





the Milky Way

Het helderste gedeelte van de Melkweg ligt in het sterrenbeeld Sagittarius. Het is de richting waarin het centrum van ons sterrenstelsel ligt. Wat de indruk van de Melkwegband extra spectaculair maakt zijn de donkere grillige banden (soms draadachtig) die zich over de hele band uitstrekken, plaatsen waar stof en dichte gaswolken het sterlicht blokkeren. Aan de andere kant van hemel, in de sterrenbeelden Auriga, Perseus en Orion, is de Melkweg tamelijk onspectaculair. Geen wonder, het wijst in de richting diametraal tegenover zijn centrum, het **Anticentrum**.



M i l k y W a y G a l a x y

Een panoramisch beeld tussen Cygnus (de Zwaan) en het Zuiderkruis ziet men in het prachtige breedveld panorama samengesteld door John Gleason (1999). Het betreft de zuidelijke band van de Melkweg schijf, genomen vanaf Australië. Het beeld is opgebouwd uit 40-minuten fotografische opnamen, vervolgens digitaal aangezet. Duidelijk zichtbaar zijn vele heldere sterren, rode emissievelen, blauwe reflectievelen en clusters van sterren. De rode vlek aan de linkerkant is de Noord-Amerika nevel, nabij de staart van Cygnus. Aan de rechterkant vind je het heldere Scutum sterrenveld, gevolgd door het centrum van het Melkweg sterrenstelsel in het Sagittarius-Scorpius gebied.

Milky Way Panorama



360° panorama of the Milky Way over Death Valley

Milky Way

Our Galaxy



the Milky Way

De Melkwegband is het uitzicht wat wij hebben op de enorme schijf van honderden miljarden sterren waarin onze Zon zelf is ingebed, zo'n 8,5 kpc vanaf het centrum.

De Melkwegband is dus wat wij zien van de gigantische roterende afgeplatte schijf van 200 miljard sterren, bestaande uit sterren, gaswolken en stof.

Door vernuftige methoden en een groot scala aan waarnemingen, over een weids bereik in golflengten, hebben we in de loop der eeuwen en dan vooral in de laatste honderd jaar, een goed idee gekregen van de structuur en samenstelling van onze Melkweg. Hierbij zijn we natuurlijk bijgestaan door het feit dat we van andere melkwegstelsels wel een direct beeld van de algehele structuur zien.


Terwijl andere sterrenstelsels ons een compleet beeld geven van de structuur van melkwegstelsels, blijft de Melkweg onovertroffen wat betreft het gedetailleerde inzicht in

verdeling, kinematica en dynamica van sterren en gas

waaruit het is samengesteld.

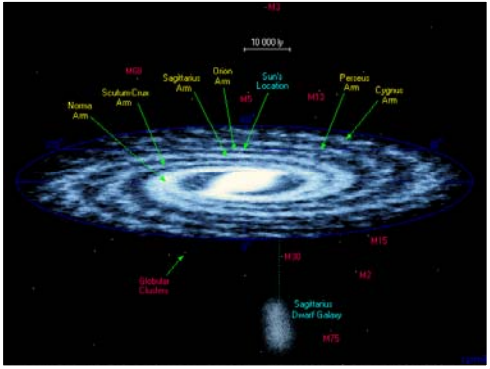
Omdat we zelfs de individuele sterren en gaswolken kunnen bestuderen hebben we ook een verbluffend mooi inzicht gekregen in de **levenscyclus** van sterrenstelsels. We beginnen geleidelijk te begrijpen hoe de ster-gas-ster cyclus de motor is van een gigantische kosmische fabriek. Sterren worden geboren uit de gaswolken in een melkwegstelsel, hun atomen worden vervolgens nucleair verbrand en daarna dmv. winden en explosies terug geslingerd in het interstellair medium, waaruit in zijn verrijkte samenstelling dan weer de volgende generatie sterren vormt. In dit college zullen we proberen enig idee te geven van de "werking" van onze Melkweg.

GIGAGALAXY ZOOM
Dive into the Milky Way
www.eso.org/gigagalaxy



the Milky Way Galaxy:
as it would appear from a distant vista point,
outside its plane (shearing view)

Notice the identification of the spiral arms, and the indication of the Sun's position. Also indicated is the position of the Sagittarius dwarf galaxy, the galaxy that recently, only a few billion years ago, fell into our Milky Way and is now in the process of gradually dissolving into the halo. This may indeed be an illustration of one of the most crucial processes in building up and forming galaxies.



GIGAGALAXY ZOOM
Dive into the Milky Way
www.eso.org/gigagalaxy



the Milky Way Galaxy:
as it would appear from a distant vista point,
outside its plane (face-on view)



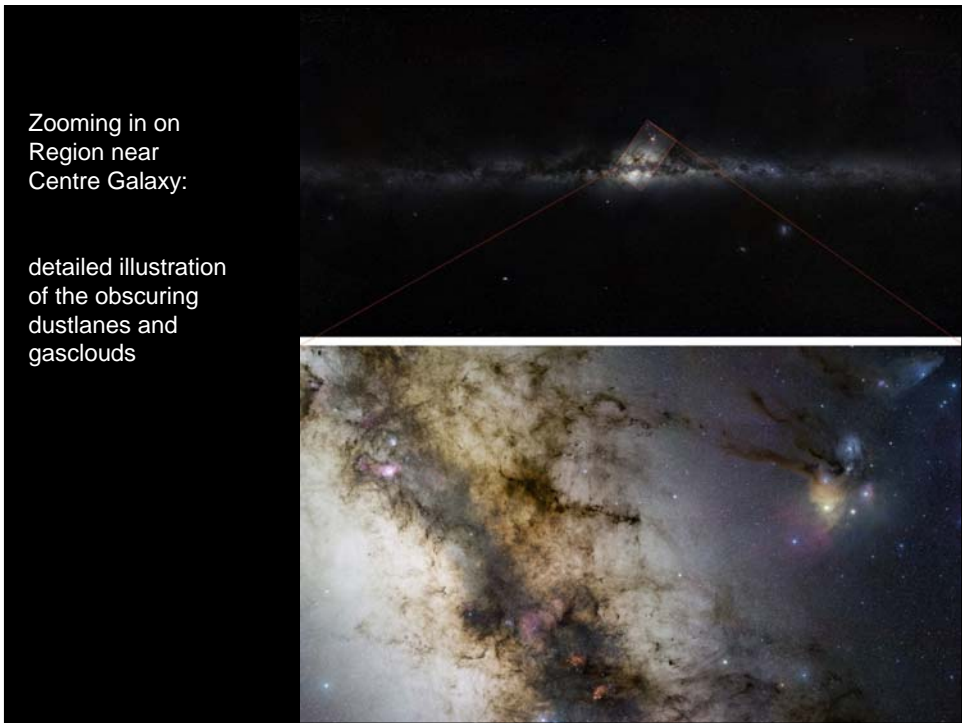
Milky Way: Morphology

- Our Galaxy is probably a SBbc bar spiral galaxy, marked by a distinct disklike and thin planar concentration of its stars, in which in particular the younger stars are grouped into conspicuous spiral arms.
- newer investigations have revealed that the Milky Way has a bar in its central region, with a total length of ~ 8-10 kpc. with 2 large spiral arms emanating from the tips of the bar.
- These results suggest that our Milky Way should be classified as a SBbc galaxy or, more precisely, a SB(rs)bcII
 - SB: barred spiral galaxy
 - (rs): weak central ring of stars and gas around the nucleus
 - bc: subclassification, related to winding of spiral arms and prominence core vs. disk (see lectures on Galaxies by S. Trager)
- Others claim it is an intermediate between a barred and normal spiral galaxy, SAB

NGC 1300: a Milky Way look-alike ?

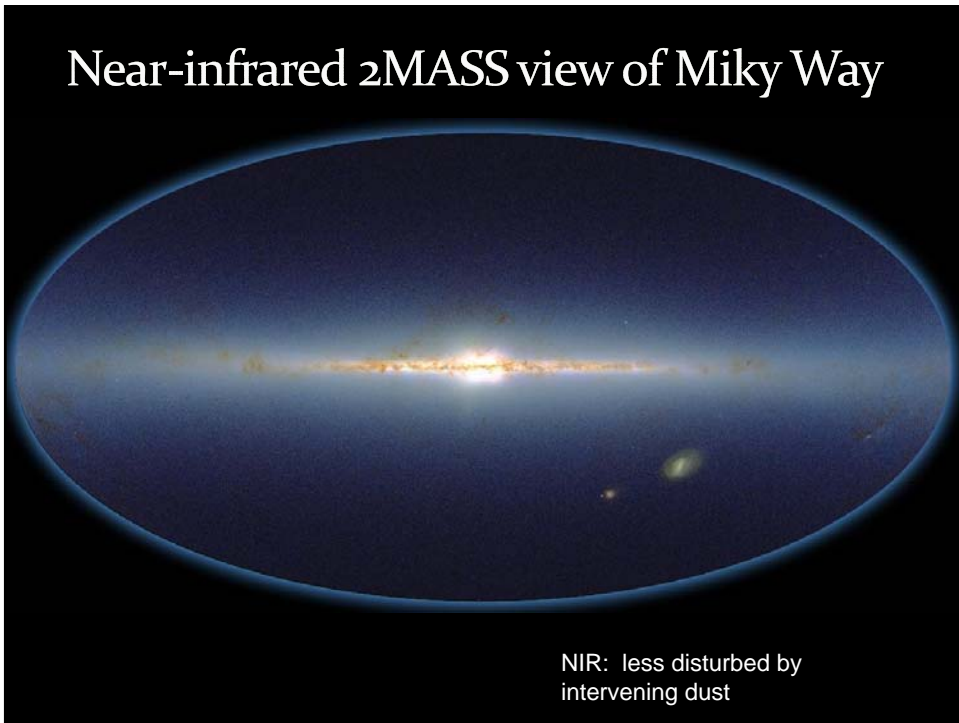


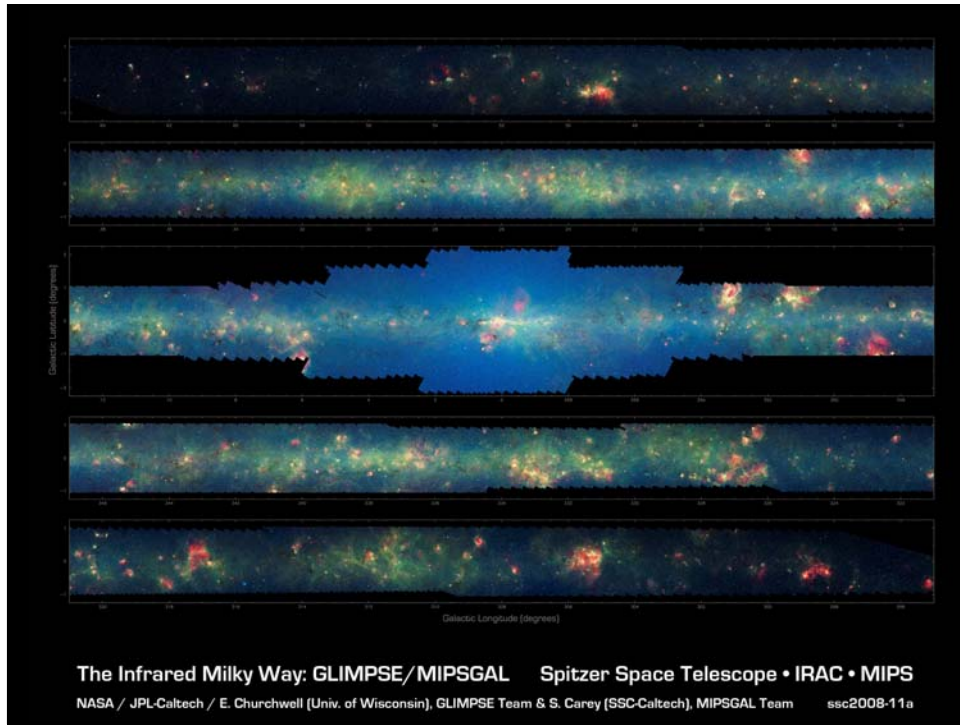
Milky Way Planar View





Near-infrared 2MASS view of Milky Way





Milky Way History

Kyklos Galaktikos

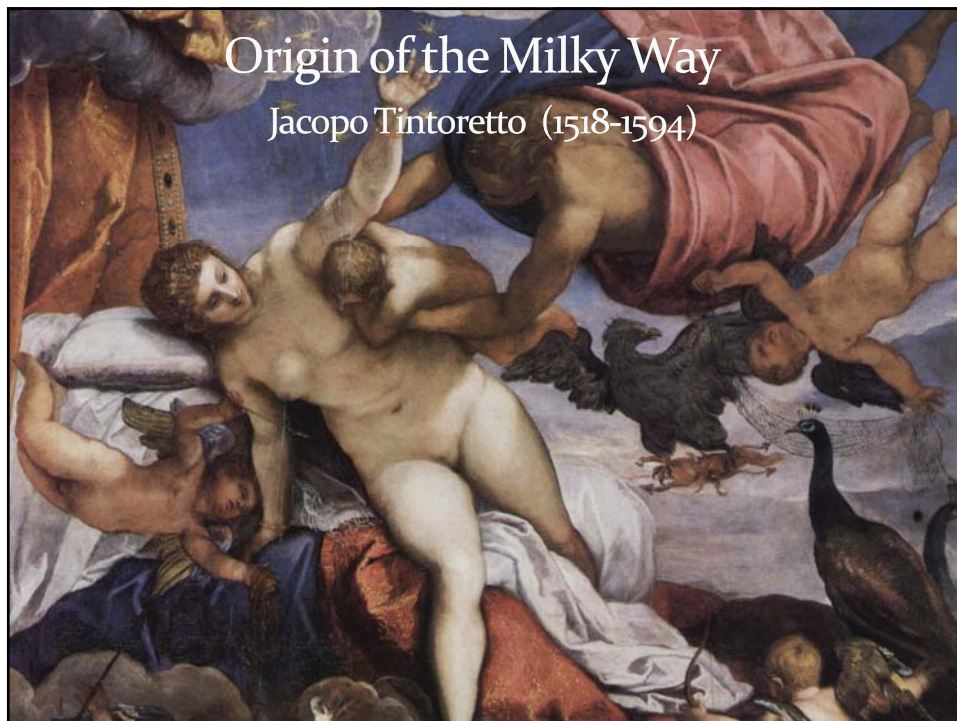
- Als de oude Grieken op een heldere zomeravond naar de hemel keken, zagen ze daar een zwakke band van licht die zich uitstrekte van horizon tot horizon. Het deed hen denken aan een stroom melk ...
- ze voorzagen dit ontzagwekkende fenomeen van de naam ``Kyklos Galaktikos" ofwel melkachtige cirkel.

- Mythe 1:

Melkweg gecreeerd door Heracles toen hij een baby was. Zijn vader was Zeus, zijn menselijke moeder Alcmena. Zeus besloot om het kindje Heracles te laten zogen bij zijn goddelijke vrouw Hera terwijl ze sliep, zodat de baby goddelijke eigenschappen zou krijgen. Toen Hera wakker werd en realiseerde dat ze een onbekend kind zoogde, duwde ze hem weg, en de gemorste melk werd de Melkweg.

- Mythe 2:

De melk is afkomstig van de godin Rhea, de vrouw van Cronus. Cronus at zijn eigen kinderen om zijn positie als oppergod van het Pantheon en als hemelgod te verkeren. Rhea vatte het plan om haar nieuw geboren zoon Zeus te redden. Ze wikkelde een steen in babykieren en gaf het aan Cronus om het te verslinden. Cronus vroeg haar het kind nog eenmaal te zogen voor het te verzwelgen, en de melk die ze gaf toen ze de rots pretendeerde te zogen werd de Melkweg.



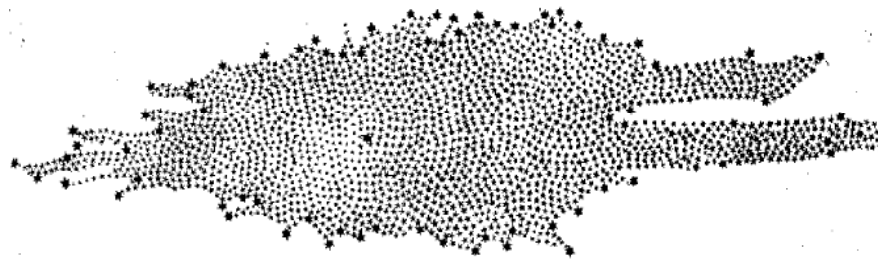
Herschel's Milky Way Map

William & Caroline Herschel (1785)

- counted stars along 685 lines of sight, using their 48-inch telescope
- assumed stars are same luminosity, then relative brightness gives distance
- assumed could see all the way to the edge of the system

Model

- Flattened Milky Way
- Sun located very near centre



Map

- from "On the Construction of the Heavens" (1785)

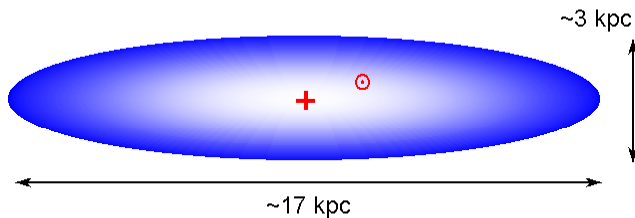
The Kapteyn Universe

Jacobus Kapteyn (1901-1922)

- used photographic star counts
- estimated distances statistically based on parallaxes & proper motions of nearby stars.
- neglected interstellar absorption of starlight (assumes that stars were faint only because they are far away, not because interstellar absorption blocks some of the light).



Kapteyn Model (1922)



Kapteyn Universe

- Milky Way is a flattened disk, ~15 kpc across & ~3 kpc thick
- the Sun is located slightly off-center.

Shapley's Globular Cluster System

Harlow Shapley (1885-1975)

-Astronomer at the Harvard College Observatory, working on the nature of Globular Clusters.

-Shapley noted two facts about Globular Clusters:

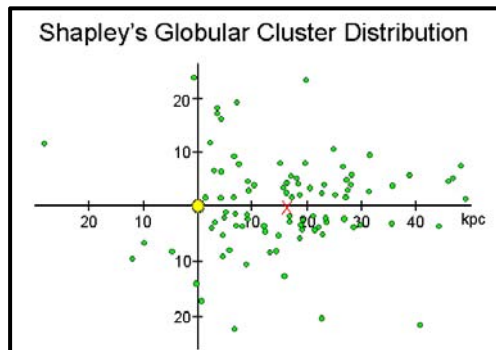
- 1) they were uniformly located above & below the Milky Way.
- 2) they were concentrated on the sky toward Sagittarius.

- Estimated Globular Cluster distances from observations of their RR Lyrae stars
- Used these distances to map the globular cluster distribution in space.

Greater Milky Way (1921):

- Globular clusters form a subsystem centered on the Milky Way.
- the Sun is 16 kpc from the MW center.
- MW is a flattened disk ~100 kpc across

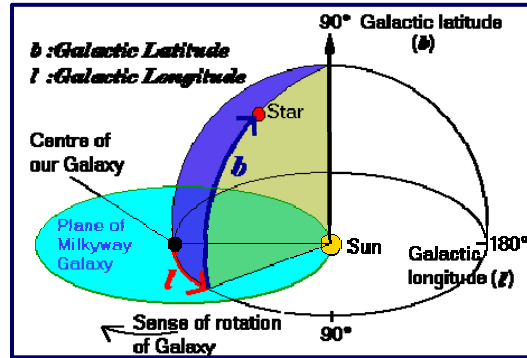
- right basic result, but too big:
Shapley ignored interstellar absorption caused him to overestimate the distances.



Galactische
Koordinaten

Galactisch Coördinaten Systeem

Voor het bepalen van de posities van objecten buiten het zonnestelsel, in het bijzonder voor objecten binnen onze Melkweg, is het heel nuttig om gebruik te maken van een coördinaten systeem dat is gebaseerd op de geometrie van de Melkweg zelf en dat dus een direct fysische connectie met de structuur van de Melkweg heeft



Galactische Equator:

In dit Galactisch Coördinaten Systeem wordt het Galactische vlak, of Galactische Equator gebruikt als referentievlak. De Galactische Equator is de Grote Cirkel op de hemelbol die het best het (centrale) Melkwegvlak lijkt te benaderen (zie figuur). Dit vlak heeft een inclinatie van een hoek van $62^{\circ}36'$ ten opzichte van de hemelequator.

Galactisch Centrum:

Het centrum van de Melkweg bevindt zich op: $(\alpha, \delta) = (17^h 45.6, -28^{\circ} 56')$ (2000.0). Het (naar men algemeen aanneemt) echte centrum van de Melkweg, die men identificeert met de compacte radiobron en infraroodbron in Sagittarius A ligt zo'n 5 arcmin verwijderd van dit Galactische nulpunt $(l, b) = (0, 0)$.

Galactische Noordpool:

De noordpool van het Galactische Systeem is gesitueerd op: $(\alpha, \delta) = (12^h 51.4^m, +27^{\circ} 07')$ (2000.0).

Galactisch Coördinaten Systeem

Galactische Lengte l:

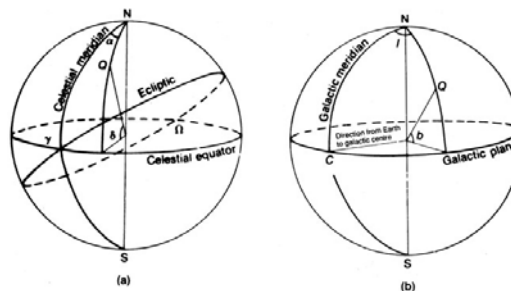
Op basis van historische motieven wordt de richting van het Galactische Centrum als nulpunt van de Galactische Lengte l gedefinieerd.

