

Waterstof, Dwingeloo en de WSRT

Prof. Dr Tom Oosterloo
Astron & Groningen

M101 - waterstof (rood; WSRT) + optisch



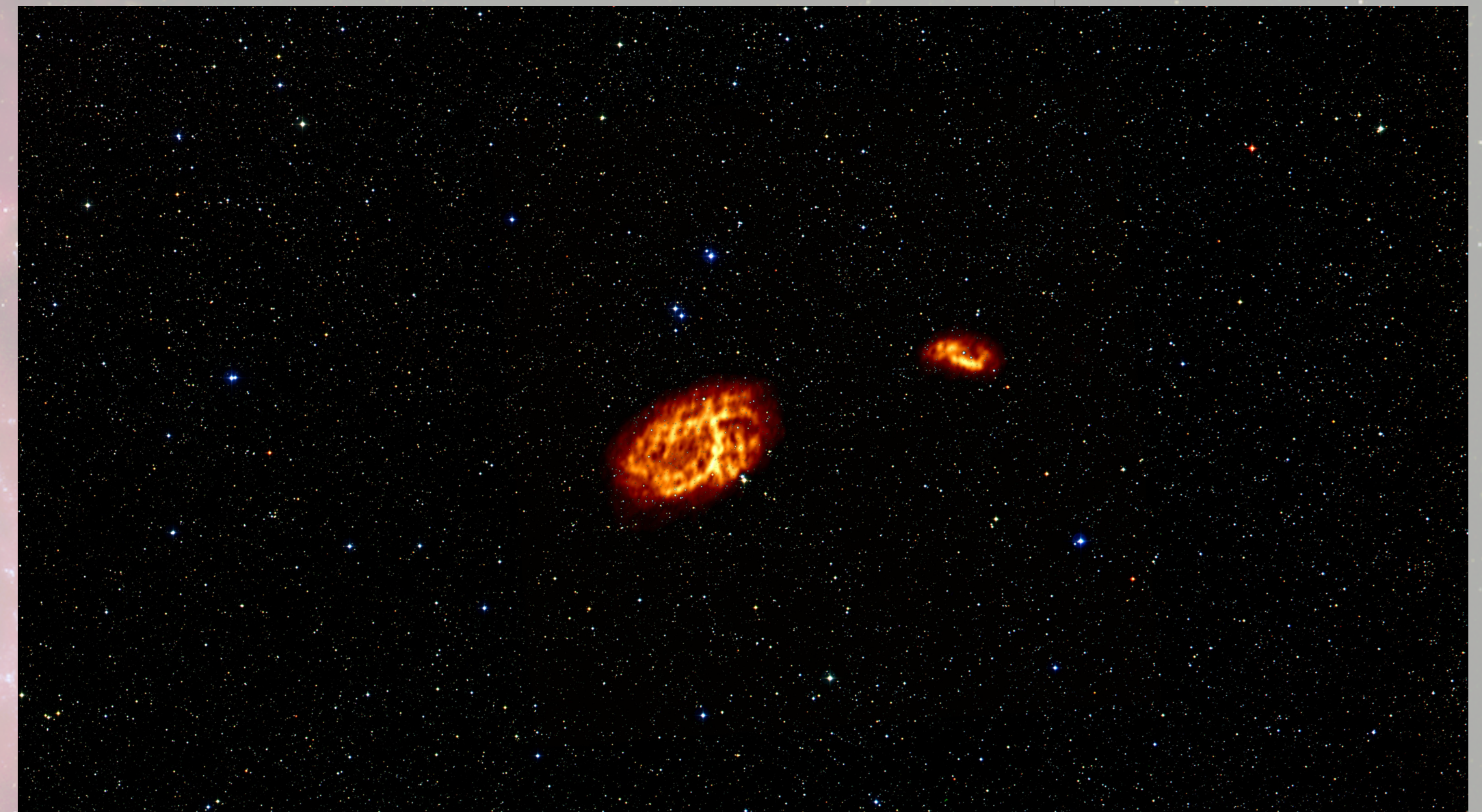
Waterstof, Dwingeloo en de WSRT

De Dwingeloo schotel en de WSRT hebben dmv H I studies belangrijke bijdragen geleverd aan het beter begrijpen van sterrenstelsels!!

De WSRT is ook erg belangrijk geweest voor het ontwikkelen van software en analyse technieken voor H I studies.

- Structuur en ISM van de Melkweg
- ISM in elliptische stelsels, massa verdeling
- Dwerg stelsels
- Kleinste dwerg stelsels
- Warps
- Accretion
- Cluster stelsels, stripping
- Void galaxies
- Low surface brightness galaxies
- Tully-Fisher relatie
- Evolutie van sterrenstelsels
- Binary galaxies
- AGN driven outflows
- Interacties tussen sterrenstelsels
- Density waves
- ...

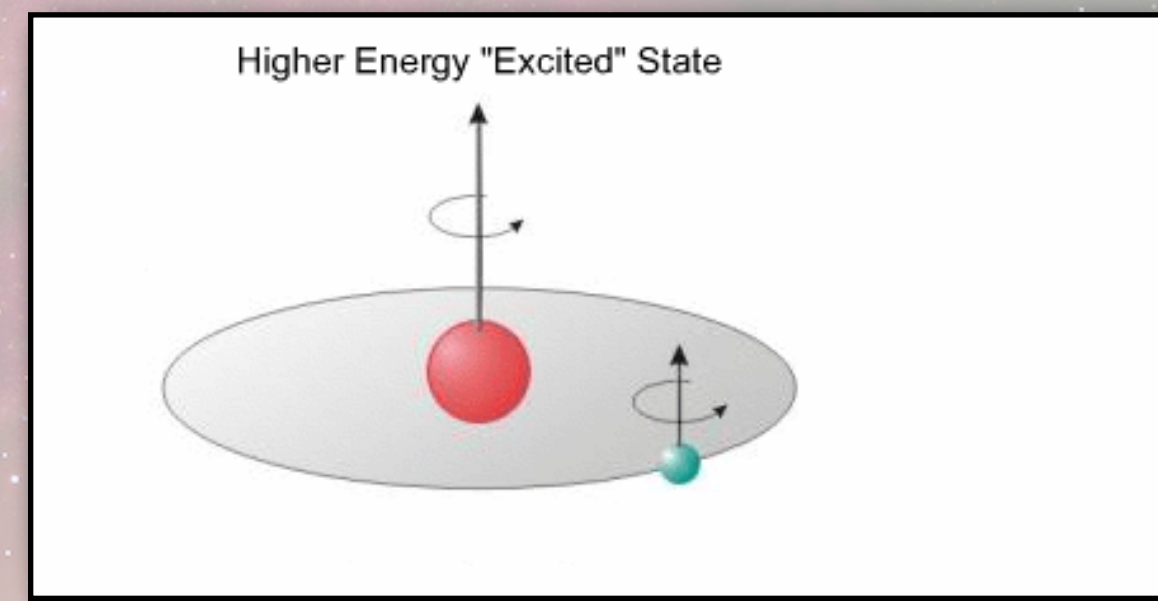
- *Donkere materie*
- *Hogesnelheidswolken, galactic fountains*



Dwingeloo 1 & 2 waargenomen met de WSRT

De H I spectraallijn

- Emissie van een foton als gevolg van de 'spin flip' van een waterstofatoom in de laagste energietoestand:
 $1420.405751786 \text{ MHz} = 21.106117011 \text{ cm}$

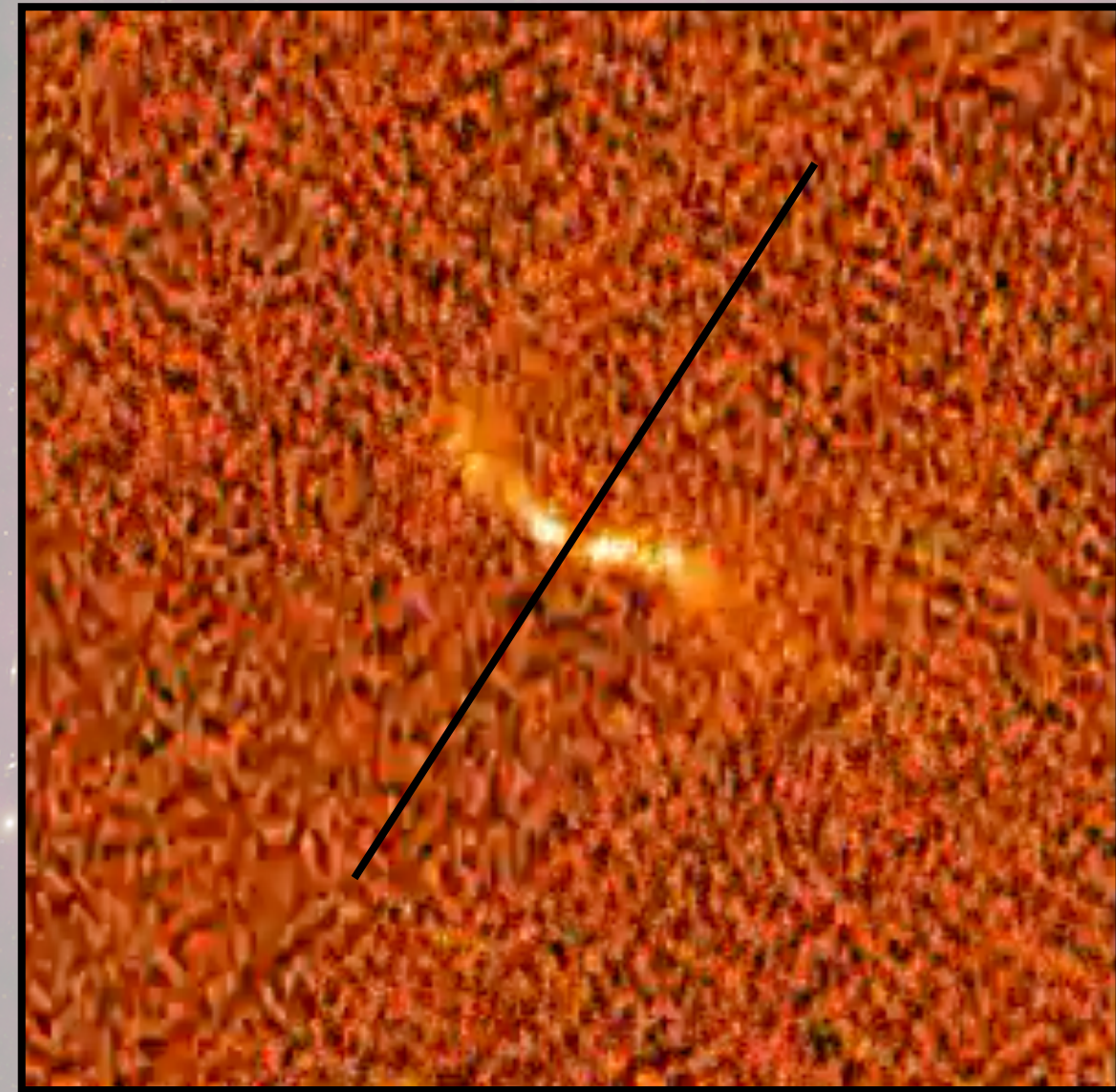


- Gebeurt niet vaak! Duurt gemiddeld 10^7 yr voordat een waterstofatoom flipt
- Maar er zijn 10^{66} waterstofatomen in een sterrenstelsel, dus waarneembaar
- Toch is de H I lijn is erg zwak.
Veel zwakker dan andere componenten van het ISM die stralen in radio, zoals bv CO
- We kunnen H I alleen detecteren in sterrenstelsels die relatief dichtbij staan, en alleen met lage resolutie (> 5 boogseconden).

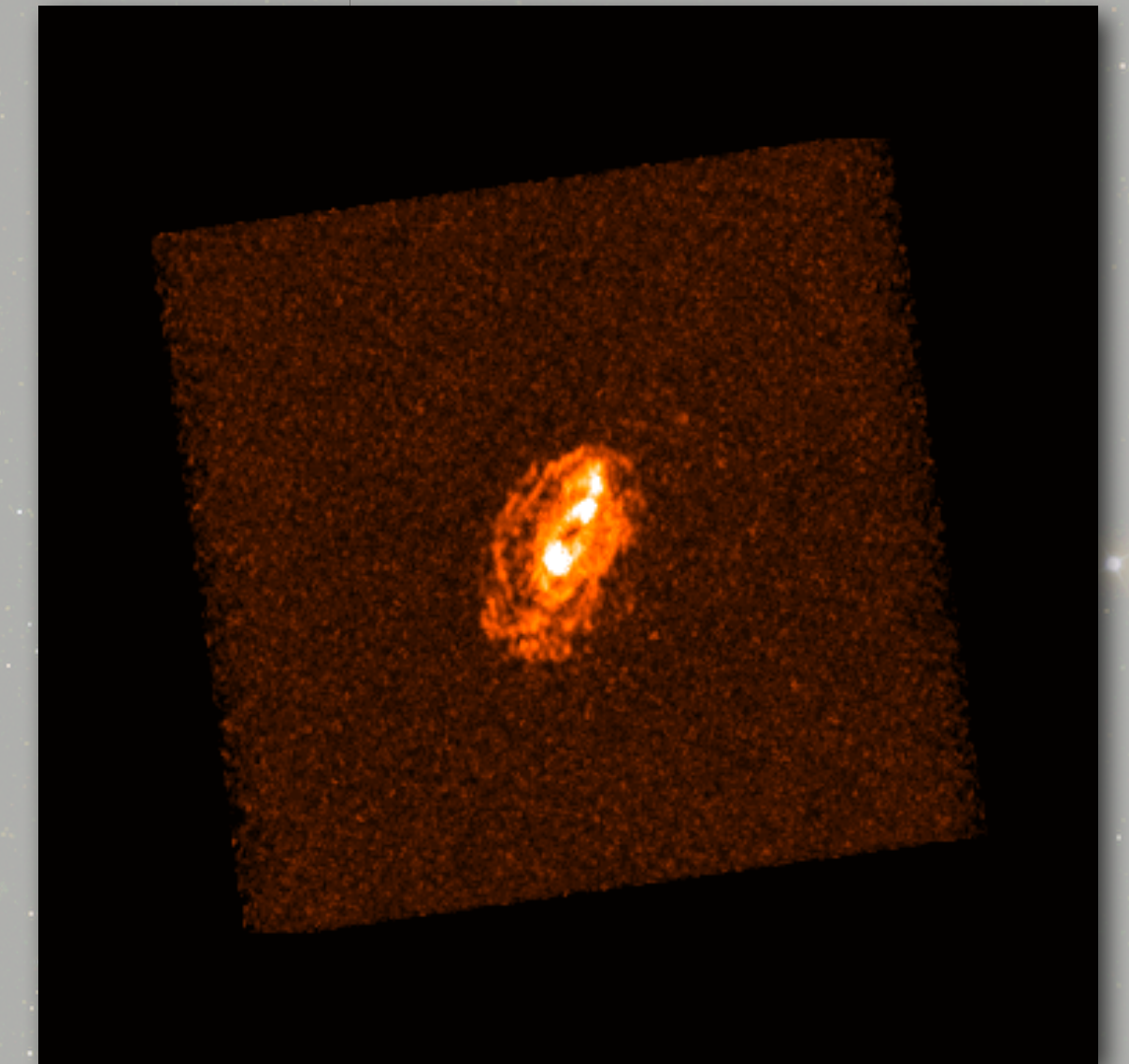
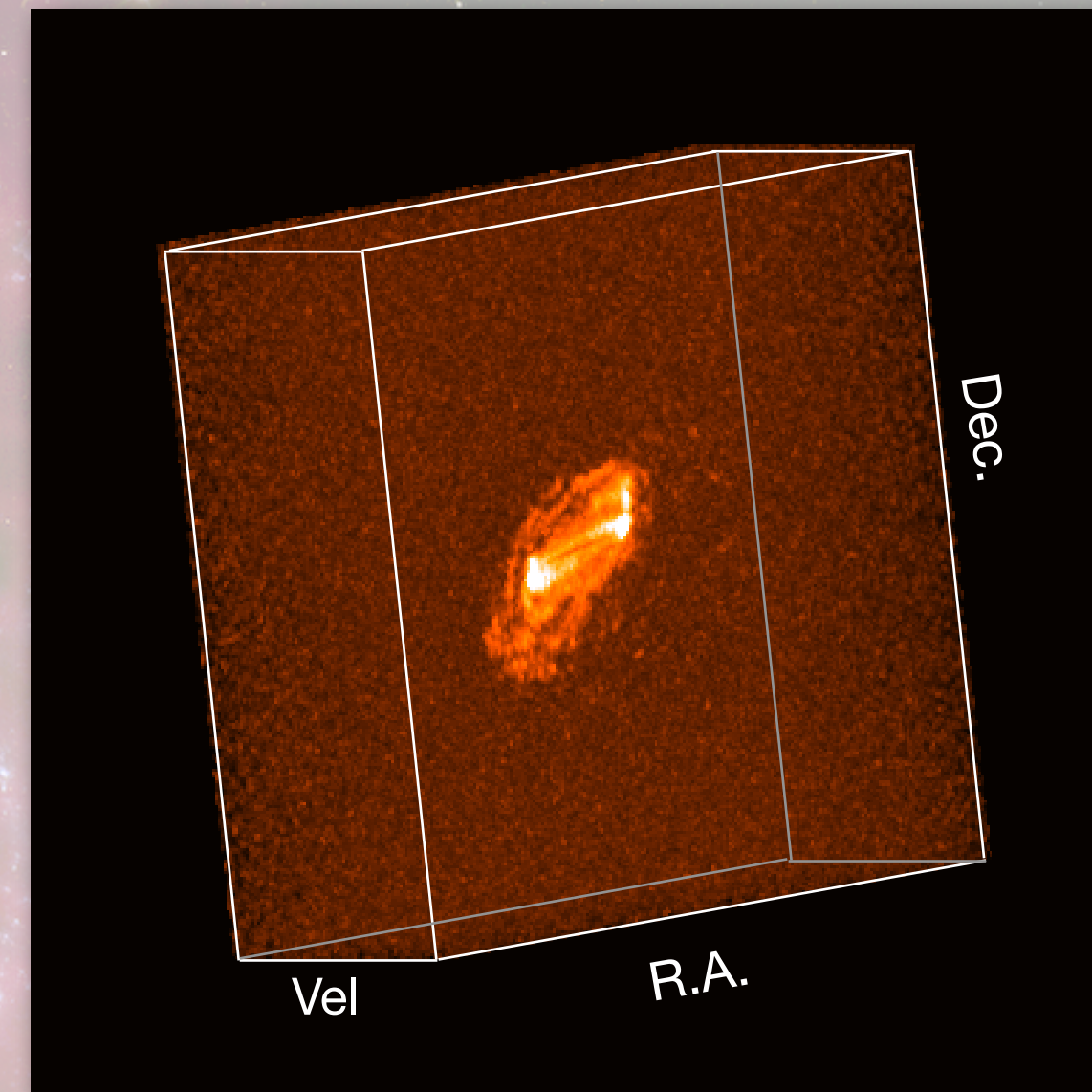
Hoe ziet een typische H I waarneming eruit?

