

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



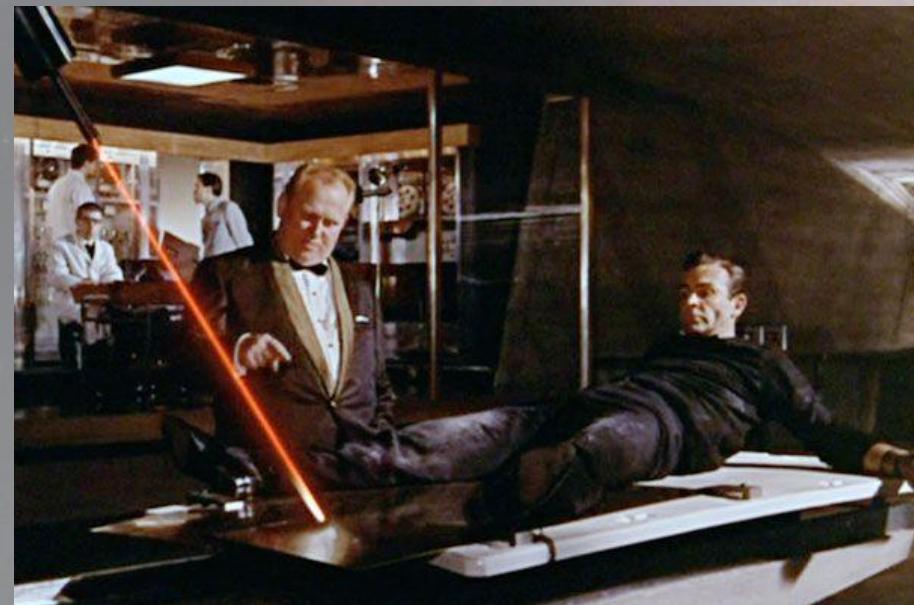
- **LASER** steht für “Light Amplification through stimulated emission of radiation”
auf deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung
- Light = sichtbares Licht ($\lambda=300\ldots600$ nm)
- Microwave=Mikrowellen ($\lambda =1\text{mm}\ldots30$ cm)
- **MASER** steht für “Microwave Amplification through stimulated emission of radiation”

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?

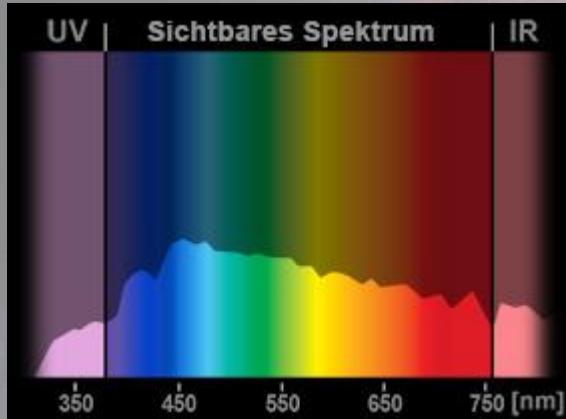
Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

- Hohe Intensität

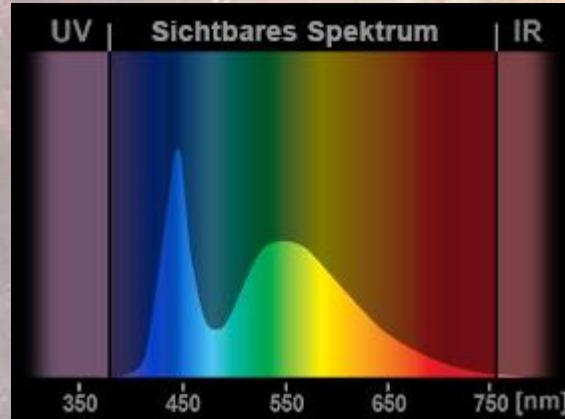


Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

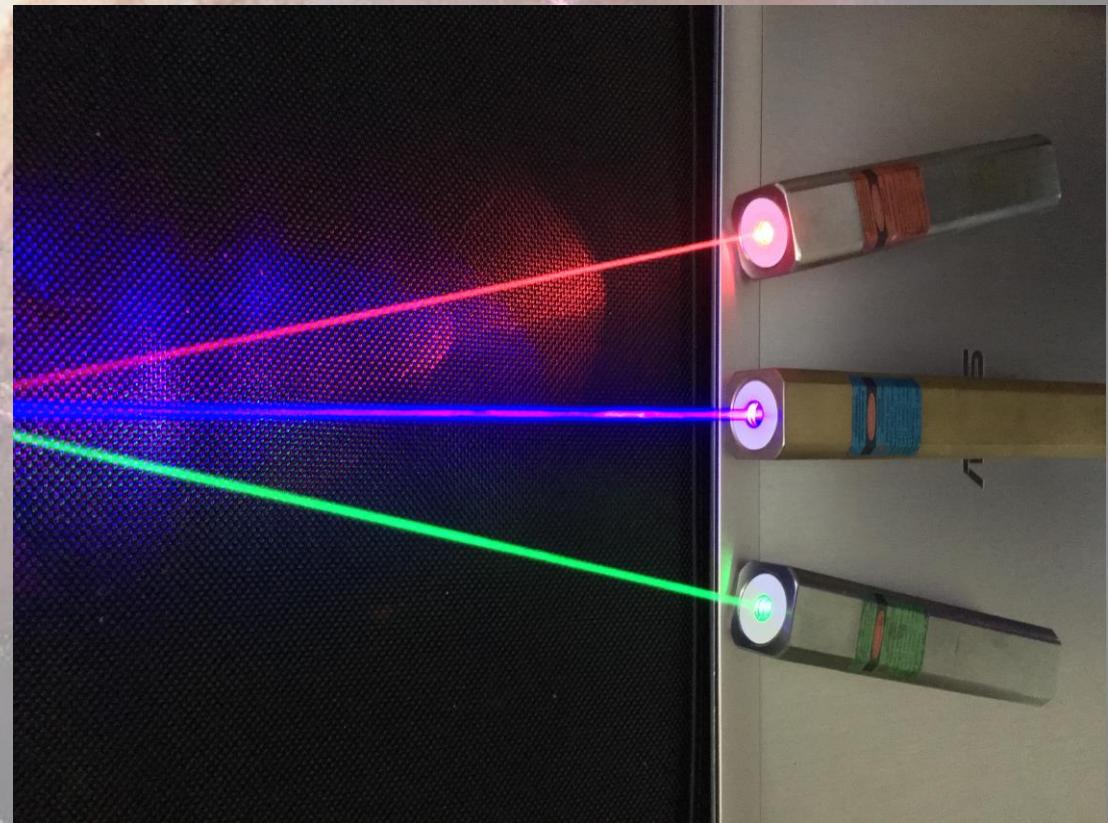
- Hohe Intensität
- Monochromatisch (besteht nur aus einer Wellenlänge/Farbe)



Sonnenspektrum
zu Mittag

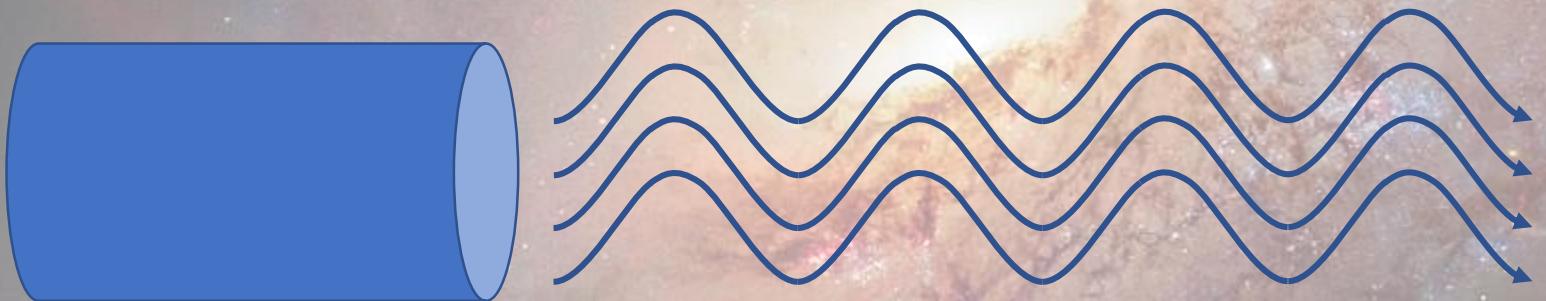


Lichtspektrum einer
LED-Lampe "daylight"

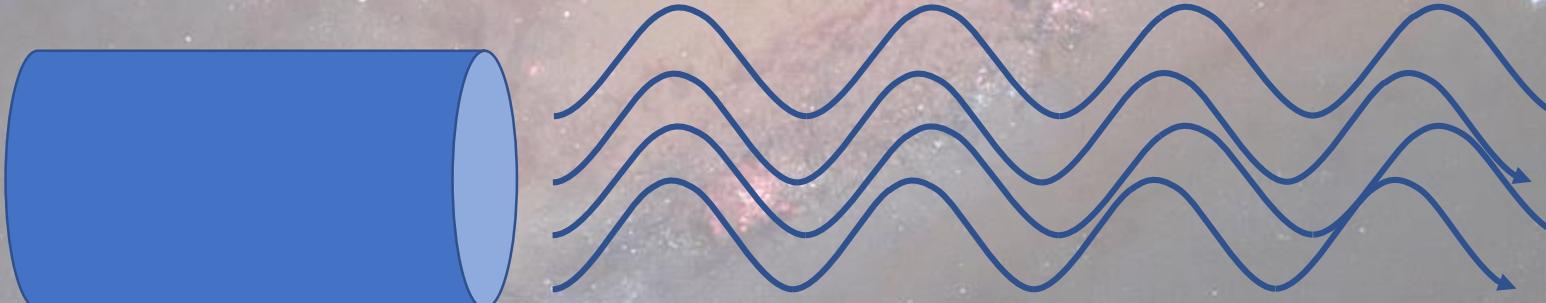


Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

- Hohe Intensität
- Monochromatisch und kohärent



Hohe Kohärenz



Geringe Kohärenz

Eigenschaften von L/(M)aser-Strahlung

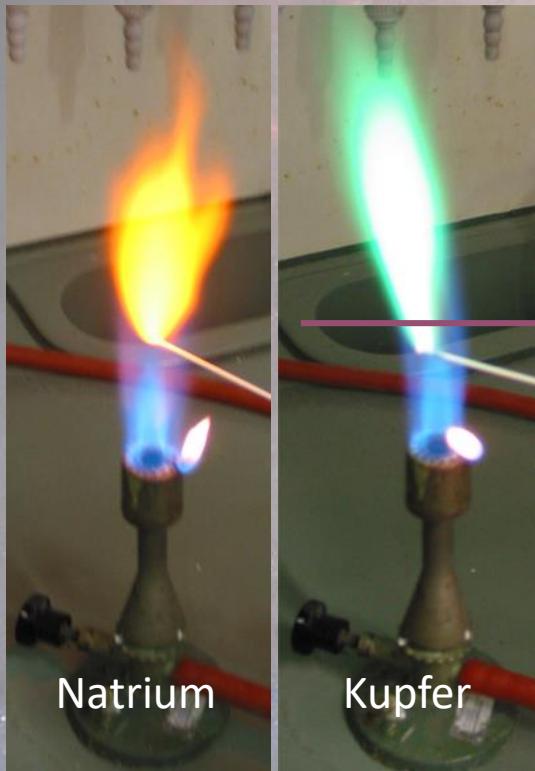
- Hohe Intensität
- Monochromatisch und kohärent
- Extrem gebündelt



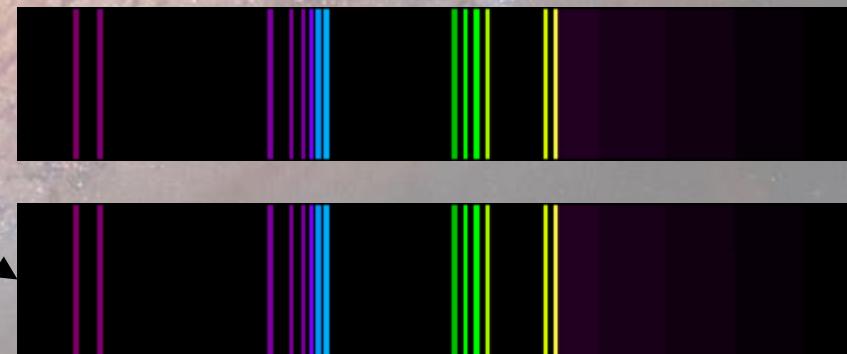


Absorption und Emission

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

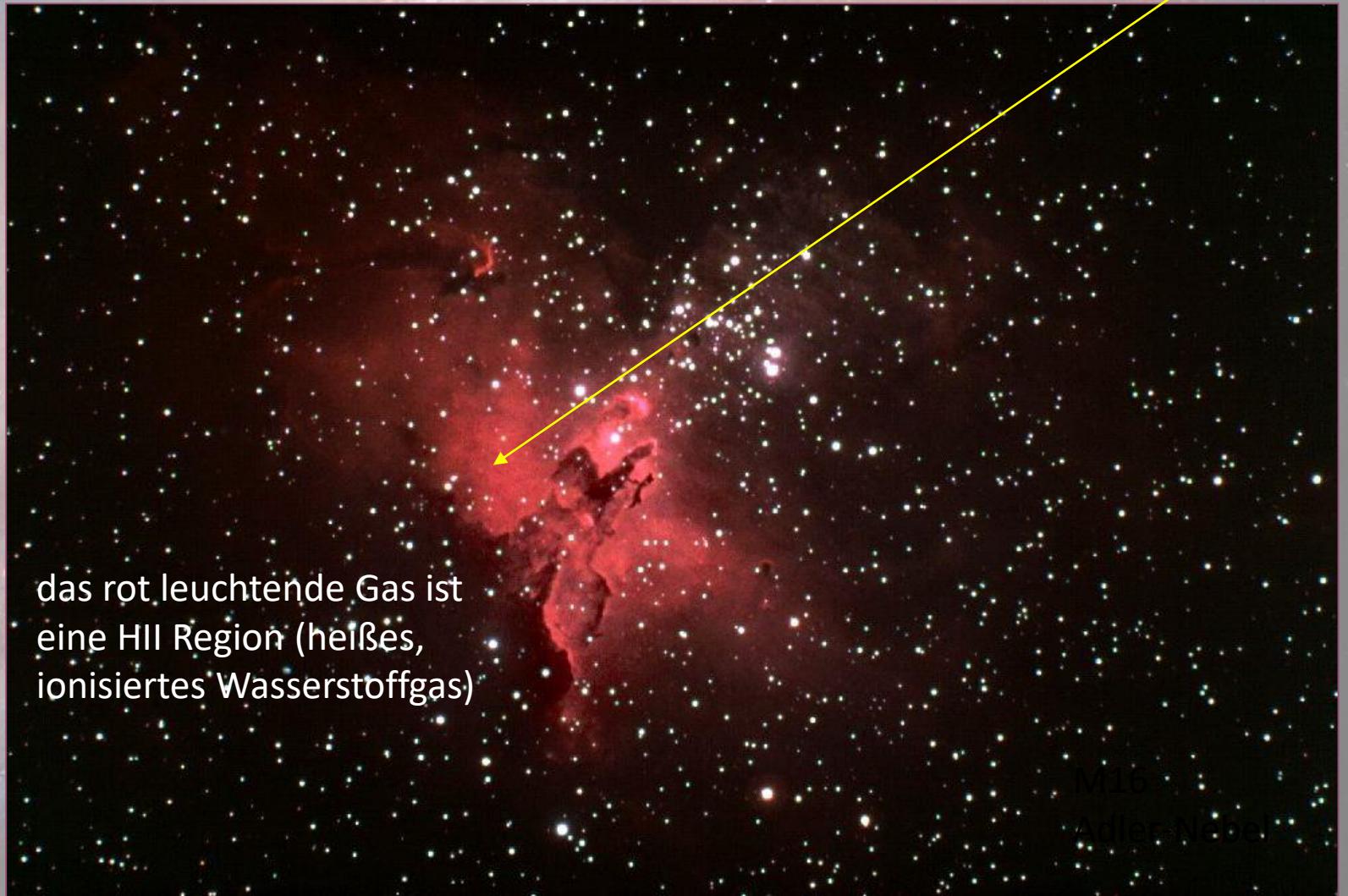


Jedes Element hat seinen ganz charakteristischen, spektralen Fingerabdruck.



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

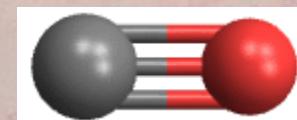
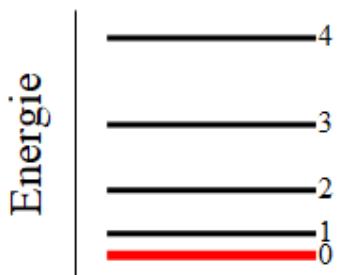
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



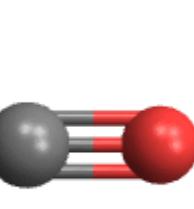
Quantenmechanik



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

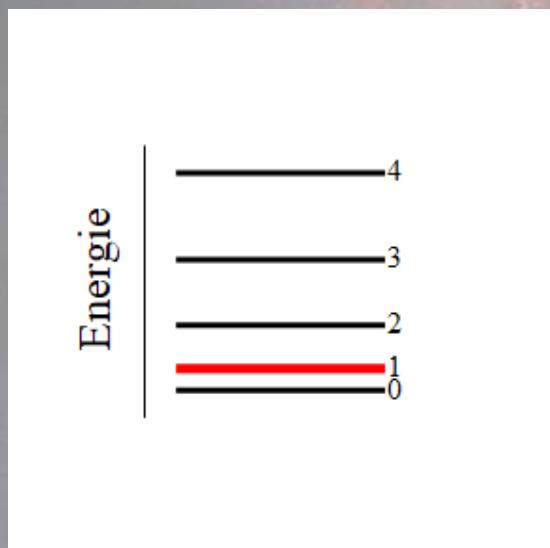
Energiezustand

z.B:



oder

Vibration



Quantenmechanik



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

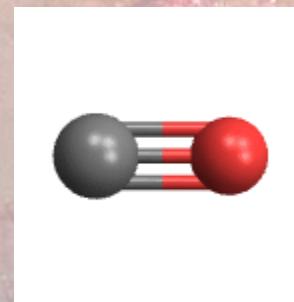
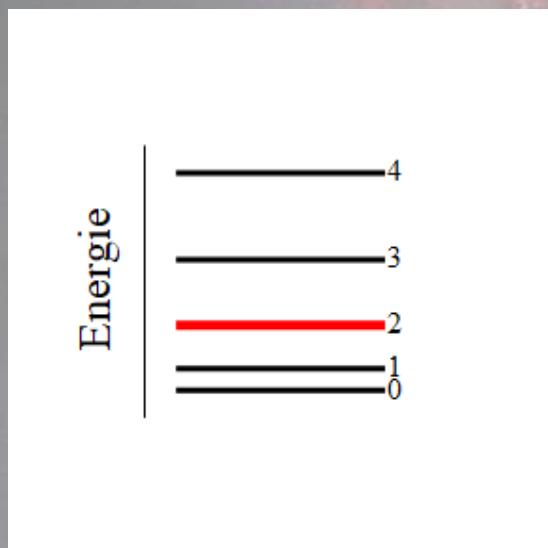
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



Quantenmechanik



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

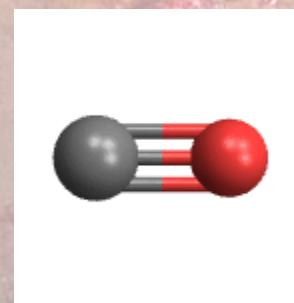
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

Vibration



Quantenmechanik



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

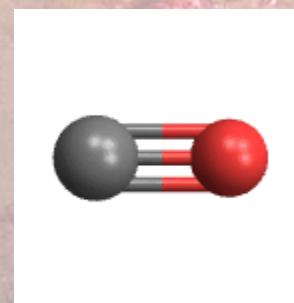
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

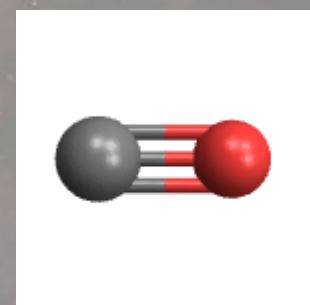
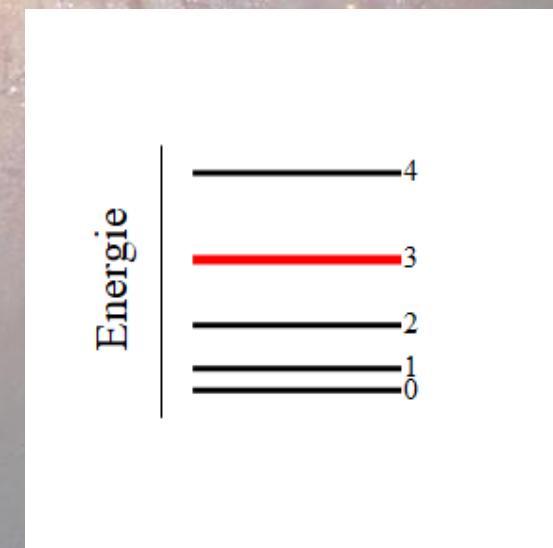
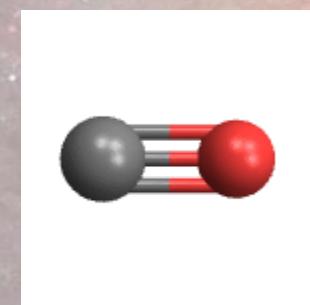
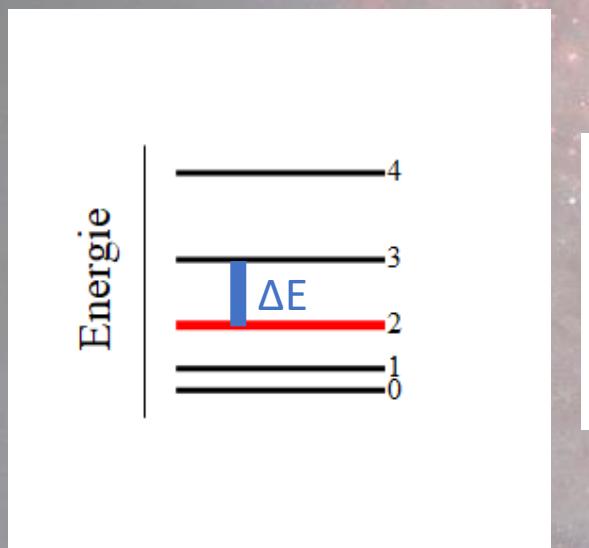
Vibration



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.