De galactische lengte loopt van $l=0^{\circ}$ tot $l=360^{\circ}$, en neemt toe tegen de richting van de klok, gezien vanuit vanaf het noordelijke galactische halfrond. Ze is zo gedefinieerd dat ze loopt in richting van de Galactische beweging van onze Zon, die dus per definitie ligt op $l=90^{\circ}$ (in het sterrenbeeld Cygnus).

Galactische Breedte b:

De galactische breedte is de hoek tussen een bepaalde positie en het galactische vlak, gemeten langs een grote cirkel door de galactische noordpool en loodrecht op het galactische vlak.

Loopt van $b=-90^{\circ}$ (zuidpool) tot $b=90^{\circ}$ (noordpool).



Galactisch Coördinaten Systeem

Historisch gezien was er een eerder galactisch coördinatensysteem:

ook wel aangeduid met (l, b) ,

waarbij het nulpunt van de galactische lengte werd gemeten vanaf een van de twee snijpunten tussen de Galactische equator en de Hemelequator.

Dit is echter een tamelijk willekeurige keuze, zonder fysische significantie, waardoor men in 1959 het huidige systeem aannam. Een tijdlang duidde men daarom het oude systeem aan met (l, b) en het nieuwe met (l^II, b^II) . De nieuwe (l^II) en de oude (l) galactische lengte verschilden 33° : $l^II = l - 33^\circ$.

Conversies tussen het equatoriale coördinatensysteem en het galactische coördinatensysteem kunnen worden verkregen dmv. de standaard formules van sferische trigonometrie.

Om de fysische positie (X, Y, Z) van een object met galactische coördinaten (l, b) en afstand D vanaf de Aarde te bepalen, geldt dus:

$$X = D \cos(l) \cos(b)$$

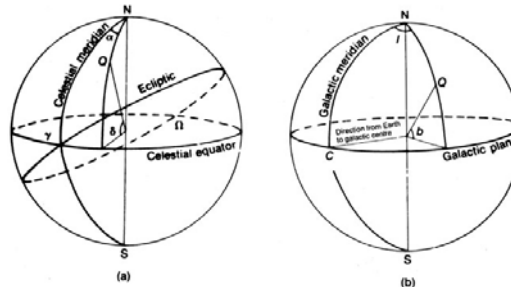
$$Y = D \sin(l) \cos(b)$$

$$Z = D \sin(b)$$

Een X-Z doorsnede van de Melkweg geeft dus een "edge-on" beeld, met het zonnestelsel links tov. het Galactische centrum.

Een Y-Z doorsnede geeft een edge-on beeld zoals gezien vanaf het anticentrum, met de Zon en het Galactische Centrum gesuperponeerd.

Een "face-on" gezicht van de Melkweg heb je vanuit een X-Y sectie.



Melkweg:

Galactische Componenten

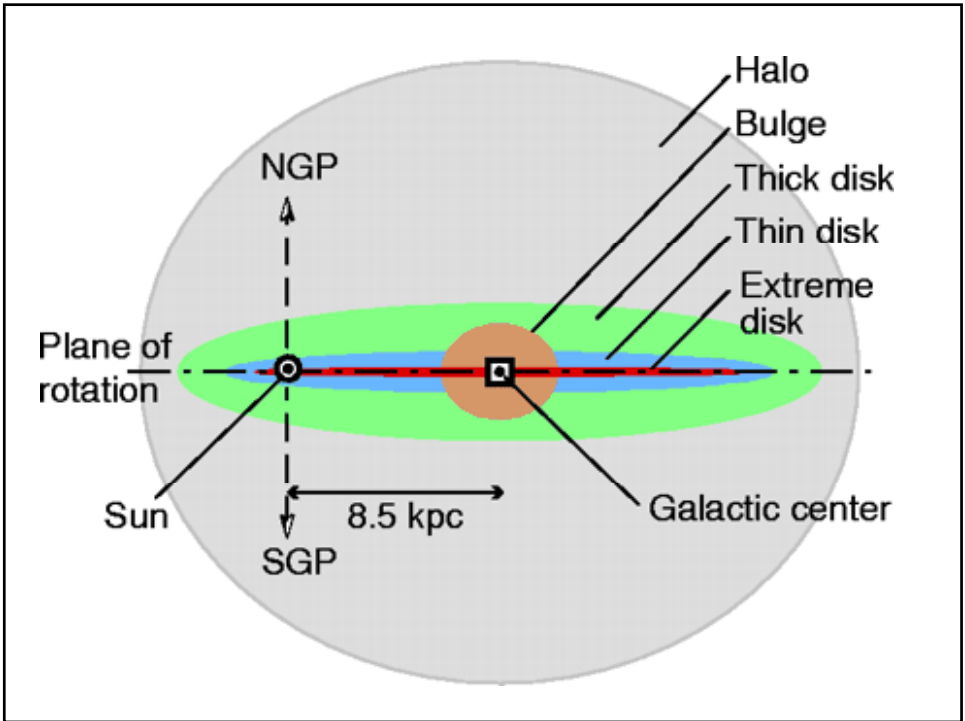
Galactische Componenten

De Melkweg is een gigantisch en zeer complex object, opgebouwd uit een aantal duidelijk identificeerbare en afzonderlijke componenten.

- Schijf:
 - Dunne Schijf
 - Dikke Schijf
 - Balk
- Bulge
- Galactisch Centrum
- Stellaire Halo
- Donkere Halo
- Ring ?

Ieder van deze galactische componenten verschillen onderling in

- ruimtelijke verdeling
- dynamische en kinematische eigenschappen (bewegingen en banen door de Melkweg)
- de sterpopulatie/samenstelling (het soort sterren en objecten, leeftijd en inhoud aan verrijkte elementen).



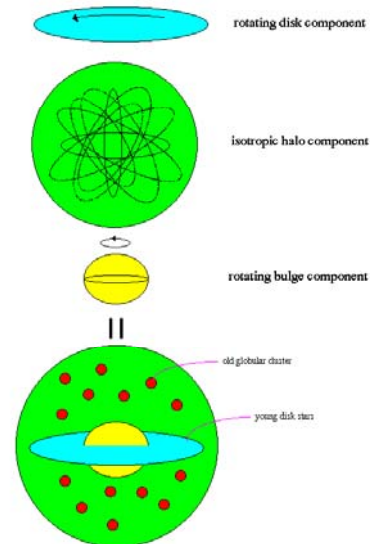
Galactische Componenten

Onderscheid op basis van

- ruimtelijke verdeling
- bewegingen
(zie figuur hiernaast)
- sterpopulatie

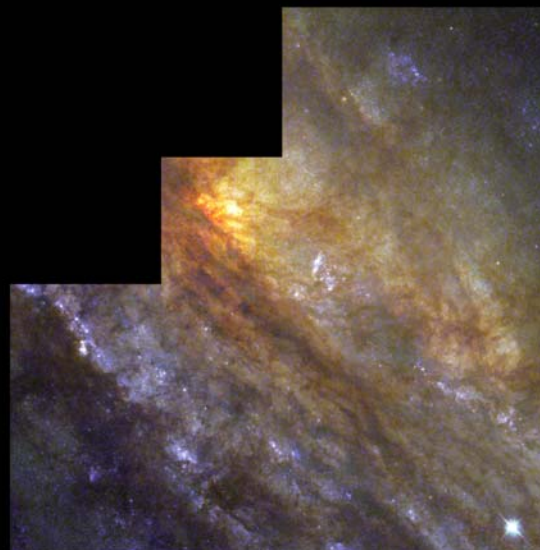
Kinematische Eigenschappen:

- **schijf component:** rotatie
- **halo component:** isotrope
random banen
- **bulge:** rotatie
+ minor random



Galactische Componenten

- Het merendeel van de sterren, en het gas, in de Melkweg bevindt zich in de schijf
- een aanzienlijk aandeel vindt men in de bulge
- een kleine fractie zich bevindt in de uitgebreide halo.
- De Galactische componenten zijn op een hechte wijze in elkaar verstrengeld. Het is van uitzonderlijk belang om te begrijpen hoe deze hiërarchische structuur in elkaar grijpt en is ontstaan.
- De evolutionaire geschiedenis van deze structurele componenten is een essentiële sleutel tot het begrip van de vorming van de Melkweg als geheel.



Galaxy NGC 253

Hubble
Heritage

Melkweg: Sterpopulaties

Sterpopulaties

Melkwegstelsels bevatten twee afzonderlijke populaties van sterren: Populatie I en Populatie II
Te identificeren met de volgende Galactische componenten:

Populatie I	Schijf
Populatie II	Halo
Populatie I+II	Bulge

Criteria correlated with stellar population are:

- metallicity, heavy element abundance
- location in the galaxy
- space velocity
- differences in distribution on the Hertzsprung-Russell diagram
- integrated colour
- presence of nearby dust and gas

Op het moment zoekt men naar Populatie III sterren, overblijvers tussen de allereerste sterren in het Heelal: zij bevatten geen enkel chemisch element zwaarder dan helium & lithium

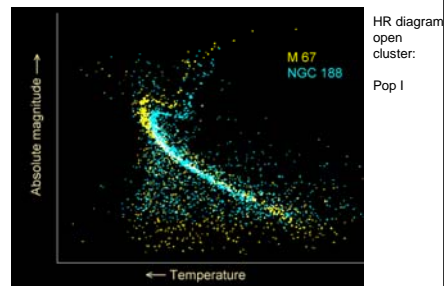
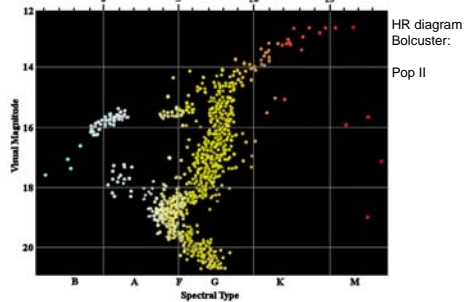
Het bestaan van twee afzonderlijke populaties van sterren werd in 1944 herkend door Baade (1944). Doordat hij met voldoende resolutie de spectra van sterren in M31 (de Andromedanevel) kon bepalen ontdekte hij dat de sterren in de **schijf** van M31 een heel ander **Hertzsprung-Russell diagram** hebben dan die in de **bulge** en de **halo**.

Sterpopulaties

Populatie III:
 - nog geen enkele gevonden
 - eerste generatie sterren gevormd in het heelal
 - zeer lage abundantie zware elementen

Populatie II:
 - voornamelijk in halo
 - HR diagram zoals dat van **bolclusters**
 - **oude** sterren:
 + zeer oude sterren, leeftijden in de orde van de leeftijd van het heelal zelf
 + lage abundantie zware elementen (metallicity)
 + ontstaan kort na ontstaan Melkweg

Populatie I:
 - HR diagram dat lijkt op dat van **open galactische clusters**.
 - Inhomogene leeftijdsverdeling veel inhomogener:
 + enkele galactische clusters hebben leeftijden ~ 10 miljard jaar (bolclusters)
 + anderen nog bezig met vorming nieuwe jonge sterren
 - Spreiding abundantie zware chemische elementen, merendeel metaalrijk
 - Vooral opvallend zijn de zwaarste: jonge, zeer heldere, blauwe sterren, die zo opvallende spiraalarmen markeren



	Populatie I		Populatie II	
	Spiraalarmen	Schijf	Intermediair	Extreem
Objecten	HI gas & moleculaire wolken	A --> M dwergen	zwakke K, M dwergen	Bolclusters
	HII gebieden	subdwergen	Mira variabelen	RR Lyrae sterren
	OB associaties	reuzen	RR Lyrae sterren	type II Cepheiden
	superreuzen	planetaire nevels		
	type I Cepheiden	witte dwergen		
Leeftijd sterren (10⁹ jr)	< 0.1	1 - 10	10-14	14-16
Verrijking [Fe/H]	0 tot +0.3	-0.5 tot +0.3	< -0.6	< -1.0 halo
Schaallengte (pc)	100	200-700	~ 1500	1000s
Rotatie (km/s)	220	190-220	180 -	1000s

Sterpopulaties

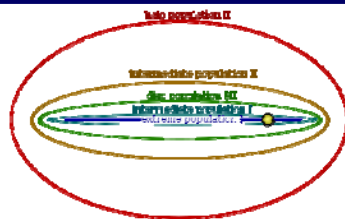
Schijf:

- voornamelijk jonge **Populatie I** sterren
- hier en daar in ook oudere **Populatie II** sterren.

Omdat de schijf is ingebed in de halo, en de baan van de sterren in de halo nogal zwierig is, zijn er op ieder moment halo sterren die zojuist de schijf passeren.

Ze vallen op door

- hun intrinsieke eigenschappen (oud, lage abundantie zware elementen)
- door een hoge snelheid tov. de Zon



Distribution of Star Populations in Milky Way



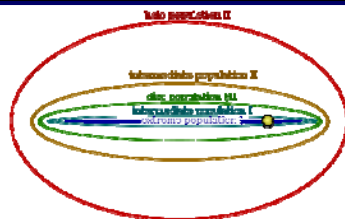
M83
HST/WFC3

Sterpopulaties

Bulge:

- mengeling van Populatie I en II sterren
- heel oude sterren, maar ook opvallend jonge sterren.

- voorgrond aan schijfsterren overweldigend: helderder door hun geringere afstand en door het feit dat het vaak jongere intrinsiek heldere sterren betreft.
- nog belangrijker: schijf een grote hoeveelheid gas- en stofwolken zitten die het zicht op de meer naar het centrum gelegen bulge belemmeren.
- "Baade's window" venster op de bulge



Distribution of Star Populations in Milky Way





Galactische Schijf



Geometrie:

Diameter: ~50 kpc in diameter, en slechts (!!!)

Dikte: ~ 200 parsec

De schijf is dus een extreem dunne structuur, platter dan een langspeelplaat !

In de schijf van de Melkweg kunnen we zeker vier grote spiraalarmen identificeren.



Galactische Schijf

Sterren:

- Voornamelijk **Populatie I** sterren
- Blauwe en redelijk jonge sterren domineren de aanblik.
Deze jongste generatie sterren bevinden zich vooral in de spiraalarmen
- Merendeel schijfsterren zijn de wat rustiger en zwakkere sterren, verspreid door de hele schijf
- Leeftijd van de sterren kan variëren van 10^6 jaar tot 10×10^9 jaar (~ leeftijd van het heelal)
- Ruimtelijk een duidelijk verschil:

- **Spiraalarm populatie**
de jonge metaal-rijke sterren die zojuist gevormd zijn in sterclusters in de spiraalarmen, en die bijgevolg een geklonterde verdeling in de spiraalarmen hebben.
- **Schijfpopulatie**
de wat oudere metaal-rijke sterren (ook de Zon) die gladjes zijn verdeeld over de hele schijf.



Galactische Schijf

Gas:

de schijf bevat veel interstellair gas en stof
verantwoordelijk zijn voor de interstellaire absorptie van het sterlicht

ruimtelijke verdeling gas:

- diffuus medium door de schijf:
 - groot gedeelte van het gas, mn. het neutrale waterstofgas (HI)
- diffuse HI gas in andere sterrenstelsels vaak tot ver buiten de straal van de spiraalarmen, wellicht is dit ook het geval voor onze eigen Melkweg.
- veel dichtere wolken, moleculaire wolken, emissienevels (van geïoniseerd waterstof HII, gloeien door het intense UV licht van zojuist gevormde O- en B- sterren), reflectienevels, etc., ingebed in het diffuse gas.

Gasdichtheid:

R: 3 kpc - 15 kpc: dichtheid van gas ruwweg proportioneel aan de dichtheid van de sterren.

R < 3 kpc: een scherpe afval in gasdichtheid
sterke nietcirculaire bewegingen

Galactische Schijf

Massa:

De totale massa aan sterren in de schijf,
binnen de Zonsstraal ~ 8.5 kpc: $M \sim 10^{11} M_{\odot}$

Dichtheid:

Typische sterdichtheid in de buurt van de Zon:

$\sim 0.05 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$

Sterdichtheid buiten de spiraalarmen:

$\sim 10\%$ dichtheid spiraalarmen

Interstellair gas:

$\sim 10\%$ tot de totale massa in de schijf,

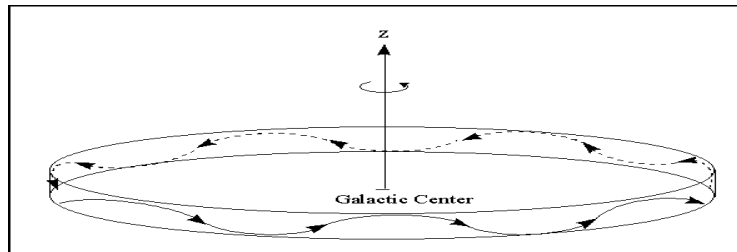
$\sim 8 \times 10^9 M_{\odot}$.



Galactische Schijf

Kinematica:

- Sterren en gas in schijf:
draaien op bijna perfect cirkelvormige banen rond centrum van de Melkweg.
- Materie in de schijf heeft een relatief zeer hoog impulsmoment per massa
- Schijf als geheel bevindt zich in een toestand van snelle **differentiele rotatie**:
de binnendelen van de schijf hebben hogere hoekrotatiesnelheid dan de buitendelen
- kleine oscillerende beweging loodrecht op het vlak van de Melkweg
- Gas heeft een zeer kleine snelheidsdispersie (**10 km/s**) vergeleken met de rotatiesnelheid (zo'n **250 km/s**) in de omgeving van de Zon.



Spiraal Structuur

Spiraal tracers:

Spiraalarmen zijn iha. geen egale structuren

Gemarkeerd door verdichtingen van

- | | |
|----------------------|----------------|
| - sterren | sterclusters: |
| | OB associaties |
| - geïoniseerd gas | HII gebieden |
| - moleculaire wolken | CO wolken |

Daarnaast,

- meer egale verdeling neutraal waterstofgas



Spiraal Structuur

Spiraal tracers:

OB associaties: heldere, jonge, blauwe sterren

HII gebieden geïoniseerd gas



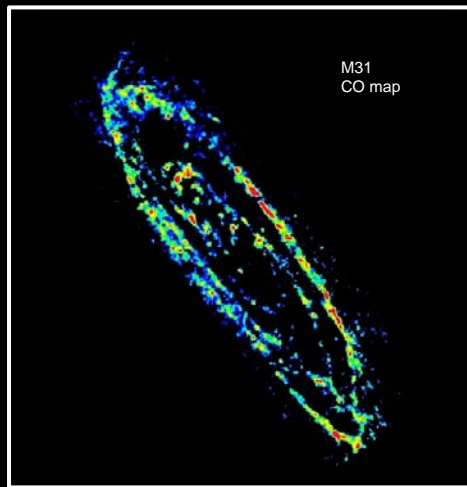
Copyright Anglo-Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh

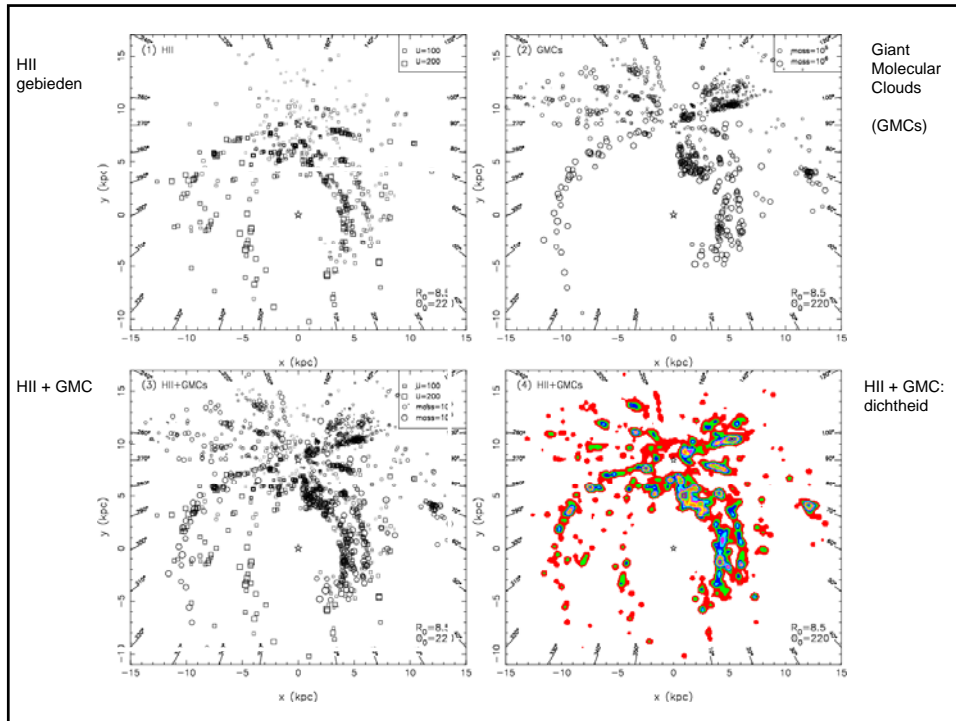


Spiraal Structuur

Spiraal tracers:

Moleculaire wolken,
mn. GMCs (Giant Molecular Clouds)
detectie mbv. CO molecuul





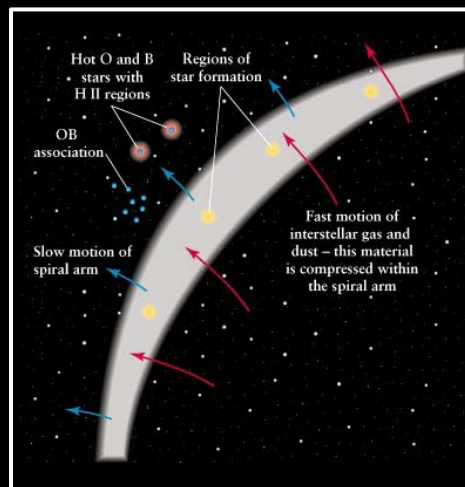
Spiraal Structuur

Spiraal tracers:

- Intrinsieke ruimtelijke relatie tussen
- Optische tracers spiraalarmen (OB associaties, HII gebieden, stof)
 - Moleculaire Wolken

Het is een reflectie van de stervorming die in gang wordt gezet als een spiraalgolf door een gaslaag passeert:

- compressie gas in dichte (moleculaire)wolken
- sterren vormen zich (in clusters)
- hete OB sterren stralen omgeving;
- ioniseren HII gebieden



Spiraal Structuur

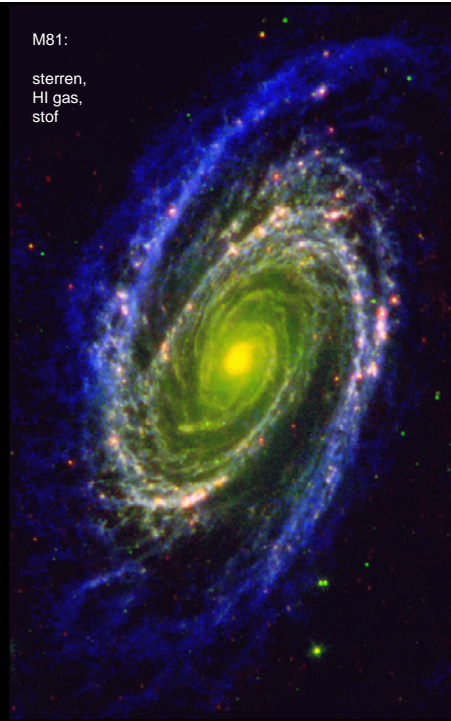
Spiraal tracers:

Meest egale tracer van schijf en spiraalstructuur:

- neutraal HI waterstofgas
- gasschijf strekt zich uit tot veel grotere afstanden dan stellair e schijf !