Groot aantal beelden (kanalen), elk kanaal op een iets andere frequentie

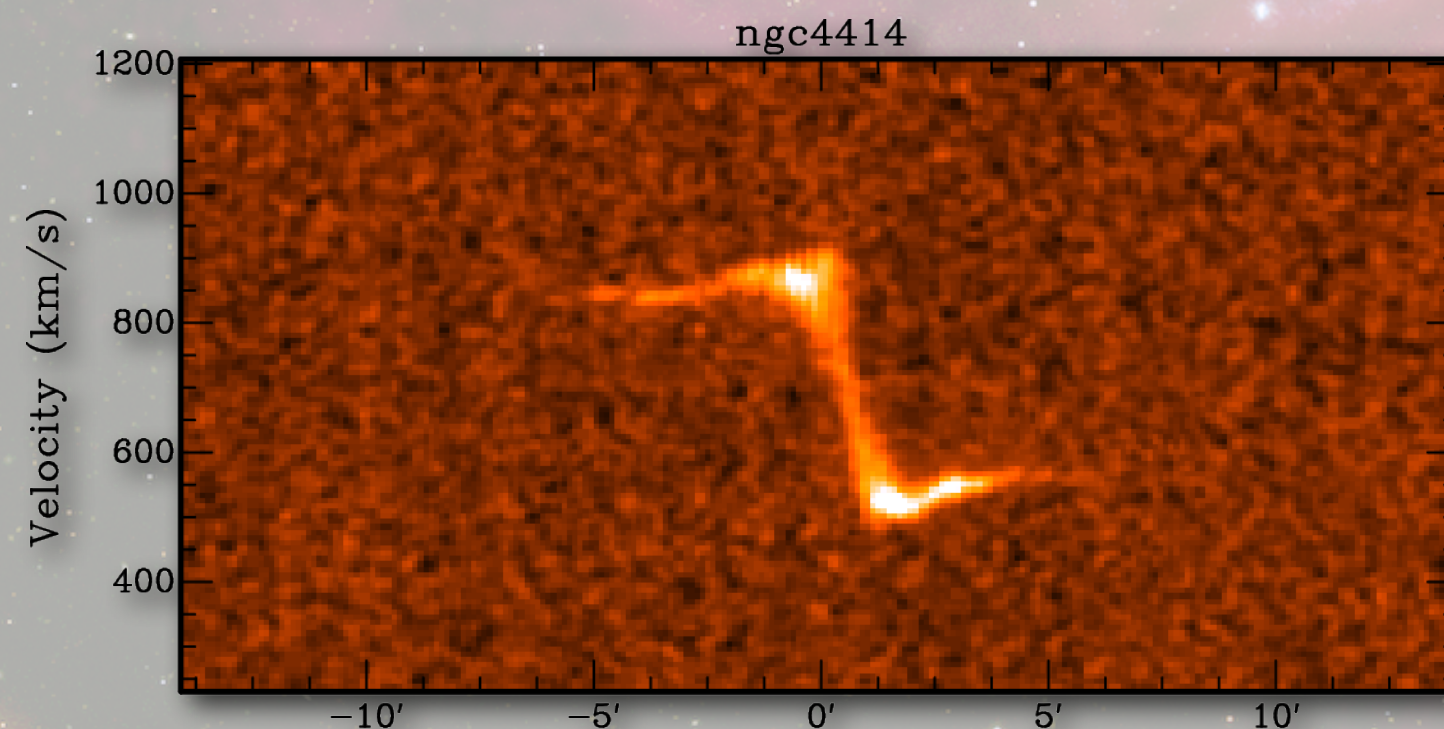
State-of-the-art: 32768 kanalen, 900 - 1700 MHz. Klassieke WSRT 10-20 MHz breed met 1024 kanalen



film van kanalen van een waterstofschiif van een sterrenstelsel vergelijkbaar met de Melkweg. Waterstof wordt gedetekteerd op verschillende frequenties



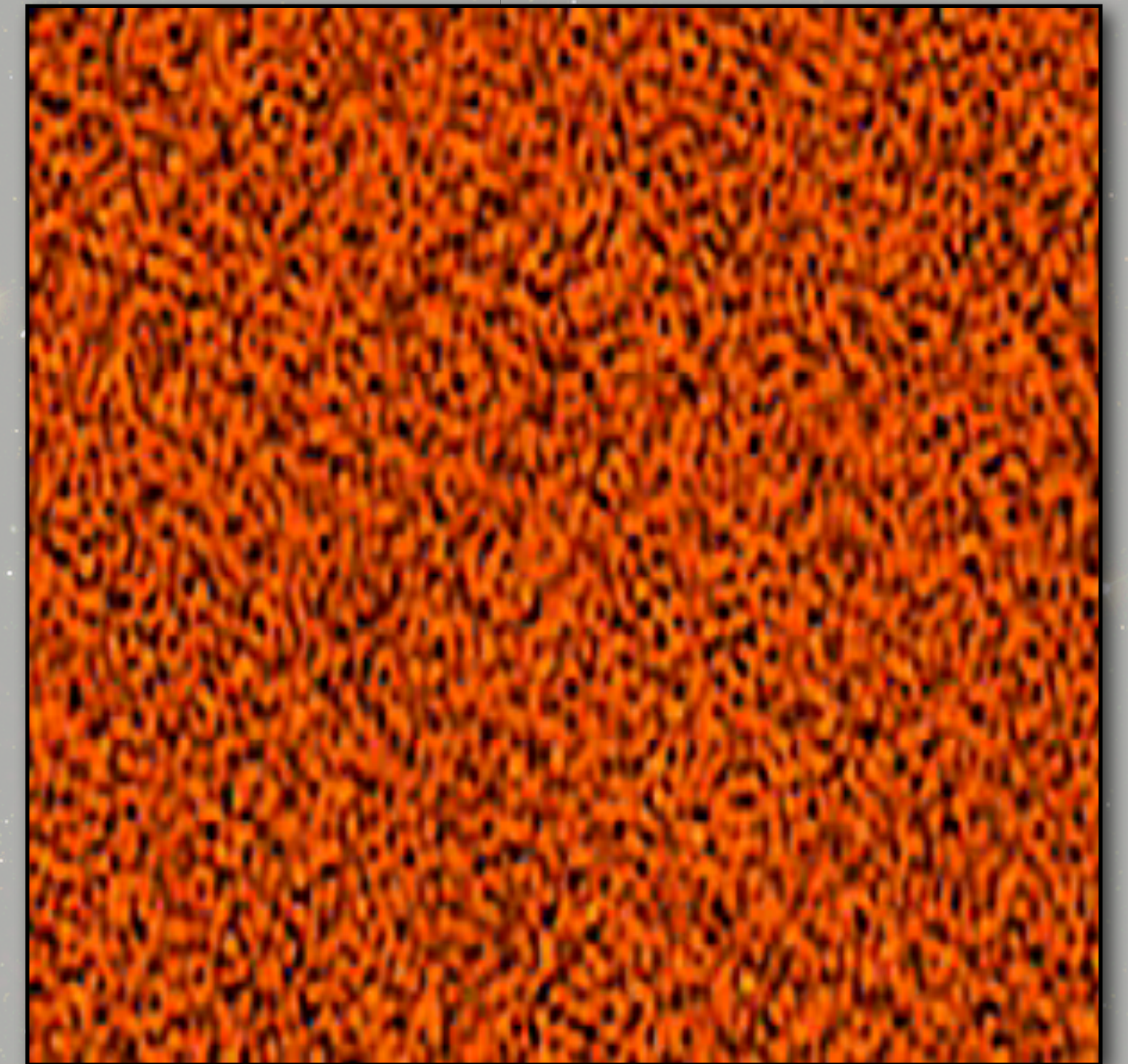
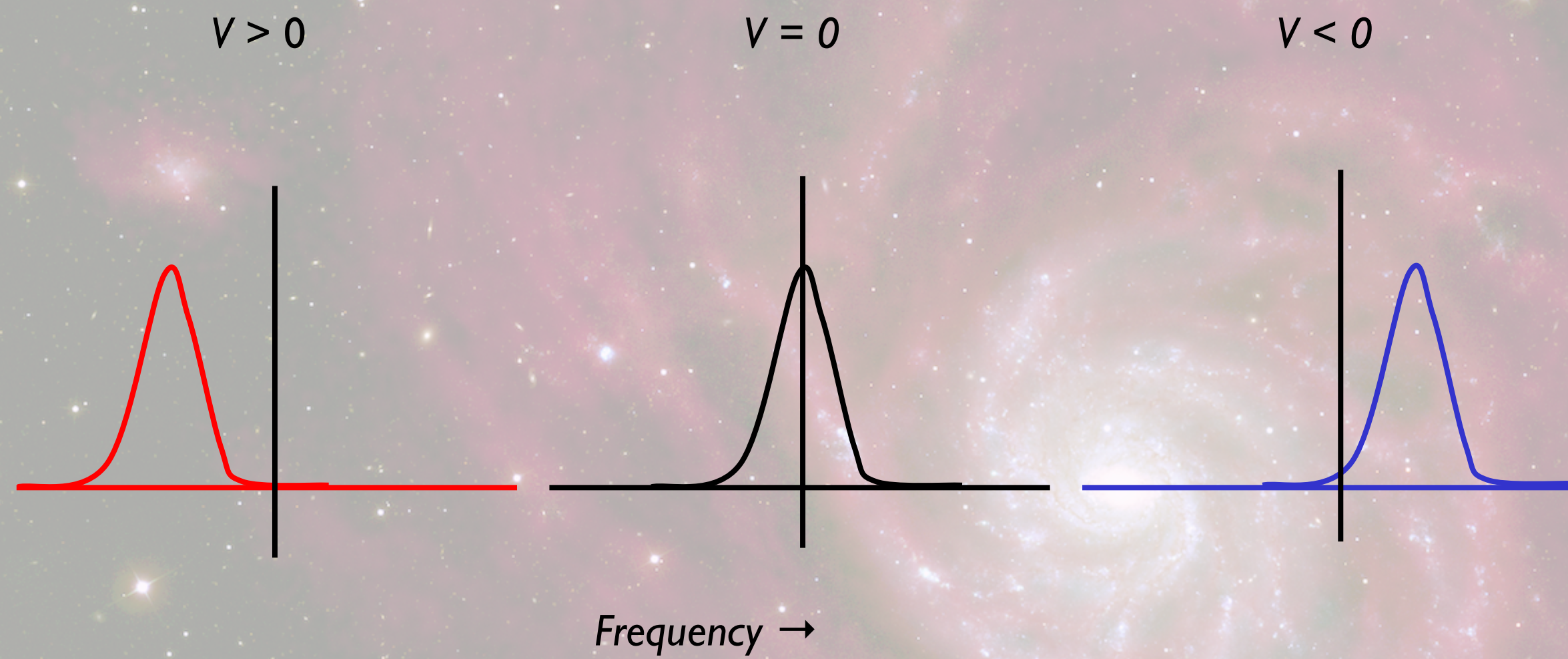
kan de data kubus op verschillende manieren doorsnijden:
positie-snelheids kaart



Waarneming geeft een 3-D dataset
Data kubus

Doppler effect

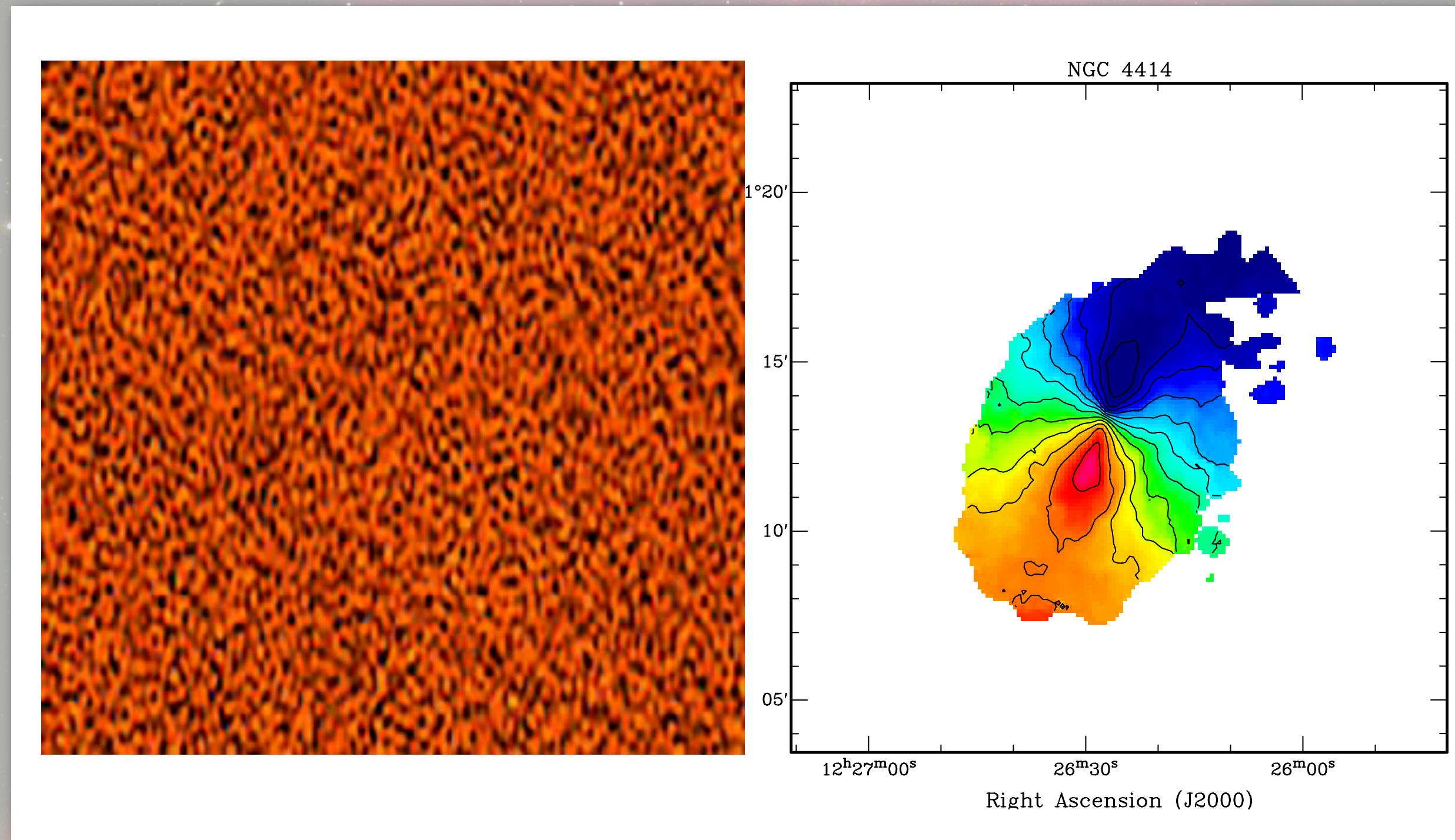
- Ontvangen frequentie hangt af van de snelheid van de emitter



