch mit ca. 2 Mio. Sonnenmassen innerhalb von 1 Lj.





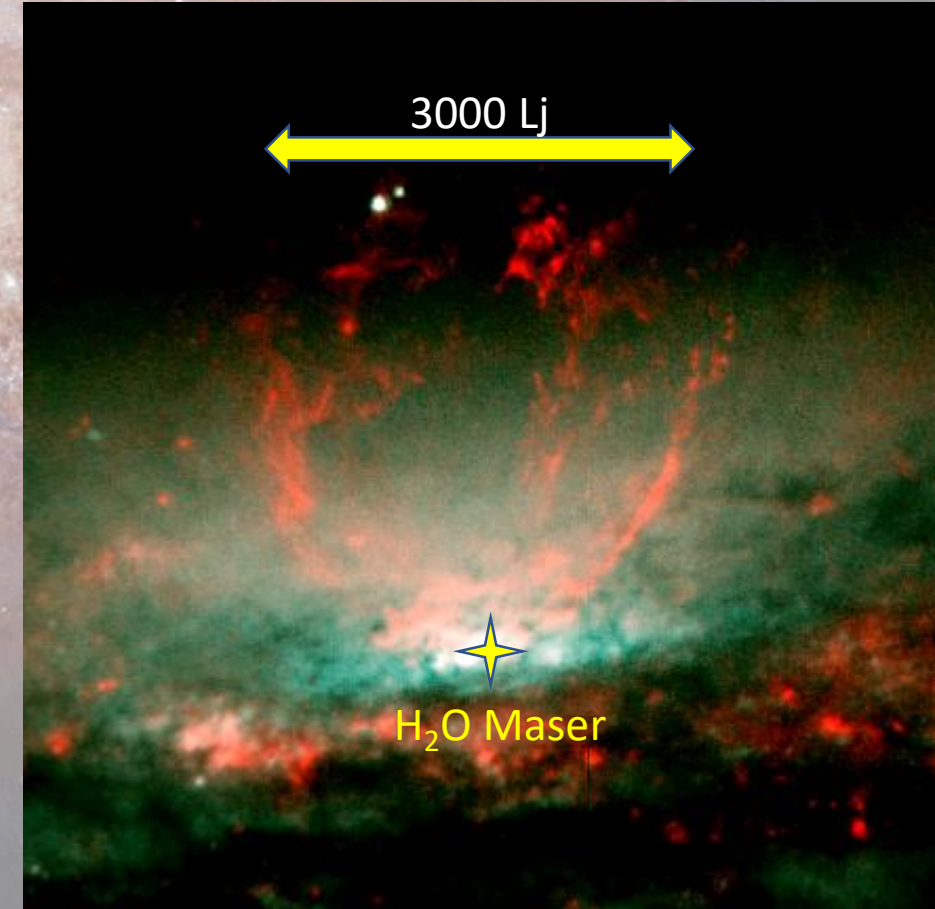
