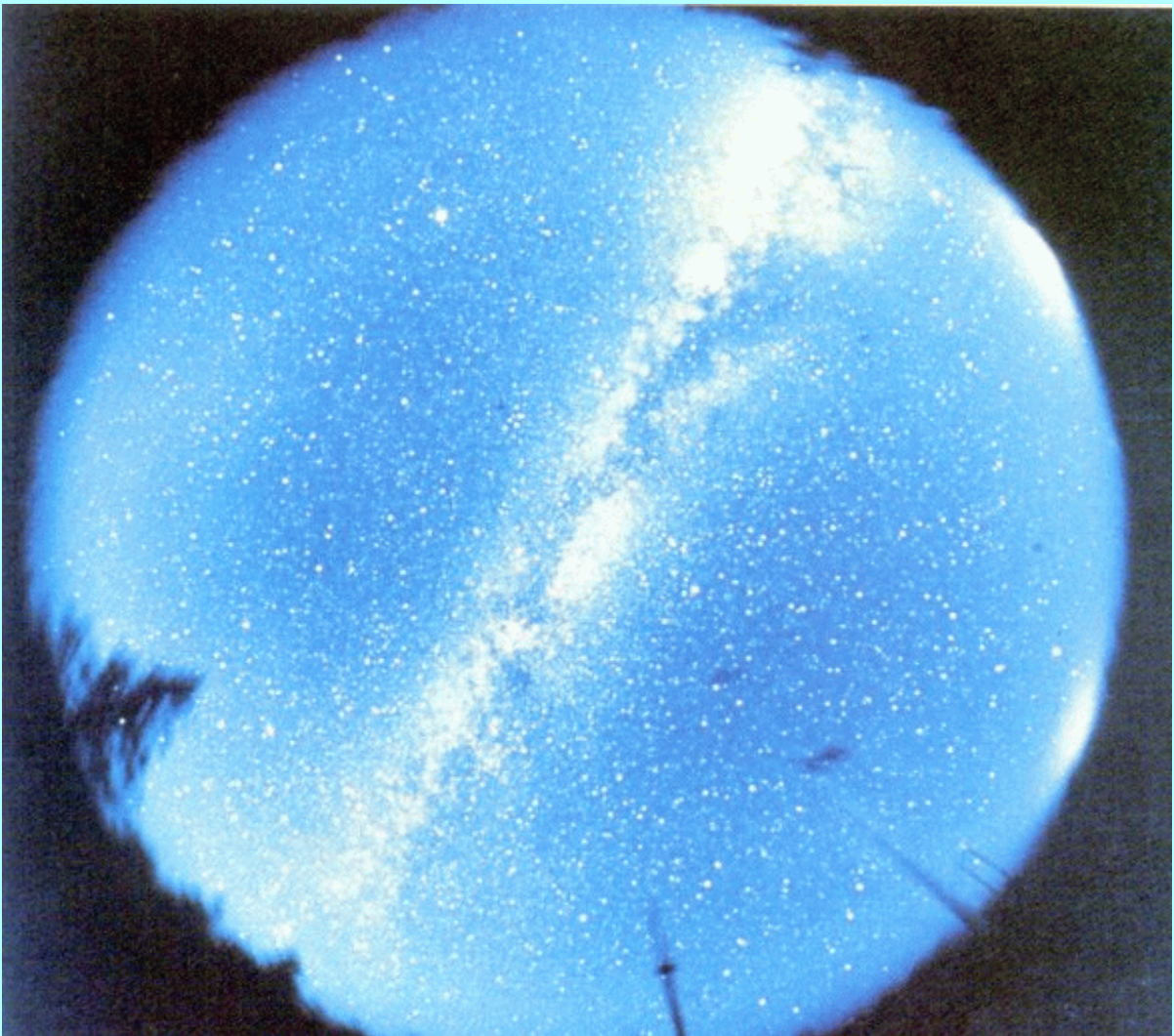


INLEIDING STERRENKUNDE

College 8. Structuur en dynamica van ons Melkwegstelsel.

