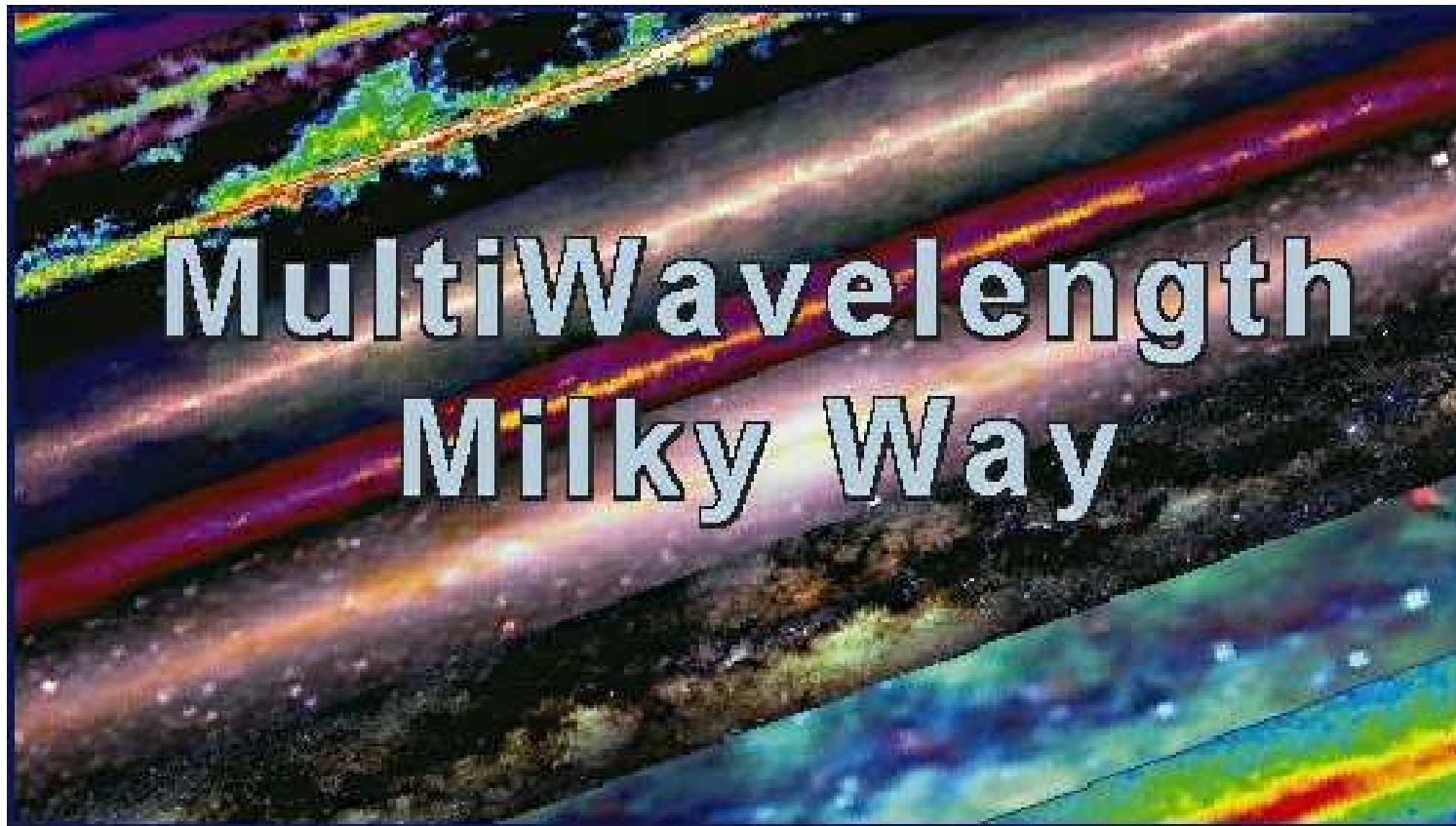
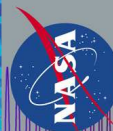
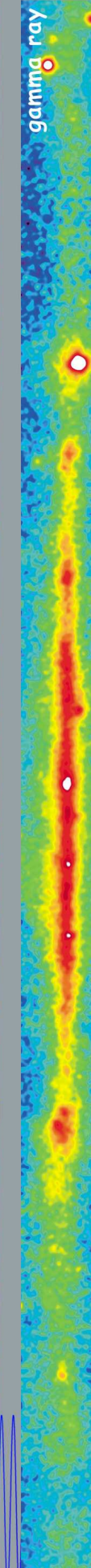
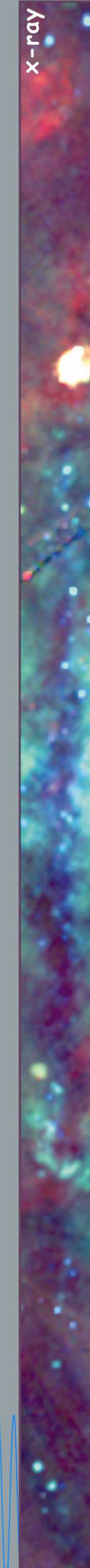
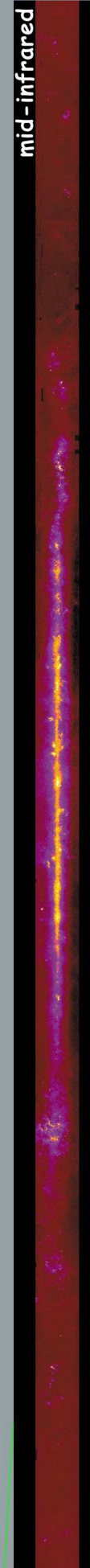
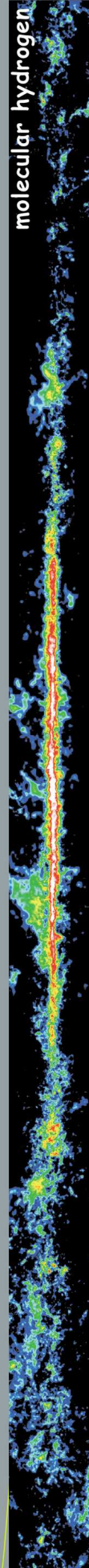
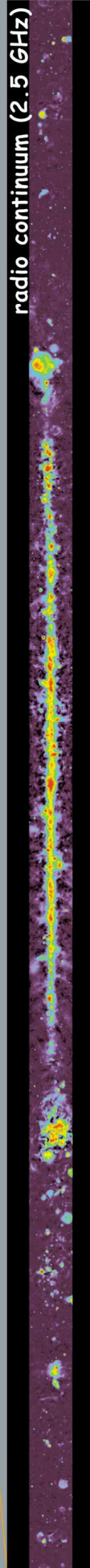
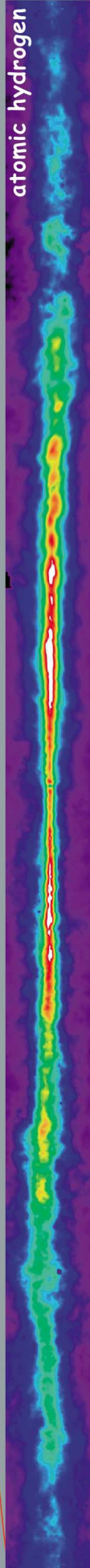
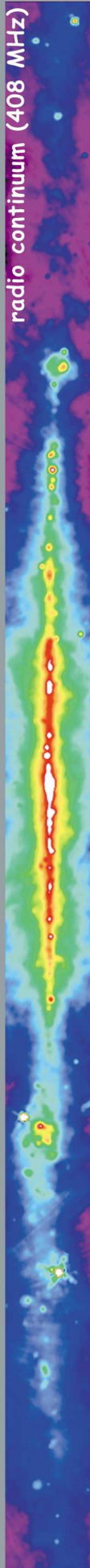


# Interstellair Medium

Wat en Waar?

- Gas (neutraal en geïoniseerd)
- Stof
- Magneetvelden
- Kosmische stralingsdeeltjes





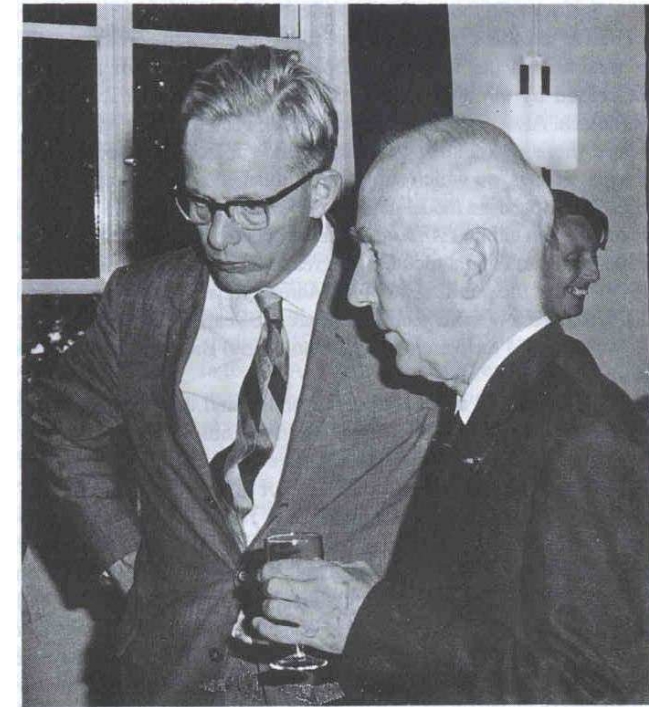
# Multiwavelength Milky Way

# Neutraal Waterstof

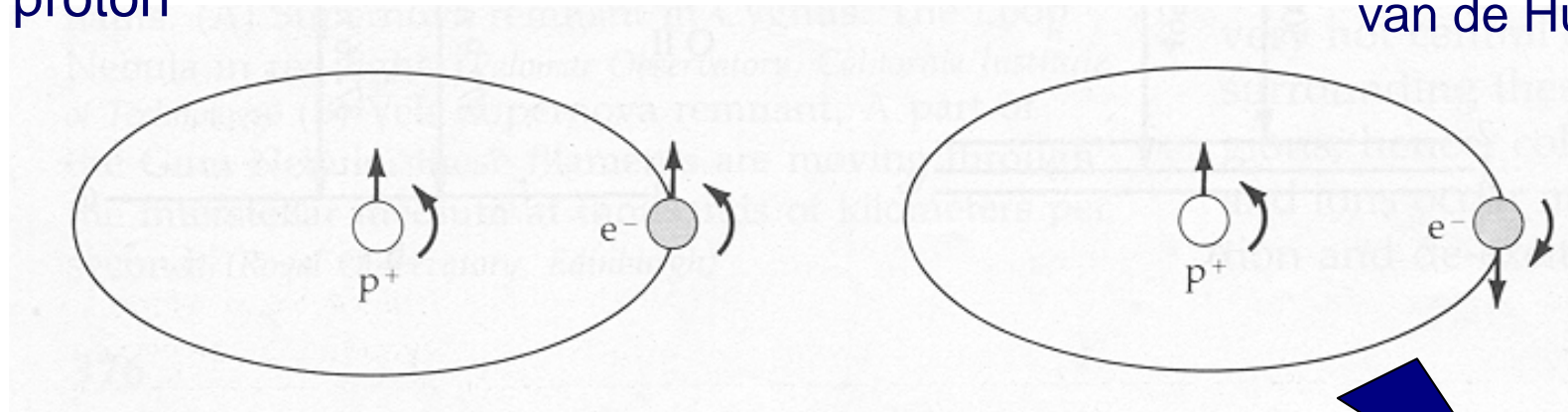
## 21-cm lijn-overgang van HI

Waarneembaarheid voorspeld door  
Henk van de Hulst

Spinflip van het electron van parallel naar  
anti-parallel vergeleken met de spin van het  
proton



van de Hulst en Oort

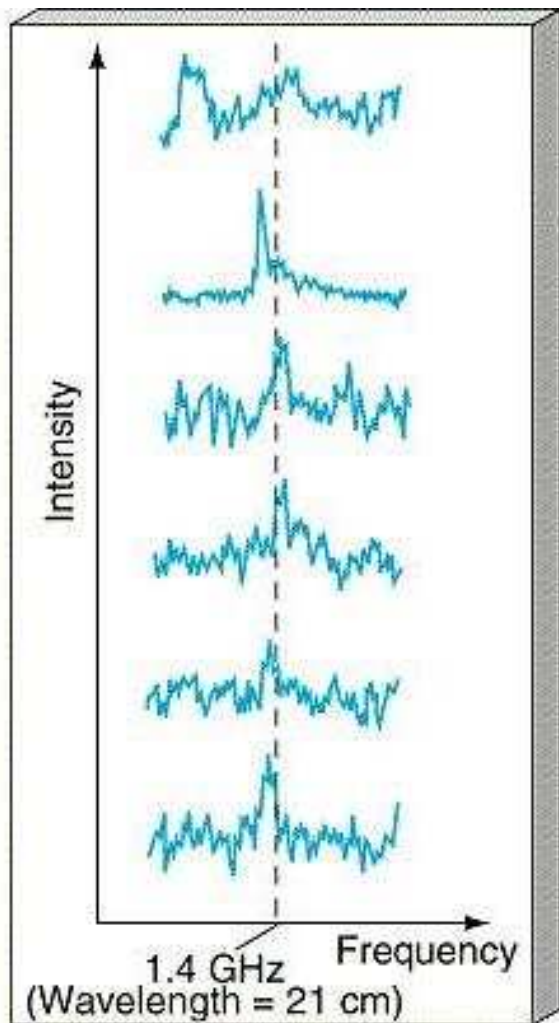


$$\Delta E = h\nu, \text{ met } \nu = 1420.405752 \text{ MHz}$$

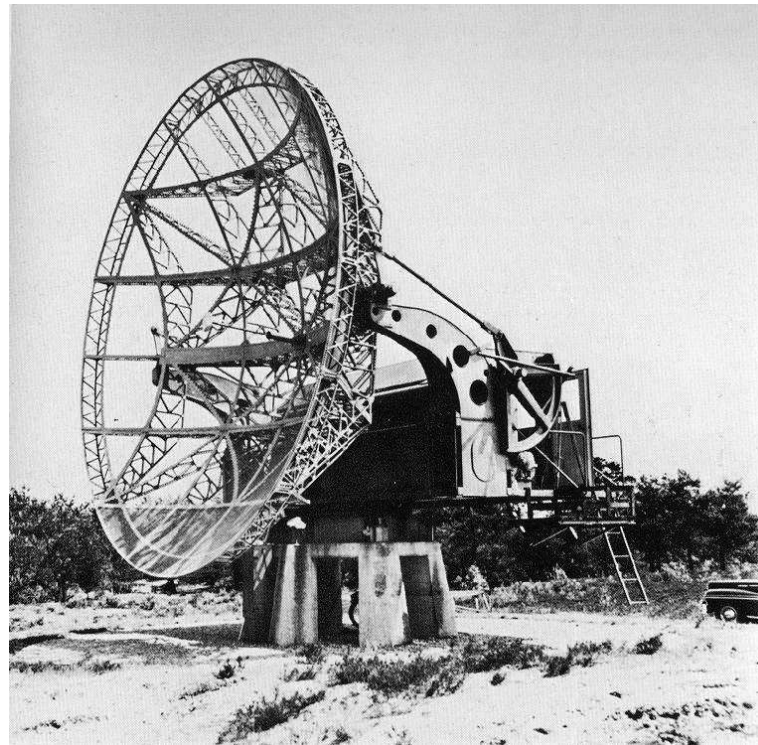
21 cm foton

# Radiometingen

Meet fluxdichtheid als functie van frekwentie  
d.w.z. als functie van snelheid (Doppler effect)

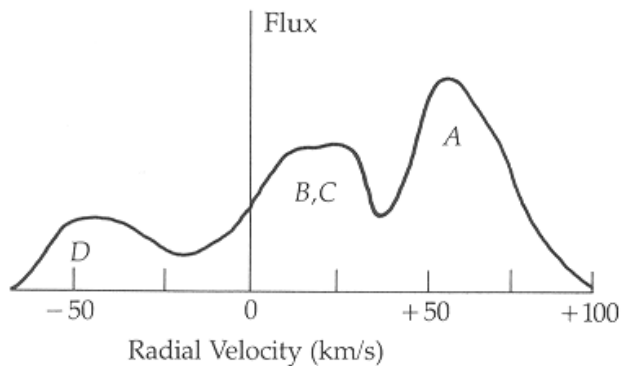


Integraal van de gemeten fluxdichtheid over  
snelheid geeft het totaal aantal HI atomen langs  
de gezichtslijn: de kolomdichtheid  $N_{\text{HI}}$  in  $\text{cm}^{-2}$



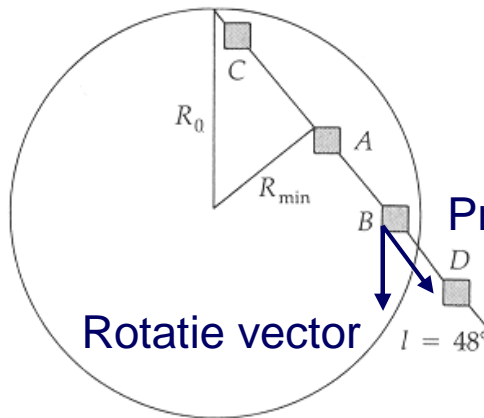
Eerste metingen met de radiotelescoop bij Kootwijk

Gemeten **radiële snelheid** geeft informatie over **positie** langs de gezichtlijn, dus kan er een 2D kaart van de HI in de Melkweg worden gemaakt.



