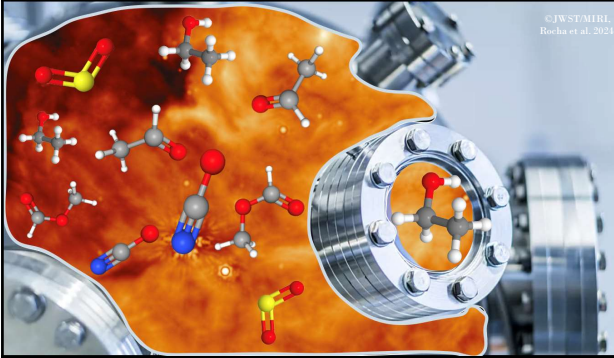


## Van simpel naar complex: hoe groot kunnen interstellair moleculen worden?



© JWST/MIRI  
Roca et al. 2024

Martijn van Gelder

Cursus "evolutie is overal" 15 mei 2024

## Mijn achtergrond: astrochemie

De astrochemie is een vakgebied dat onderzoek verricht naar de abundantie van elementen, de chemische reacties die optreden in het universum en de daaruit gevormde verbindingen en ionen.

Het vormt een overlappingsgebied van de scheikunde en astronomie.

- Wikipedia

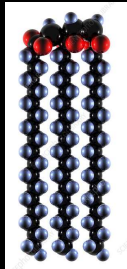
## Moleculaire astrochemie

De studie van moleculen en hun chemische reacties in het universum.

Voornamelijk ten tijde van het vormen van sterren en planeten en hun verdere evolutie

## Hoe complex kunnen moleculen worden?

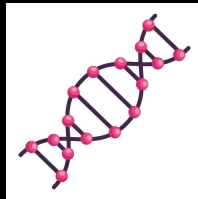
Vetten



Eiwitten



DNA



Aanwezig op onze aarde, (nog) niet waargenomen in de ruimte

## Het periodieksysteem der elementen

Meer dan 100 elementen om moleculen van te kunnen bouwen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H Hydrogen																	He Helium
Li Lithium	Be Beryllium											B Boron	C Carbon	N Stikstof	O Zwavel	F Fluor	Ne Neon
Na Natrium	Mg Magnesium											Al Aluminium	Si Silicium	P Fosfor	S Zwavel	Cl Chloor	Ar Argon
K Kalium	Ca Calcium	Sc Scandium	Ti Titanium	V Vanadium	Cr Chroom	Mn Manganees	Fe IJzer	Co Cobalt	Ni Nikkel	Cu Koper	Zn Zink	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsen	Se Selen	Br Bromine	Kr Krypton
Rb Rubidium	Sr Strontium	Y Yttrium	Zr Zirkon	Nb Niobium	Mo Molibdeen	Tc Technetium	Ru Ruthenium	Rh Rhodium	Pd Palladium	Ag Zilver	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimon	Te Telluur	I Jood	Xe Xenon
Cs Cesium	Ba Barium	La-Lu Lanthaniden	Hf Hafnium	Ta Tantalum	W Wolfram	Re Rhenium	Os Osmium	Ir Iridium	Pt Platina	Au Goud	Hg Quecksilber	Tl Thallium	Pb Blei	Bi Bismut	Po Polonium	At Astatine	Rn Radon
Fr Francium	Ra Radium	Ac-Lr Actiniden	Rf Rutherfordium	Db Dubnium	Sg Seaborgium	Bh Bohrium	Hs Hassium	Mt Meitnerium	Ds Darmstadtium	Rg Roentgenium	Cn Copernicium	Nh Nihonium	Fl Flerovium	Mc Moscovium	Lv Livermorium	Ts Tennessium	Og Oganesson
La Lanthanum	Ce Ceetium	Pr Praseodymium	Nd Neodymium	Pm Promethium	Sm Samarium	Eu Europium	Gd Gadolinium	Tb Terbium	Dy Dysprosium	Ho Holmium	Er Erbium	Tm Thulium	Yb Ytterbium	Lu Lutetium			
Ac Actinium	Th Thorium	Pa Protactinium	U Uranium	Np Neptunium	Pu Plutonium	Am Americium	Cm Curium	Bk Berkelium	Cf Californium	Es Einsteinium	Fm Fermium	Md Mendelevium	No Nobelium	Lr Lawrencium			

CNPO

## Het periodieksysteem voor sterrenkundigen

H	He		
1.0 by number	0.1		
3	1		
□	□		
C	N	O	Ne
.	.	.	.
Mg	Si	S	Ar
.	.	.	.
Fe			

B. McCall 2001

## Het periodieksysteem voor moleculaire astrochemie

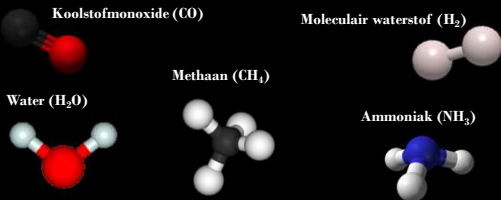
H	He		
1.0 by number			
3	1		
□	□		
C	N	O	Ne
.	.	.	.
Mg	Si	S	Ar
.	.	.	.
Fe			

B. McCall 2001

## Wat zijn veel voorkomende moleculen in de ruimte?

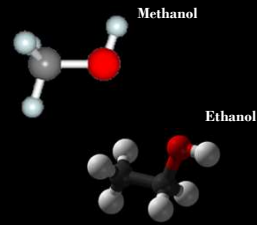
- Lage dichtheid ( $<10^8$  moleculen per  $\text{cm}^3$ ) vergeleken met de atmosfeer van de aarde ( $\sim 3 \times 10^{25}$  moleculen per  $\text{cm}^3$ )
- Vaak lagere temperaturen (tot wel  $-260$  °C)

→ Kans dat 2 deeltjes in de gasfase reageren in de ruimte klein



## Wat is de sterrenkundige definitie van een complex organisch molecuul?

6 of meer atomen, waarvan één koolstof (C)

