

Radioastronomie, Vorlesung 13

- 1) Rotationspektren der Moleküle
- 2) Moleküle im interstellaren Medium
- 3) NOEMA, <https://vimeo.com/108095987>

Übergänge in Molekülen:

1) elektronische Übergänge

typische Energien von einigen eV

im sichtbaren oder ultravioletten (UV) Bereichen des Spektrums

b) Schwingungsübergänge

typische Energien 0.1-0.01 eV

im Infrarotbereich des Spektrums

c) Rotationsübergänge

typische Energien von $\sim 10^{-3}$ eV

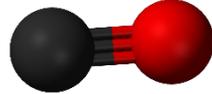
im Wellenlängenbereich von cm und mm

Klassifizierung der Moleküle:

Trägheitsmomente:

Energieniveaus:

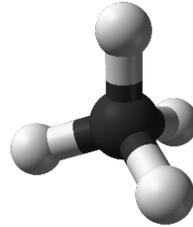
Lineares Molekül



$$I_A = 0, I_B = I_C$$

$$E = B_j(j+1) - D_j^2(j+1)^2$$

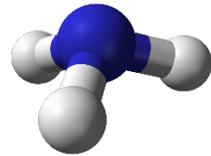
Sphärischer Kreisel



$$I_A = I_B = I_C$$