Emissie profiel

A



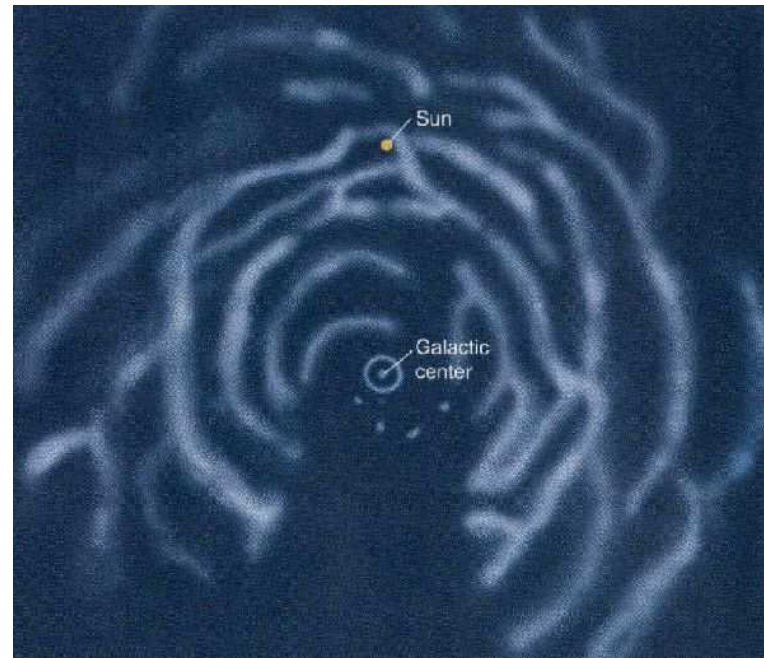
Rotatie vector

B

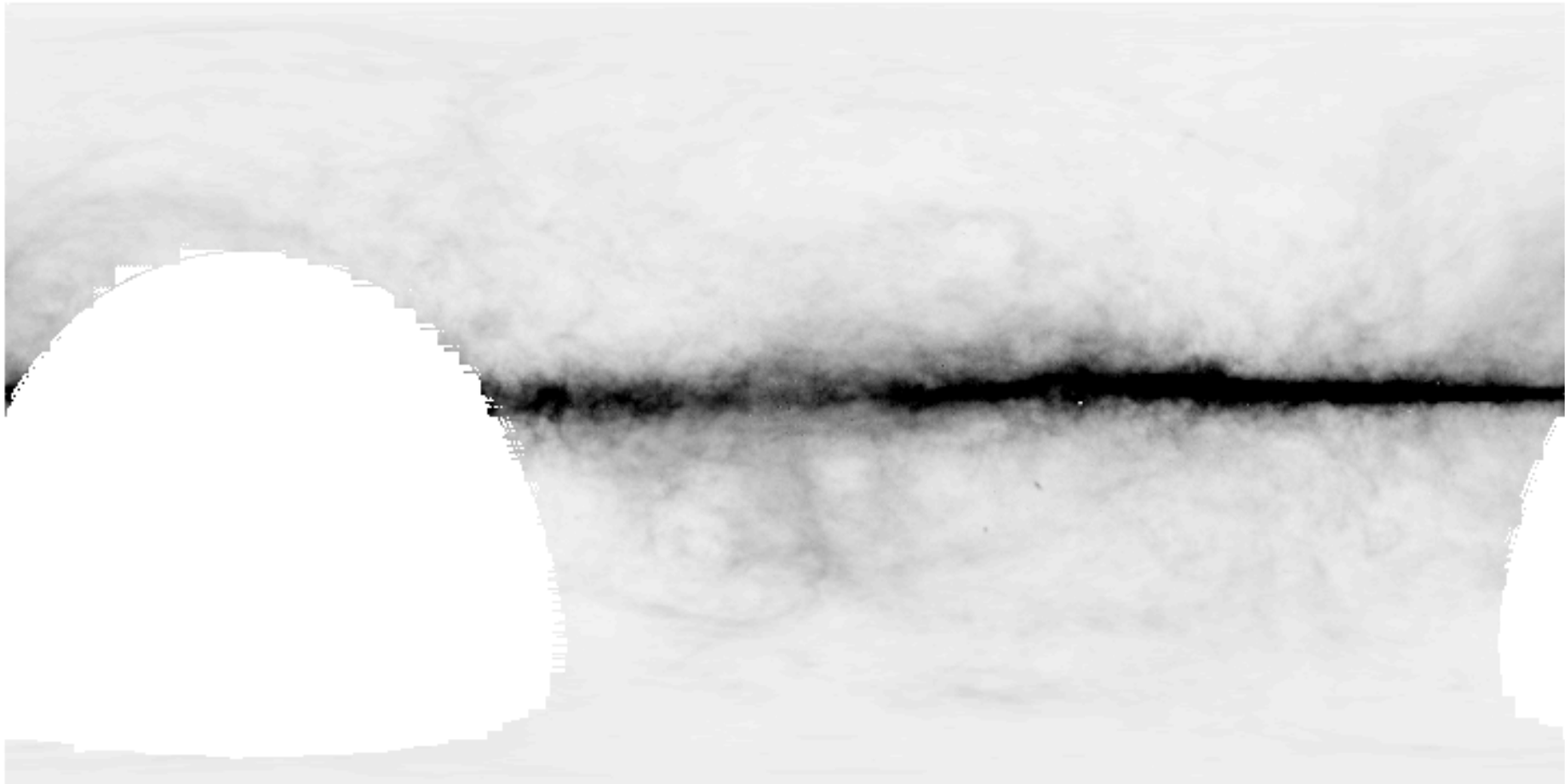
Locaties A t/m D van de emissie

Projectie langs de gezichtlijn d.w.z. de gemeten component

De uit de een 21-cm lijnsurvey van de noordelijke hemel geconstrueerde kaart van HI in de Melkweg →

