At forstå Mælkevejens rotation
ved at bruge radioteleskop-observationer[1]

Alexander L. Rudolph
Professor i Fysik og Astronomi, Cal Poly Pomona
Professeur Invité, Université Pierre et Marie Curie (UPMC)

Oversat af
Michael Andrew Dolan Møller, marts 2013. (Rettelser jan. 2014.)

[1] "Dette projekt er finansieret med støtte fra Europa-Kommissionen. Denne publikation afspejler kun forfatterens synspunkter, og Kommissionen kan ikke holdes ansvarlig for nogen brug, der måtte blive gjort af oplysningerne heri."

1. Konceptuelle udfordringer (Kineæstetisk aktivitet)

Figur 1. Dette billede af Andromeda-galaksen, vores nærmeste nabo, viser, hvordan Mælkevejen kunne se ud, hvis vi kunne observere den udefra.

Den største begrebsmæssige udfordring i at forstå, hvordan vi kan observere Mælkevejens rotation (også kaldet *Galaksen*), er det faktum, at vi bor inde i Galaksen. Således er observationer af objekternes bevægelser i Galaksen lavet fra en platform (Solsystemet), som selv bevæger sig i forhold til Galaksens referenceramme.

For at måle objekters bevægelser i Universet, bruger vi **Dopplerforskydningen** - Lysets bølgelængde forskydes på grund af den relative bevægelse langs sigtelinien (radial bevægelse) mellem lysgiveren og iagttageren, i forhold til hvad vi ville observere, hvis de to var i hvile i forhold til hinanden. Vi kan simpelthen konstatere, at når den relative afstand er **stigende**, så er lyset **rødforskudt,** hvilket betyder, at det er forskudt mod *længere* bølgelængder. Når den relative afstand mellem lysgiver og observatør er **faldende**, så er lyset **blåforskudt,** hvilket betyder, at det er forskudt mod *kortere* bølgelængder.

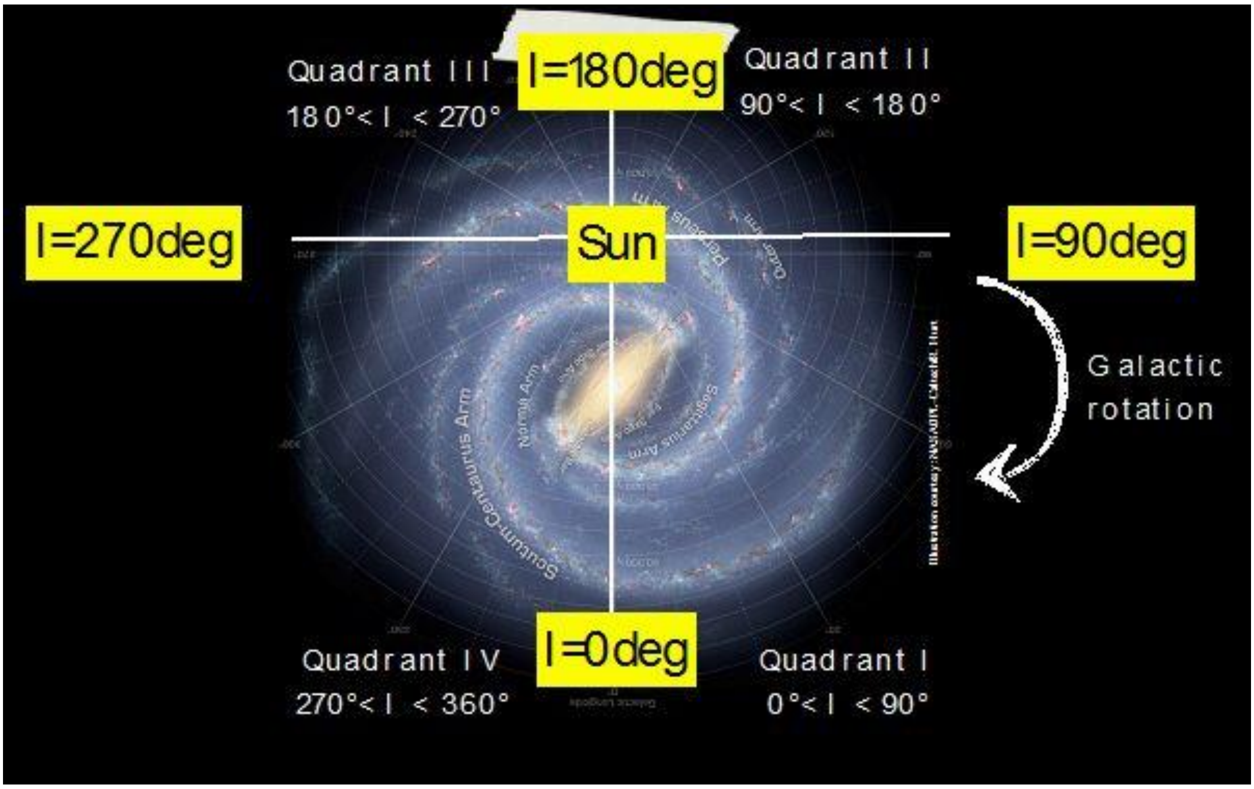
For at forstå kinematikken (bevægelserne) i Mælkevejen, vil vi begynde med en kineæstetisk læringsaktivitet, hvor vi vil simulere Mælkevejens rotation. Vi vil indse, at der fra vores udsigtspunkt i Solsystemet, er et mønster for de observerede bevægelser af objekter i Mælkevejen. For at måle radialhastigheden, v_r af objekter i forhold til os selv, iagttageren, vil vi bruge en **Doppler-detektor**, nemlig en elastik som holdes udstrakt mellem det observerede objekt (lysgiveren) og Solen (iagttageren). Efterhånden som Galaksen roterer, vil vi indse, at hvis denne elastik strækkes ud, så må afstanden mellem lysgiveren og observatøren være *stigende* - hvilket altså angiver en **rødforskydning.** Hvis elastikken bliver slappere, så vi ved, at afstanden mellem lysudgiveren og observatøren er *faldende* - hvilket angiver en **blåforskydning.**