M81:

sterren,
HI gas,
stof



Spiraal Structuur

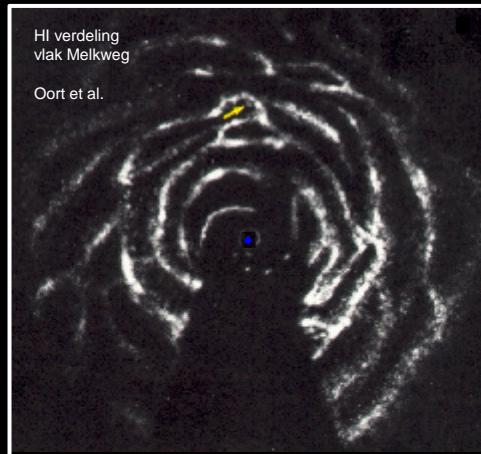
Spiraal tracers:

Meest egale tracer van schijf en spiraalstructuur:

- neutraal HI waterstofgas
- gasschijf strekt zich uit tot veel grotere afstanden dan stellair e schijf !

HI verdeling
vlak Melkweg

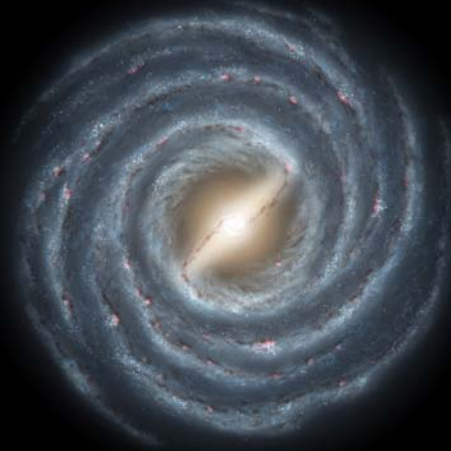
Oort et al.



Spiral Structure

Milky Way spiral structure:

- Four major spiral arms
(recent claims: only 2 spiral arms, at ends of bar)
- Each roughly logarithmic spiral
 - pitch angle ~ 12°
 - unusually small pitch angle:
in general, spiral galaxy arm pitch angle ~ 10° - 40°



Logarithmic Spirals

The spiral structure of spiral galaxies like our Milky Way can be roughly modelled by Logarithmic Spirals. A **logarithmic spiral** is a special kind of spiral curve which often appears in nature. The logarithmic spiral was first described by Descartes and later extensively investigated by Jakob Bernoulli, who called it *Spira mirabilis*, "the marvelous spiral".

- In polar coordinates (r, θ) , the curve can be written as

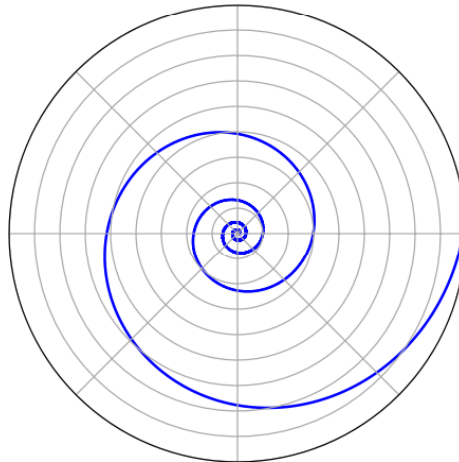
$$r = ae^{b\theta}$$
 or

$$\theta = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{r}{a}\right)$$
 with a and b being arbitrary positive real constants.
- In parametric form, the curve is

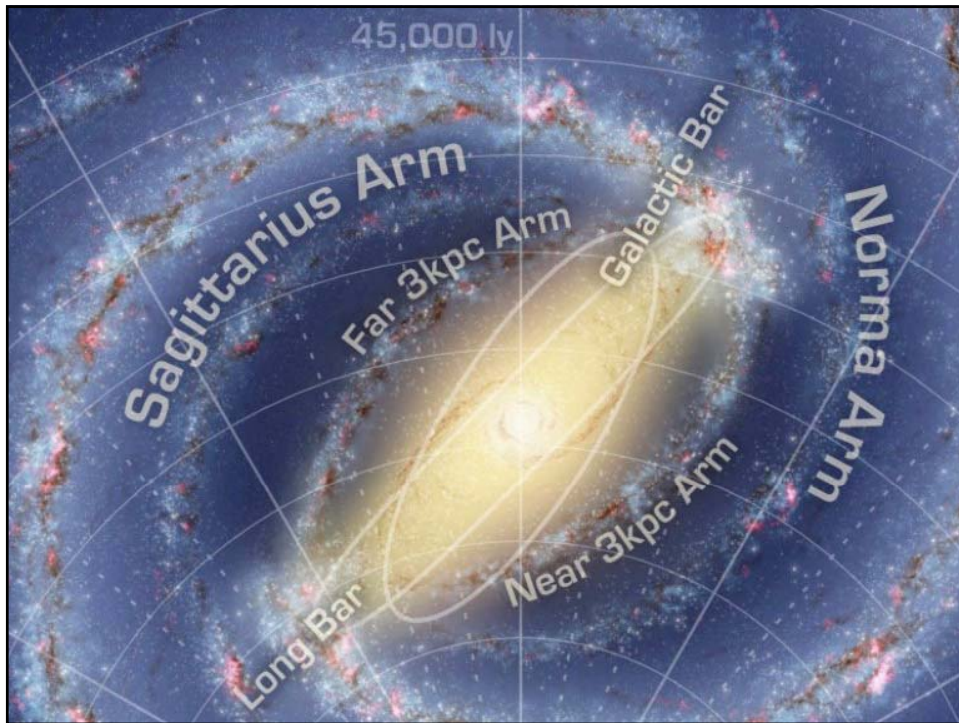
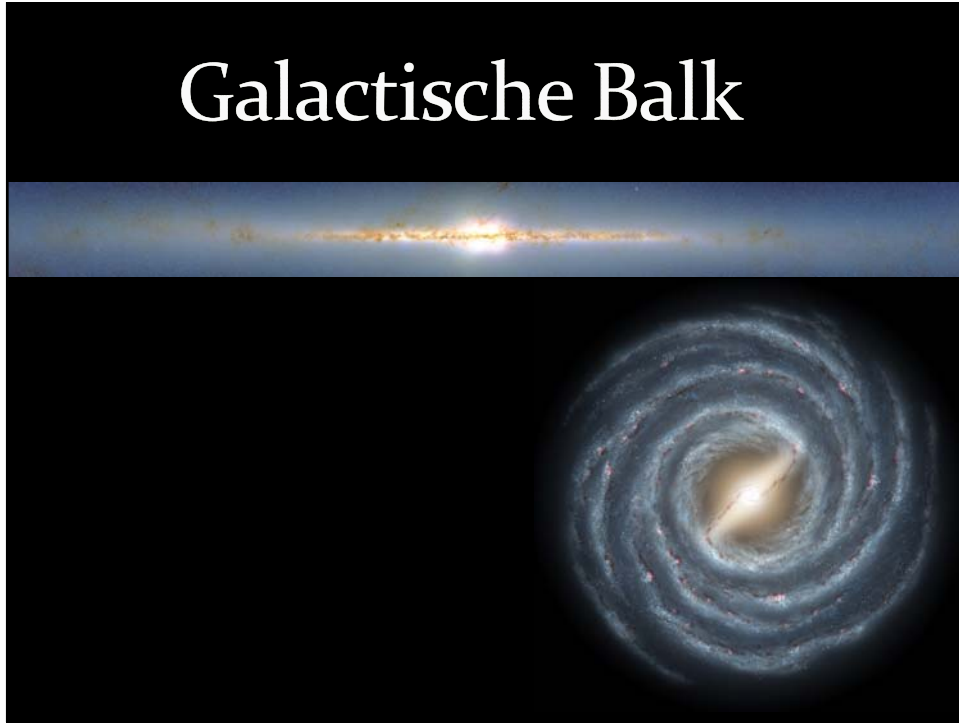
$$x(t) = ae^{bt} \cos(t)$$

$$y(t) = ae^{bt} \sin(t)$$
- The spiral has the property that the angle ϕ between the tangent and radial line at the point (r, θ) is constant. The angle ϕ is determined by the parameter b :

$$\phi = \arctan\left(\frac{1}{b}\right)$$
 Complement of ϕ : **spiral pitch angle**
- In other words, it controls how "tightly" and in which direction the spiral spirals. Extreme cases:
 - $b = 0$: spiral = a circle of radius a .
 - $b \rightarrow \infty$: spiral = a straight line



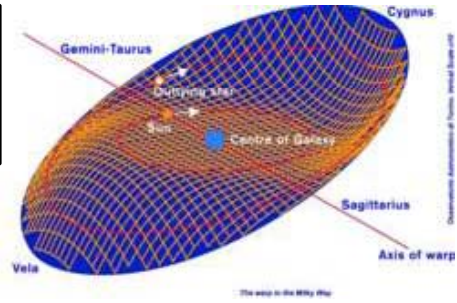
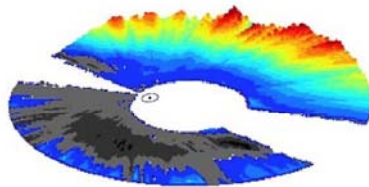
Galactische Balk



Galactische Warp

Melkwegschijf is niet vlak, maar gekruld:
de Galactische Warp

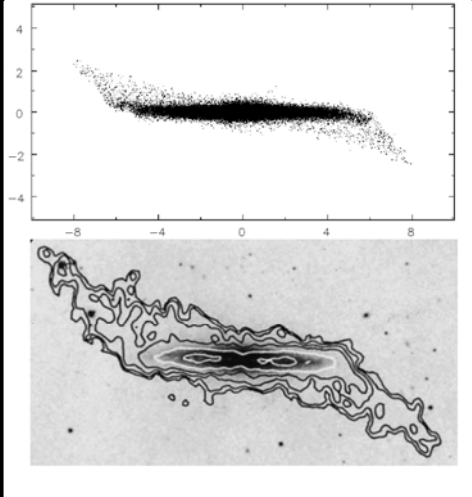
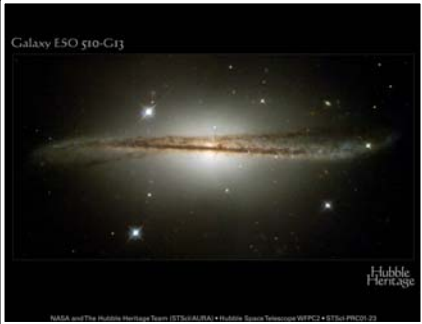
The Milky Way's Warped Disk

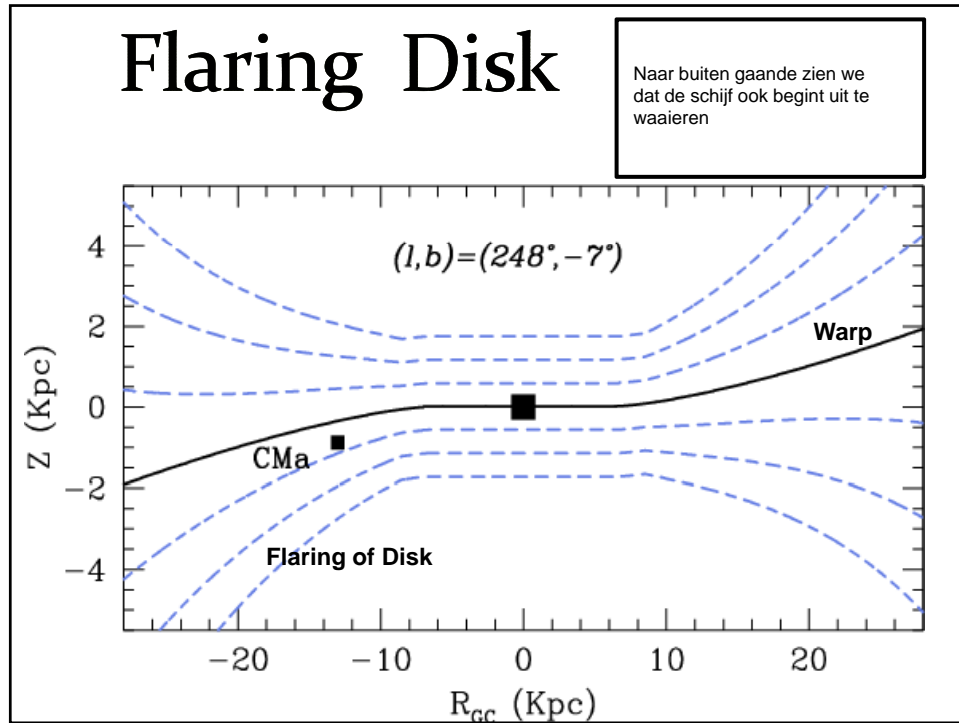


An image, to scale, of the asymmetric, warped hydrogen layer of the Milky Way newly mapped by UC Berkeley astronomers. The colored contours are warped "up" with regard to the galactic plane, while the grey contours are warped "down." The white area at the center is where most of the stars are, and the position of the sun is given by the dot with a circle around it. The sun orbits the center of the galaxy and is moving to the upper right in this view. The white areas, including the wedges, are difficult to study from Earth because of our position within the disk. (Credit: Leo Blitz/Carl Heiles/Evan Levine-UC Berkeley)

Galactische Warp

Galactische warps:
voorbeelden van stellaire warp
warp HI gasschijf (NGC4013)





Onze
Locatie
In de Melkweg

Onze Locatie in de Melkweg

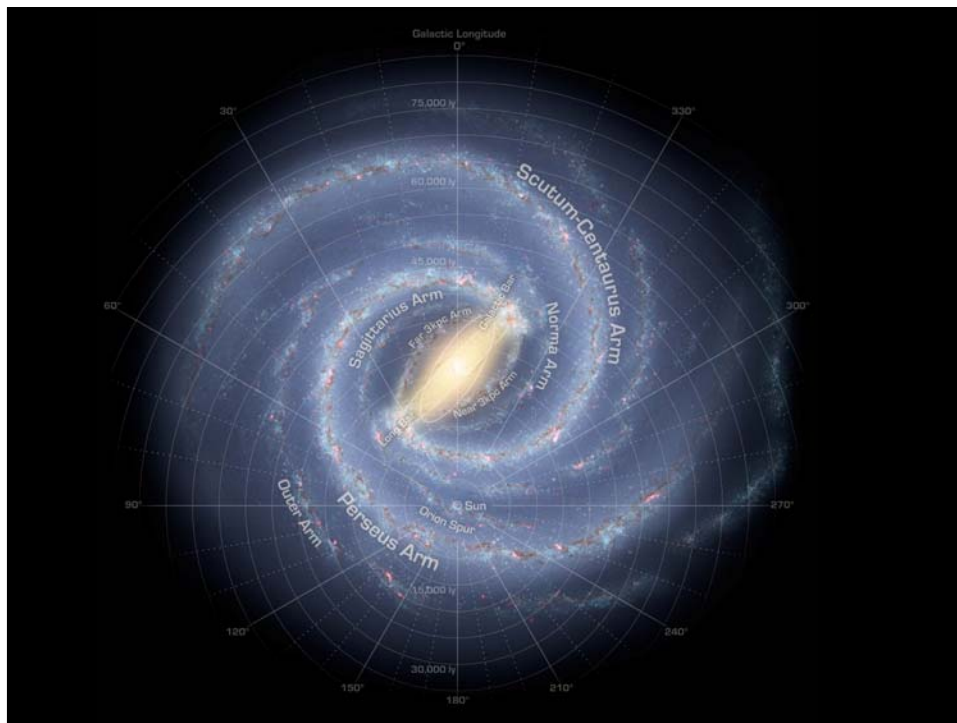
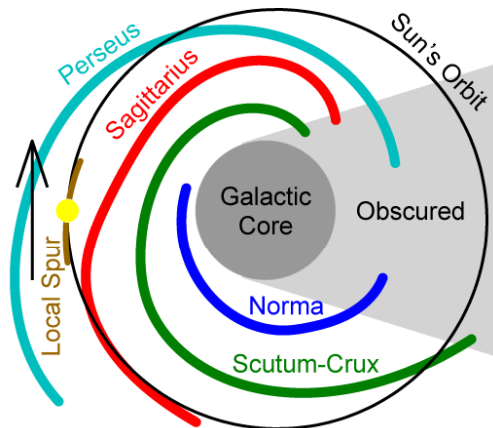
De Zon bevindt zich op een afstand van zo'n **8.5 kpc** van het centrum van de Melkweg, op een hoogte van **8 parsec** boven het Melkwegvlak. Met een snelheid van **220 km/s** snelt hij op zijn bijna cirkelvormige baan rond het centrum van de Melkweg, een omloop die hij eens in een **Galactisch jaar** van zo'n **220-230 miljoen jaar** aflegt.

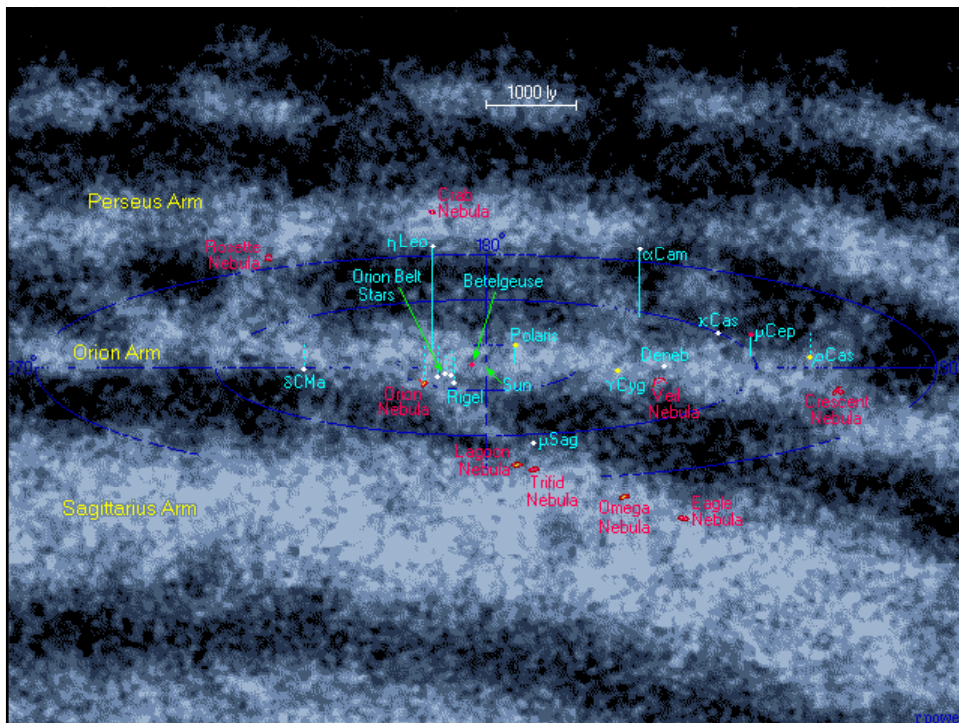
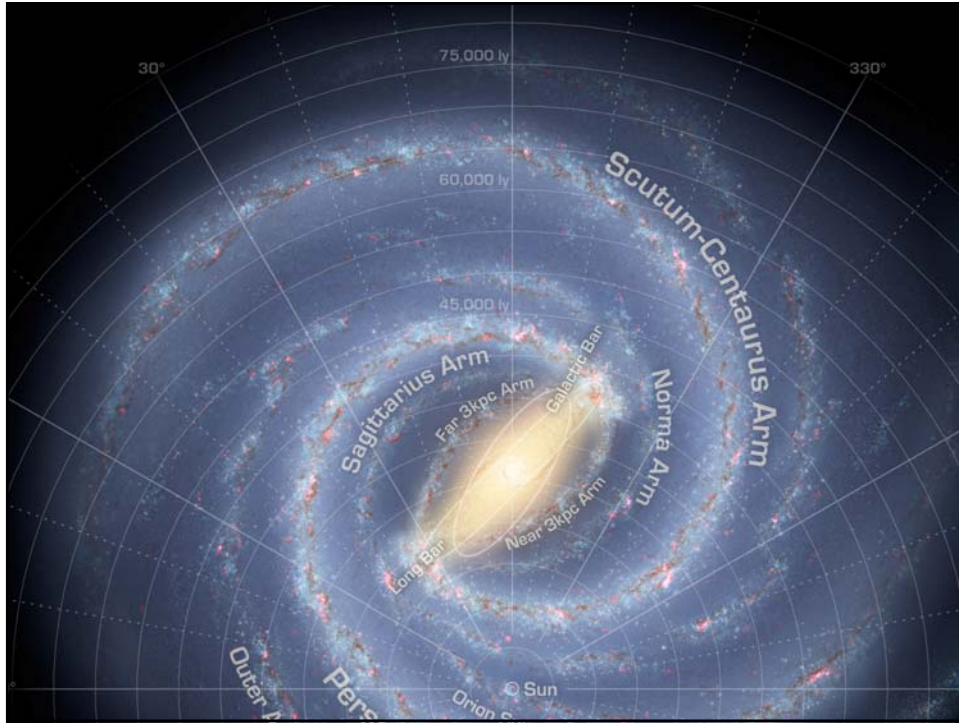
Samengevat in een tabel zijn de Galactische credentials van de Zon de volgende:

R_{\odot}	$8.5 \pm 1.0 \text{ kpc}$
z_{\odot}	8 pc
v_{\odot}	220 km/s
T_{\odot}	$220\text{-}230 \times 10^6 \text{ jaar}$
Sterdichtheid	$0.05 M_{\odot}/\text{pc}^3$

Beweging zonnestelsel:

1 AU: 8 dagen
1 lichtjaar: 1400 jaar

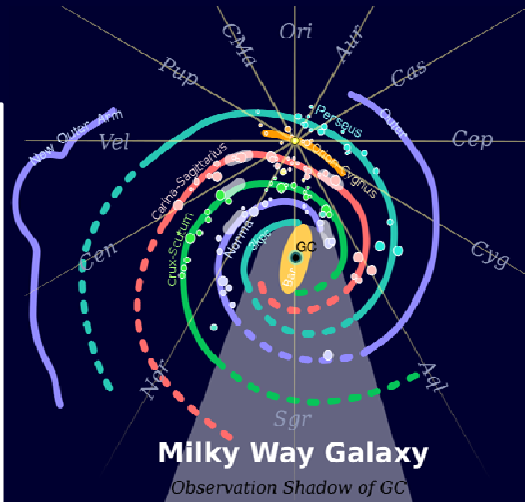




Locale Spiraalarmen

- de Zon en de locale spiraalarmen:
 - figuur: ruimtelijke verdeling van de spiraalarmen in zonsomgeving
 - de spiraalarmen van de Melkweg, vooral die in de nabijheid van de Zon (dwz. binnen enkele kpc), worden typisch vernoemd naar de sterrenbeelden (in de richting waarvan een substantieel deel van hen is gesitueerd).