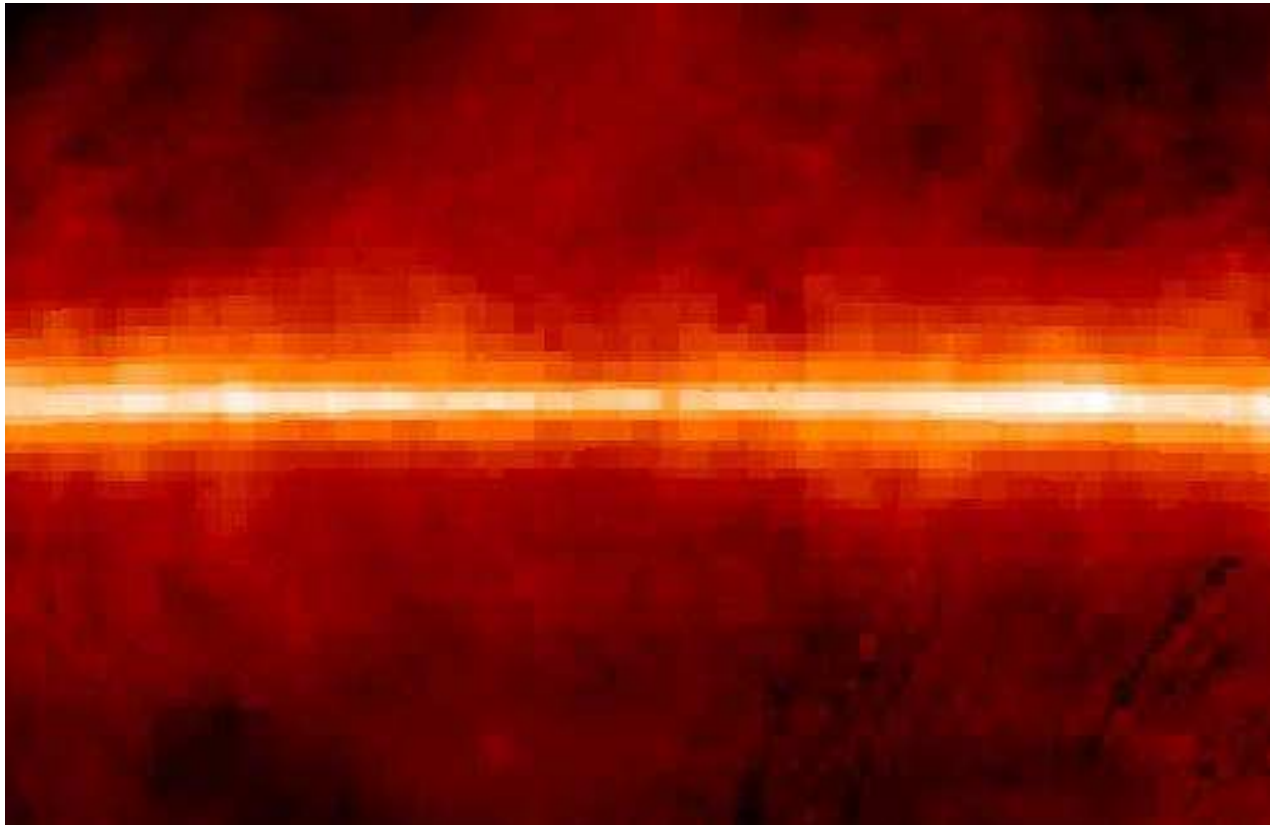


# de Melkweg in HI



# Centrale deel van de Melkweg

HI



# Centrale deel van de Melkweg

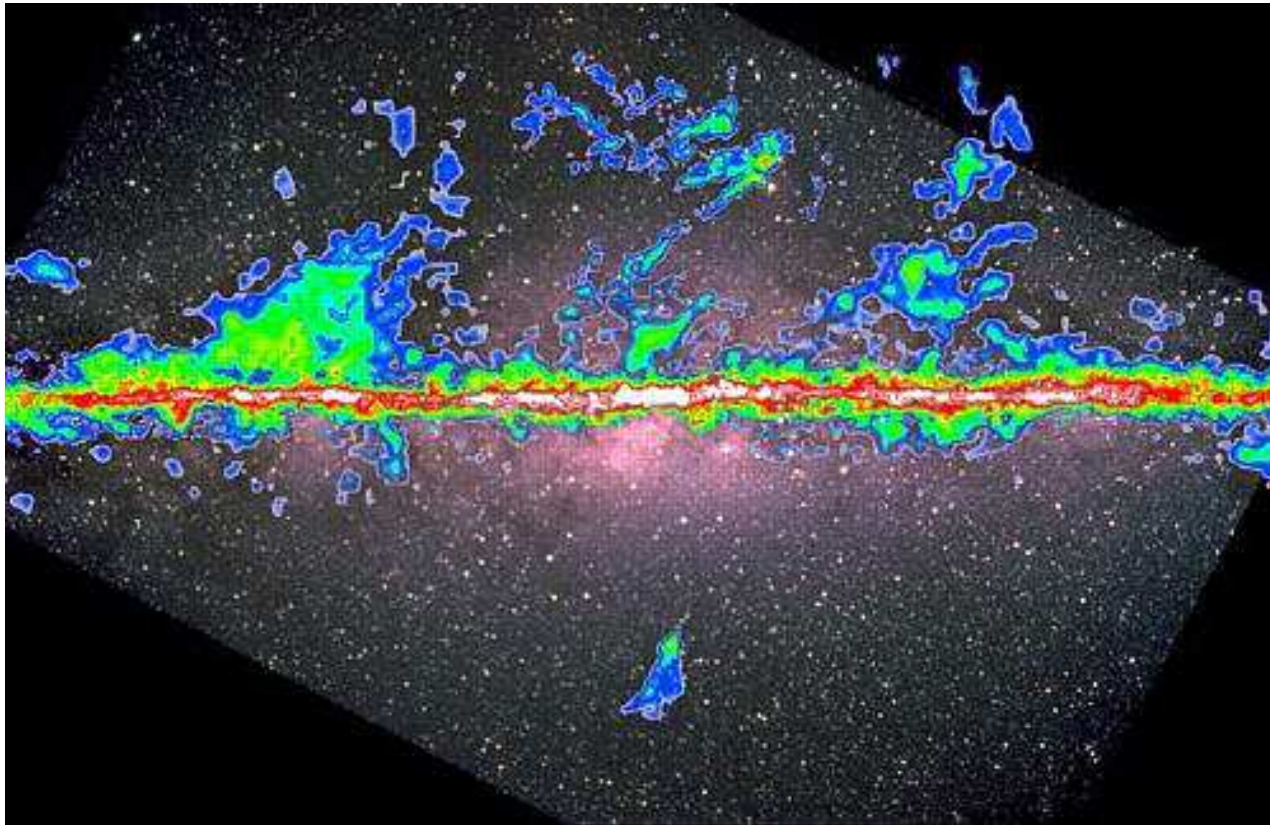
optisch





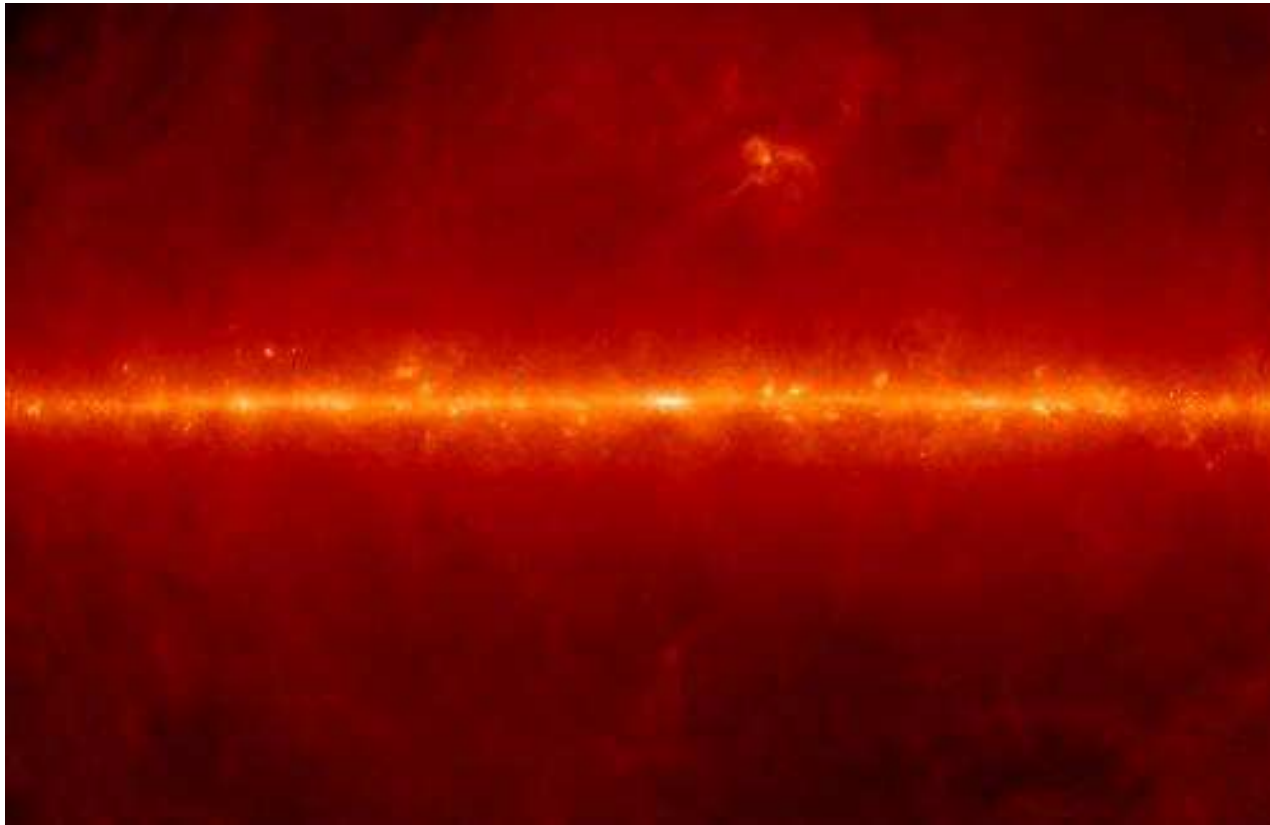
# Centrale deel van de Melkweg

optisch + CO



# Centrale deel van de Melkweg

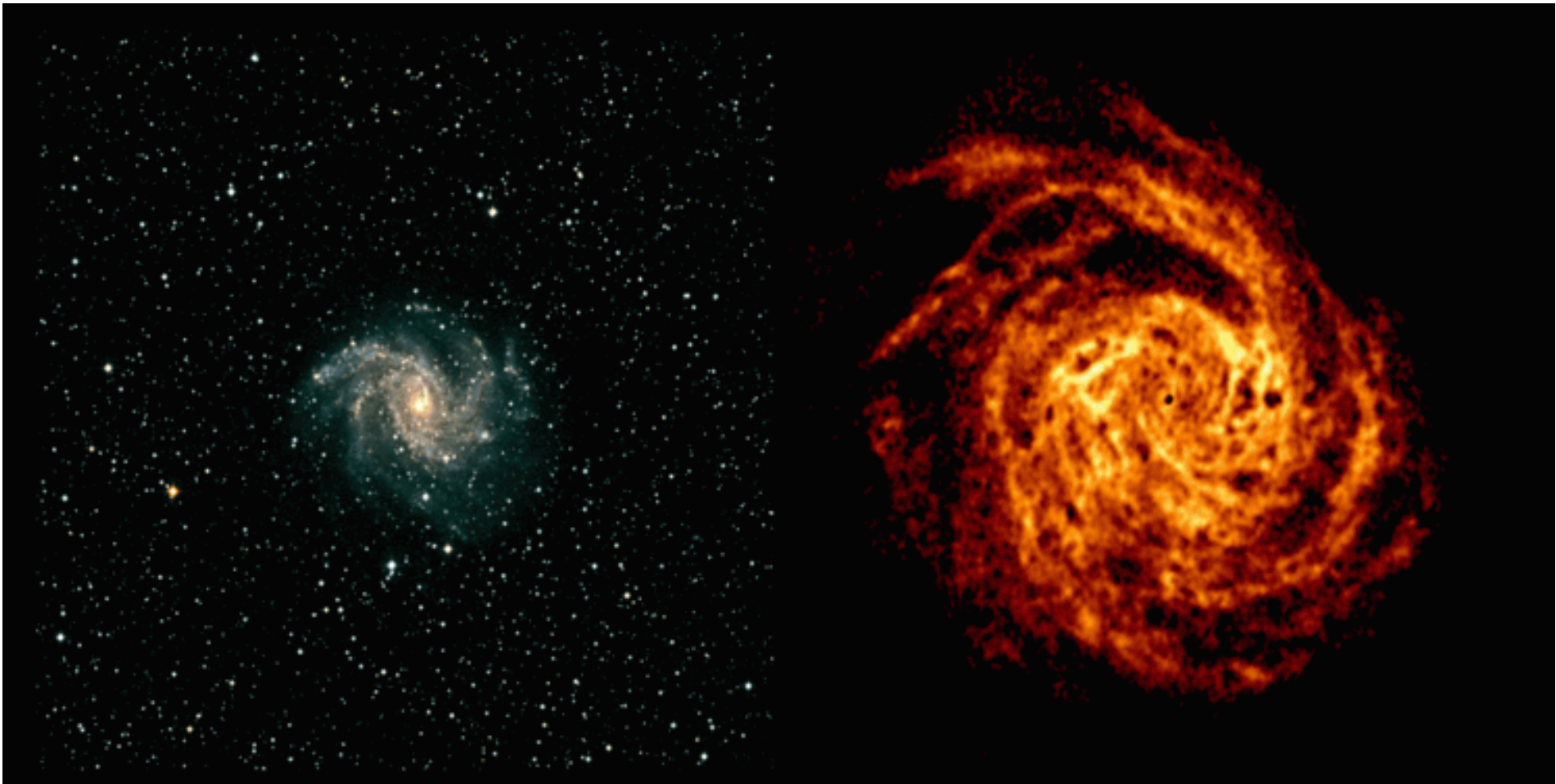
Stof (IR 100 micron)



# Hoe zou de melkweg er “van buiten” uitzien ?

Voorbeeld:

Het melkwegstelsel NGC 6946: een optisch en HI beeld



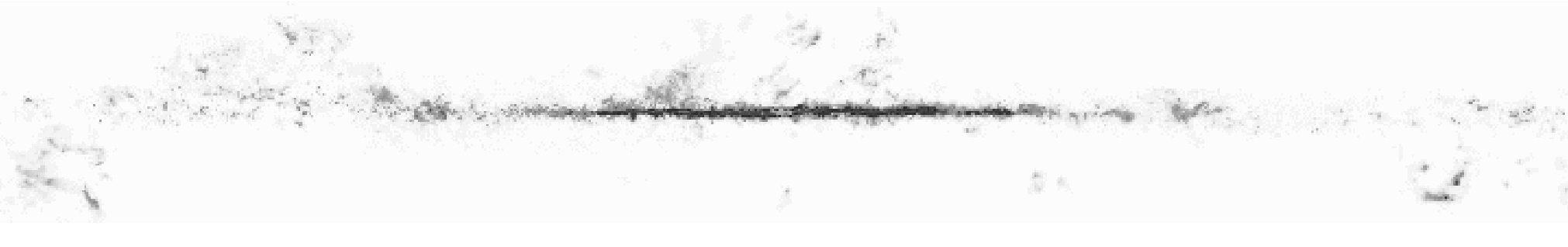
sterlicht

HI verdeling

# Moleculair gas

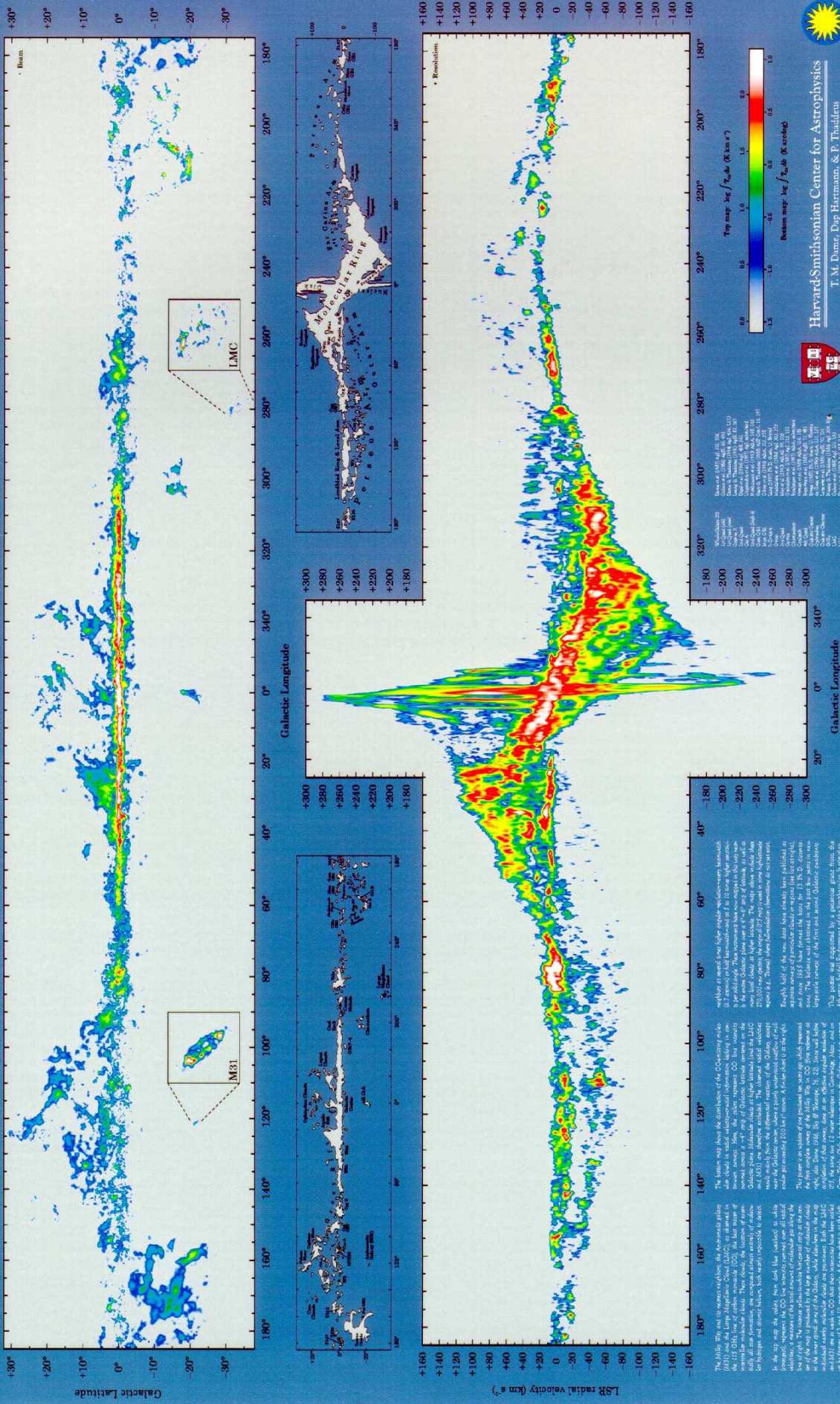
Meest abundante en makkelijk waarneembare molecuul: **CO**

- Waarneembaar door rotatie-energie overgangen in het mm gebied
- CO wordt geëxciteerd door botsingen met  $H_2$  moleculen
- dus  $H_2$  waarneembaar via CO met een (sub)mm radiotelescoop



de Melkweg in CO

# The Milky Way in Molecular Clouds



Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics  
T. M. Dame, Dap Hartmann, & P. Thaddeus



Gould et al. (1994) ApJ, 410, 705  
 Dame et al. (1997) ApJ, 492, 813  
 Dame & Thaddeus (1999) ApJ, 511, 207  
 Dame et al. (2001) ApJ, 553, 292  
 Dame et al. (2002) ApJ, 565, 770  
 Dame et al. (2003) ApJ, 595, 136  
 Dame et al. (2004) ApJ, 608, 105  
 Dame et al. (2005) ApJ, 622, 859  
 Dame et al. (2006) ApJ, 642, 139  
 Dame et al. (2007) ApJ, 654, 139  
 Dame et al. (2008) ApJ, 672, 139  
 Dame et al. (2009) ApJ, 690, 139  
 Dame et al. (2010) ApJ, 708, 139  
 Dame et al. (2011) ApJ, 726, 139  
 Dame et al. (2012) ApJ, 744, 139  
 Dame et al. (2013) ApJ, 762, 139  
 Dame et al. (2014) ApJ, 780, 139  
 Dame et al. (2015) ApJ, 798, 139  
 Dame et al. (2016) ApJ, 816, 139  
 Dame et al. (2017) ApJ, 834, 139  
 Dame et al. (2018) ApJ, 852, 139  
 Dame et al. (2019) ApJ, 870, 139  
 Dame et al. (2020) ApJ, 888, 139  
 Dame et al. (2021) ApJ, 906, 139  
 Dame et al. (2022) ApJ, 924, 139  
 Dame et al. (2023) ApJ, 942, 139  
 Dame et al. (2024) ApJ, 960, 139  
 Dame et al. (2025) ApJ, 978, 139

This figure is based on data from the *Galactic Plane Survey* (GPS), a multi-wavelength survey of the Milky Way's molecular clouds. The GPS is a joint effort between the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics and the National Science Foundation. The survey covers the entire Galactic plane from Galactic Longitude 0 to 360 degrees and Galactic Latitude -10 to 10 degrees. The data are presented in this figure as a color-coded map of Galactic Longitude versus Galactic Latitude. The color scale represents the intensity of the molecular clouds, with red indicating the highest intensity and blue indicating the lowest. The top map shows the  $\log(T_{mb})$  of the  $^{13}\text{CO}$  line, and the bottom map shows the  $\log(T_{mb})$  of the  $^{12}\text{CO}$  line. The inset maps show the *Magellanic Clouds* (LMC and SMC) and the *Large Magellanic Cloud* (LMC).

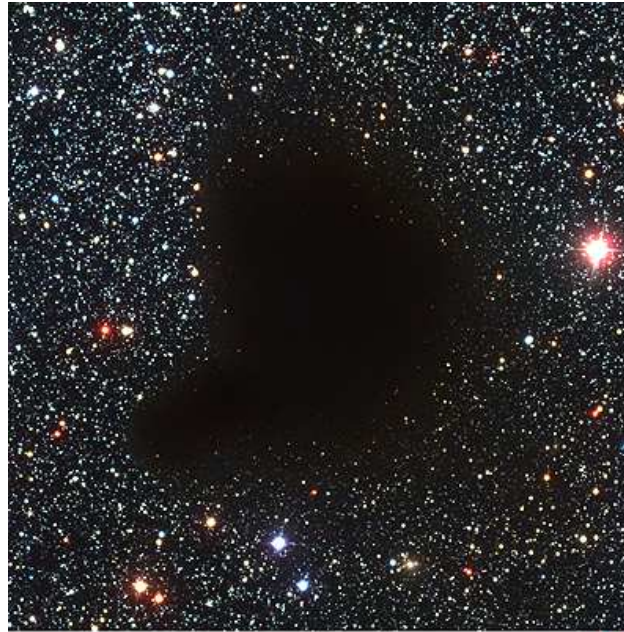
The  $^{13}\text{CO}$  line is a good tracer of molecular gas in the Milky Way. It is less abundant than the  $^{12}\text{CO}$  line, but it is less affected by self-absorption. The  $^{13}\text{CO}$  line is therefore a better tracer of the total molecular gas mass than the  $^{12}\text{CO}$  line. The  $^{13}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{13}\text{CO}$  line is therefore a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{13}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{13}\text{CO}$  line is therefore a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way.

