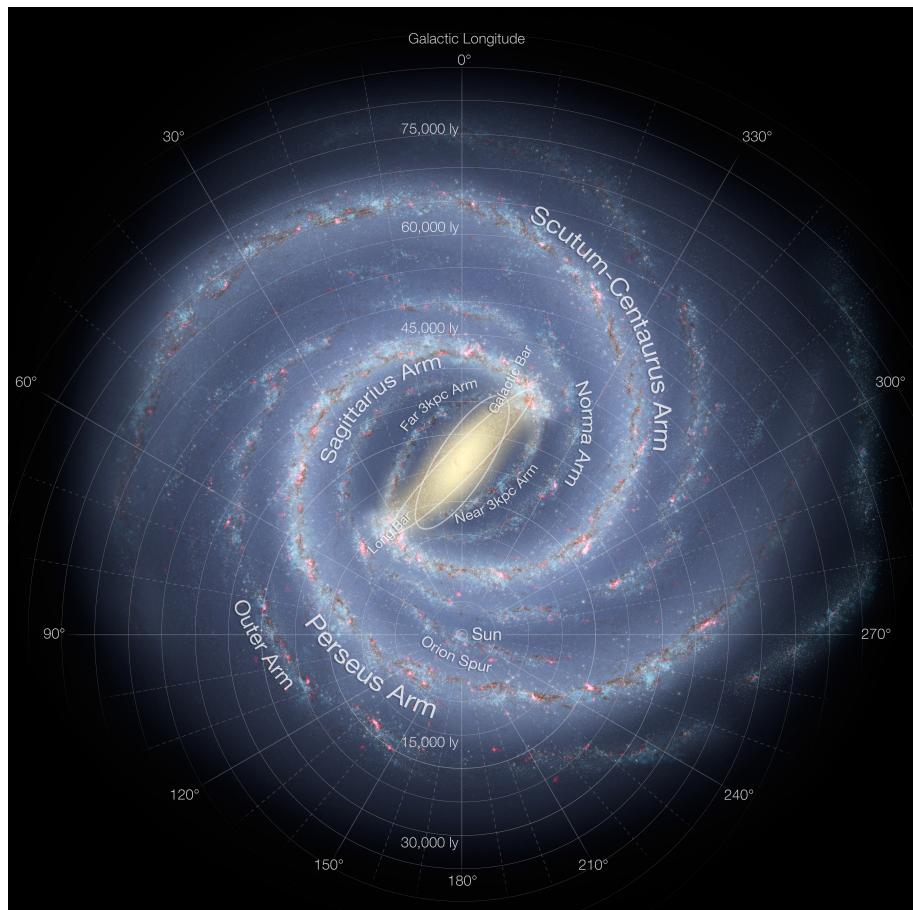


CHALMERS

SALSA projekt: Kartläggning av Vintergatan



Cathy Horellou, Daniel Johansson & Eskil Varenius
Onsala Space Observatory
Chalmers University of Technology
SE-439 92 Onsala
Sweden

Senast uppdaterad 2014-12-24 22:14

Innehåll

Sammanfattning	2
1 Välkommen till Vintergatan	3
1.1 Vår plats i Vintergatan	4
1.2 Galaktiska koordinater: longitud och latitud	4
1.3 Radiovågor från atomärt väte	5
1.4 Dopplereffekten	6
2 Vintergatans rörelse och struktur	8
2.1 Vintergatans rotationskurva	8
2.1.1 Att mäta rotationskurvan med SALSA	10
2.2 Kartläggning av Vintergatan	11
2.2.1 Att konvertera från (r, l) till kartesiska koordinater	12
2.2.2 Att göra en karta med SALSA	13
Bilagor	15
A Rotationskurvor	16
A.1 Stelkroppsrörelse	16
A.2 Keplersk rotation: Solsystemet	16
A.3 Rotationskurvan för en spiralgalax	16
B 21 cm observationer: En tillbakablick	19
Litteraturförteckning	20

Sammanfattning

SALSA-Onsala (“Sicken Attans Liten Söt Antenn”) är ett 2.3m diameter radioteleskop utvecklat av Onsala Rymdobservatorium för att introducera elever, studenter och lärare till radioastronomi. Den känsliga mottagaren gör det möjligt att detektera bland annat radiovågor från atomär vätgas lång bort i vår galax Vintergatan. Med hjälp av mätningarna så kan vi lära oss om hur gasen i galaxen roterar och skapa en karta som visar galaxens spiralstruktur.