Læseren bedes nu udføre den kineæsteiske øvelse, som er beskrevet her:
http://www.euhou.net/index.php/exercises-mainmenu-13/radio

2. Modellering af Mælkevejens bevægelse

a. Sammenligninger med kineæstetisk aktivitet

Lad os nu gennemgå, hvad vi har lært i den kineæstetiske aktivitet. Vi definerer det galaktiske koordinatsystem til at placere objekter i Mælkevejen sådan, at origo er placeret i vores solsystem, og den **galaktiske længdegrad,** l er et mål for observationsretningen i Galaksens plan, og hvor $l = 0$ er retningen til Galaksens centrum. Den galaktiske breddegrad defineres til b, og den er i denne øvelse nul, da vi vil måle hastigheder i galaksens plan. Vi kan derefter definere fire *kvadranter*, baseret på værdien af l (Se figur 2 nedenfor).



Figur 2. Skitse, der viser definitionen af Galaktisk længdegrad og de fire kvadranter. Mælkevejen roterer med uret i dette diagram.

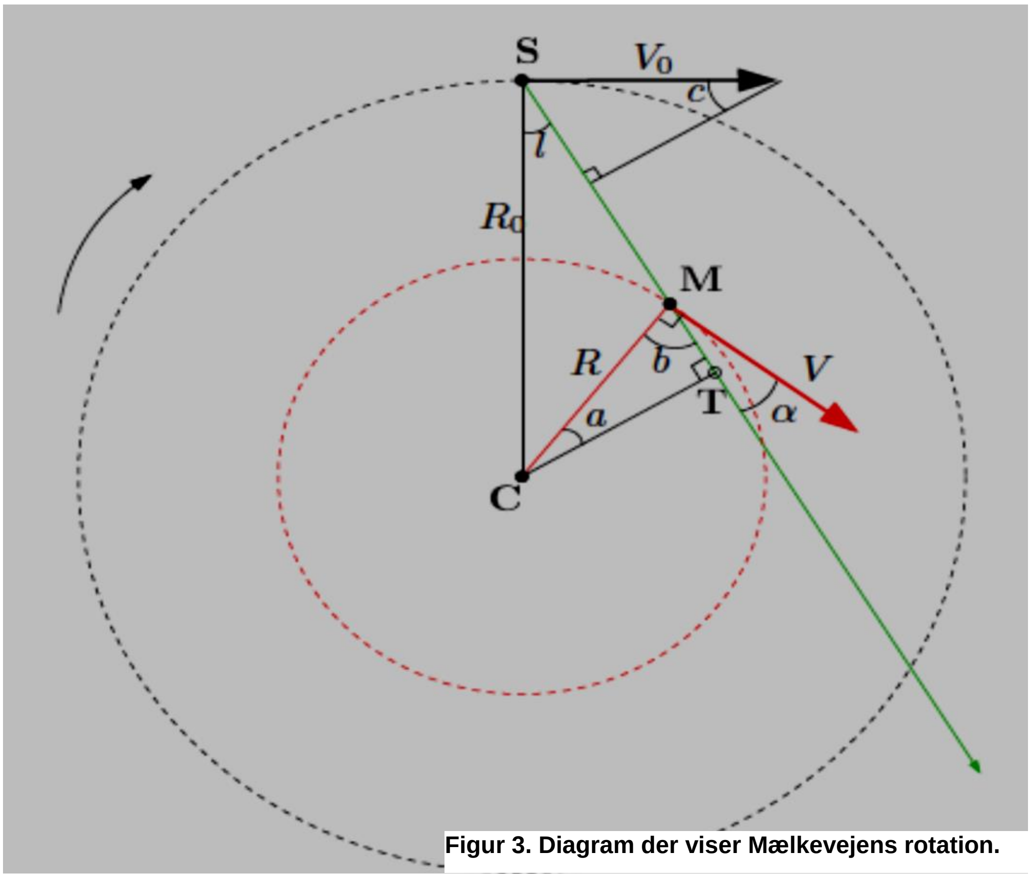
Som vi bemærkede i vores aktivitet, afhænger **fortegnet** i Dopplerforskydningen af, hvilken kvadrant, vi observerer. Vi observerede, at:

Kvadrant I: $0° < l < 90°$ $v_r > 0$ (rødforskudt)
Kvadrant II: $90° < l < 180°$ $v_r < 0$ (blåforskudt)
Kvadrant III: $180° < l < 270°$ $v_r > 0$ (rødforskudt)
Kvadrant IV: $270° < l < 360°$ $v_r < 0$ (blåforskudt)

For at forstå dette mønster, er vi nødt til matematisk set at forstå hvordan radialhastigheden, v_r, bestemmes. Når vi observerer et objekt i Galaksen, måler vi den *relative* bevægelse af objektet langs **sigtelinien** til objektet.