The  $^{12}\text{CO}$  line is a good tracer of molecular gas in the Milky Way. It is more abundant than the  $^{13}\text{CO}$  line, but it is more affected by self-absorption. The  $^{12}\text{CO}$  line is therefore a better tracer of the total molecular gas mass than the  $^{13}\text{CO}$  line. The  $^{12}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{12}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{12}\text{CO}$  line is therefore a good tracer of the  $^{12}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{12}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{12}\text{C}$  abundance in the Milky Way.

The  $^{13}\text{CO}$  line is a good tracer of molecular gas in the Milky Way. It is less abundant than the  $^{12}\text{CO}$  line, but it is less affected by self-absorption. The  $^{13}\text{CO}$  line is therefore a better tracer of the total molecular gas mass than the  $^{12}\text{CO}$  line. The  $^{13}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{13}\text{CO}$  line is therefore a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{13}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{13}\text{C}$  abundance in the Milky Way.

The  $^{12}\text{CO}$  line is a good tracer of molecular gas in the Milky Way. It is more abundant than the  $^{13}\text{CO}$  line, but it is more affected by self-absorption. The  $^{12}\text{CO}$  line is therefore a better tracer of the total molecular gas mass than the  $^{13}\text{CO}$  line. The  $^{12}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{12}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{12}\text{CO}$  line is therefore a good tracer of the  $^{12}\text{C}$  abundance in the Milky Way. The  $^{12}\text{CO}$  line is also a good tracer of the  $^{12}\text{C}$  abundance in the Milky Way.

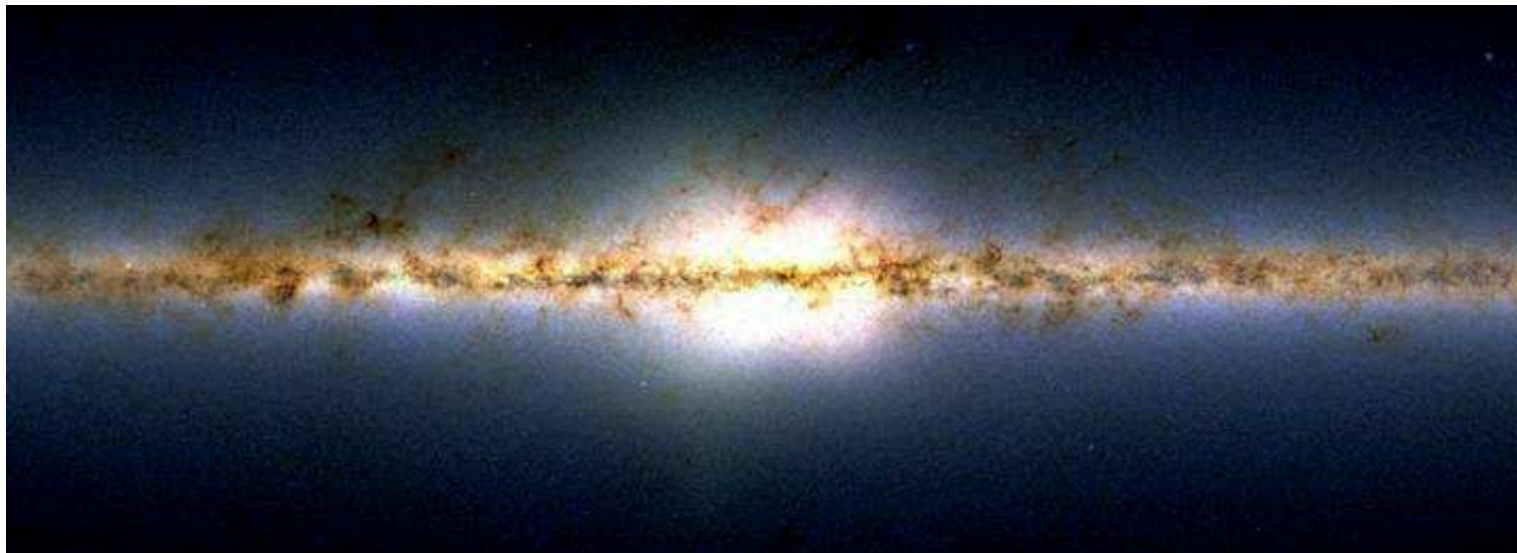
# Interstellair stof



ESO PR Photo 26/99 (30 April 1999)

The "Black Cloud" B68  
(VLT ANTU + FORS1)

© European Southern Observatory



# Interstellair stof (recapitulatie)

Stof absorbeert en verstrooit sterlicht → **interstellaire extinctie**

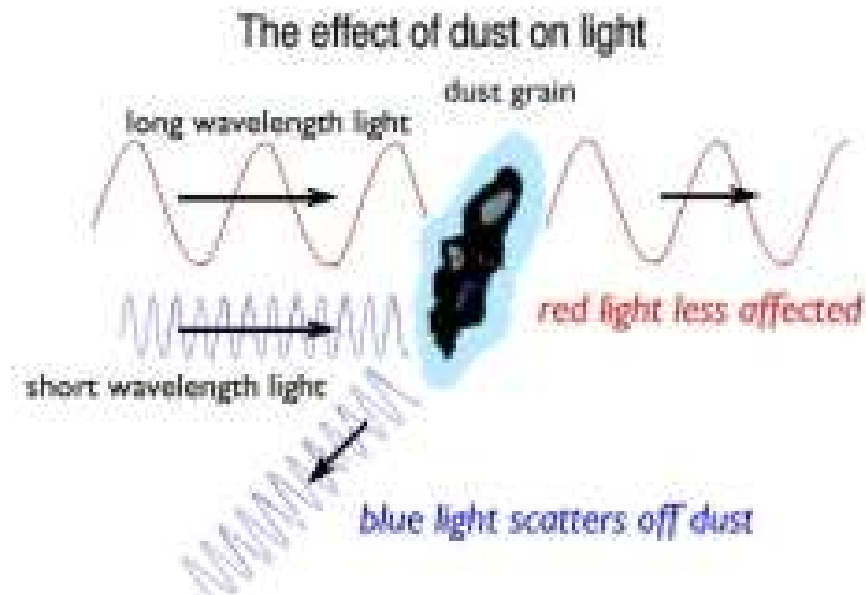
Resultaat van extinctie: **verroding** van het licht door stofdeeltjes

Moet voor gecorrigeerd worden als je metingen van sterlicht doet!

Effecten: extra term in de absolute magnitude berekeningen

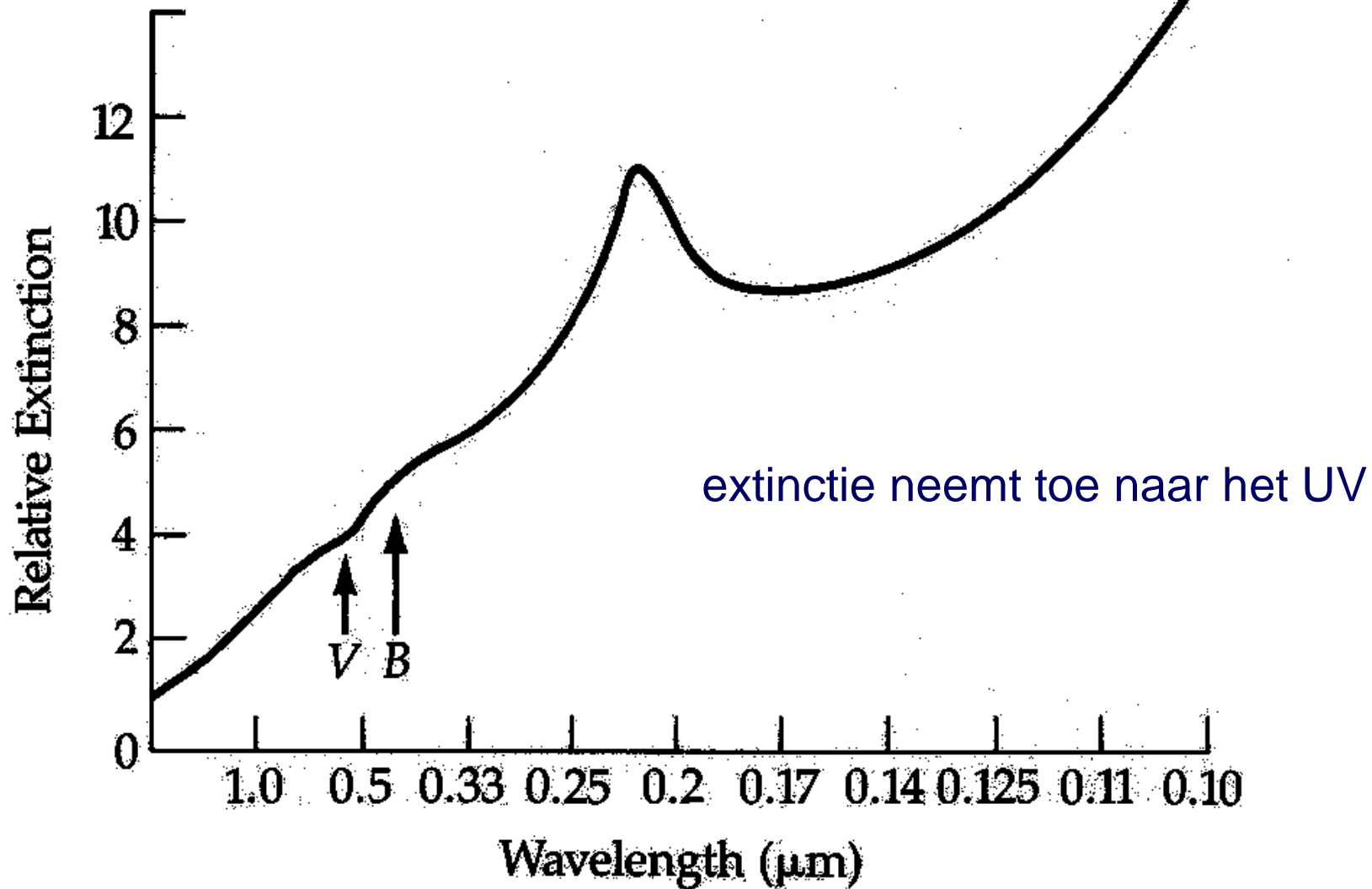
$$m - M = 5 \log(d) - 5 + A$$

**A** is de **extinctie** in magnituden en wordt gegeven door de extinctie kromme (experimenteel bepaald)



# Interstellair stof

extinctie kromme





# Interstellair stof

Extinctie hangt samen met het kleur excess:  $E_{B-V}$

$$E_{B-V} = (B - V)_{\text{obs}} - (B - V)_{\text{true}}$$

$A_V = R \cdot E_{B-V}$  voor de Melkweg geldt:  $R = 3.0$ , dus

$$A_V = 3 E_{B-V}$$

en dan geldt:

$$m_V - M_V = 5 \log(d) - 5 + A_V$$

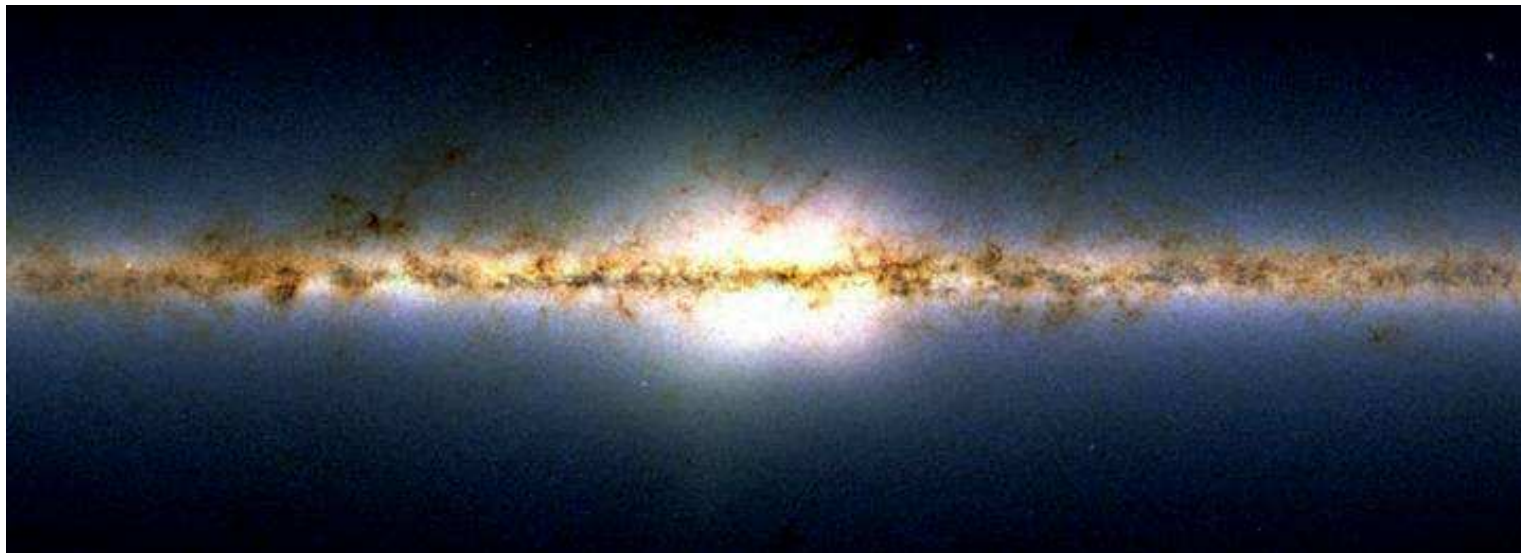
*Interstellaire extinctie* is over een groot deel van de melkweg bepaald en vergeleken met de *HI kolomdichtheid*: beide correleren met elkaar dus de *HI* is te gebruiken om een *schatting van de extinctie* te maken

Stof is waarneembaar via extinctie, maar:

Stof ook waarneembaar omdat stofdeeltjes zwarte lichaamsstraling afgeven: optimale golflengte wordt bepaald door de temperatuur: IR

Stof bestaat uit kleine deeltjes: 0.25 micrometer of kleiner  
*samenstelling: silicaten en grafiet* deeltjes en de z.g.  
polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen: **PAH's**

Stof heeft typische temperaturen tussen **30 en 300 K**.  
het heetste stof komt voor in de buurt van OB sterren