$$E = B_j(j+1) - D_j^2(j+1)^2$$

Symmetrischer Kreisel



$$I_B = I_C \neq I_A, I_A \neq 0$$

$$E = B_j(j+1) + (A - B)K^2 - D_j^2(j+1)^2 - D_{jK}j(j+1)K^2 - D_K K^4$$

Asymmetrischer Kreisel



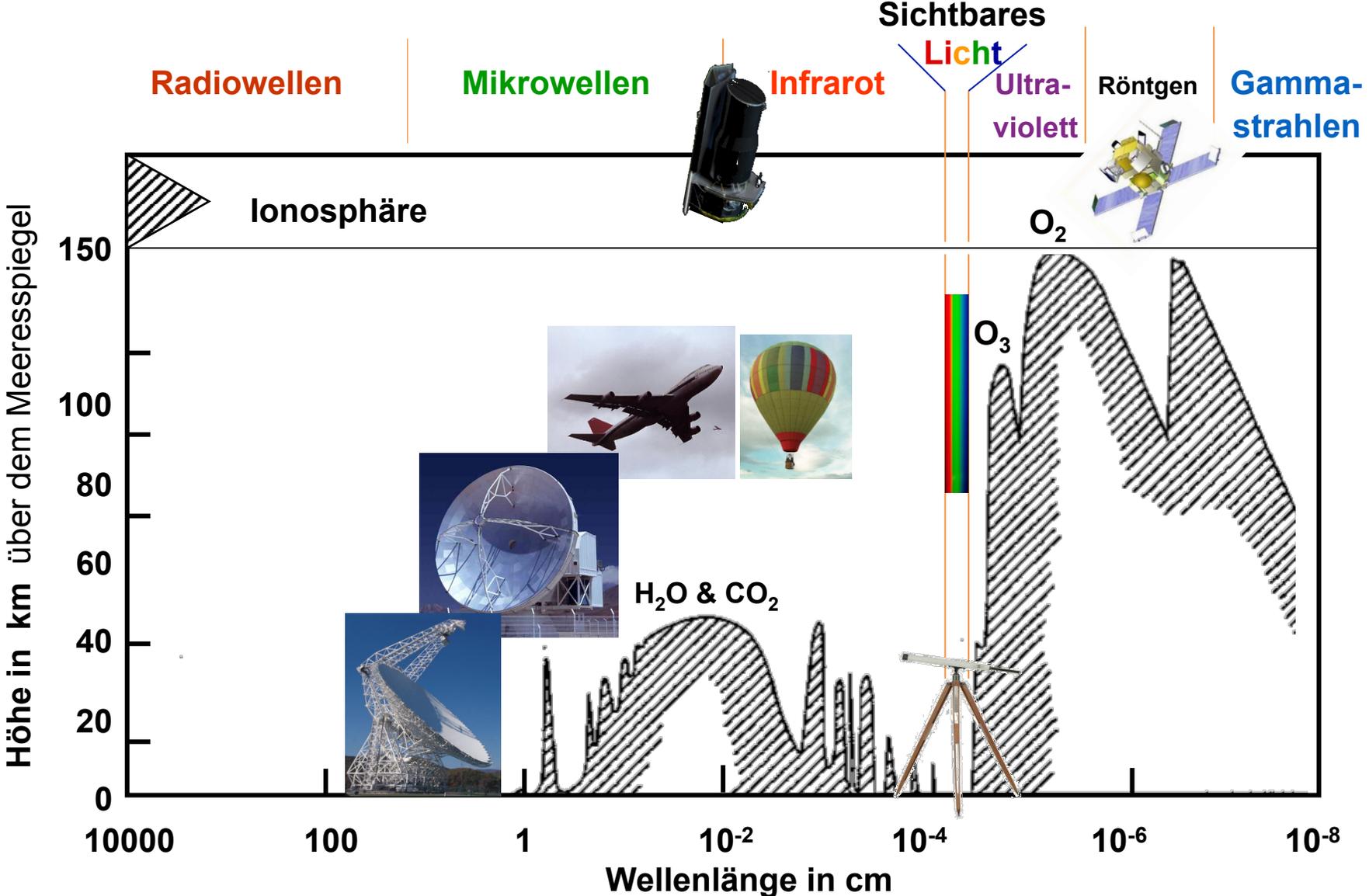
$$I_A \neq I_B \neq I_C$$

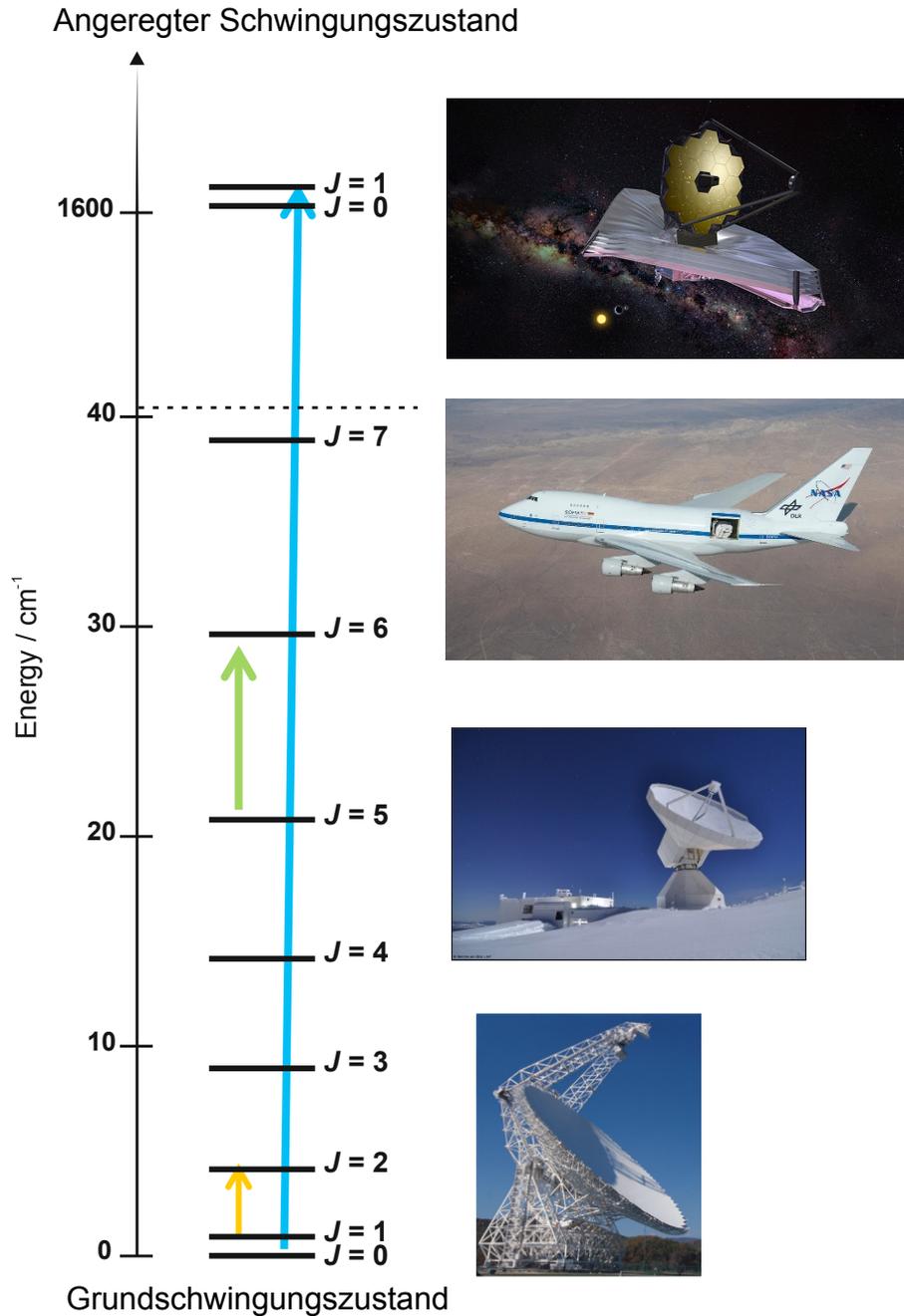
Intensität der spektralen Linien

$$\mathcal{E}_\nu = -\frac{h\nu_0}{4\pi} N_2 A_{21} \varphi(\nu)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu_0}{kT}\right) \quad A_{mn} = \frac{64\pi^4}{3hc^3} \nu_{mn}^3 |\mu_{mn}|^2$$

Wie hoch muss ein Teleskop stehen, damit es die Hälfte der Strahlung kosmischen Ursprungs messen kann ?





Infrarotbereich $1000 - 5000 \text{ cm}^{-1}$

Diode Laser und Quantum Cascade Laser (QCL) Spektrometer
Fourier transform infrared (FTIR) Spektrometer