De rotatie van de waterstofschijs
veroorzaakt verschuiving in frequentie

Kinematica

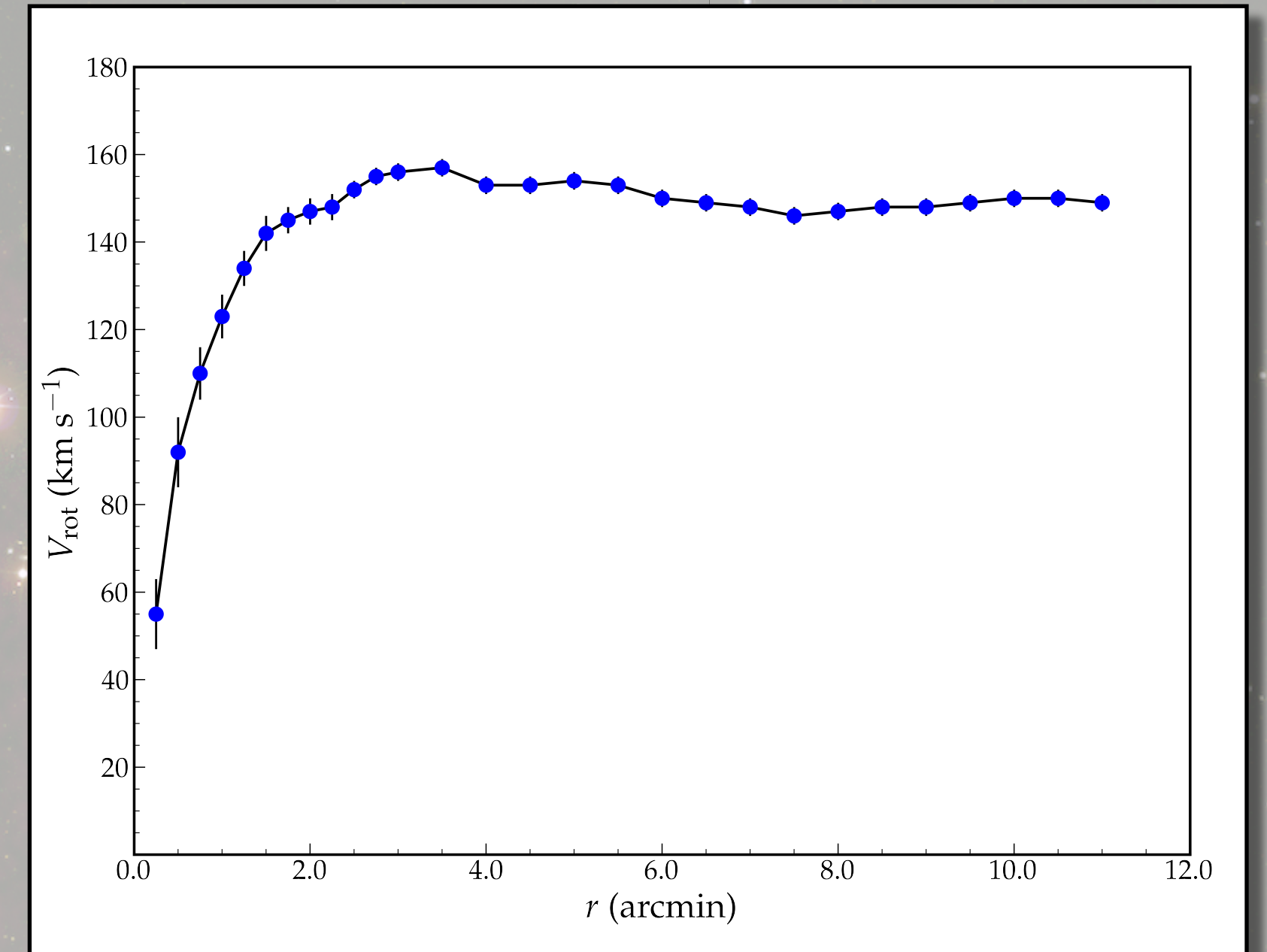
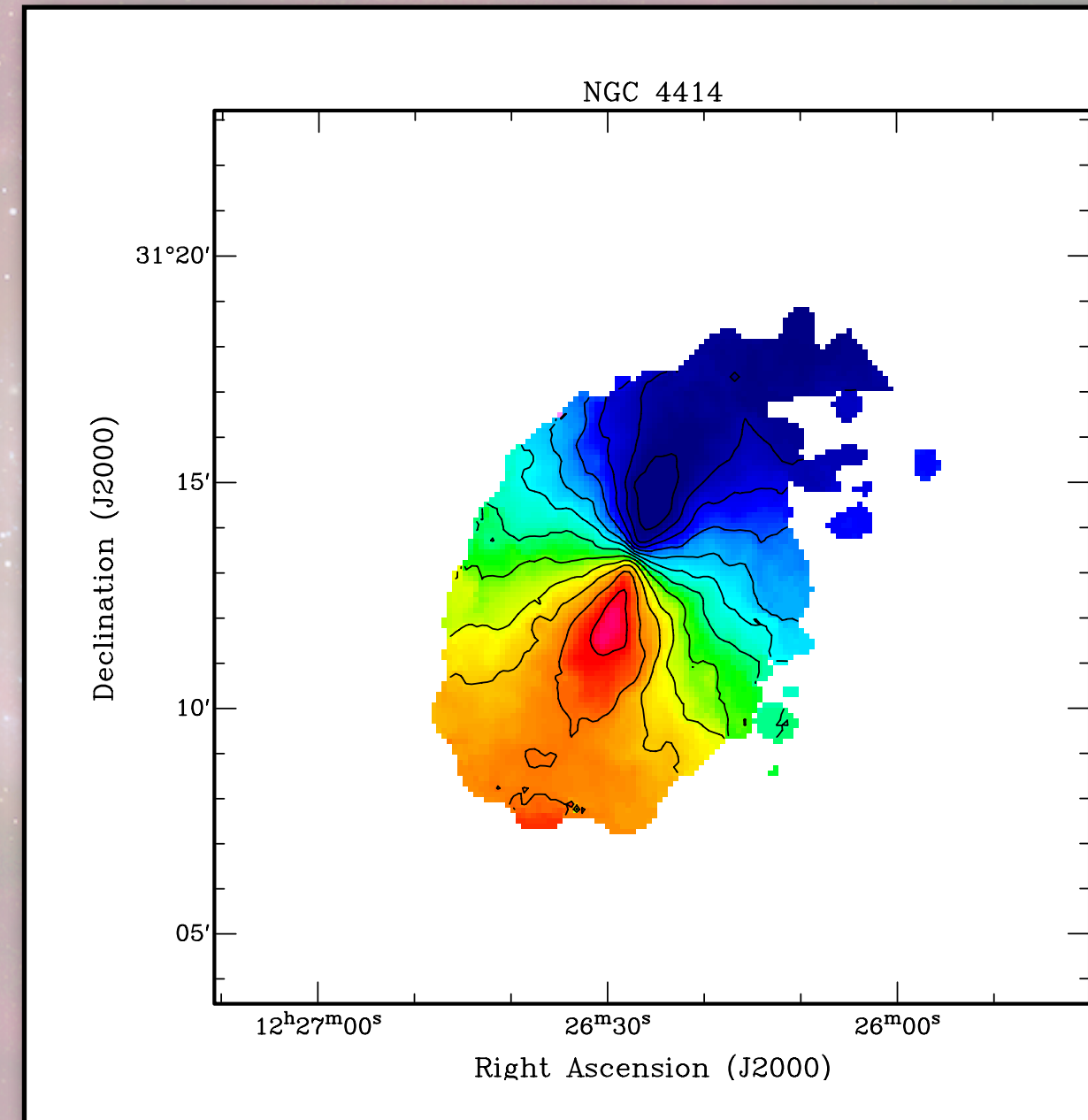
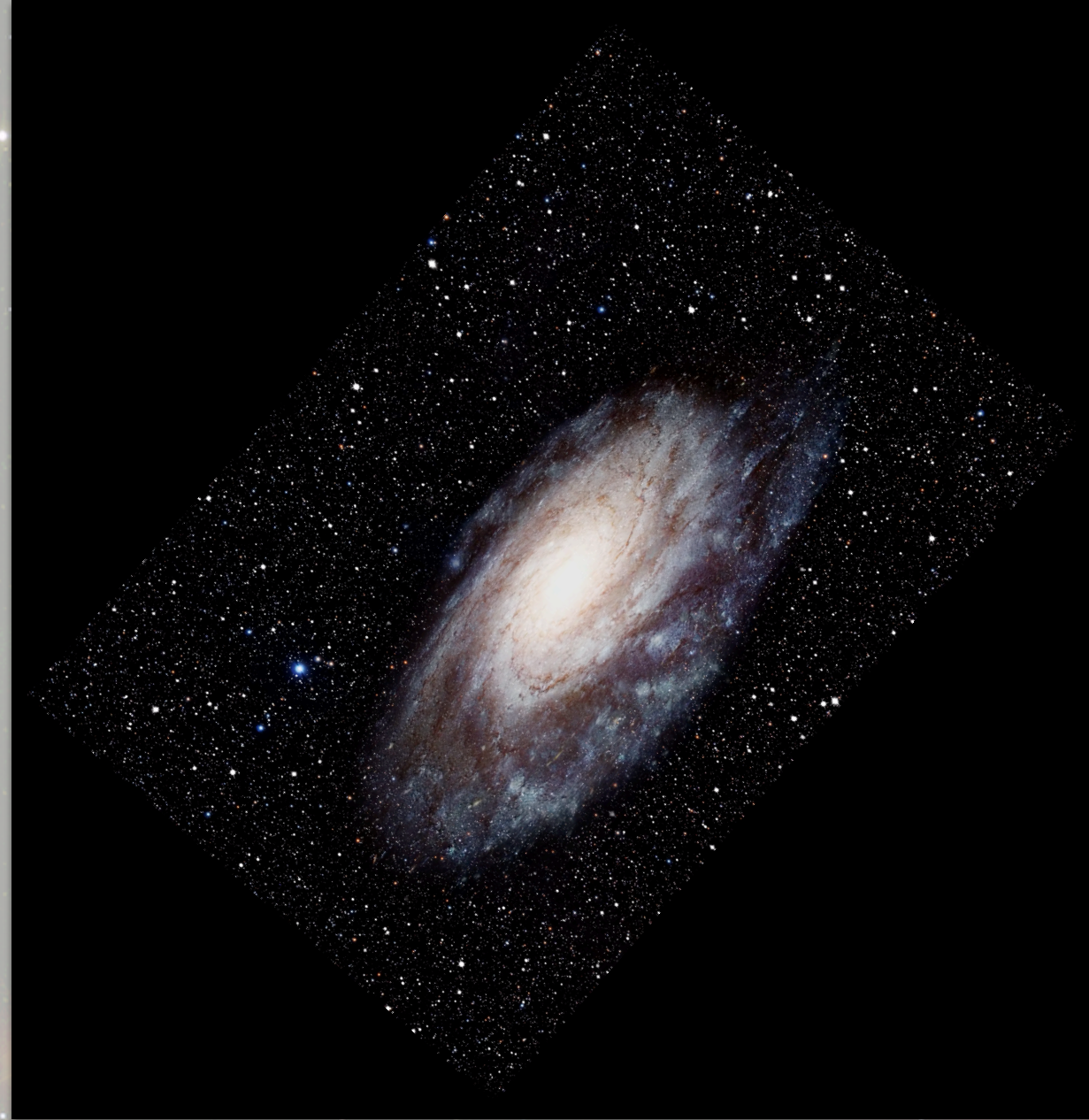
- Voor elke positie kunnen we dus de snelheid meten
⇒ een ‘snelheidsveld’: kaart met de snelheden van het gas



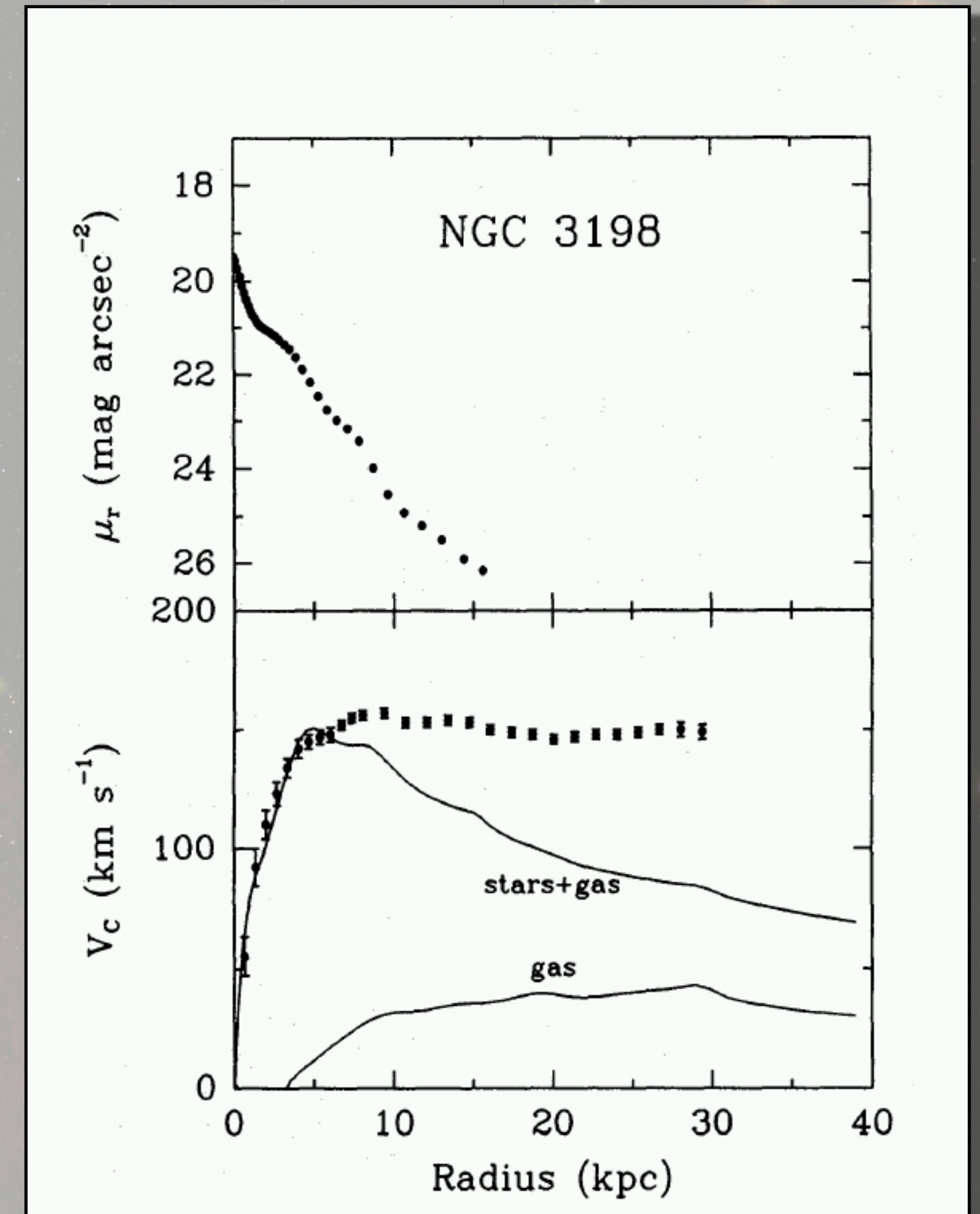
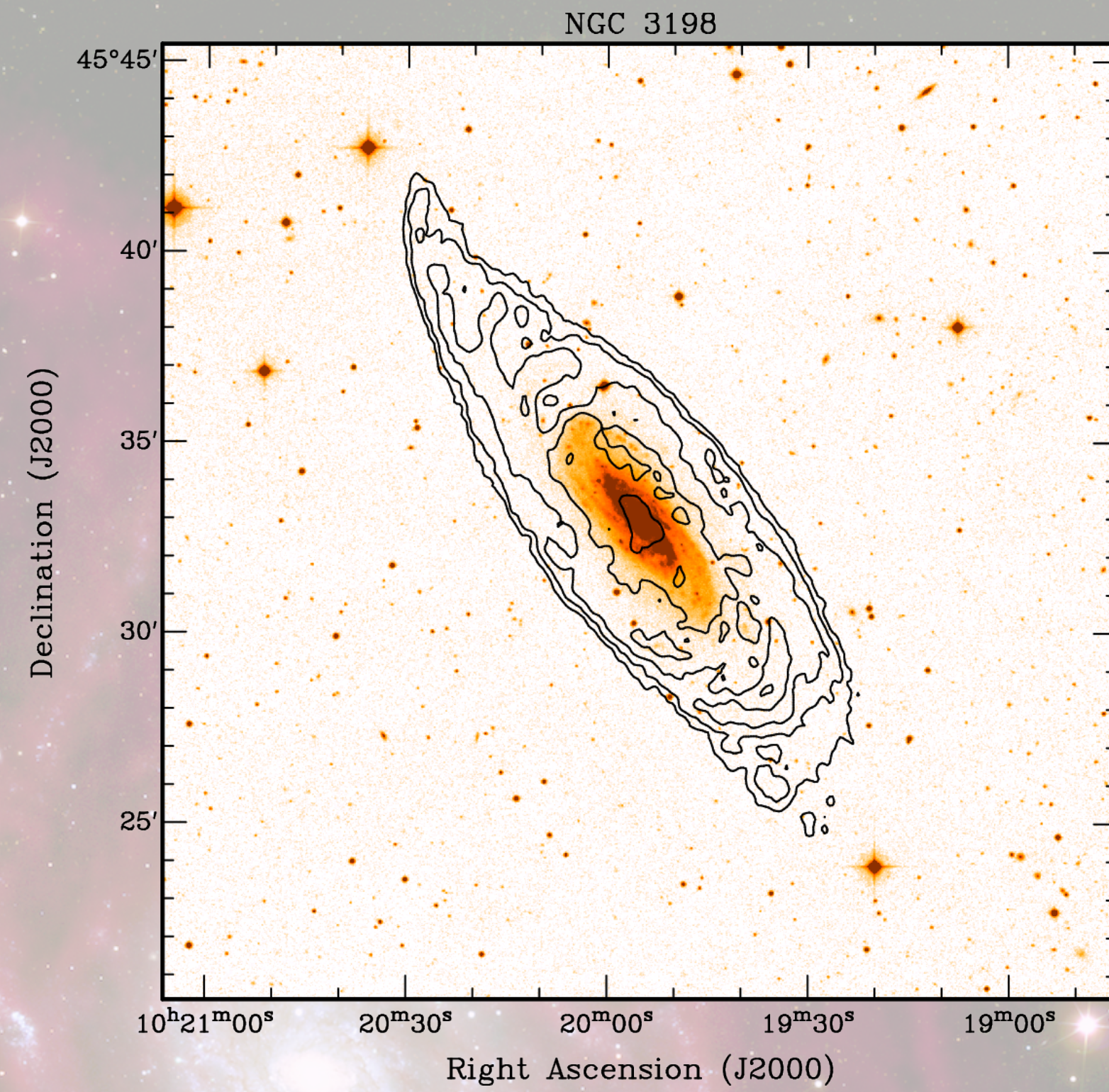
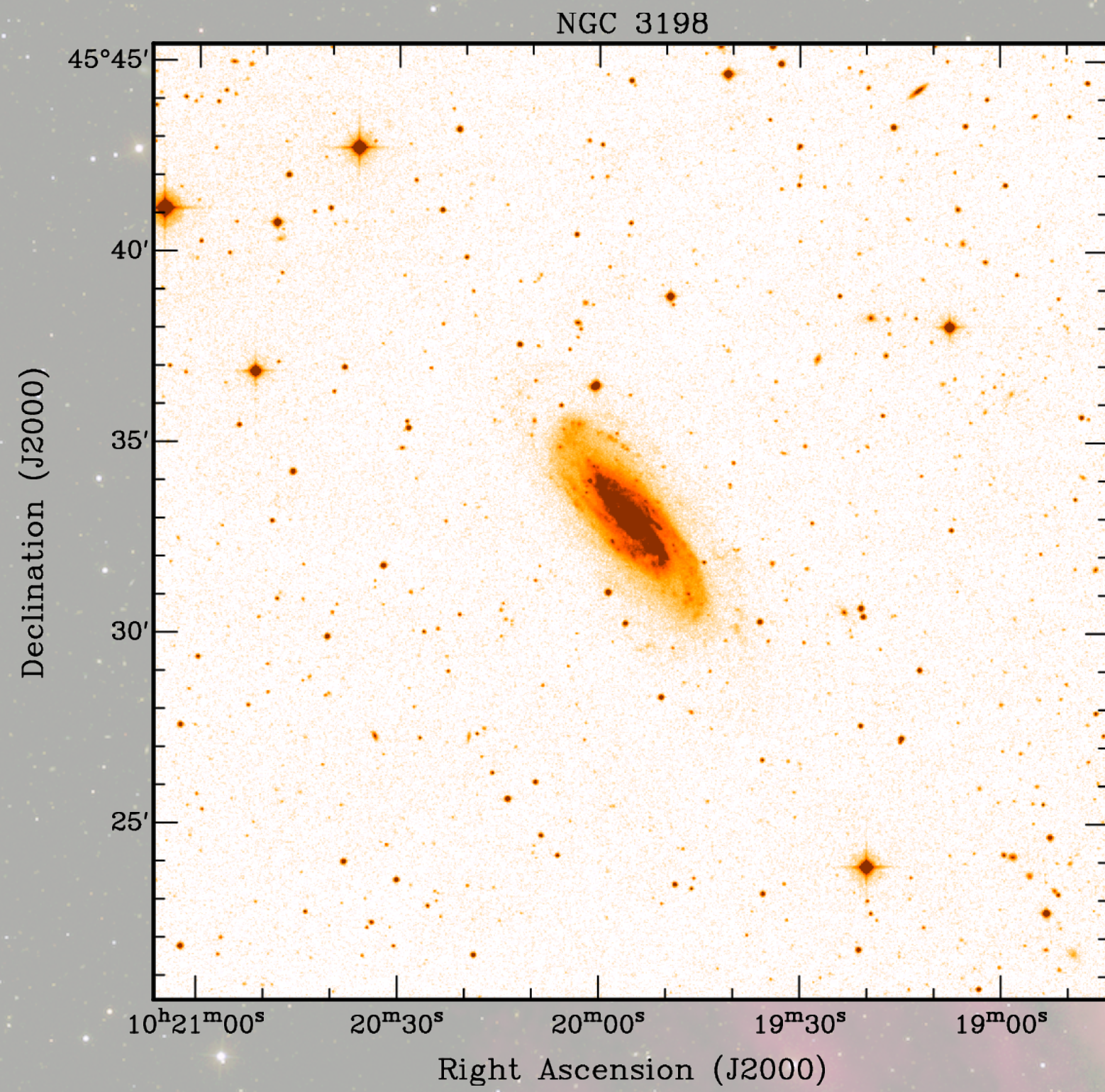
Kinematica

- Als we aannemen dat de waterstof een platte, roterende schijf is, net als de Melkweg, kunnen we bepalen hoe de rotatiesnelheid afhangt van de afstand tot het centrum van het sterrenstelsel

⇒ rotatiekromme



Rotatiekromme is vlak!!