For at bestemme størrelsen af den relative bevægelse, kan vi bruge figur 3 nedenfor, hvor vi har antaget jævn cirkelbevægelse for objekterne i Mælkevejen. Dvs. objekterne har samme fart hele tiden i deres bane. Følgende variable er også defineret i figuren:

$\boldsymbol{V_0}$ Solens hastighed omkring Galaksens centrum. (220km/s).
$\boldsymbol{R_0}$ Afstanden fra Solen til Galaksens centrum. (8,5 kpc hvor 1pc = $3{,}086 \times 10^{16}$ m).
$\boldsymbol{l}$ Galaktisk længdegrad.
$\boldsymbol{V}$ Hastigheden af en gassky.
$\boldsymbol{R}$ Skyens afstand til Galaksens centrum. (Galaktocentrisk radius.)
$\boldsymbol{d}$ Skyens afstand til Solen.



Figur 3. Diagram der viser Mælkevejens rotation.

Vi er nødt til at finde *projektionen* af både V_0 og V ***på sigtelinien,*** $\overrightarrow{SM}$**,** og derefter finde deres ***forskel***.

For at finde projektionen af V_0 på sigtelinjen, kan vi konstatere, at vinklen $c=l$, så projektionen af V_0 på sigtelinien er derfor $V_0 \cdot \sin(l)$.

For at finde projektionen af V på sigtelinien kan vi gøre som følger: Først indser vi, at denne projektion kan skrives $V \cdot \cos(\alpha)$. For at relatere α til l, ser vi, at da $\overrightarrow{CM} \perp \vec{V}$ og $\overrightarrow{CT} \perp \overrightarrow{MT}$, er vinklen $a=\alpha$ således at cos (α) = cos (a) = CT/R.

Endelig bemærker vi, at fra trekant SCT, kan vi se, at sin (l) = CT/R_0, Med lidt algebra, får vi, at projektionen af V på sigtelinien er $V \cdot (R_0/R) \cdot \sin(l)$.