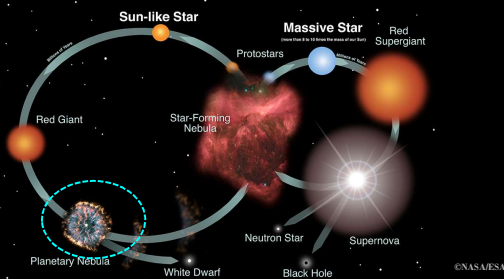


Alle "normale" chemici

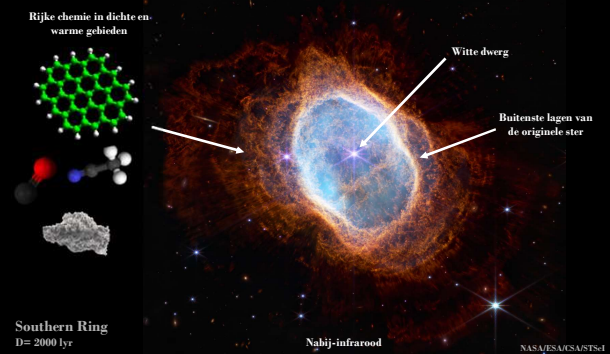


AI generated

## Moleculen in de ruimte: het begin bij het eind



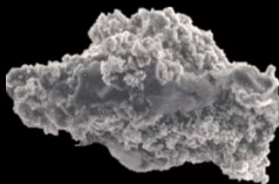
## Dood van een "normale" ster: Planetaire nevel



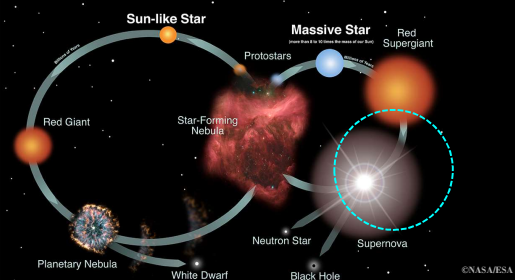
## Stofkorrels in de interstellaire ruimte

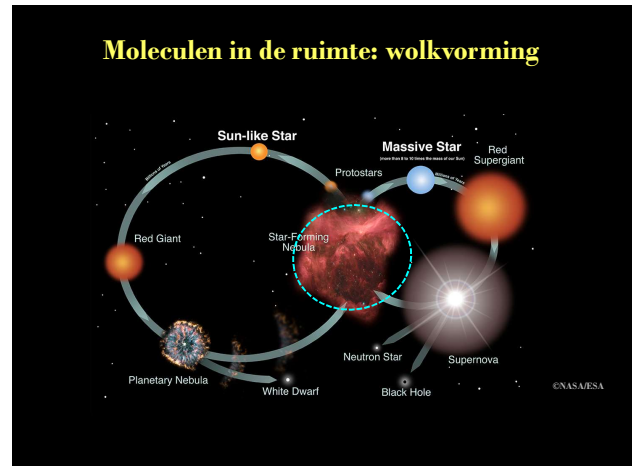
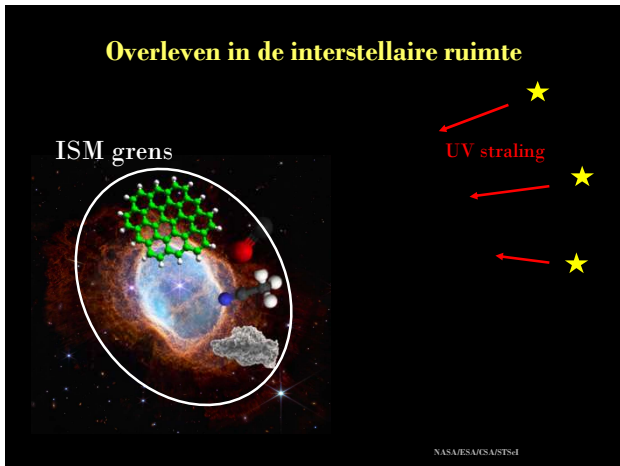
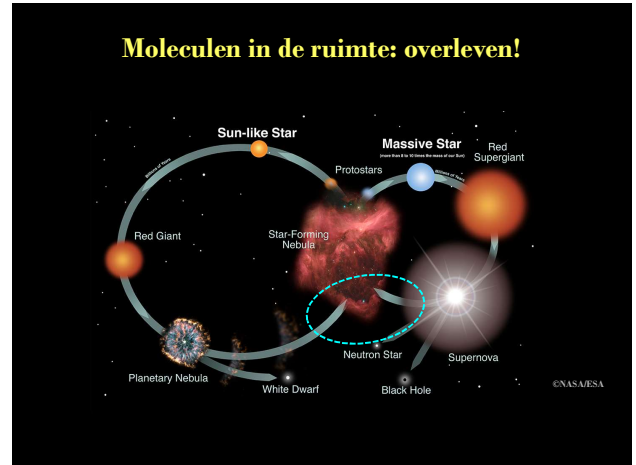
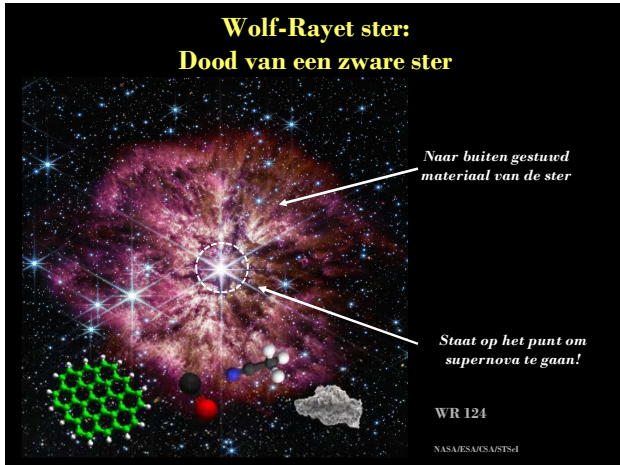
Bestaan voornamelijk uit metalen zoals ijzer (Fe), silicium (Si) en magnesium (Mg) maar bevatten ook veel zuurstof (O) en koolstof (C)