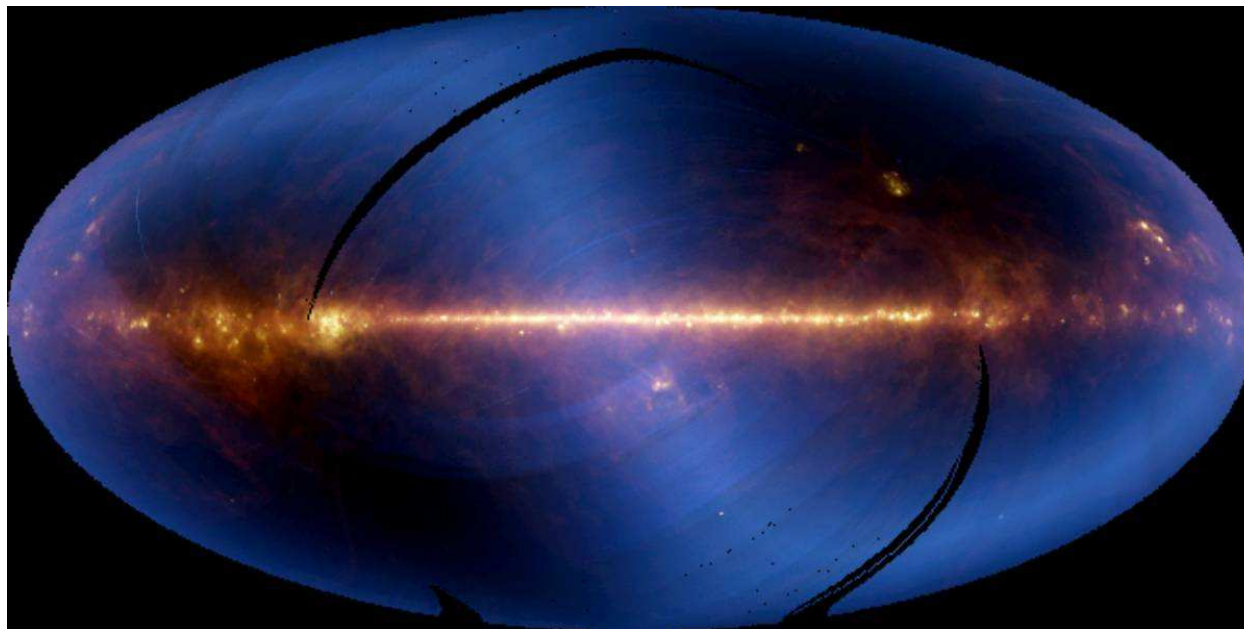


Stof is waarneembaar via extinctie, maar:

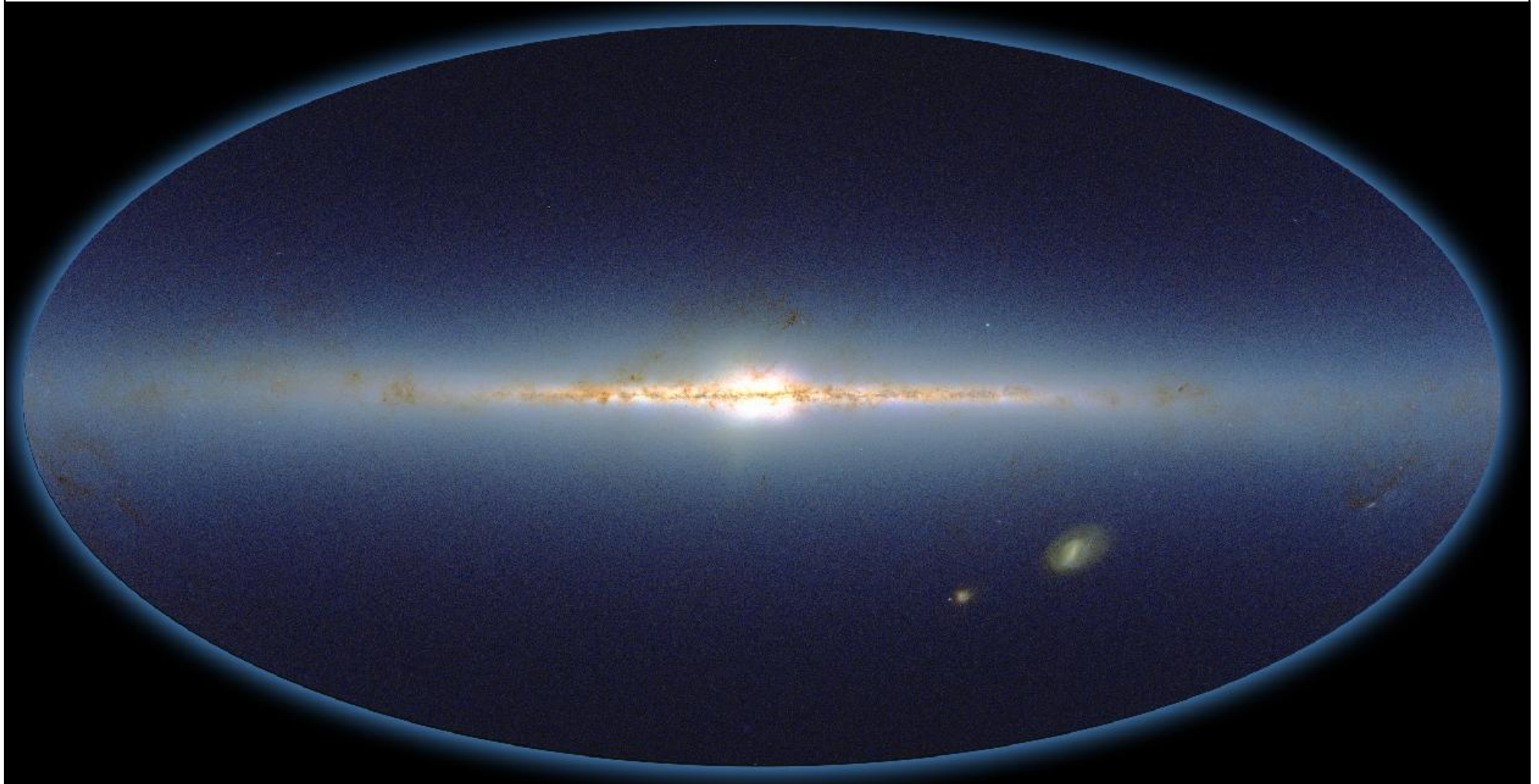
Stof ook waarneembaar omdat stofdeeltjes zwarte lichaamsstraling afgeven: optimale golflengte wordt bepaald door de temperatuur: IR

Stof bestaat uit kleine deeltjes: 0.25 micrometer of kleiner  
*samenstelling*: **silicaten en grafiet** deeltjes en de z.g.  
polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen: **PAH's**

Stof heeft typische temperaturen tussen **30 en 300 K**.  
het heetste stof komt voor in de buurt van OB sterren

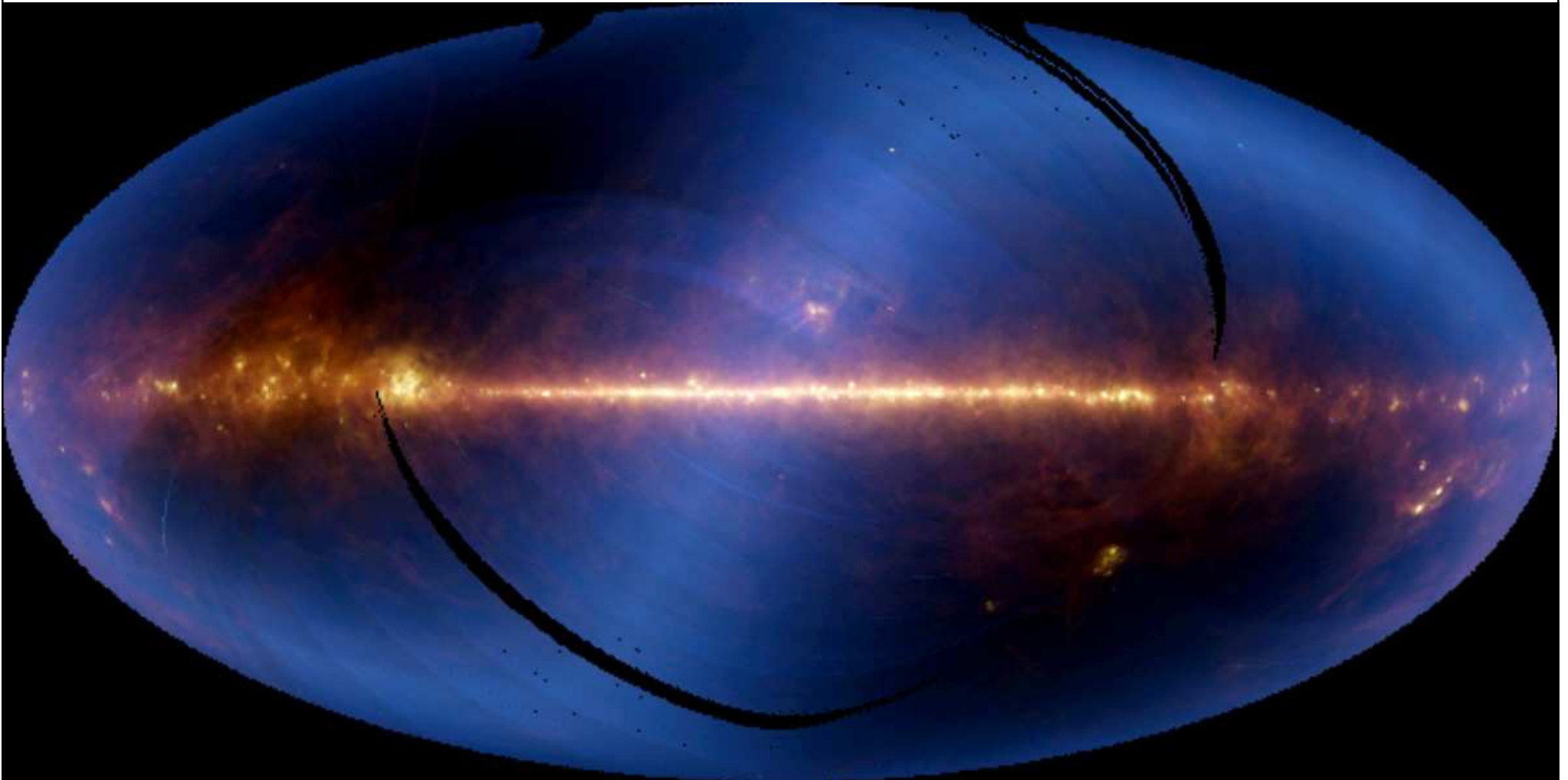


# De Melkweg in het nabije Infrarood



Interstellair stof

IR image van de Melkweg



100 micrometer straling opgenomen met de IRAS satelliet

## Processen die de fysica van het Inter Stellair Medium (ISM) bepalen:

- *straling*: OB sterren, heet gas ( $10^6$  K gas geeft Röntgen straling) de straling zorgt voor ionizatie van gas en excitatie van atomen en moleculen

door straling wordt het ISM verwarmt  
door straling koelt het ISM



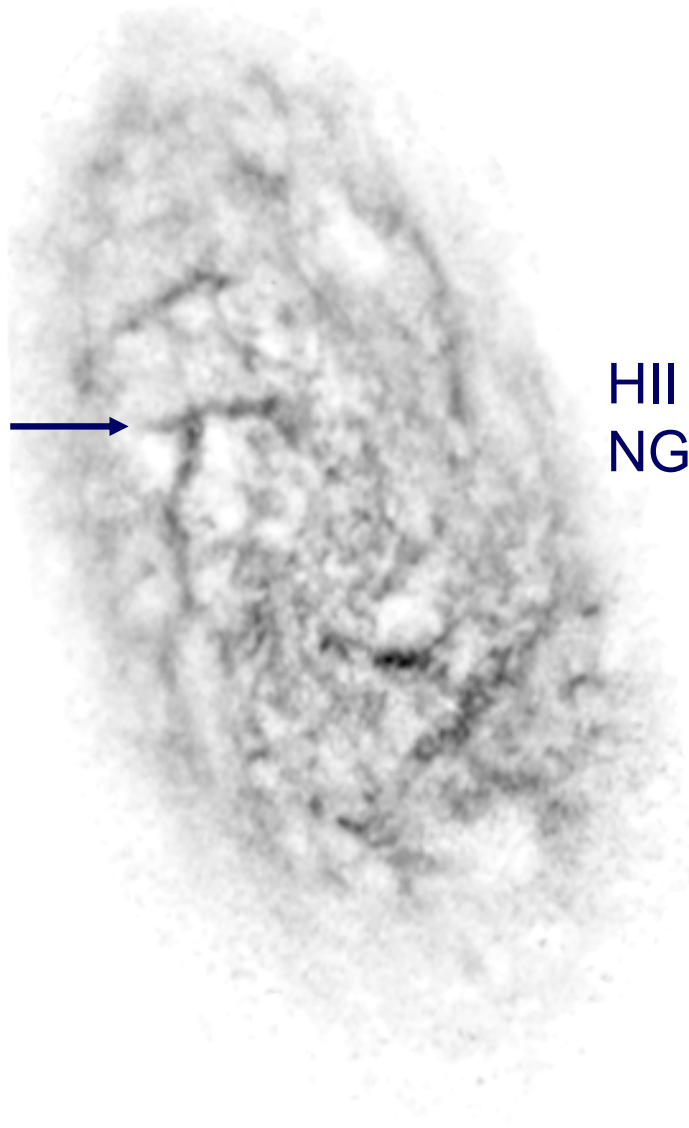
samen zorgt dit voor een temperatuur- en dus ook drukevenwicht

- *schokken*: door supernovae, sterrewinden: zorgen voor herverdeling van het ISM
- *botsingen tussen deeltjes*: zorgen voor de excitatie van atomen en moleculen

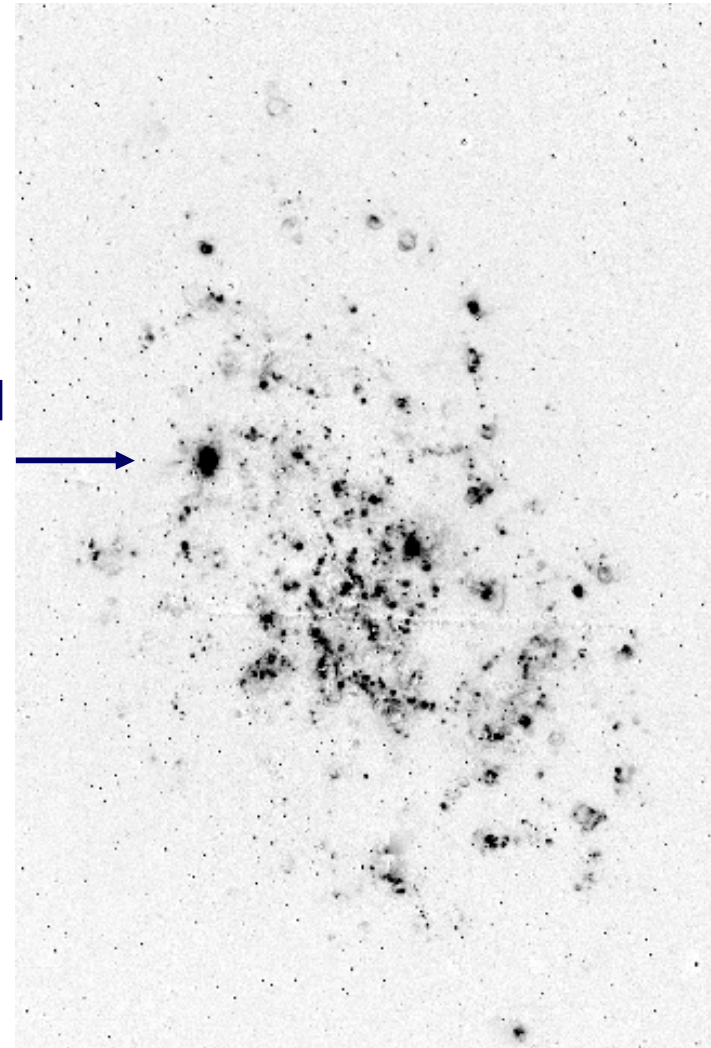
Alle processen samen zorgen voor een fysisch evenwicht in het ISM en bepalen eigenschappen zoals temperatuur, dichtheid en verdeling.

