

STERREN EN MELKWEGSTELSELS

5. Structuur en dynamica van ons Melkwegstelsel

Piet van der Kruit
Kapteyn Astronomical Institute
University of Groningen
the Netherlands

Voorjaar 2007

Outline

Geschiedenis

Sterpopulaties

Rotatie en massaverdeling

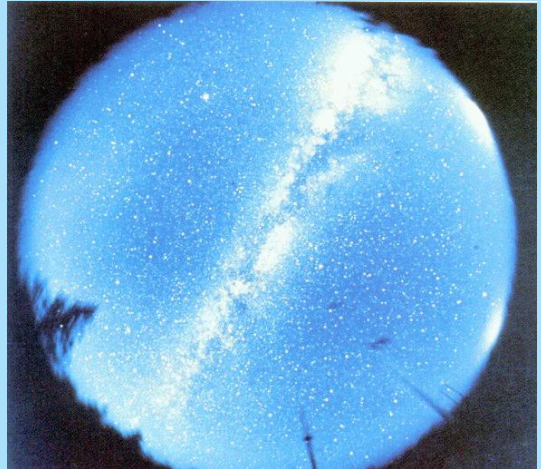
Differentiële rotatie

Massaverdeling

Vorming van het Melkwegstelsel

Geschiedenis

Ons **Melkwegstelsel** ontleent zijn naam aan de **Melkweg**, die als een lichtende band aan de hemel gezien kan worden.



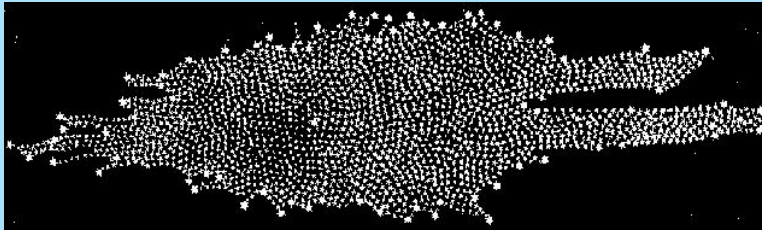
De oudste pogingen om het **Melkwegstelsel** (of ook wel **Sidereal System**, eigenlijk zover toen bekend het heelal als geheel) in kaart te brengen zijn uit stertellingen.

William Herschel (1738 – 1822) telde sterren en nam aan, dat

- (1) ze allemaal intrinsiek even helder waren en
- (2) hij keek tot de rand van het sterrenstelsel.

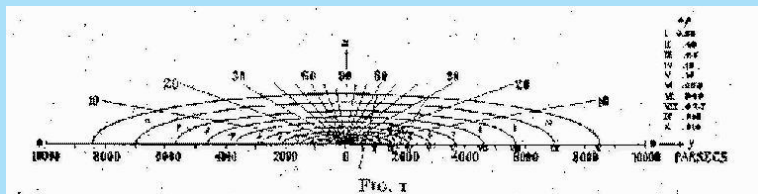
De afstand tot de rand van het stelsel gaat dan met de wortel uit het aantal sterren per vierkante graad.

Uit tellingen met zijn telescoop ("star gauges") vond hij toen deze dwarsdoorsnede van de Melkweg.



Het blijkt, dat Herschel sterren telde tot ongeveer magnitude 14.5.

Jacobus Kapteyn (1851 – 1922) deed dit beter door ook de **helderheids-functie** te bepalen, d.w.z. de frequentie van sterren als functie van hun absolute magnitude.

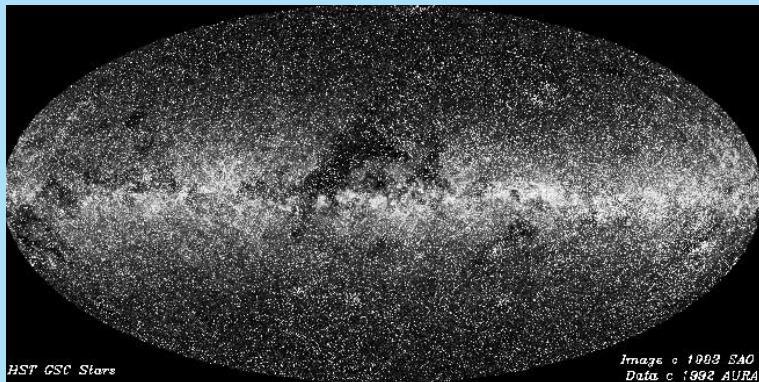


De zon bevindt zich bijna in het centrum van het stelsel. Dit was verdacht.