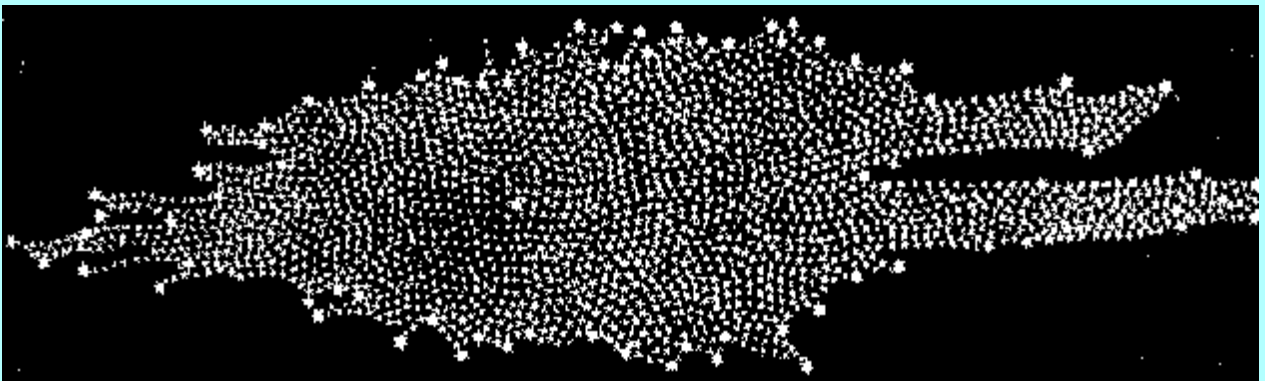
Ons **Melkwegstelsel** ontleent zijn naam aan de **Melkweg**, die als een lichtende band aan de hemel gezien kan worden.



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.

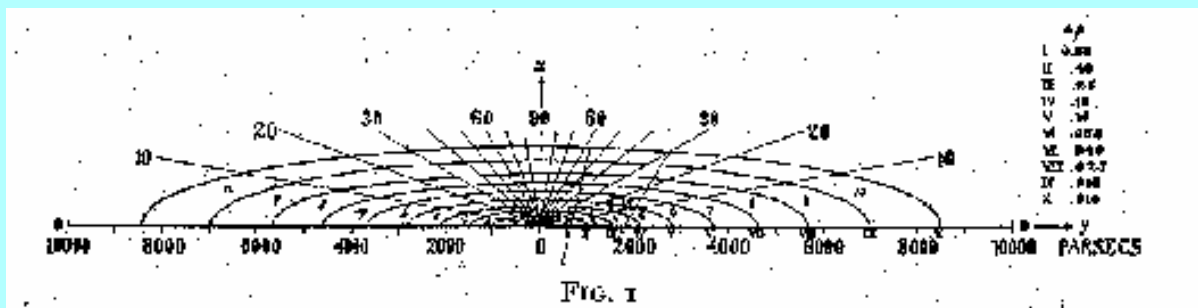
William Herschel (1738 – 1822) telde sterren en nam aan, dat (1) ze allemaal intrinsiek even helder waren en (2) hij keek tot de rand van het sterrenstelsel.

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



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.