# Messier 33 ( NGC 598 )

HI neutraal waterstof



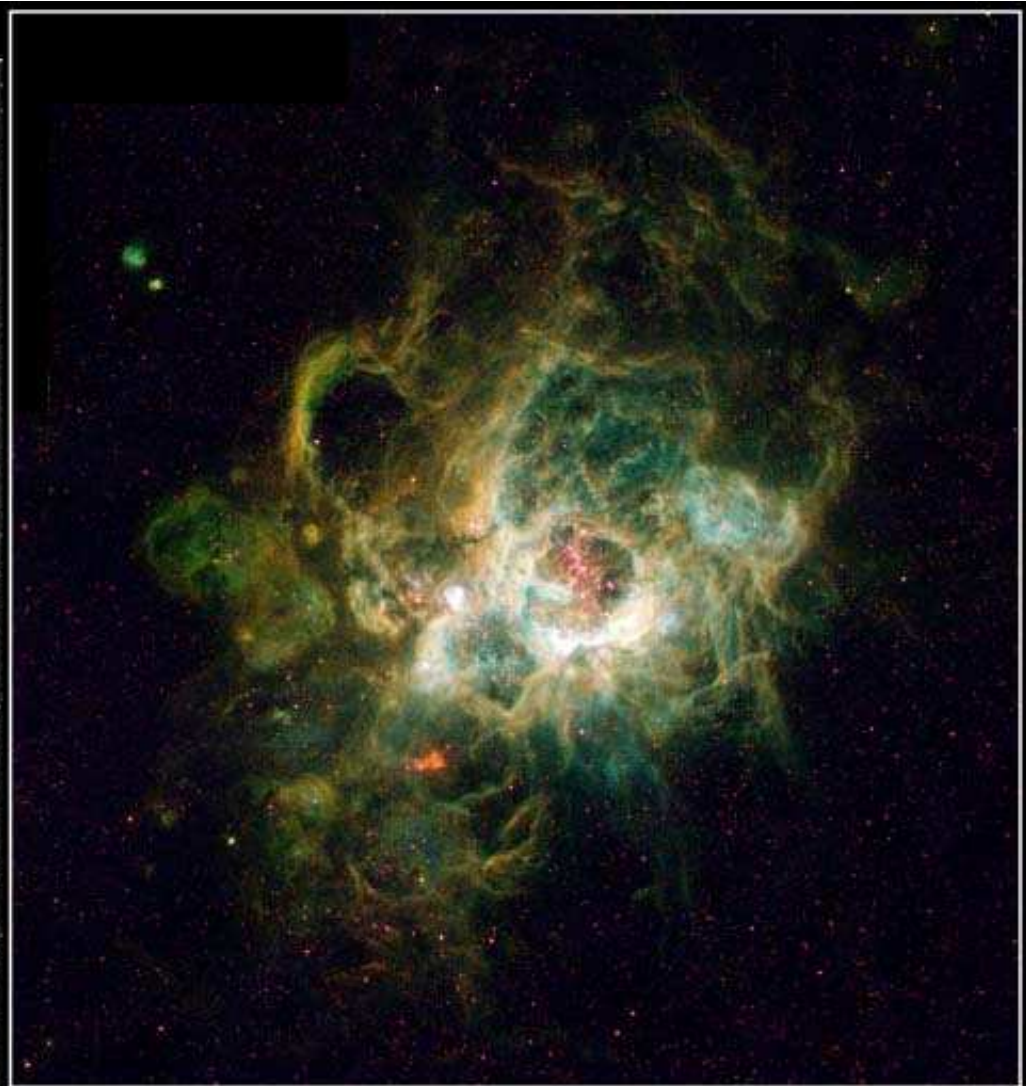
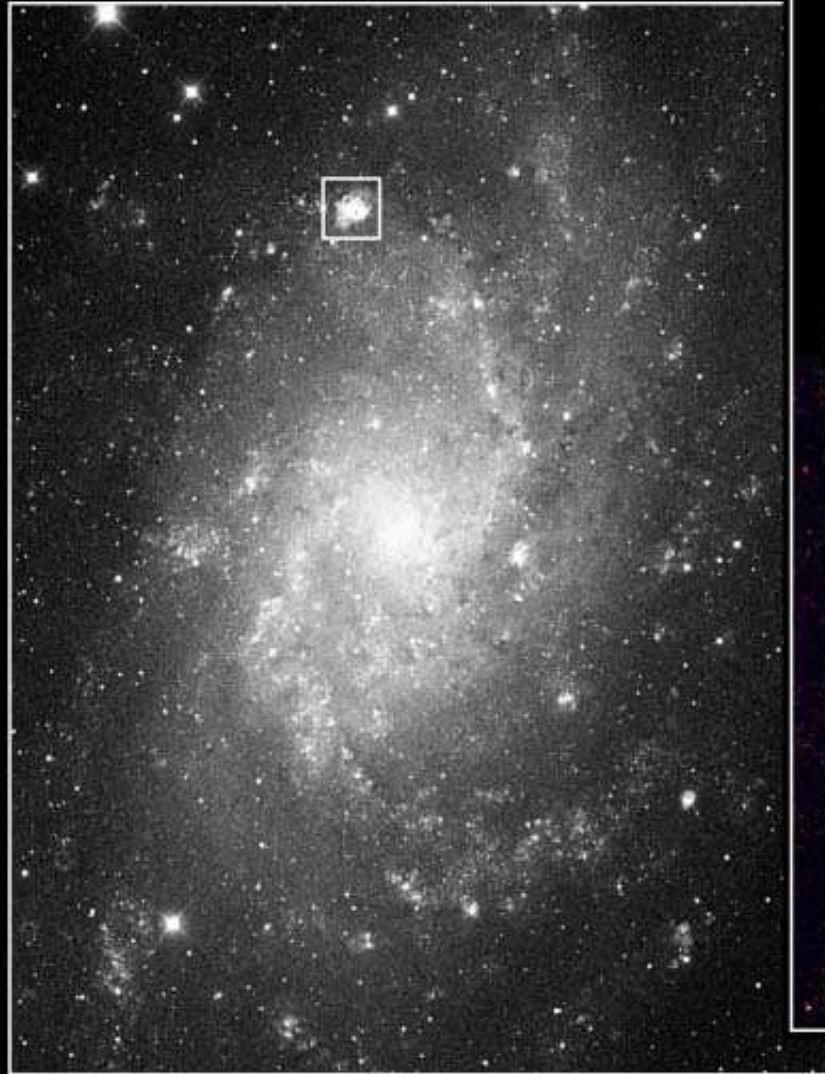
HII geïoniseerd waterstof



HII gebied  
NGC 604

# Geïoniseerd waterstof: HII gebieden

Palomar



HST

HST · WFPC2

**NGC 604 in Galaxy M33**

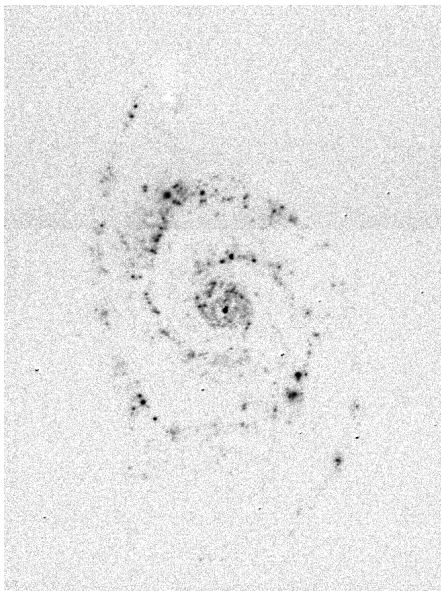
PRC96-27 · ST ScI OPO · August 7, 1996 · Hui Yang (U.I.L) and NASA



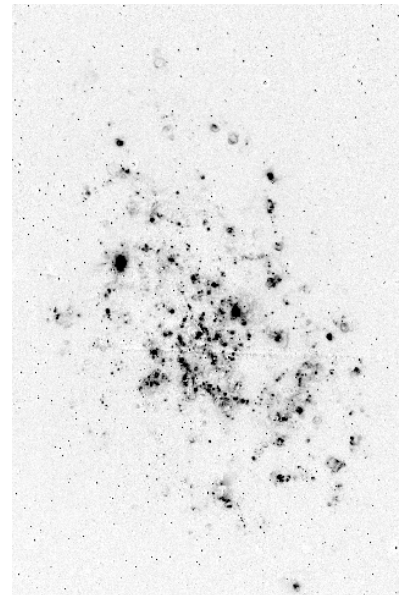
# Geïoniseerd waterstof: HII gebieden

- HII gebieden traceren de plaatsen waar zich O en B sterren bevinden
- dit zijn de plaatsen van recente stervorming (immers O sterren zijn *jong*)
- in de schijf van melkwegstelsels en in de spiraalarmen

M 51

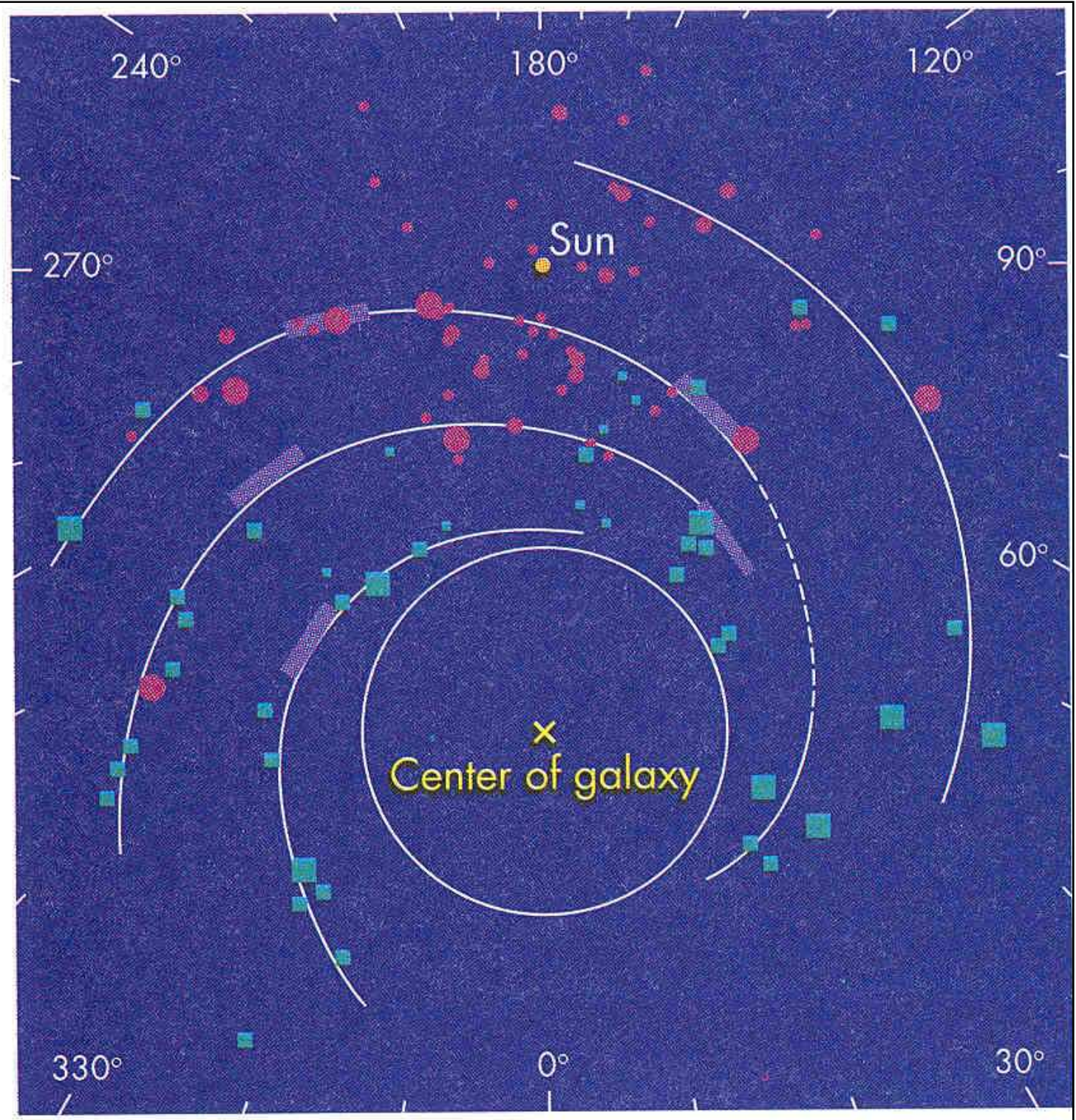


M 33



# Spiraalstructuur in de Melkweg

aan de hand van de locatie van OB associaties (rood) en HII gebieden (blauw)



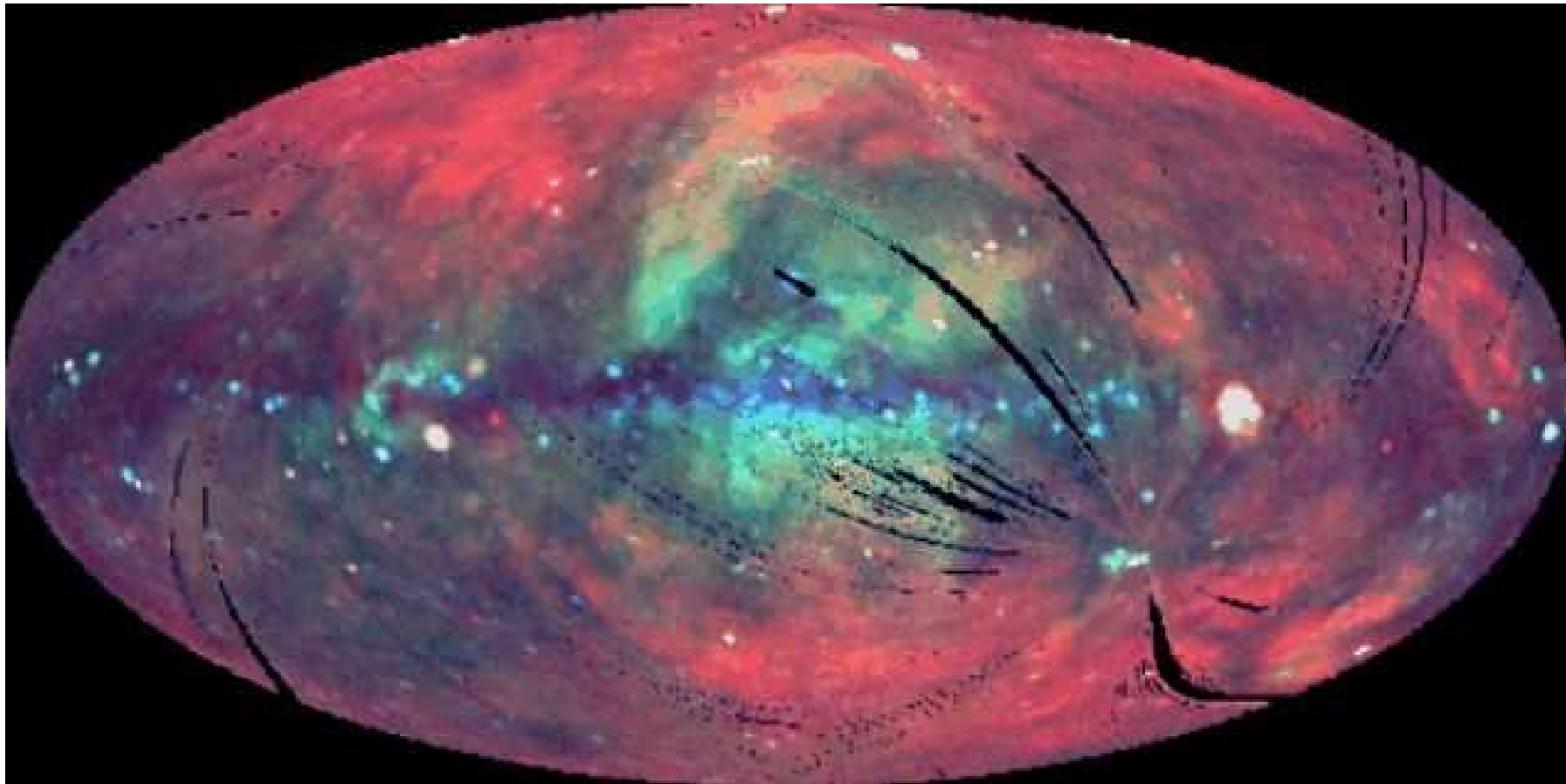
# Typische Toestanden van Gas in het Interstellaire Medium