Gemiddeld zo'n 0.1-1 micrometer groot

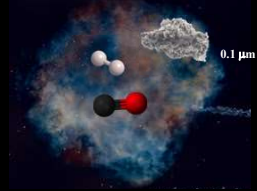


## Moleculen in de ruimte: het begin bij het eind





## Moleculen tijdens de vorming van een ster



Moleculaire wolk van gas en stof

Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO

## Moleculen tijdens de vorming van een ster

### The formation of water on interstellar dust particles

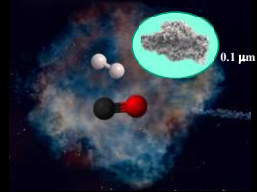
prof. Ewine F. van Dishoeck, PhD, A.L.M. "Thanja" Lamberts, MSc

Universiteit Leiden  
The Netherlands



Discover the world at Leiden University

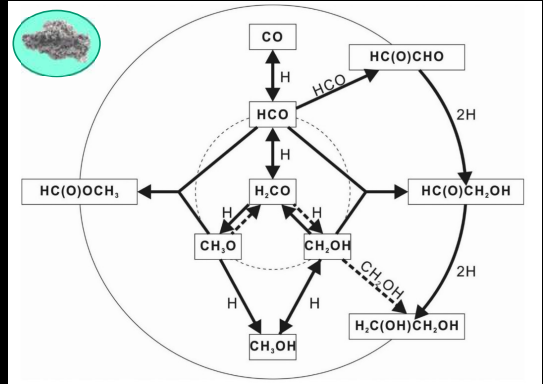
## Moleculen tijdens de vorming van een ster



Moleculaire wolk van gas, stof en simpele moleculen

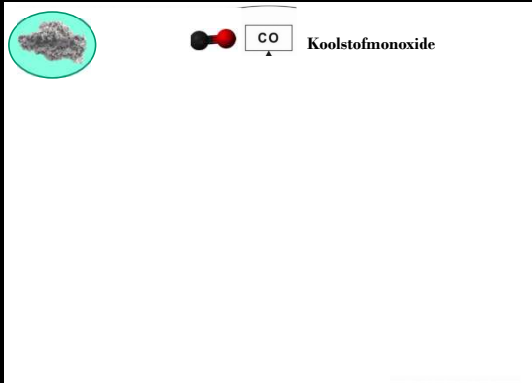
Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO

## Ook complexe organische moleculen vormen



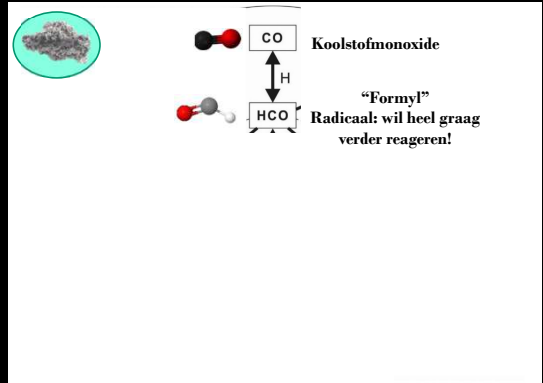
Chuang et al. 2016

## Ook complexe organische moleculen vormen



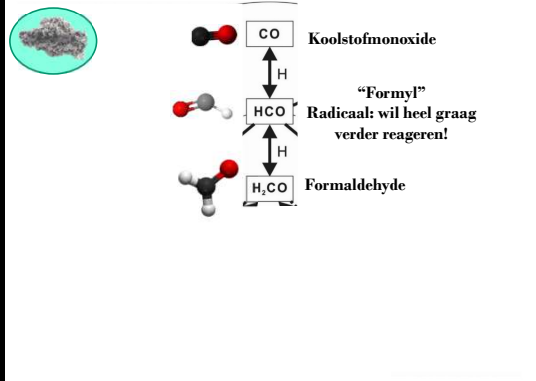
Chuang et al. 2016

## Ook complexe organische moleculen vormen



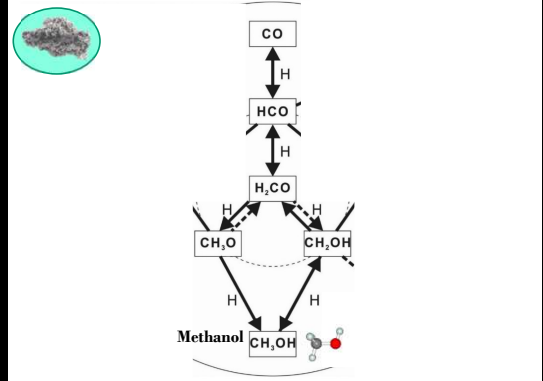
Chuang et al. 2016

### Ook complexe organische moleculen vormen



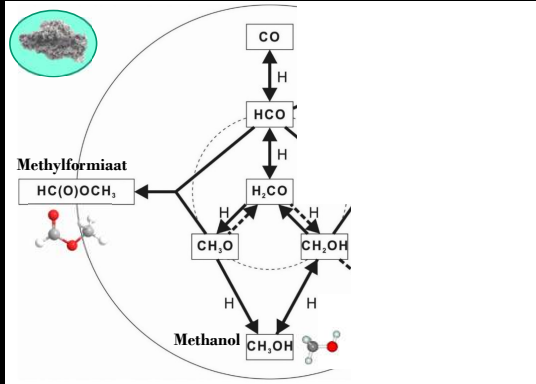
Chuang et al. 2016

### Ook complexe organische moleculen vormen



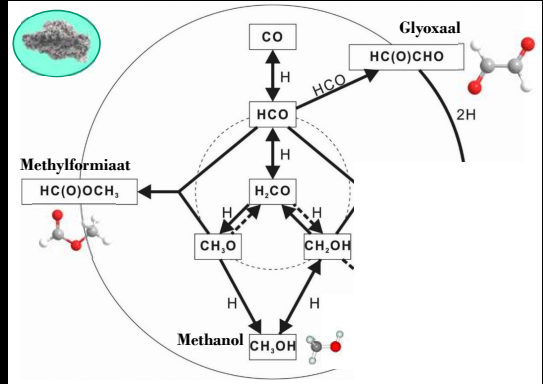
Chuang et al. 2016

### Ook complexe organische moleculen vormen



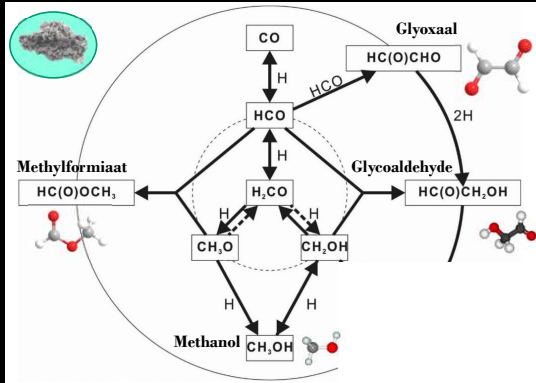
Chuang et al. 2016

### Ook complexe organische moleculen vormen



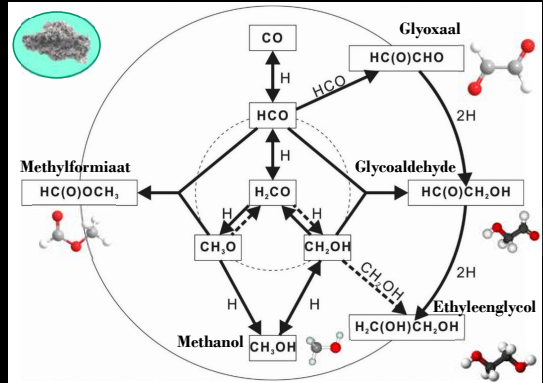
Chuang et al. 2016

### Ook complexe organische moleculen vormen



Chuang et al. 2016

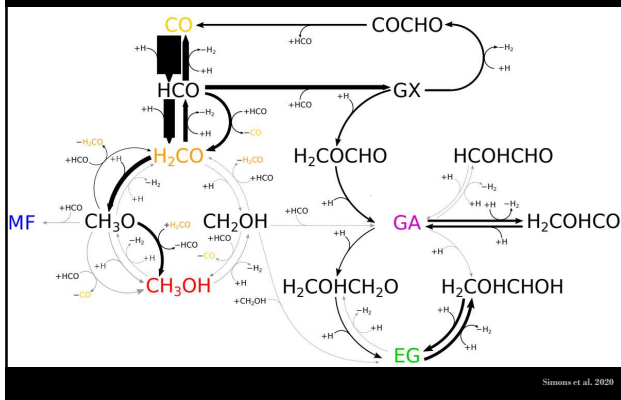
### Ook complexe organische moleculen vormen



Chuang et al. 2016



### Er vinden nog veel meer reacties plaats!



### Moleculen tijdens de vorming van een ster

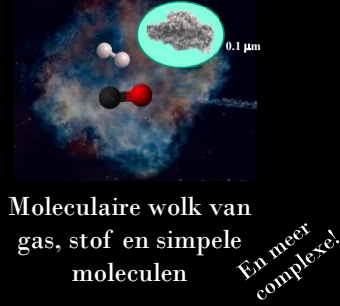


Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO

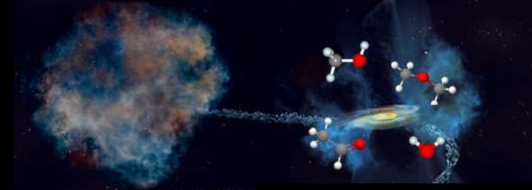
### Moleculen tijdens de vorming van een ster



Geboorte van een protoster

Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO

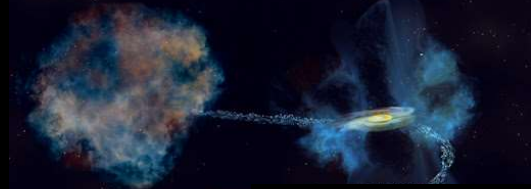
### Moleculen tijdens de vorming van een ster



Geboorte van een protoster en meer complexe moleculen

Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO

### Moleculen tijdens de vorming van een ster



De moleculaire wolk verdwijnt

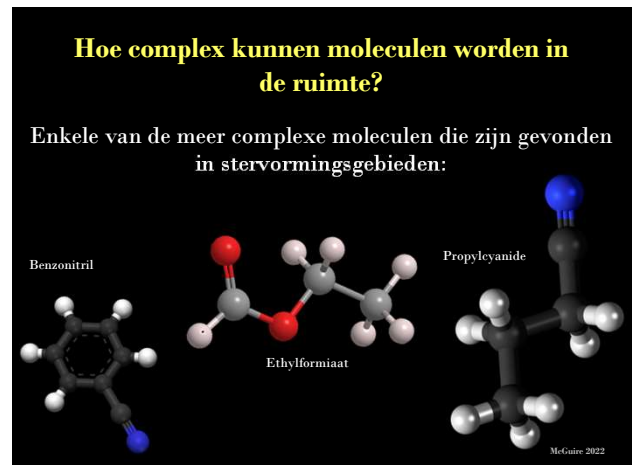
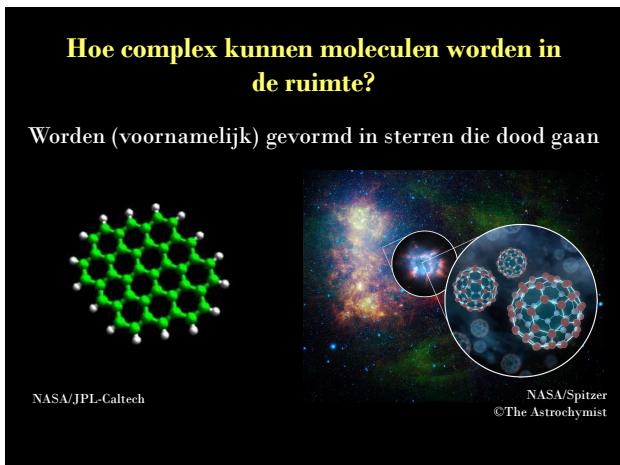
Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO

### Moleculen tijdens de vorming van een ster

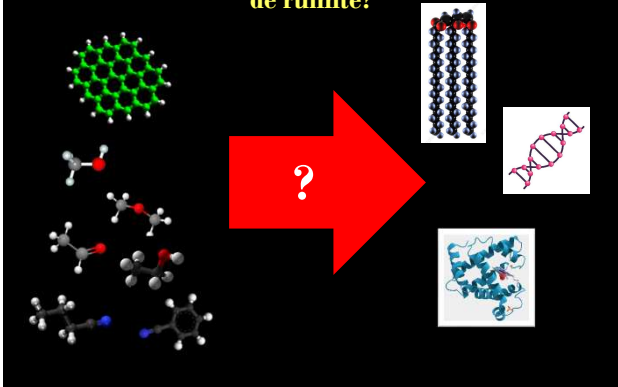


De moleculaire wolk verdwijnt, complexe moleculen moeilijker te detecteren!

Figure credits: Bill Saxton, NSF/AUI/NRAO



Hoe complex kunnen moleculen worden in de ruimte?



Waar zijn deze complexe moleculen waar te nemen?

In de gasfase rond een jonge protoster

In de ijsslagen rondom stofkorrels

Welke telescopen zijn het beste? Op welke golflengte kunnen we deze moleculen zien?

A diagram showing where complex molecules can be found. On the left, there are ball-and-stick molecular models. On the right, there are three glowing cyan spheres representing ice layers around dust grains. Below the diagram, there is a question about the best telescopes and wavelengths for observing these molecules.