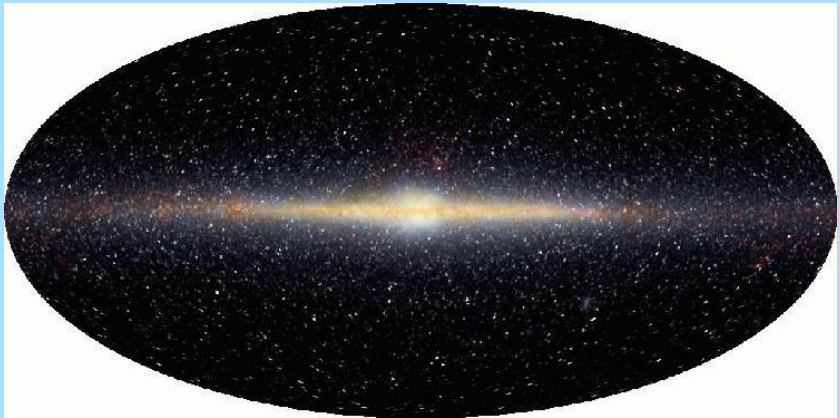
Kapteyn vermoedde **interstellaire absorptie** en voorspelde ook, dat het **verroding** zou geven, maar hij vond geen aanwijzingen.

Onder Kapteyn's leiding startte een project van **Selected Areas** over de gehele hemel om systematisch sterstellingen te doen.

Onderstaande plaatje geeft alle sterren uit de **Guide Star Catalogue** van de **Hubble Space Telescope** tot ongeveer magnitude **16**.

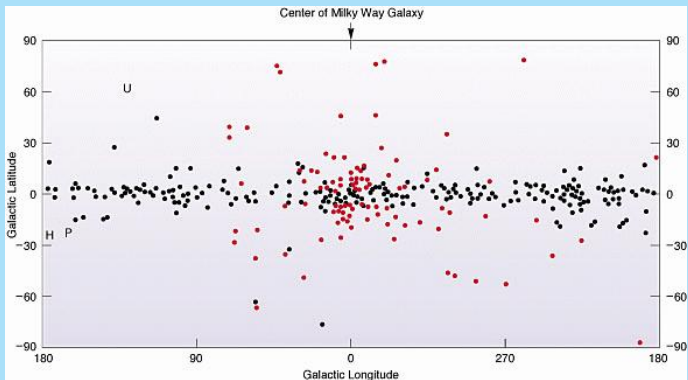


Met de satelliet **Cosmic Background Explorer (COBE)** ziet de Melkweg er in het infrarood als volgt uit.



Sterpopulaties

Als we kijken naar de verdeling van sterrenhopen zien we, dat er twee verschillende soorten zijn, **open hopen** en **bolhopen**.
In de eerste plaats valt op de verdeling aan de hemel (**bolhopen rood**, open hopen zwart).



De coördinaten zijn **Galactische lengte** (langs de Melkweg) en **breedte** (loodrecht op de Melkweg). De richting naar het centrum heeft **lengte** nul.

De **open hopen** zien we langs de Melkweg; ze bevinden zich in de **schijf**.

De **bolhopen** bevinden zich in een meer bol-vormig volume rond het **Galactisch centrum**; dit is de **halo**.

In 1944 voerde **Walter Baade** het concept van **Sterpopulaties** in.

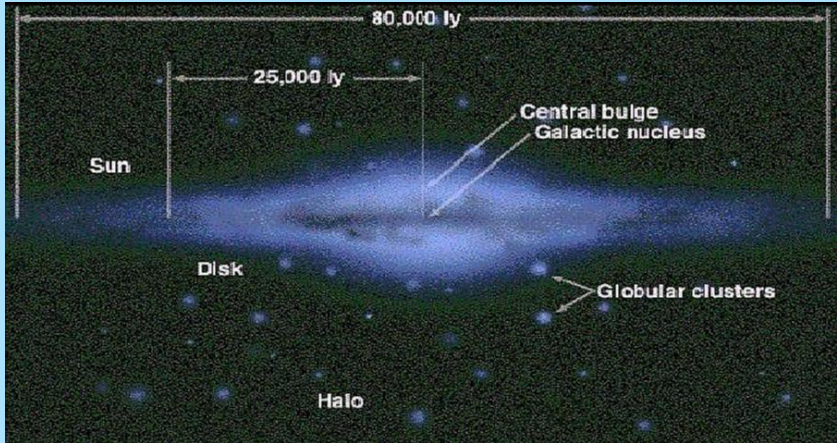
Dit was met name gebaseerd op HR-diagrammen van clusters en een vergelijking met de helderste sterren in de **Andromeda nevel** (het dichtstbijzijnde stelsel als de het Melkwegstelsel).