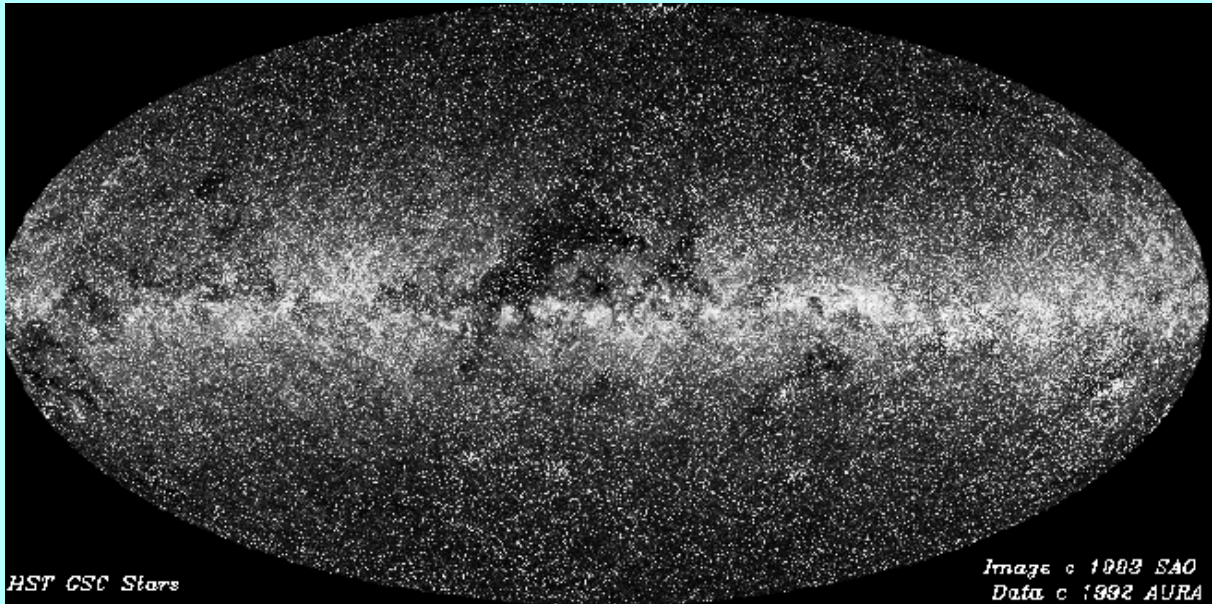


De zon bevindt zich bijna in het centrum van het stelsel. Dit was verdacht.

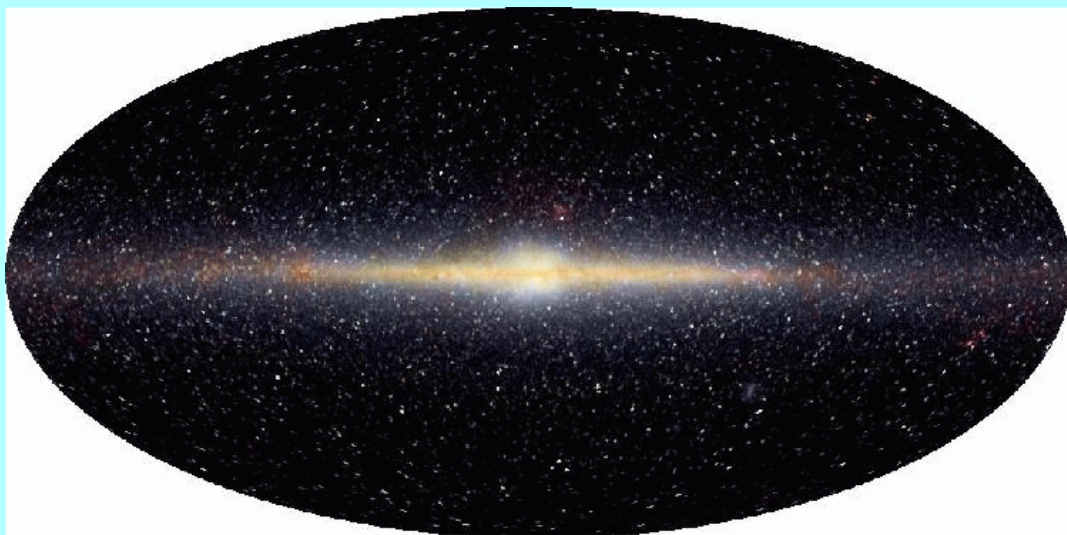
Kapteyn vermoedde **interstellaire absorptie** en voorspelde ook, dat het **verroding** zou geven, maar kon er geen aanwijzingen voor vinden.

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

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



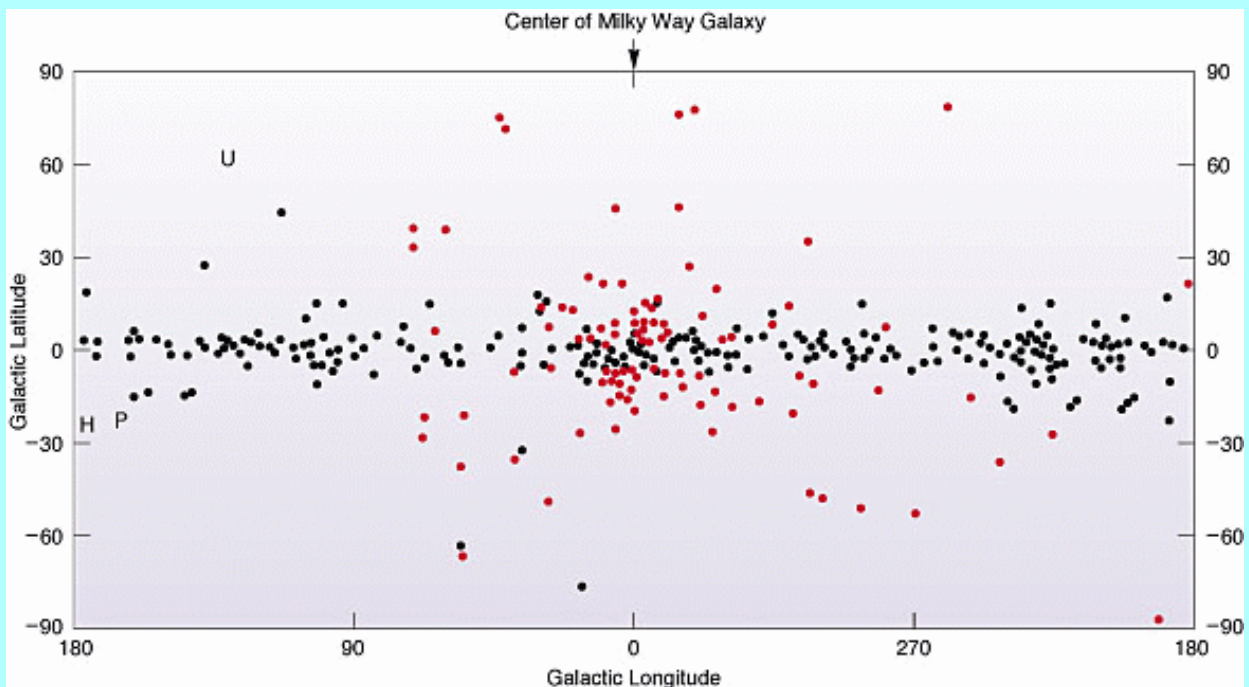
Met de satelliet **Cosmic Background Explorer (COBE)** ziet de Melkweg er in het infrarood als volgt uit.