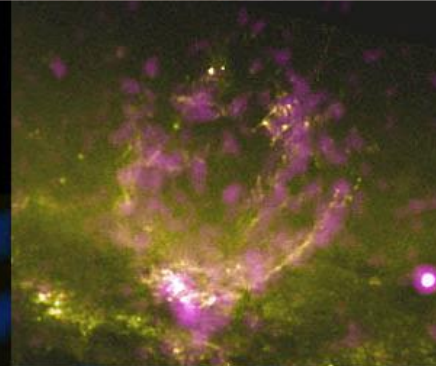
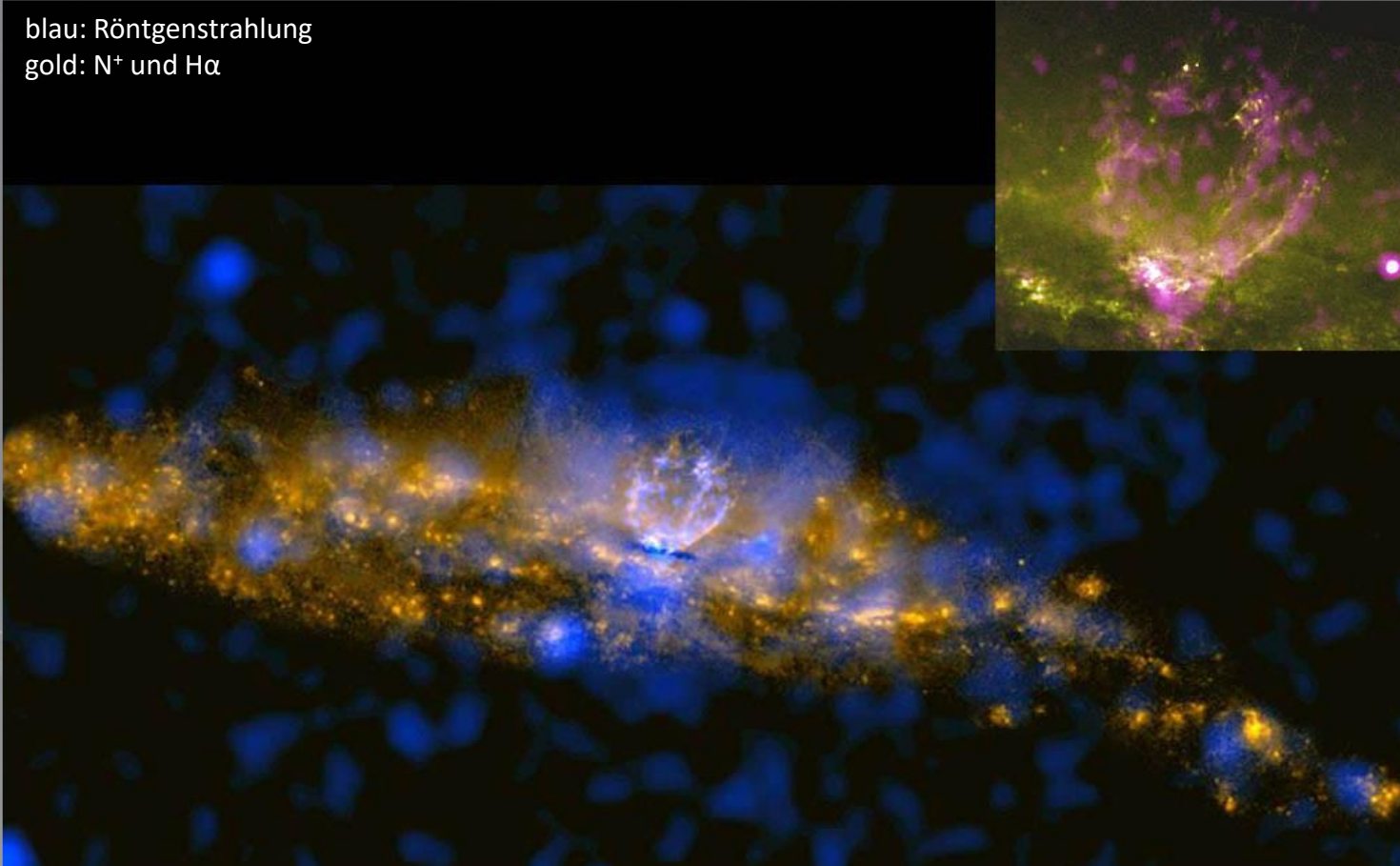