- Orion-Cygnus Spiraalarm**
 - ons zonnestelsel diep ingenesteld in Orion spiraalarm, ~ 8.7 kpc van het centrum van de Melkweg
 - ook wel aangeduid met "0"-arm magere arm ivm. grotere omringende armen
- Sagittarius-Carina Spiraalarm**
 - binnenkant, dicht bij centrum Melkweg
- Perseus arm**
 - buitenkant
- Outer Arm**
 - nog verder naar buiten
- Scutum-Crux arm**
- Norma arm**
 - verder naar binnen



Galactische Componenten

De Bulge

Galactische Bulge

De Bulge,
in het centrum van de Melkweg,
is een afgeplatte sferoïde

Afmeting:

1 kpc (loodrecht op het Melkwegvlak) x
6 kpc (in het vlak).

De impressie van een **pinda** vorm
(infrarood en microgolflengten)
is een manifestatie van stof, hoewel er
ook wel is gespeculeerd dat het een
indicatie is van de centrale **balk**.



Galactische Bulge

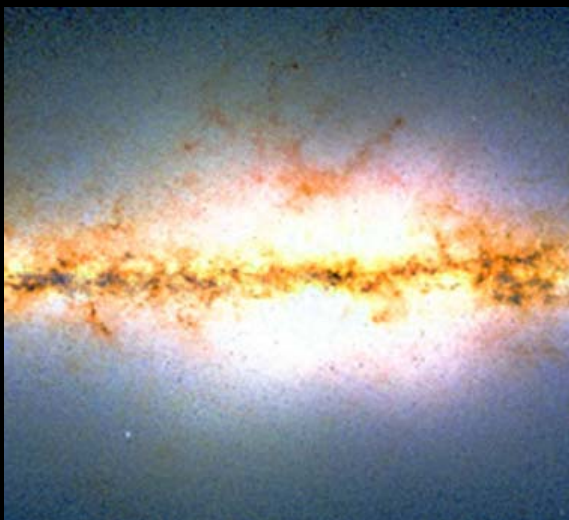
Massa:

- totale massa van de bulge,
binnen een straal van 500 parsec
 $M \sim 10^{10} M_{\odot}$.

Dichtheid:

- gemiddelde dichtheid $\sim 20 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$
- aanzienlijk hoger dan in de schijf

Veruit het grootste deel in deze massa
bestaat uit sterren, hoewel er ook wel
wat gas aanwezig is.



Galactische Bulge

Sterren:

- gebied met hoge dichtheid aan sterren
- **Populatie II** sterren domineren
- voornamelijk rode en zeer oude sterren (10×10^9 jaar).

- licht op de 2μ infrarood opname toe te schrijven aan K en M rode reuzen

Baade's venster:

- RR Lyrae sterren, variabele sterren die het mogelijk maken de afstand te bepalen,
- planetaire nevels
- beiden typische Populatie II objecten

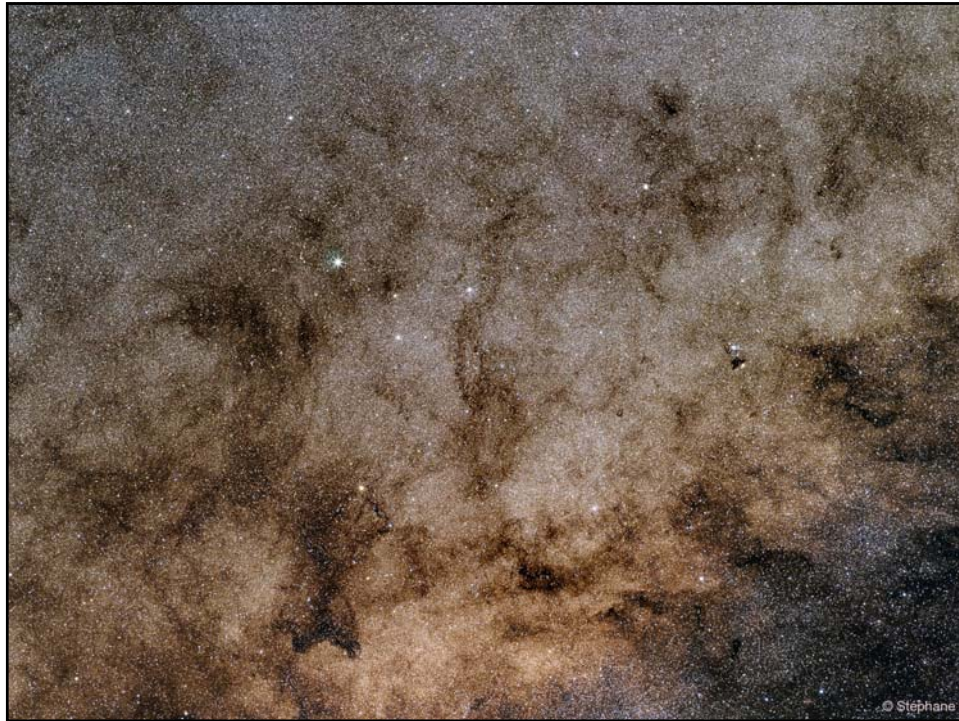


Baade's Window

- Narrow zone on the sky through which we can look all the way to the Milky Way Centre:

a “window” on the centre of the Galaxy, i.e. somewhat south of centre, to the central bulge

- one of 6 small zones with view to central bulge
- relatively low amounts of Galactic dust
- irregularly shaped, $\sim 1^\circ$ in size
- direction constellation Sagittarius, centered around globular cluster NGC 6522
- called after astronomer Walter Baade



Galactische Bulge

Gas:

- tussen 50-700 parsec:
gasschijf van neutral waterstofgas,
in circulaire Kepler banen.
- massieve moleculaire wolken,
met zeer afwijkende bewegingen.
- zeer intrigerende gasbewegingen
en hoedanigheden in centrale parsecs.



Galactische Bulge

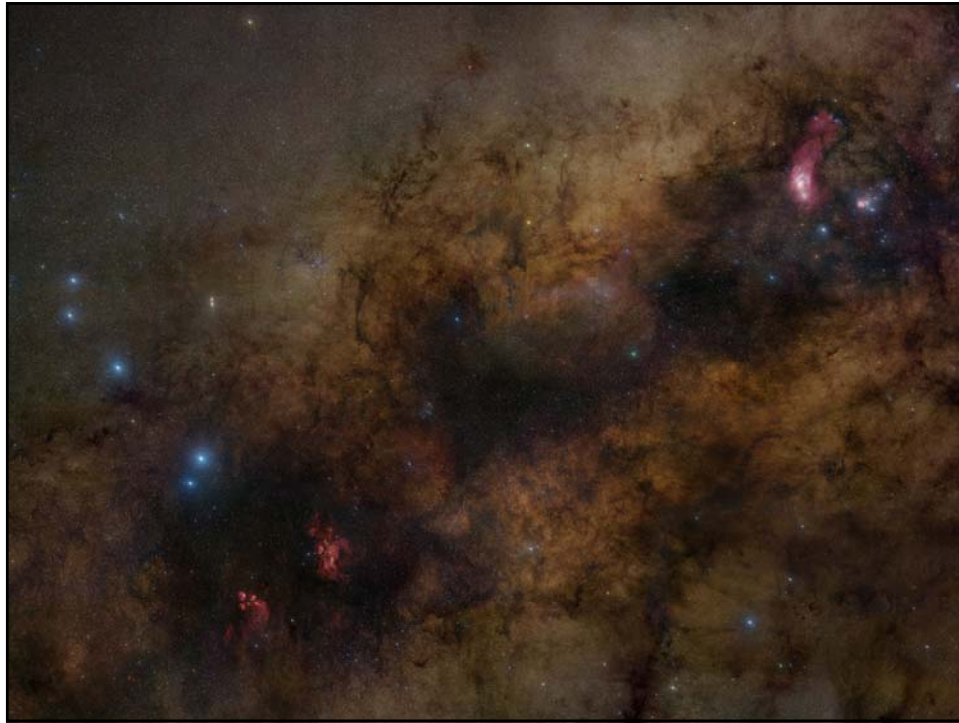
Kinematics:

- Voornamelijk gedomineerd door **random** bewegingen
- vorm van de bulge bepaald door evenwicht tussen deze "thermische" bewegingen en de zwaartekracht.
- belangrijke **rotatie** component, gevolg van de grote dichtheid daar de bijbehorende impulsmoment verdeling bijna gelijk is aan die van de halo.



Galactische Componenten

het
Galactische
Centrum



Galactisch Centrum

Het Centrum van de Melkweg ligt in de richting van het sterrenbeeld Sagittarius.

Het gebied valt niet bijzonder op voor het menselijk oog. Echter, als we het interstellaire stof dat ons zicht in die richting beneemt zouden kunnen verwijderen, zouden we de elliptische vorm van de **bulge** van de Melkweg heel het sterrenbeeld Sagittarius zien beslaan. Zijn pracht zou een van de meest opvallende verschijnselen aan de hemel zijn.

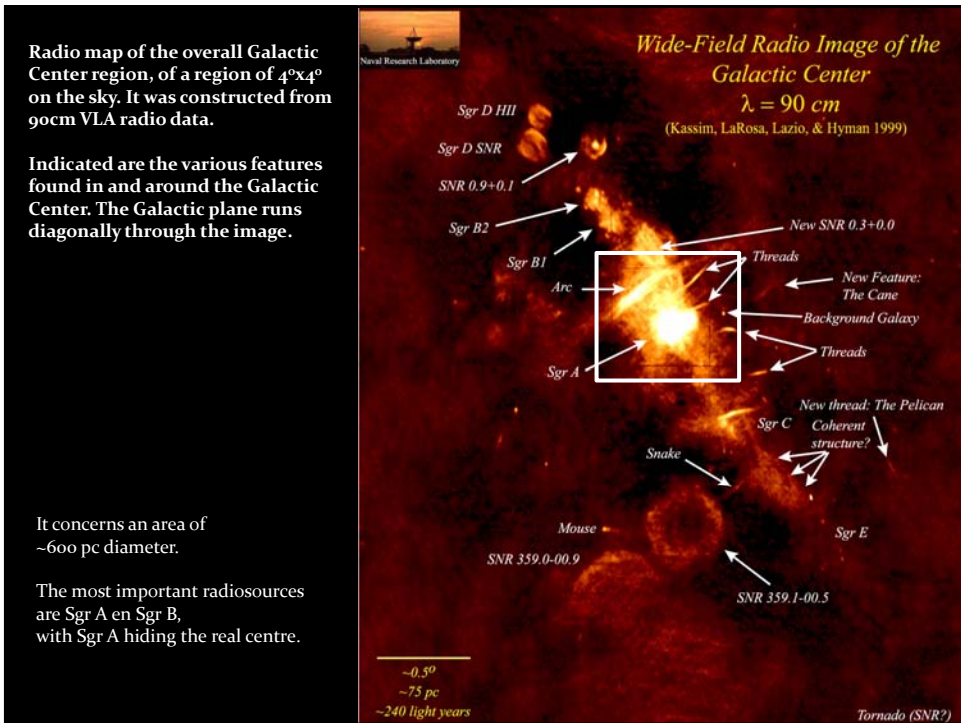
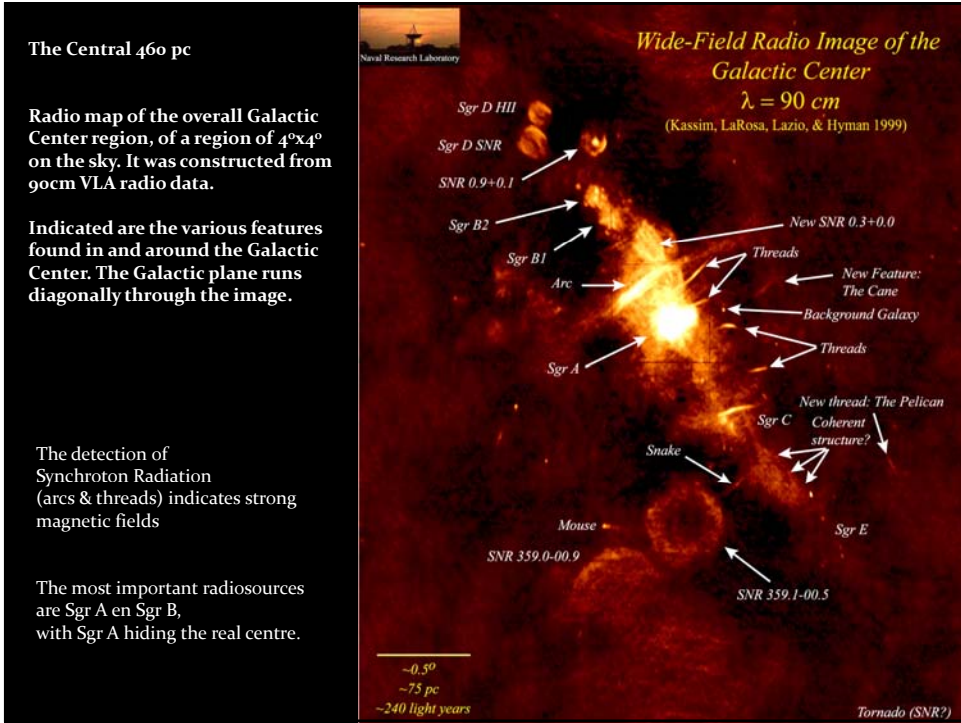
Het centrum van de Melkweg is zondermeer het meest uitzonderlijke en spectaculairste gebied in de Melkweg, waarin een groot aantal unieke objecten kunnen worden geïdentificeerd. Men vindt er een zeer compacte en bevolkingsrijke stercluster, alsmede gas in moleculaire wolken en in HII gebieden.

Uit de bewegingen van het gas en uit die van de sterren vindt men dat er zich een zeer hoge concentratie van massa in het centrum van de Melkweg bevindt, hoogstwaarschijnlijk een Zwart Gat.

View into the Core

- Omdat de Melkweg relatief transparant is voor straling op lange golflengten, kunnen we met radio- en infraroodtelescopen in het hart van de Melkweg kijken.
- Op infrarood golflengten krijgen we vooral een goede kijk op de sterren die zich in dit gebied bevinden (zie ook de spectaculaire impressie van het gehele centrale gebied in het zMASS survey mozaiek).
- Wellicht de meest spectaculaire impressies van het centrum komen naar buiten in het radiogebied. Als radiobron is het uniek in de Melkweg. In de regio vinden we verscheidene bronnen van zeer heldere radio continuum emissie. In de kern van dit alles bevindt zich een extreem heldere bron van radio continuum emissie, **Sagittarius A'**. We vermoeden dat zich daar een **Zwart Gat** van $10^6 M_{\odot}$.





Galactic Center Radio Arc

Langs het Galactische vlak ziet men wervelende gaswolken.

Worden bewerkt door de straling afkomstig van hete sterren en door ronde supernova resten (SNRs). Alles een uiting van een heftige en energetische kosmische omgeving.

Heel intrigerend zijn de bogen, draden en filamenten in dit gebied.

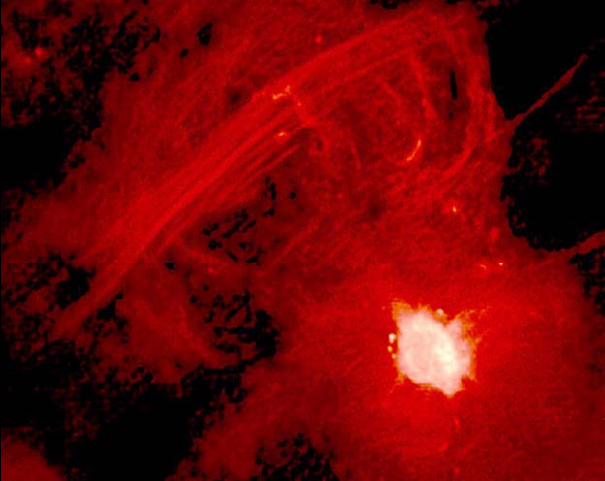
Hoewel hun oorsprong niet geheel duidelijk is, duiden zij op sterke en coherente magneetvelden die zich door dit turbulente gebied slingeren.

Duidelijk voorbeeld :
de **Galactic Center Radio Arc** boog van lange parallelle lijnen, die als het ware uit het Galactisch vlak steken en die door middel van gebogen filamenten vervonden is met Sgr A (zie hiernaast).

Men denkt dat de geometrie van Radio Arc en de daaraan verbonden Arches geïnterpreteerd moet worden in termen van een heet plasma dat langs de magnetische veldlijnen stroomt.

Opnamen van de Chandra X-ray satelliet laten zien dat het plasma botst met een nabije wolk van koud gas.

The Galactic Center Radio Arc:
The Radio Arc is connected to the Galactic center, the black hole probably residing at the location of the bright radio source Sagittarius A*, by strange curving filaments known as the Arches.



Galactic Center Radio Arc

Langs het Galactische vlak ziet men wervelende gaswolken.

Worden bewerkt door de straling afkomstig van hete sterren en door ronde supernova resten (SNRs). Alles een uiting van een heftige en energetische kosmische omgeving.

Heel intrigerend zijn de bogen, draden en filamenten in dit gebied.

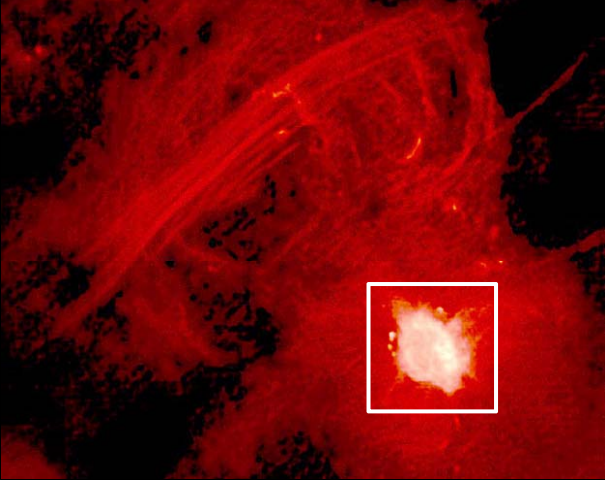
Hoewel hun oorsprong niet geheel duidelijk is, duiden zij op sterke en coherente magneetvelden die zich door dit turbulente gebied slingeren.

Duidelijk voorbeeld :
de **Galactic Center Radio Arc** boog van lange parallelle lijnen, die als het ware uit het Galactisch vlak steken en die door middel van gebogen filamenten vervonden is met Sgr A (zie hiernaast).

Men denkt dat de geometrie van Radio Arc en de daaraan verbonden Arches geïnterpreteerd moet worden in termen van een heet plasma dat langs de magnetische veldlijnen stroomt.

Opnamen van de Chandra X-ray satelliet laten zien dat het plasma botst met een nabije wolk van koud gas.