### Stervormingsgebieden

Orionnevel

Pilaren der schepping



Figure credits: NASA/ESA Hubble space telescope



Figure credits: NASA/ESA Hubble space telescope

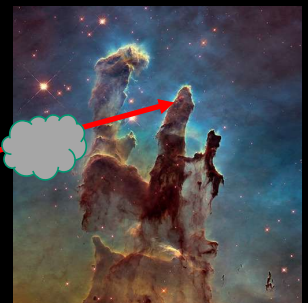
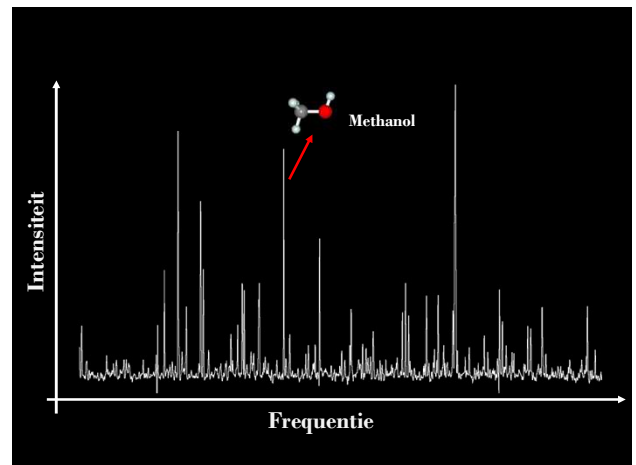
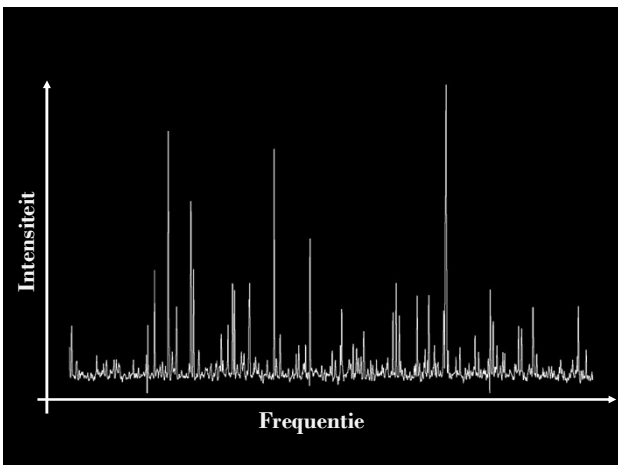
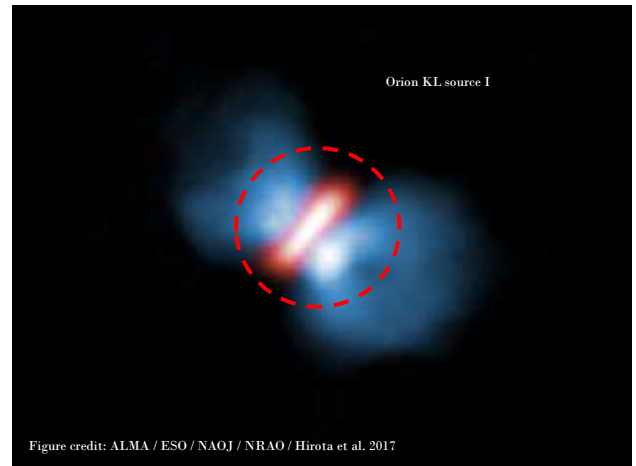
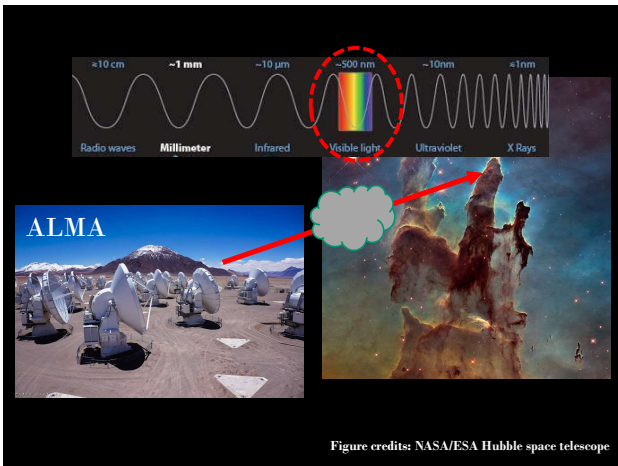