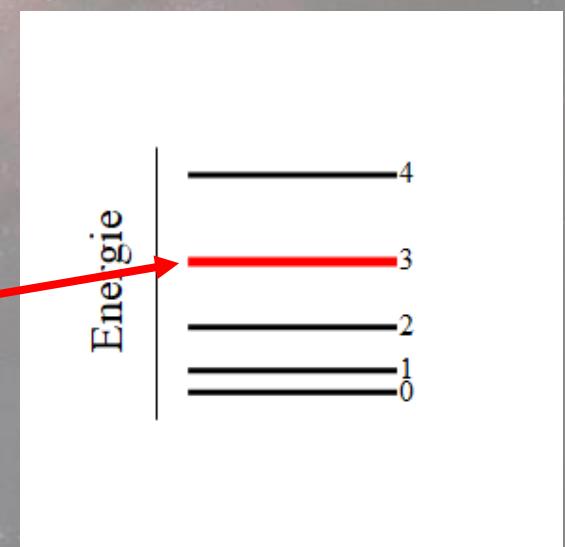
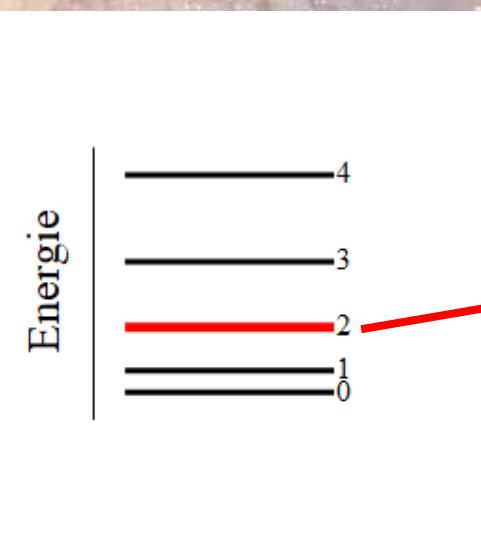
Niedrige Energie



Mittlere Energie



Hohe Energie



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



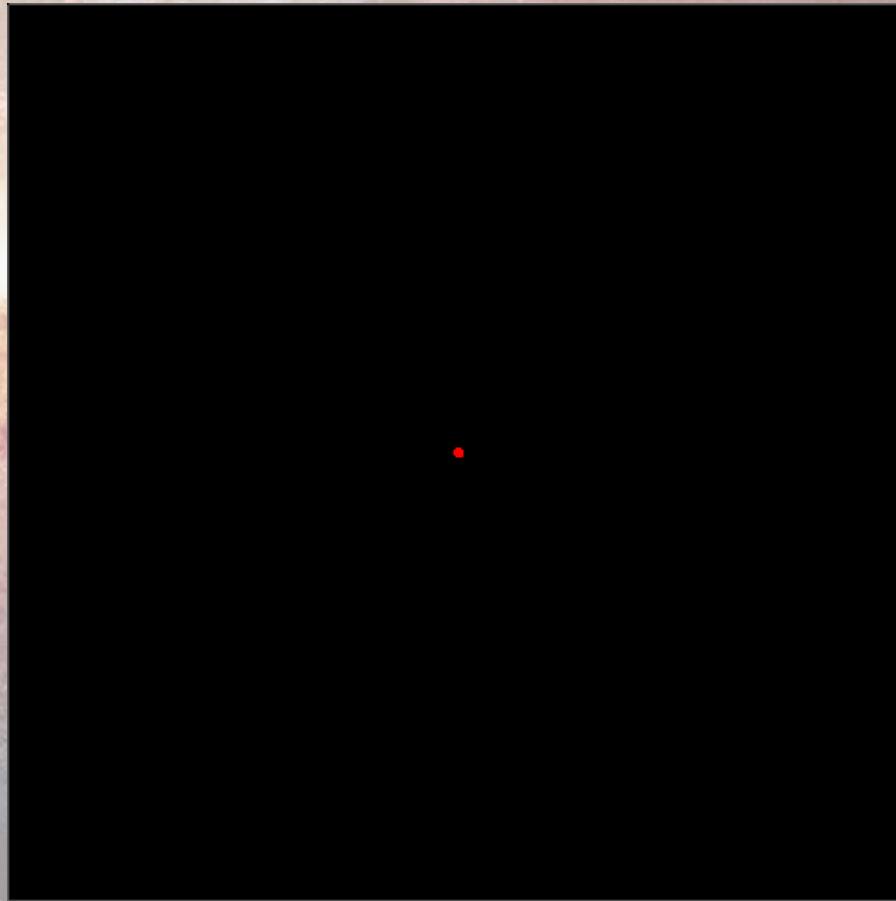
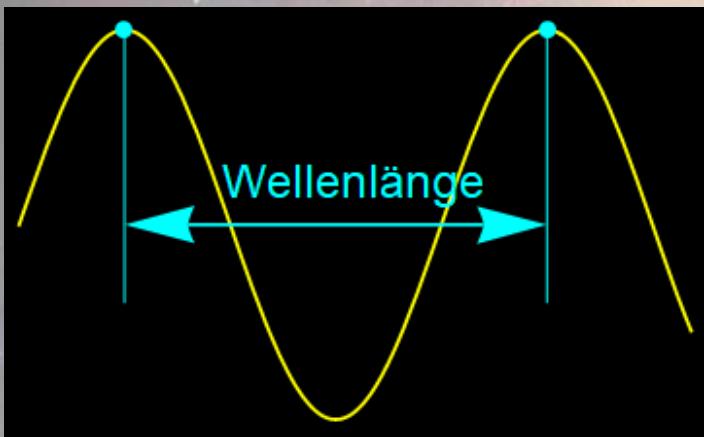
Das Medium ist **intransparent** für diese Wellenlänge

Hohe Energie

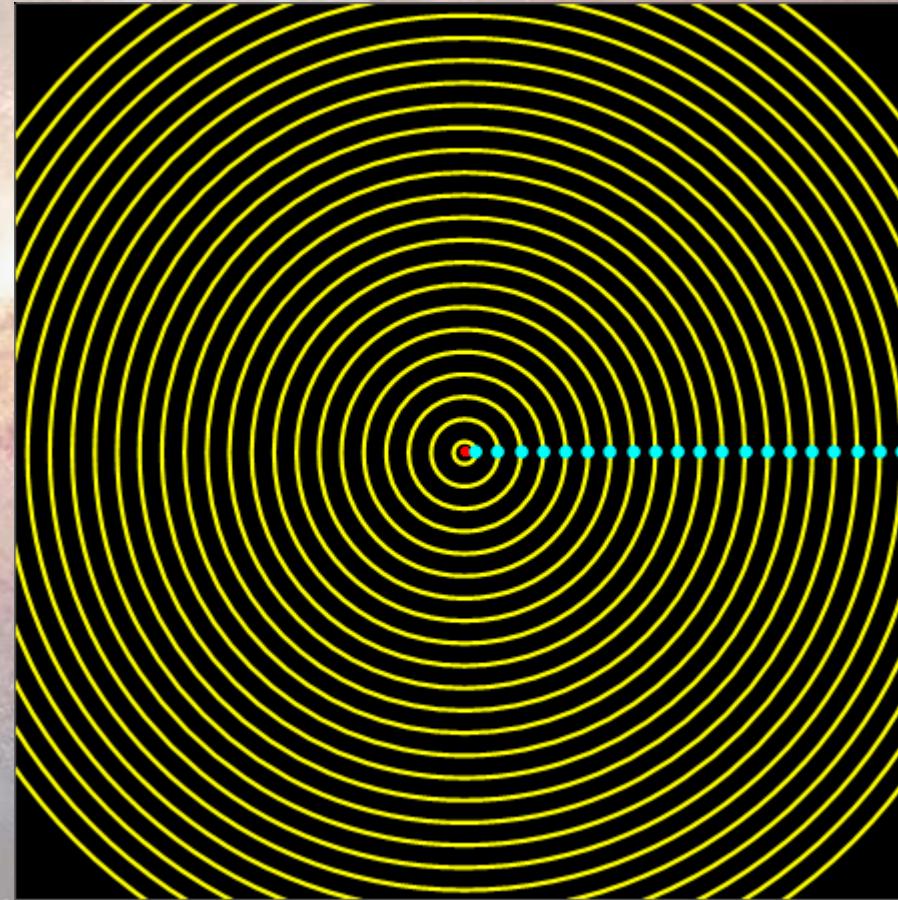
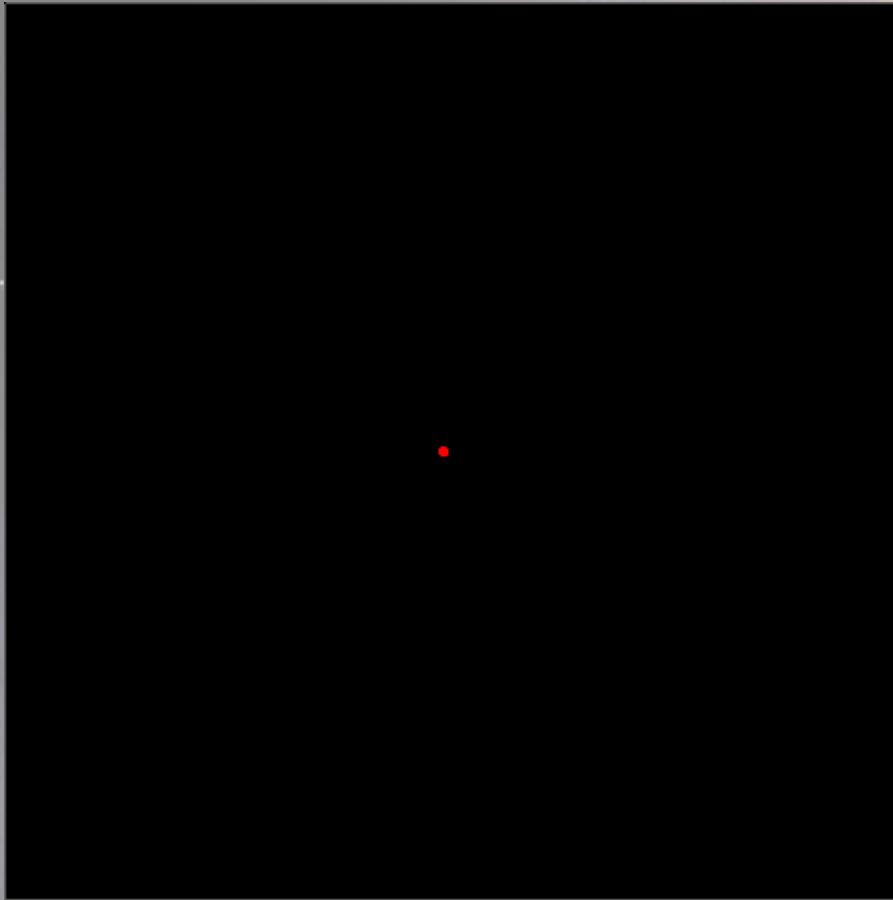


Das Medium ist **transparent** für diese Wellenlänge

Wellenlänge und der Dopplereffekt



Wellenlänge und der Dopplereffekt



Wellenlänge und der Dopplereffekt

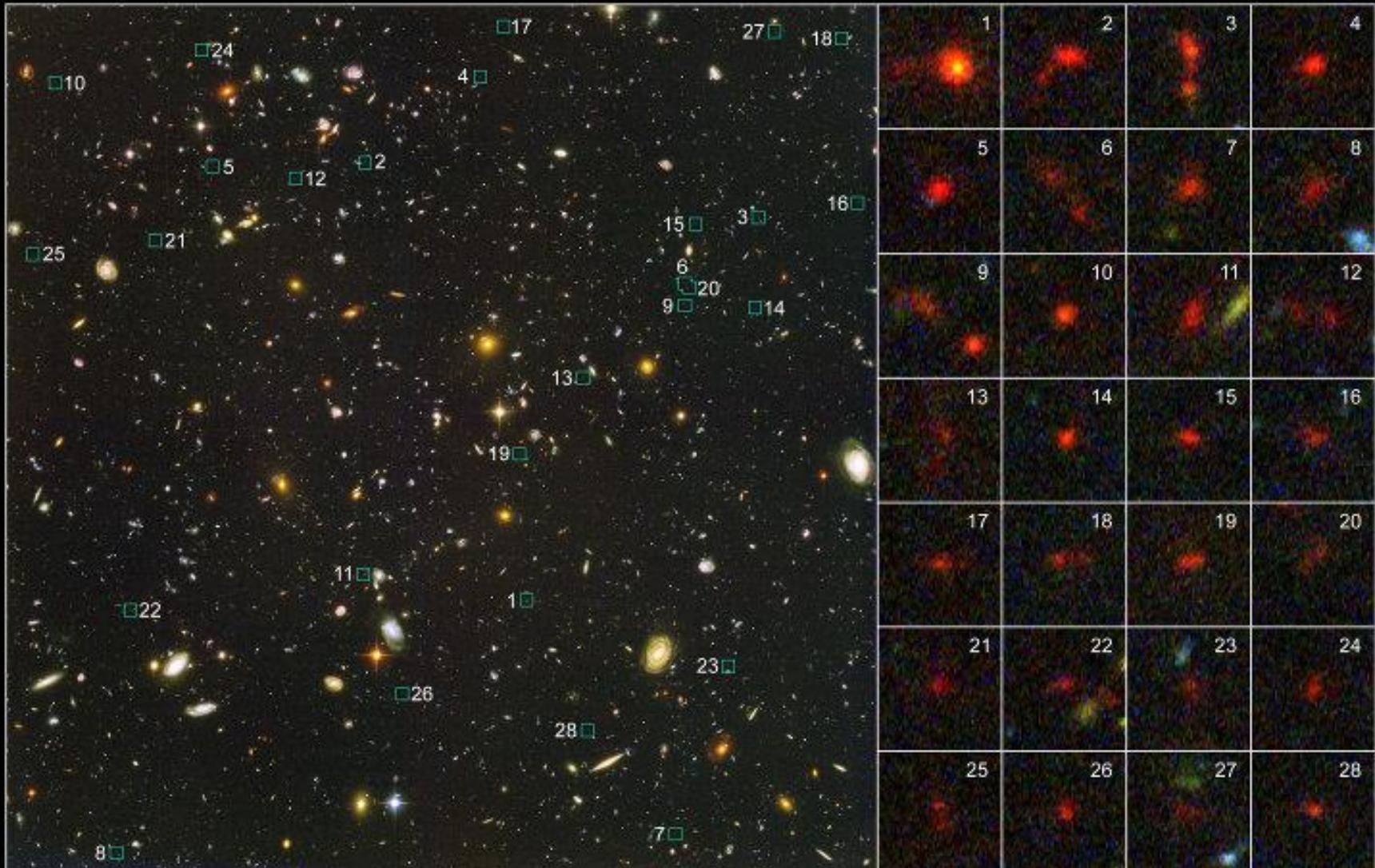
Der Dopplereffekt verschiebt die Wellenlänge einer Welle zu

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

„Rotverschiebung“

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

„Blauverschiebung“



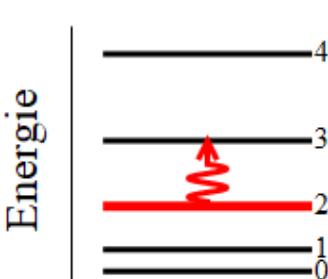
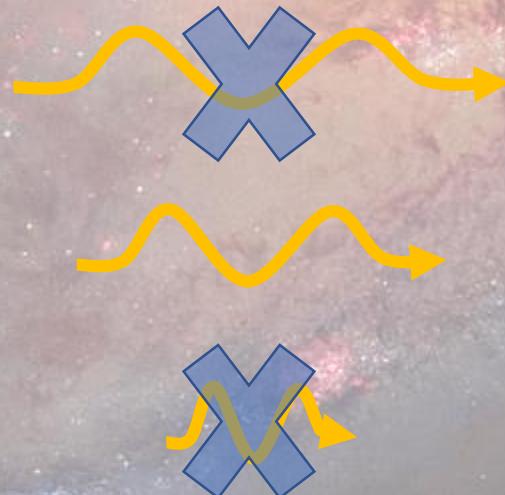
Distant Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

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

Was nicht passt ...

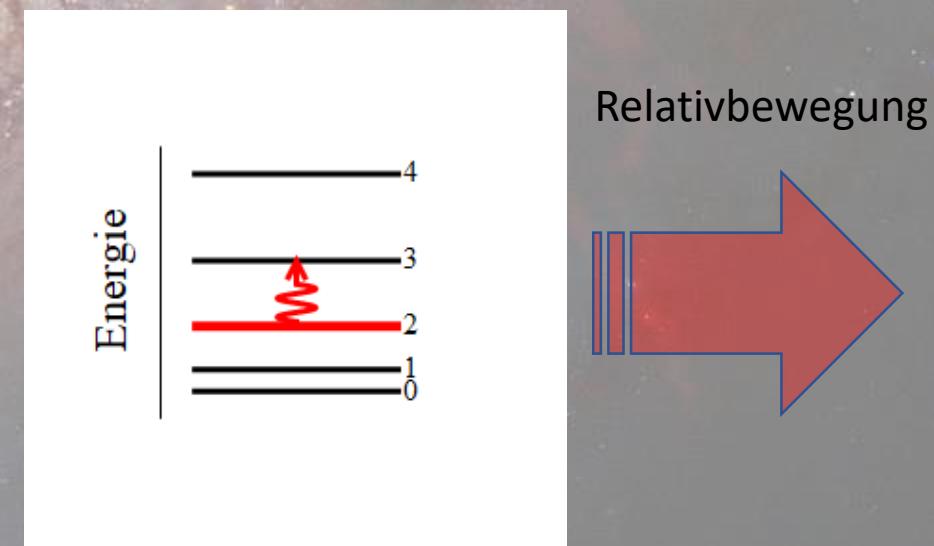
- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Moleköl sie nicht aufnehmen.
- Aber ...

Niedrige Energie



Was nicht passt wird passend gemacht!

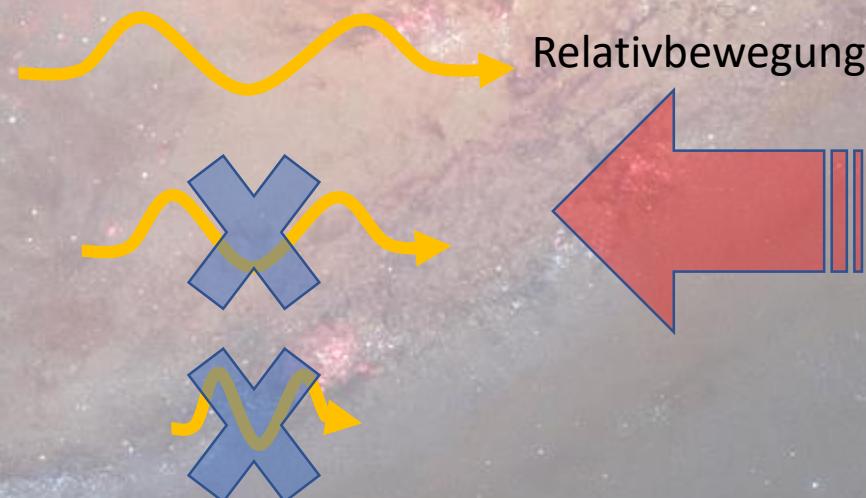
- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Moleköl sie nicht aufnehmen.
- Aber Dopplerverschiebung der Wellenlängen



Was nicht passt wird passend gemacht!

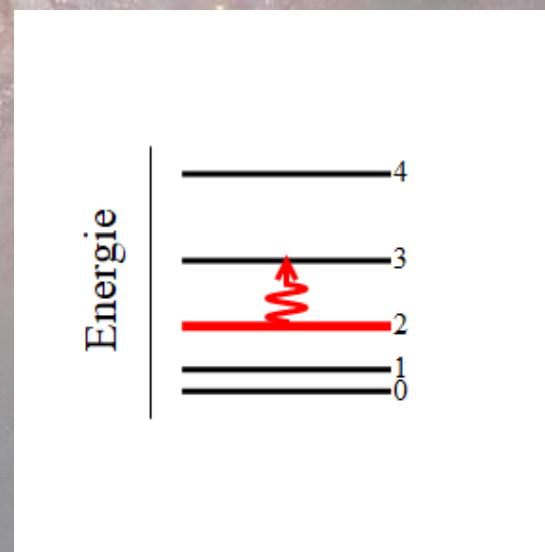
- Wenn die Strahlung nicht die passende Energie (also Frequenz oder Wellenlänge) hat, dann kann das Moleköl sie nicht aufnehmen.

Niedrige Energie



Mittlere Energie

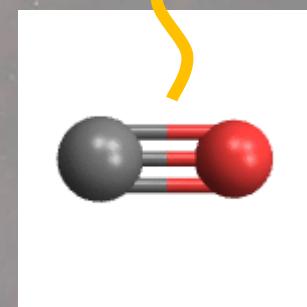
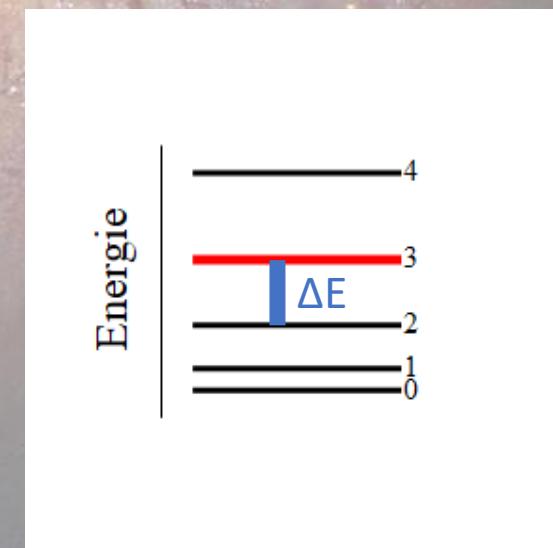
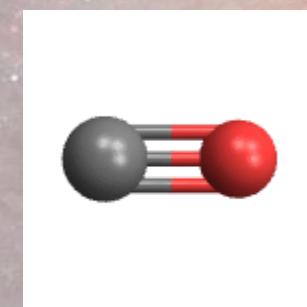
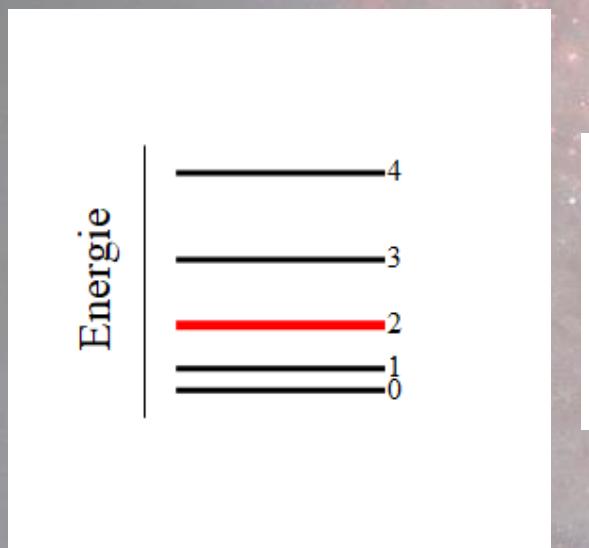
Hohe Energie



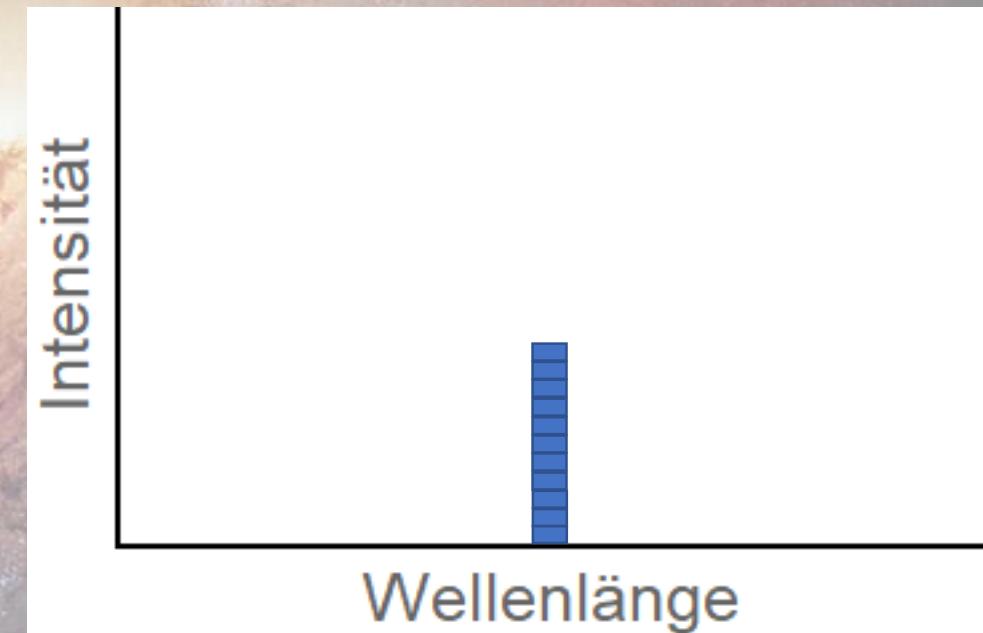
Quantenmechanik



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

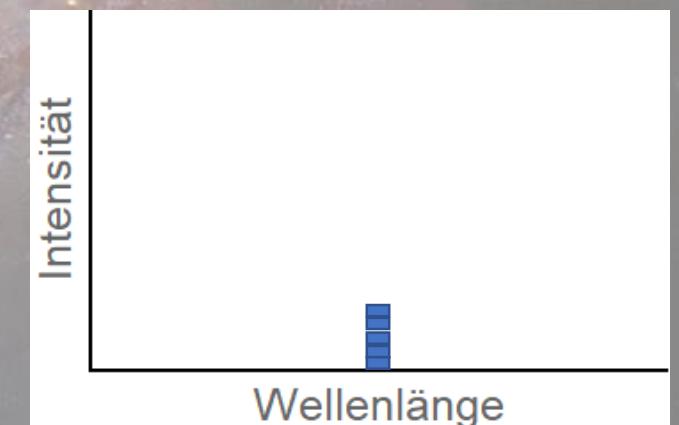
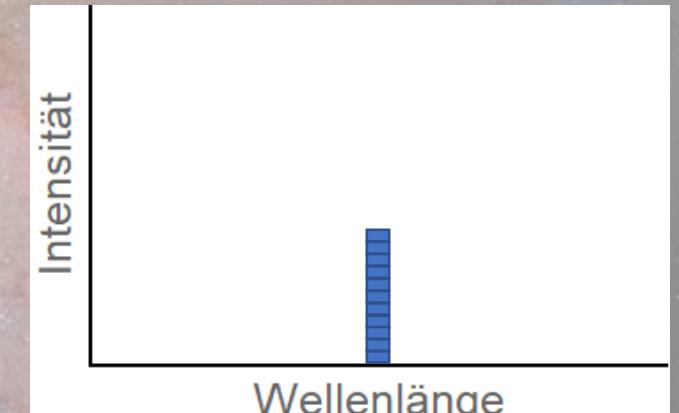
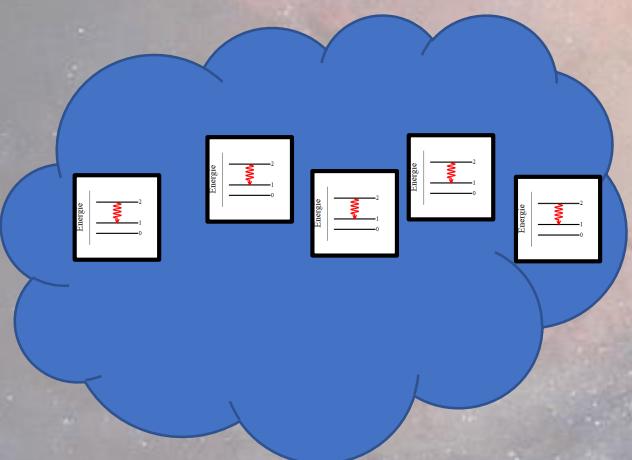
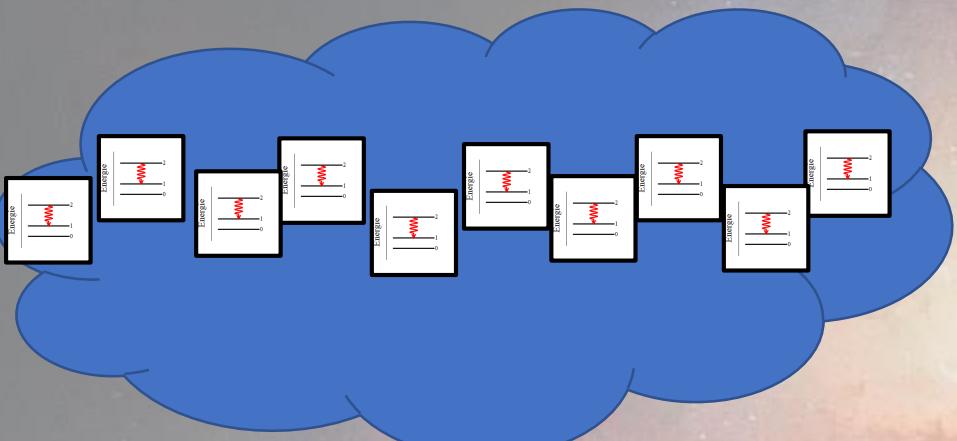


Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



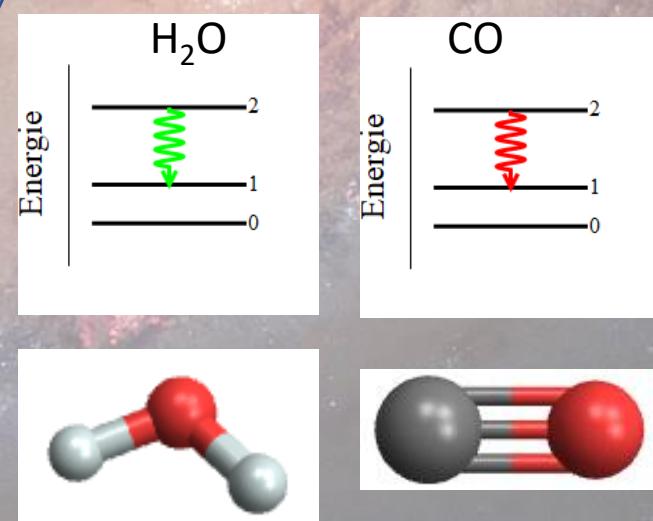
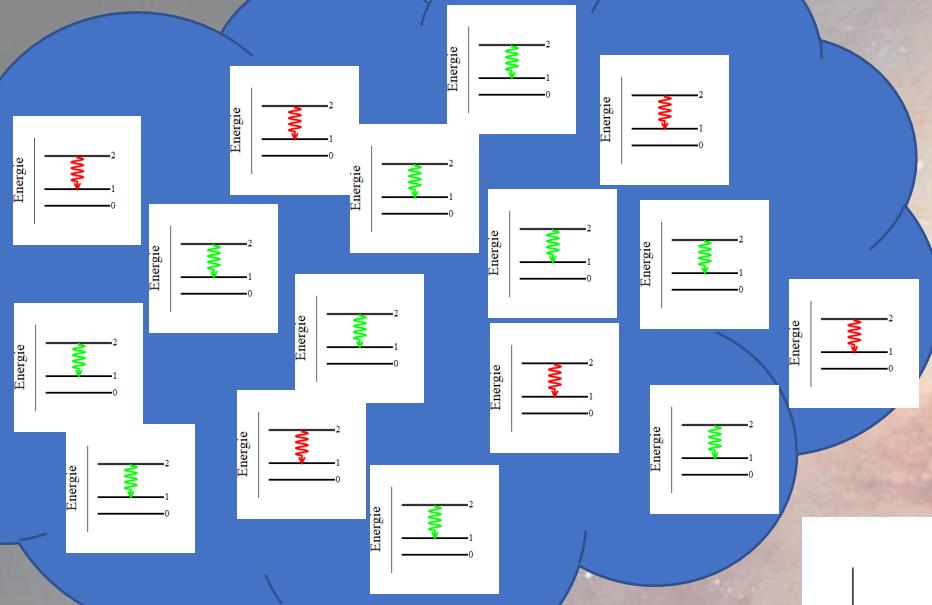
In einem Spektrum zählen wir im Prinzip die Zahl der Emissionen/Absorptionen.

Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

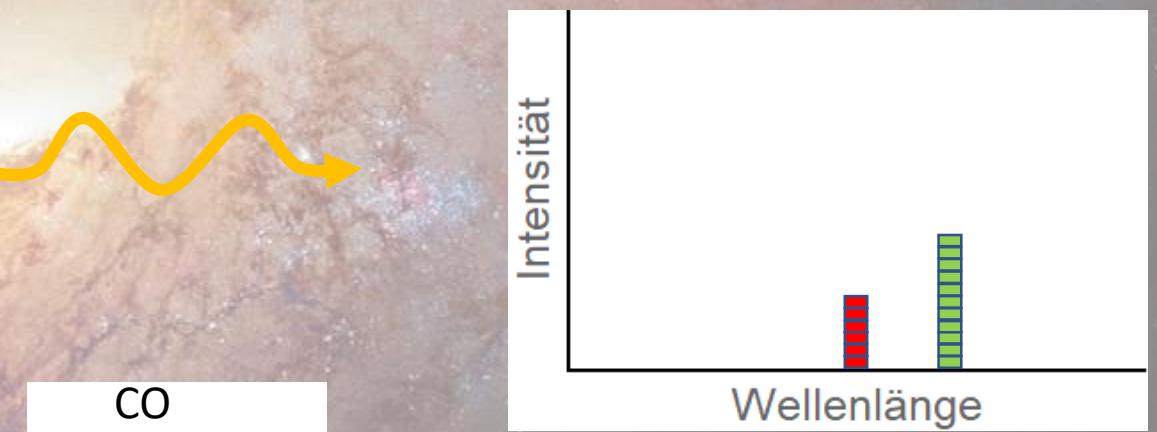


Die Intensität wird damit auch zu einem Maß für die Häufigkeit („Säulendichte“).

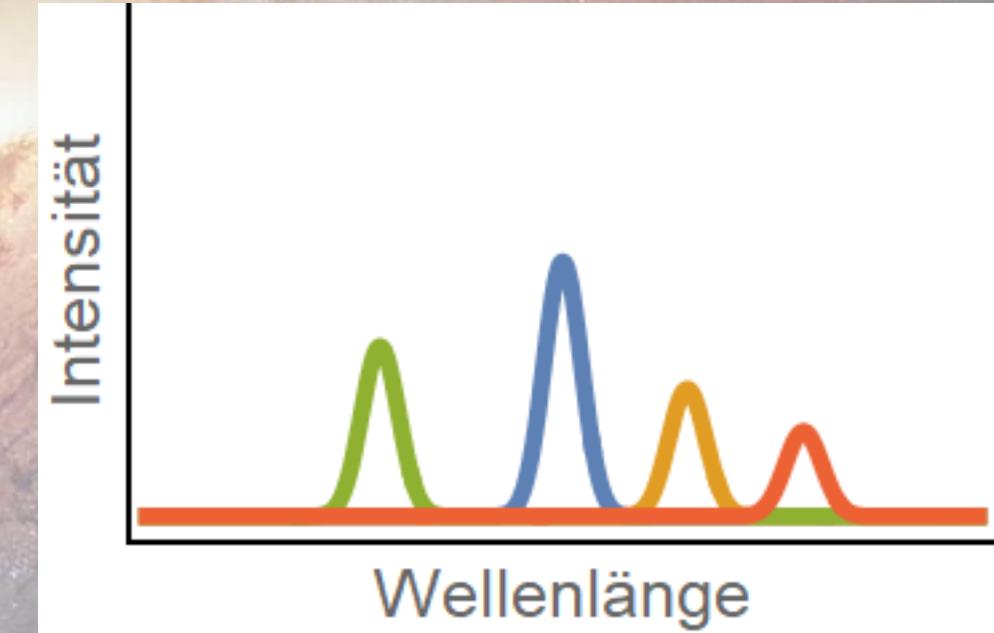
Viele Emissionen ergeben ein Spektrum



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

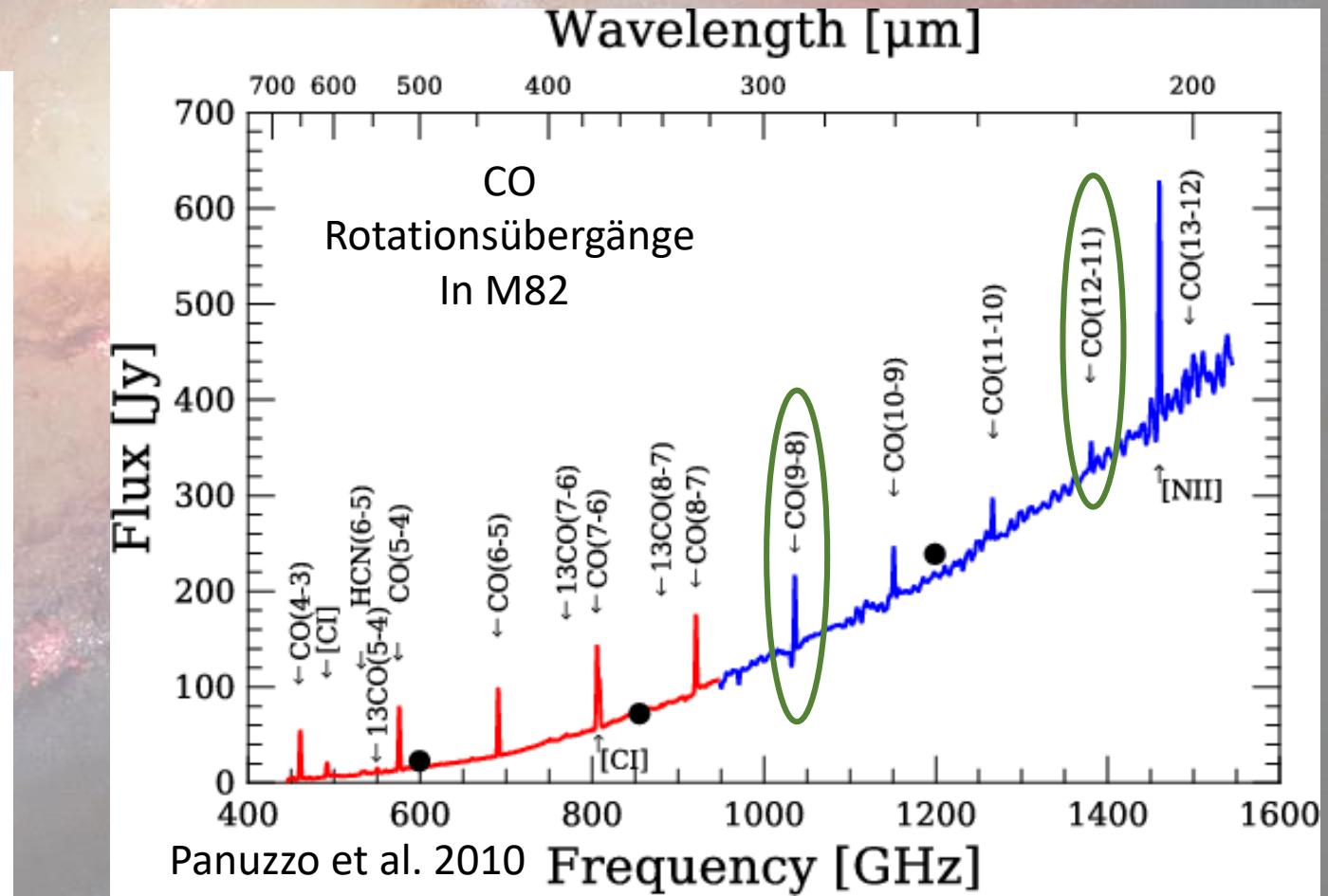
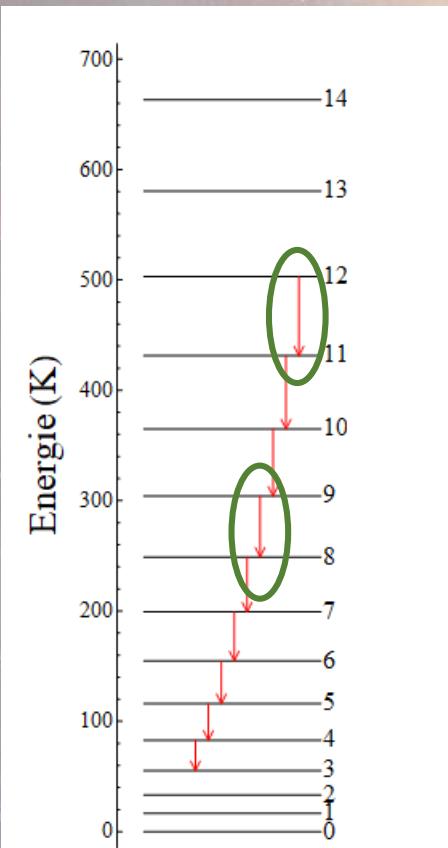


Viele Emissionen ergeben ein Spektrum

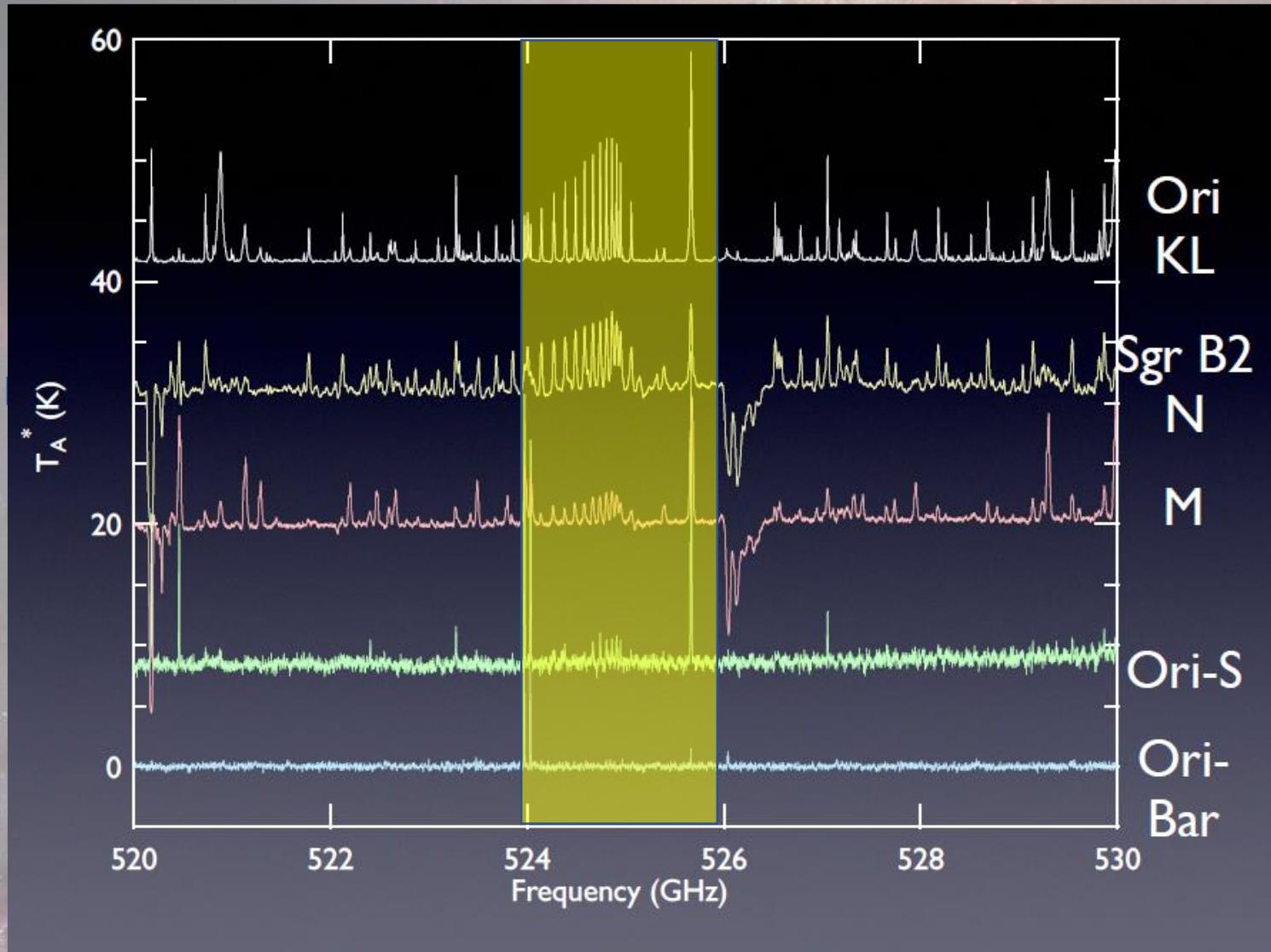


Spektroskopie in der Astronomie

- Damit lassen sich hervorragend Moleküle im Weltall identifizieren!

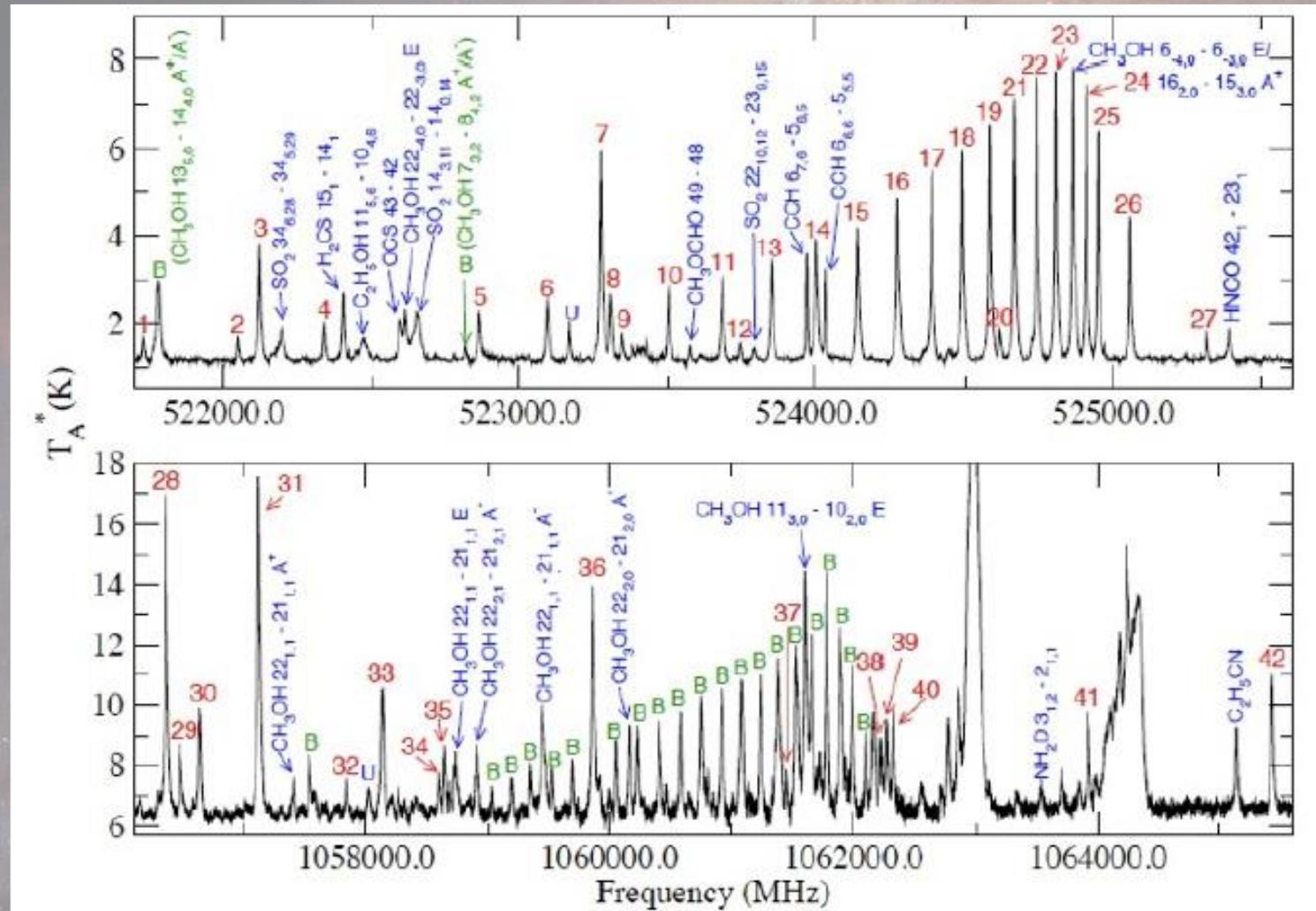


Beispiel: Sternentstehung in Orion



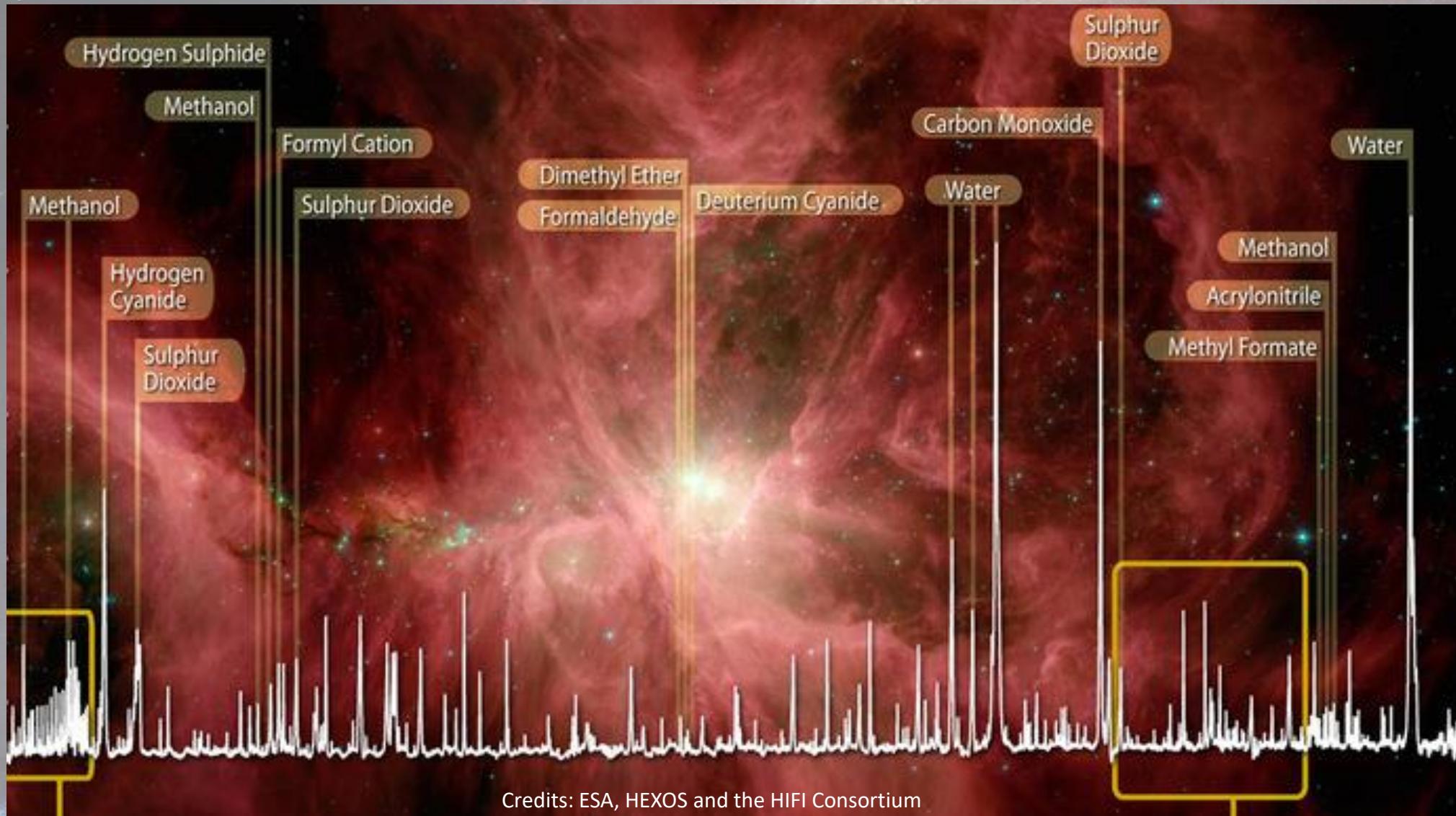
Source: E. Bergin
(Univ. of Michigan)

Beispiel: Sternentstehung in Orion



Wang et al. 2011

Beispiel: Sternentstehung in Orion

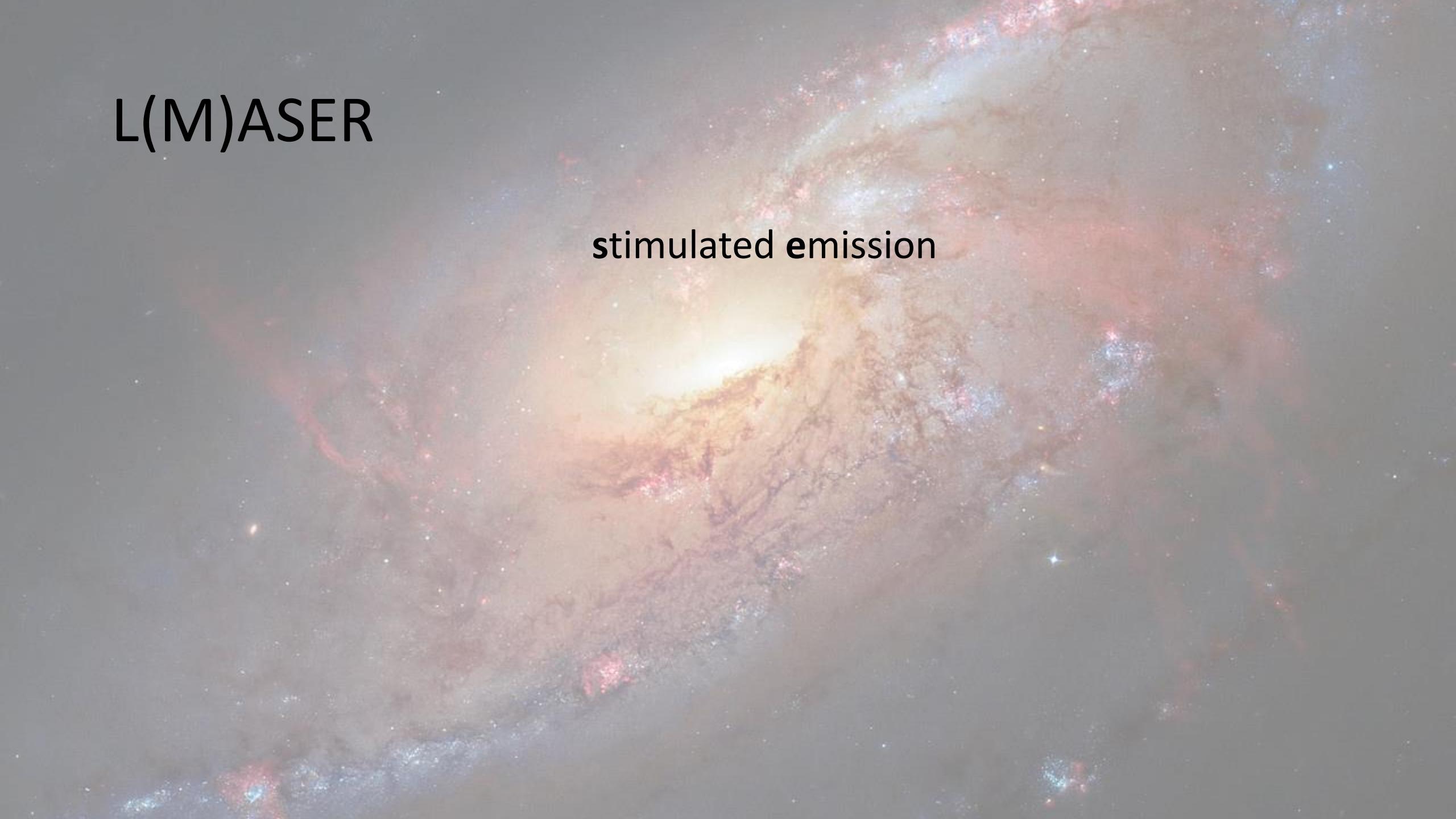


Kompliziert, kompliziert,...