Forskellen mellem disse to størrelser giver os vores endelige resultat for den ***observerede Dopplerforskydning*** $\boldsymbol{v_r}$**:**

$$v_r = V \cdot \frac{R_0}{R} \cdot sin(l) - V_0 \cdot sin(l)$$

For at finde v_r's **fortegn** som funktion af galaktisk længdegrad, l, vil vi foretage en forenklende antagelse, nemlig at $V=V_0$, som er sand for R > 2-4kpc. Dermed fås:

$$v_r = V_0 \cdot (\frac{R_0}{R} - 1) \cdot \sin(l)$$

Udfyld nedenstående tabel. Du skal finde **fortegnene** for hvert af leddene i formlen ovenfor, gang dem og find **fortegnet** for v_r for hver kvadrant. Udfør a*rbejdet med en makker og sammenlign dine svar med jeres nabogruppe. Hvis I ikke er enige i resultaterne, så diskuter jeres resultater, indtil I er enige.* **Stemmer dine resultater overens med, hvad vi fandt i den kineæstetiske aktivitet?**

Tabel 1

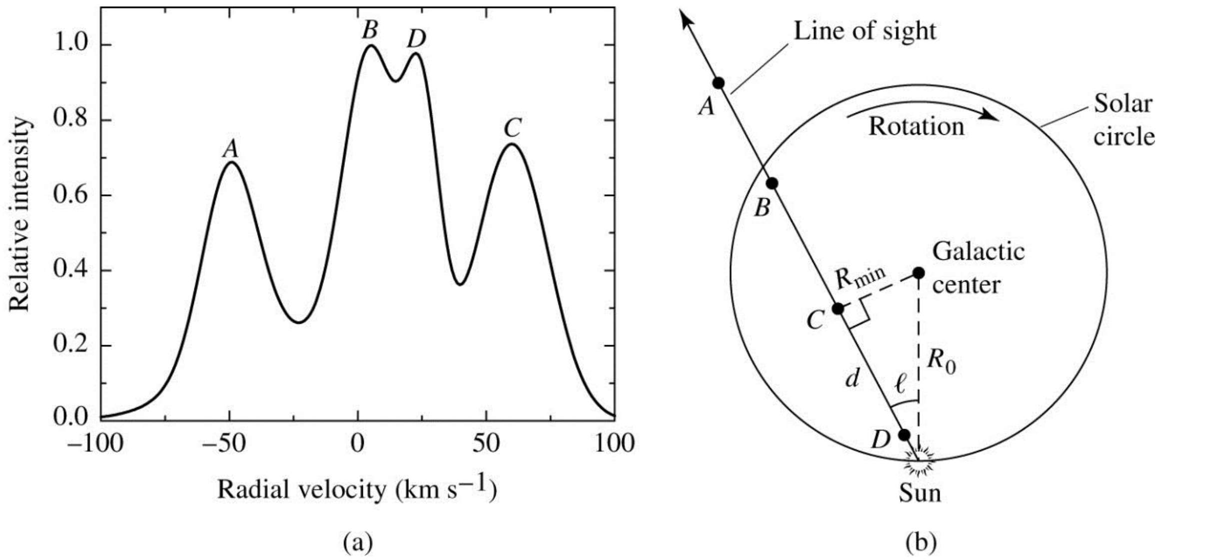
			V_0	sin (l)	(R_0/R)-1	v_r
Kvadrant I	0° < l <90°	$R < R_0$	+			
Kvadrant II	90° < l <180°	$R > R_0$	+			
Quadrant III	180° < l <270°	$R > R_0$	+			
Kvadrant IV	270° < l <360°	$R < R_0$	+			

b. Galaksens Rotationskurve

Vi vil nu bestemme rotationskurven for Galaksen, dvs. vi skal tegne en (R, *V)*-graf. For at tegne denne kurve, er vi nødt til at bruge vores målinger af v_r. Betragt ligningen for v_r:

$$v_r = V \cdot \frac{R_0}{R} \cdot \sin(l) - V_0 \cdot \sin(l)$$

Langs en given sigtelinie vil v_r være størst, når R er et minimum og så længe V stiger monotont (jævnt) med R, hvilket den gør. Så hvis vi observerer et antal objekter (f. eks. gasskyer, der udsender 21-cm radiostråling) langs den samme sigtelinie, vil det objekt, der er placeret ved den *mindste* galaktocentriske radius, R, have *største* v_r. Figur 4 illustrerer dette.