<i>Toestand</i>	<i>Primaire Component</i>	<i>Temperatuur (typisch)</i>	<i>Dichtheid atomen/cm<sup>3</sup></i>	<i>Beschrijving</i>
<b>Hete Bellen</b>	<b>III:</b> Geïoniseerd waterstof	<b>1,000,000 K</b>	<b>0.01</b>	<b>bellen van gas dat is verhit door supernova schokgolven</b>
<b>Warm atomair gas</b>	<b>HI:</b> atomair waterstof	<b>10,000 K</b>	<b>0.01</b>	<b>vult zich door de gehele Galactische schijf</b>
<b>Koud atomair gas</b>	<b>HI:</b> atomair waterstof	<b>100 K</b>	<b>1</b>	<b>intermediair stadium van ster-gas-ster cyclus</b>
<b>Moleculaire Wolken</b>	<b>H<sub>2</sub>:</b> Moleculaire waterstof	<b>30 K</b>	<b>300</b>	<b>gebieden van stervorming</b>
<b>Moleculaire Wolk Kernen</b>	<b>H<sub>2</sub>:</b> Moleculaire waterstof	<b>60 K</b>	<b>10,000</b>	<b>stervormende wolken</b>

# Hete Bellen

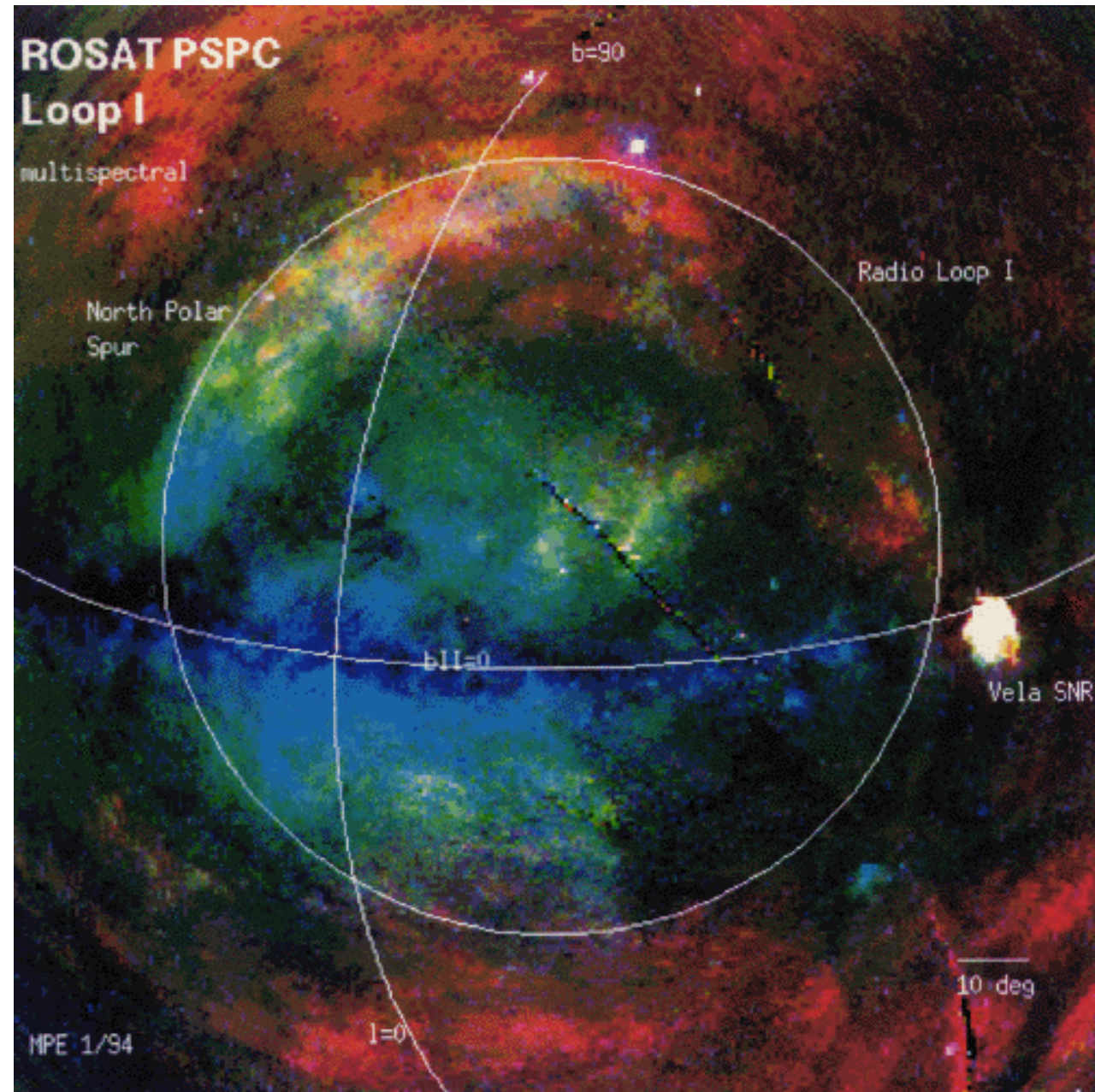
Aanwijzingen uit metingen van de zachte Röntgen straling in de melkweg:

- zwarte lichaamsstraling van een heel ijl en heet gas ( $10^6$  K)



Rosat all sky X-ray image

# Hete Bellen



Rosat image of Galactic Center region

# Hete bellen in de Grote Magelhaense Wolk

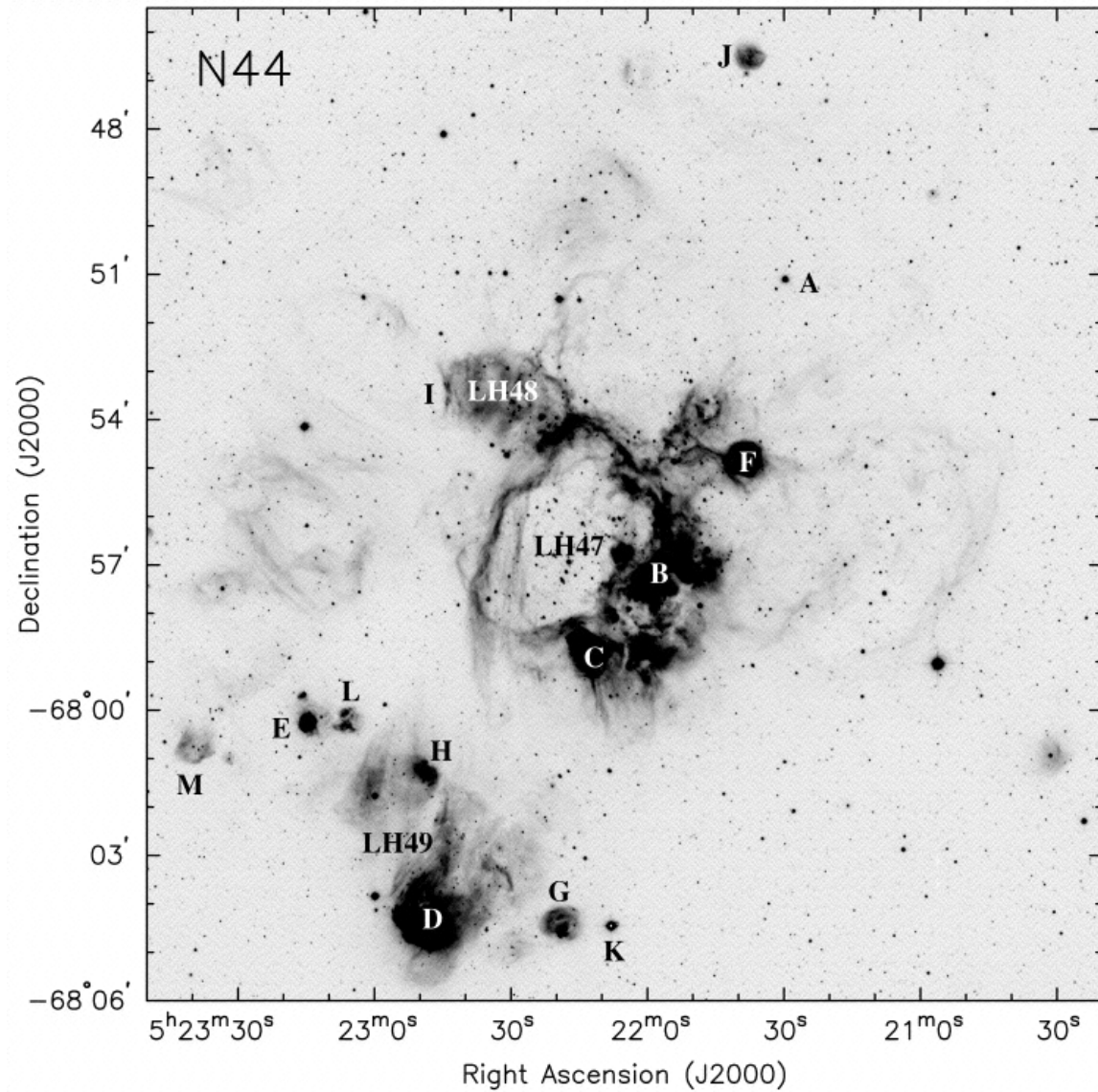
## het 30 Doradus complex





# Hete bellen in de Grote Magelhaense Wolk

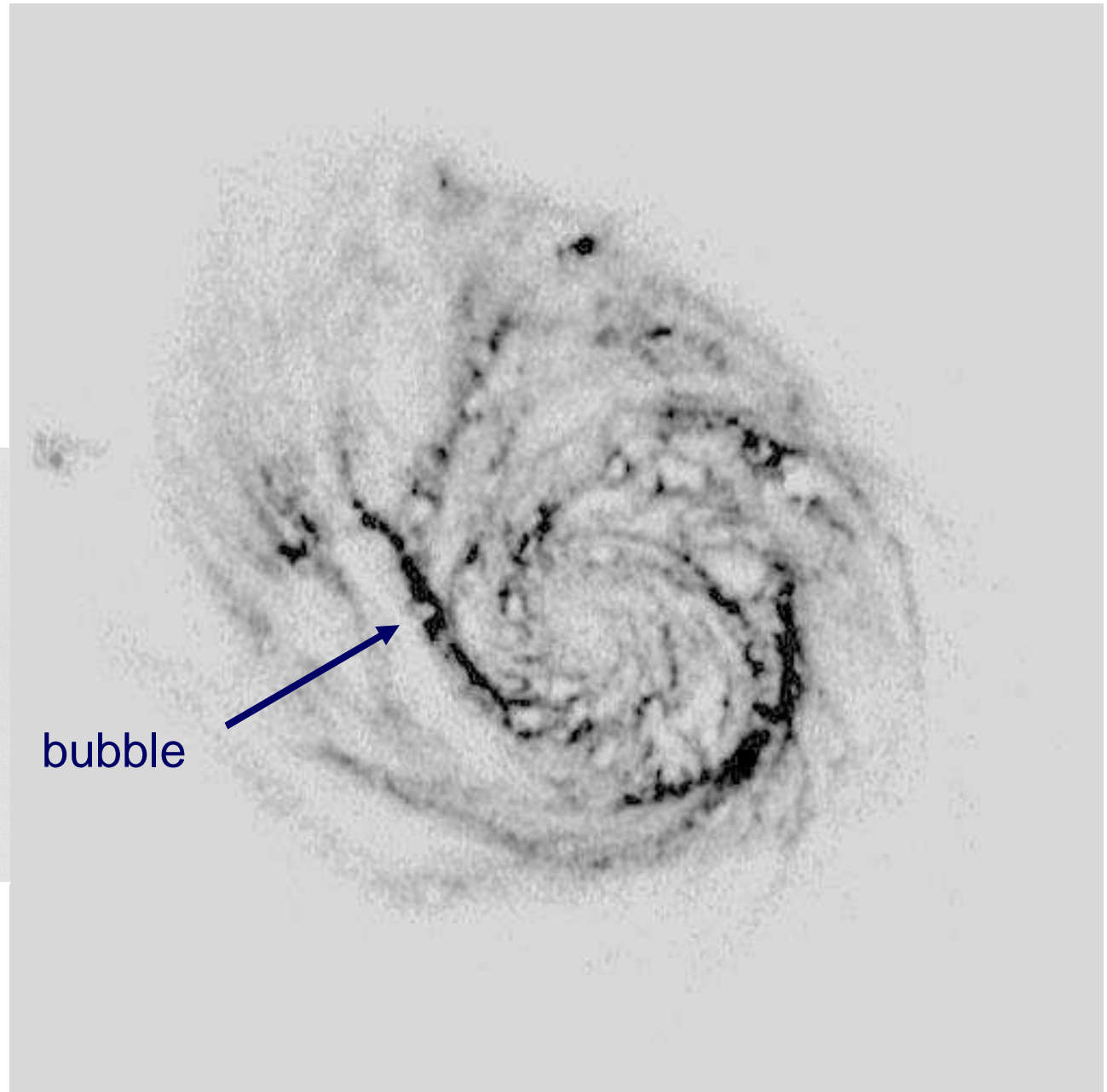
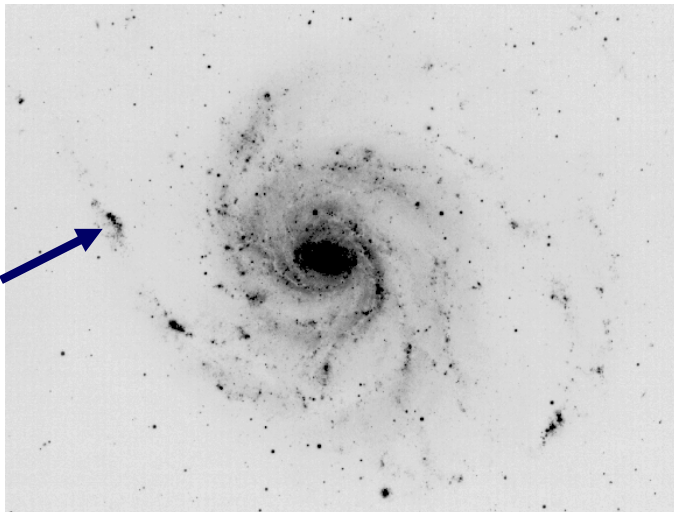
## het N 44 complex