NASA and G. Cecil (U. North Carolina, Chapel Hill)



# NGC 3079

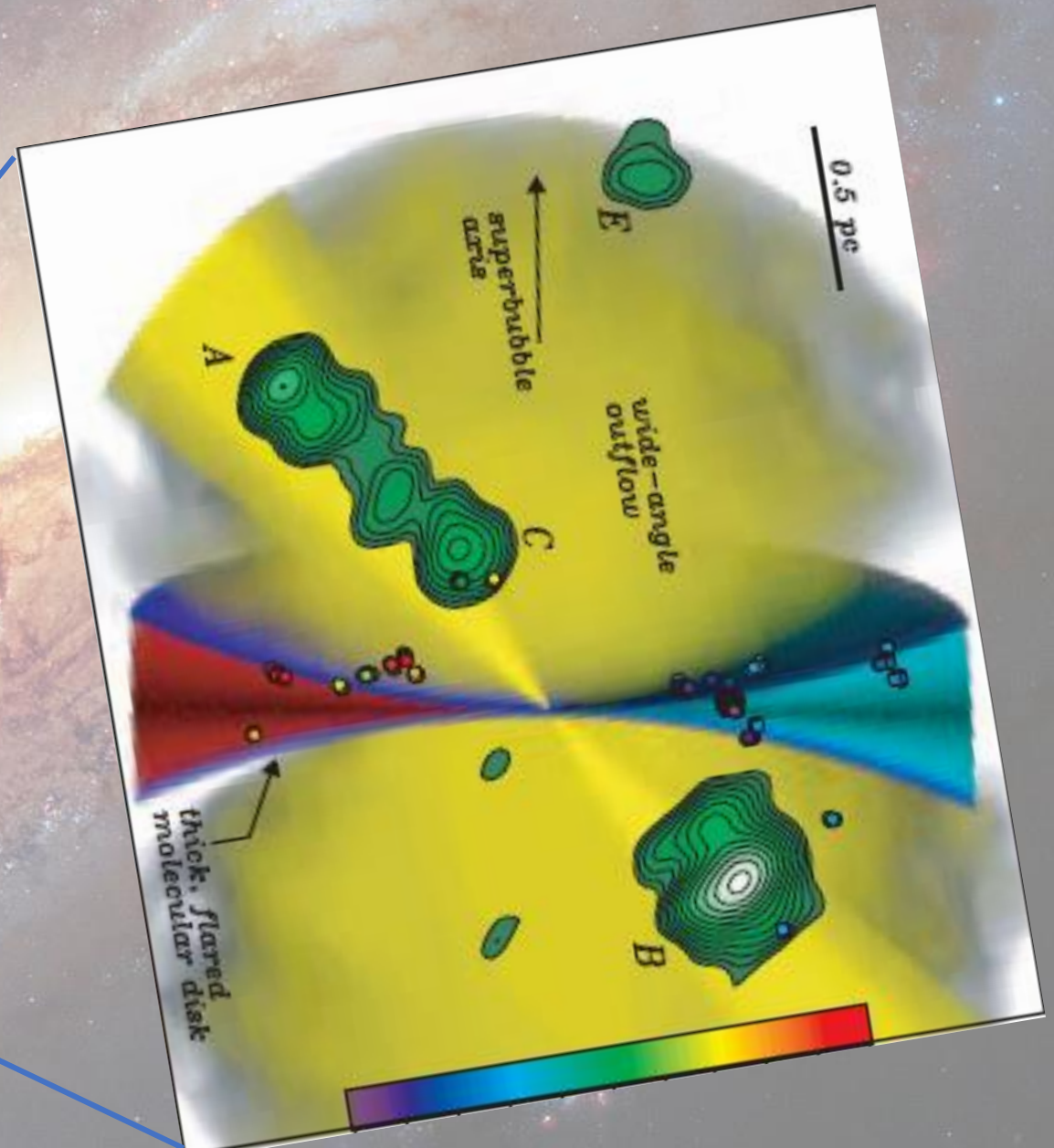