Figur 4. (a) Plot af Hydrogen 21-cm emission langs sigtelinien fra Solen. (b) Diagrammet viser placeringen af de 4 Hydrogen-skyer (A, B, C, D) i forhold til Solen. Bemærk, at skyen med den mindste *R* (sky C) har den største radialhastighed.

Af figur 4 ser vi, at sky C har den største radialhastighed, $v_r \approx 65$ km/s, og er på en længdegrad $l \approx 30°$.

For at finde V, mangler vi at finde objektets galaktocentriske radius, R. Vi kan af figur 4b se, at den mindste radius langs sigtelinien, R_{min}, er ved **tangentpunktet** for cirklen med $R=R_{min}$, så vi kan fra simpel trigonometri bestemme at $R = R_{min} = R_0 \cdot \sin(l)$. Dette udtryk indsættes i ligning for v_r. Udtrykket forenkles dermed til:

$$v_r = V - V_0 \sin(l) \Leftrightarrow V = v_r + V_0 \sin(l).$$

For sky C finder vi:

$$R = R_0 \cdot \sin(l) = 8{,}5kpc \cdot \sin(30) = 4{,}25kpc.$$
$$V = v_r + V_0 \cdot \sin(l) =$$
$$65\frac{km}{s} + 220\frac{km}{s} \cdot \sin(30) = 175\frac{km}{s}.$$

Bemærk, at denne fremgangsmåde, kendt som **tangent-punkt metoden[2],** kun virker for kvadranterne I og IV, dvs. den indre del af Galaksen ($R<R_0$).

Brug tangent-punktmetoden til at bestemme *R* og *V* for skyer for de længdegrader og radialhastigheder, der er anført i tabellen nedenfor. Husk at R_0 = 8,5kpc, og V_0 = 220 km/s. Udfør a*rbejdet med en makker og sammenlign jeres svar med nabogruppen. Hvis I ikke er enige, så sørg for at diskutere jeres resultater, indtil I er enige.*

Tabel 2

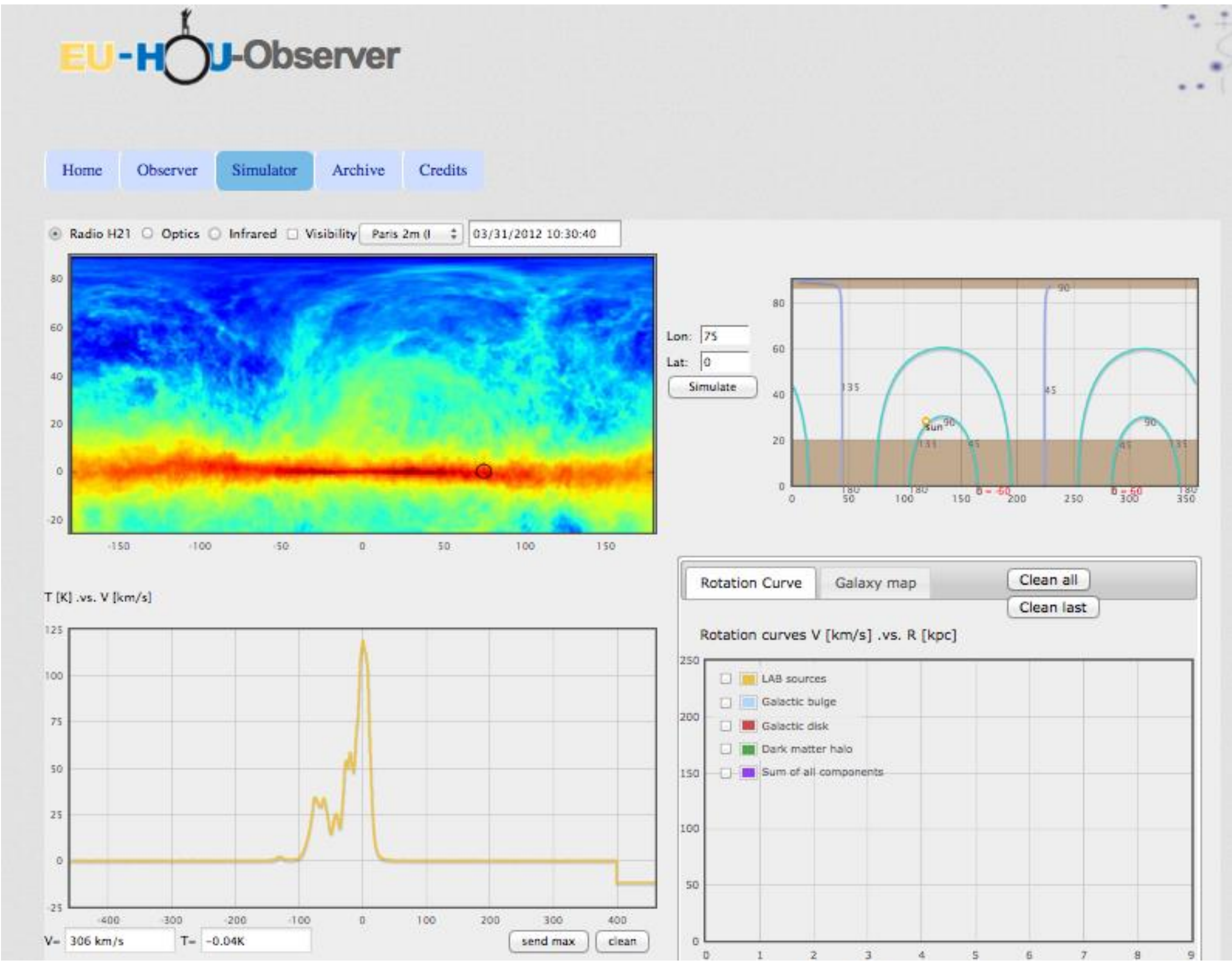
l	v_r (km/s)	R(kpc)	V(km/s)
15°	140		
30°	100		
45°	60		
60°	30		
75°	0		