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**.

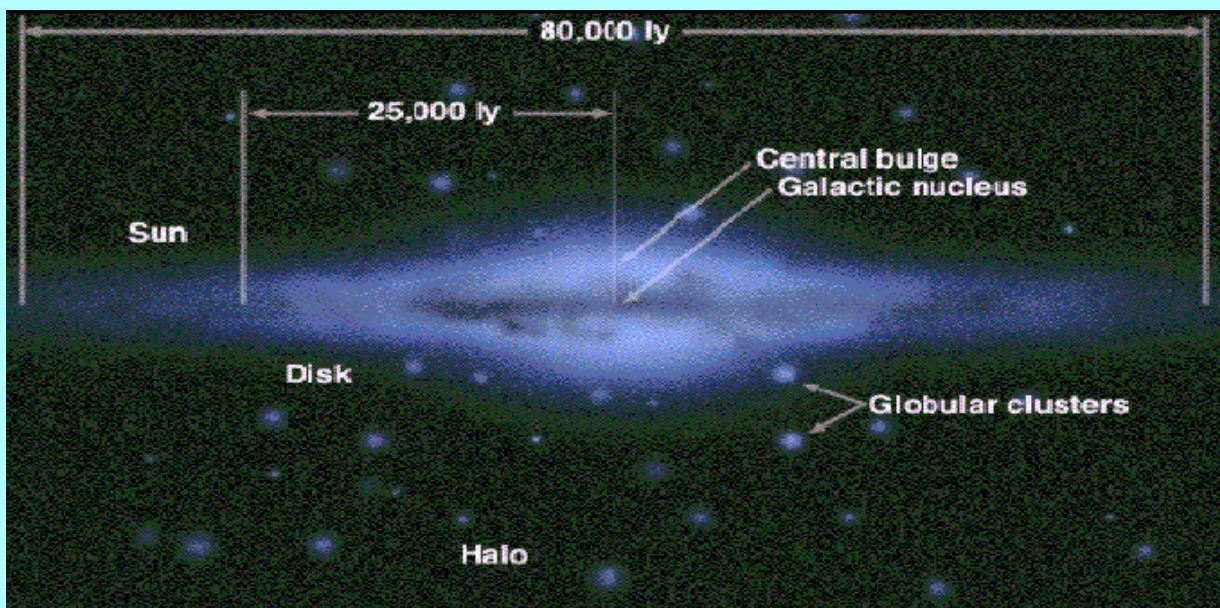
In 1944 voerde **Walter Baade** het concept van **Sterpopulaties** in. Dit was met name gebaseerd op HR-diagrammen van clusters en een vergelijking met de helderste sterren in de **Andromeda nevel** (het dichtstbijzijnde stelsel als de het Melkwegstelsel).