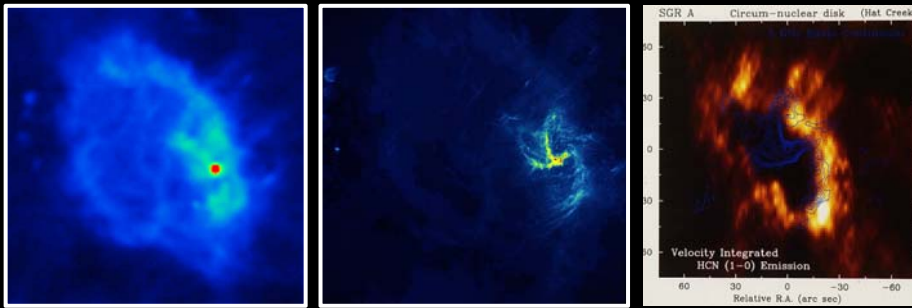
The Galactic Center Radio Arc:
The Radio Arc is connected to the Galactic center, the black hole probably residing at the location of the bright radio source Sagittarius A*, by strange curving filaments known as the Arches.



Zooming in on Sagittarius A

Sgr A bestaat uit een complex van bronnen: Sgr Oost, Sgr West en Sgr A'.

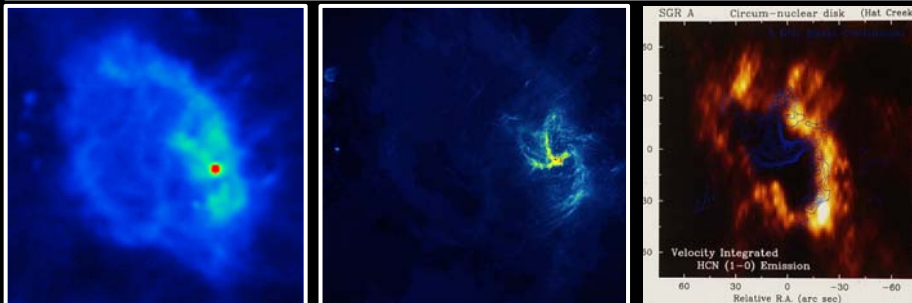
- Sgr A Oost (20 cm VLA opname, links):
 - ovale, schilachtige structuur;
 - waarschijnlijk een supernovarest, waarvan de materie helpt om de accretischijf rond het centrale zwarte gat te voeren (gesitueerd in Sgr A' : rode puntje).



Zooming in on Sagittarius A

Sgr A bestaat uit een complex van bronnen: Sgr Oost, Sgr West en Sgr A'.

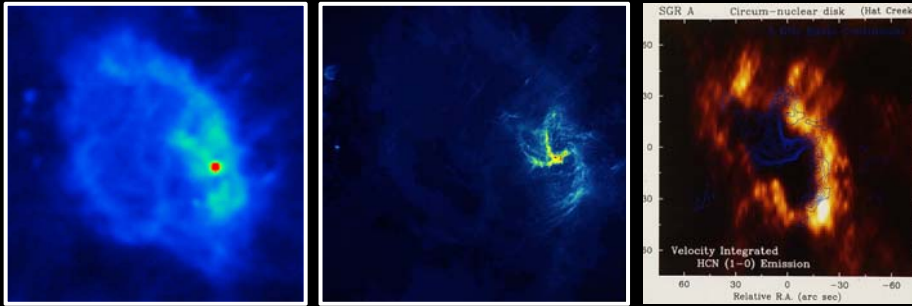
- Sgr A West (6 cm VLA opname, midden):
 - opname: gebied ~ 3pc afmeting
 - verzameling filamentachtige structuren;
 - radioemissie geconcentreerd in richelachtige bron met opvallende spiraalachtige structuur
 - sommige filamentachtige structuren onderdeel van massieve wolk dat invalt naar het Galactische centrum.
 - waarnemingen van atomair waterstof, suggereren dat sommige van deze filamentachtige structuren onderdeel zijn van een massieve wolk die invalt naar het Galactische centrum.
 - vertoont karakteristieken van een geïoniseerd waterstof (HII) gebied, gas geïoniseerd door de talrijke jonge en zeer hete (O en B) sterren in dit gebied.



Zooming in on Sagittarius A

Sgr A bestaat uit een complex van bronnen: Sgr Oost, Sgr West en Sgr A*.

- Gas rond Sgr A*:
 - bewegingen te volgen op millimeter en centimeter golflengten.
 - op hoge resolutie opnamen ziet men een ring van moleculair gas gecentreerd op Sgr A*
 - spiraalstructuur van heet geïoniseerd gas bevindt zich net binnen deze schijf



Central Starclusters

The central parsec around Sagittarius A* contains thousands of stars.

Although most of them are old red main sequence stars, the Galactic Center is also rich in massive stars:

More than 100 OB and Wolf-Rayet stars have been identified so far.

All seem to have been formed in a single star formation event a few million years ago.

Currently, star formation does not seem to be occurring, although the Circumnuclear Disk of molecular gas that orbits the Galactic center at two parsecs seems a fairly favorable site for star formation

It is interesting to note that most of the 100 young, massive stars are concentrated within one (according to the UCLA group) or two (according to the MPE group) disks, rather than randomly distributed within the central parsec.



Central Starclusters

New adaptive optics instruments in infrared astronomy create high-resolution images of the Galactic Center:

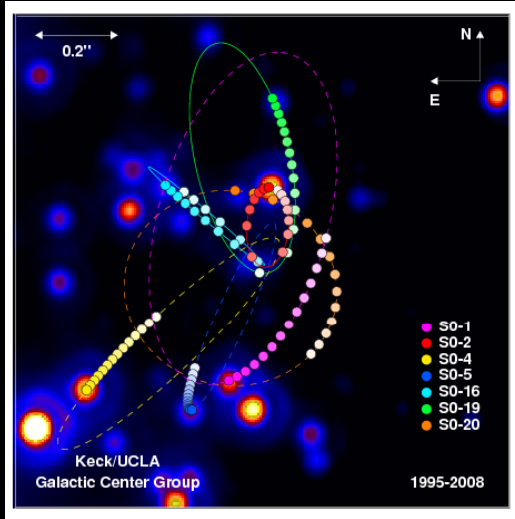
Resolution of $\sim 0.025''$.
 At Galactic Center spatial resolution < 200 AU.

With such instruments, the orbits of stars around Sgr A* can be precisely measured.

Because Sgr A* provides virtually all of the gravitational attraction at the very center of the Galaxy, the motion of nearby stars is governed solely by this object, and observation of this motion is a direct measure of the properties of Sgr A*

Two groups follow these motions since ~ 15 yrs.:

- UCLA group A. Ghez
- MPE group R. Genzel



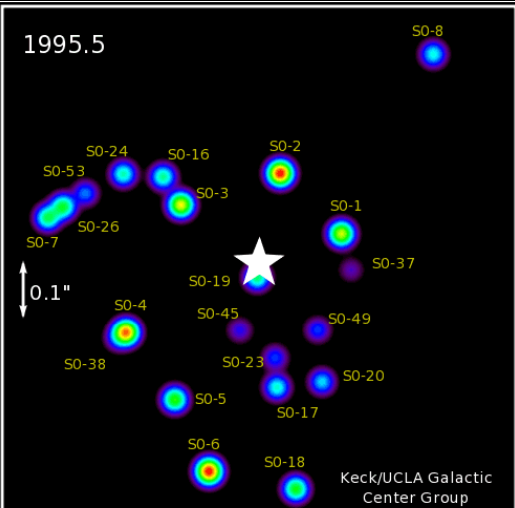
Central Starclusters

The velocities of the stars near Sgr A* can be $>1,000$ km s⁻¹.

While these are very high velocities, they are not so high that one sees the effects of General Relativity in their motions around the black hole.

The stars close to Sgr A* therefore move in Keplerian orbits:

the mass of Sgr A* can be directly measured by measuring the size and period of the orbit of a single nearby star.



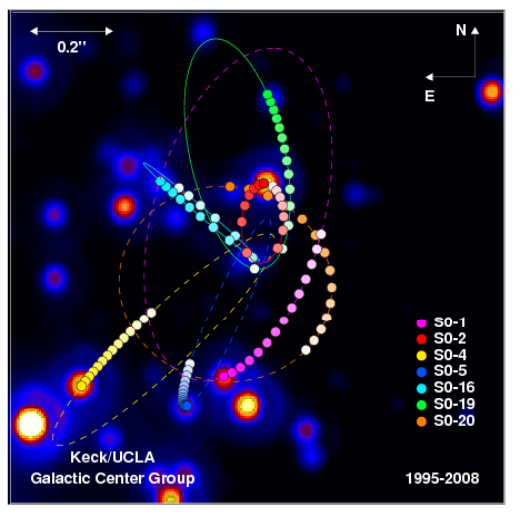
Central Starclusters

The stars close to Sgr A* therefore move in Keplerian orbits:

- M₁: mass star
- M₂: mass black hole
- a: distance star to black hole (better: distance to center of mass)
- P: orbital period

$$P^2 = \frac{a^3}{M_1 + M_2} \quad M_2 \gg M_1$$

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2} \Rightarrow M_2 \approx \frac{a^3}{P^2}$$



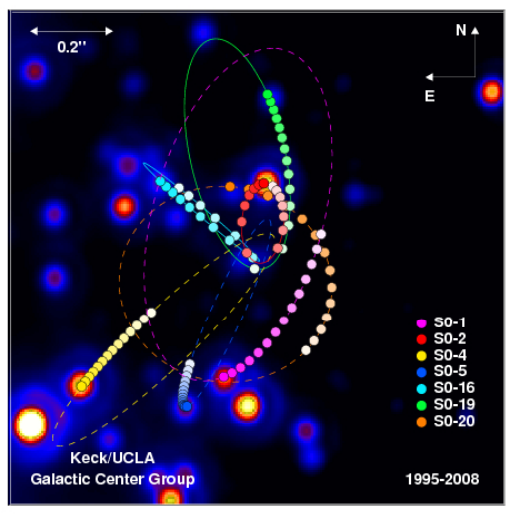
Central Starclusters

The stars close to Sgr A* therefore move in Keplerian orbits:

$$M_1 + M_2 = \frac{a_3^3}{P^2} \Rightarrow M_2 \approx \frac{a_3^3}{P^2}$$

S₂ around Sgr A* :

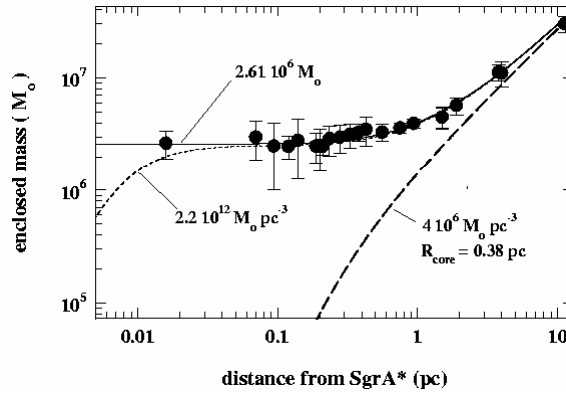
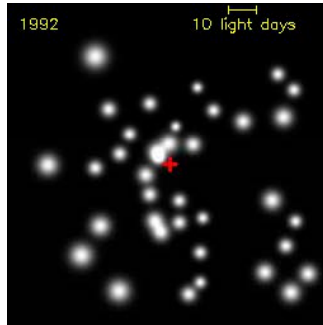
- P = 15.2 yrs
- a = 4.62 × 10³ pc
- ⇒ M₂ ≈ 3.7 × 10⁶ M_⊙



Superzwaar Zwart Gat

Uit deze bewegingen kan men mbv. de gebruikelijke zwaartekrachtswetten, de massa bepalen die zich binnen de baan van de sterren bevindt.

De conclusie is fascinerend:
centrale gebied van Sgr A* moet
 $M \sim 2.6 \times 10^6 M_{\odot}$
bevatten, binnen straal $R \sim 10 \text{ AU}$!!!!!!!



Maar 1 soort object:
Zwart Gat

Galactische Componenten

De Halo

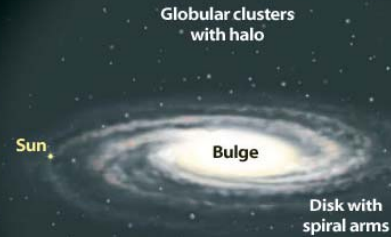
Galactische Halo

Bulge en schijf liggen ingebed in Halo:

Een diffuse sferoidale "wolk"

- 1) sterren en bolclusters,
- 2) donkere materie

- **Diameter:** ~ 200 kpc
- meeste sterren binnen ~20 kpc
- buitenrand moeilijk te bepalen, niet eenduidig bepaald, maar strekt zich uit tot voorbij Magelhaense Wolken en omringende dwergsterrenstelsels
- naarmate verder naar buiten, lijkt de donkere materie (gravitationeel) dominantier



Galactische Halo

• **Massa:**

- sterrenmassa binnen 20 kpc:

$$\sim 2 \cdot 9 \times 10^9 M_{\odot}$$

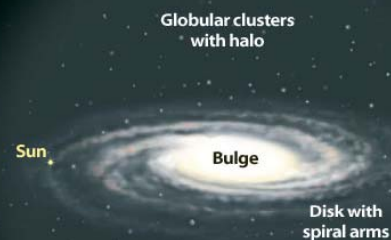
- dark halo mass:

$$> 10^{11} M_{\odot}$$

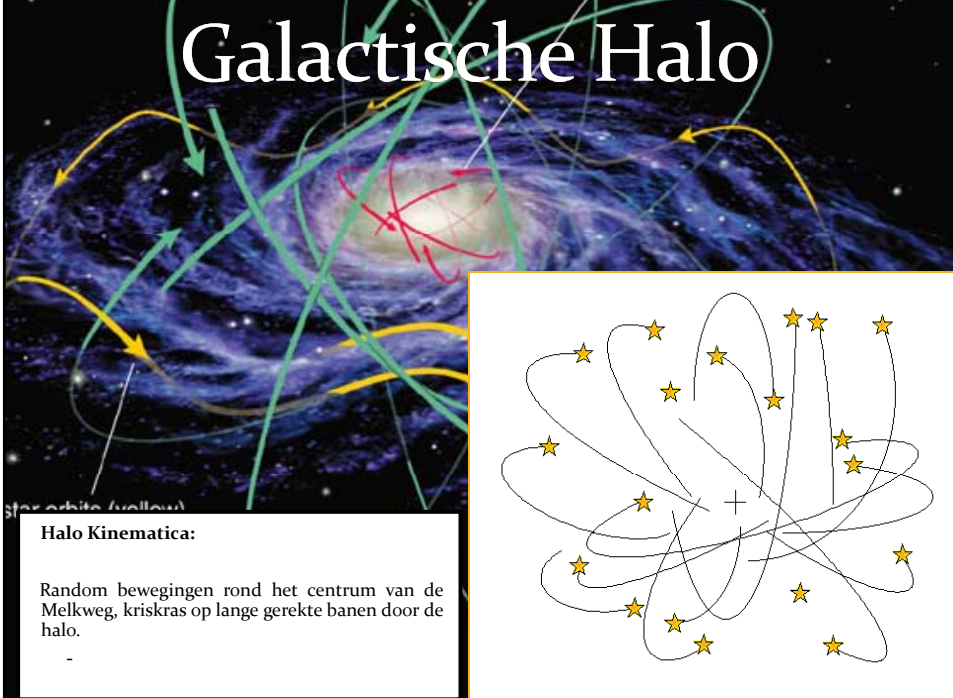
• **Dichtheid:**

Halo sterdichtheid in Zonsomgeving:

$$\sim 3 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$$



Galactische Halo



Halo Kinematica:

Random bewegingen rond het centrum van de Melkweg, kriskras op lange gerekte banen door de halo.

-

Galactische Halo

Sterren:
Halo sterren behoren alle tot de **oude Populatie II** sterren.

Twee componenten:

- gewone halo populatie van sterren.
- zeer karakteristieke component:
~ **154 bolclusters**.




Galactische Halo

Bolclusters:

- Bolvormige compacte sterclusters
~ 10^5 - 10^6 sterren
- 154 Galactische bolclusters
- Bolclusters bevatten ~ 1%
totale massa aan sterren in
galactische halo
- totale massa bolcluster populatie:
 - $9 \times 10^7 M_{\odot}$
 - $4.5 \times 10^7 M_{\odot}$ $R < 1 \text{ kpc}$
 - $4 \times 10^7 M_{\odot}$ $R \sim 1\text{-}20 \text{ kpc}$.

- Twee groepen:
 - Halo populatie
 - Dikke schijf populatie



Galactische Halo

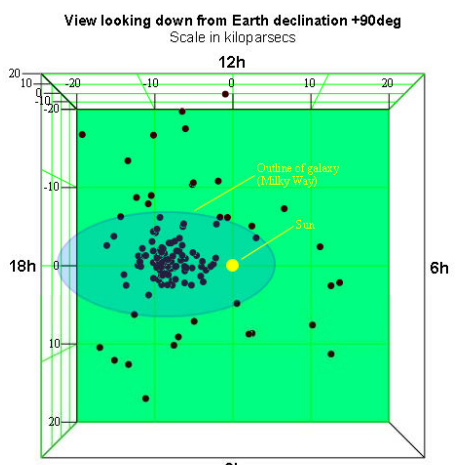
Bolcluster Halo populatie

- merendeel bolclusters
- echte Populatie II objecten
- sferisch verdeeld door halo
- tot op straal ~ 20 kpc
- afstand tot Galactisch vlak ~ 10 kpc
- random bewegingen door halo,
zonder systematische rotatie
- metaalarme sterren,
6-7 maal metaalarm dan Zon

Dikke schijf Bolcluster populatie

- ~ 20% bolclusters
- binnen 1-2 kpc van Melkwegvlak
- enigszins afgeplatte ruimtelijke verdeling
- minder metaalarm
- circulaire banen rond Melkwegcentrum
- rotatiesnelheid ~ $\frac{1}{2}$ van vergelijkbare
populatie I sterren in dunne schijf

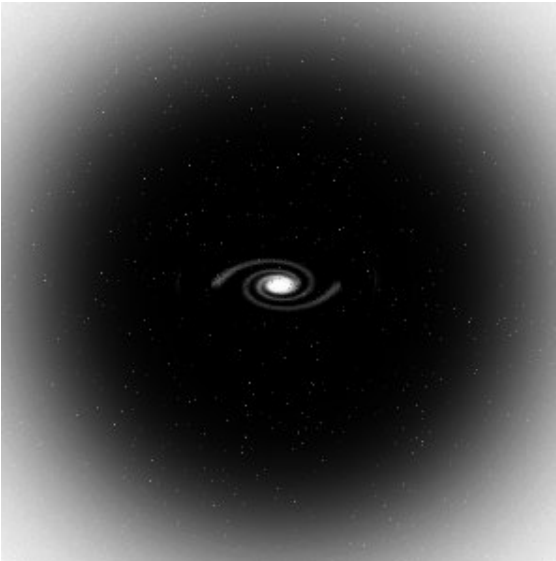
View looking down from Earth declination +90deg
Scale in kiloparsecs



Plot of globular clusters in a 40x40x40 Kpc volume around Earth
Copyright © 2000 by Wil Milan wmilan@airdigital.com



Dark Halo

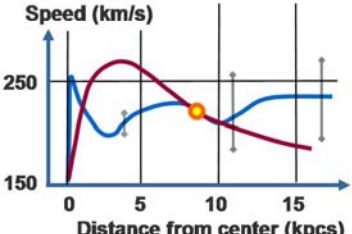


Galaxies embedded in large surrounding halos of dark matter:

Its presence is revealed by the gravitational effect on the Galaxy's rotation curve:

Rotation velocities of neutral hydrogen gas do not decline out to very large distances from Centre,

out to at least 100 kpc
(far beyond stellar disk)



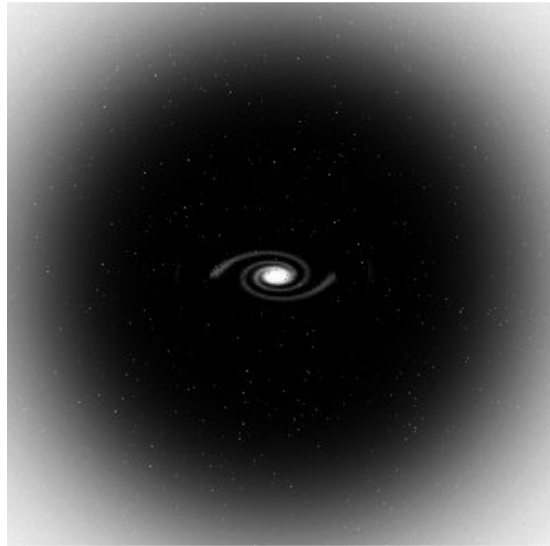
Speed (km/s)

Distance from center (kpcs)

Distance from center (kpcs)	Speed (km/s)
0	150
2.5	250
5	200
7.5	220
10	230
12.5	240
15	240

The graph shows two curves: a red curve that peaks at approximately 250 km/s around 2.5 kpc and then declines, and a blue curve that rises to a constant speed of about 240 km/s after 10 kpc. A yellow dot is placed on the blue curve at approximately 10 kpc. Error bars are shown for the data points on the blue curve.

Dark Halo



Galaxies embedded in large surrounding halos of dark matter:

The Navarro-Frenk-White profile:

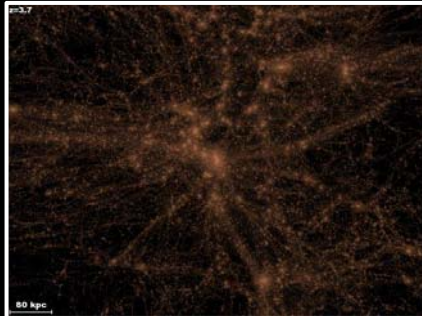
$$\rho(r) = \frac{cst.}{(r/a)(1+r/a)^2}$$

is often used to model the mass distribution of dark matter halos.