c. Radioobservationer til at bestemme Mælkevejens rotationskurve

Vi vil begynde med at *simulere* virkelige radioteleskop-observationer af 21-cm liniens stråling fra H-skyer i vores galakse. Der bliver senere mulighed for at lave dine egne *ægte* observationer af denne gas ved hjælp af en af en række fjernstyrede teleskoper, der drives af EU-HOU og som er tilgængelige for offentligheden.

For at simulere observationer af brintskyer i vores galakse, skal du åbne EUHOU radioteleskop-simulatoren på internetadressen: http://euhou.obspm.fr/public/simu.php. Du kan se et skærmdump af siden nedenfor.

[2] Vi antager, at der så mange gasskyer i Mælkevejen, at vi altid finder en gassky ved $R_{min.}$ (I virkeligheden ligger skyen naturligvis ikke altid ved R_{min} - grafen bliver altså ikke perfekt.)



I øverste venstre hjørne ses et farvekodet kort i galaktiske koordinater for 21-cm brintstrålingen taget fra *Leiden/Argentina/Bonn (LAB)* Galactic HI-Survey. (Kalberla, P.M.W. et al. 2005). Farverne repræsenterer intensitet, hvor rød er den mest intense, og blå er den mindst intense. Den røde stribe hen over skærmen er Mælkevejens plan. Ved at placere musemarkøren over dette kort, er det muligt at simulere observerede spektre ved forskellige sigtelinier i Mælkevejen; de vises nederst til venstre på skærmen. Før du begynder, skal du sørge for, at boksen "Visibility" ovenfor HI-galaksekortet ikke er hakket af. Ellers vil du være begrænset til kun at "observere", hvad der er synligt for det valgte EUHOU-radioteleskop.

- For hver af de længdegrader, som du i tabel 2 beregnede *R* og *V* for, skal du nu klikke de relevante steder på billedet øverst til venstre. Hver gang du klikker med musen, vil en cirkel vises på kortet nederst til højre, og længde- og breddegraderne for denne cirkel vises i kasserne mærket Lon. og lat. til højre. Sørg for at musemarkøren er anbragt så tæt på det galaktiske plan (galaktisk breddegrad b=0) som muligt. Bliv ved med at flytte markøren, indtil du har den længde- og breddegrad, du ønsker. (F. eks længdegrad = 15°, bredde = 0°).

- Når du har de ønskede værdier, skal du klikke på "Simulate"-knappen og et spektrum vises i nederste venstre boks. Flyt markøren ind i boksen nederst til venstre - dermed vises et trådkors. Værdierne vist under boksen: "V =" og "T =" repræsenterer *radial*hastigheden, v_r, og "temperaturen" (svarende til intensiteten af strålingen ved denne hastighed målt i radioastronomiske enheder).