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

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

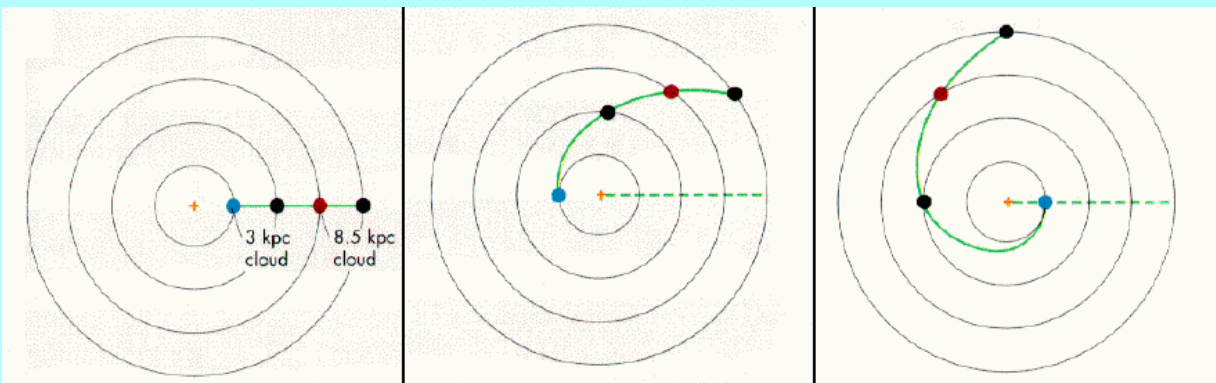
Supernovae komen voor in twee typen. **Type II en Ia** is een ontploffende zware ster, **type Ib** is een ontploffende ster in een dubbelster na overdracht van materie van de grote naar de kleinere component.

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



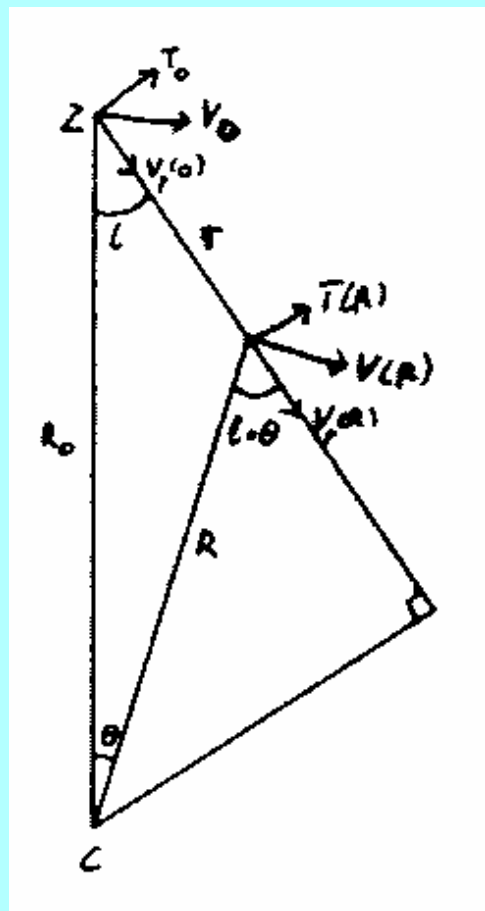
Differentiële rotatie.

De rotatie in het Melkwegstelsel is niet zoals bij een star wiel. De omloops-periode variëert met afstand tot het centrum. Dit heet differentiële rotatie.



Dus alle delen bewegen t.o.v. delen die niet toevallig op dezelfde afstand van het centrum liggen.

Noem de rotatiesnelheid $V(R)$ en die bij de zon V_0 . Als de zon Z op afstand R_0 van het centrum C ligt, heeft een object op afstand r van de zon bij Galactische lengte l een zekere radiële snelheid V_{rad} en transversale snelheid T .