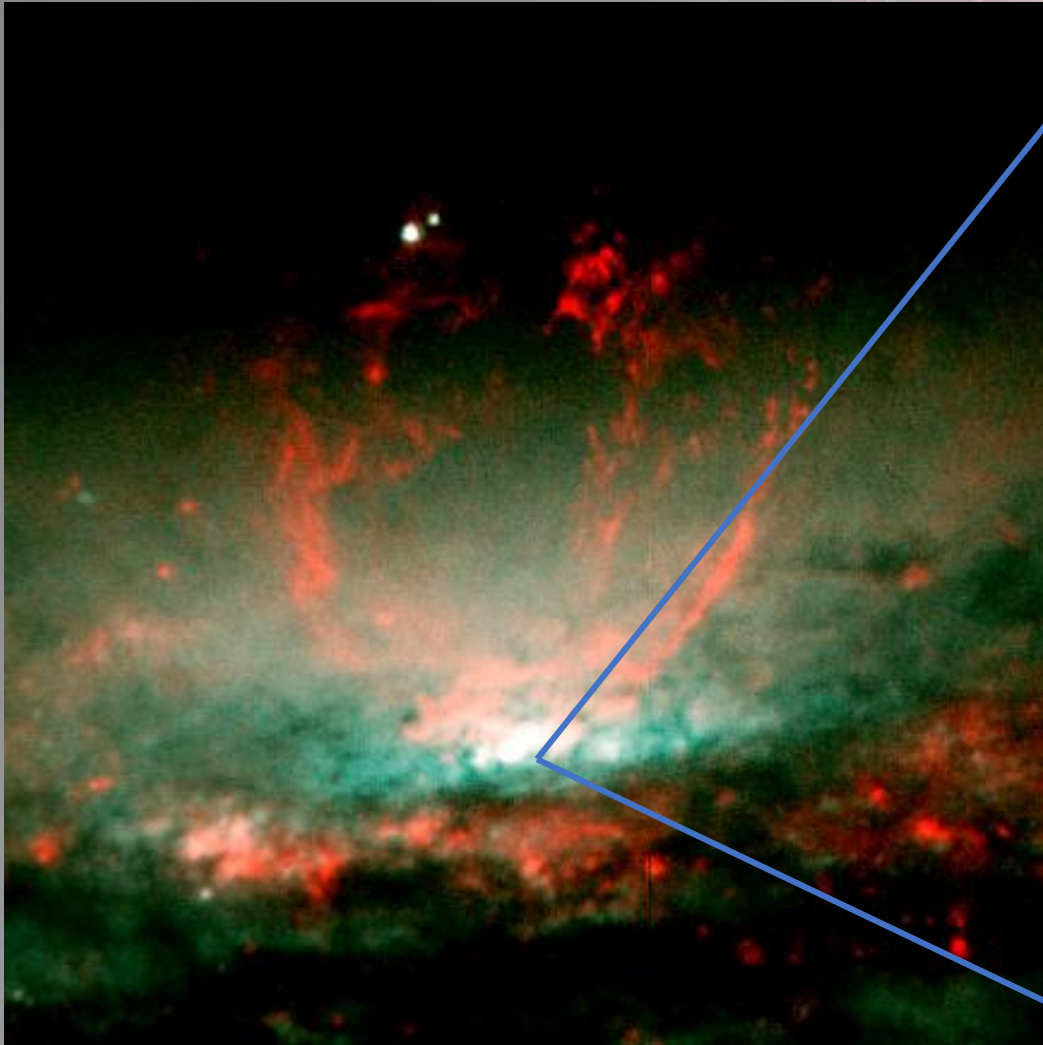
blau: Röntgenstrahlung  
gold:  $N^+$  und  $H\alpha$