# Messier 101

HI

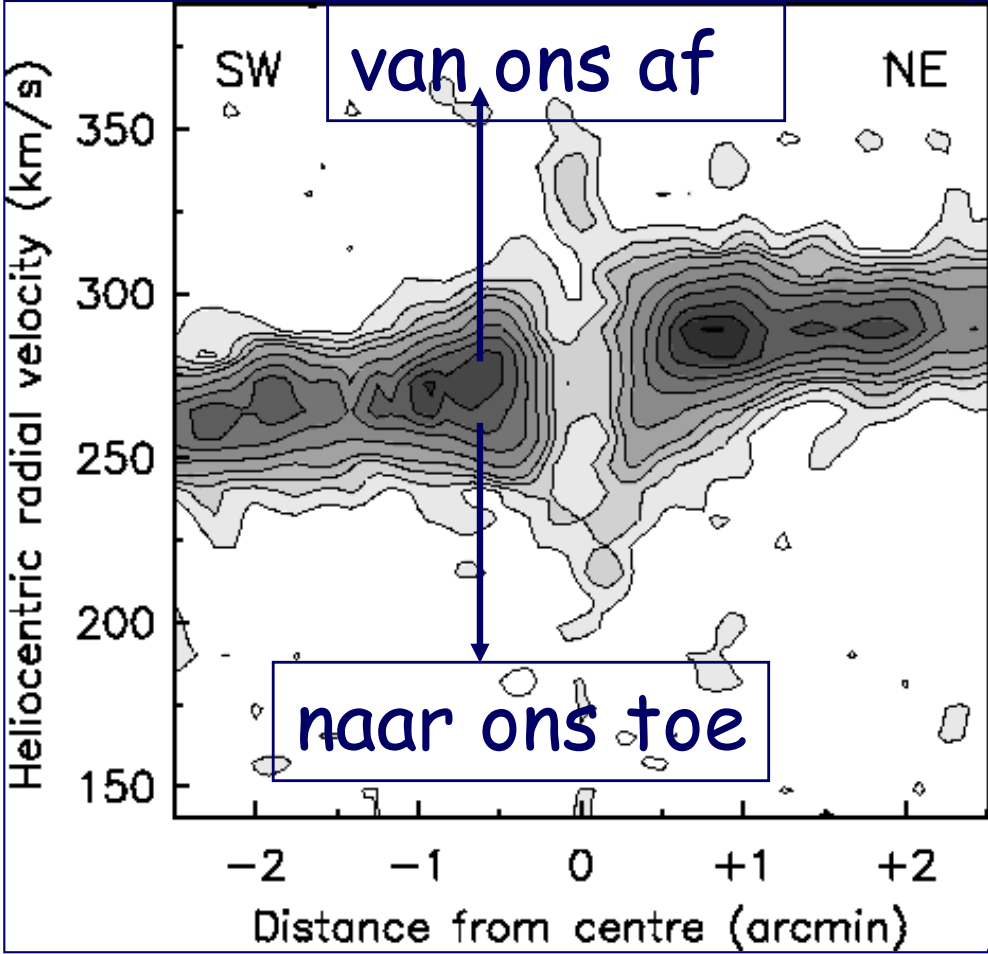
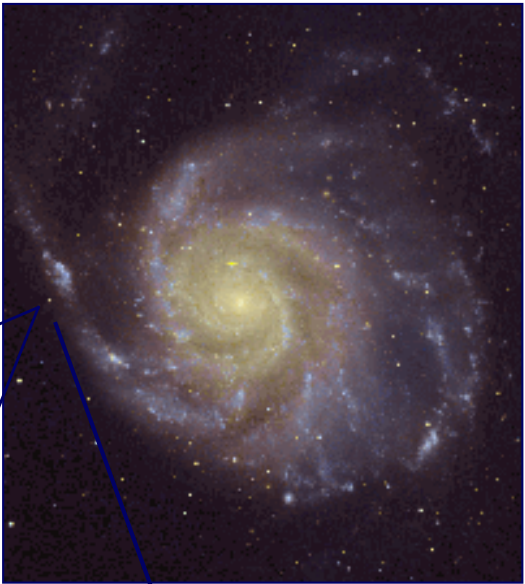
optisch



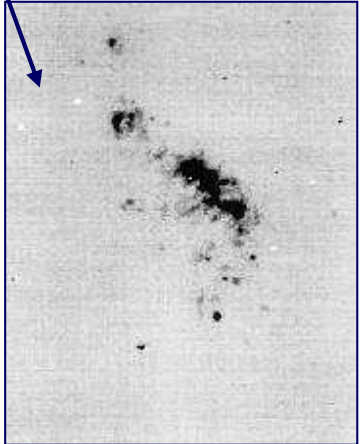
bubble



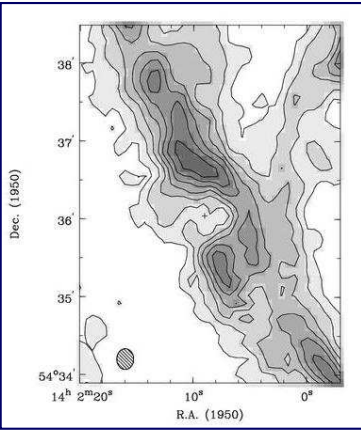
Waterstof beweegt uit het melkwegvlak:



Heet waterstof



Koel waterstof



# Neutraal atomair gas

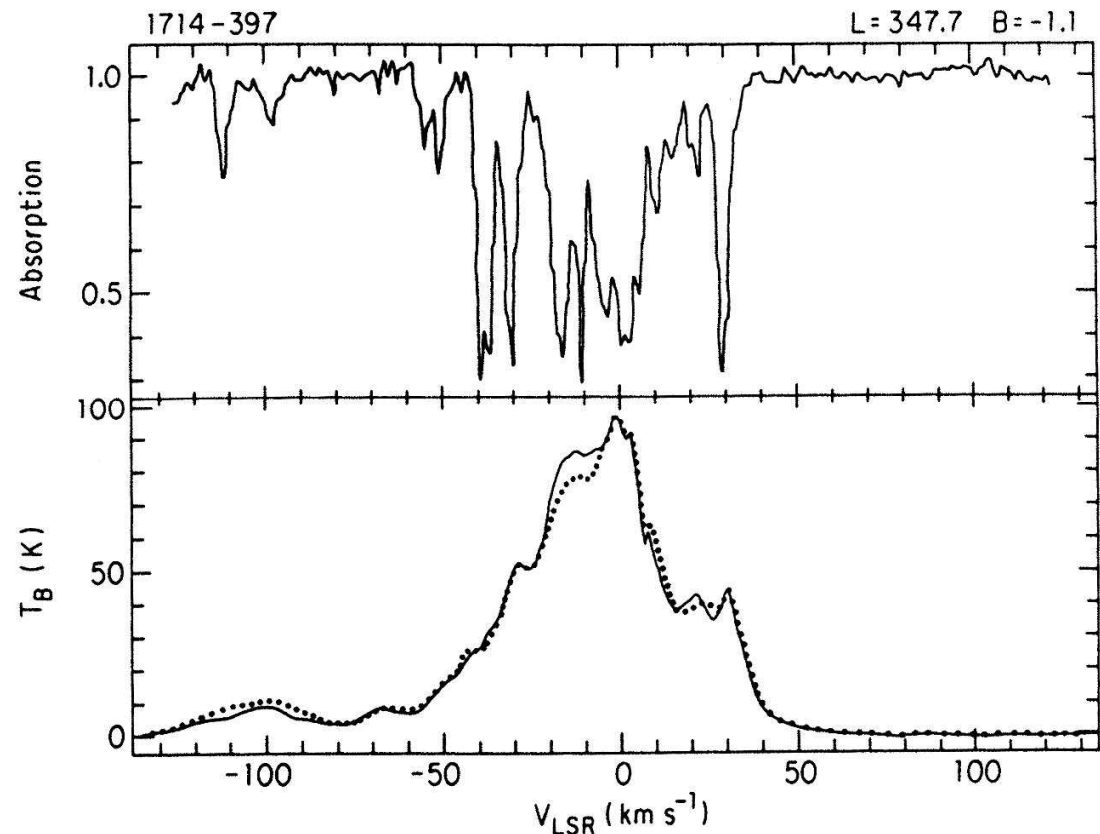
Bestaat uit minstens twee regimes die in **drukevenwicht** zijn ( $P = nkT$ )

- Warm gas met  $n = 0.01 \text{ cm}^{-3}$  en  $T = 10000 \text{ K}$
- Koud gas met  $n = 1 \text{ cm}^{-3}$  en  $T = 100 \text{ K}$

Te onderscheiden door  
emissie en absorptie van HI:

*emissie* wordt gedomineerd  
door het *warme* gas

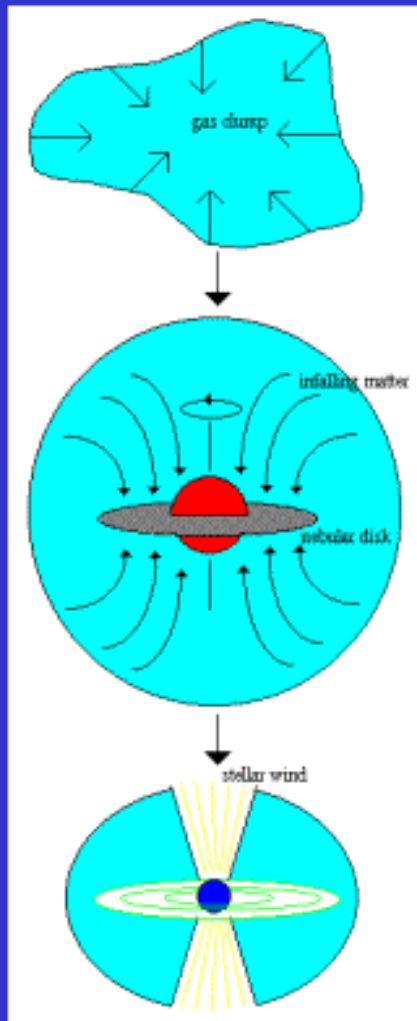
*absorptie* door het *koude* gas



HI absorptie en emissie langs 1 gezichtslijn

# Koud moleculair gas

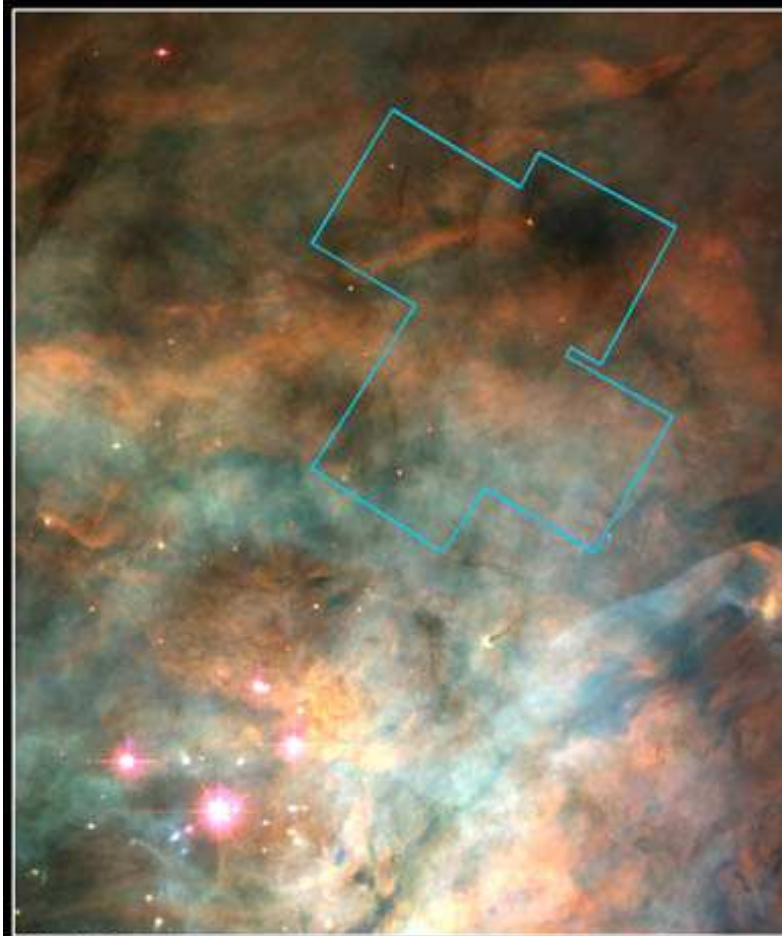
Dichtheden oplopend tot  $1000 \text{ cm}^{-3}$  en temperaturen van  $10 - 30 \text{ K}$



- Moleculaire waterstof wolken klappen onder eigen zwaartekracht ineen.
- Door hoge druk en temperatuur in de kern ontbranden nieuwe sterren (rechts). Het gas draait om de ster heen en vormt een accretieschijf.
- Sterrenwinden blazen gas weg. Samenklontering van materie in de accretieschijf veroorzaakt vorming van proto-planeten



# Koud moleculair gas: kraamkamers voor sterren

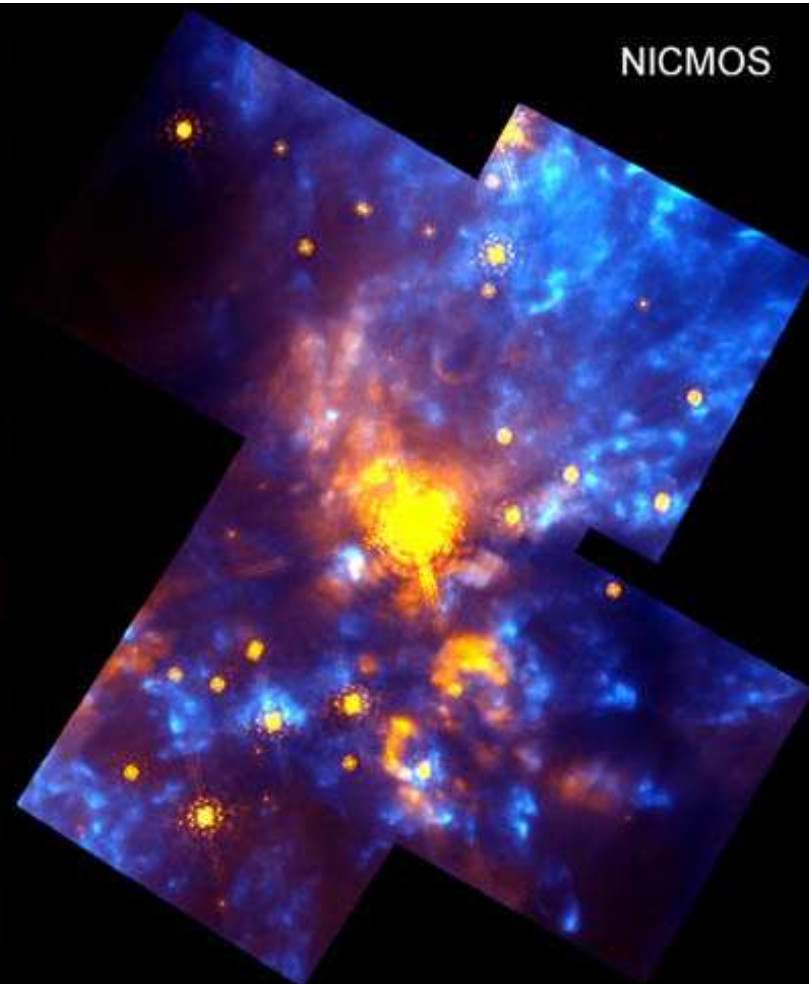


WFPC2

**Orion Nebula • OMC-1 Region**

PRC97-13 • ST ScI OPO • May 12, 1997

R. Thompson (Univ. Arizona), S. Stolovy (Univ. Arizona), C.R. O'Dell (Rice Univ.) and NASA



NICMOS

Hubble Space Telescope