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

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

Verder kunnen we zien, dat

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

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

Vul dit in, dan

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

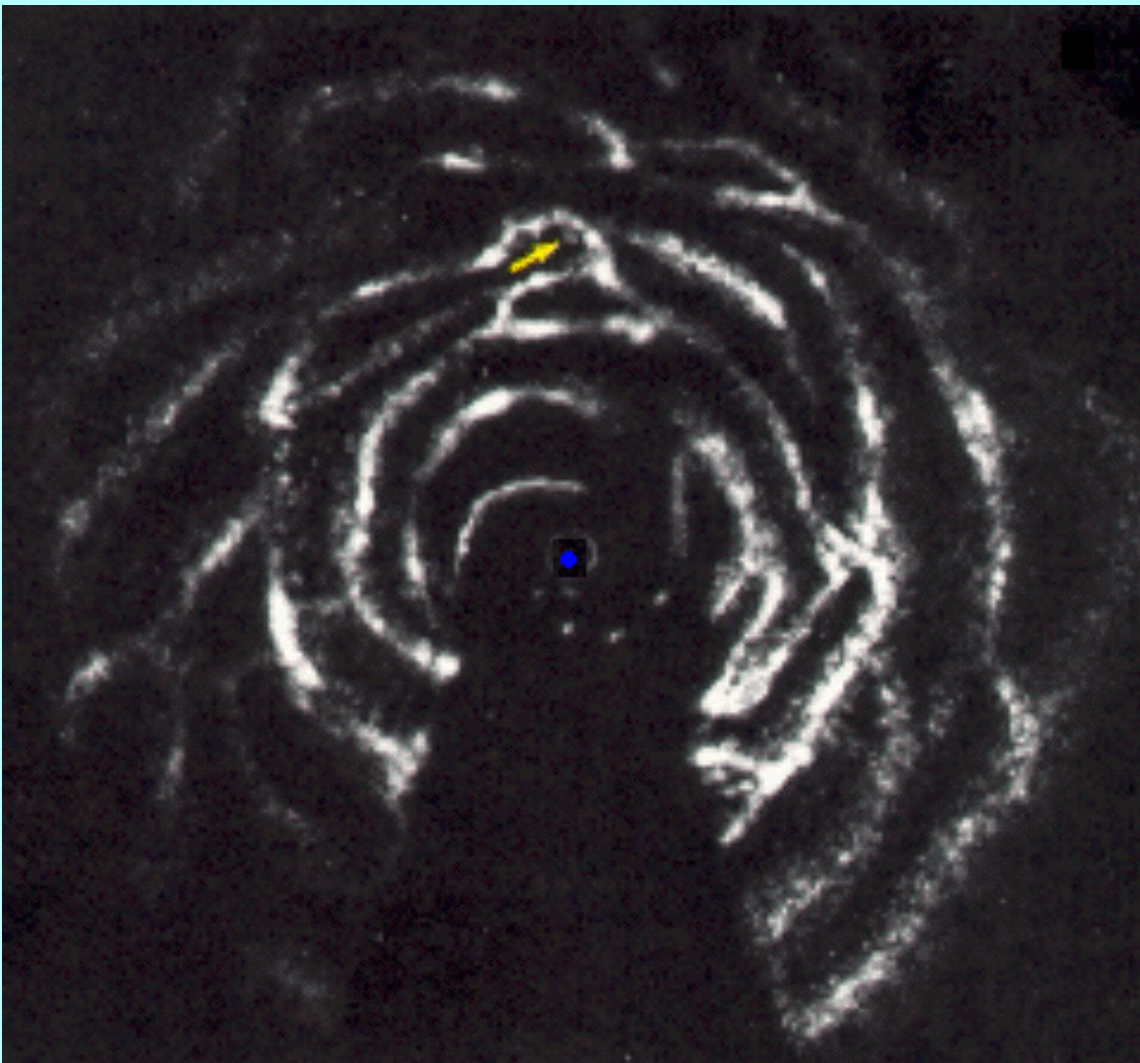
$$T = R_o \left(\frac{V(R)}{R} - \frac{V_o}{R_o} \right) \cos l - \frac{r}{R} V(R) \quad (2)$$

Dus als we de **rotatie kromme** $V(R)$ weten kunnen we uit metingen van V_{rad} de afstand R uitrekenen. Daaruit volgt dus r met een ambiguïteit rond het **sub-centrale punt**.

Dit is het punt langs de gezichtslijn het dichtst bij het centrum.

$V(R)$ kun je bepalen door in elke richting l de grootste snelheid te nemen. Dit moet in het sub-centrale punt zijn.

Met de **21-cm lijn** is zo de **HI** in het Melkwegstelsel in kaart gebracht.



Nu kijken we alleen in de buurt van de zon, dus voor $r \ll R_o$. We nemen hoeksnelheden $\omega(R) = V(R)/R$ en $\omega_o = V_o/R_o$. Neem de Taylor reeksontwikkeling

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

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

Ook zien we met de **cosinus regel**

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

Hiervan geeft een reeks-ontwikkeling en verwaarlozen van termen met $(r/R_o)^3$ en hoger

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

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

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

Vul dit in in de formule 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

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

Gebruik nu $2 \sin l \cos l = \sin 2l$ en verwaarloos termen met $(r/R_o)^2$ en hoger, dan

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

Dus sterren op dezelfde afstand r zullen een patroon van systematische grootte van de radiële snelheid over de hemel vertonen met **Galactische lengte**.

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

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

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

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

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

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

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

Nu is de afstands-afhankelijkheid natuurlijk weg. Voor hogere **Galactische breedte** wordt de rechterkant weer met $\cos b$ vermenigvuldigd.