Quelle: [NASA/ESA](#), Gerald Cecil (University of North Carolina), Sylvain Veilleux (University of Maryland), Joss Bland-Hawthorn (Anglo-Australian Observatory), and Alex Filippenko (University of California at Berkeley)



# NGC 3079



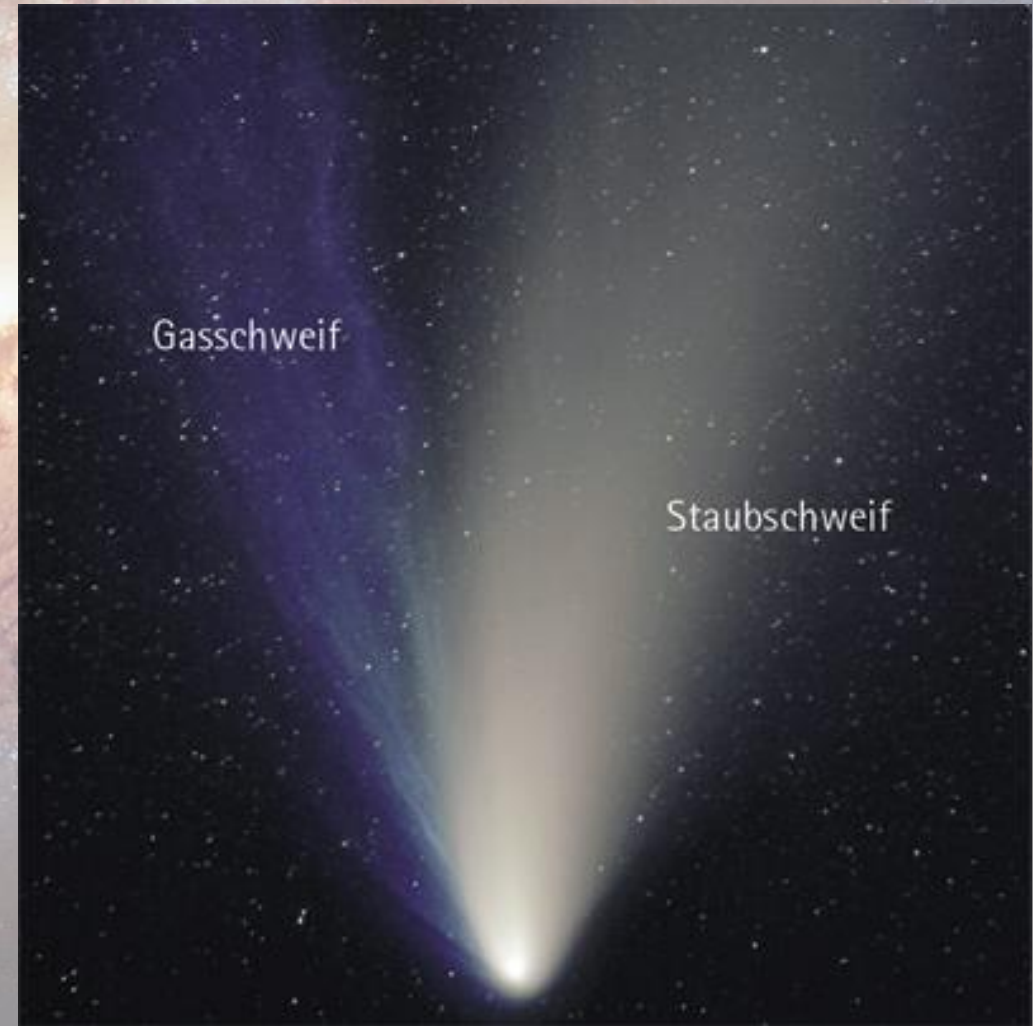
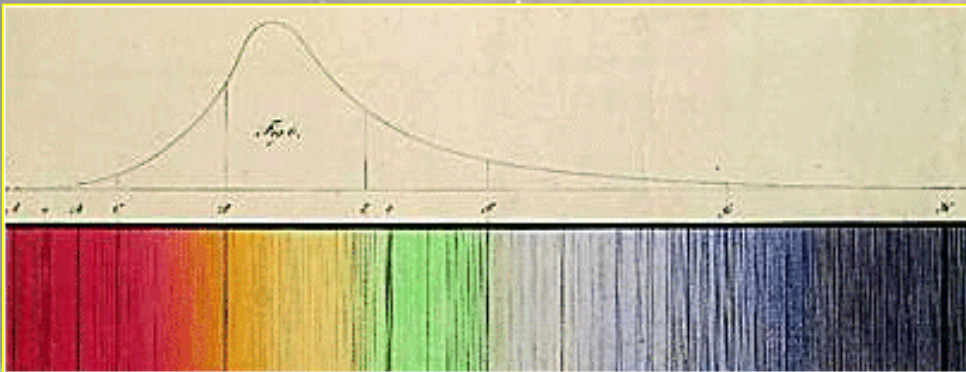
# Die passende Geometrie: Kometen ?!

- Man weiß schon lange, dass Kometen zu großen Teilen aus Wassereis bestehen.
- 1976 konnte die Emission von Wassermolekülen in der Koma des Kometen Bennett gefunden werden
- Die Intensität der Strahlung war 25 mal höher als theoretisch vorhergesagt