- 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 Amplification through stimulated emission of radiation



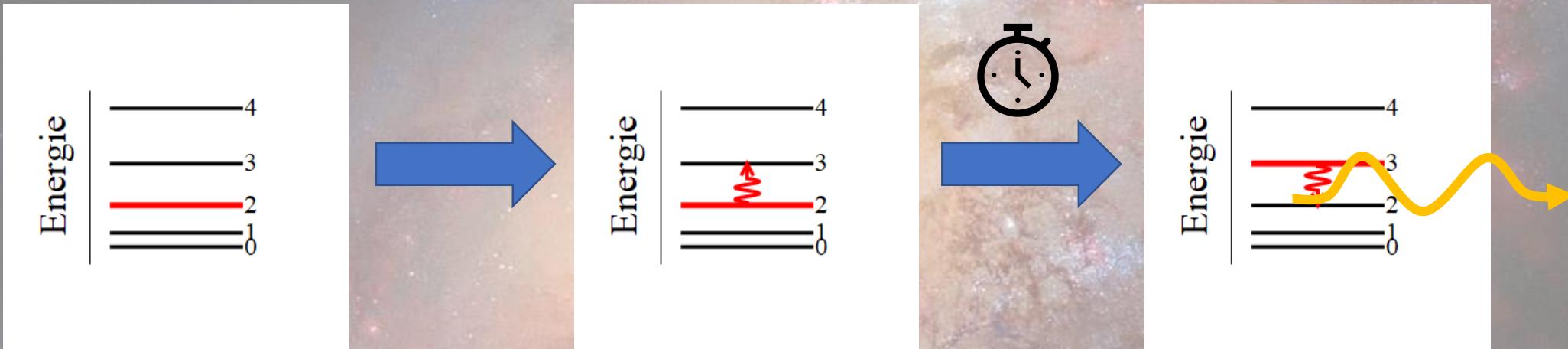
L(M)ASER

stimulated emission

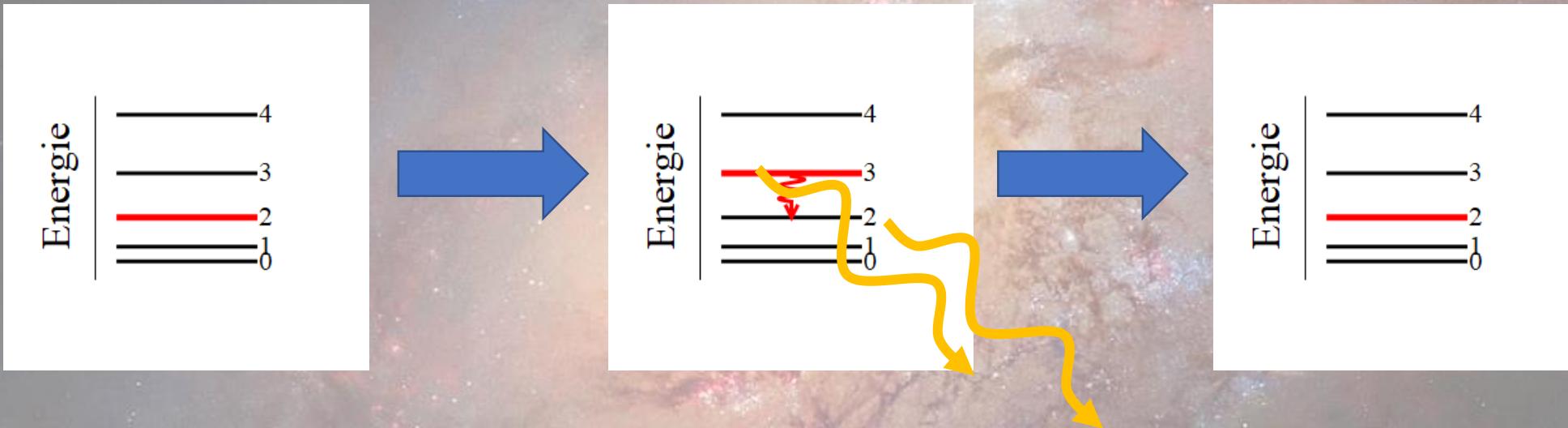
L(M)ASER

stimulierte Emission

Absorption, Emission, und ...



Stimulierte Emission

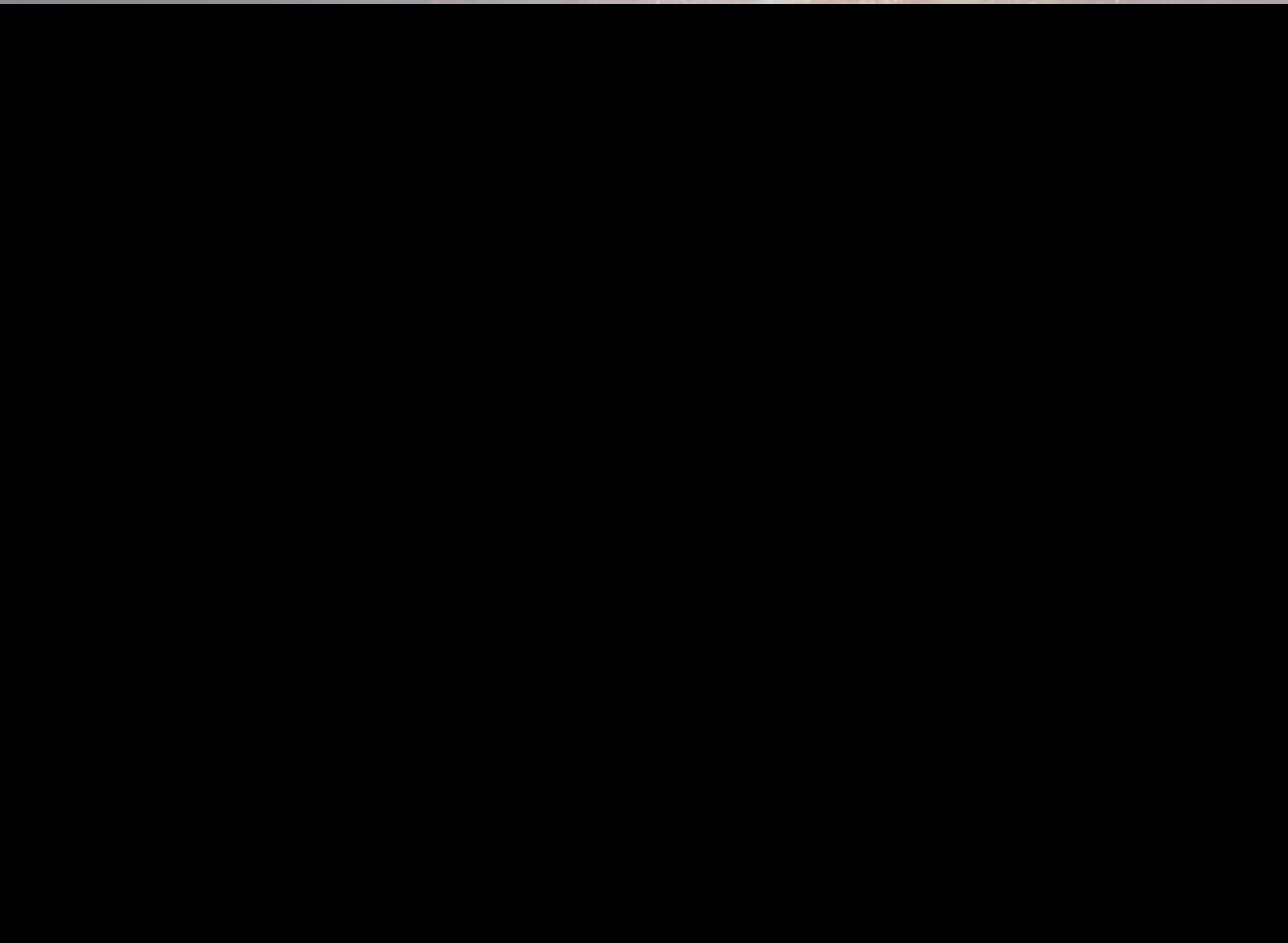


Der Unterschied?

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 **Besetzungsinvolution**.
- Dieser Zustand ist nur stabil wenn das Pumpen andauert.

Quantenmechanik



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

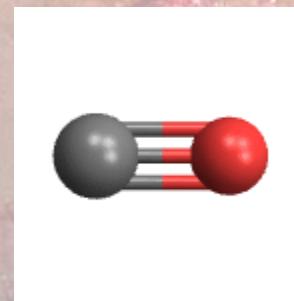
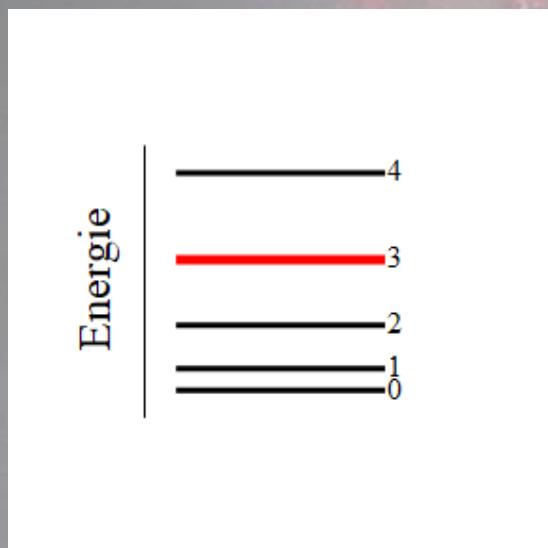
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

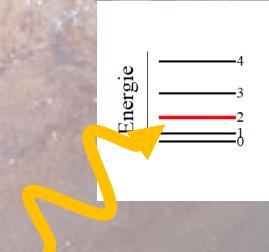
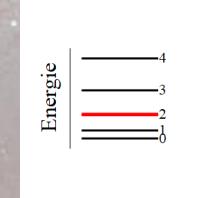
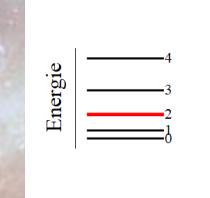
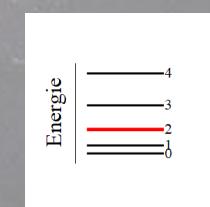
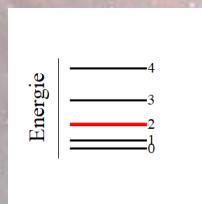
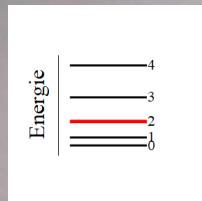
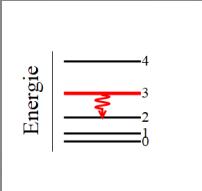
Vibration



„Mausefallen neu spannen“

=

Pumpen



Quantenmechanik



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

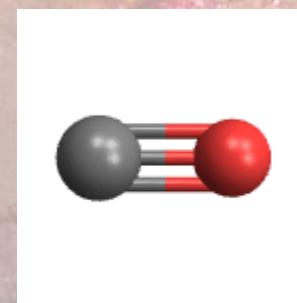
Energiezustand

z.B:

Rotation

oder

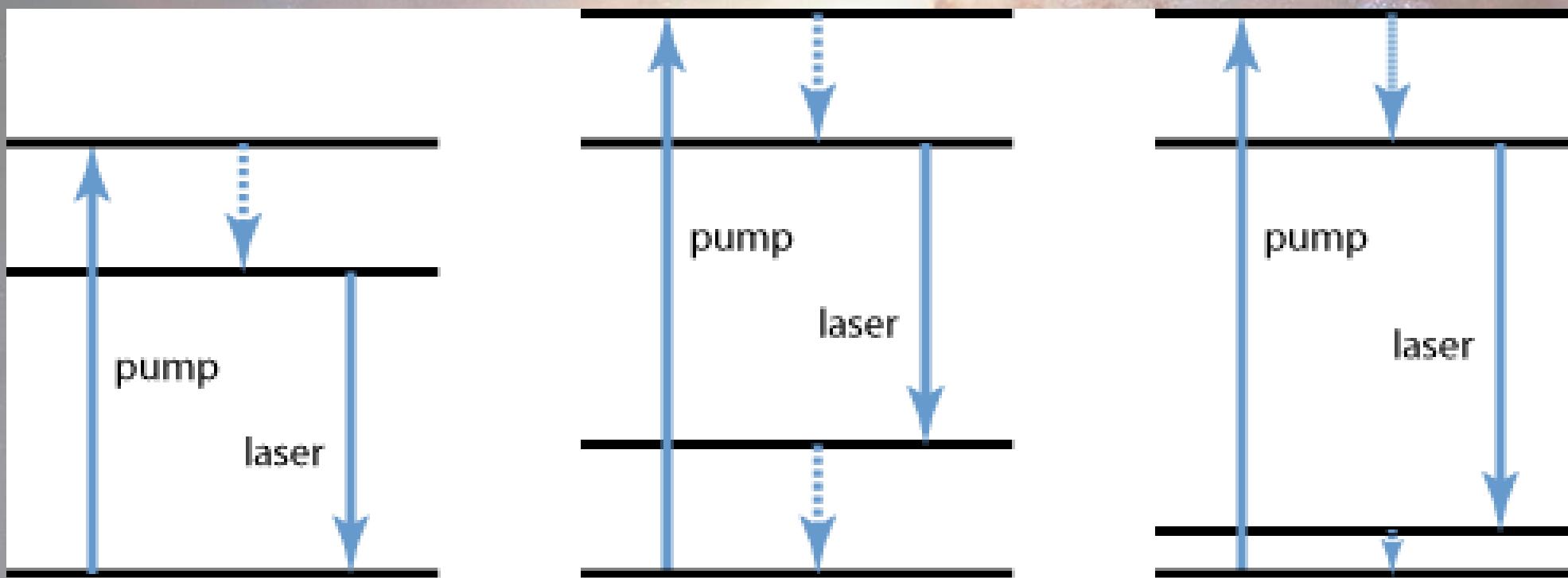
Vibration

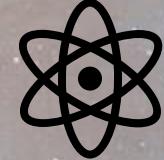


Quantenmechanik

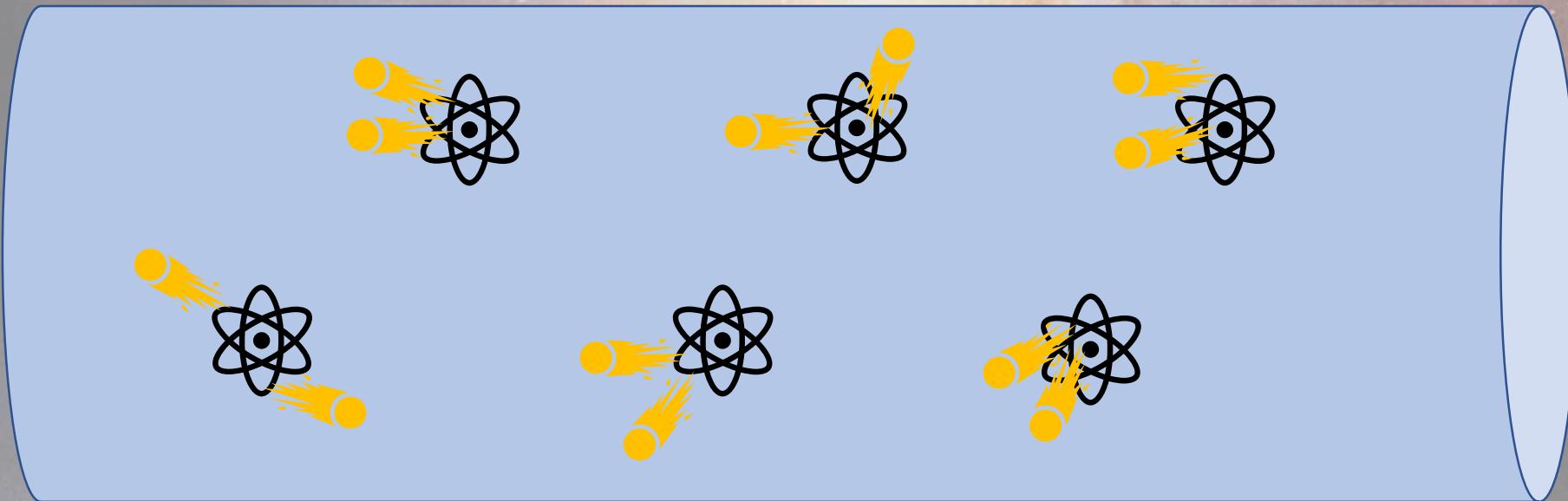


- Tatsächlich pumpt man über einen „Umweg“ über einen höheren Energiezustand





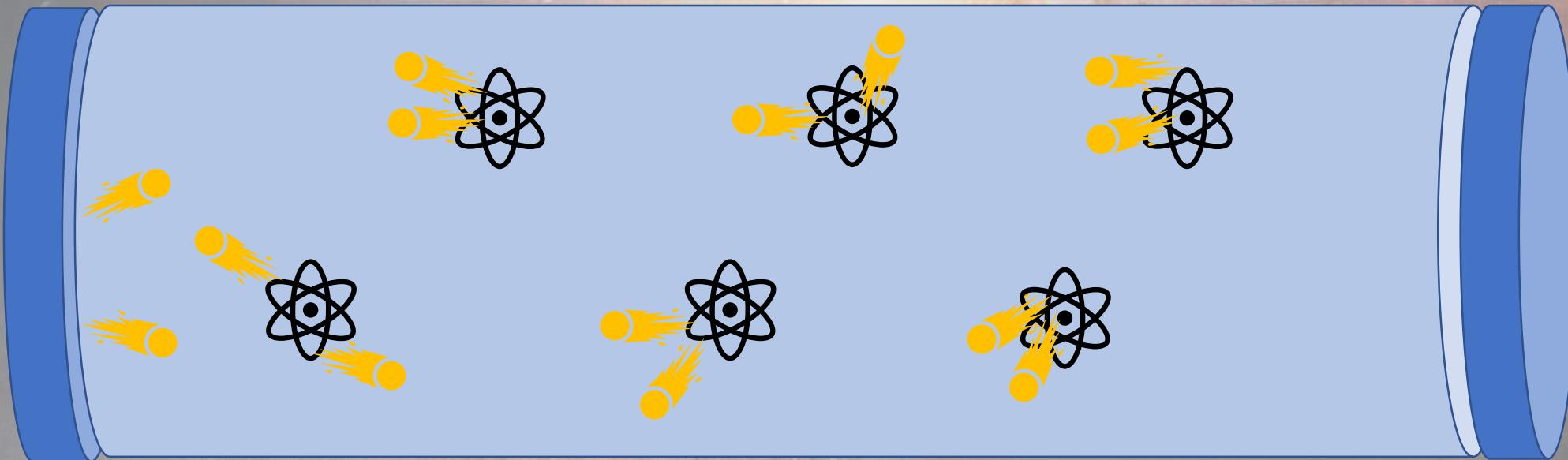
Wie baut man einen LASER?



Wie baut man einen LASER?

Spiegel

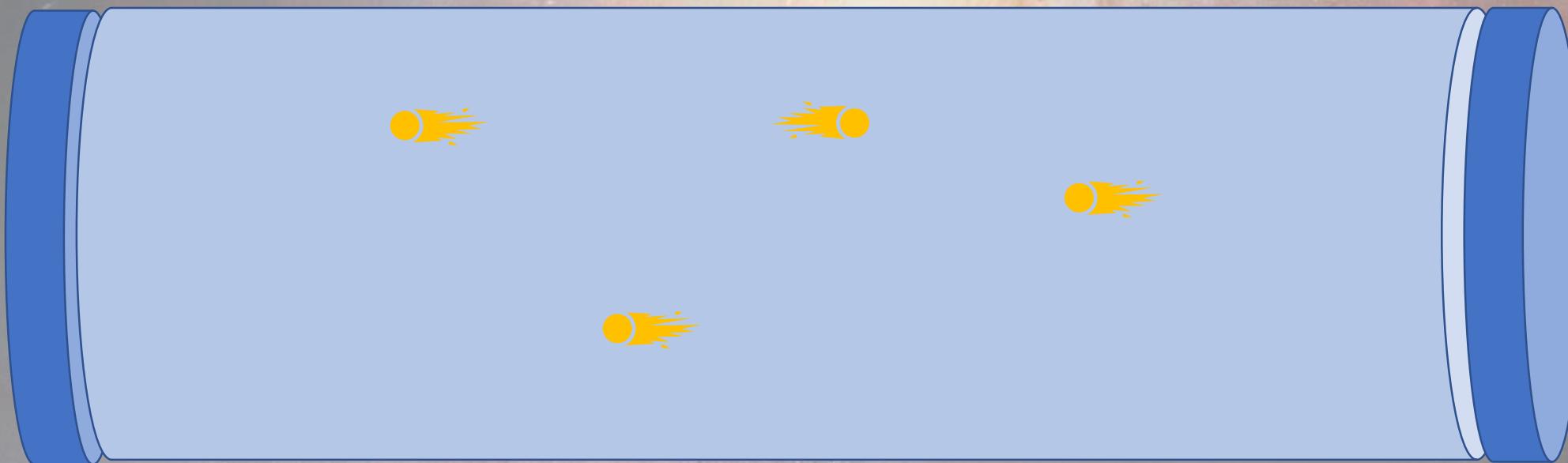
Spiegel



Wie baut man einen LASER?

Spiegel

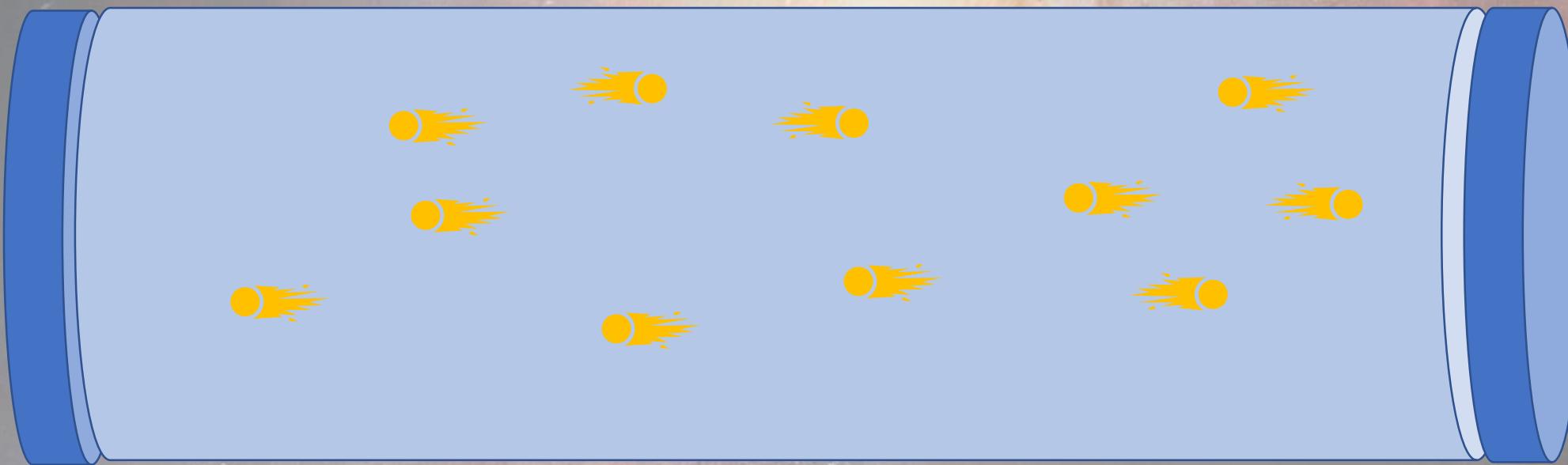
Spiegel



Wie baut man einen LASER?

Spiegel

Spiegel



Wie baut man einen LASER?