Theoretical dark matter halos produced in computer simulations are best described by the Einasto profile:

$$\rho(r) = \rho_0 e^{-\alpha r^n}$$

Dark Halo Evolution: Hierarchical Buildup



Dark Halo's

Most intriguing aspect is whether we can detect the fossil substructure,

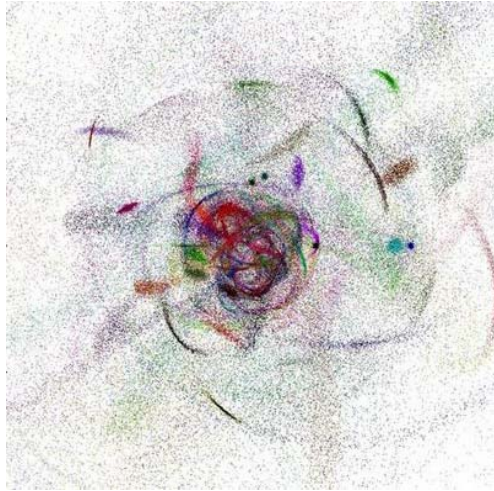
Remnant of the hierarchical buildup process.

Search for streams of matter, the remnants of small fragments (clumps, satellites, etc.) that fell in into the Galaxy during its life.

In particular clear when looking at phase-space structure halo:

$$f(\vec{x}, \vec{p})$$

Dark Halo Evolution: Hierarchical Buildup



Dark Halo's

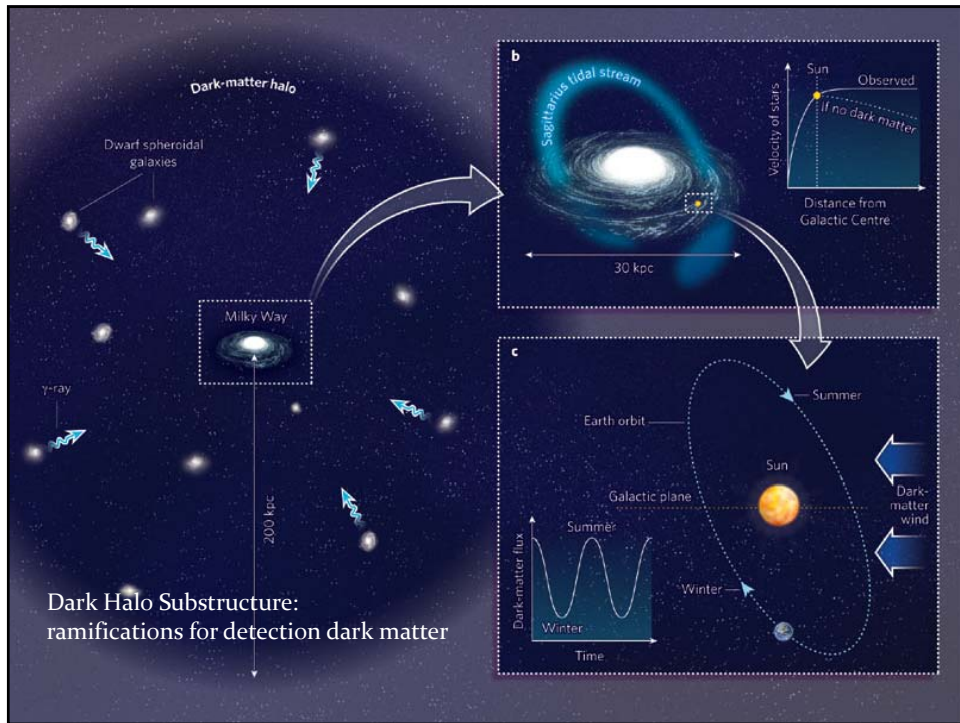
most intriguing aspect is whether we can detect the fossil substructure,

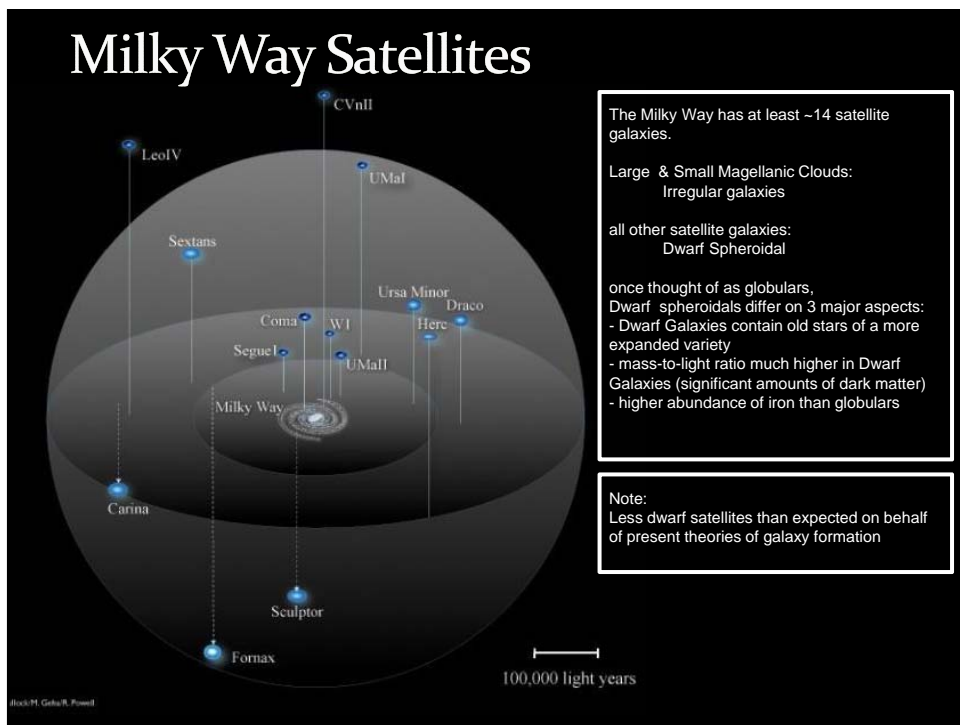
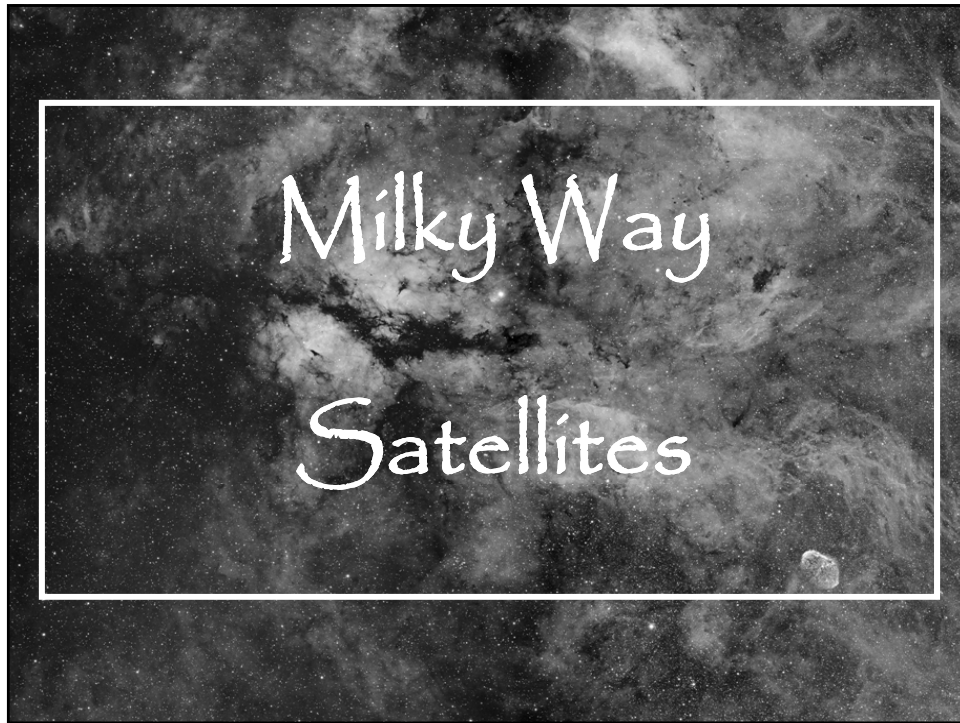
remnant of the hierarchical buildup process.

search for streams of matter, the remnants of small fragments (clumps, satellites, etc.) that fell in into the Galaxy during its life.

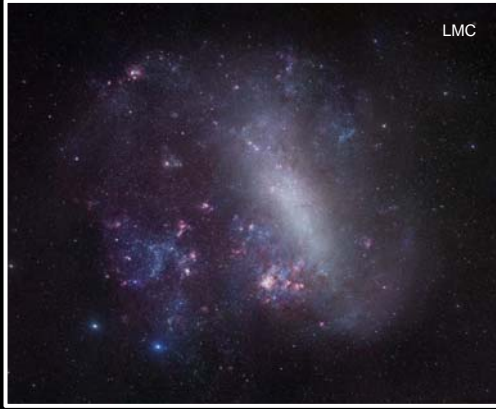
In particular clear when looking at phase-space structure halo:

$$(\bar{x}, \bar{p})$$

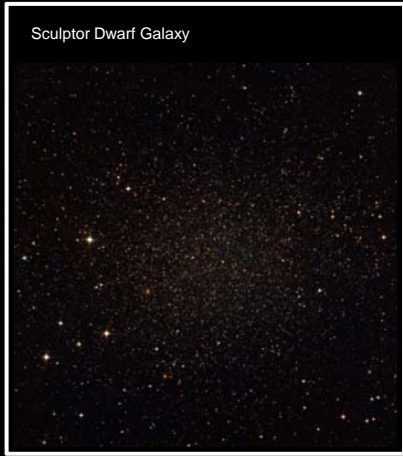




Milky Way Satellites



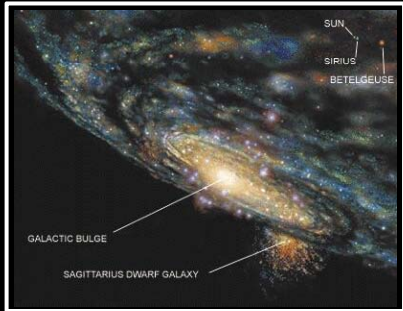
The Milky Way has at least ~14 satellite galaxies.
Large & Small Magellanic Clouds: Irregular galaxies
all other satellite galaxies: Dwarf Spheroidal



Sagittarius Dwarf Galaxy



Nearest known neighbour to Galaxy:
central cluster (old population II) +
loop-shaped structure wrapping around Galaxy



Based on current trajectory:

- Sag DEG main cluster is about to pass through the galactic disc of Milky Way within next 100 Myr
- extended loop-shaped ellipse already extended around and through our local space and on through the Milky Way galactic disc (will be slowly absorbed into Milky Way)

Globulars:
- 4 globular clusters (incl. M54)
- dynamically linked to 3 young globulars

Multiple stellar populations:
- very oldest globular cluster populations
- stars as young as ~ 100 Myr

Milky Way Rotation

Differential Galactic Rotation

Solid Body Rotation

Wheel-like rotation

Rotation curve for wheel-like rotation

Within the disk stars are moving on circular orbits. The orbital velocity varies as function of radius R . Because the mass is distributed, with density $\rho(R)$ a function of radius R the circular velocity $v(R)$ is a nontrivial function of radius R : Rotation Curve

Kepler Rotation: Central Mass

Planet-like rotation

Rotation curve for planet-like rotation

Galactic Differential Rotation: distributed mass

Orbital speed (km/s)

Distance from galactic center (ly)

Keplerian orbit

Galactic Rotation

Assuming all orbits are circular,
at distance R from the centre:
rotation velocity $v(r)$
angular speed $\Omega(r)$
mass density $\rho(r)$

Mass contained within radius R:

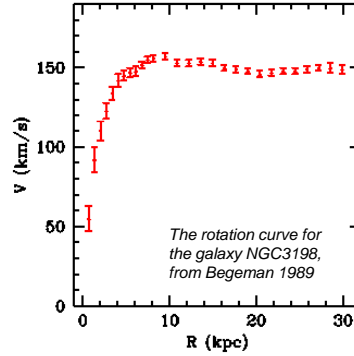
$$M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r)r^2 dr$$

Gravitationally induced circular motion:

$$\frac{GM(R)}{R^2} = \frac{v^2(R)}{R}$$

so that the mass within radius R may be inferred from

$$M(R) = \frac{v(R)^2 R}{G}$$

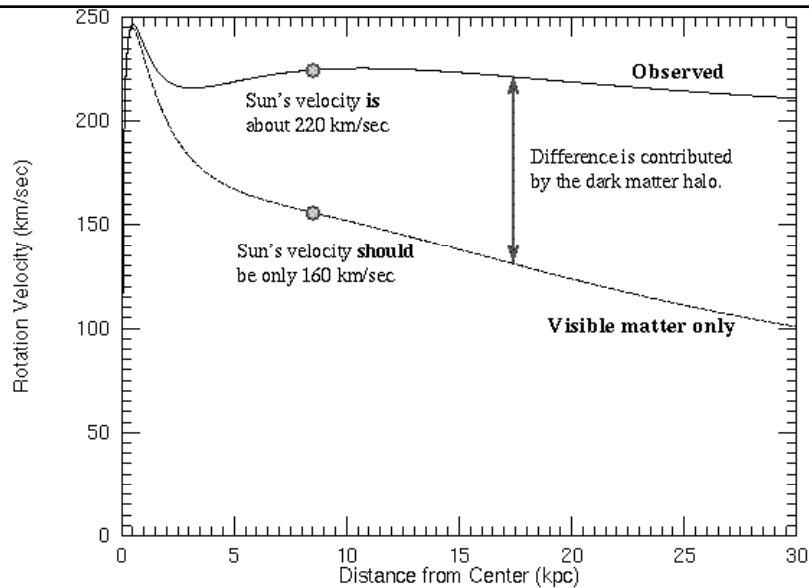


In terms of angular velocity $\Omega(r)$:

$$\Omega(R) = v(R) / R$$

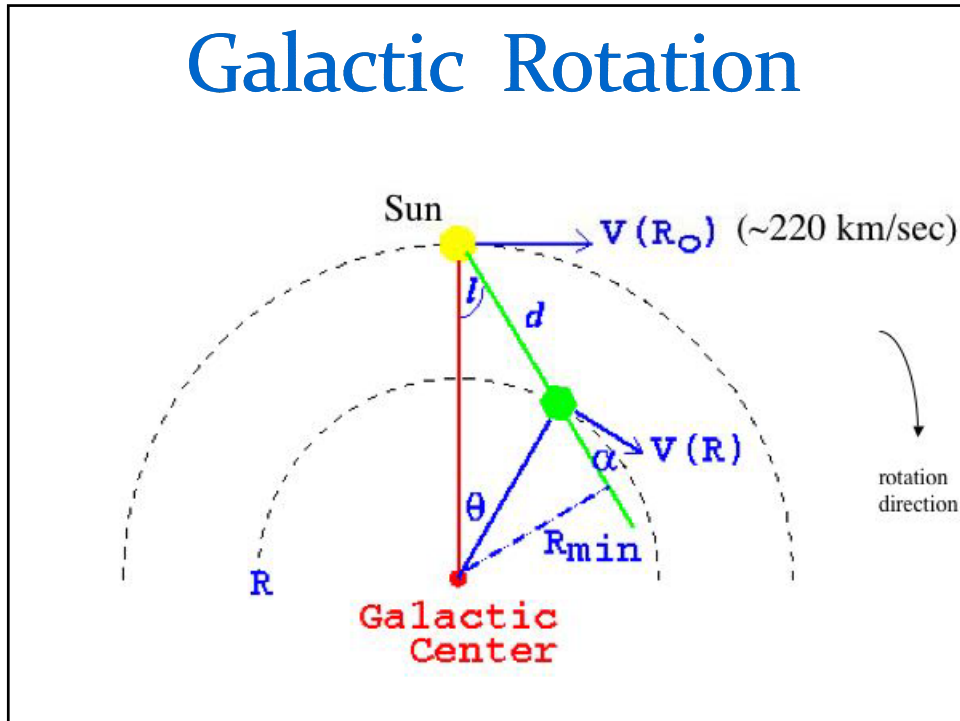
the mass within radius R is:

$$M(R) = \Omega(R)^2 R^3 / G$$



The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve. The discrepancy between the two curves is evidence for a **dark matter halo**.

Galactic Rotation



Radial Velocity Differential Rotation

Circular Rotation

The diagram shows the Sun at radius R_0 with velocity v_0 and a star at radius R with velocity $v(R)$. The angle between the Sun-Galactic Center line and the Sun-star line is l . The angle between the star-Galactic Center line and the star's velocity vector is α . A vector V_R is shown as the difference between the star's velocity and the Sun's velocity.

Trigonometric Relations:

$$\cos \alpha = \sin(90 + \alpha)$$

$$\frac{\sin l}{R} = \frac{\sin(90 + \alpha)}{R_0}$$

Radial velocity equation:

$$v_r(l, R) = v(R) \cos \alpha - v_0 \sin l$$

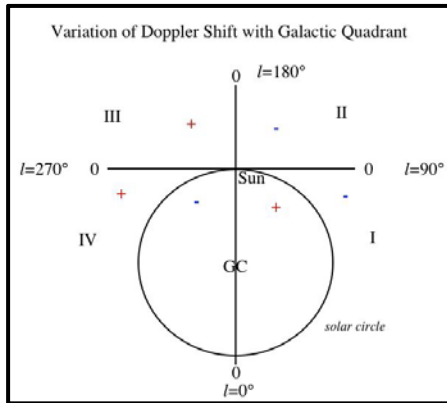
$$v_r(l, R) = v(R) \frac{R_0}{R} \sin l - v_0 \sin l$$

$$= R_0 \sin l \left(\frac{v(R)}{R} - \frac{v_0}{R_0} \right)$$

Final equation:

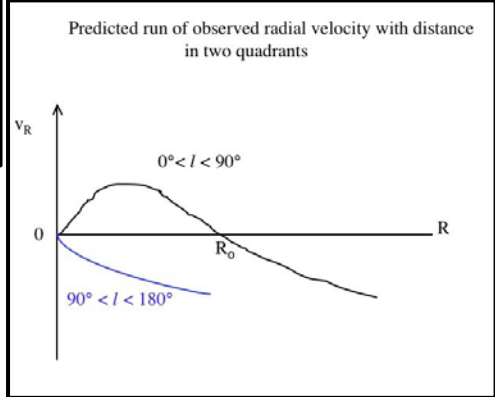
$$v_r(l, R) = R_0 \sin l (\Omega(r) - \Omega_0)$$

Radial Velocity Differential Rotation



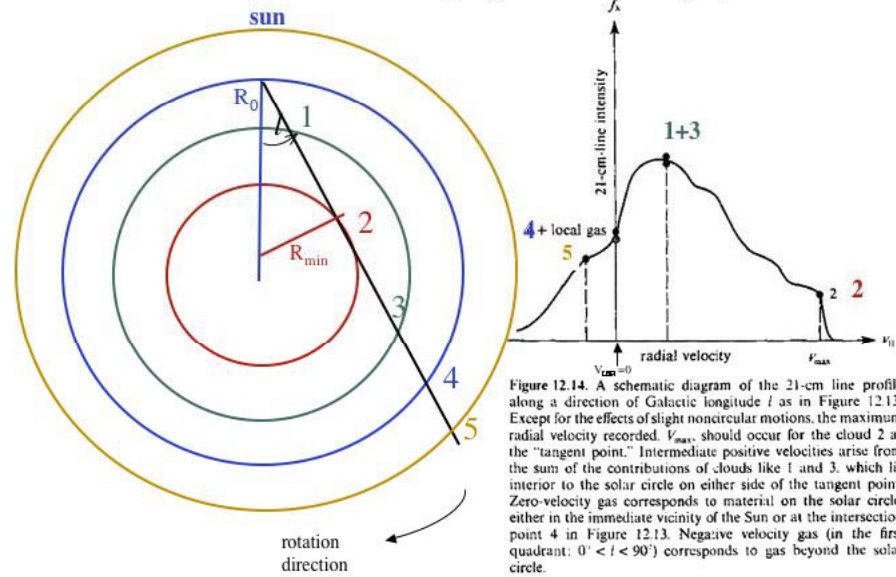
Radial Velocity as function of direction:

$$v_r(l, R) = R_0 \sin l (\Omega(r) - \Omega_0)$$

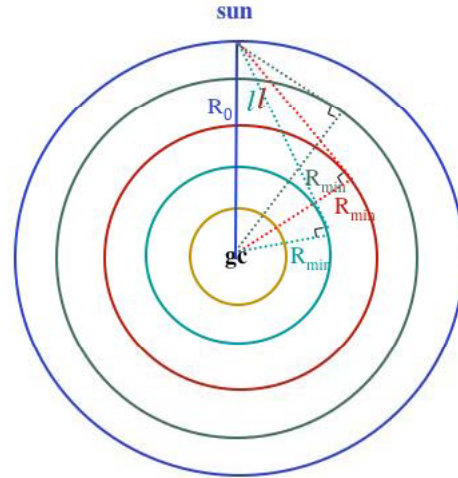


Galactic Rotation

Multiple clouds along a given line of sight, l



Galactic Rotation



$$R_{\min} = R_o \sin l$$

For each l , there is an R_{\min} corresponding to a $V_{R_{\max}}$

Circular Galactic Rotation.
Derivation of Oort's constants: A & B

$\Delta V = V(R_o) - V(R)$
 $\approx \Delta R \times dV/dR$
 $\approx r \cos l \times dV/dR$

$\Delta R = R_o - R = r \cos l$
 $\theta = (r \sin l) / R_o$

$v_{\parallel} = \theta V_o \cos l - \Delta V \sin l$
 $v_{\perp} = -\theta V_o \sin l - \Delta V \cos l$

Fig 1 shows the global situation: a circular rotation velocity field of amplitude $V(R)$ about the GC with the sun at S. Consider a star at galactic longitude l , distance r from the sun: it subtends $\theta = (r \sin l) / R_o$ at the GC, and its velocity also subtends θ w.r.t. the solar velocity. It is closer to the GC by $\Delta R = r \cos l$ and differs in V by $\Delta R dV/dR$.