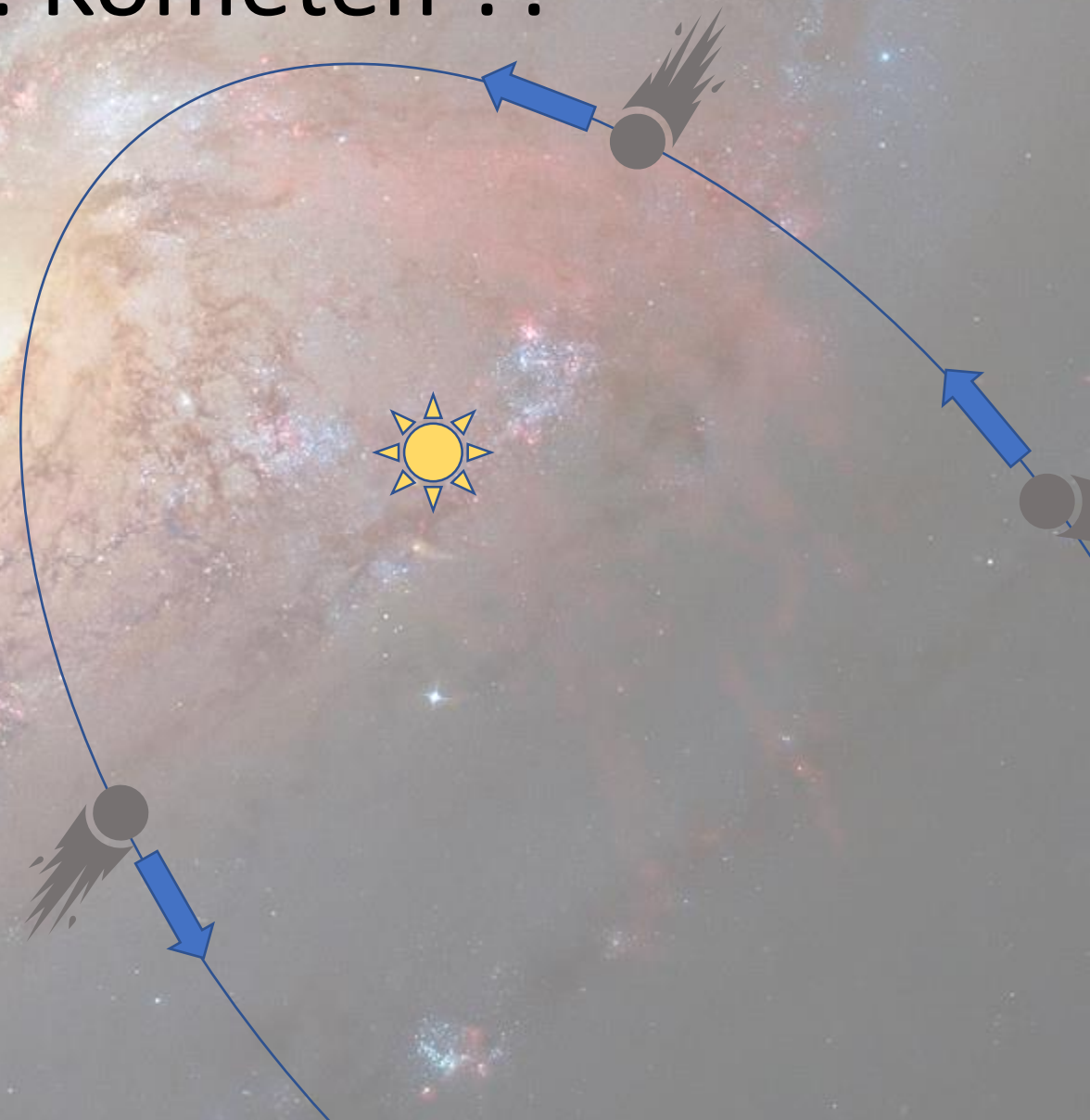
# Die passende Geometrie: Kometen ?!

- Kometen bestehen zu Teilen aus Wassereis
- In Sonnennähe sublimiert das Wasser und bildet die Koma und den Gasschweif
- Sonnenlicht kann die  $\text{H}_2\text{O}$  Moleküle anregen (pumpen)