Je kunt op grond van de waargenomen verdeling van de sterren en het gas voorspellen hoe de rotatiekromme eruit zou moeten zien

Voorspelde rotatiekrommen zijn *niet* vlak!!
Er moet nog een andere component zijn: donkere materie

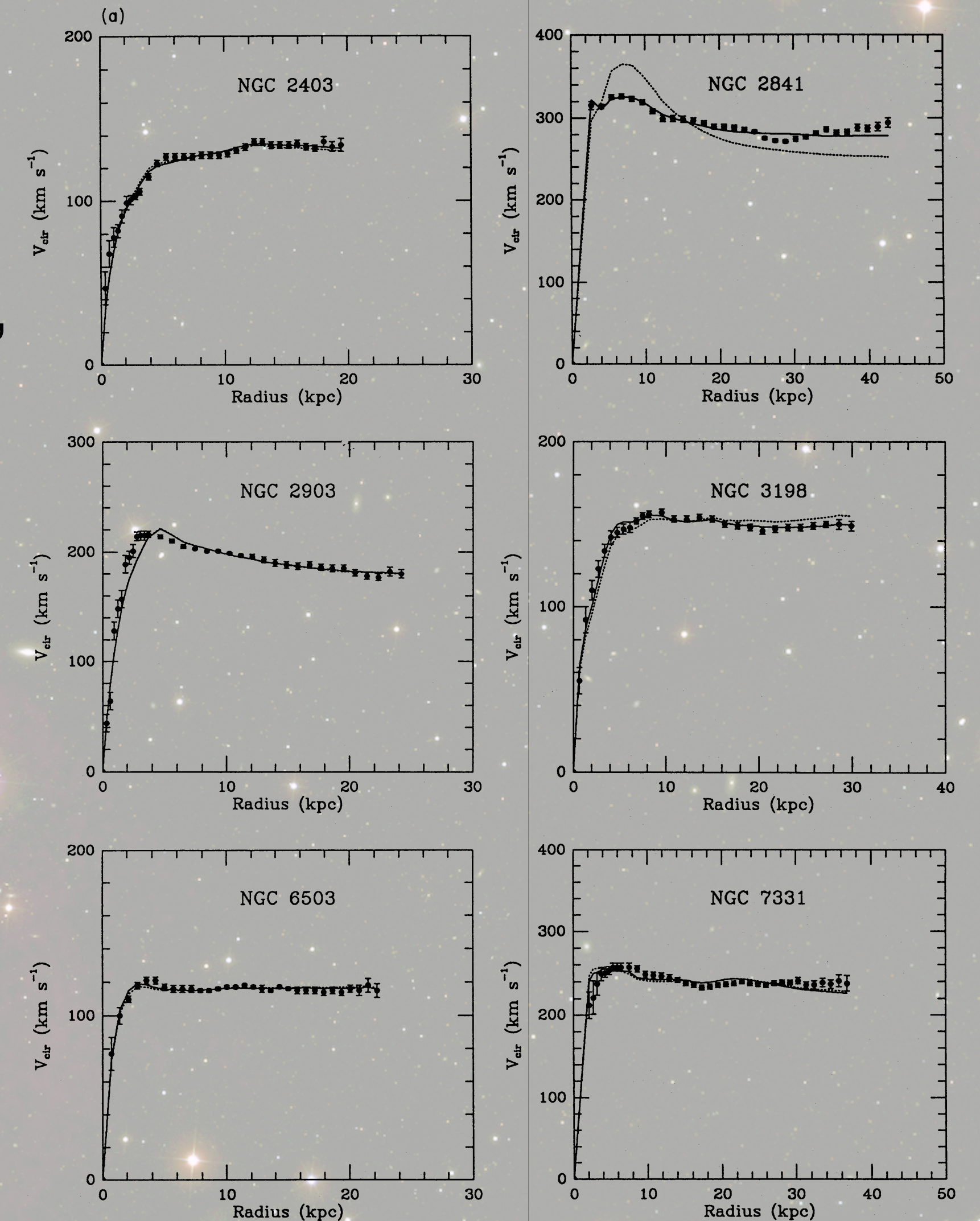
Begeman

Eind vorige eeuw was er veel debat over *donkere materie*

Vera Rubin claimde, op grond van optische waarnemingen, dat rotatiekrommen vlak zijn, maar die claim bleek onterecht, ze bestreken slechts de binnendelen van de stelsels

De vlakke rotatiekrommen mbv WSRT waarnemingen gingen tot veel grotere straal en gaven daardoor doorslaggevend bewijs dat stelsels donkere materie hebben

slechts 1/5 van alle materie in het heelal is 'normale' materie, de rest is 'iets anders', en we weten nog steeds niet wat het is

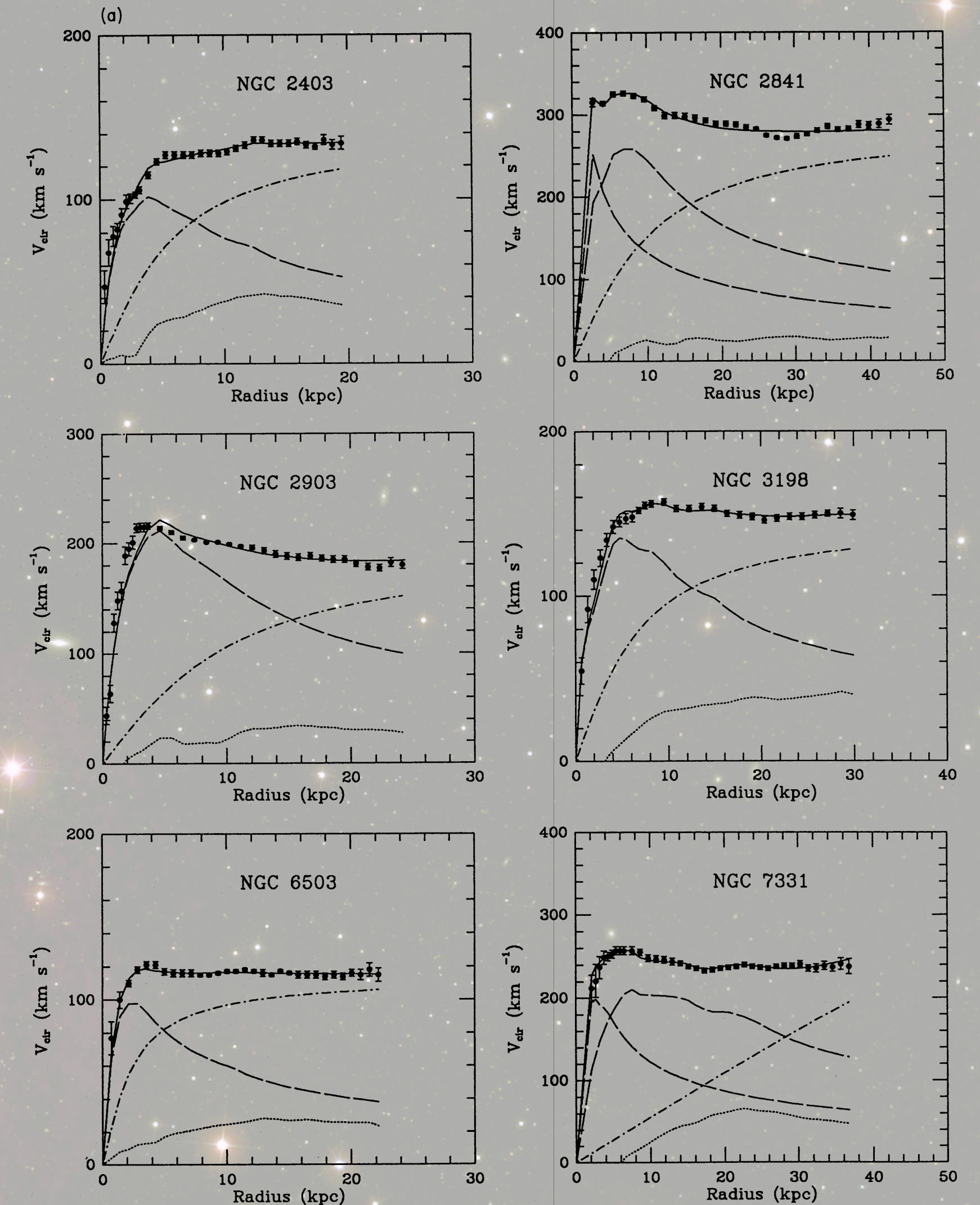


Sancisi, van Albada, Begeman, Bosma...

Er is een donkere massacomponent nodig om de rotatiekrommen vlak te maken

De vlakke rotatiekrommen mbv WSRT waarnemingen gaven doorslaggevend bewijs dat alle stelsels donkere materie hebben

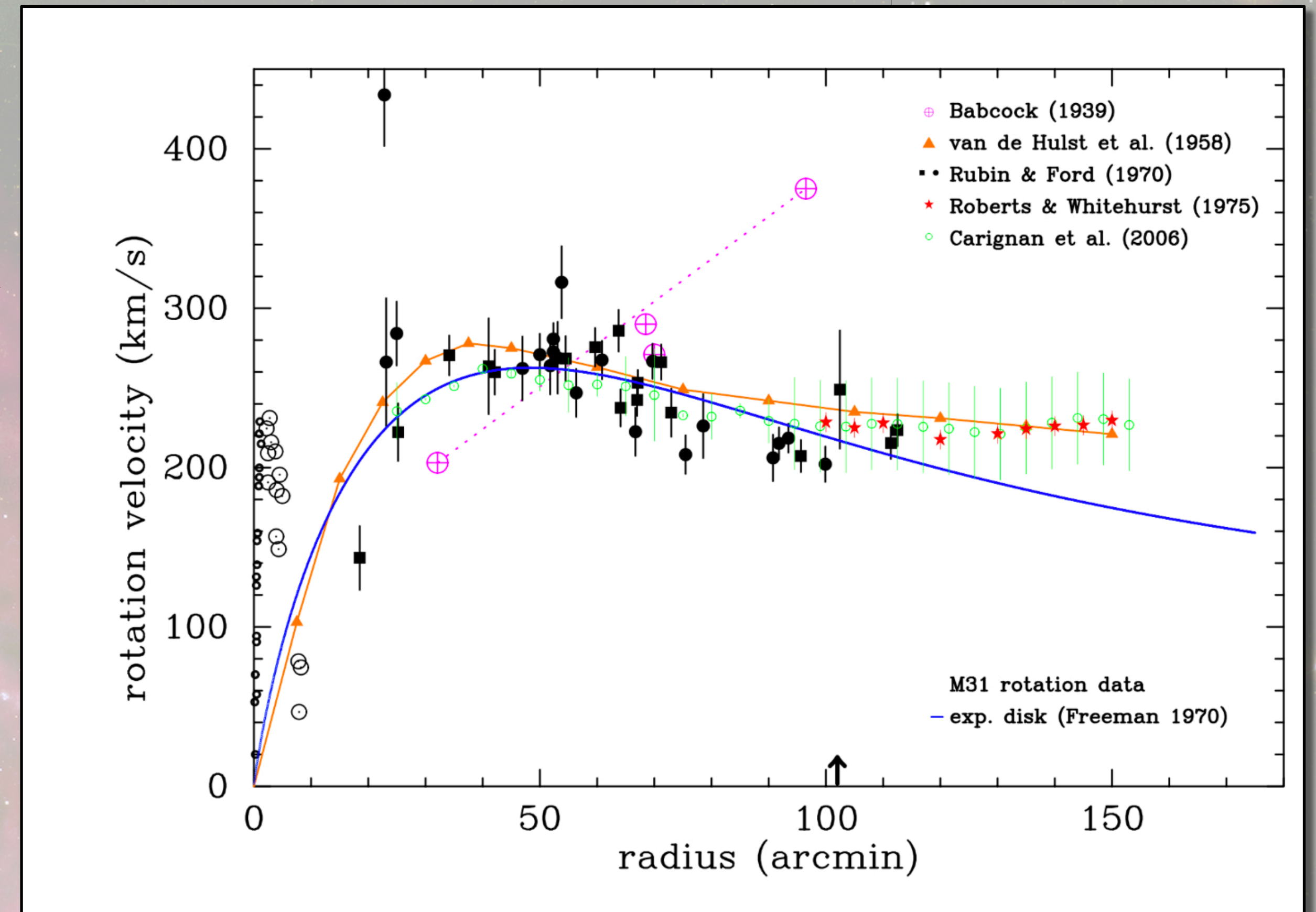
Donkere materie is nu een standaard ingrediënt van alle kosmologische modellen voor de evolutie van het heelal en van sterrenstelsels (zonder te weten wat het is....)



de discussie over vlakke rotatiekrommen werd beslist rond 1985

maar van de Hulst et al. hadden het eigenlijk al in 1957 gezien in M31 met Dwingeloo

maar het concept donkere materie bestond toen nog niet en andere verklaringen werden gezocht, bv verandering van de sterpopulatie met straal



van de Hulst, Raimond, van Woerden

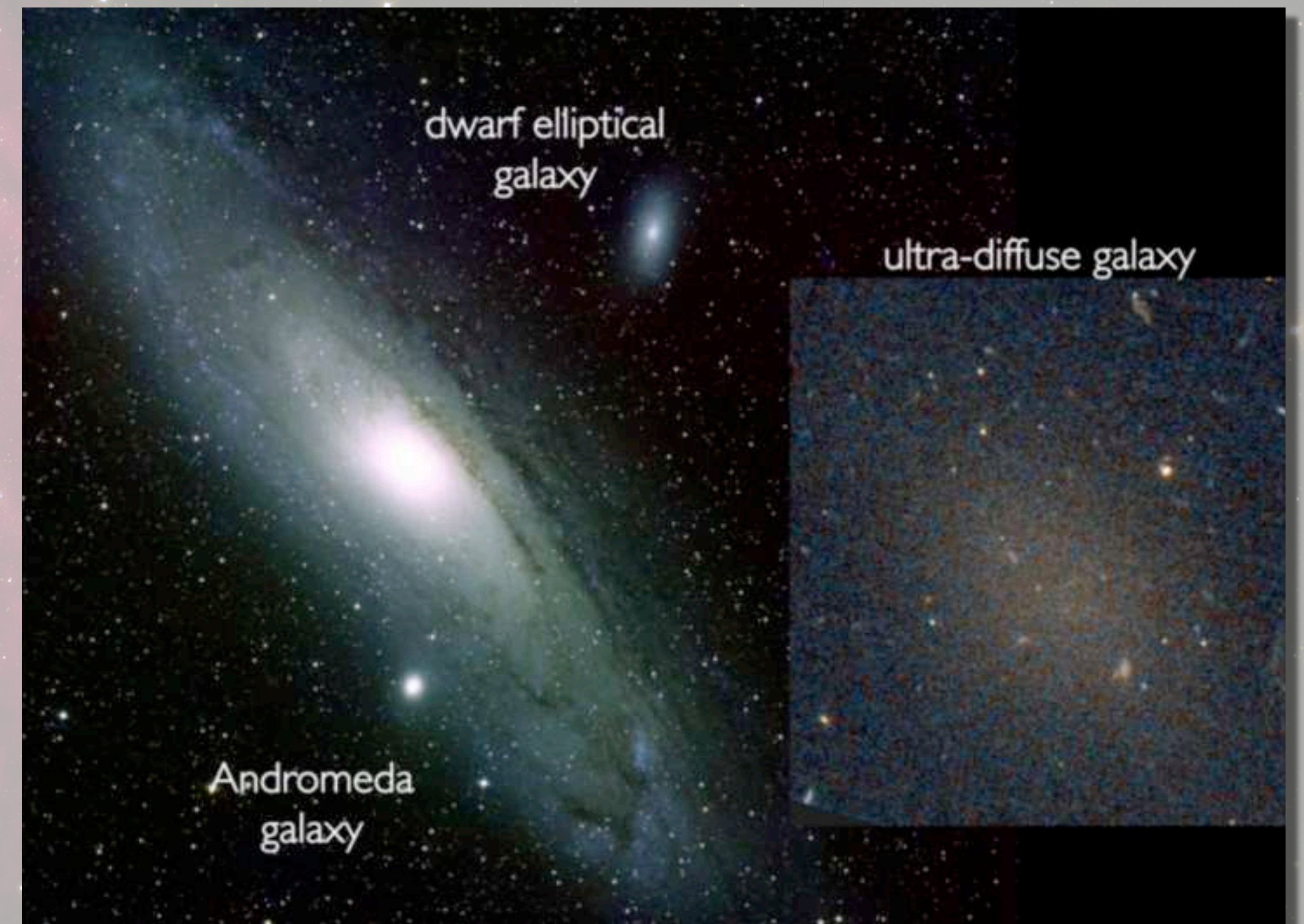
Na 1985 was de consensus dat alle sterrenstelsels DM hebben, de normale materie is slechts een klein deel ($\sim 20\%$).