Fig 2 shows the velocity vectors of the sun and star (red) and their relative velocity (blue), which is what we witness.

Fig 3 zooms into the difference velocity (blue). We want to find its projection parallel (v_{\parallel} ; doppler) and transverse (v_{\perp} ; proper motion) to the line of sight (l.o.s.). To do this, make use of its (green) components parallel and perpendicular to the solar velocity (amplitudes ΔV and θV_o).

Oort's Formulae Differential Rotation

Looking at the imprint of differential rotation in the solar neighbourhood:

permits direct analysis of the characteristics of differential Galactic rotation:

Expressions first derived by Oort, and named in his honour.

Radial velocity components projected onto the line of sight:

$$v_r = \theta V_o \cos l - \Delta V \sin l = \frac{V_o}{R_o} r \sin l \cos l - \frac{dV}{dR} r \sin l \cos l$$

$$= r \sin l \cos l \left(\frac{V_o}{R_o} - \frac{dV}{dR} \right) = A r \sin 2l$$

where $A = \frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{R_o} - \frac{dV}{dR} \right)_{R_o}$ is Oort's first (shear) constant.

Transverse velocity components projected onto the sky (proper motion):

$$v_t = -\theta V_o \sin l - \Delta V \cos l = -\frac{V_o}{R_o} r \sin^2 l - \frac{dV}{dR} r \cos^2 l$$

$$= -\frac{1}{2} \left(\frac{dV}{dR} + \frac{V_o}{R_o} \right) r (\cos^2 l + \sin^2 l) - \frac{1}{2} \left(\frac{dV}{dR} - \frac{V_o}{R_o} \right) r (\cos^2 l - \sin^2 l)$$

$$= -\frac{1}{2} \left(\frac{dV}{dR} + \frac{V_o}{R_o} \right) r + \frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{R_o} - \frac{dV}{dR} \right) r \cos 2l = B r + A r \cos 2l$$

where $B = -\frac{1}{2} \left(\frac{V_o}{R_o} + \frac{dV}{dR} \right)_{R_o}$ is Oort's second (rotation) constant.

Oort's Formulae Differential Rotation

Oort Constant A:

measures the local shear: the degree to which stars slide past each other. Eg. solid body rotation has no shear, $dV/dR=V/R$, so $A=0$. Note that a flat rotation curve does have shear, $dV/dR=0$, with $A=1/2 V/R$.

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{v_0}{R_0} - \frac{dv}{dr} \right)$$

Oort Constant B:

measures the local rotation, or vorticity: it comes from the curl of the velocity field, $B=\nabla \times v$. Eg. solid body is pure rotation, at the angular velocity of the disk, $B=V/R$

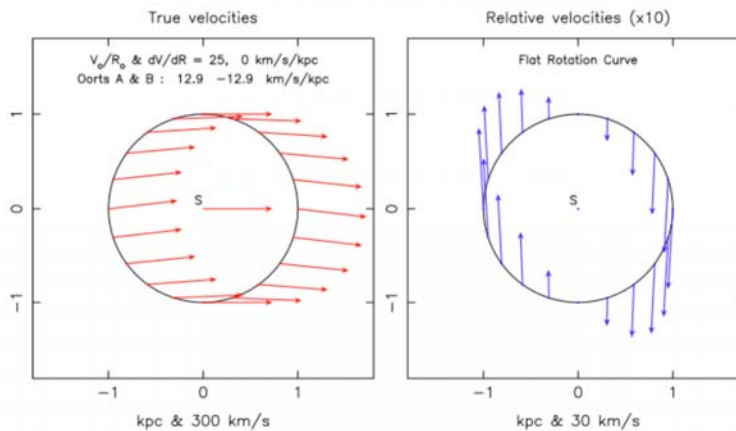
$$B = -\frac{1}{2} \left(\frac{v_0}{R_0} + \frac{dv}{dr} \right)$$

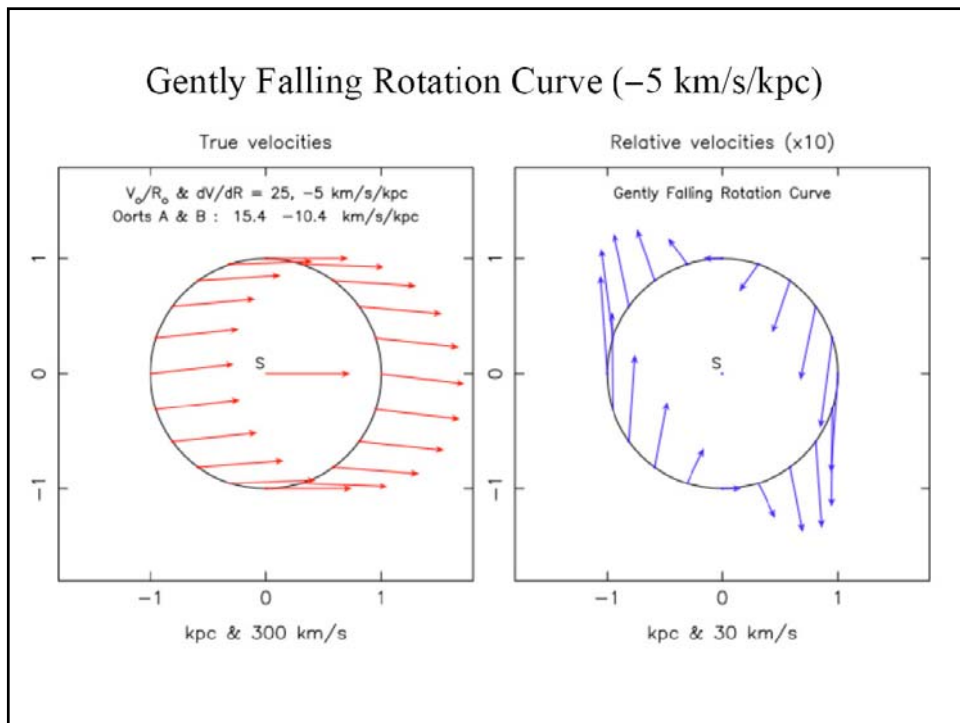
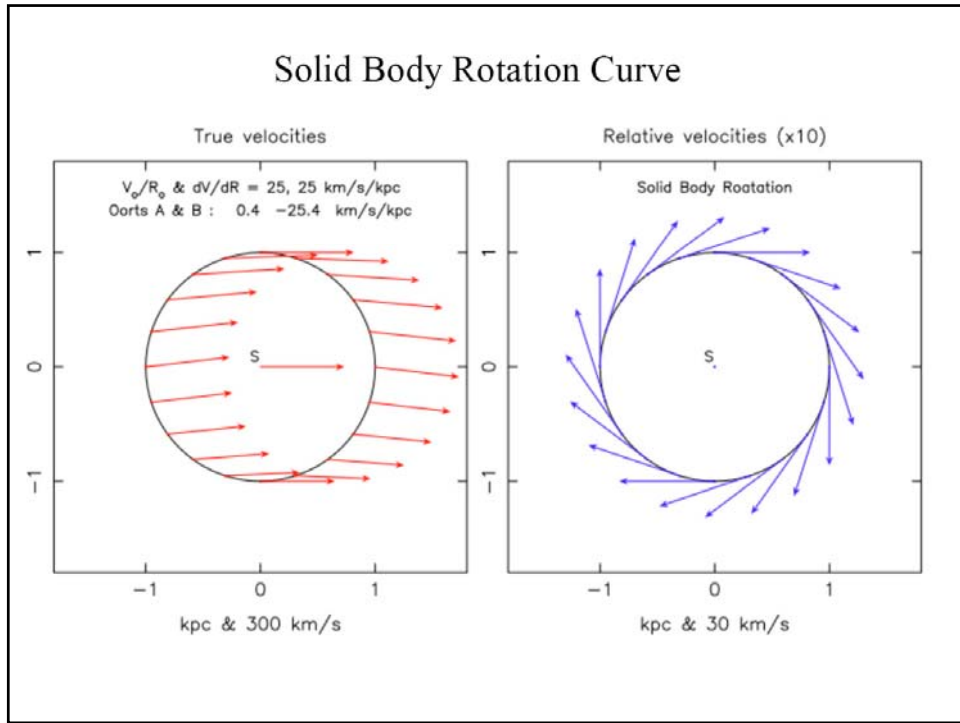
$$A=14.82 \pm 0.84 \text{ km}/(\text{kpc s})$$

$$B=-12.37 \pm 0.64 \text{ km}/(\text{kpc s})$$

Here are some examples of circular disk rotation, with full velocities shown on the left (red vectors), and the differential velocity on the right (blue vectors). Each pair is for a particular rotation curve gradient near the sun (dV/dR). The galactic center is at $y = -8.5$ kpc, and $V_{\text{sun}} = 220$ km/s. The circle is 1 kpc in radius.

Flat Rotation Curve





Galactisch Gas en Stof

Interstellair Gas Toestanden

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

Interstellair Gas & Stof

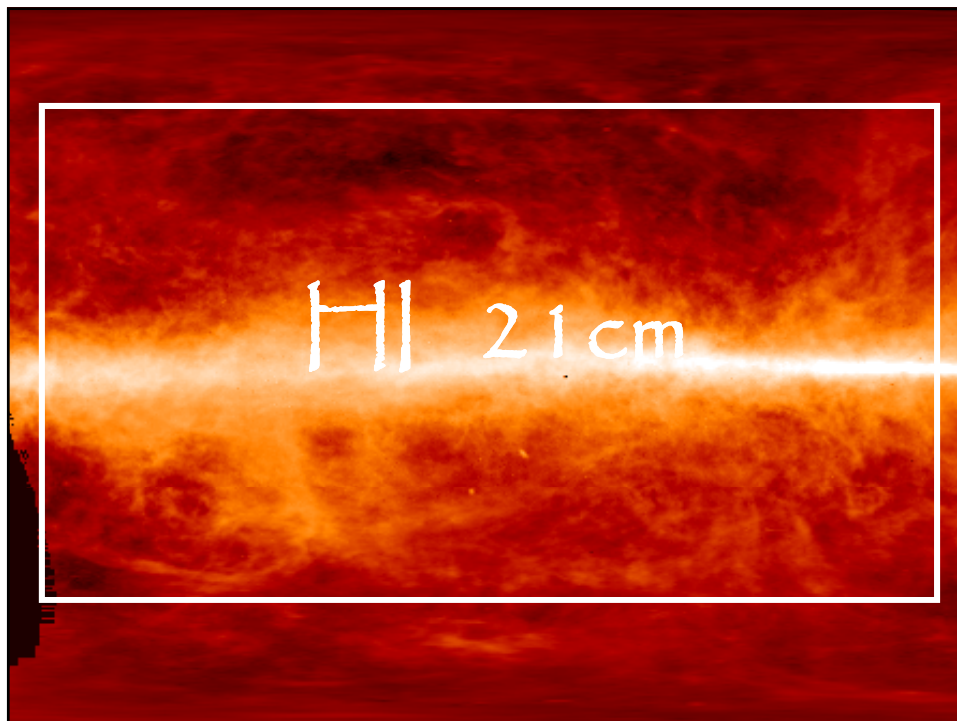
- Een van de belangrijkste elementen van de Melkweg betreft **Gas en Stof**: het **Interstellaire Medium (ISM)**
- Hoewel de sterren in de Melkweg relatief ver van elkaar aflaggen, en de ruimte zeer leeg is, bevat de ruimte tussen de sterren een zeer diffuus medium van en en stof. Dit medium bestaat uit
 - 1) **neutral waterstofgas (HI)**
 - 2) **moleculair gas**
(hoofdzakelijk H_2 , met daarbij sporadisch een verrassend grote variëteit aan vaak complexe moleculen)
 - 3) **geïoniseerd gas**
 - 4) **stofdeeltjes**
(beter ware de naam "rookdeeltjes", daar ze kleiner zijn dan die in rook)
- Daarnaast vinden we in de interstellaire ruimte ook nog
 - 5) **magnetische velden**
 - 6) **kosmische straling**
(hoog-energetische deeltjes)

Interstellair Gas & Stof

- Hoewel het Interstellaire Medium een beter vacuum is dan fysici in het laboratorium kunnen creëren (vele orden van grootte beter), vertegenwoordigt het gas en stof toch een aanzienlijk aandeel van de totale (baryonische) massa in de Melkweg:
- Het neemt een totale massa van $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.
- zo'n 5% van de massa die we in de Melkweg aantreffen in de vorm van zichtbare sterren.
-
- Het overwegende belang van het galactische gas en stof reikt echter aanzienlijk verder dan alleen het aandeel aan de massabalans van de Melkweg:
- Het is een **essentieel** onderdeel van de **dynamische levenscyclus** van onze Melkweg (en van andere sterrenstelsels):
de **Ster-Gas-Ster** cyclus
(zie verder)

Neutraal Waterstof (HI) Gas

- Het merendeel van het gas betreft neutraal waterstofgas.
 - Dit concentreert zich in een dunne laag in de schijf van de Melkweg, met name in de spiraalarmen.
 - We verkeren in de gelukkige omstandigheid dat het HI gas zeer goed is waar te nemen op radiogolflengten. Dit is van cruciale betekenis, daar we op deze golflengten niet worden gehinderd door stof, de Melkweg is transparant op radiofrequenties !
 - Door de hyperfijn (spin)overgang van het waterstofatoom straalt het een karakteristieke straling uit op een golflengte van **21 cm (1420 MHz)**. Op instigatie van J.H. Oort beweest H. van de Hulst in 1944 dat deze overgang ook inderdaad waarneembaar moet zijn. Dit is een van de belangrijkste bijdragen geweest aan de sterrenkunde van de 20e eeuw:
 - Hierdoor werd het mogelijk om de Melkweg in kaart te brengen, niet alleen lokaal, maar over zijn gehele schijf. Met name Nederland heeft een ZEER vooraanstaande rol gespeeld op dit gebied. De 25 m radiotelescoop in Dwingeloo heeft vanaf 1956 nauwgezet de Melkweg in het radiogebied in kaart gebracht.
-
- Echter, niet alleen het diffuse glad verdeelde neutrale waterstofgas is van belang. Een gedeelte van het gas koelt af en vormt compactere en dichtere wolken, die als het ware condenseren in het overig gladde medium.



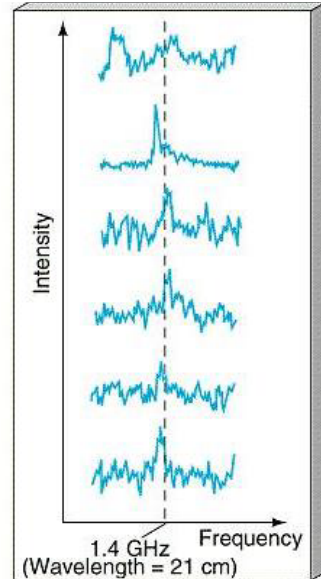
HI 21cm lijn

- Neutraal waterstof (HI) is veruit het meest voorkomende atoom in het Heelal
- Neutraal waterstof bevindt zich in aanzienlijke hoeveelheden in de schijven van spiraalstelsels zoals onze Melkweg
- De Melkweg is gevuld met een zeer diffuse verdeling van neutraal waterstofgas, met een typische dichtheid van ongeveer

$$n_{\text{HI}} = 1 \text{ atoom/cm}^3 = 10^{-24} \text{ g/cm}^3$$
- en een typische temperatuur van

$$T_{\text{HI}} = 100 \text{ K}$$
- Dit interstellaire neutrale waterstofgas is veel te koel om de UV of optische overgangen van het waterstofatoom aan te slaan.
- Er is een atomaire overgang op de radiogolflengten van 21 cm die onder interstellaire omstandigheden wel herhaaldelijk optreedt. Hierdoor wordt HI zichtbaar in het radio golflengtegebied !
- De betreffende overgang van neutrale waterstofatomen op een golflengte en frequentie van

$$\lambda = 21.1 \text{ cm}; \quad \nu = 1420.406 \text{ MHz}$$



HI 21cm hyperfine transition

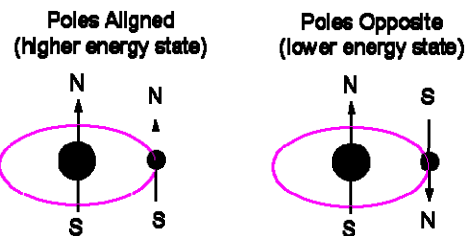
Het grondniveau $n=1$ van HI, waarin zich bij een $T=100 \text{ K}$ vrijwel alle atomen zich bevinden, gesplitst in twee niveaus, energetisch zeer dicht bij elkaar.

Deze hyperfijne niveaoverschillen zijn terug te voeren op het **magnetische moment** van het **proton** en het **electron** in het waterstofatoom:

Het magnetische moment is een gevolg van de **intrinsieke spin** van zowel het proton als het electron.

Ieder bewegende lading geeft aanleiding tot een magnetisch veld. Doordat het proton en het electron **lading** hebben genereert hun spinbeweging een **dipolair magnetisch veld: magnetisch moment**.

Het magnetische moment van een spinnend deeltje wordt gerepresenteerd door een vector, wiens richting en amplitude bepaald worden door het vector impulsmoment van het deeltje.



A 21-cm photon is emitted when poles go from being aligned to opposite (a spin flip).

In de grondtoestand van het waterstofatoom kunnen er bijgevolg 2 configuraties bestaan (zie figuur boven):

- 1) magnetisch moment van het electron en het proton parallel.
- 2) magnetisch moment tegenovergestelde, anti-parallel, richting.

Net zoals twee parallelle staafmagneten elkaar afstoten, zo zullen de parallel gerichte electronen en protonen minder aan elkaar zijn gebonden en dus een iets hogere energietoestand van het waterstofatoom vertegenwoordigen.

Daartegenover zal de antiparallel gerichte toestand een lagere magnetische energie vertegenwoordigen, zodat het electron en proton dan in een iets hechter gebonden onderlinge baan hebben.

HI 21cm hyperfine transition

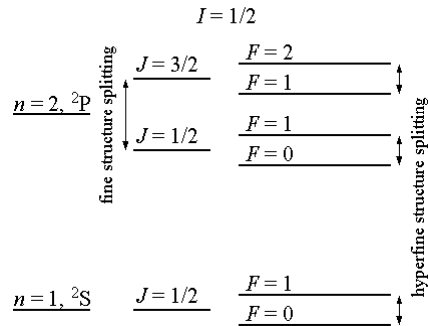
Het grondniveau $n=1$ van HI, waarin zich bij een $T=100$ K vrijwel alle atomen zich bevinden, gesplitst in twee niveaus, energetisch zeer dicht bij elkaar.

Deze hyperfijne niveauverschillen zijn terug te voeren **magnetische moment** van het **proton** en het **electron** in het waterstofatoom:

Het magnetische moment is een gevolg van de **intrinsieke spin** van zowel het proton als het electron.

Ieder bewegende lading geeft aanleiding tot een magnetisch veld. Doordat het proton en het electron **lading** hebben genereert hun spinbeweging een **dipolair magnetisch veld: magnetisch moment**.

Het magnetische moment van een spinnend deeltje wordt gerepresenteerd door een vector, wiens richting en amplitude bepaald worden door het vector impulsmoment van het deeltje.



Door het energieverschil van de twee configuraties is dus de grondtoestand van het atoom gesplitst in twee dichtbij elkaar gelegen niveaus,

de **hyperfijn splitsing**.

Het energieverschil correspondeert met een golflengte van 21.1 cm, een frequentie van 1420.406 MHz.

HI 21cm hyperfine transition

Een **spontane** overgang van de hogere hyperfijn toestand naar de lagere toestand,

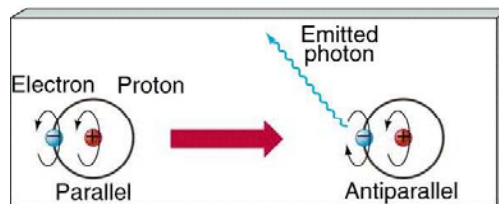
- **spin-flip** van de hogere parallel toestand naar anti-parallel toestand
- uitzending van een foton met frequentie $\nu = 1420.406$ MHz.

Overgang een sterk verboden (quantum) overgang:

- spontane overgang zeer zeldzaam, eenmaal in de **30 miljoen jaar** !

Interstellaire ruimte, voornaamste oorzaak van aanslaan waterstofatoom:

- botsingen met andere waterstofatomen.
- uitwisselen electron & mogelijke verandering hyperfijn toestand.
- als nieuwe electron andere spinorientatie als oude: verandering niveau
- dus bij botsing: **geen verandering, excitatie of de-excitatie**
- netto, verandering van richting eens in de **400 jaar** !
- uiteindelijk een **evenwicht** van parallel-antiparallel van **3:1**.



Door de enorme afstanden in de interstellaire ruimte, ~ kiloparsec, ondanks uitzonderlijk lage dichtheden

toch genoeg overgangen langs een gezichtslijn zien om een detecteerbare 21cm spectraallijn met een radiotelescoop te kunnen waarnemen (zie bovenste afbeelding).

HI 21cm hyperfine transition

Interstellaire ruimte:
enorme afstanden – kiloparsec
uitzonderlijk lage dichtheden

Toch genoeg overgangen langs een gezichtslijn:
detecteerbare 21cm spectraallijn
Met een radiotelescoop waar te nemen!

Plotseling werd het meest voorkomende atoom in de kosmos
zichtbaar gemaakt.