# Die passende Geometrie: Kometen ?!

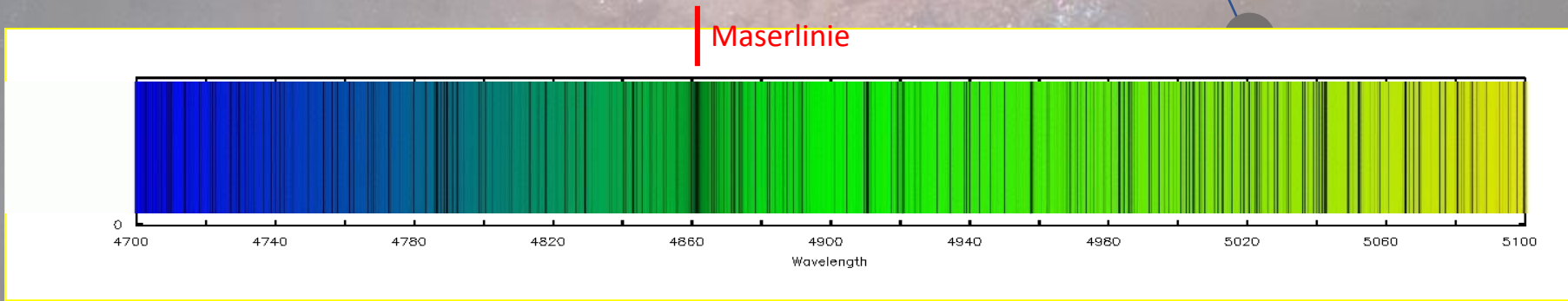
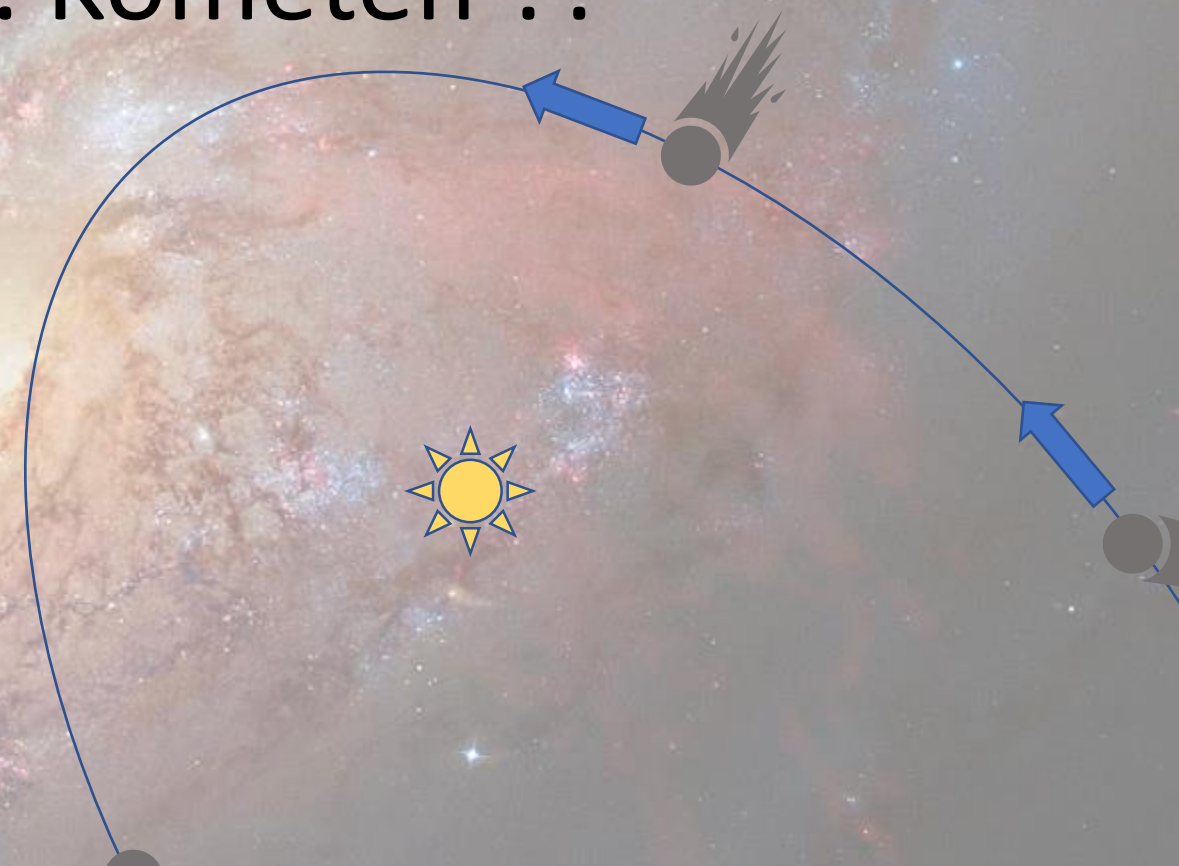
- Kometen bestehen zu Teilen aus Wassereis
- In Sonnennähe sublimiert das Wasser und bildet die Koma und den Gasschweif
- Sonnenlicht kann die  $\text{H}_2\text{O}$  Moleküle anregen (pumpen)
- Auf ihrer Bahn um die Sonne ändert sich die Relativgeschwindigkeit Komet-Sonne





# Die passende Geometrie: Kometen ?!

- Wechselnde Dopplerverschiebung der Fraunhoferlinien des Sonnenspektrums
- Wassermoleküle werden auf ihrer Bahn um die Sonne angeregt je nachdem ob die Sonnenstrahlung gerade ‚passt‘