De constanten A en B heten de **Oort constanten**. Oort leidde bovenstaande voor het eerst af (in 1927) en bevestigde met de waarnemingen aan de eigen bewegingen zo de rotatie van het Melkwegstelsel.

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

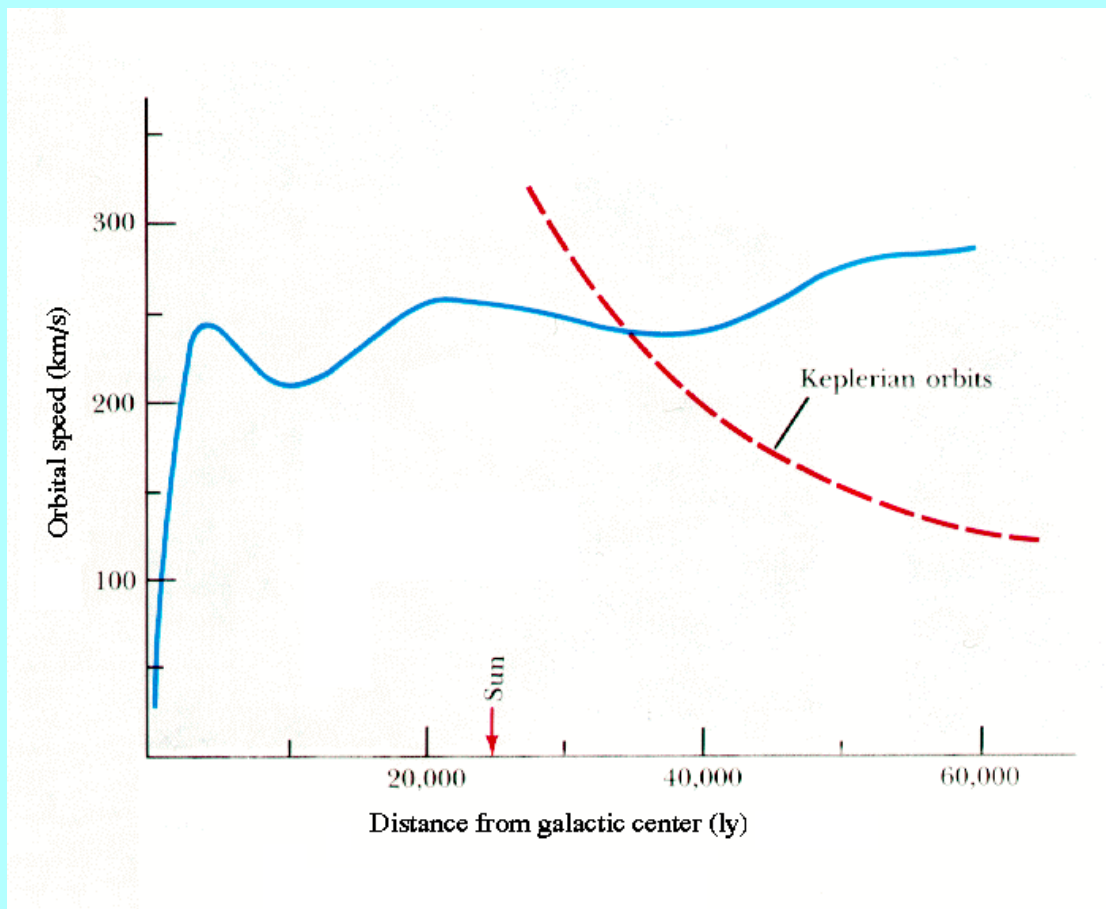
$$A + B = - \left(\frac{dV}{dR} \right)_{R_0} ; A - B = \frac{V_0}{R_0}$$

Beste waarden zijn

$$\begin{aligned} R_0 &\approx 8.5 \text{ kpc} & A &\approx 13 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1} \\ V_0 &\approx 220 \text{ km s}^{-1} & B &\approx -13 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1} \end{aligned}$$

De rotatiekromme $V(R)$ is lastig te bepalen buiten R_0 en dat kan alleen met objecten, waarvan de afstand gemeten kan worden (HII-gebieden).

Een bepaling is de volgende



Dus tot op grote afstand van het centrum neemt de rotatie snelheid niet af.

In een cirkelbaan rond een puntmassa M geldt $M = V^2 R / G$ (als in het zonnestelsel). Dit heet een **Kepler rotatiekromme**.