| | Populatie II Halo | Populatie I Schijf |
|--------------|-------------------------|----------------------------|
| Ruimtelijk | weinig afgeplat | sterk afgeplat |
| Concentratie | sterk | matig |
| Rotatie | weinig | snel |
| Bewegingen | hoog | klein |
| Sterrenhopen | bolvormig | open |
| Leeftijd | $\approx 10^{10}$ jaar | 0 – $\approx 10^{10}$ jaar |
| Associaties | niet | wel |
| I.S.M. | niet | wel |
| Supernovae | Type Ib | Type II, Ia |
| Abondantie | 10^{-3} tot 10^{-1} | 1/3 tot 3 |

Met **concentratie** wordt ruimtelijke concentratie naar het Galactisch centrum bedoeld.

Supernovae komen voor in twee typen. **Type II en Ia** is een ontploffende zware ster, **type Ib** is een ontploffende ster in een dubbelster na overdracht van materie van de grote naar de kleinere component.

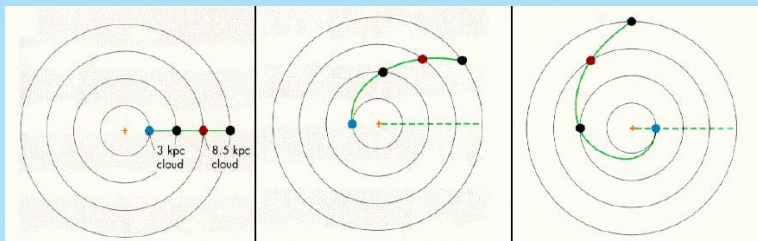
De **abondantie** is het voorkomen van elementen zwaarder dan helium, uitgedrukt t.o.v. de zon (**2%**).



Rotatie en massa

Differentiële rotatie

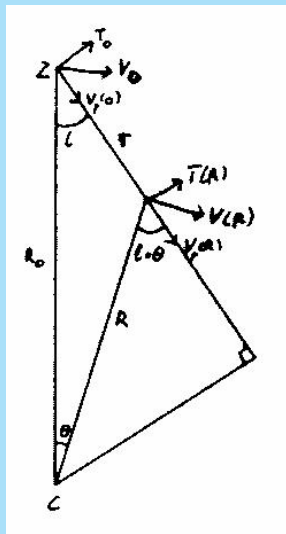
Het **Melkwegstelsel** roteert niet als een wiel. De **periode** (van beweging rond het centrum) varieert met de afstand tot het centrum. Dit wordt **differentiële rotatie** genoemd.

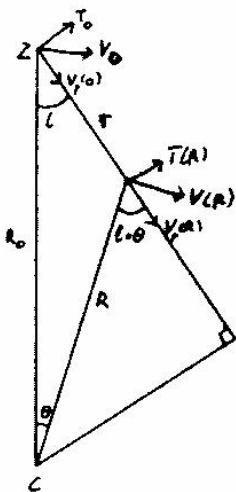


Elk deel beweegt ten opzichte van die andere delen die niet dezelfde galactocentrische afstand hebben.

Noem de rotatie snelheid $V(R)$
en die de zonsomgeving V_0 .

Als de zon Z op een afstand R_0 van het centrum C staat, dan heeft een object op afstand r van de zon bij een galactische lengte l een radiële snelheid t.o.v. de zon V_{rad} en een tangentiële snelheid T .





$$V_{\text{rad}} = V_r(R) - V_r(0) = V(R) \sin(l + \theta) - V_0 \sin l$$

$$T = T(R) - T(0) = V(R) \cos(l + \theta) - V_0 \cos l$$

$$R \sin(l + \theta) = R_0 \sin l$$

$$R \cos(l + \theta) = R_0 \cos l - r$$

Substitueer dat, dan krijgen we

$$V_{\text{rad}} = R_o \left(\frac{V(R)}{R} - \frac{V_o}{R_o} \right) \sin l \quad (1)$$

$$T = R_o \left(\frac{V(R)}{R} - \frac{V_o}{R_o} \right) \cos l - \frac{r}{R} V(R) \quad (2)$$