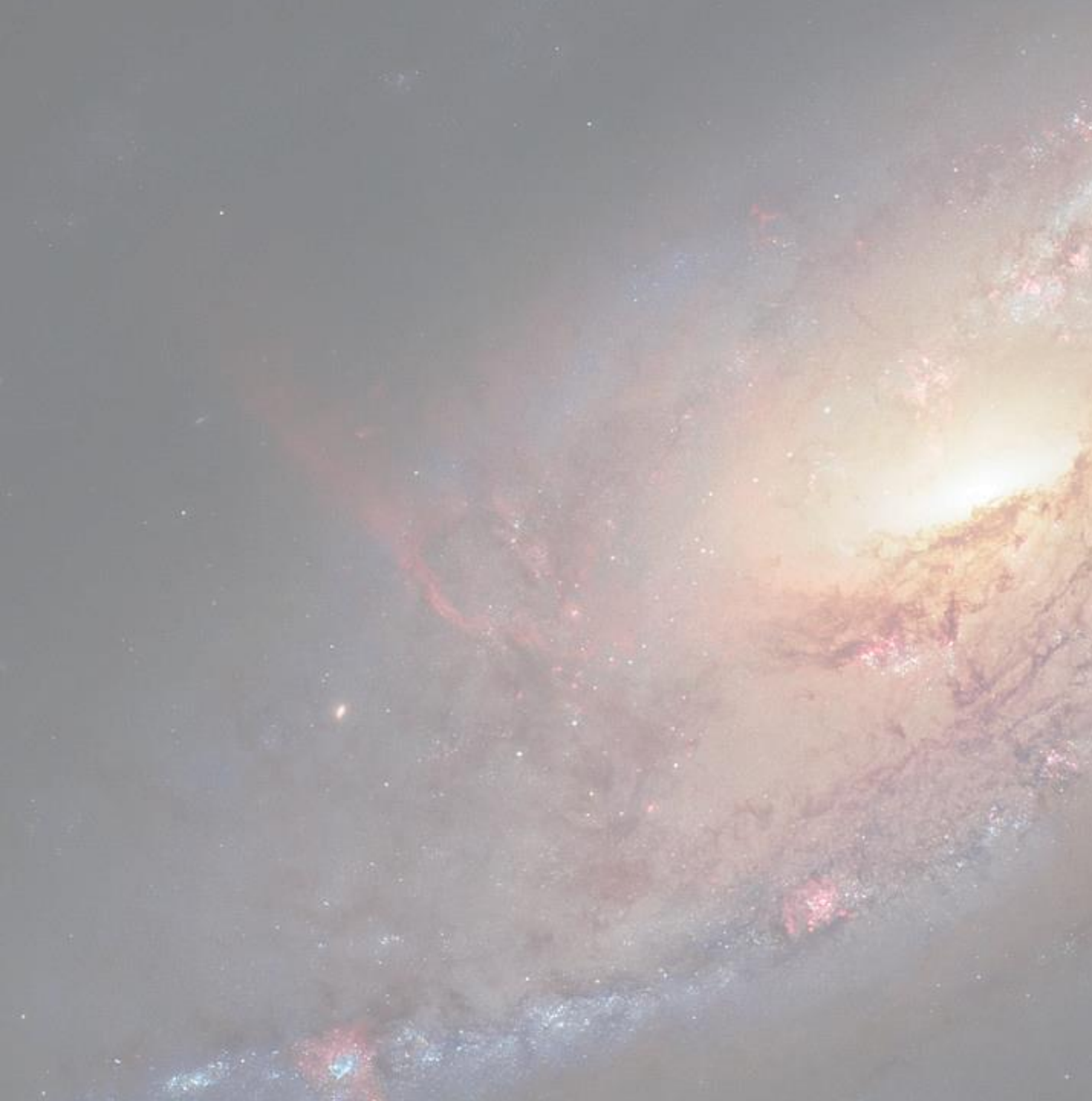


# Kometen und Planeten

- Der Komet Shoemaker-Levy 9 stürzte 1994 auf Jupiter
- Vor der Kollision konnte kein Wasser in der Atmosphäre von Jupiter gefunden werden.
- Nach der Kollision wurden Wasser-Maser in der Hochatmosphäre von Jupiter beobachtet.







Prof. Dr. Wilhelm H. Kegel (1936-2019)



**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**