Spiegel



Teildurchlässiger
Spiegel

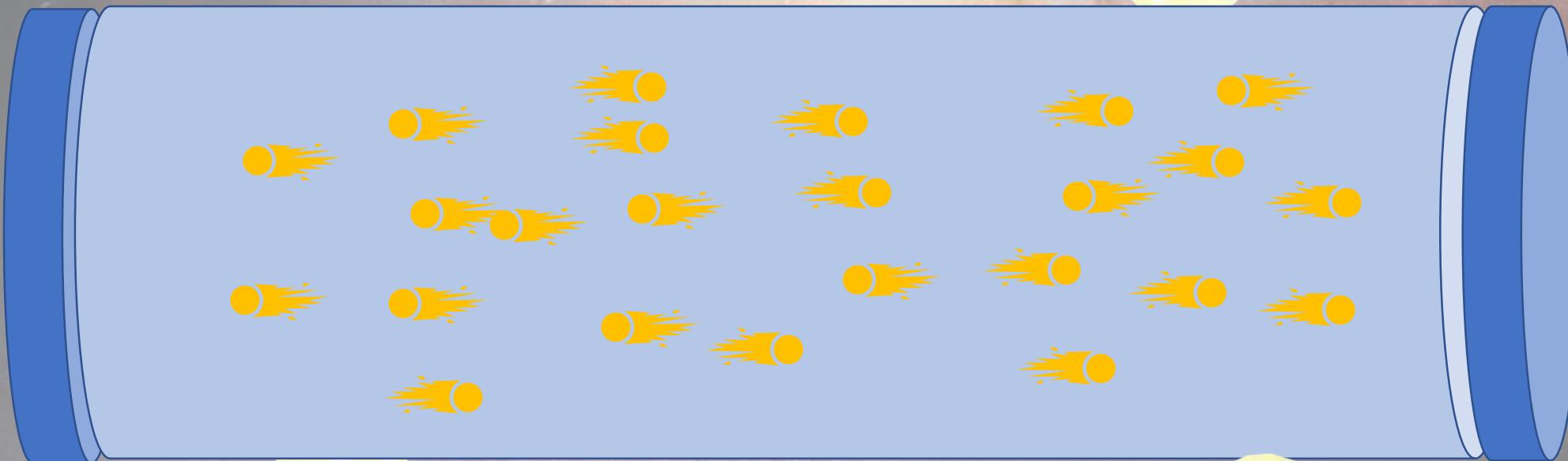




Foto: R. Wengenmayr, Physik in unserer Zeit

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 interstellaren 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 ₂ O	N ₂ O	NH ₃	HC ₃ N
CN	NH	HCO ⁺	MgCN	H ₂ CO	HCOOH
CH ⁺	SiN	HCN	H ₃ ⁺	HNCO	CH ₂ NH
OH	SO ⁺	OCS	SICN	H ₂ CS	NH ₂ CN
CO	CO ⁺	HNC	AINC	C ₂ H ₂	H ₂ CCO
H ₂	HF	H ₂ S	SINC	C ₃ N	C ₄ H
SiO	N ₂	N ₂ H ⁺	HCP	HNCS	SiH ₄
CS	CF ⁺	C ₂ H	CCP	HOCO ⁺	c-C ₃ H ₂
SO	PO	SO ₂	AlOH	C ₃ O	CH ₂ CN
SiS	O ₂	HCO	H ₂ O ⁺	I-C ₃ H	C ₅
NS	AlO	HNO	H ₂ Cl ⁺	HCNH ⁺	SiC ₄
C ₂	CN ⁻	HCS ⁺	KCN	H ₃ O ⁺	H ₂ CCC
NO	OH ⁺	HOC ⁺	FeCN	C ₃ S	H ₂ C ₄
HCl	SH ⁺	SiC ₂	HO ₂	c-C ₃ H	HCCNC
NaCl	HCl ⁺	C ₂ S	TiO ₂	HC ₂ N	HNCC
AlCl	SH	C ₃	CCN	H ₂ CN	H ₂ COH ⁺
KCl	TiO	CO ₂	SICSi	SiC ₃	C ₄ H ⁻
AlF	ArH ⁺	CH ₂	S ₂ H	CH ₃	CNCHO
PN	NS ⁺	C ₂ O	HCS	C ₃ N ⁻	HNCNH
SiC	MgNC	HSC	PH ₃	CH ₃ O	SiH ₃ CN
	NH ₂	NCO	HCNO	NH ₃ D ⁺	
	NaCN		HOCH ₃	H ₂ NCO ⁺	
			HSCN	NCCNH ⁺	
			HOOH	CH ₃ Cl	
			I-C ₃ H ⁺		
			HMgNC		
			HCCO		
			CNCN		

Table 3

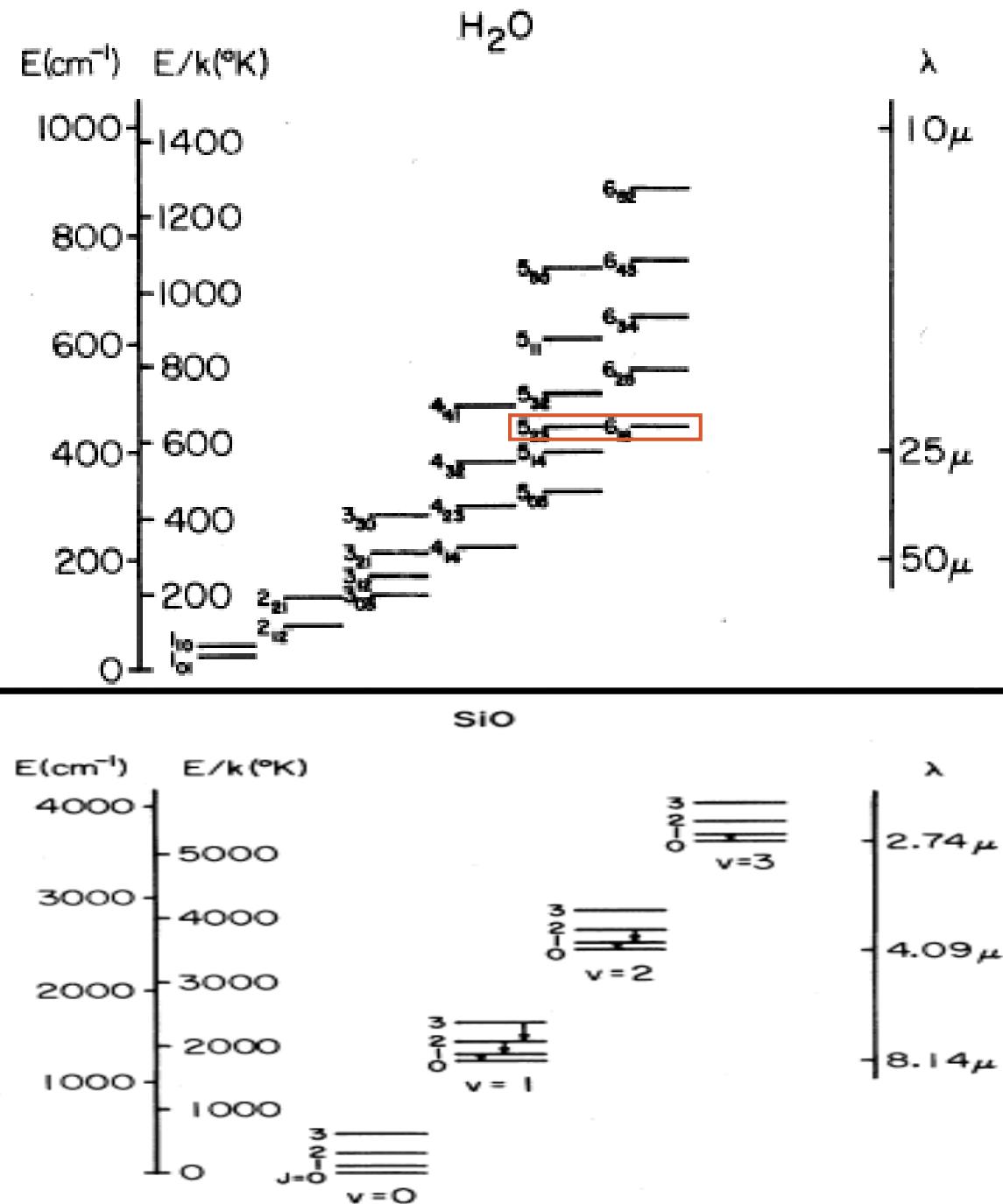
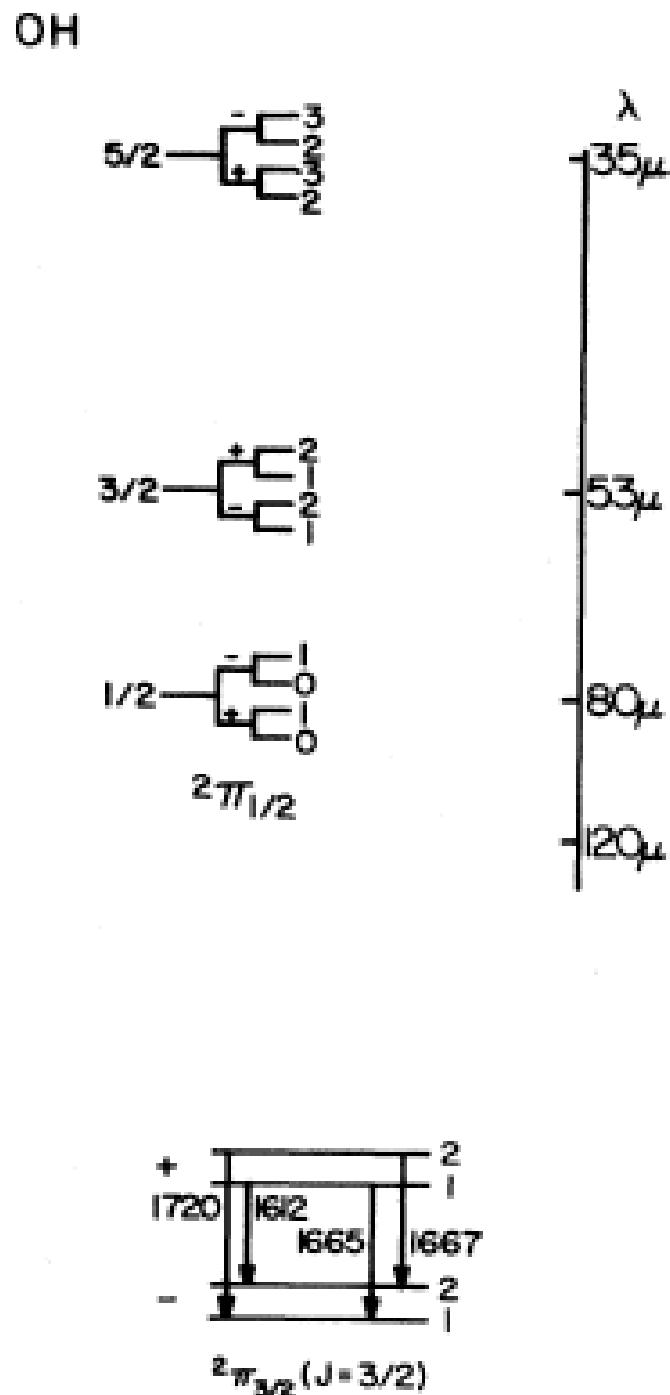
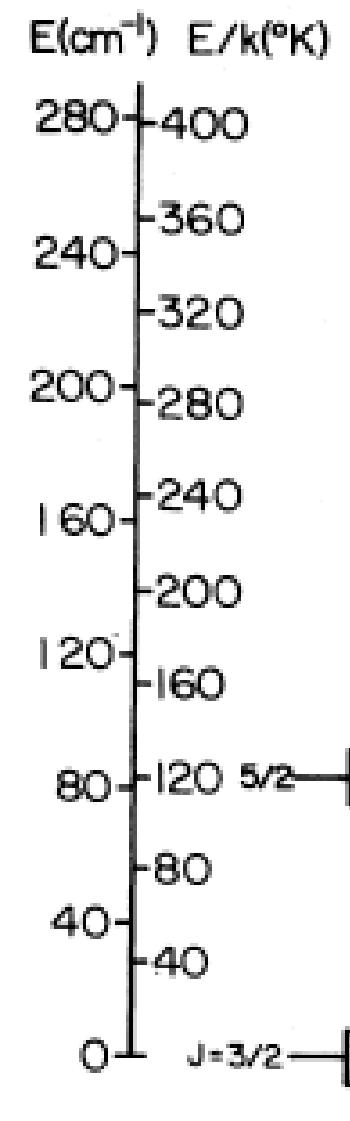
List of Detected Interstellar Molecules with Eight or More Atoms, Categorized by Number of Atoms, and Vertically Ordered by Detection Year

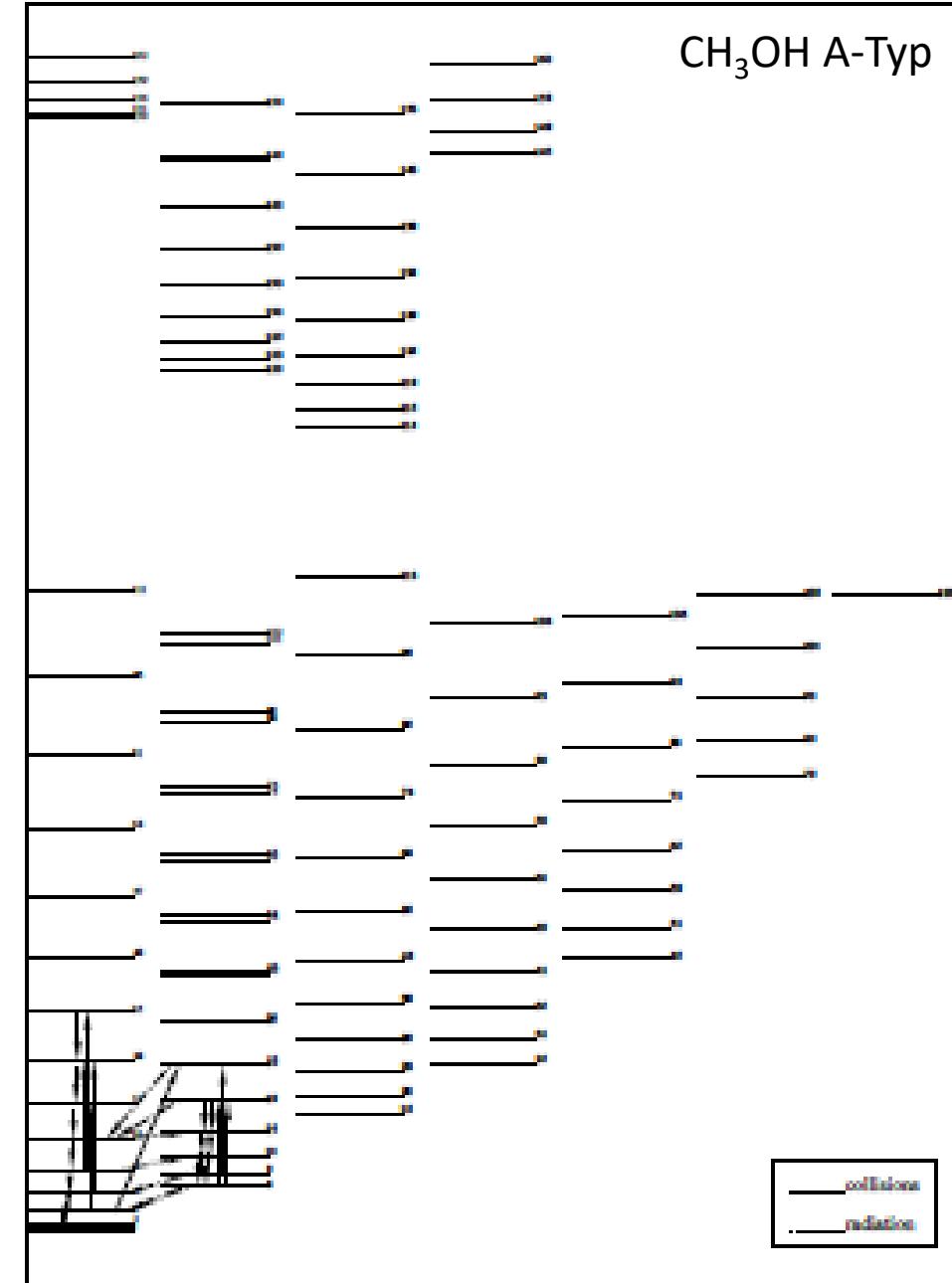
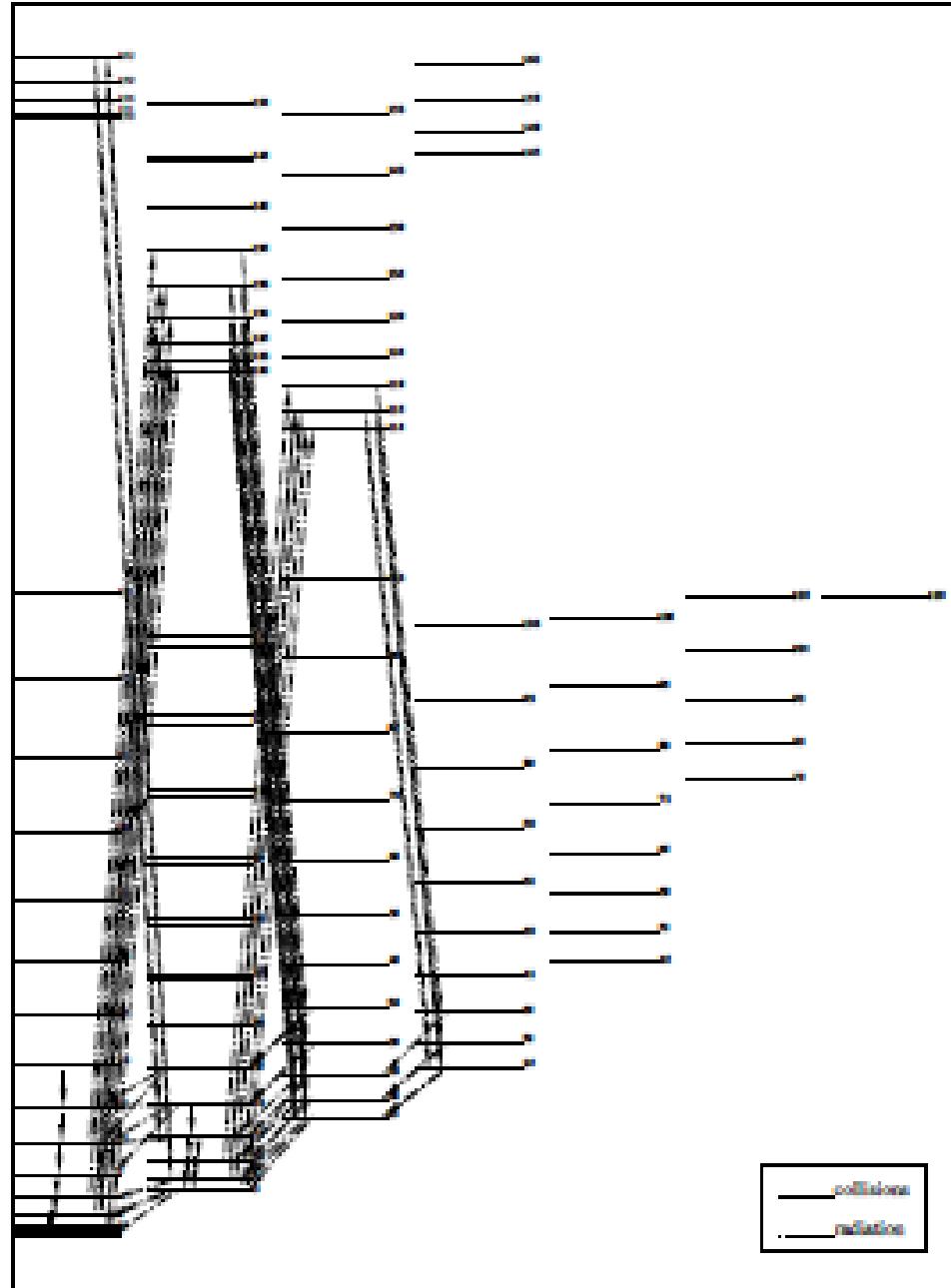
8 Atoms	9 Atoms	10 Atoms	11 Atoms	12 Atoms	13 Atoms	Fullerenes
HCOOCH ₃	CH ₃ OCH ₃	(CH ₃) ₂ CO	HC ₉ N	C ₆ H ₆	c-C ₆ H ₅ CN	C ₆₀
CH ₃ C ₃ N	CH ₃ CH ₂ OH	HO(CH ₂) ₂ OH	CH ₃ C ₆ H	n-C ₃ H ₇ CN	C ₆₀ ⁺	
C ₇ H	CH ₃ CH ₂ CN	CH ₂ CH ₂ CHO	CH ₃ CH ₂ OCHO	i-C ₃ H ₇ CN	C ₇₀	
CH ₃ COOH	HC ₇ N	CH ₃ C ₅ N	CH ₃ COOCH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

McGuire 2018

Das passende optische Medium

- Das interstellaren Medium hat eine reiche chemische Zusammensetzung (209 identifizierte Spezies, Stand 2018)
- Maserstrahlung wurde gefunden bei:
 - OH
 - SiO
 - H₂O
 - CH₃OH





Das passende optische Medium

- Das interstellaren Medium hat eine reiche chemische Zusammensetzung (209 identifizierte Spezies, Stand 2018)
- Maserstrahlung wurde gefunden bei:
 - OH
 - SiO
 - H₂O
 - CH₃OH
 - + ca. 10 Weitere
- Wo und unter welchen Bedingungen können diese Moleküle in ausreichenden Mengen vorkommen?

→ ASTROCHEMIE

Der passende Pumpprozess

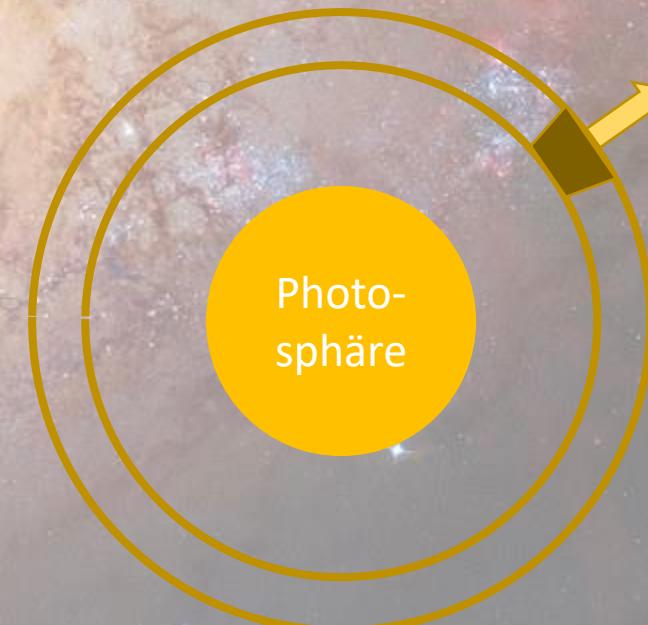
- Stoß-Pumpen:
 - In einem Gas hängt die Zahl der Stöße sowie deren Energie ab von:
 - Teilchendichte
 - Temperatur (kinetischen Energie der Teilchen)
 - Stöße sorgen meistens für den gegenteiligen Effekt: die Aufhebung der Besetzungsinvolution
- Strahlungs-Pumpen:
 - Eine passende Strahlungsquelle muss 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: $\sim 10^{10}\text{-}10^{15}$ 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!**

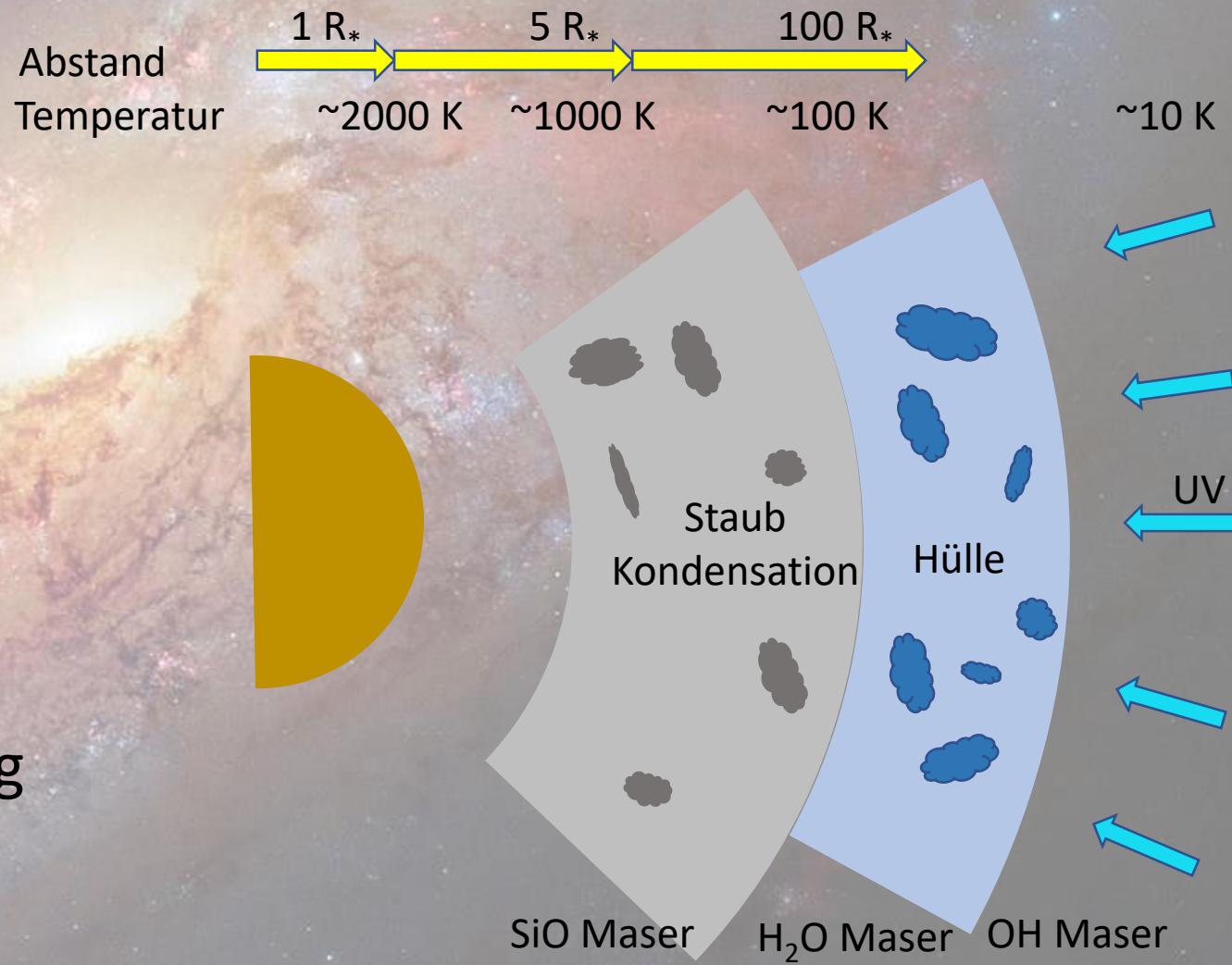
Die passende Geometrie: expandierende Sternhüllen

- 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 ~ 3000 K



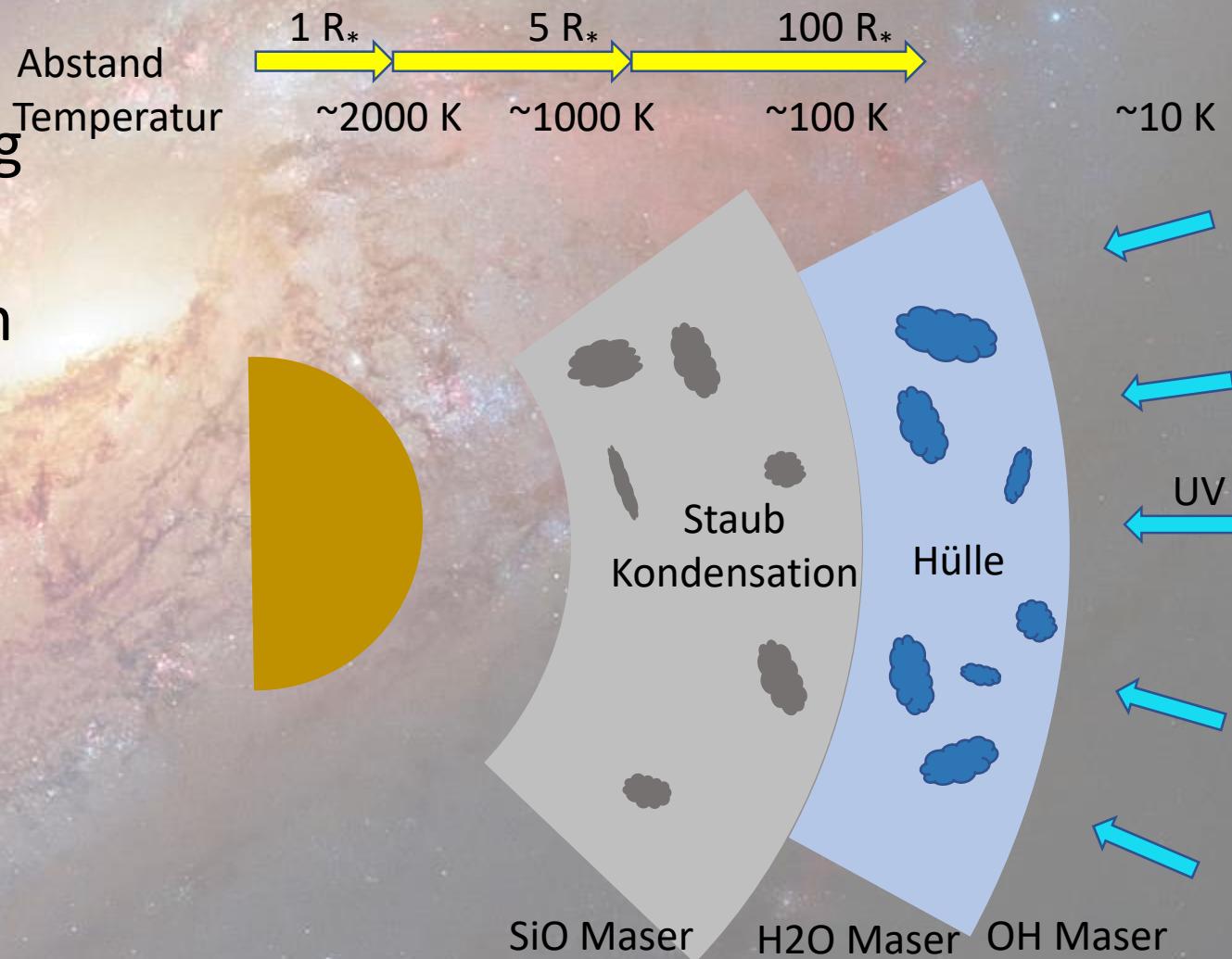
Die passende Geometrie: expandierende Sternhüllen