Je verwacht dat de rotatiekromme van het Melkwegstelsel daarnaartoe gaat als je buiten de rand van de schijf komt. Maar we zien een **vlakke rotatiekromme**.

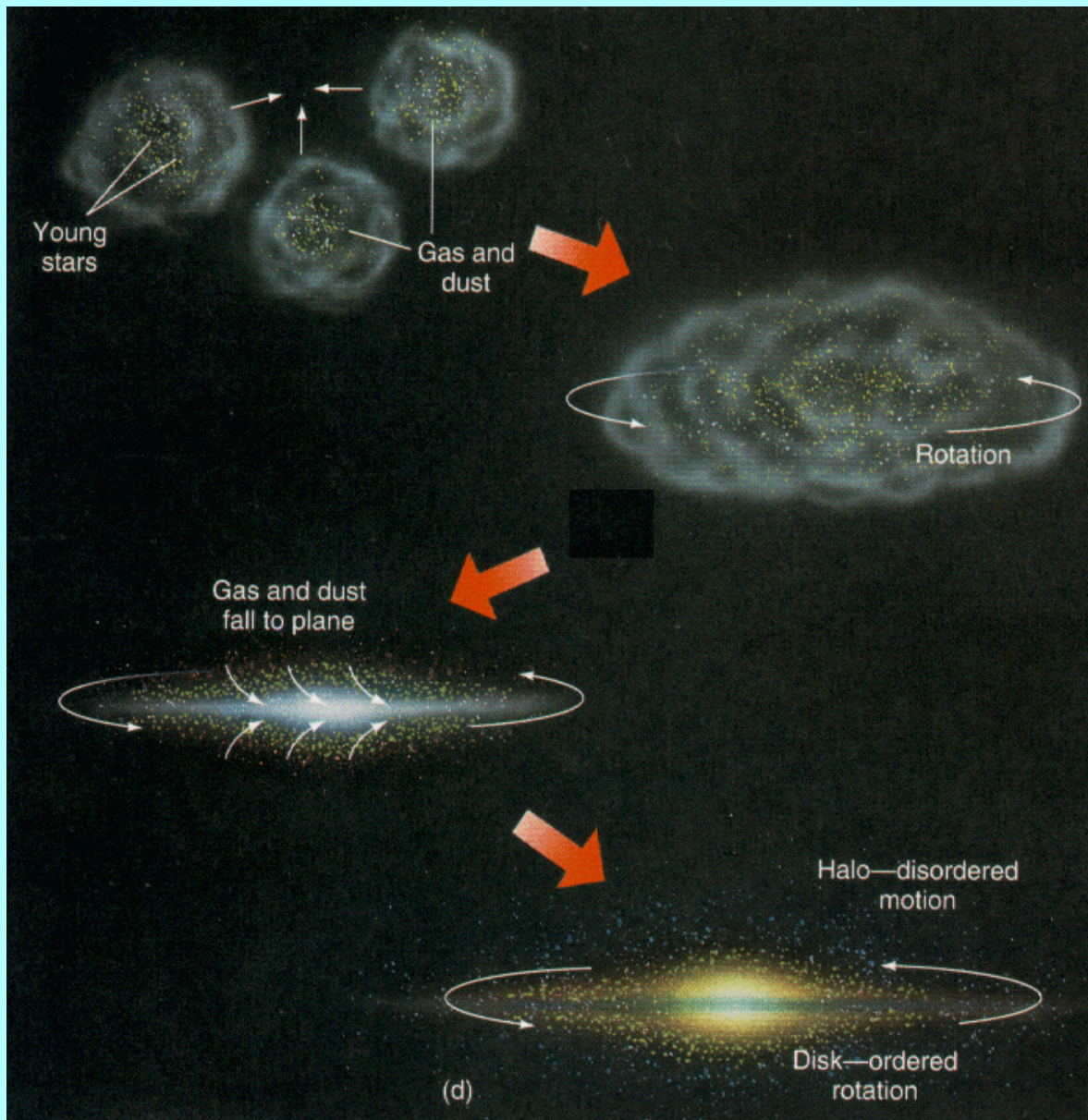
We zien dat ook in andere melkwegstelsels. Dit geeft aan, dat er meer materie is dan in sterren, gas en stof en dat noemt men **donkere materie**.

Met de formule vinden we een schatting voor de massa binnen R_0 van $\approx 9.6 \times 10^{10} M_{\odot}$.

Aan de rand van de gemeten rotatiekromme wordt dit wel $\approx 10^{12} M_{\odot}$.

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.