Totdat veel later ultra-diffuse galaxies (UDG) werden ontdekt

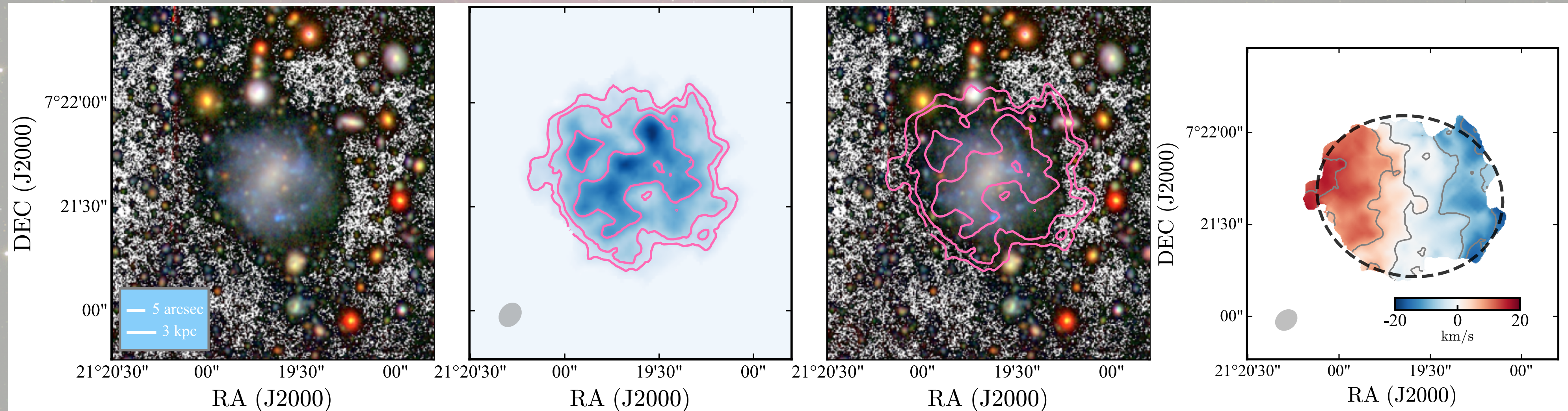
UDG:
heeft de massa van een dwergstelsel,
maar de grootte van een normaal stelsel

de oppervlaktehelderheid is dus heel laag
en zijn dus moeilijk te vinden

het lijkt erop dat UDGs 'geen' DM hebben



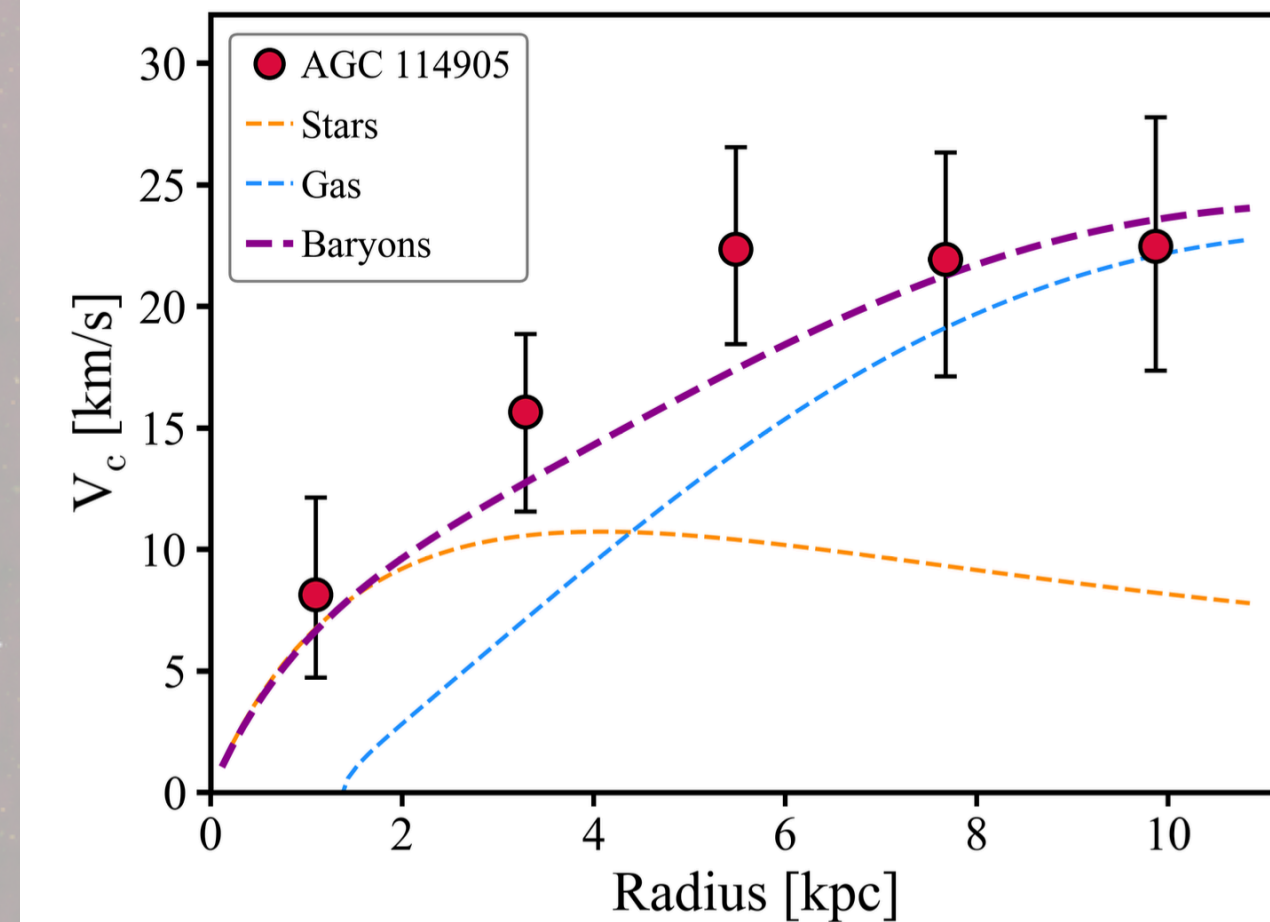
Voorbeeld: ACG I 14905



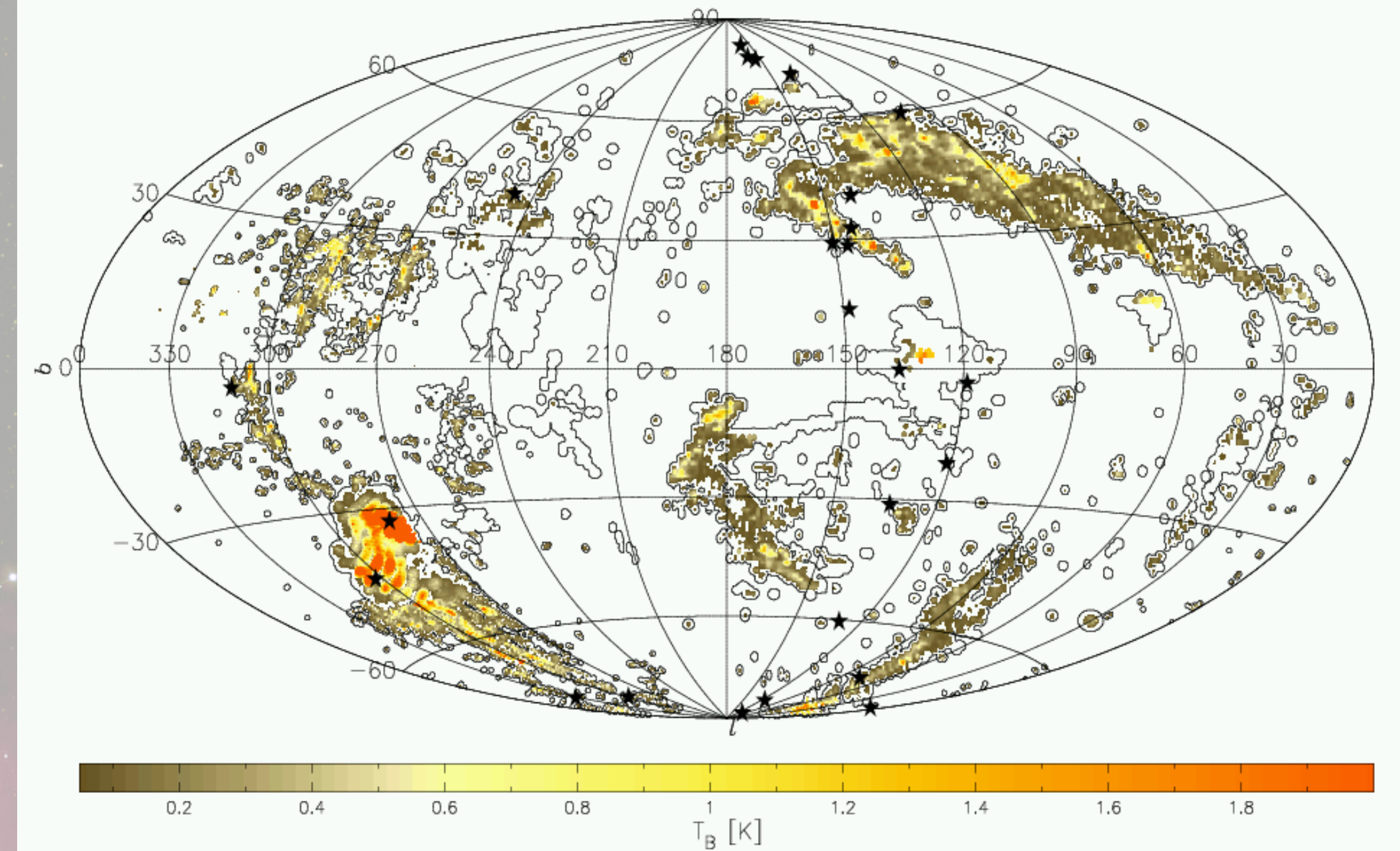
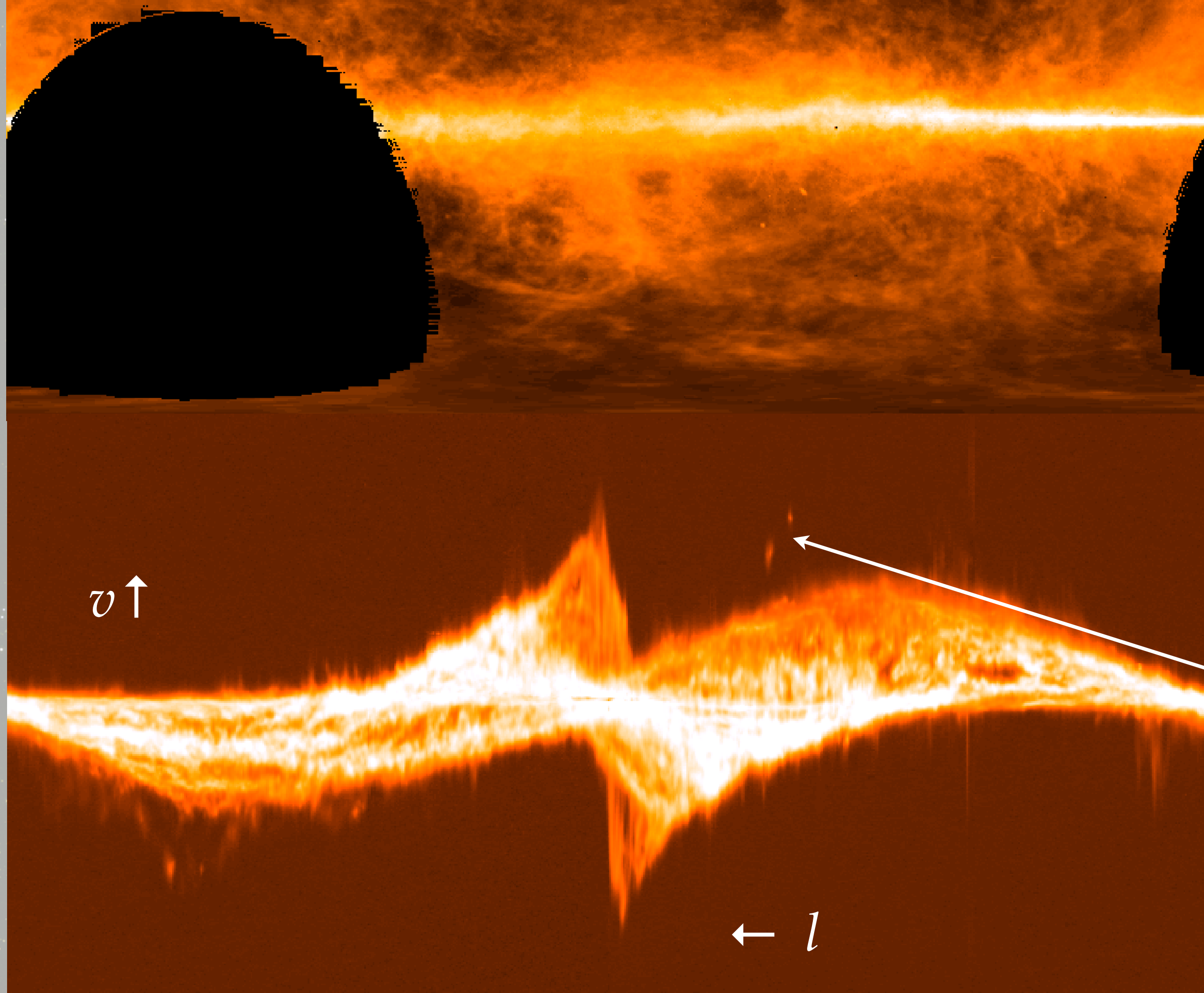
AGC114905 is een UDG met heel veel waterstof

rotatiekromme is 'vlak', en heeft geen DM nodig

UDG's hebben veel minder DM,
nog niet duidelijk wat dit betekent,
wordt nu veel onderzoek naar gedaan



De H I hemel gezien door de Dwingeloo schotel



De Dwingeloo H I survey was lang de standaard H I survey van de Melkweg.

Heeft geleid tot de ontdekking van hogesnelheidswolken (HVC).

Belangrijk voor het begrijpen van de 'ecologie' van de Melkweg

HVCs: gas met locatie/kinematica inconsistent met normale schijf

Belangrijke ontdekking gedaan met de Dwingeloo schotel
eerste HVC gevonden rond 1958

Gevonden over een groot deel van de hemel

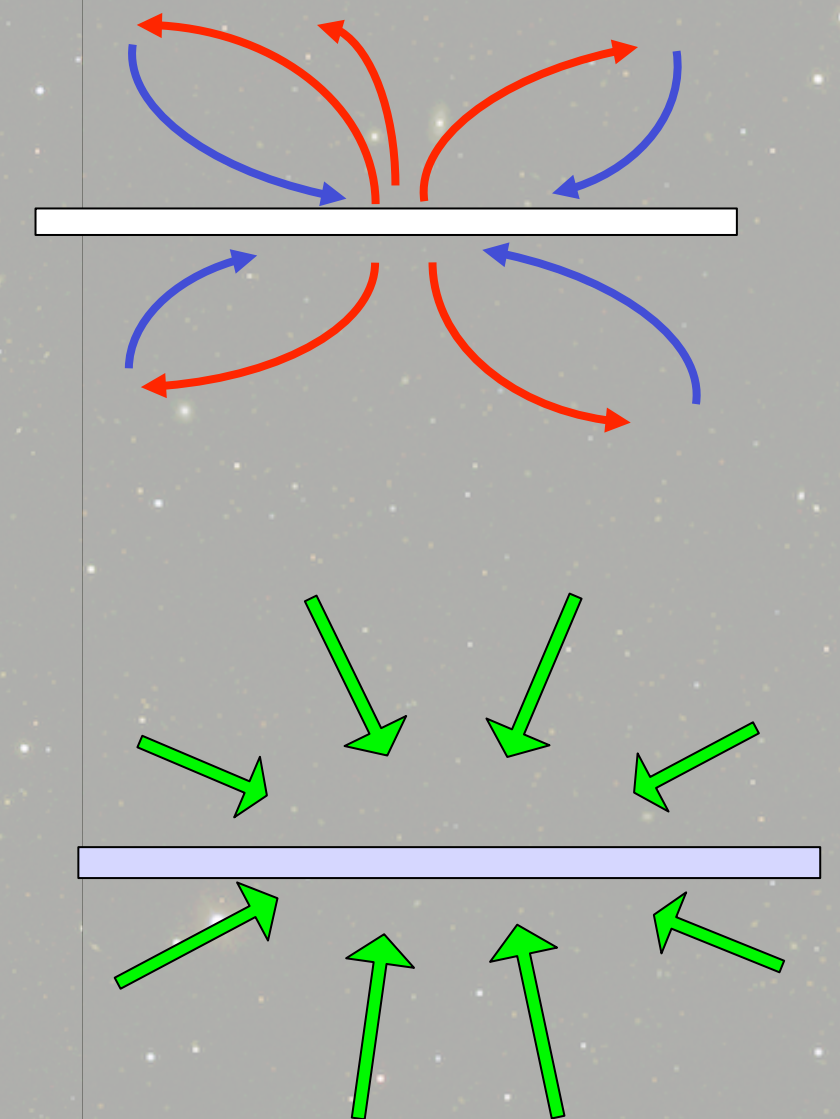
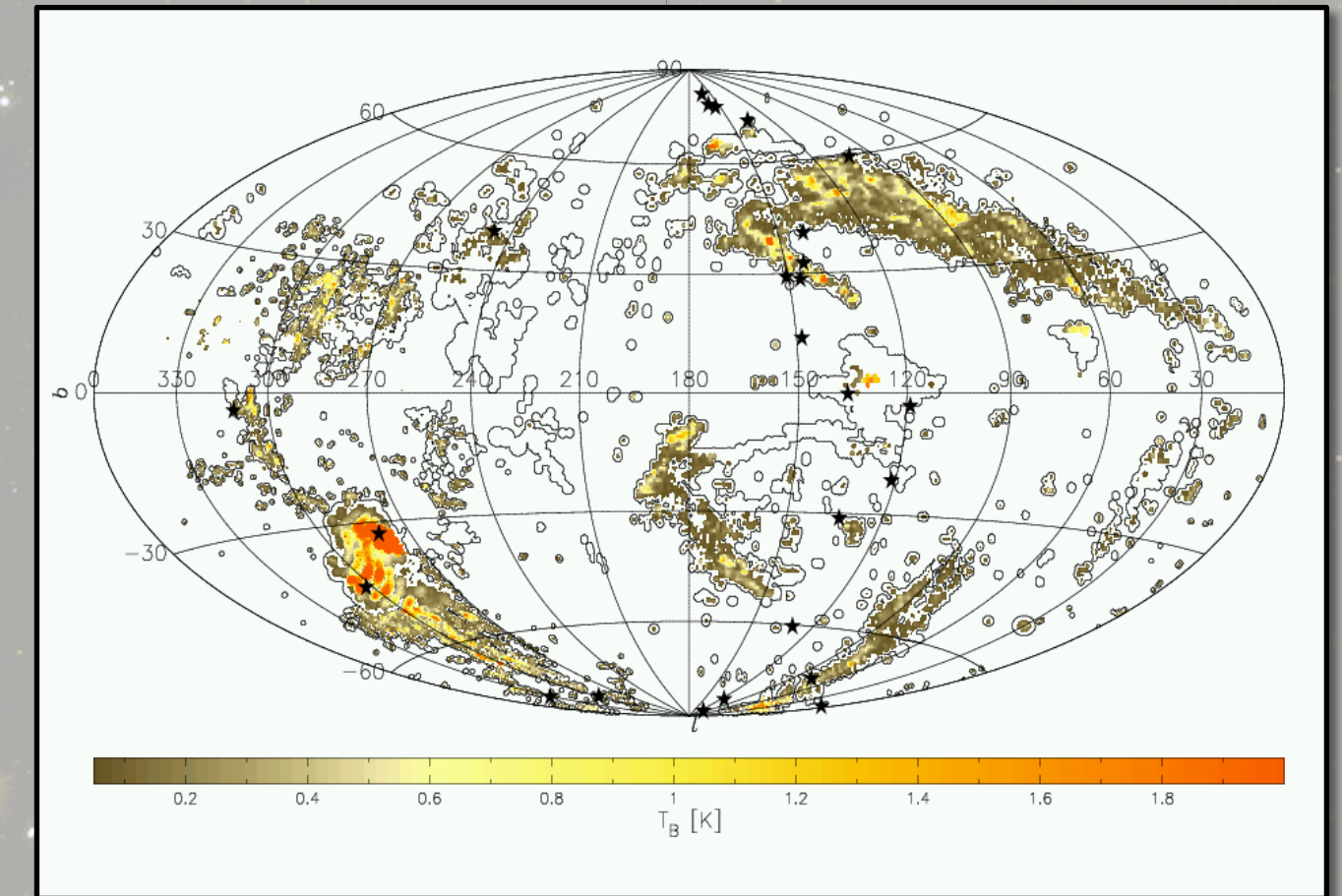
Mogelijke oorsprong:

- Supernovae en sterrenwinden blazen gas de schijf uit, de halo in, circulatie van gas (galactic fountains)
- Invangen van of interactie met begeleiders (bv Magelhaense wolken)
- Invangen van primordiaal gas

Speelt een belangrijke rol in de evolutie van de Melkweg:

- herverdeling van gas
- aanvoer van vers gas
 - de MW heeft $\sim 4 \times 10^9 M_{\odot}$ aan gas;
 - stervorming in de MW is $1-3 M_{\odot}/\text{jaar}$
 - \Rightarrow in $\sim 10^9$ jaar is het gas op!!! Maar de MW is veel ouder: wat houdt de stervorming op gang?

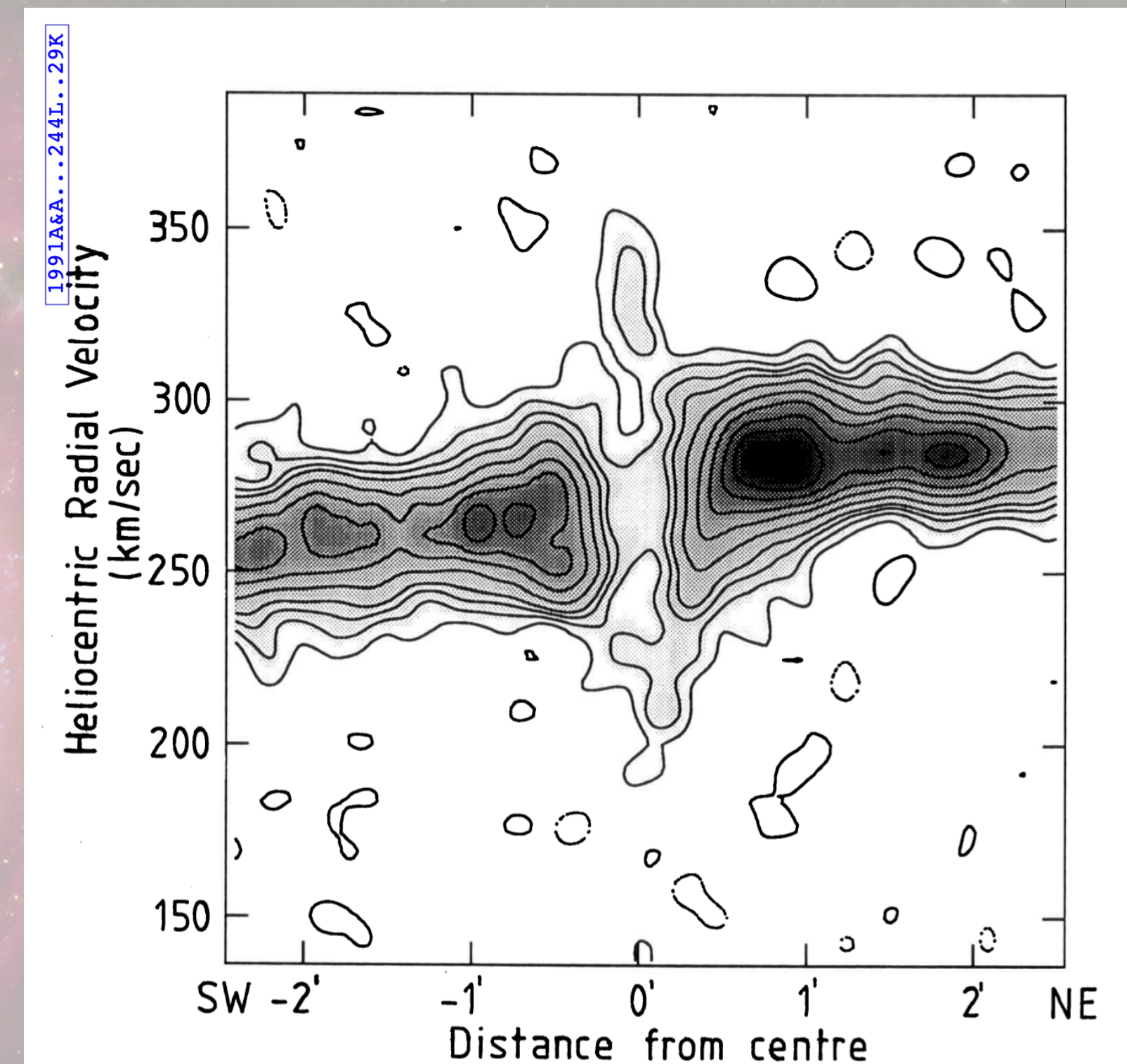
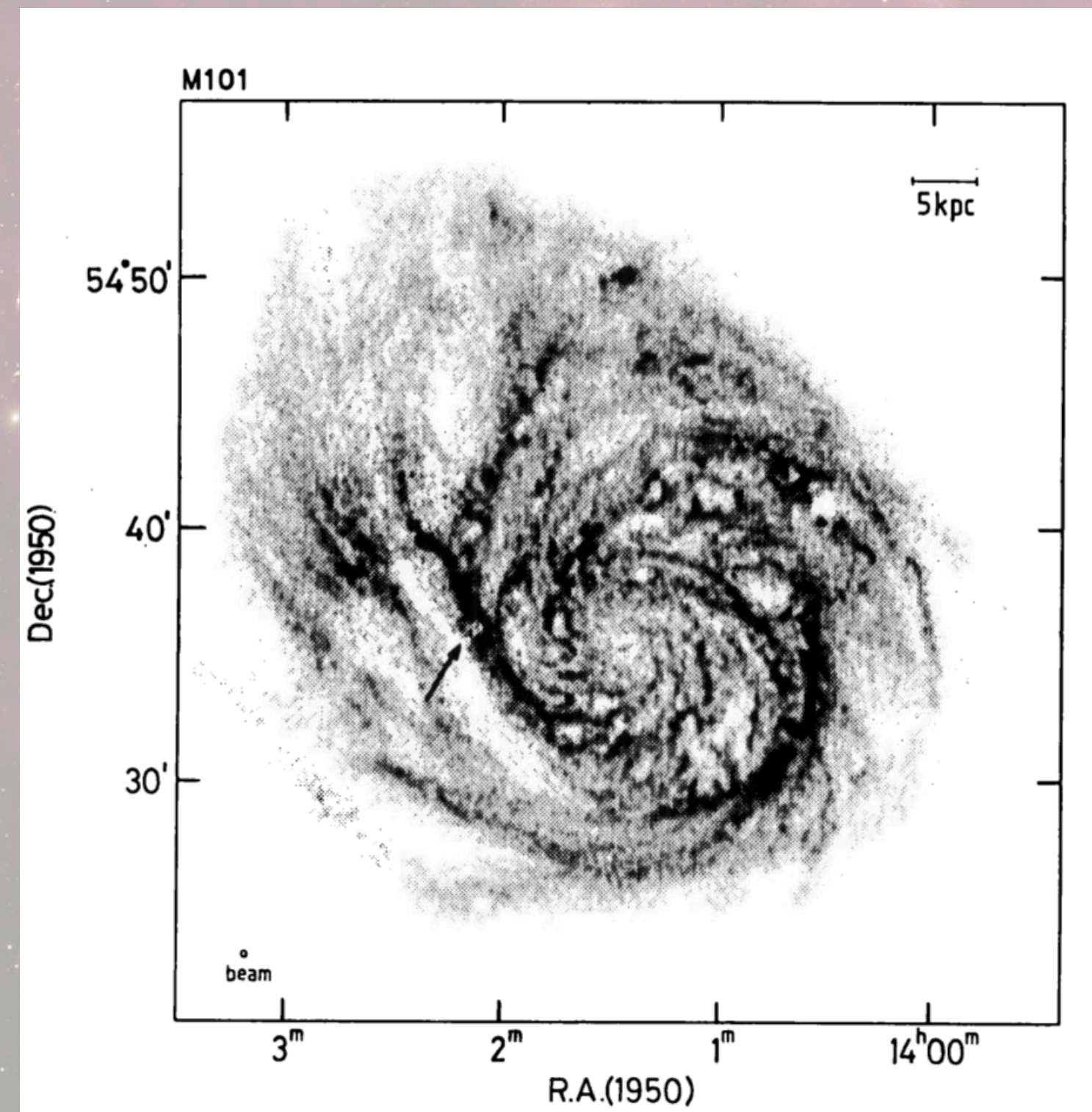
Probleem: moeilijk om de afstand van de HVCs te bepalen, en dus de massa en de ruimtelijke verdeling van de HVCs, en dus de oorsprong



Oplossing: HVCs in andere sterrenstelsels bekijken want dan is het wel mogelijk de massa en de verdeling te bepalen

Klassiek voorbeeld: de 'bubble' in M101

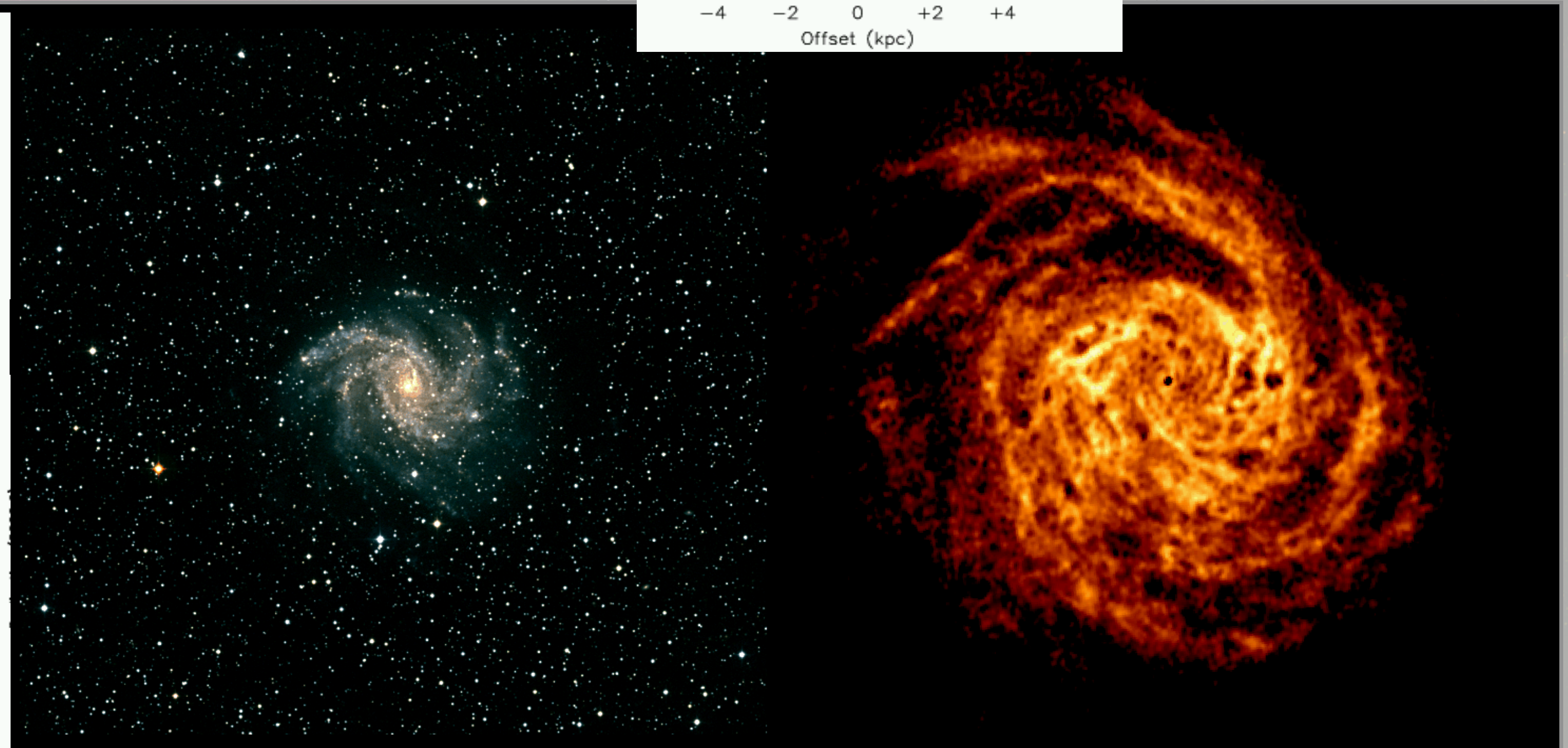
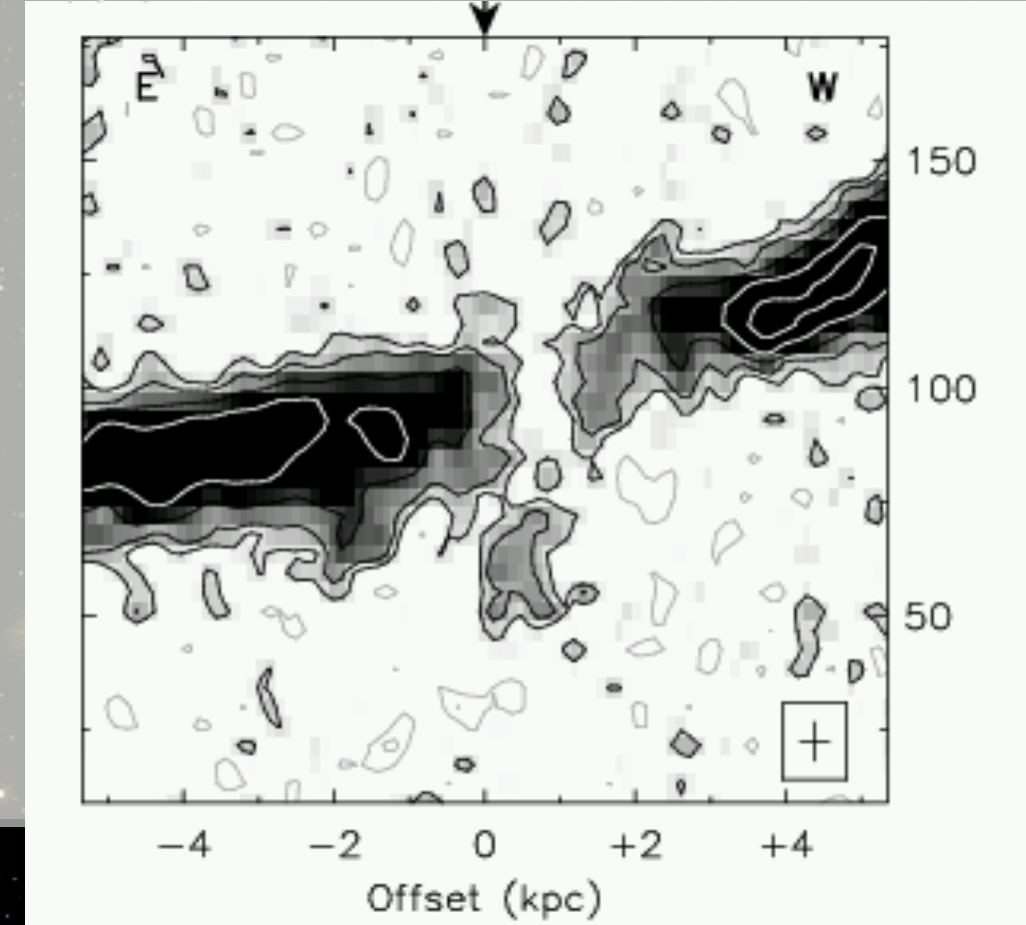
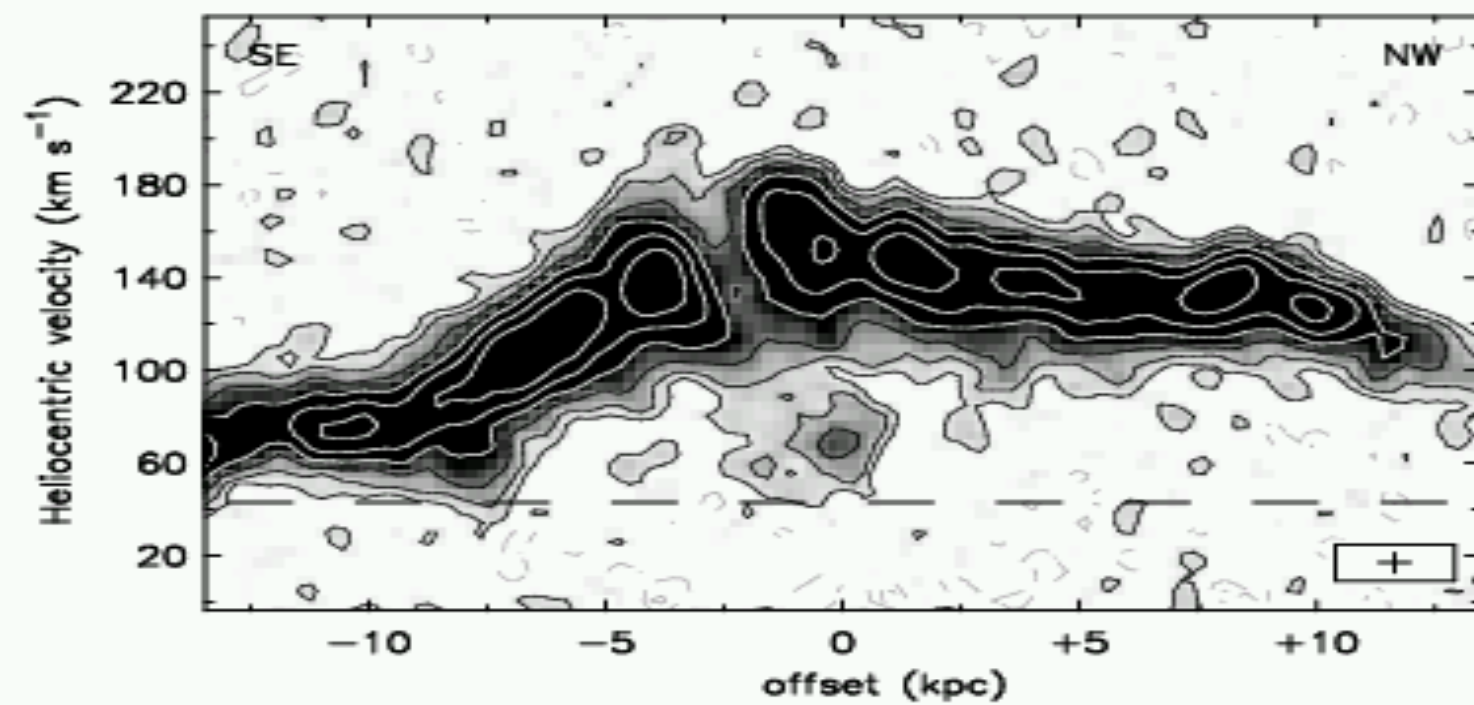
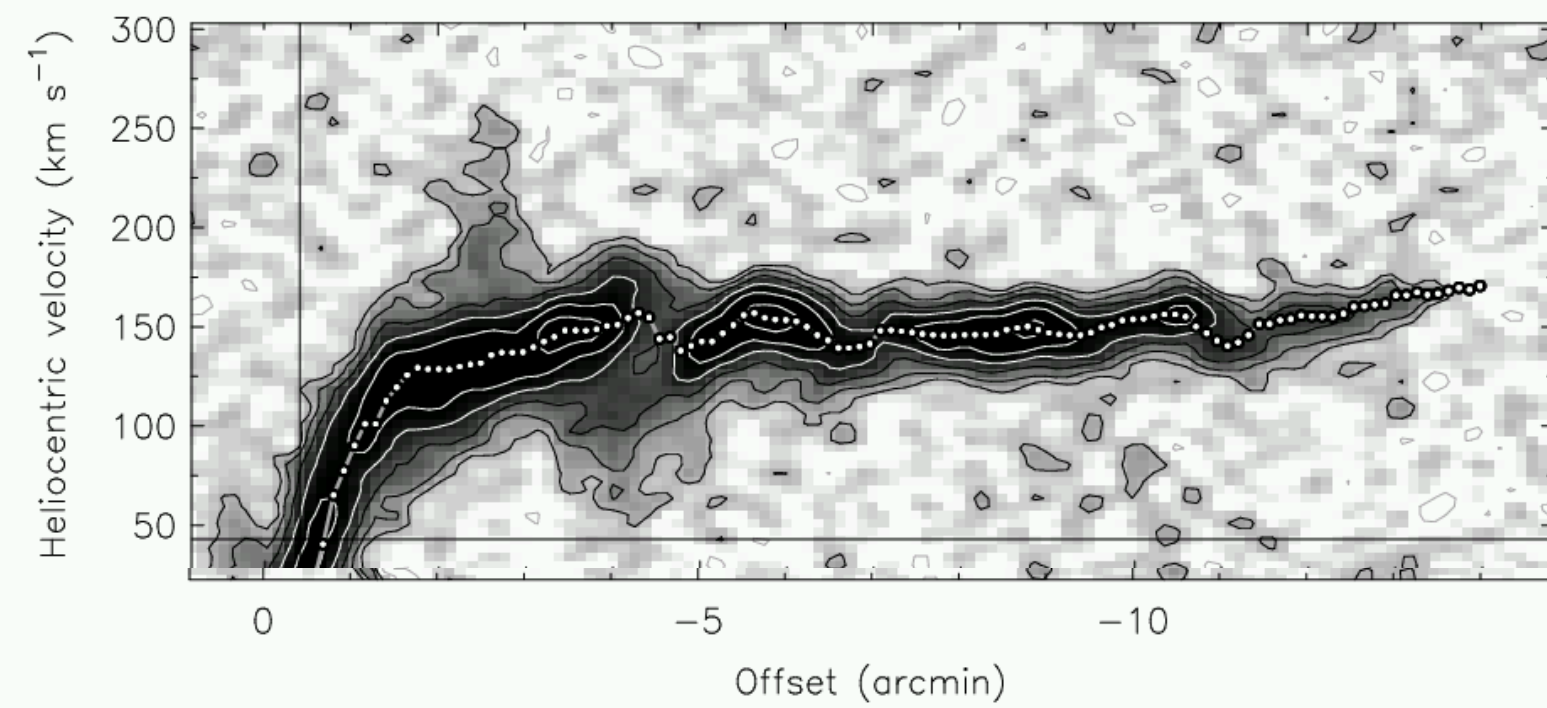
Kamphuis, Sancisi, van der Hulst, 1991