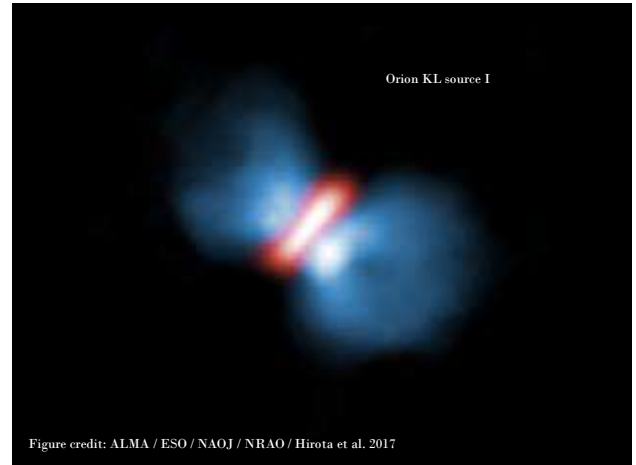
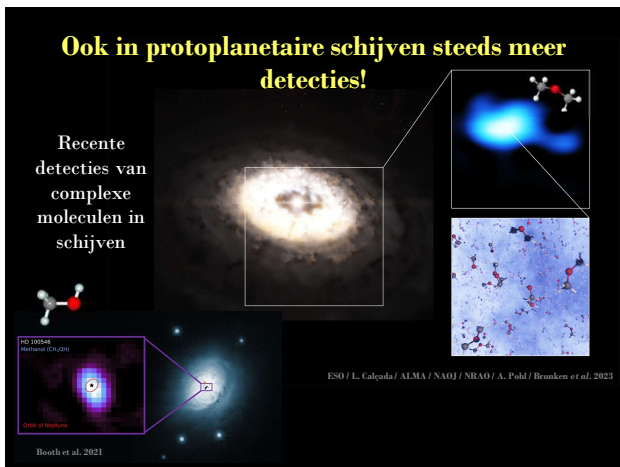
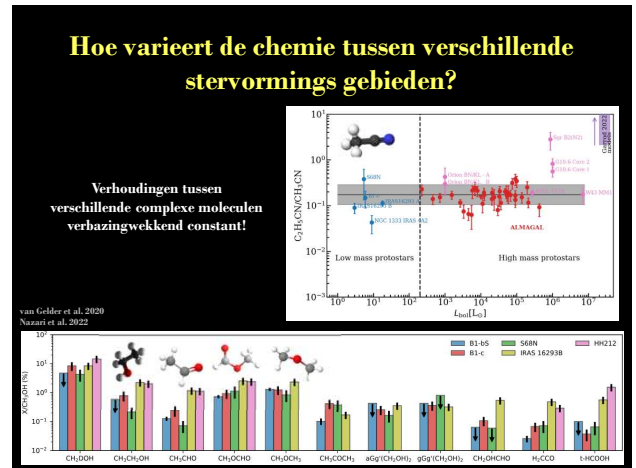
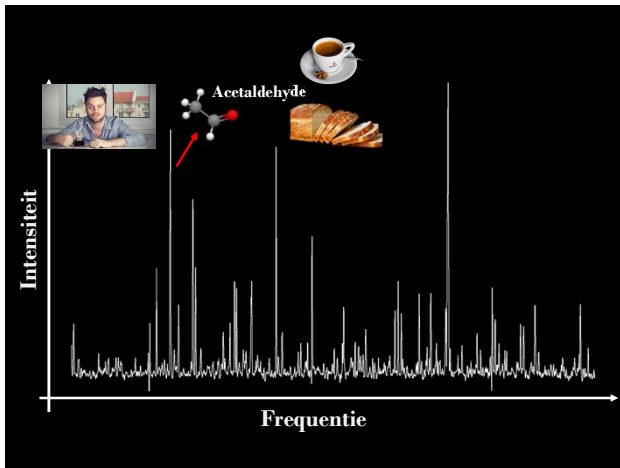
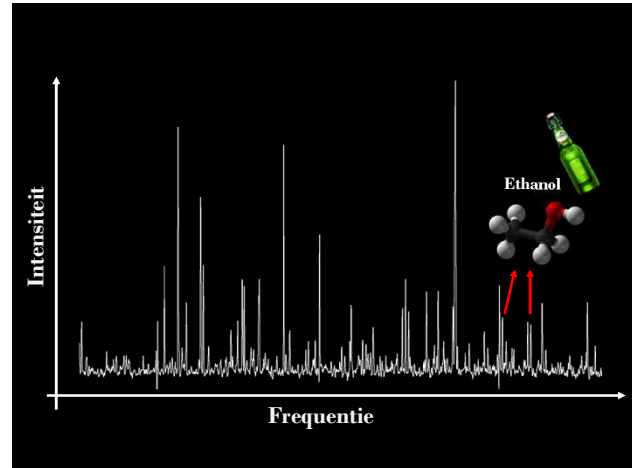
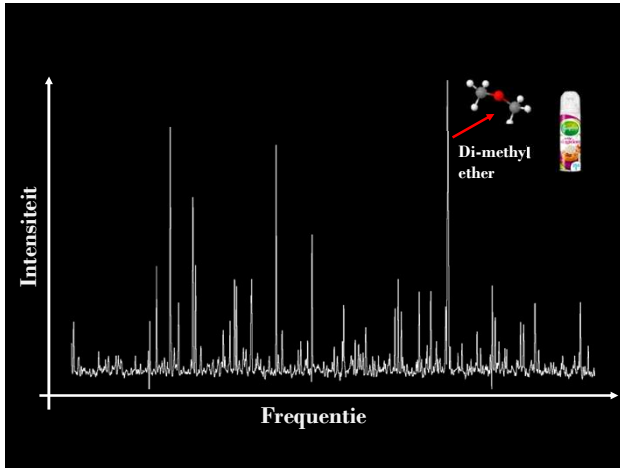
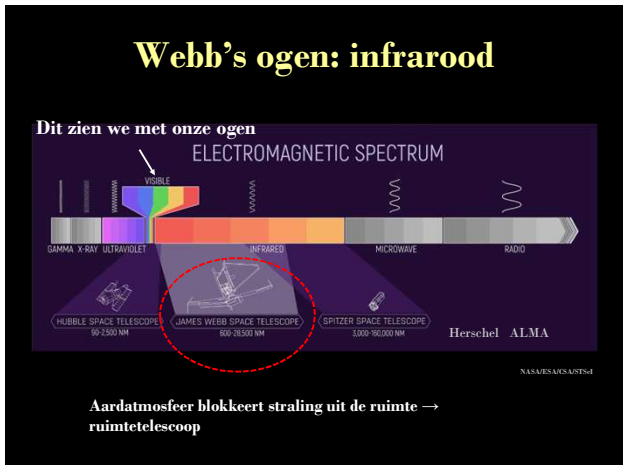
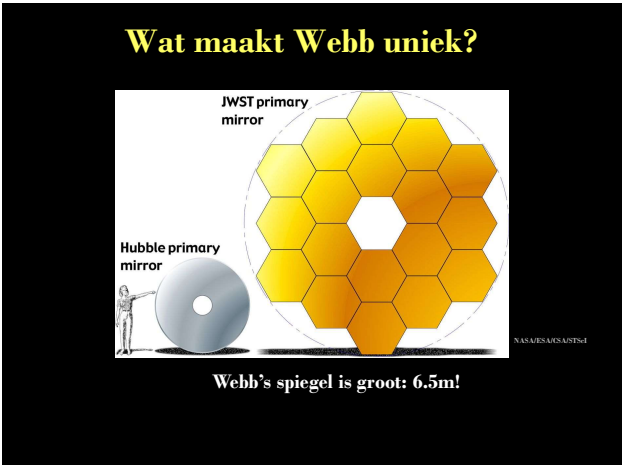
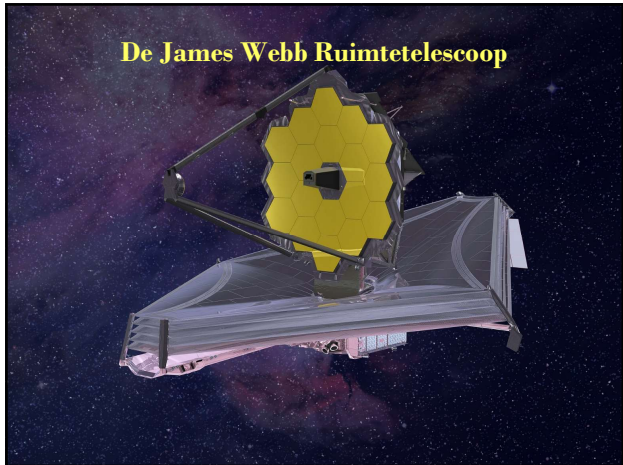