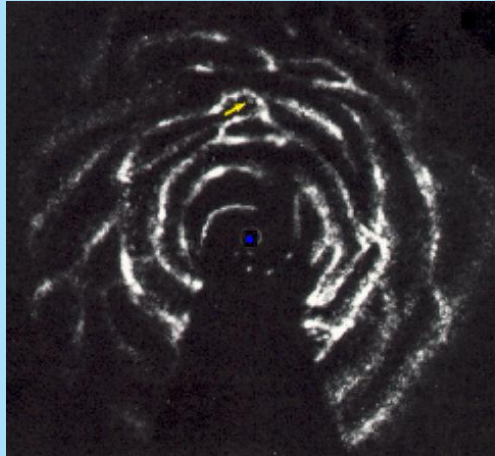
Dus als we **rotatiekromme** $V(R)$ zouden weten, zouden we ook de afstand R kunnen berekenen uit waarnemingen van V_{rad} . Hieruit volgt dan r , weliswaar met een ambigüiteit symmetrisch t.o.v. het zogenaamde **sub-centrale punt**.

Dat laatste is het punt langs de gezichtslijn, dat het dichtst bij het Galactisch Centrum ligt.

$V(R)$ kan afgeleid worden door in elke richting l de grootste waargenomen radiële snelheid te nemen.

Met de 21-cm liin van HI is de verdeling van waterstof in het Melkwegstelsel in kaart gebracht.

Dit was de eerste indicatie dat het Melkwegstelsel een **spiraal stelsel** is.



We maken nu **lokale** benaderingen; d.w.z. we nemen $r \ll R_o$.

Verander nu naar **hoeksnelheden** $\omega(R) = V(R)/R$ en $\omega_o = V_o/R_o$ en neem een **Taylor-reeksontwikkeling**

$$f(a+x) = f(a) + x \frac{df(a)}{da} + \frac{1}{2} x^2 \frac{d^2 f(a)}{d^2 a} + \dots$$

voor de hoek-rotatiesnelheid

$$\omega(R) = \omega_o + (R - R_o) \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_o} + \frac{1}{2} (R - R_o)^2 \left(\frac{d^2 \omega}{dR^2} \right)_{R_o}$$

De **cosinus-regel** geeft

$$R = R_o \left[1 + \left(\frac{r}{R_o} \right)^2 - \frac{2r}{R_o} \cos l \right]^{1/2}$$

Maak een Taylor-reeksontwikkeling voor deze uitdrukking en verwaarloos alle termen met een hogere orde dan $(r/R_o)^3$.

$$R = R_o \left[1 - \frac{r}{R_o} \cos l + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R_o} \right)^2 (1 - \cos^2 l) \right]$$

$$R - R_o = -r \cos l + \frac{1}{2} \frac{r^2}{R_o} (1 - \cos^2 l)$$

$$(R - R_o)^2 = r^2 \cos^2 l$$

Substitueer dit in de vergelijking voor ω

$$\begin{aligned} \omega(R) &= \omega_o + \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_o} R_o \left[-\frac{r}{R_o} \cos l + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R_o} \right)^2 (1 - \cos^2 l) \right] \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\omega}{dR^2} \right)_{R_o} R_o^2 \left(\frac{r}{R_o} \right)^2 \cos^2 l \end{aligned}$$

of in lineaire snelheid

$$\begin{aligned}
 V_{\text{rad}} &= \left(\frac{r}{R_o}\right)^2 \left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R_o} \frac{R_o^2}{2} \sin l - \frac{r}{R_o} \left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R_o} R_o^2 \sin l \cos l \\
 &+ \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R_o}\right)^2 \left[-\left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R_o} R_o^2 + \left(\frac{d^2\omega}{dR^2}\right)_{R_o} R_o^3 \right] \sin l \cos^2 l
 \end{aligned}$$

Gebruik $2 \sin l \cos l = \sin 2l$ en verwaarloos termen met $(r/R_o)^2$ en hogere orden. Dan

$$V_{\text{rad}} = -\frac{1}{2} R_o \left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R_o} r \sin 2l \equiv A r \sin 2l$$

Dus sterren op een gelijke afstand r zullen een systematisch patroon over de hemel vertonen in hun radiële snelheid met **Galactische lengte**.

Voor sterren op **Galactische breedte** b moeten we de projecties gebruiken van hun snelheden op het Galactisch vlak:

$$V_{\text{rad}} = Ar \sin 2l \cos b$$

Voor de **tangentiële snelheden** gaan we over naar **eigen bewegingen** μ . Op equivalente wijze vinden we dan

$$\begin{aligned} \frac{T}{r} = 4.74\mu &= -\omega_0 + \frac{3}{2} \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_0} r \cos l - \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_0} R_0 \cos^2 l \\ &+ \frac{r}{2R} \left[- \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_0} + \left(\frac{d^2\omega}{dR^2} \right)_{R_0} R_0^2 \right] \cos^3 l \end{aligned}$$

Gebruik nu $\cos^2 l = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2l$ en verwaarloos alle termen (r/R_o) en hogere orden.

$$4.74\mu = -\omega_o - \frac{1}{2} \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_o} R_o - \frac{1}{2} R_o \left(\frac{d\omega}{dR} \right)_{R_o} \cos 2l$$

$$\equiv B + A \cos 2l$$

De afstands-afhankelijkheid is nu uit deze vergelijking verdwenen.