- Die expandierende Hülle kühlt nach Außen hin ab
- Die Gasdichten sind vergleichsweise hoch
- Ab ca. 1500 K können sich SiO, Al_2O_3 und TiO Moleküle bilden
- Weiter außen kann sich bei ca. 100 K H_2O bilden
- Die UV Strahlung der Umgebung zerstört H_2O zu OH



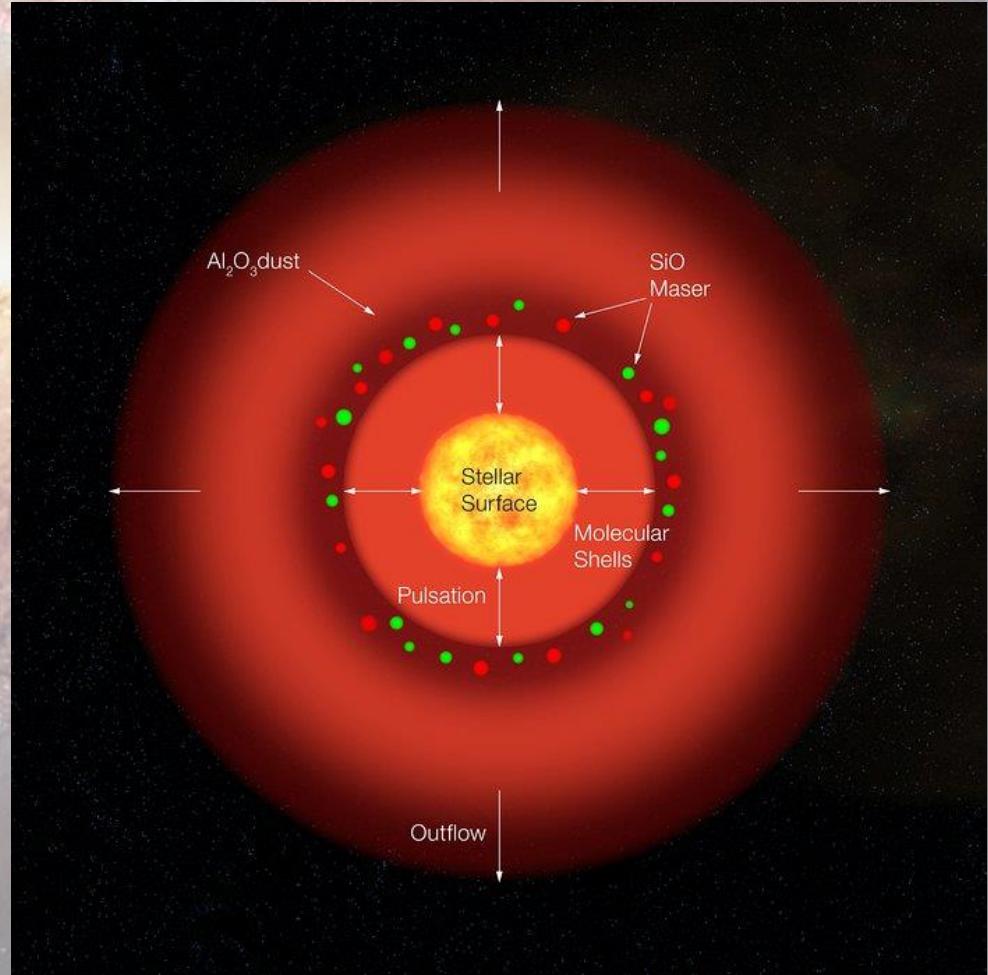
Die passende Geometrie: expandierende Sternhüllen

- Die UV Strahlung der Umgebung zerstört H_2O zu OH
- Daher findet man SiO Maser am nächsten um den Stern gefolgt von H_2O Masern und weiter außen OH Maser.



S Ori

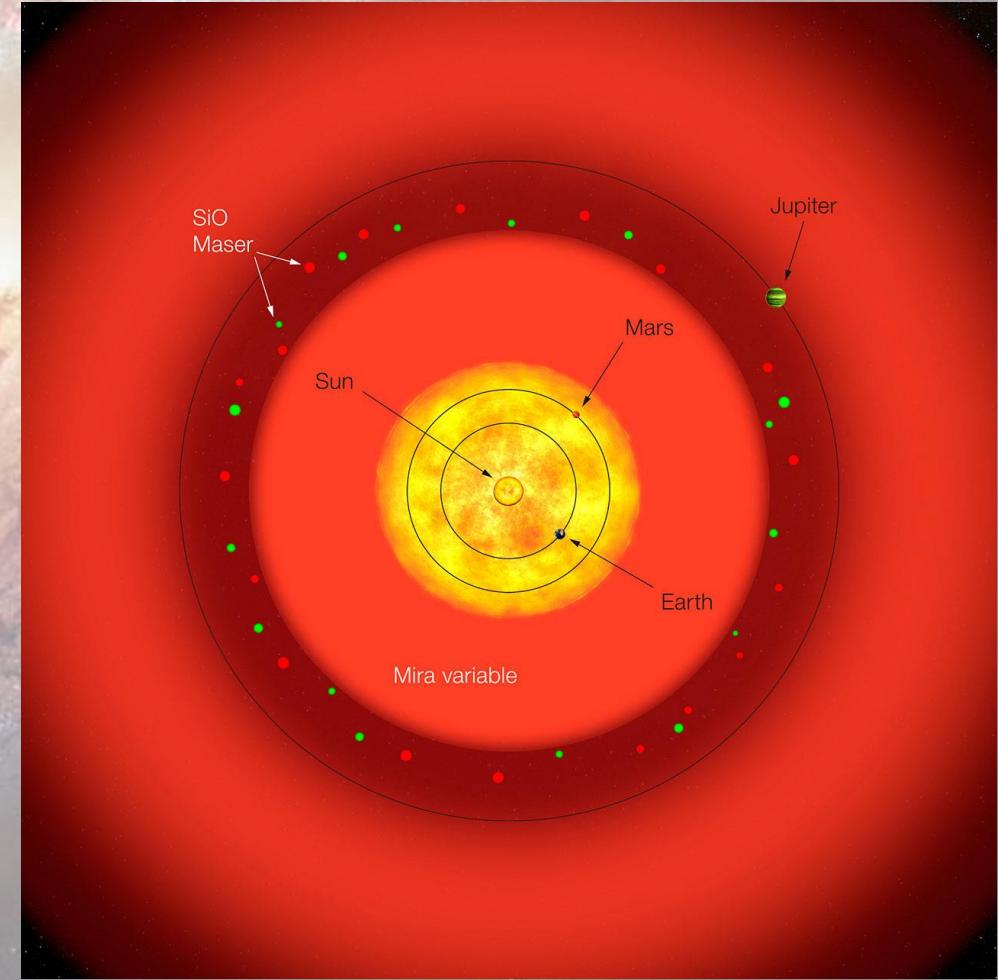
- S Orionis ist ein Roter Riese vom Typ Mira (Entfernung: 1000 Lj)
- Extreme Massenverluste:
1 Erdmasse pro Jahr
- Pulsiert mit einer Periode von 420 Tagen
- Die Helligkeit variiert dabei um den Faktor 500



Quelle: ESO

S Ori

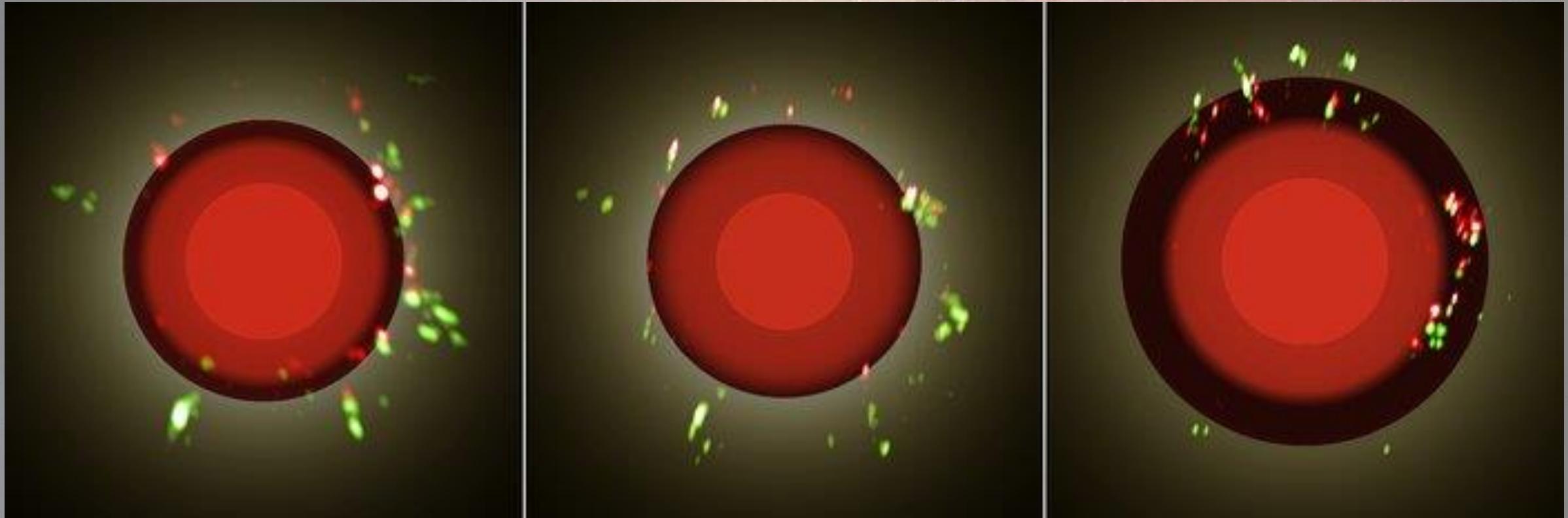
- S Orionis ist ein Roter Riese vom Typ Mira (Entfernung: 1000 Lj)
- Extreme Massenverluste:
1 Erdmasse pro Jahr
- Pulsiert mit einer Periode von 420 Tagen
- Die Helligkeit variiert dabei um den Faktor 500



Quelle: ESO

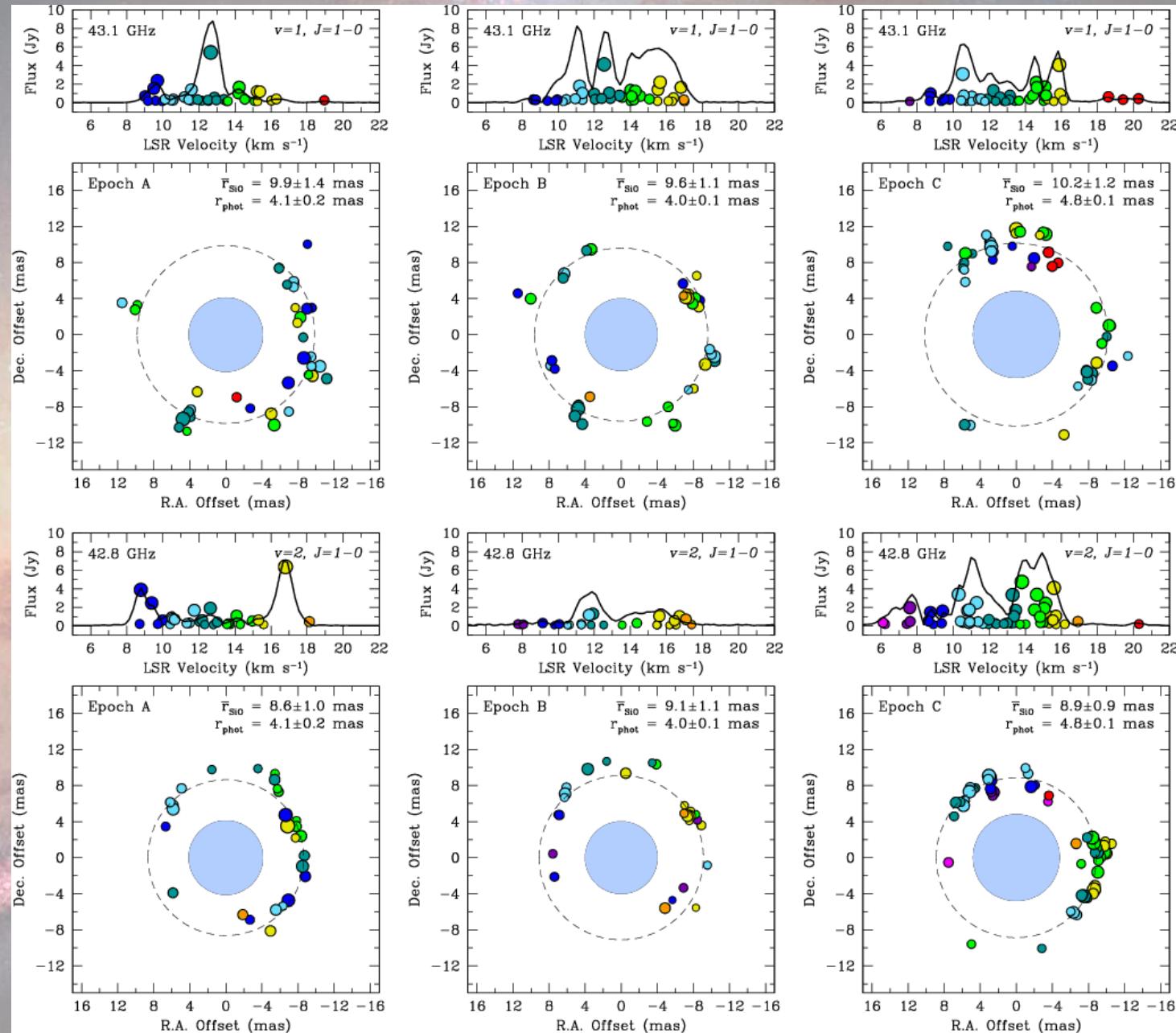
S Ori

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



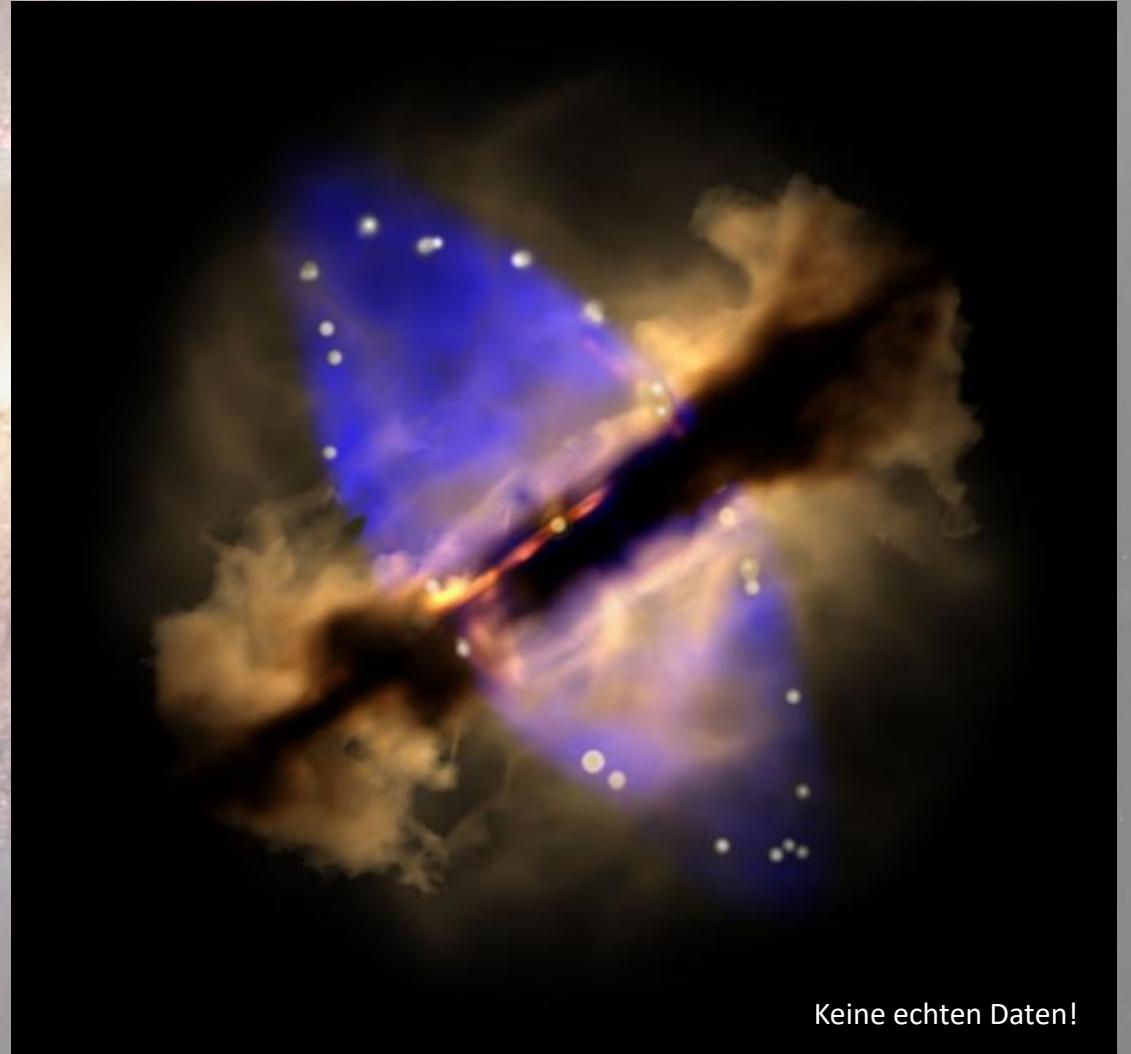
S Ori

- 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

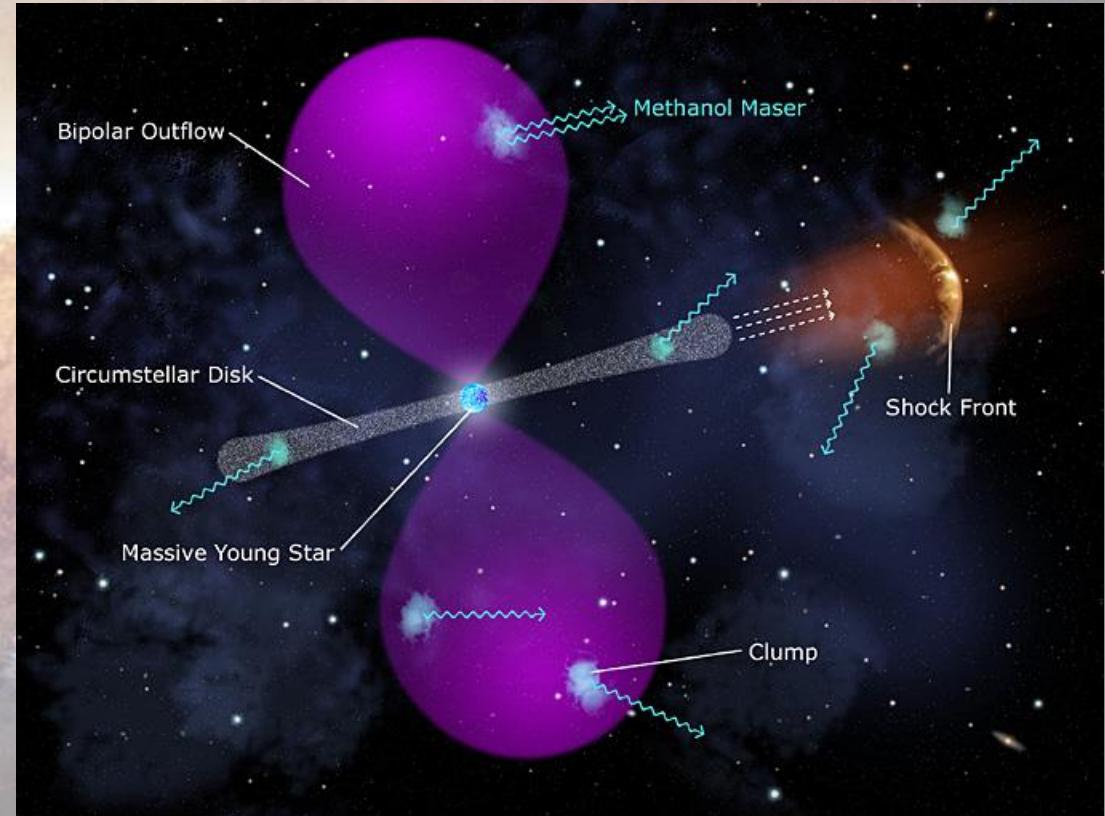


Keine echten Daten!

Quelle: Wolfgang Steffen, Instituto de Astronomía, UNAM

Die passende Geometrie: Scheiben und Ausflüsse

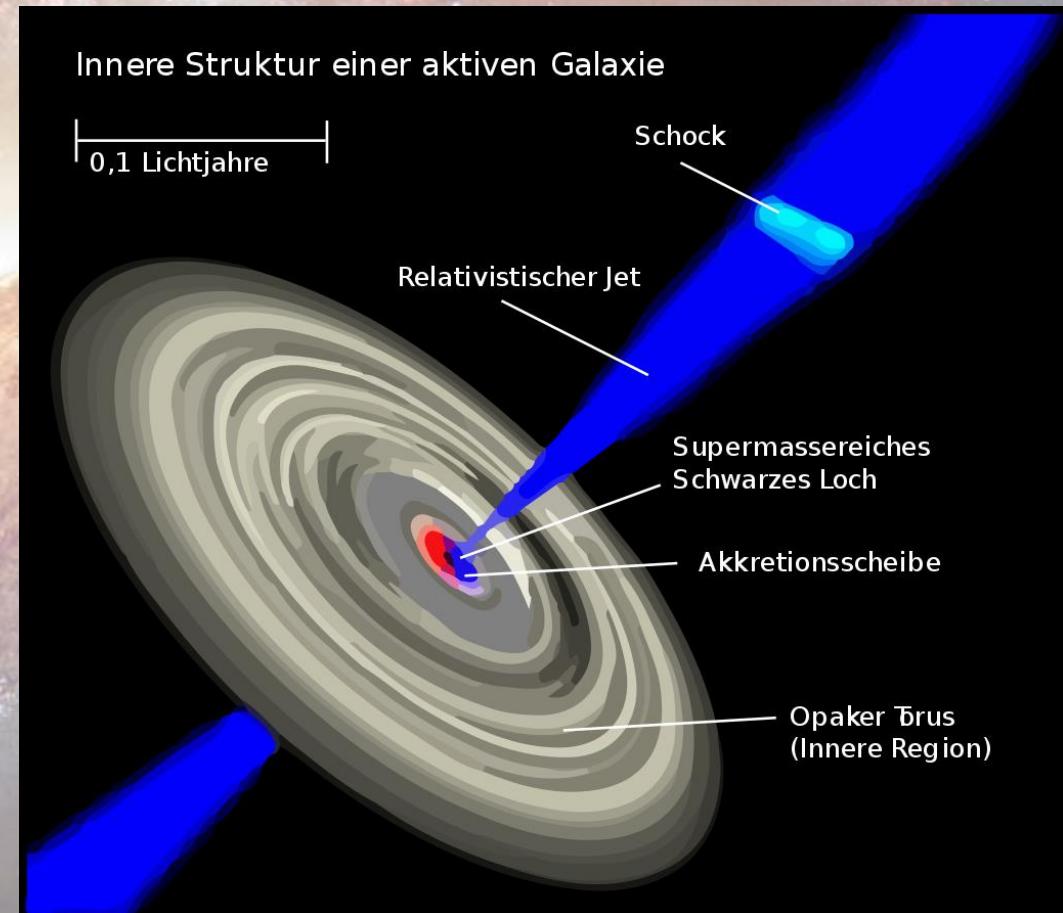
- Bei der Entstehung von Sternen bilden sich Scheiben aus Gas und Staub
- Bilden sich Sterne nicht zu hoher Masse, entstehen auch Bipolare Ausflüsse
- In diesen Ausflüssen: große Gasvolumina fließen kohärent in die gleiche Richtung und werden intensiv beleuchtet → MASER
- OH, H₂O, SiO, CH₃OH