Figure credits: NASA/ESA Hubble space telescope

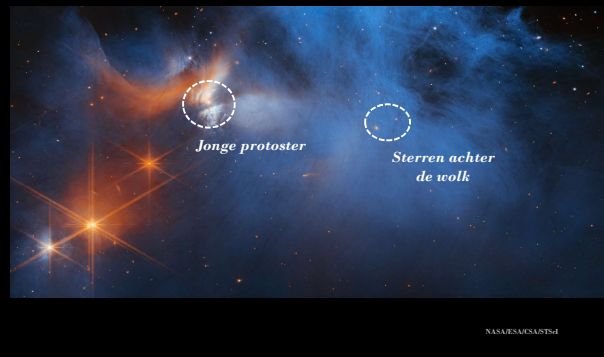




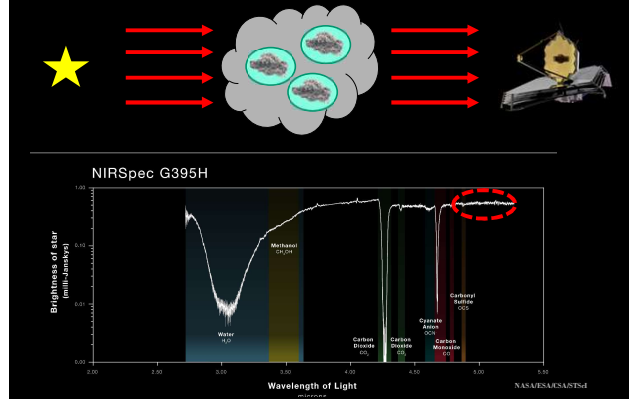




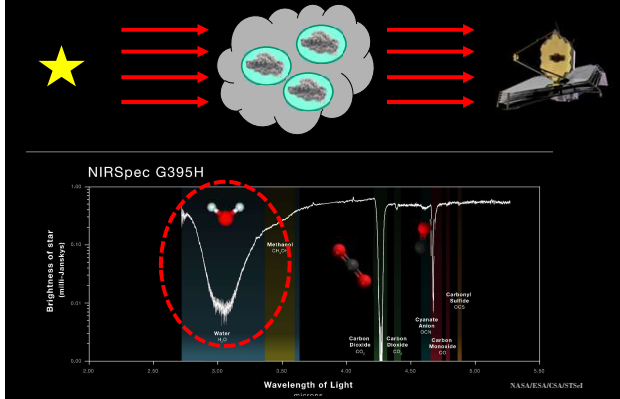
## Moleculaire wolk: Chameleon 1



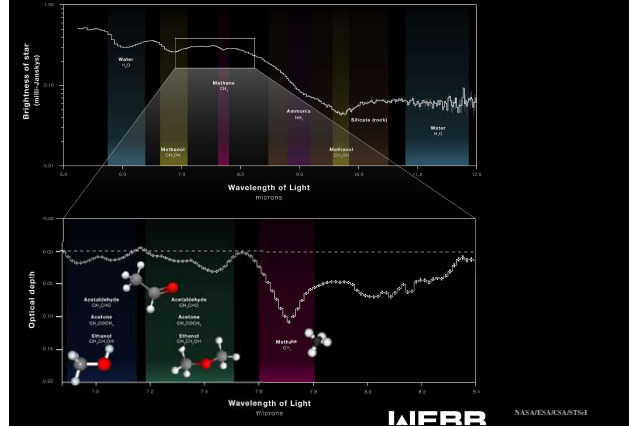
## Webb ziet ijslaag op stofkorrels



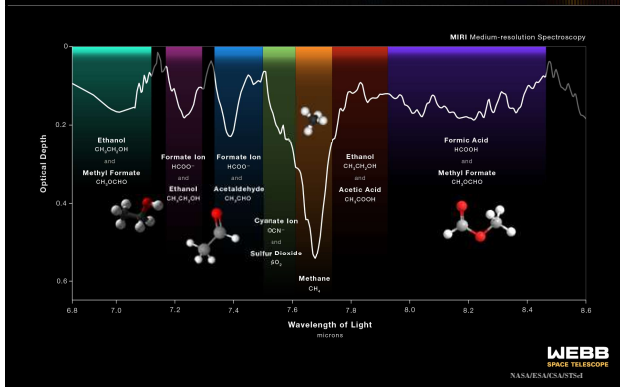
## Webb ziet ijslaag op stofkorrels



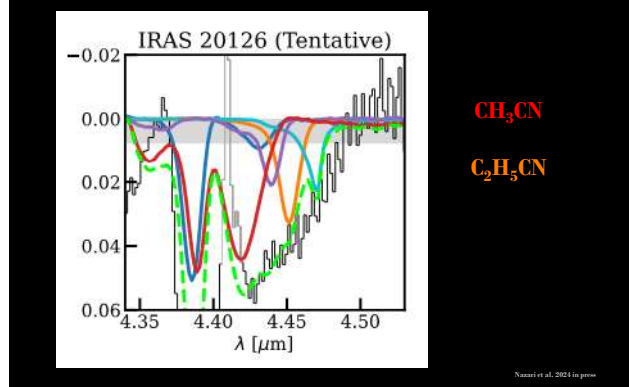
## MIRI LRS P750L



## Protoster: ijzen in de ineenstortende wolk



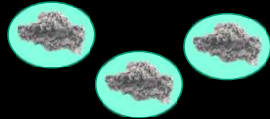
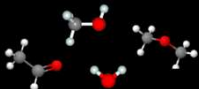
## Protoster: ijzen in de ineenstortende wolk



## Waar zijn deze complexe moleculen waar te nemen?

In de gasfase rond een jonge protoster

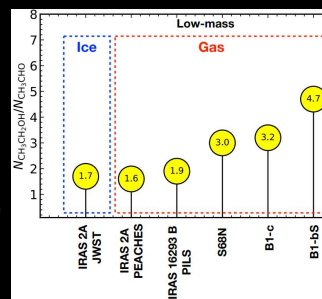
In de ijslagen rondom stofkorrels



## Wat zijn de verhoudingen tussen ijs en gas?



Verhouding gas en ijs bijna hetzelfde!  
Chemie in ijsfase dominant voor deze twee complexe moleculen



Bondu et al. 2021

## Wat kunnen we nog leren?

Overleven de complexe moleculen het van de moleculaire wolk naar de schijf?

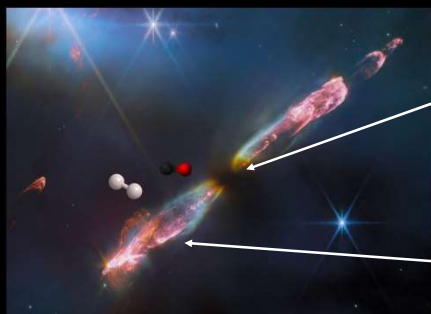
Overleven de moleculen het van schijf naar planeet?

Waar komen welke moleculen allemaal voor?

## Wat kunnen waarnemingen ons verder nog vertellen?

Wat heeft JWST ons tot nu toe verder allemaal geleerd over moleculen in de ruimte?

## Straalstromen van jonge protoster

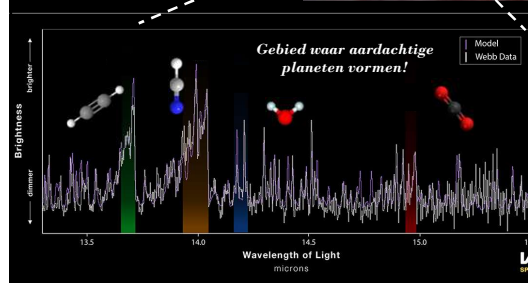
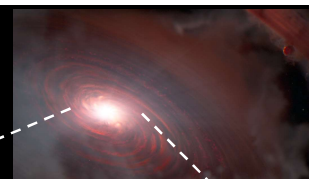


Protoster zelf niet zichtbaar

Straalstromen zijn ook moleculair!

NASA/ESA/CSST/4

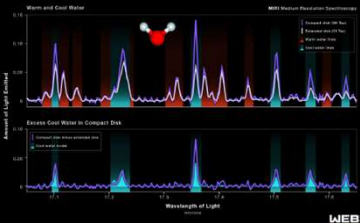
## Planeet-vormende schijf



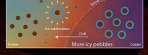
NASA/ESA/CSST/4



# Planet- vormende schijf

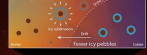


Higher water abundance



Compact Disk

Lower water abundance



Extended Disk

WEBB SPACE TELESCOPE NASA/ESA/CSA/STES/J