Millimeter-Wellen – Terahertzbereich
 $1 - 1000 \text{ cm}^{-1}$

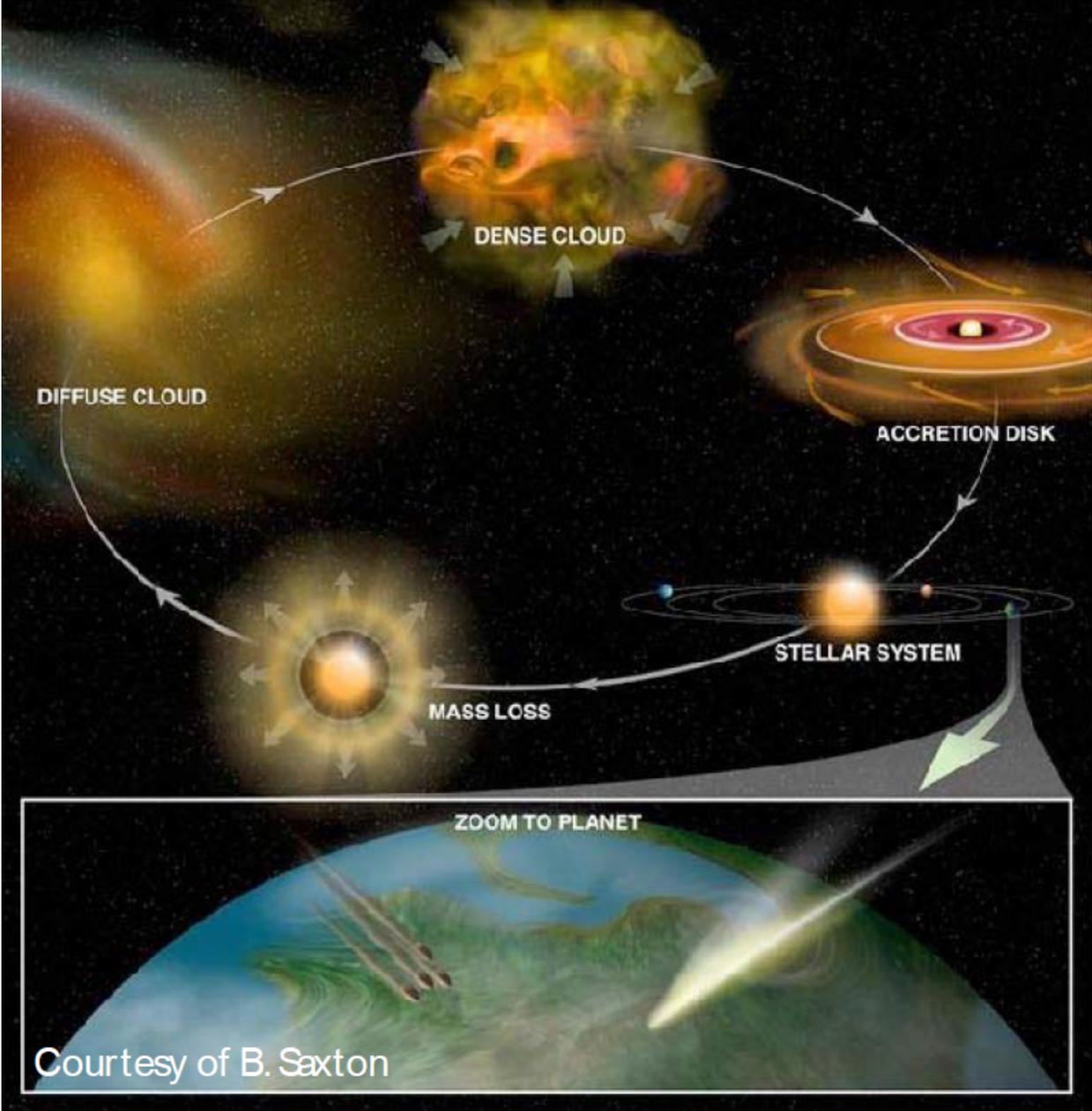
Spektrometer mit Multireflexionszelle

Mikrowellenbereich $0.1 - 1 \text{ cm}^{-1}$

Fourier transform microwave (FTMW) Spektrometer

Moleküle im interstellaren Medium

Der Kreis der Materie im Weltall



Moleküle im Interstellaren Medium: die Geschichte

1963 – OH