Uiterst belangrijke voorspelling:

1944: H. van der Hulst gedaan
(op instigatie van zijn promotor, J.H.Oort).

Daadwerkelijke detectie van de HI 21cm lijn: 1951

- Muller en Oort:
 - Duitse radarschotel uit Kootwijk met aangepaste ontvanger
 - 21cm lijn emissie
 - door pech (brand), enkele maanden na
- Ewen & Purcell

▪ Amerikaanse en Nederlandse resultaten gepubliceerd in
dezelfde aflevering van Nature:

Ewen & Purcell, 1951, Nature, 168, 356
Muller & Oort, 1951, Nature, 168, 357

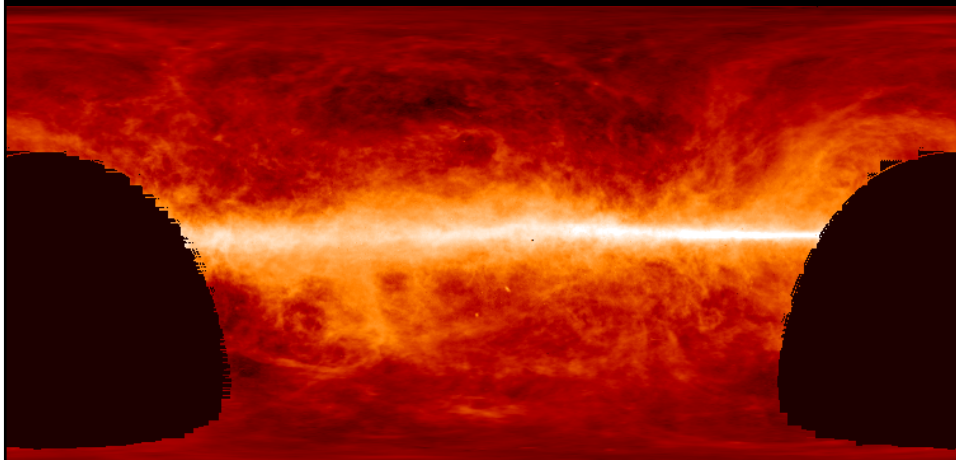


Omdat Melkweg transparant op radio golflengten:
doorbraak in het onderzoek naar de structuur en
kinematica van de Melkweg.

Mogelijk om de verdeling en bewegingen van
neutraal waterstof te onderzoeken door de gehele
schijf van de Melkweg heen.

Atlas Galactic Neutral Hydrogen

(D. Hartmann 1997)

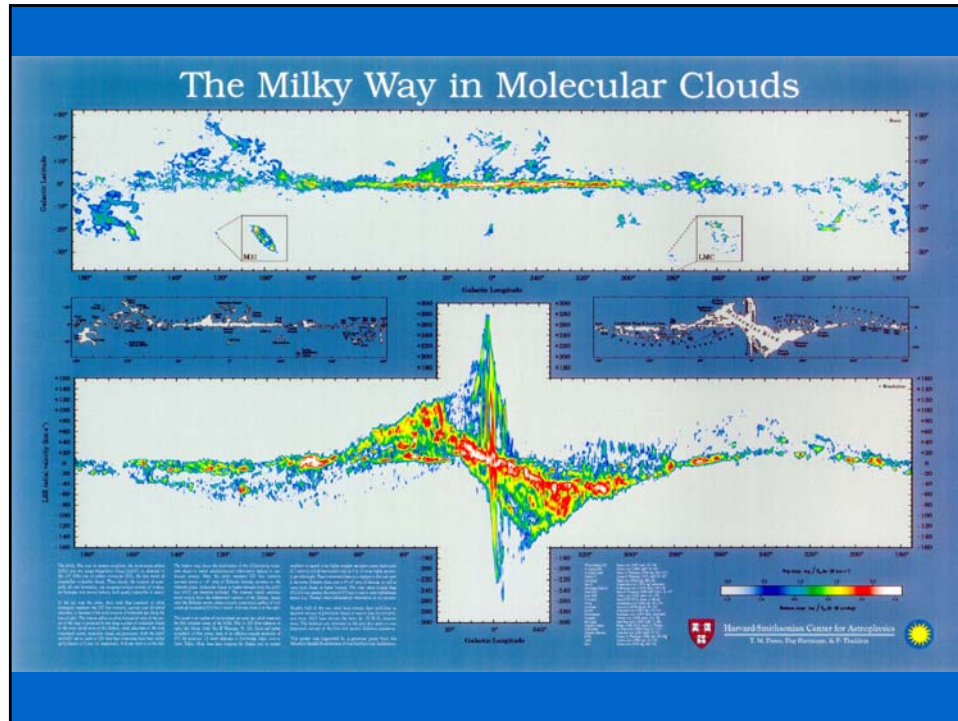


Moleculair Gas

- Moleculaire wolken bestaan hoofdzakelijk uit moleculair waterstof, H_2 .
- Het is zeer lastig om dit molecuul waar te nemen:
Omdat het geen **dipoolmoment** heeft (het is immers een perfect symmetrisch molecuul), heeft het geen waarneembare rotatie-overgangen. Het zijn juist deze overgangen die gemakkelijk zijn aan te slaan en waar te nemen in het radiogebied.
- Er bestaat een alternatieve manier om het moleculaire gas in de Melkweg in kaart te brengen:
- het meest abundante interstellaire molecuul na H_2 is CO,
 - weliswaar slechts 2×10^{-5} maal de dichtheid aan H_2 moleculen
 - heeft wel een dipool:
 - met name de $J=1-0$ overgang in het radiogebied bij 115 GHz (2.6 mm) is goed waar te nemen.
- Het lijkt het qua verdeling goed die van moleculair waterstof te volgen. Men gebruikt CO daarom als "**tracer**" molecuul om het moleculaire gas in de Melkweg in kaart te brengen

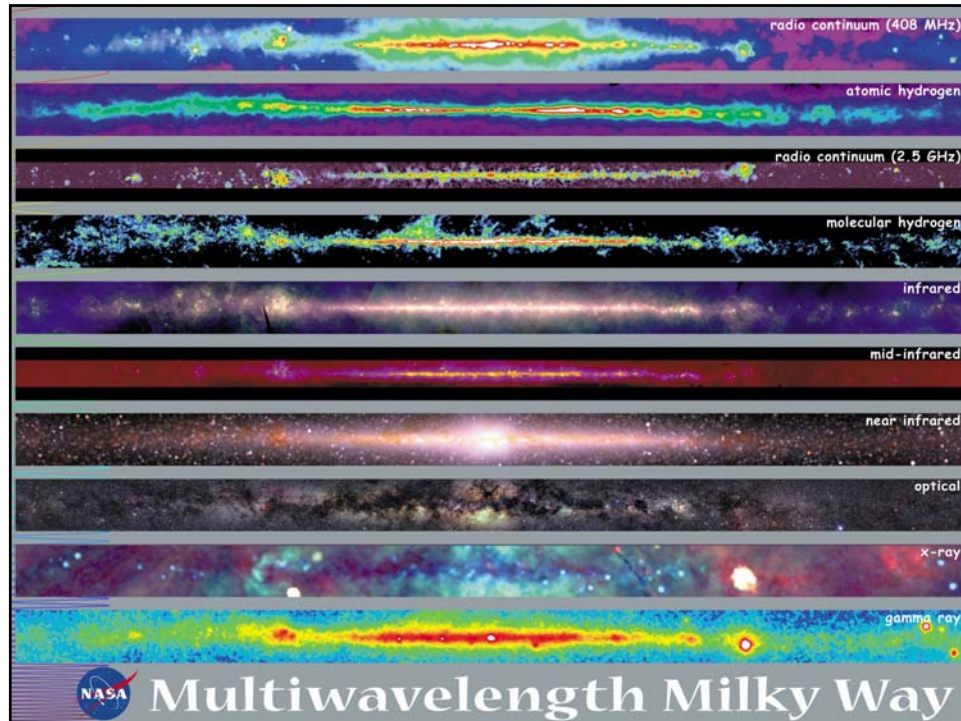
Moleculair Gas

- Het blijkt dat er een redelijk aantal wolken in de Zonsomgeving van de schijf is te vinden. Het merendeel bevindt zich echter veel meer in de binnendelen van de Melkweg.
- Het moleculaire gas vertoont een enorme concentratie nabij
 - 1) het centrum van de Melkweg
 - 2) een ring van moleculaire wolken tussen 3-7 kpc.
- Als men dit vergelijkt met de verdeling van met name HII gebieden valt de sterke correlatie tussen de moleculaire wolk verdeling en de HII gebieden verdeling op.
- Atomair waterstof daarentegen neemt meer toe naar de buitengebieden van de Melkweg. Terwijl zo'n 90% van het moleculair waterstof in de binnendelen van de Melkweg is te vinden, bevindt zich zo'n 70% van het atomaire waterstof zich buiten de zons afstand, tot op vaak zeer grote afstanden
- Het merendeel van het moleculair gas blijkt zich te bevinden in zogenaamde **Giant Molecular Clouds (GMCs)**, die een massa hebben in de orde van 10^5 - $10^6 M_{\odot}$. Hun afmetingen kunnen enkele malen kleiner zijn dan die van de Orion moleculaire wolk tot zo'n vijfmaal groter. Een typische afmeting is in de orde van 40 parsec. Hun vorm is vaak zeer onregelmatig, en waarschijnlijk georiënteerd langs het vlak van de Melkweg.



Multiwavelength Galaxy

- Door het in kaart brengen van de Melkweg op een groot aantal verschillende golflengten van het elektromagnetisch spectrum krijgen we een idee van de verdeling van verschillende fysische gas en stellaire componenten waaruit de Melkweg is opgebouwd.
- Uit de vergelijking tussen de verschillende kaarten kunnen we belangrijke conclusies trekken over de evolutie en levenscyclus van onze Melkweg.
- Deze enorme verbreding van verkenning van het elektromagnetische spectrum is in de afgelopen decaden mogelijk geworden door de verscheidenheid aan instrumenten op Aarde en in de ruimte.
- De bijgaande kaart betreft een compositie van kaarten van de hemel nabij het Galactische Vlak in 10 verschillende golflengtegebieden. Het betreft golflengten van spectraallijnen en continuumbanden over een frequentiebereik van 14 orden van magnituden.
- Iedere afbeelding representeert een 360° "false color" gezicht van de Melkweg in een band van 10° rond het vlak. De horizontale as betreft de Galactische lengte l, met in het midden van iedere kaart het Centrum van de Melkweg. Ter vergelijking van de schaal, de verticale dimensie van iedere kaart is 40x de hoekafmeting van de Volle Maan ! (met dank aan de Space Science Data Operations Office, NASA Goddard Space Flight Center, S. Digel, J. Friedlander)



Multiwavelength Galaxy

1) Radiocontinuum (408 MHz)

Intensiteit van radio continuum emissie door hoog energetische geladen deeltjes in de Melkweg. Op de frequentie is de emissie hoofdzakelijk toe te schrijven aan electronen die met relativistische snelheden door het interstellair magnetisch veld bewegen. Schokgolven van supernova explosies versnellen electronen tot deze hoge snelheden, wat onder andere te merken is aan het feit dat de intensiteit van deze straling vooral intens is in de nabijheid van de SNRs. Merk bv. op de gigantische emissie bij μo° , die afkomstig is van de helderste extrasolaire radiobron, Cas A.

2) Atomaire waterstof (HI)

De 21 cm emissie laat de verdeling van het "koude en warme" interstellair medium zien, die op grote schaal is georganiseerd in diffuse wolken van gas en stof die een afmeting kunnen hebben van enkele honderden parsecs. Het merendeel van bovenstaande HI kaart is gebaseerd op de Leiden-Dwingeloo Survey of Galactic Neutral Hydrogen, uitgevoerd m.b.v. de 25 m Dwingeloo radiotelescoop (oa. D. Hartmann, W.B. Burton, zie proefschrift Dap Hartmann).

3) Radio continuum (2.4-2.7 GHz)

Heet geïoniseerd gas

4) Moleculaire waterstof (CO kaart)

5) Infrarood

Thermische emissie van verhit stof

Multiwavelength Galaxy

6) Mid-Infrarood (6.8-10.8 micron)

Emissie afkomstig van complexe moleculen (PAHs), vooral voorkomend in kool en interstellaire gaswolken. Heldere plekken afkomstig van rode reuzensterren, planetaire nevels, en massieve sterren die zo jong zijn dat ze diep ingebed liggen in de moleculaire gaswolken waarin ze zijn gevormd. (kaart alleen tot op 5° van het Galactische vlak.

7) Nabij Infrarood

Merendeel van de emissie afkomstig van relatief koude K sterren in de schijf en bulge van de Melkweg. Het interstellaire stof verduistert slechts zeer gering op deze golflengten, zodat de kaart een verdeling laat zien die door de gehele Melkweg heen gaat. Alleen nabij het centrum van de Melkweg kun je absorptie zien op 1.25 micron.

8) Optisch

9) Roentgen (X-ray) Emissie

Uitgebreide zachte roentgenemissie is afkomstig van heet, geschokt gas. Vooral bij lagere energieën is er sterke absorptie van de X-ray straling door het ISM. Koude wolken van interstellair gas zijn daardoor zichtbaar als schaduwen tegen de achtergrond van X-ray emissie.

10) Gamma-straling

Verdeling van fotonen zien met een energie hoger dan 300 MeV. Op deze extreme energieën is het merendeel van de gammastraling afkomstig van botsingen van de energetische kosmische stralings deeltjes met waterstofkernen in interstellaire wolken.

Galactische

Rook (Stof)



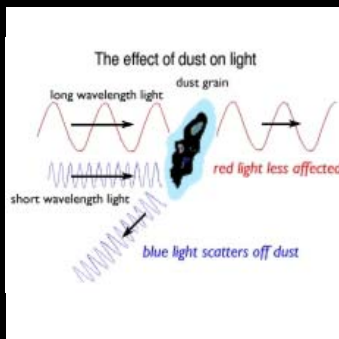
Galactisch Stof

Galactisch Stof

- Interstellair stof is qua massa slechts een miniem onderdeel van het interstellair medium.
 - Het bevat slechts 1% van de totale gas- en stofmassa.
 - de dichtheid bedraagt niet meer dan **1 stofdeeltje/10⁶ m³**.
- Een gegeven massa aan stof is echter veel belangrijker qua extinctie dan een zelfde hoeveelheid gas.

- Er zijn 3 belangrijke fysische effecten van interstellair stof:
 - Extinctie
 - Verroding
 - Polarisatie

- Naast het verzwakken en verroden van licht, wordt het licht door stofnevels ook gereflecteerd in onze richting. We zien dit voornamelijk bij stofnevels rond jonge sterren. Merk op dat tengevolge van de eigenschappen van scattering deze nevels altijd blauw zijn !





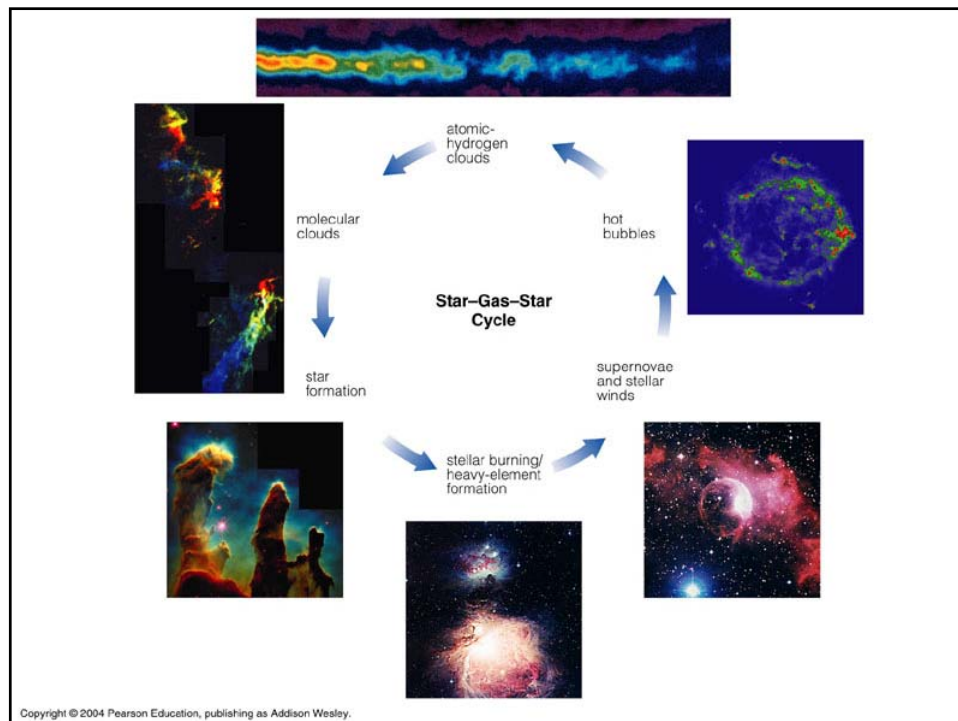
Galactische
Ecocyclus

Galactische Ecocyclus

- Galactisch Gas en Stof vormen een essentieel onderdeel van de **Dynamische Levenscyclus** van onze Melkweg.
- We kunnen pas de vorming en evolutie van melkwegstelsels begrijpen als we het dynamische en complex systeem van de **Ster-Gas-Ster** cyclus hebben doorgrond.
- Passend vergelijking:
Melkweg=doos van sterren wiens ecologie wordt bepaald door de cyclus van leven en dood van sterren en wiens structuur wordt bepaald door de zwaartekracht en rotatie van de galactische schijf.

- Sterren worden gevormd.
- Ze leven vervolgens op de nucleaire verbranding in hun kernen.
- Door de nucleaire fusie reacties worden gestaag zwaardere atoomkernen gevormd.
- Aan het einde van hun leven exploderen de zwaarste sterren, de lichtere sterren blazen een groot gedeelte van hun buitenlagen naar buiten.
- De verrijkte verbrandings producten worden aldoende het interstellair medium in geworpen.

Dit zijn continu doorgaande processen gedurende de geschiedenis van onze Melkweg. Generaties van sterren recyclen dezelfde galactische materie door hun kernen, waardoor de algemene abundantie van zwaardere elementen gestaag toeneemt.



Galactische Ecocyclus

- **Fase 1: Nucleosynthese**

Op het ogenblik maken de atomen van elementen zwaarder dan helium, meestal als **zwaardere elementen** of **metalen** aangeduid, zo'n ~2% van de baryonische massa in de Melkweg uit.

De samenstelling is, in massa, **70% waterstof**, **28% helium** en **2% zware elementen**.

Dit proces van continue toevoeging aan de abundantie van zware elementen wordt **chemische verrijking** genoemd, en is een onontkoombaar bijproduct van de continue vorming van sterren. Deze synthese van elementen is echter slechts een aspect van de Galactische ecocyclus.

- **Fase 2: Verrijking ISM**

De nieuw gevormde atoomkernen worden de ruimte in geslingerd verwerkt in de nieuwe generatie sterren.

Dit is niet geheel triviaal. Als een ster explodeert als supernova vliegt de geëjecteerde materie naar buiten met snelheden van meer dan enkele duizenden km/s. Dit is aanzienlijk hoger dan de ontsnappingssnelheid van de Melkweg zodat de nieuw gevormde zware elementen direct de Melkweg uit zouden vliegen, de intergalactische ruimte in. Dit wordt voorkomen doordat het weggeslingerde gas meestal botst met het interstellair medium, waardoor het afremt en uiteindelijk tot stilstand komt.

We nemen dit dan waar in de vorm van **Supernovaresten** (zie Krabnevel hierboven). Een rustiger en additionele pad van verrijking vindt men in de winden en laatste zucht van lichtere sterren, die hun leven eindigen met het uitblazen van hun buitenlagen, spectaculair zichtbaar als **Planetaire Nevel**.

Galactische Ecocyclus

- **Fase 3: Koeling ISM**

Opeenvolgende supernovae **mengen** en verhitten daardoor het interstellair medium, en verrijken het met de nieuwe zware elementen.

Deze elementen mengen met het oudere, chemisch minder verrijkte waterstofgas in de omgeving.

Voordat uit dit gas nieuwe sterren kunnen worden gevormd moet het **koelen** en **wolken vormen**. Het hete gas koelt eerst in wolken van **atomaire waterstof**, het **HI gas** dat we door vrijwel de gehele schijf van de Melkweg aantreffen en dat we via de typische HI 21 cm lijnstraling kunnen waarnemen.

Vervolgens koelt het verder in wolken van **moleculair waterstof**. Het koelingsproces van het interstellair gas in wolken van moleculair waterstof neemt miljoenen jaren in beslag.

- **Fase 4: Stervorming**

In de afgekoelde **moleculaire wolken** kan de zwaartekracht uiteindelijk winnen, waardoor nieuwe sterren gevormd worden die verrijkt zijn met zwaardere elementen.

De intense ultraviolet straling van de helderste jonge (O en B) sterren ioniseren het waterstofgas in hun directe omgeving, welke dan als de vaak prachtige **HII gebieden** aan de randen van de grote moleculaire wolkcomplexen worden waargenomen (zie bv. Orionnevel).



Botsing Melkweg – Andromeda ?

The **Andromeda-Milky Way collision** is a predicted galaxy collision that could possibly take place in approximately 3 billion years' time between the two largest galaxies in the Local Group.

There is, as yet, no way to know whether the possible collision is definitely going to happen or not.

The radial velocity of the Andromeda galaxy with respect to the Milky Way can be measured by examining the Doppler shift of spectral lines from stars in the galaxy, but the transverse velocity cannot be directly measured. Thus, while it is known that the Andromeda galaxy is getting closer to the Milky Way by about 120 km/s, there is no way to tell whether it is going to collide or miss.





Simulation
M31-Milky Way collision,
J. Dubinski