- Flyt musemarkøren hen over toppen med den største hastighed og klik med musen. En lodret blå linje vises på den hastighed, du har valgt. Undersøg om hastigheden matcher det, der vises i tabel 2. Man kan også finde hastigheden af de andre toppe i spektret på samme måde. Disse repræsenterer andre skyer langs den samme sigtelinie.

- Når du er færdig med at markere spektrets toppe, skal du klikke på "send max"- knappen under skærmen. Et punkt vises i (R, V)-plottet til højre på skærmen. Ved at flytte markøren over det punkt, der vises, kan du kontrollere, om værdierne for denne længdegrad svarer til dem, du fandt i tabel 2. *Hvis de ikke passer så gå tilbage og tjek dit arbejde!*

- Når du har fundet (og kontrolleret) R og V for de 5 længdegrader i tabel 2, kan du bruge simulatoren for at finde værdier for vilkårlige længdegrader i kvadrant I. Hvis du forsøger at "sende max" for et punkt i kvadranterne II eller III, vil intet blive vist i plottet af den galaktiske rotation. Det skyldes, at tangentpunkts-metoden kun virker i det indre af Galaksen, $R<R_0$. (I kvadrant IV skal du klikke længst til venstre på spektrene, da v_r jo er negativ i denne kvadrant).

- Tillykke, du har nu målt Mælkevejens rotationskurve!

d. Måling af Mælkevejens masse

Rotationskurven for en galakse kan anvendes til at bestemme massen af galaksen ved hjælp af nogle meget enkle love. Til denne beregning vil vi antage, at massen af galaksen er kuglesymmetrisk. Selvom de fleste af stjernerne og gasskyerne i spiralgalakser er formet som en fladtrykt disk, er denne tilnærmelse acceptabel af to grunde:

1. Forskellen mellem resultatet for en sfærisk massefordeling og en flad skive ændrer kun resultatet en smule, så selvom vi laver denne antagelse, bliver slutresultatet alligevel af den rette størrelsesorden.
2. En endnu vigtigere faktor er, at størstedelen af massen af Mælkevejen er fordelt i en sfærisk symmetrisk halo af **mørkt stof**, der påvirker dynamikken (og derfor kinematikken) af Galaksen.

Forestil dig en stjerne eller gassky med masse m, kredsende om Galaksen med den galaktocentriske radius R. Keplers 3. lov sammen med antagelsen om jævn cirkelbevægelse giver:

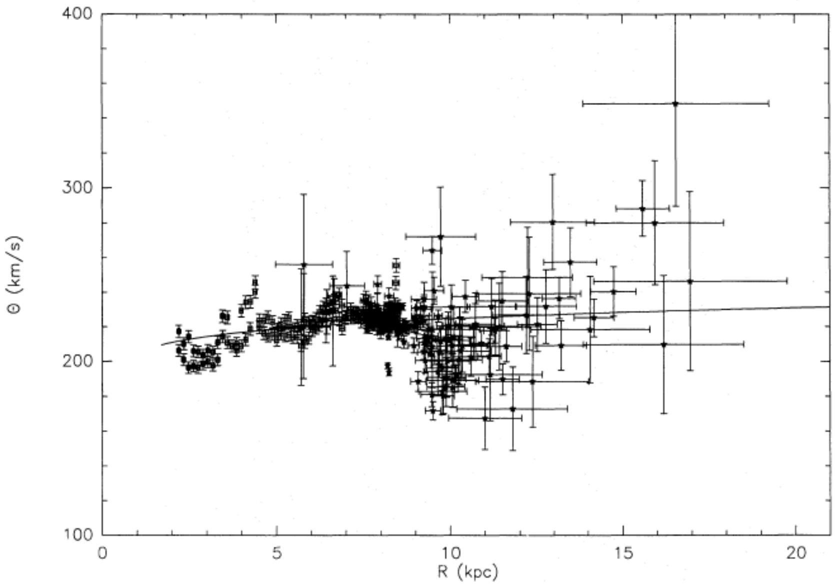
$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{G\cdot(M(<R)+m)}{(4\pi)^2} \Rightarrow \frac{R^3}{(2\pi R/V)^2} = \frac{G\cdot(M(<R)+m)}{(4\pi)^2} \Rightarrow M(<R) = \frac{R\cdot V^2}{G}$$

hvor $M(<R)$ er den samlede masse *indenfor R*, og G er gravitationskonstanten. m<<M, så den ser vi bort fra.