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



Quelle: Wikipedia

NGC 4258 / M106

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

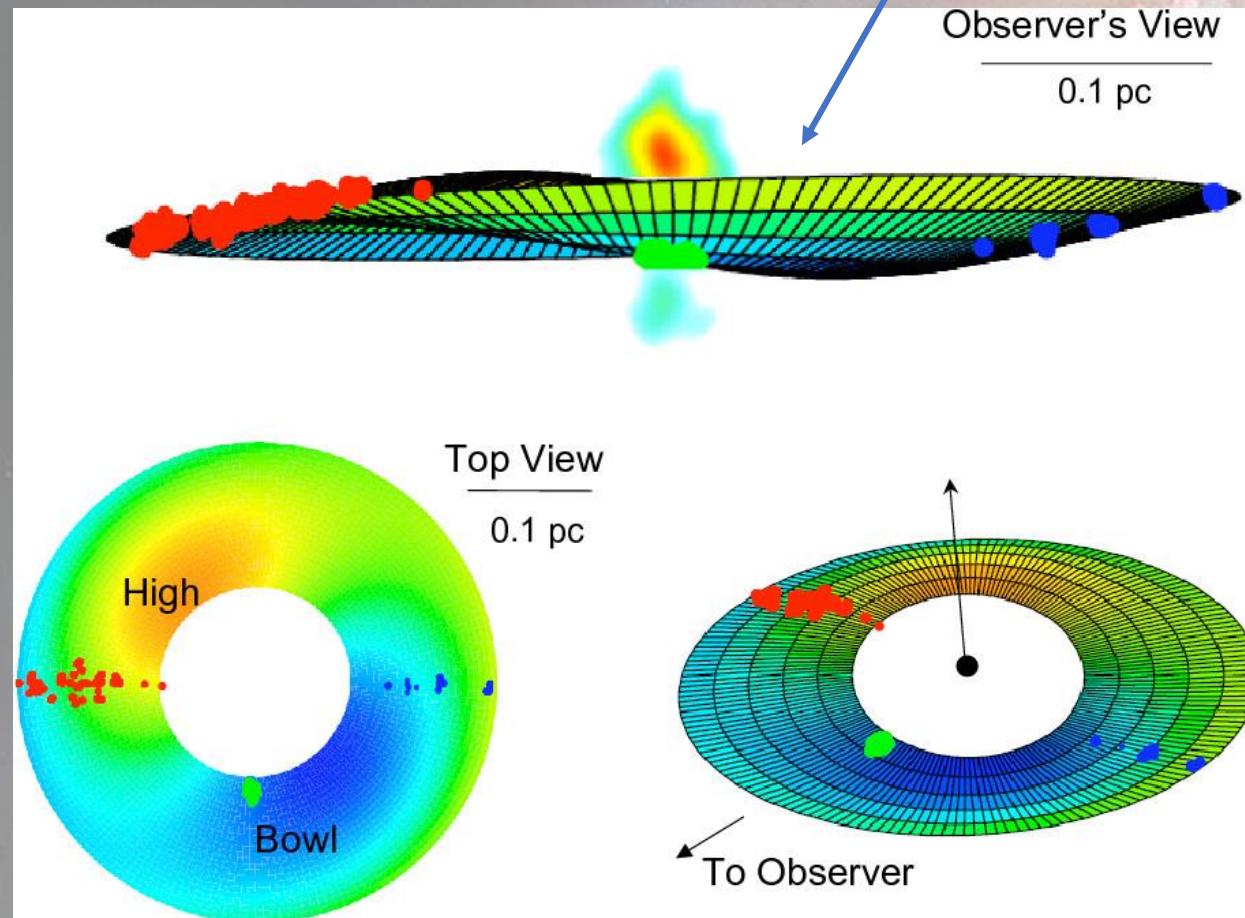


Quelle: [Fabian Neyer](#)

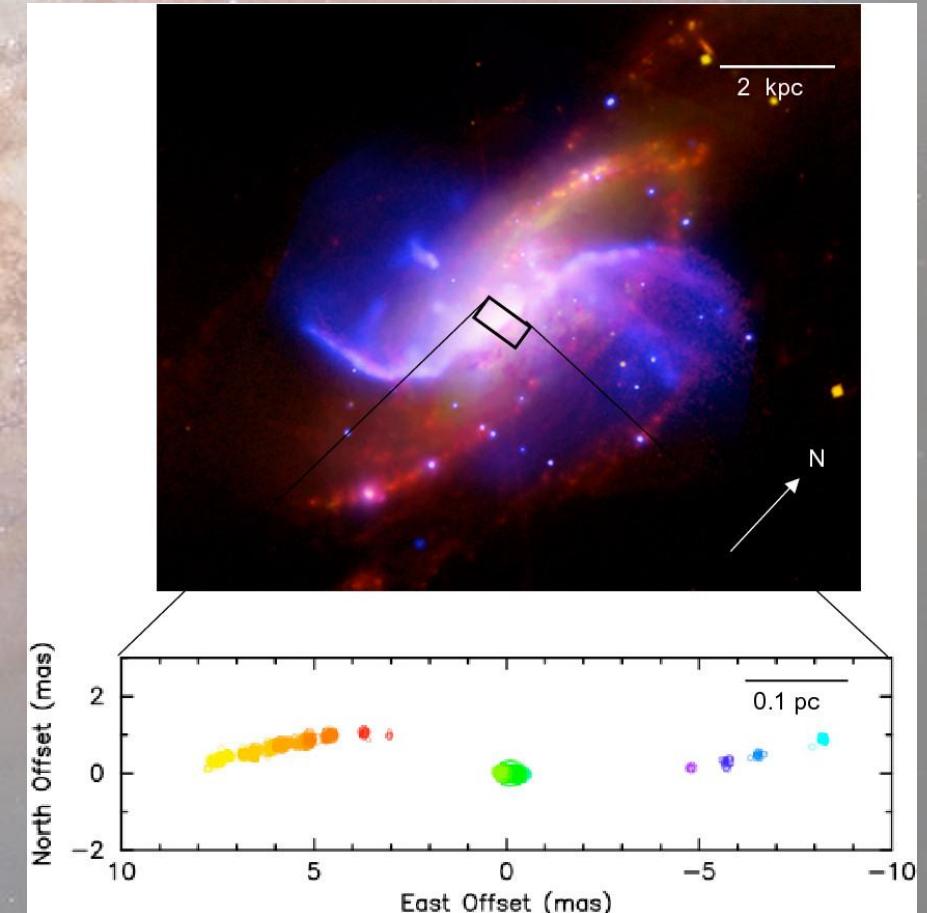


NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), and R. Gendler (for the Hubble Heritage Team)

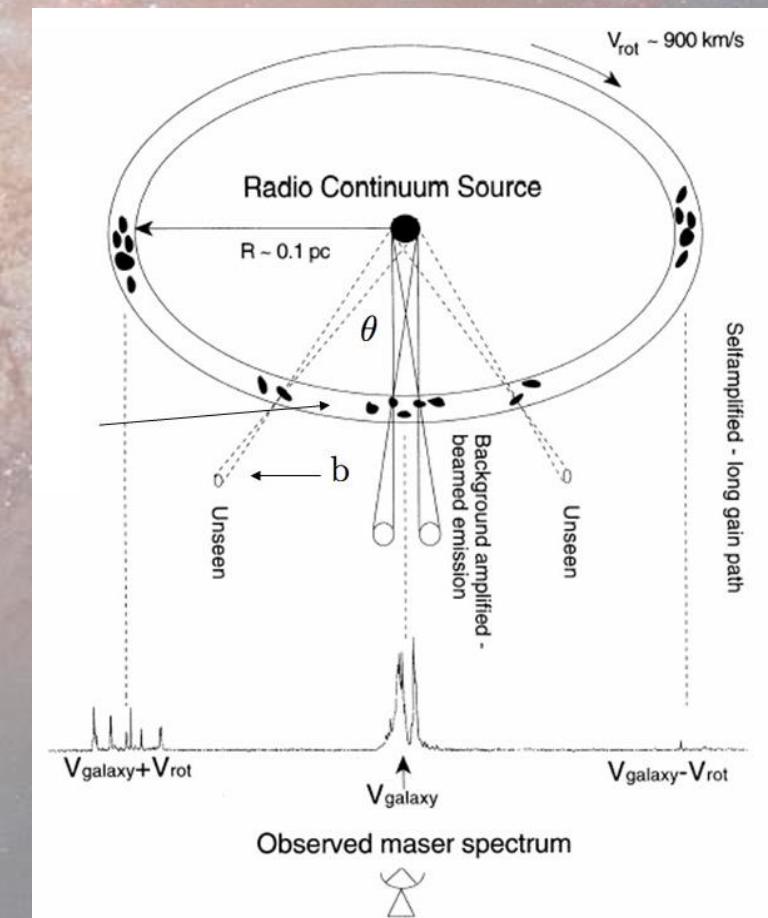
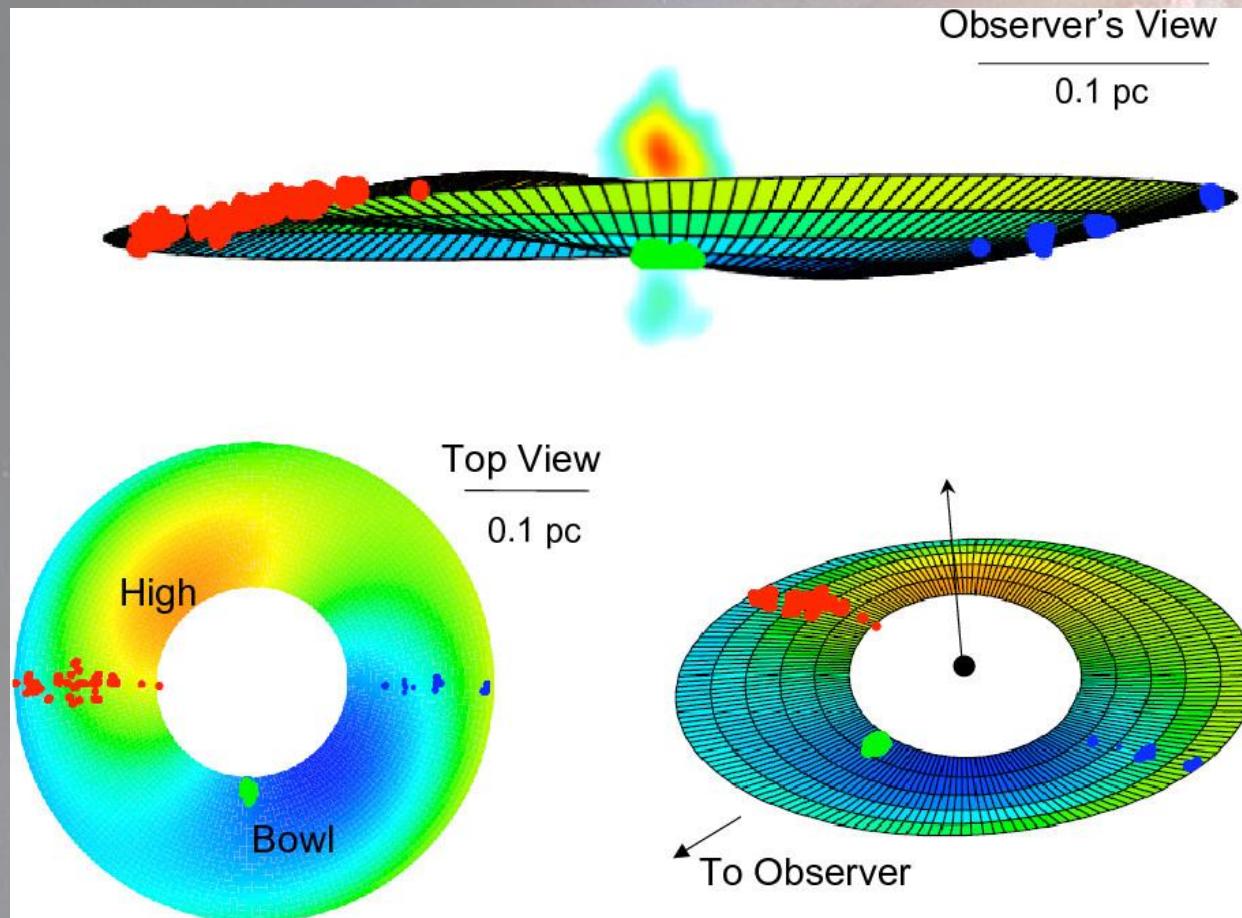
NGC 4258



Scheibe aus Gas und Stab um zentrales schwarzes Loch



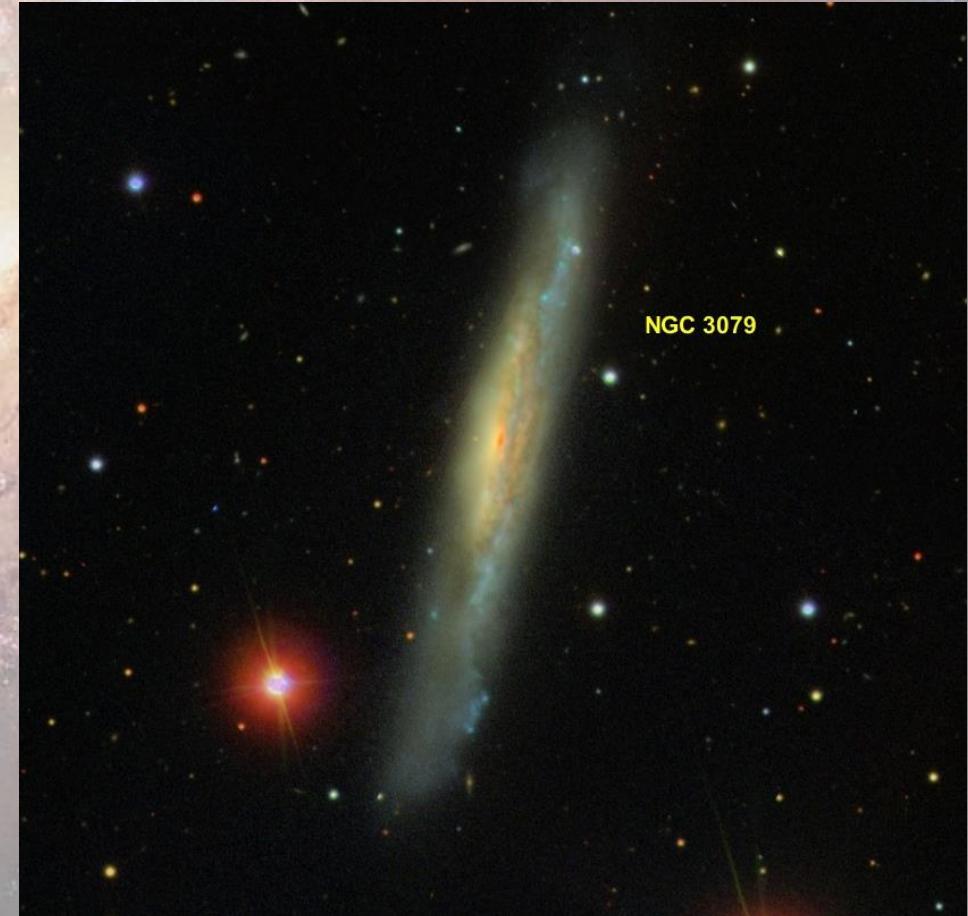
NGC 4258



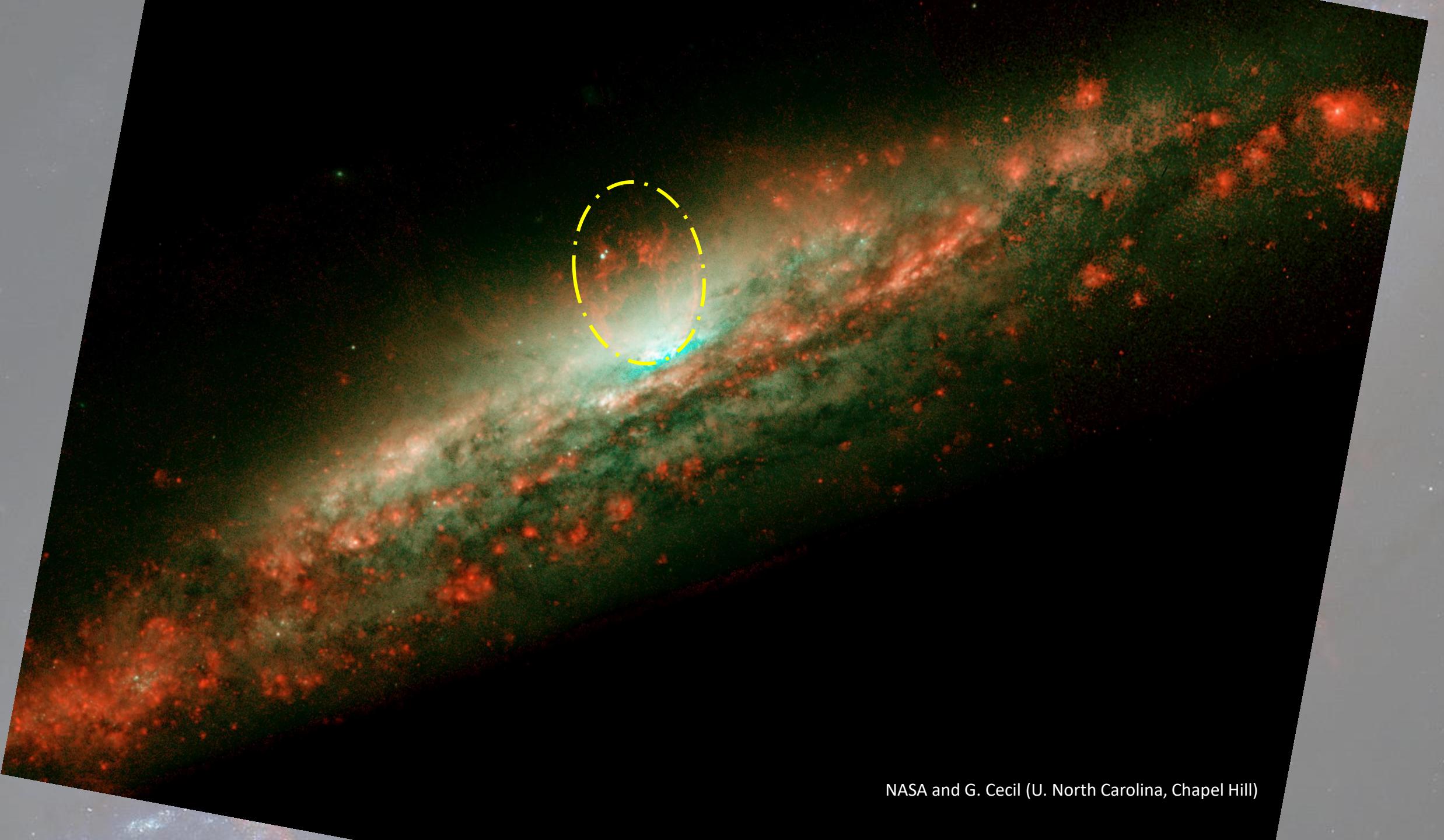
Herrnstein et al. 2005

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.



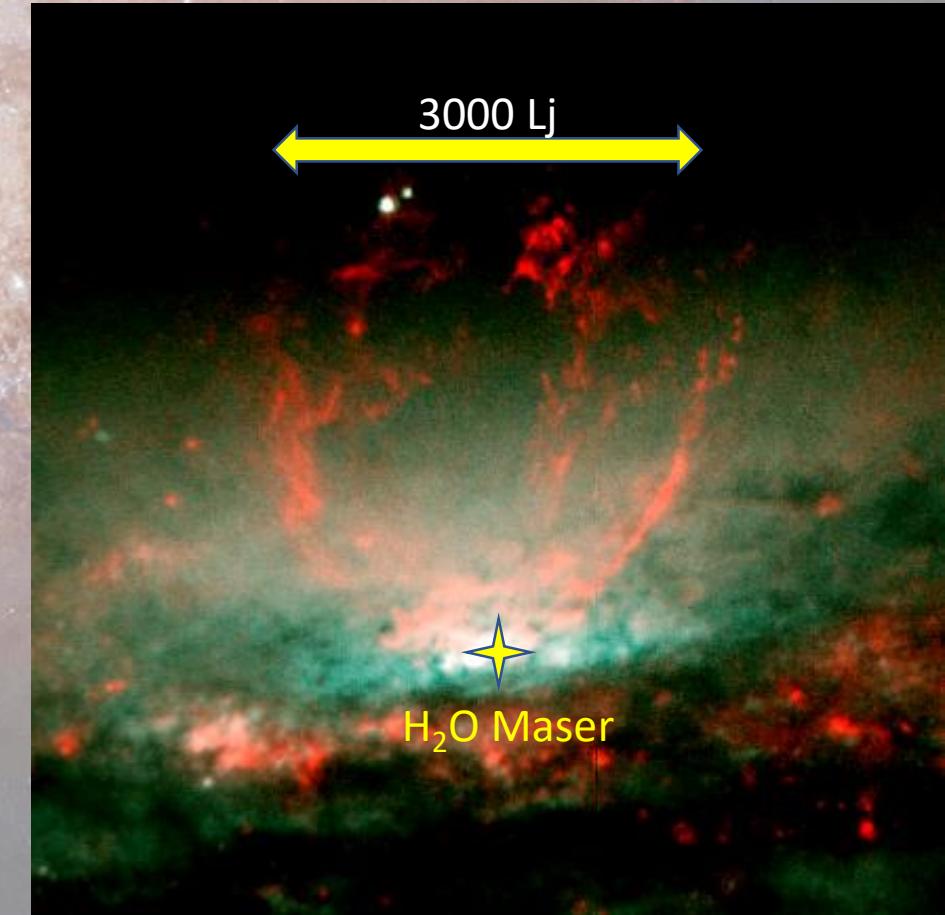
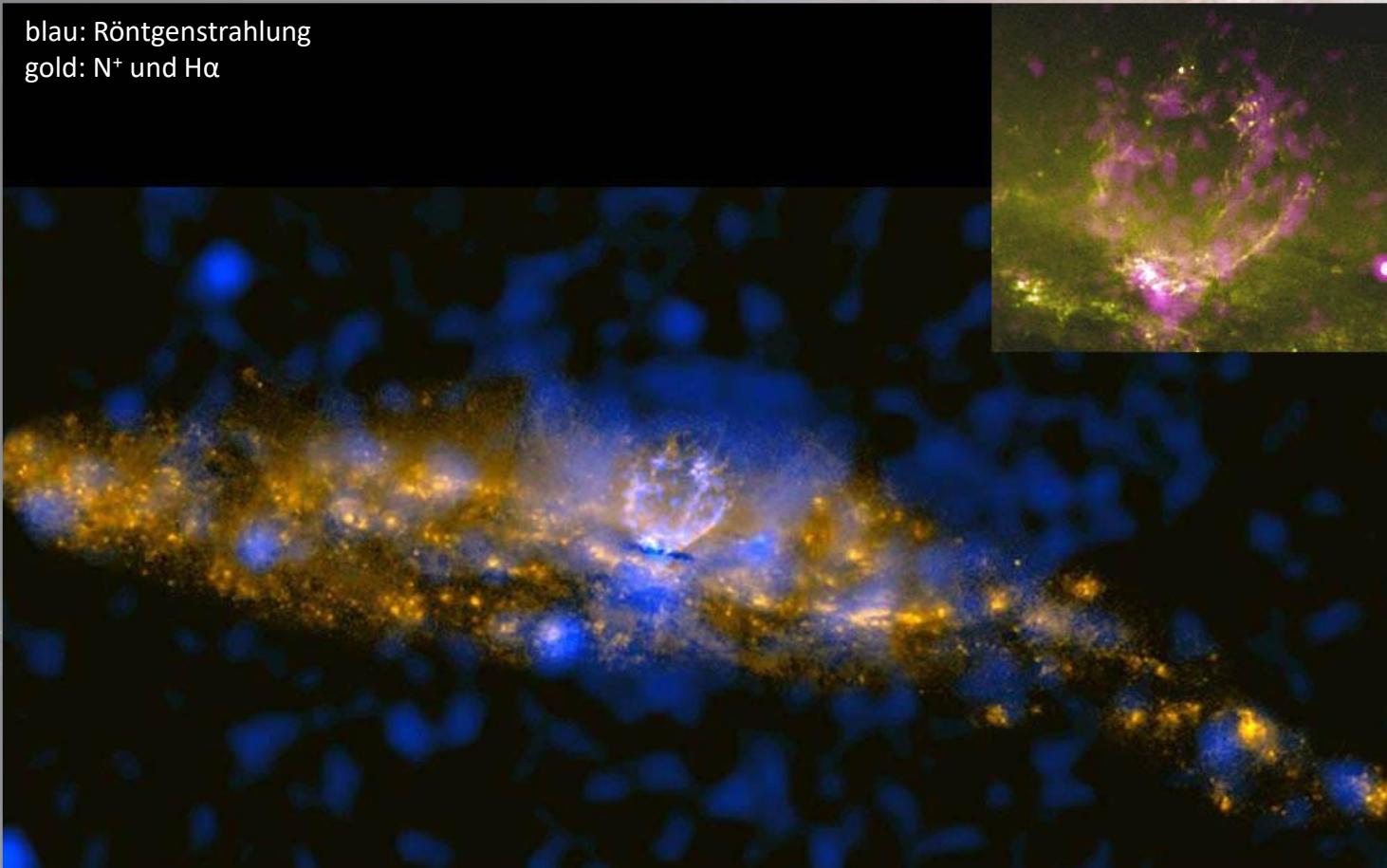
Quelle: SDSS/ Wikipedia