Bis 1968 – nur zweiatomige Moleküle (natürliche Grenze?)

1968 – NH₃ und H₂O

Früh 1970er – CO (CO/H₂ ≈ 10⁻⁴)

Bis 1970er – 6 Moleküle

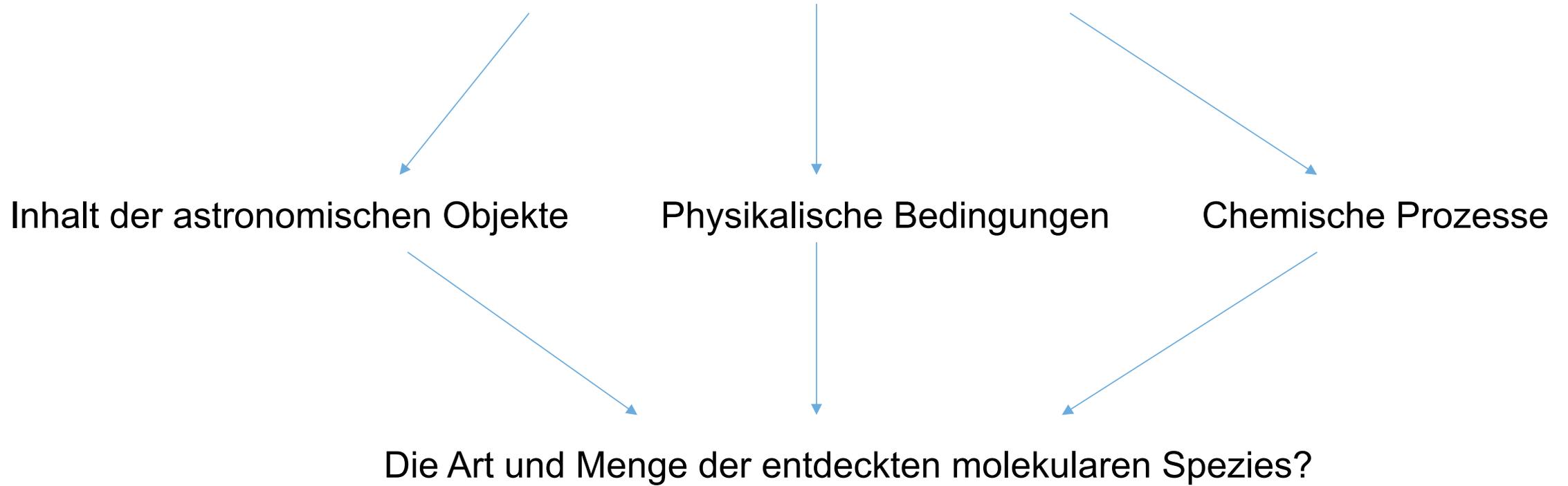
Bis 1980er – 51 Moleküle

Bis 1990er – 85 Moleküle

Bis 2004 – 130 Moleküle

Heute – ~200 Moleküle

Moleküle im interstellaren Medium



Entdeckte Moleküle im interstellaren Medium (~200)