Als je face-on stelsels waarneemt, kun je de verticale bewegingen meten.
Duidelijk geval van een Galactic Fountain

Ander voorbeeld: NGC 6946

Groot aantal gaten in de schijf veroorzaakt door stervorming

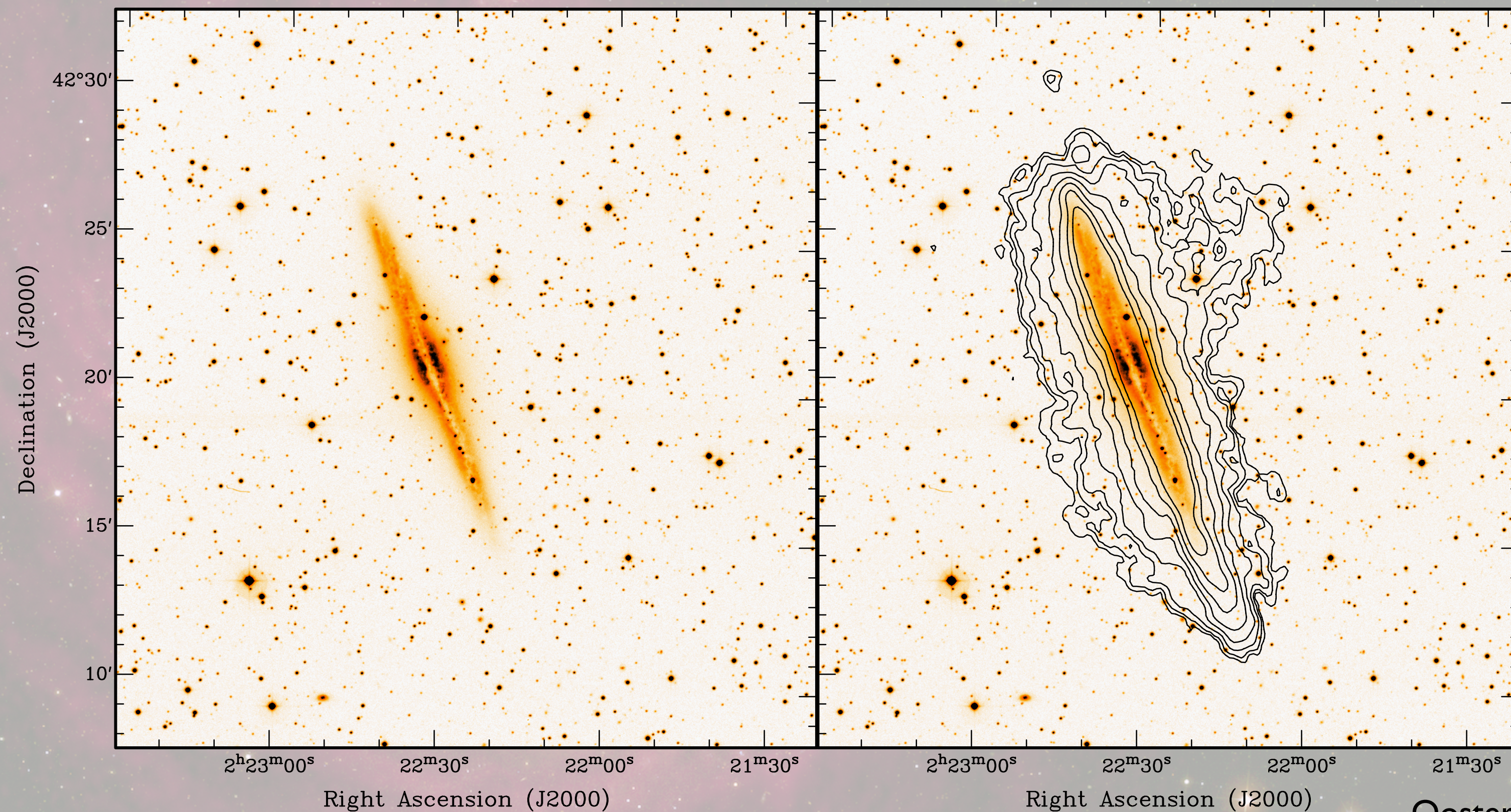


Boomsma, Oosterloo, Sancisi, 2005

Conclusie: belangrijk deel van de HVCs horen bij een galactic fountain

Om de verticale structuur te bepalen moet je edge-on stelsels waarnemen

NGC 891



Oosterloo, Fraternali, Sancisi, 2007

HVCs vormen een 'dikke' schijf, een paar kpc dik, filamenten tot ~20 kpc

Twee componenten

- galactic fountain
- rotatie neemt af met afstand tot vlak ('lagging thick disk')