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

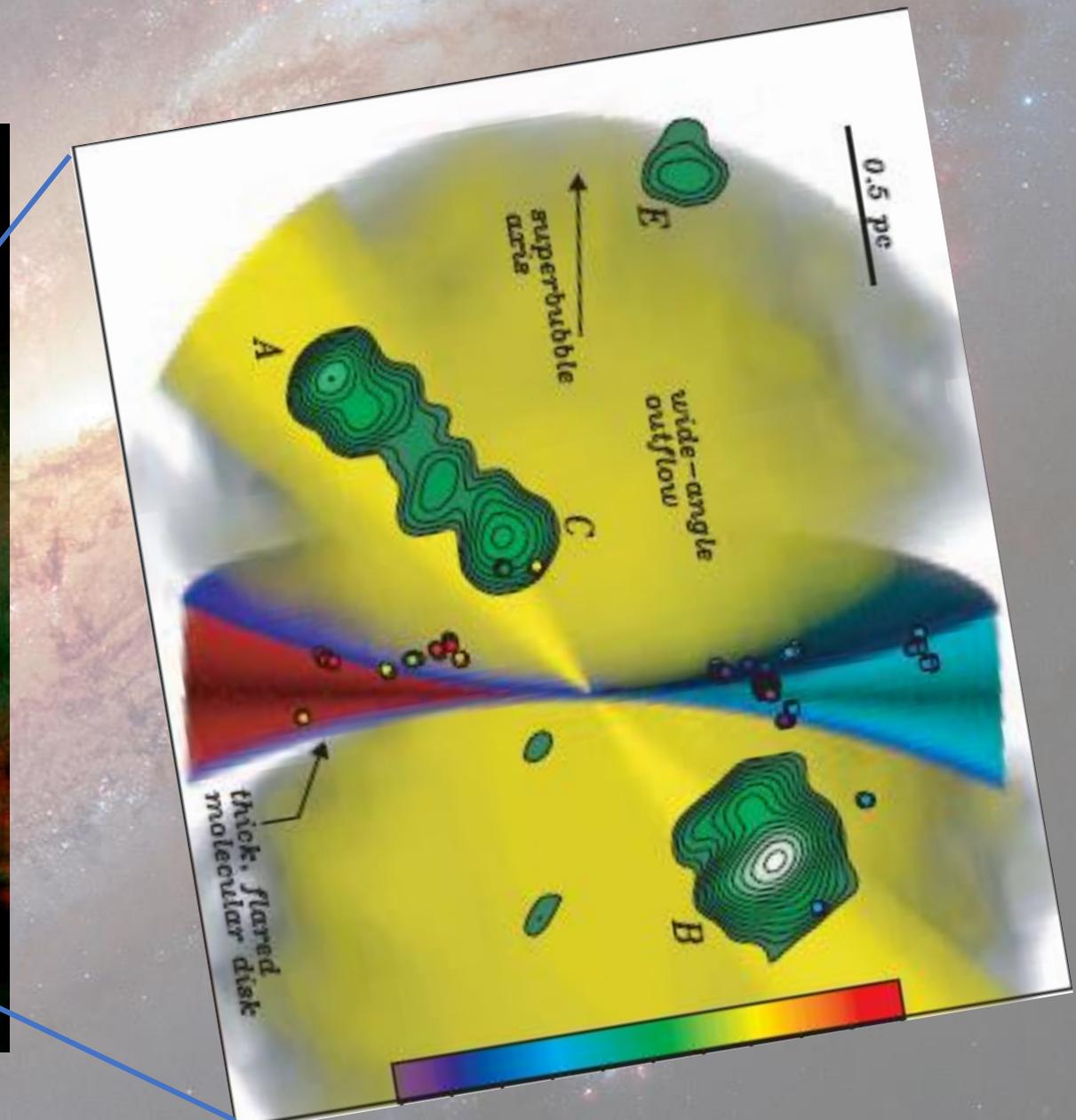
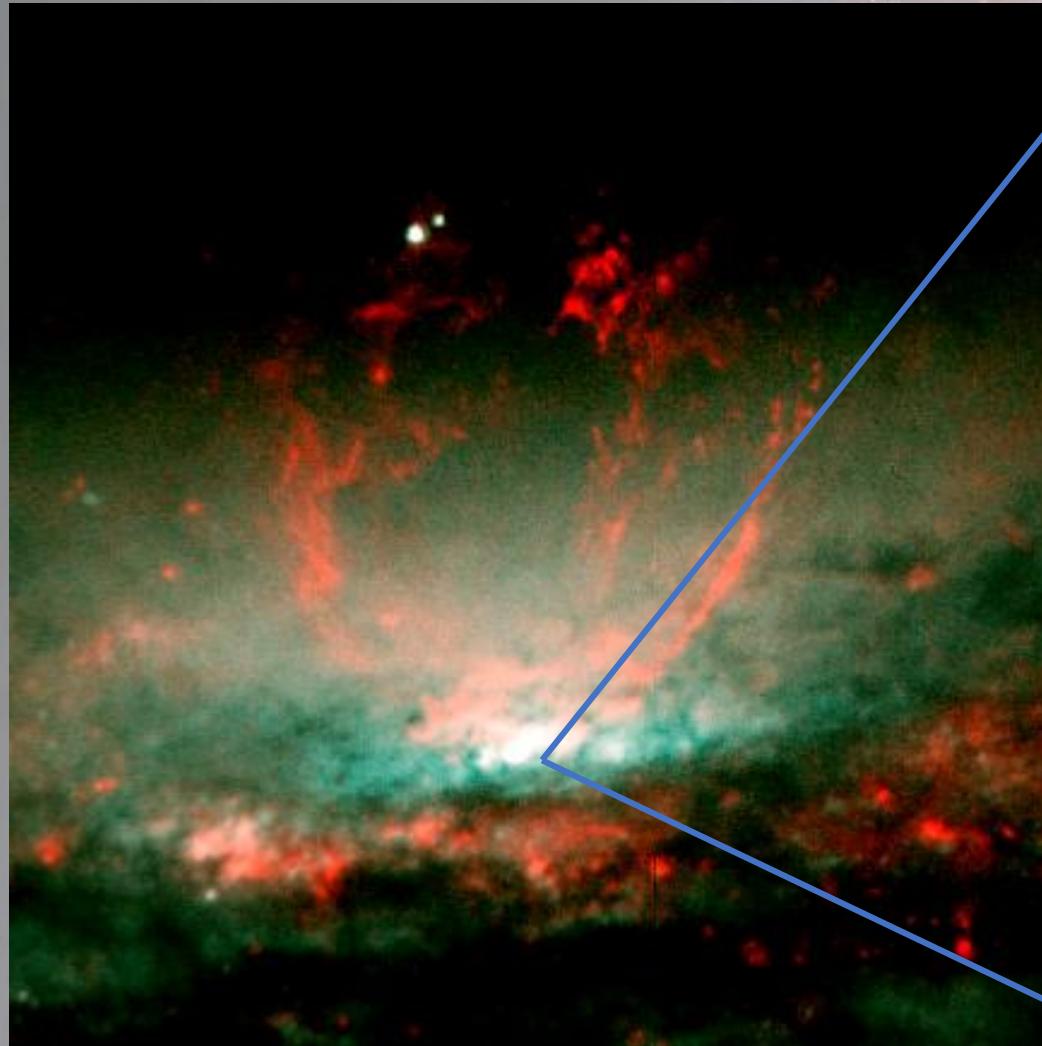
NGC 3079

blau: Röntgenstrahlung
gold: N⁺ und H α



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

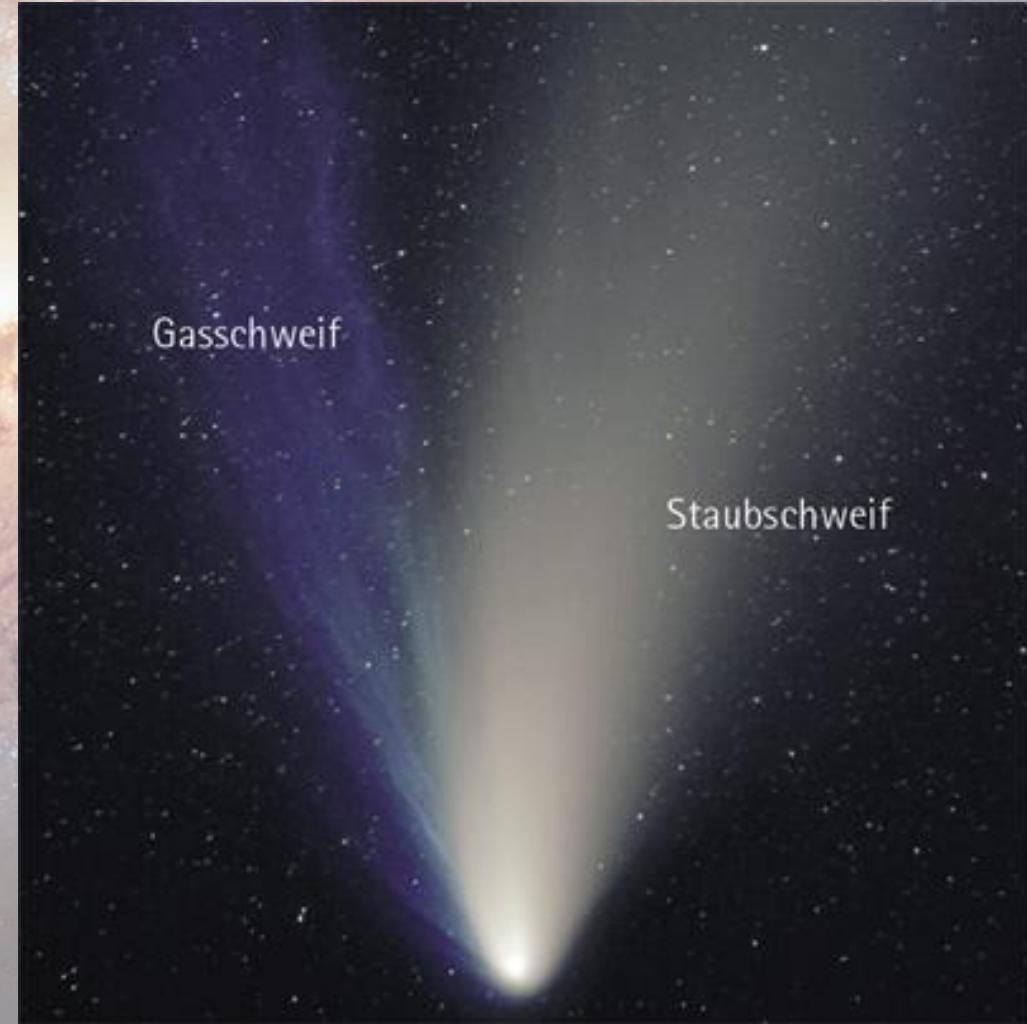
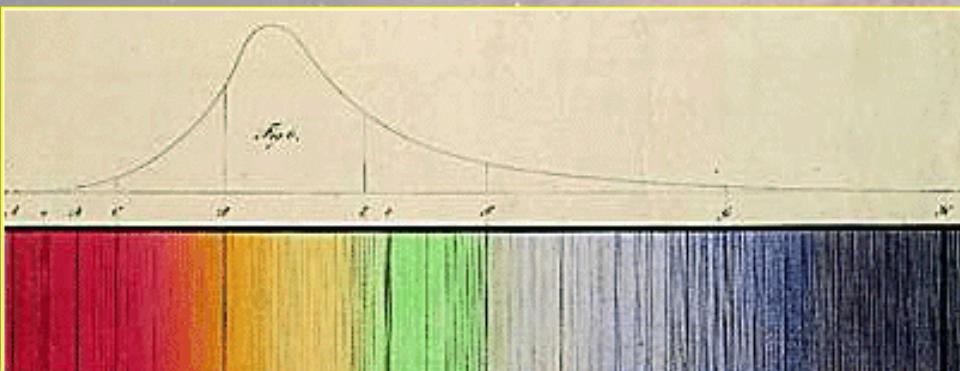


Die passende Geometrie: Kometen ?!

- 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

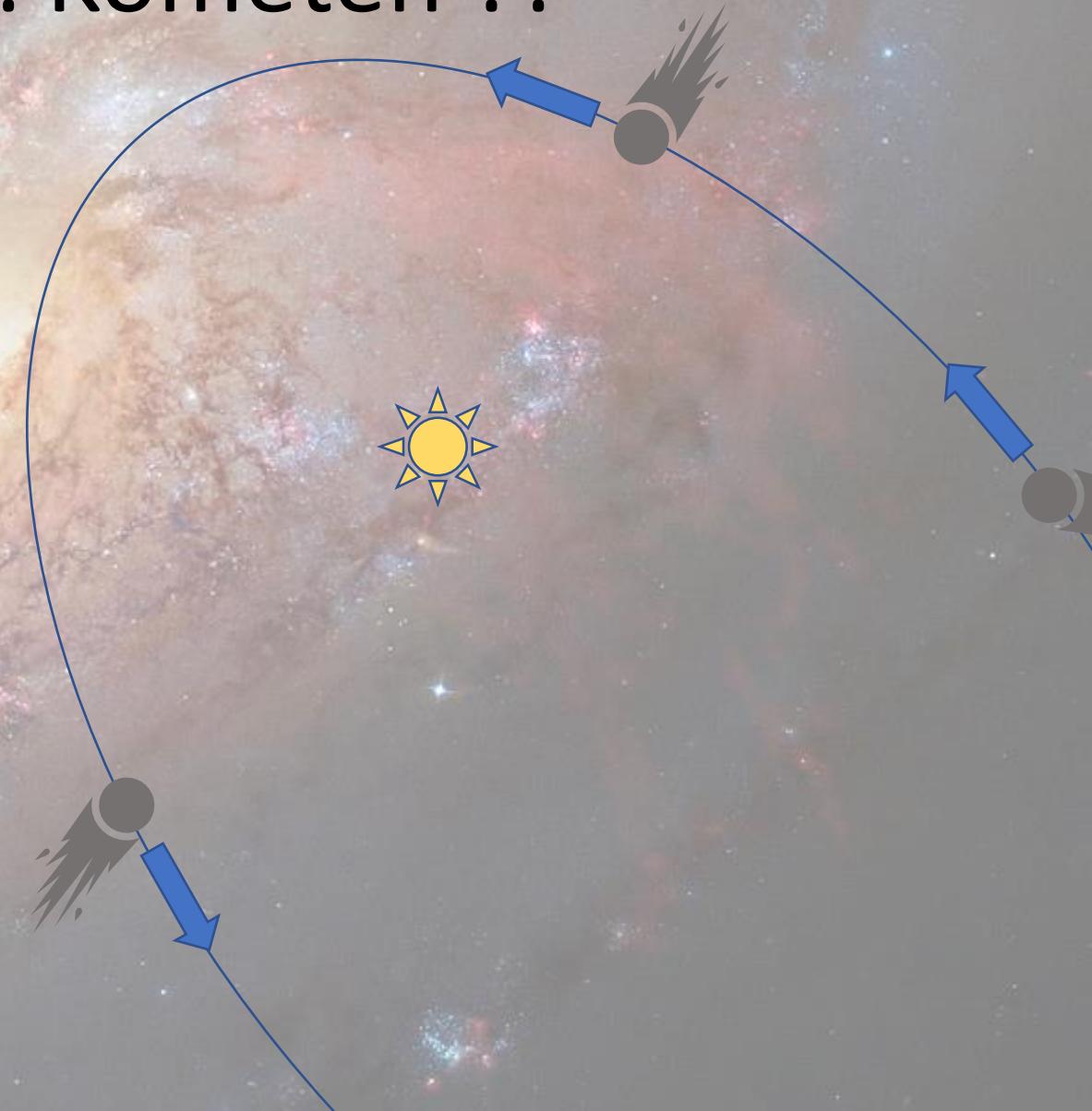
Die passende Geometrie: Kometen ?!

- Kometen bestehen zu Teilen aus Wassereis
- In Sonnennähe sublimiert das Wasser und bildet die Koma und den Gasschweif
- Sonnenlicht kann die H₂O Moleküle anregen(pumpen)



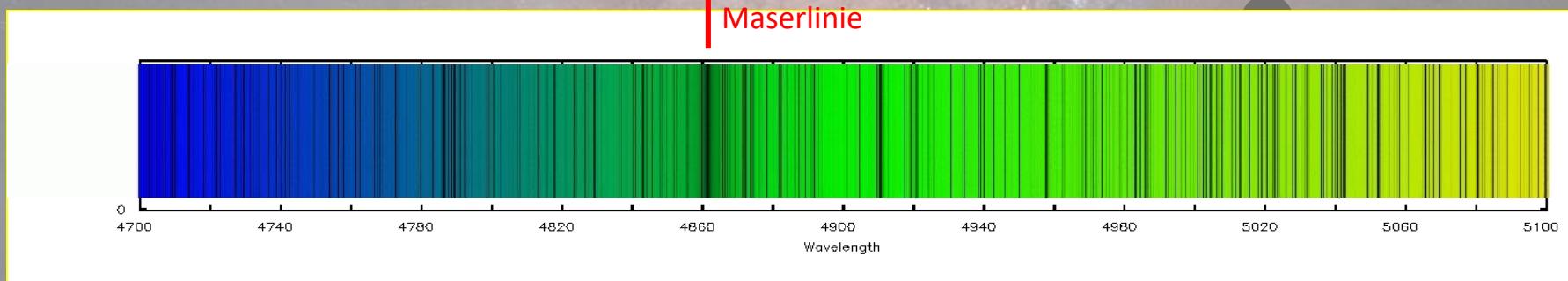
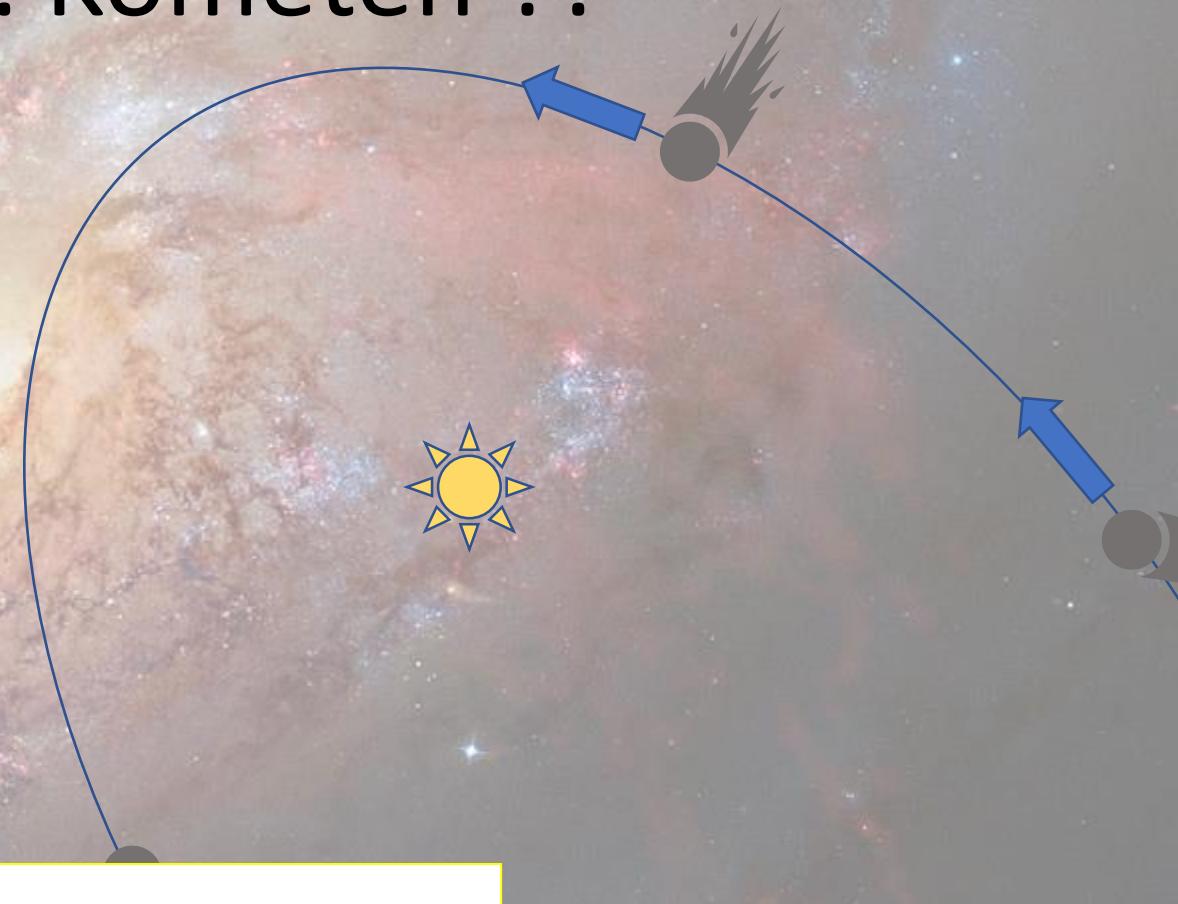
Die passende Geometrie: Kometen ?!

- Kometen bestehen zu Teilen aus Wassereis
- In Sonnennähe sublimiert das Wasser und bildet die Koma und den Gassschweif
- Sonnenlicht kann die H₂O Moleküle anregen(pumpen)
- Auf ihrer Bahn um die Sonne ändert sich die Relativgeschwindigkeit Komet-Sonne



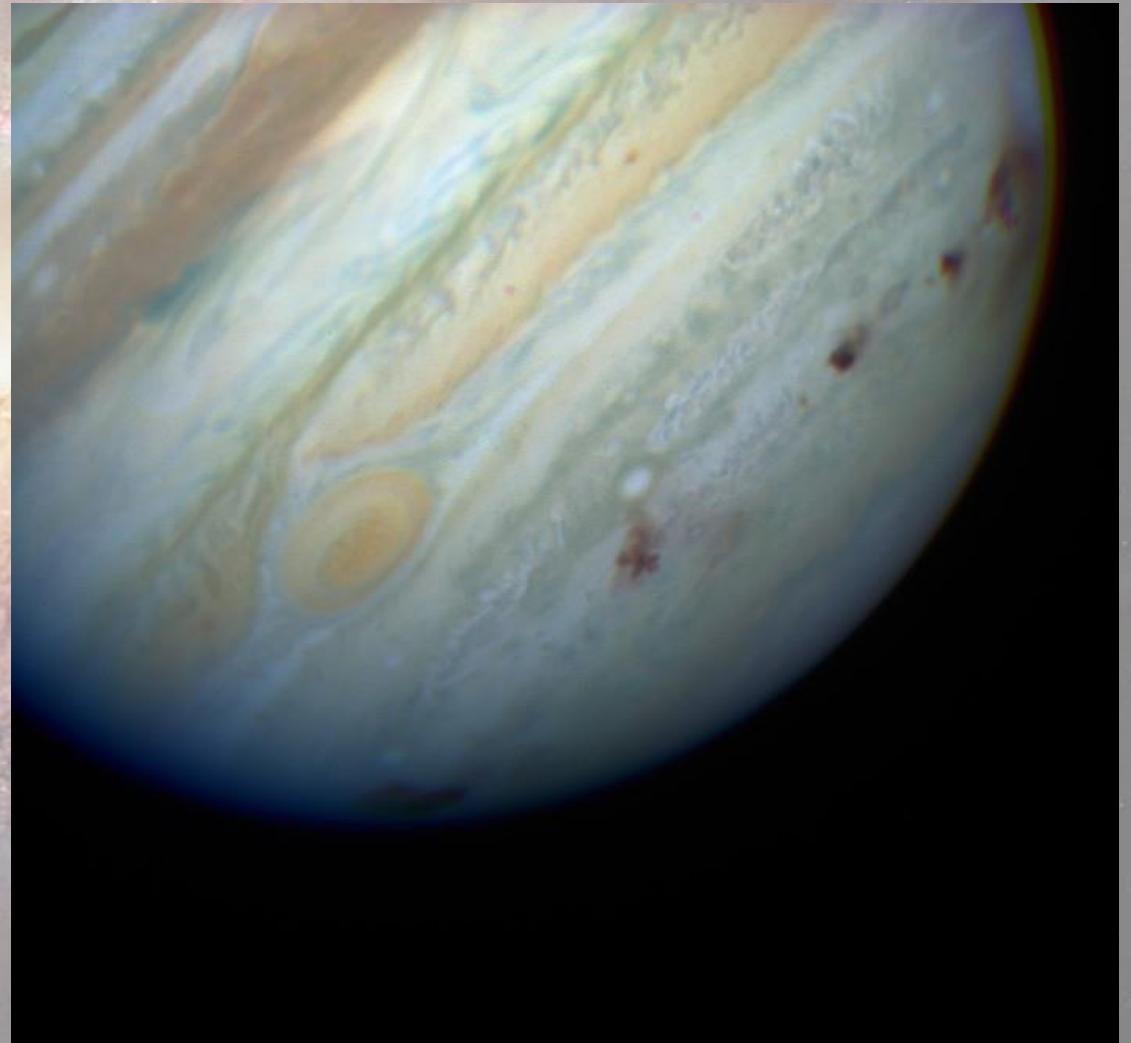
Die passende Geometrie: Kometen ?!

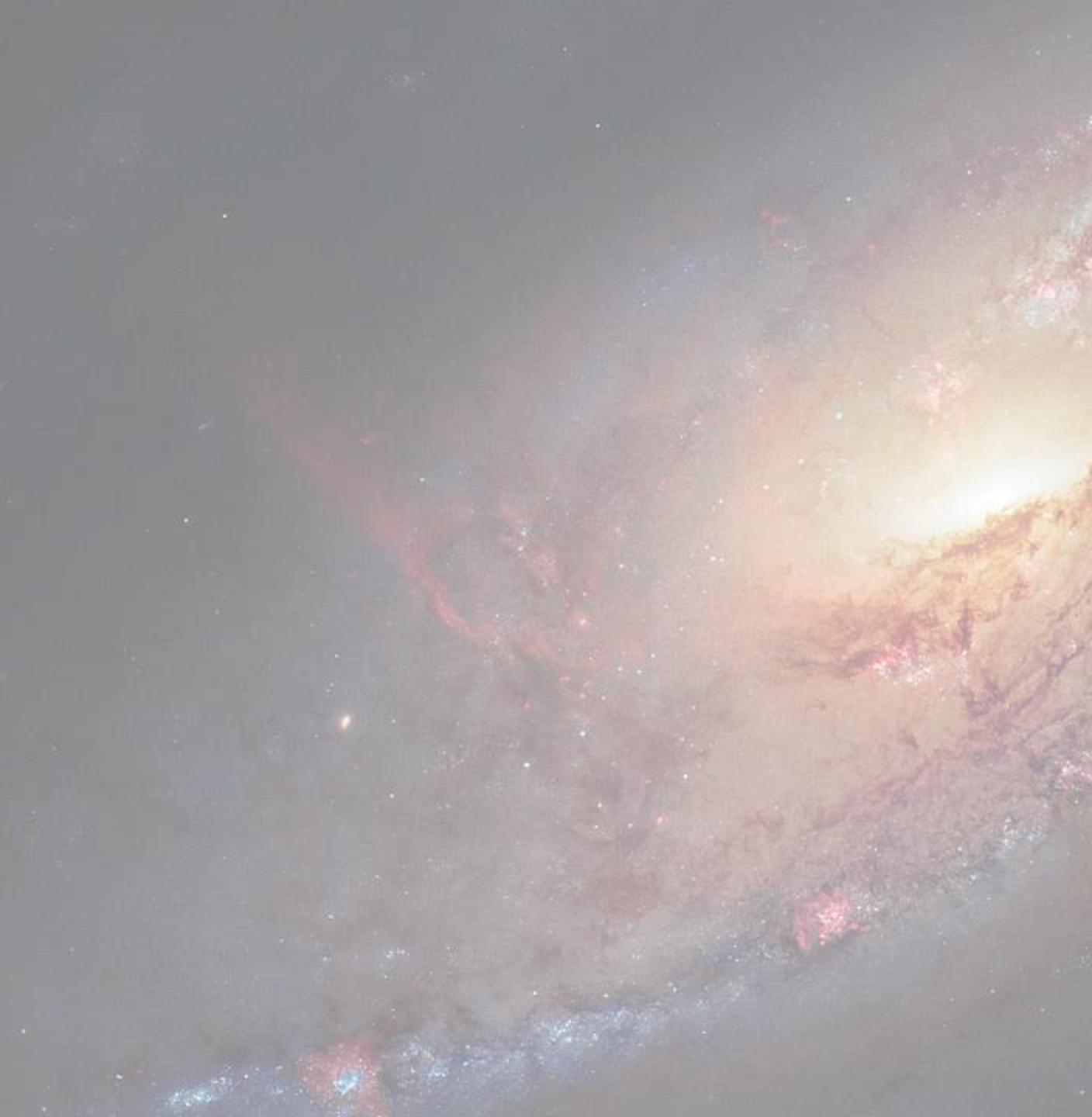
- Wechselnde Dopplerverschiebung der Fraunhoferlinien des Sonnenspektrums
- Wassermoleküle werden auf ihrer Bahn um die Sonne angeregt je nachdem ob die Sonnenstrahlung gerade ‚passt‘



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