H2	H3+	CH3	CH4	CH3OH	CH3NH2	HCOOCH3	(CH3)2O	(CH3)2CO
CO	CH2	NH3	CH2NH	CH3SH	CH3CCH	CH3C3N	C2H5OH	CH3C5N
CS	NH2	H3O+	H2CCC	C2H4	CH3CHO	HC6H	C2H5CN	CH3CH2CHO
CN	H2O	H2CO	c-C3H2	CH3CN	c-CH2OCH2	C7H	CH3C4H	(CH2OH)2
C2	H2S	H2CS	CH2CN	CH3NC	CH2CHCN	HOCH2CHO	C8H	HCOOC2H5
CH	CCH	c-C3H	NH2CN	CH2CHO	HC5N	CH3COOH	HC7N	HC9N
CH+	HCN	I-C3H	CH2CO	NH2CHO	C6H	H2CCCHCN	CH3CONH2	CH3C6H
HF	HNC	C2H2	HCOOH	HC3NH+	CH2CHOH	H2C6	CH3CHCH2	C6H6
CF+	HCO	HCNH+	C4H	H2CCCC	C6H-	CH2CHCHO	C8H-	C3H7CN
SO	HCO+	H2CN	HC3N	C5H		NH2CH2CN		HC11N
SS	HOC+	HCCN	HCCNC	HC4H				C2H5OCH3
SC	N2H+	HNCO	HNCCC	HC4N				
SN	HNO	HOCN	H2COH+	c-C3H2O				
NH	HCS+	HCNO	C4H-	CH2CNH				
NO	C3	HNCS	SH4	C5N-				
SO	C2O	HSCN	C5	C5N	~40 extragalactic molecules			
SO+	C2S	C3N	SiC4		~5 in exoplanetary atmospheres			
CP	SO2	C3O	CNCHO					
PO	N2O	C3S						
PN	CO2	C3N-						
HCl	H2O+	HCO2+						
KCl	H2Cl+	CNCHO						
AlCl	OCS	C-SC2						
OH	MgNC							
OH+	MgCN							
SH	NaCN							
CN-	SCN							

<http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>

Molecule	Average abundance relative to H or H ₂	Average abundance (fraction of gas phase elemental ^a)
CH	3.5×10^{-8}	1.3×10^{-4}
CH ₂	1.6×10^{-8}	6×10^{-5}
CH ⁺	6×10^{-9}	4×10^{-5}
CH ₃ ⁺	$< 2 \times 10^{-9}$	$< 1.4 \times 10^{-5}$
NH	8×10^{-9}	6×10^{-5}
NH ₂	4×10^{-9}	3×10^{-5}
NH ₃	4×10^{-9}	3×10^{-5}
NH ⁺	$< 4 \times 10^{-10}$	$< 6 \times 10^{-6}$
OH	1×10^{-7}	1.6×10^{-4}
H ₂ O	2.4×10^{-8}	4×10^{-5}
OH ⁺	1.2×10^{-8}	4×10^{-5}
H ₂ O ⁺	2×10^{-9}	6.5×10^{-6}
H ₃ O ⁺	2.5×10^{-9}	4×10^{-6}
HF	1.4×10^{-8}	0.4
SH	1.1×10^{-8}	4×10^{-4}
H ₂ S	5×10^{-9}	1.8×10^{-4}
SH ⁺	1.1×10^{-8}	8×10^{-4}
HCl	1.5×10^{-9}	0.004
HCl ⁺	8×10^{-9}	0.04
H ₂ Cl ⁺	3×10^{-9}	0.02
ArH ⁺	3×10^{-10}	1×10^{-4}

Credit: Gerin, Neufeld, Goicoechea, 2016

Komplexe organische Moleküle (COMs)

6 oder mehr Atome (Herbst & van Dishoeck 2009)

Kohlenstoffketten: C_nH , C_nH^- , $HC_{2n}CN$

Terrestrisch-ähnliche: Alkohole (CH_3OH , C_2H_5OH),
Ester ($HCOOCH_3$),
Zucker ($HOCH_2-CHO$),
...

Kohlenstoff Formen: Fulleren (C_{60} , C_{60}^+ , C_{70}),
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAHs)

beträchtliche Lücke zwischen großen Kohlenstoffarten und anderen COMs

Zucker im interstellaren Medium

The image features a colorful nebula representing the interstellar medium. In the upper left, a circular inset shows a ball-and-stick model of a complex organic molecule. In the upper right, a photograph shows two white sugar crystals. In the lower right, a ball-and-stick model of glycolaldehyde is shown. A white box on the left side of the nebula is connected by a dotted line to the circular inset. The text 'IRAS 16293-2422' is positioned below this box. The text 'Glycolaldehyde (HOCH₂-CH=O)' and 'Baustein für Ribonukleinsäure' is positioned below the glycolaldehyde model. The citation 'Jørgensen et al. 2012 ApJ757 L4' is at the bottom left.

IRAS 16293-2422

Glycolaldehyde (HOCH₂-CH=O)
Baustein für Ribonukleinsäure

Jørgensen et al. 2012 ApJ757 L4

Der Ursprung des Lebens



Lass uns ein Molekül im interstellaren Medium detektieren:

Molekül, Frequenz, Teleskop, Astronomisches Objekt