Voor **Galactische breedte** moet de rechterkant nu vermenigvuldigd worden met $\cos b$.

De constanten A en B zijn de **Oort constanten**. Oort maakte voor het eerst bovenstaande afleiding (in 1927) en gebruikte dat om de rotatie van het Melkwegstelsel aan te tonen uit waarnemingen van de eigen bewegingen van sterren.

De Oort constanten kunnen ook geschreven worden als

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{R_o} - \left(\frac{dV}{dR} \right)_{R_o} \right]$$

$$B = -\frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{R_o} + \left(\frac{dV}{dR} \right)_{R_o} \right]$$

Verder

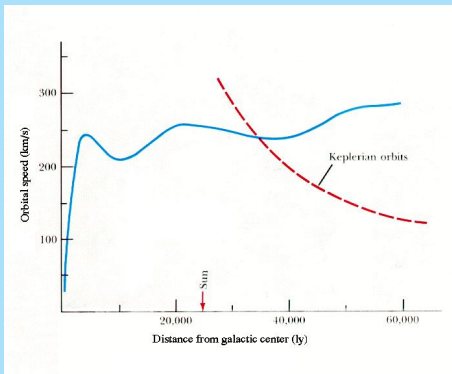
$$A + B = - \left(\frac{dV}{dR} \right)_{R_o} ; \quad A - B = \frac{V_o}{R_o}$$

De beste waarden zijn thans

$$\begin{aligned} R_o &\sim 8.5 \text{ kpc} & A &\sim 13 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1} \\ V_o &\sim 220 \text{ km s}^{-1} & B &\sim -13 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1} \end{aligned}$$

Massaverdeling

De **rotatiekromme** $V(R)$ is moeilijk te bepalen buiten R_0 en dit kan alleen gedaan worden met objecten waarvan de afstand bekend is, zoals **HII regions**. Een bepaling van de rotatiekromme van ons Melkwegstelsel is bijvoorbeeld:



We zien dat tot op grote afstanden van het centrum de rotatiesnelheid niet kleiner wordt.

In een cirkelvormige baan rond een puntmassa M geldt, dat $M = V^2 R / G$ (zoals in ons zonnestelsel). Dit heet een **Keplerische rotatiekromme**.

Je zou verwachten dat de rotatiekromme van ons Melkwegstelsel naar een dergelijke kromme zou naderen als je voorbij de grenzen van de schijf komt. Maar we zien een **vlakke rotatiekromme**.

We zien dit ook in andere melkwegstelsel. Het toont aan, dat er meer materie aanwezig moet zijn dan we waarnemen in sterren, gas en stof en dit wordt **donkere materie** genoemd.

We schatten de massa binnen R_{\odot} als $\sim 9.6 \times 10^{10} M_{\odot}$.

Aan het einde van de gemeten rotatiekromme is dit $\sim 10^{12} M_{\odot}$.

Vorming van het Melkwegstelsel

- Het begint met het samentrekken van een grote gaswolk. Deze bestaat alleen uit **waterstof** en **helium**.
- Hierin vormen de **eerste sterren**.
- Het gas wordt “**verrijkt**” met zware elementen en zo ontstaan iets later **bolhopen** met **enige abundantie**.
- In het samentrekkende proto-stelsel botsen de sterren niet. Wel worden veel bolhopen **opgelost** in onderlinge botsingen.
- De bolhopen vormen zo de **Populatie II** in een min of meer **bolvormig** volume (de **halo**), met **weinig rotatie** en **weinig zware elementen**.
- De onderlinge bewegingen blijven **hoog**.

- Het overblijvende (verrijkte) gas, dat o.a. van grote afstand komt, krijgt door de samentrekking een steeds hogere **rotatie** en **afplatting**.
- Door botsing van de gaswolken worden de onderlinge bewegingen **klein**.
- In de **schijf** gaat stervorming tot op heden door. Dit is **Populatie I**.

Waarnemingen van **jonge** (=verre) melkwegstelsels met de **Hubble Space Telescope** geven aan, dat het gecompliceerder was en dat veel interactie en samenklonteren voorkomt.