Ved således at måle V for en given R kan vi finde massen af Galaksen indenfor dette punkt. Det er klart, at jo større R, desto bedre estimat af totalmassen.

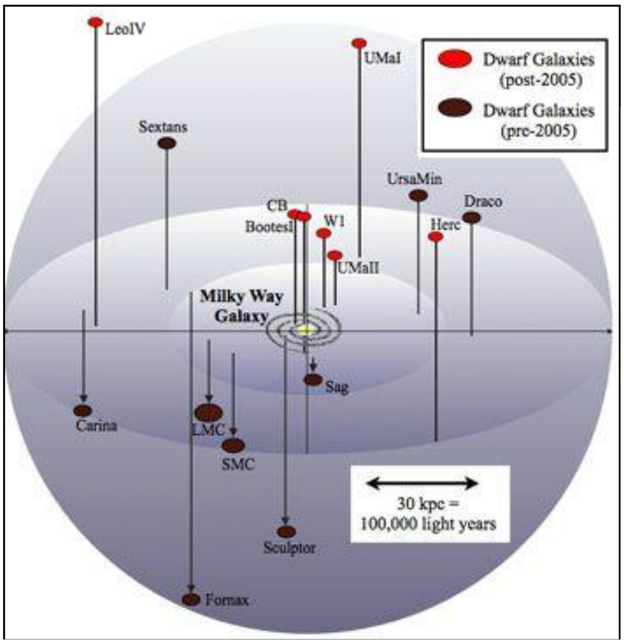
- Anvend værdierne fra tabel 2 svarende til den største *R-værdi* til at bestemme massen af Galaksen i solmasseenheder. *Vær forsigtig med dine enheder*. Benyt at $M_{Sol}=2\cdot10^{30}$kg, $G=6{,}67\cdot10^{-11}$ Nm^2/kg^2 og 1 pc=$3{,}086\cdot10^{16}$m. Dette er kun massen indenfor Solens bane.

- Brug den galaktiske rotationskurve nedenfor (fig. 5) til at finde massen af Galaksen indenfor den største radius, du kan måle fra kurven. (ca. 17kpc).

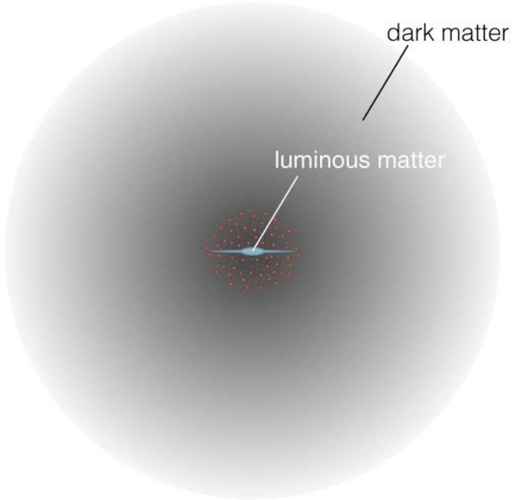


Figur 5. Galaktisk rotationskurve. (Brand og Blitz 1993)

- Målinger af hastighederne af dværggalakser (herunder de Magellanske skyer) i kredsløb om Mælkevejen (se figur 6), kan give det bedst mulige skøn af den samlede masse af Mælkevejen. Målinger af hastighederne af de Magellanske Skyer samt sfæriske dværggalakser i Sculptor samt Ursa Minor, giver hastigheder på $V \approx 175$ km/s ved galaktocentriske radier på R=100kpc. (Bell og Levine, 1997). Ved hjælp af disse værdier, skal du finde den totale masse af Mælkevejen. Sammenlign denne værdi med massen af stjerner i Mælkevejen på omkring $2{\cdot}10^{11} M_{\text{Sol}}$. Forskellen mellem disse værdier tilskrives **mørkt stof** (Figur 7).



Figur 6. Mælkevejens omgivelser.



Figur 7. En kunstners forestilling af mørkt-stof haloen omkring Mælkevejen.

Referencer

Bell, GR, og Levine, SE, 1997, BAAS, **29** (2): 1384

Brand J., Blitz L., 1993, A & A, **275**, 67

Kalberla, P.M.W. et al., 2005, A & A, **440**, 775