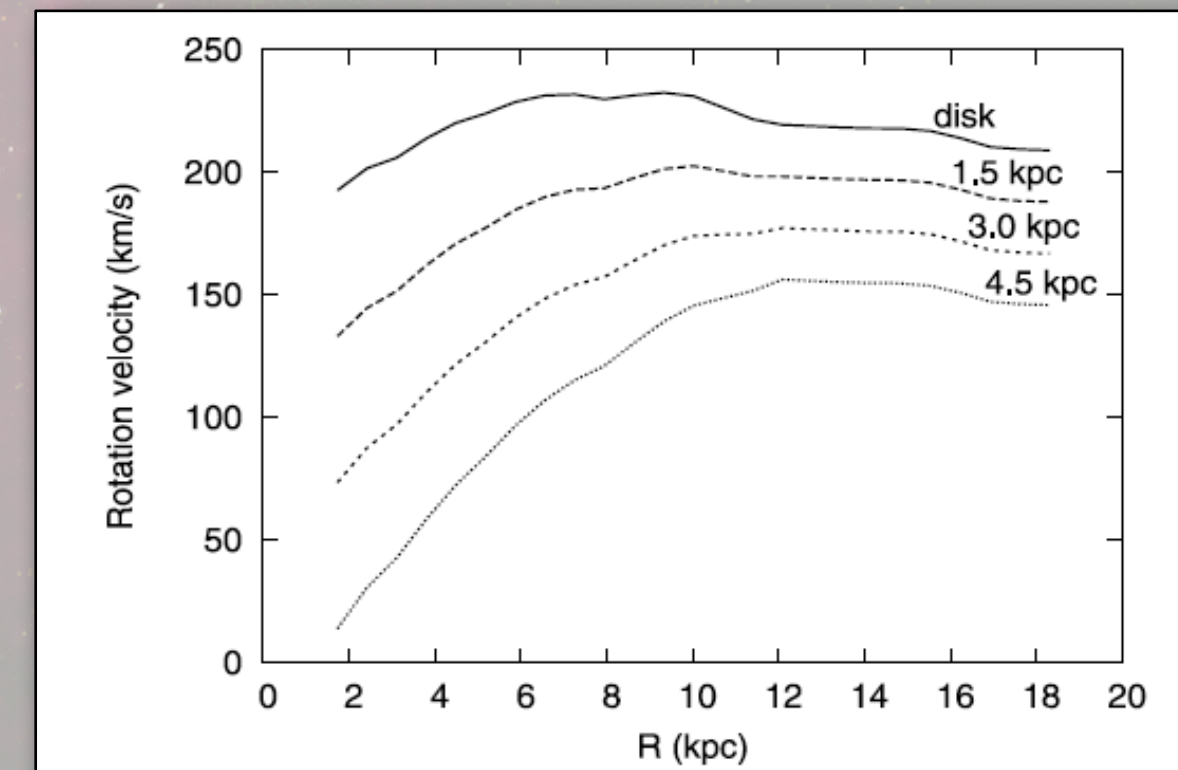
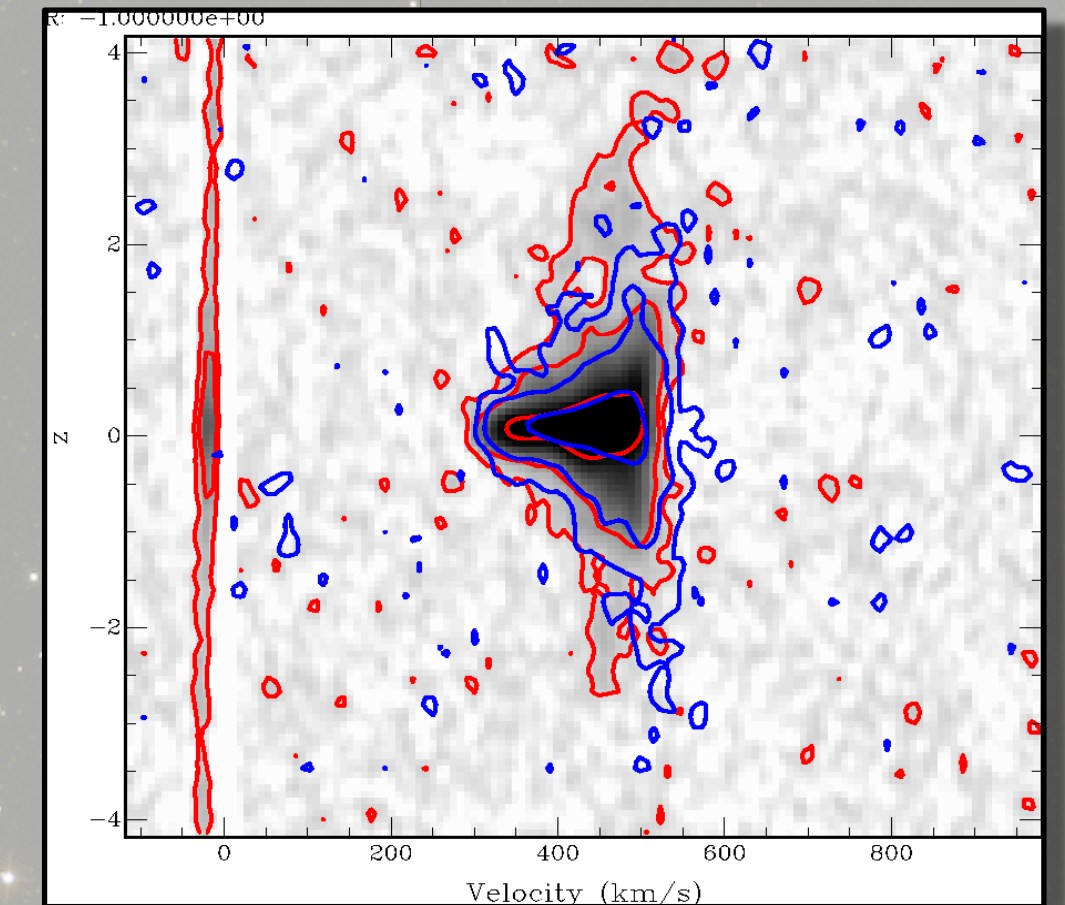
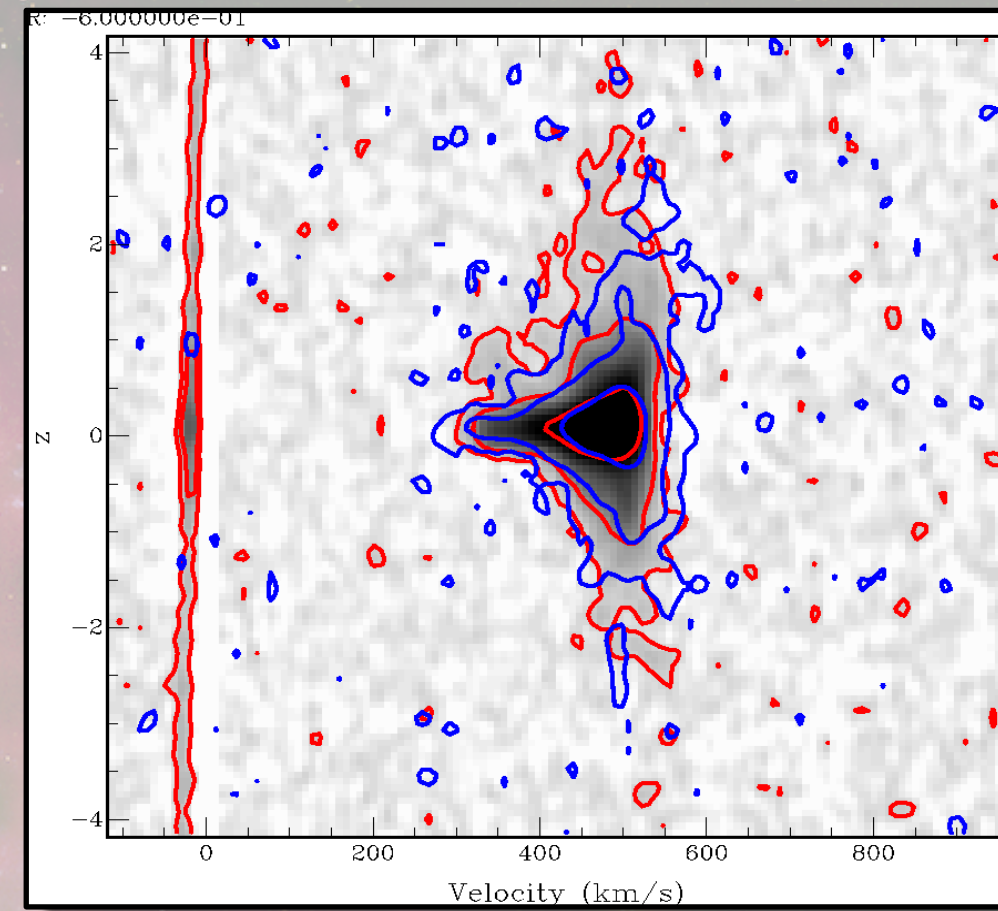
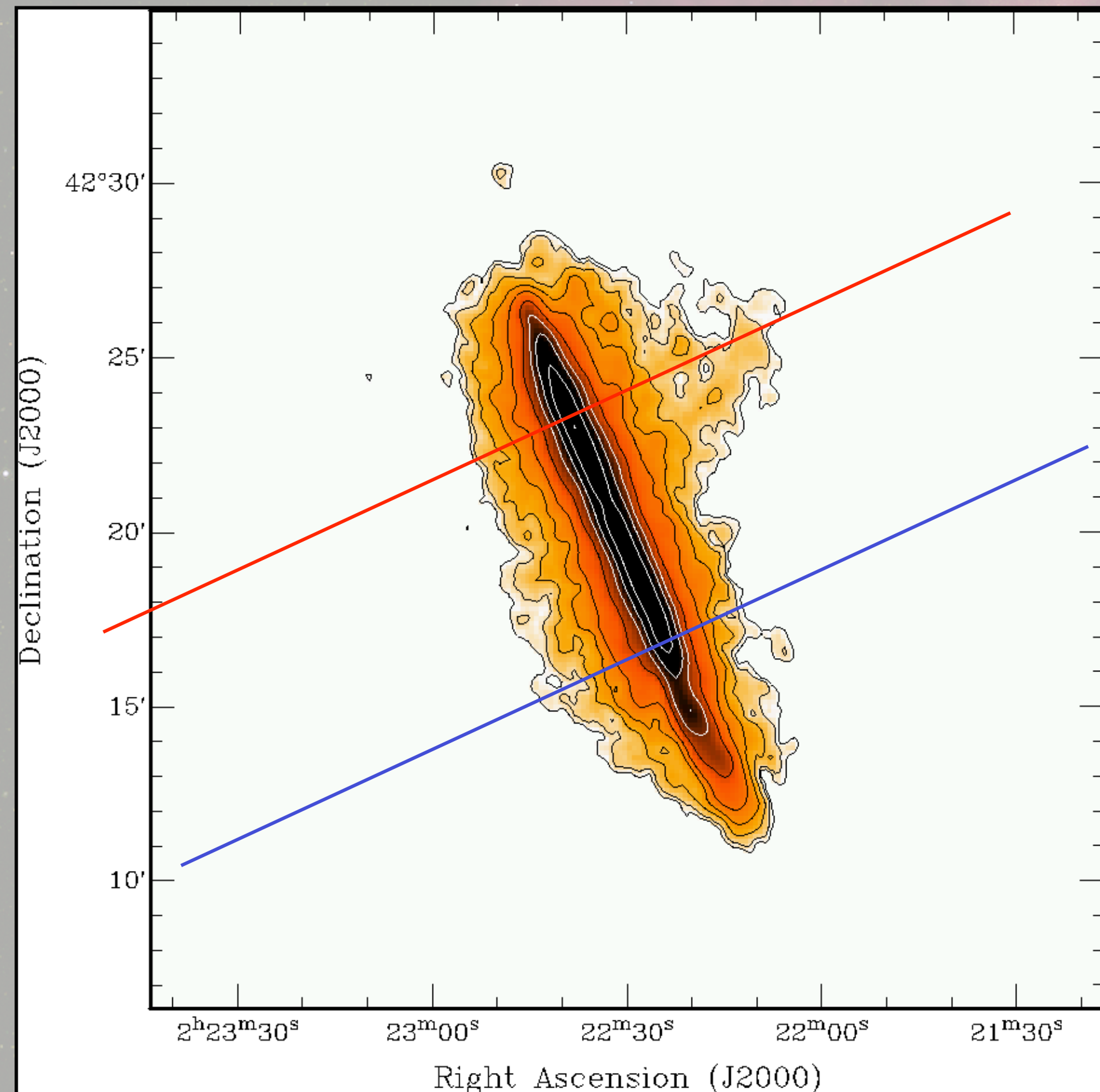
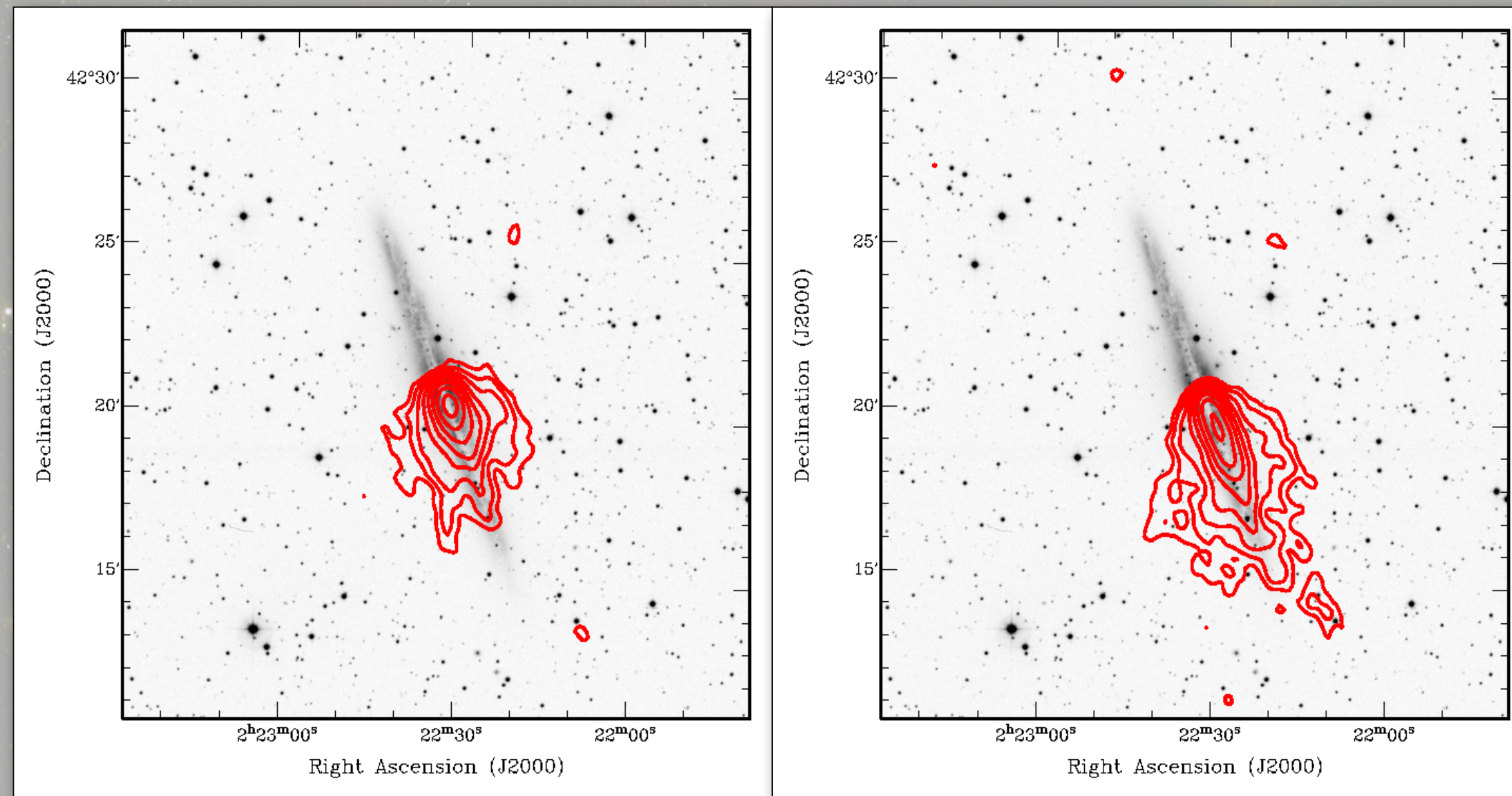


FIG. 15.—Rotation curves as a function of z used in the modeling. In the inner region they become shallower for increasing z -distances from the plane (1.5, 3.0, and 4.5 kpc).

een kleine fractie is niet gerelateerd aan stervorming



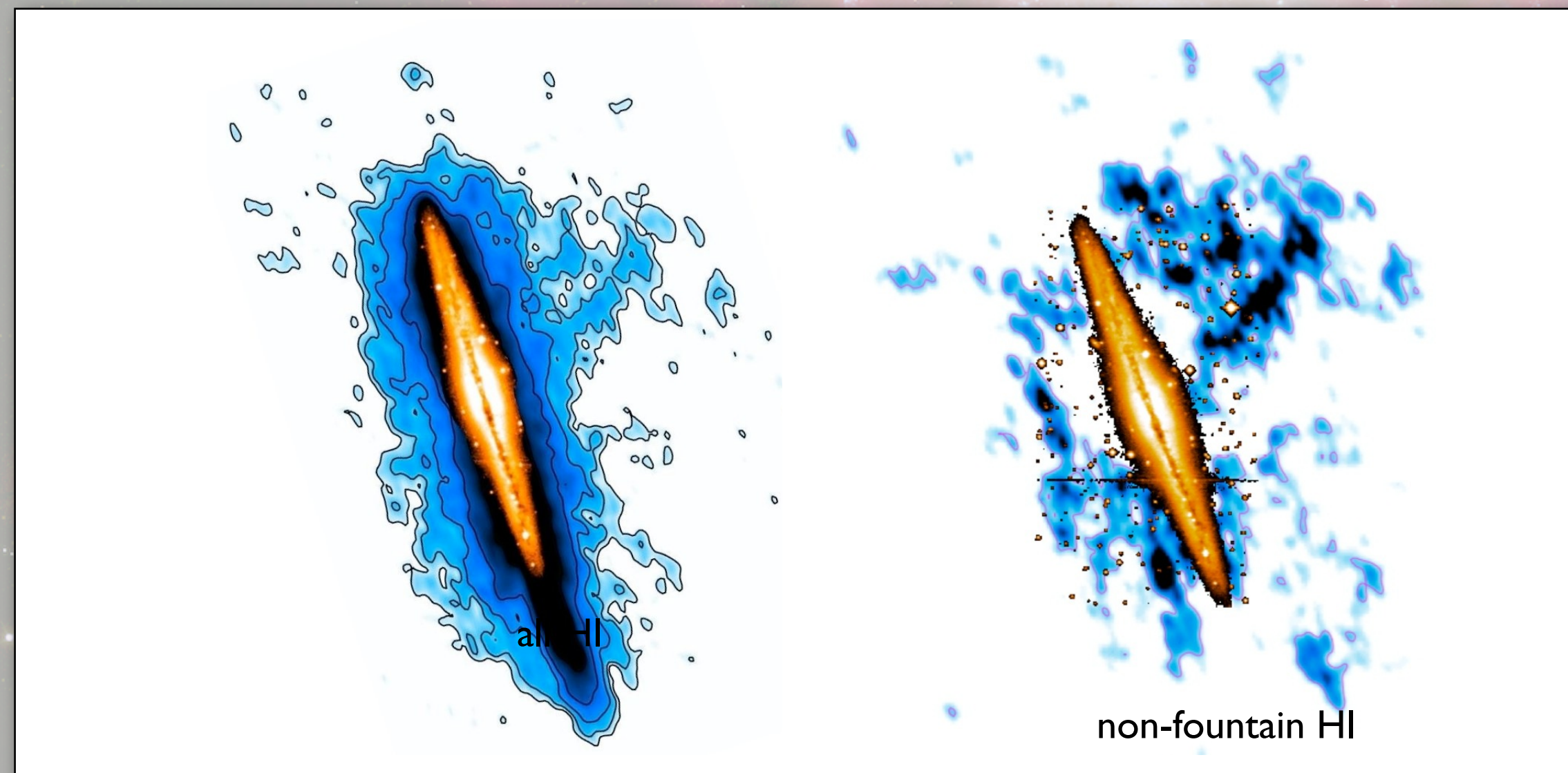
Een aantal HVCs hebben een snelheid die teveel afwijkt van wat je verwacht voor een galactic fountain

Dit is gas dat van buiten af naar NGC 891 valt

Maar de hoeveelheid gas dat binnenkomt is niet genoeg om de stervorming op peil te houden

Veel minder invallend HI waargenomen dan computermodellen van de evolutie van sterrenstelsels voorspellen

Nog steeds belangrijk onderzoeksgebied, ook hier in Dwingeloo



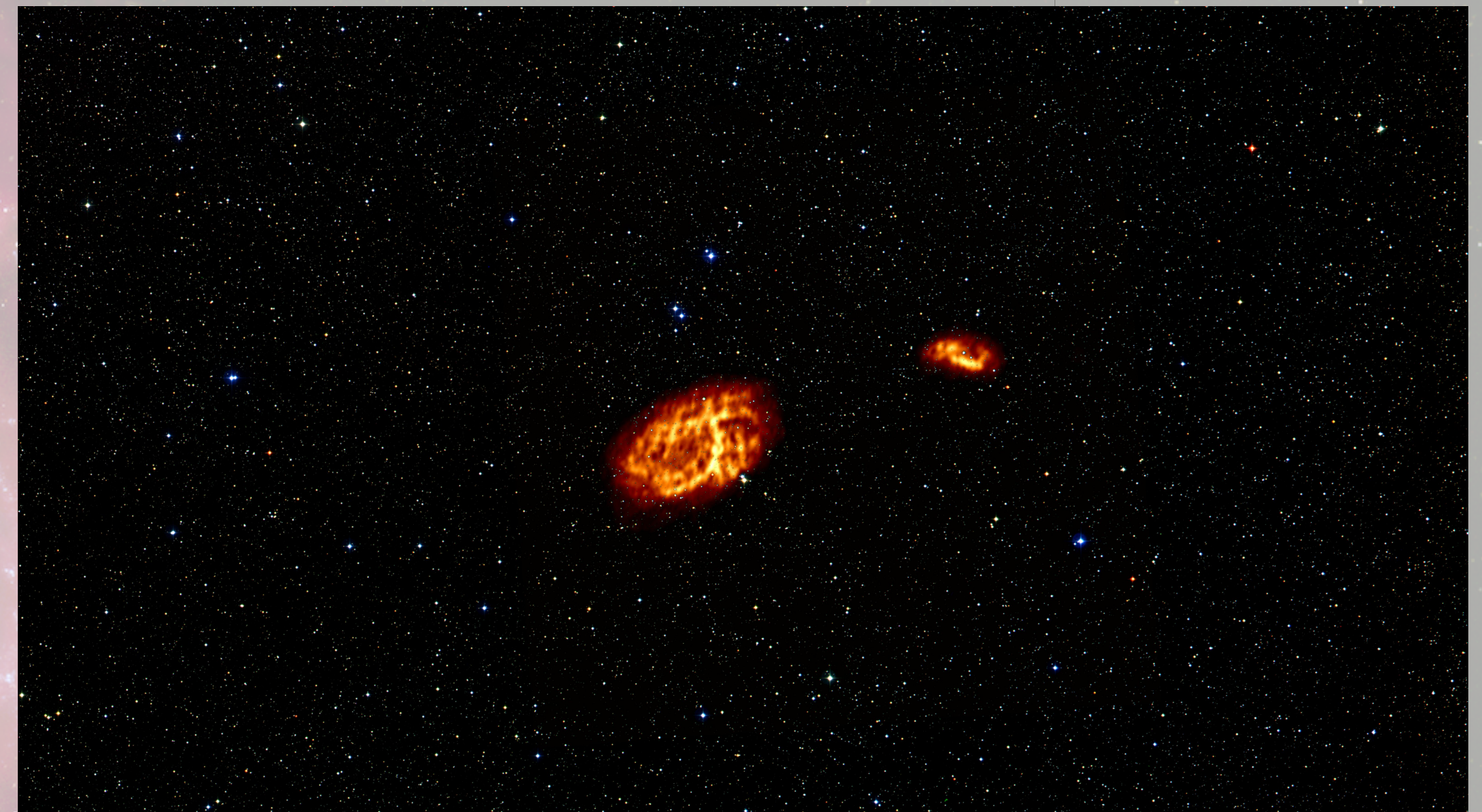
Waterstof, Dwingeloo en de WSRT

De Dwingeloo schotel en de WSRT hebben dmv H I studies belangrijke bijdragen geleverd aan het beter begrijpen van sterrenstelsels!!

De WSRT is ook erg belangrijk geweest voor het ontwikkelen van software en analyse technieken voor H I studies.

- Structuur en ISM van de Melkweg
- ISM in elliptische stelsels, massa verdeling
- Dwerg stelsels
- Kleinste dwerg stelsels
- Warps
- Accretion
- Cluster stelsels, stripping
- Void galaxies
- Low surface brightness galaxies
- Tully-Fisher relatie
- Evolutie van sterrenstelsels
- Binary galaxies
- AGN driven outflows
- Interacties tussen sterrenstelsels
- Density waves
- ...

- *Donkere materie*
- *Hogesnelheidswolken, galactic fountains*



Dwingeloo 1 & 2 waargenomen met de WSRT

De WSRT wordt niet meer gebruikt voor H I studies, maar de erfenis is blijvend