I detta dokument så går beskriver vi det galaktiska koordinatsystemet och hur radiovågorna från väte uppkommer och hur vi kan relatera våra mätningar till hastighet genom Dopplerskift. Sedan beskriver vi hur SALSA kan användas för förstå hur snabbt vätgasen roterar på olika avstånd från galaxens centrum, d.v.s. vi skapar en *rotationskurva*. Slutligen så visas hur vi, med hjälp av rotationskurvan, kan skapa en karta över Vintergatan.

Observera att detta dokument fokuserar på den vetenskapliga förståelsen av mätningarna. Instruktioner för att styra teleskopet och göra mätningar finns i dokumentet *SALSA bruksanvisning* som du hittar på SALSA-hemsidan.

Omslagsbild: En konstnärs bild av Vintergatans spiralstruktur. Avstånd är i ljusår (ly) och riktningar i galaktiska koordinater. Källa: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt.

Kapitel 1

Välkommen till Vintergatan

När vi tittar upp mot himlen en mörk, stjärnklar natt, så kan vi se ett ljusstarkt band sträcka sig över himlen. Om du tittar med en kikare eller med ett teleskop, som Galileo gjorde år 1609, så upptäcker du att bandet består av ett stort antal stjärnor. Detta är vår galax, **Vintergatan**, så som den ser ut från jorden. Den består av omkring hundra miljarder stjärnor, och Solen är en av dem. Det finns många andra galaxer i Universum.

Det tog lång tid för astronomer att förstå hur Vintergatan verkligen ser ut. Man skulle vilja åka ut i ett rymdskepp och observera galaxen utifrån, men det kommer aldrig att kunna gå eftersom den resan är för lång. Vi måste därför bestämma Vintergatans struktur från vår egen plats inuti den.

Observationer med optiska- och radioteleskop av Vintergatan och andra galaxer har använts för att förstå Vintergatans struktur. Idag så har vi mycket kunskap om vår galax; den består av en skiva (disk) av stjärnor och gas, som är fördelade i olika spiralarmar.

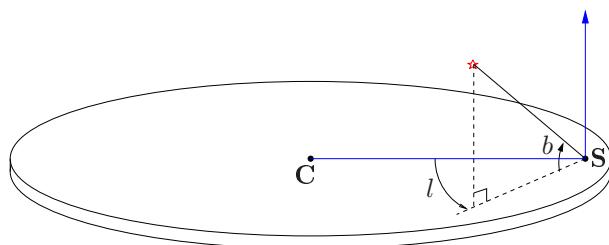
När man äntligen trodde att man förstod hur Vintergatan var uppbyggd, uppkom ett nytt mysterium! Man observerade hastigheterna hos stjärnor långt ut i galaxen, och kunde se att de roterade alldeles för snabbt i förhållande till hur mycket massa man kunde se. Man tror nu att galaxen innehåller stora mängder av **mörk materia**, något som vi inte kan se men som påverkar galaxens rörelse genom gravitation. Man kan jämföra den mörka materiens inverkan med en man och en kvinna som dansar i ett helt mörkt rum. Mannen har på sig mörka kläder och syns därför inte, medan kvinnan har på sig självlysande färger. När de dansar, ser man bara kvinnan, inte mannen, men man förstår att mannen måste vara där eftersom annars skulle kvinnan flyga iväg då hon har väldigt hög fart. Radioobservationer har hjälpt till att upptäcka den mörka materian, men man vet fortfarande inte vad den består av.

1.1 Vår plats i Vintergatan

Vår stjärna, Solen, och dess solsystem, befinner sig i den yttre delen av Vintergatan, ungefär 8,5 kpc¹ (25000 ly²) från galaxens centrum. Den största delen av gasen och stjärnorna finns i den tunna skiva och roterar runt galaxens centrum. Solen roterar runt centrum av galaxen med en hastighet av 220 km/s och tar ca 240 miljoner år på sig att fullfölja ett varv runt galaxen.

1.2 Galaktiska koordinater: longitud och latitud

För att beskriva positioner för astronomiska objekt använder man olika typer av koordinatsystem. I vår galax är det smidigt att använda det galaktiska koordinatsystemet (l, b) , där l är den galaktiska *longituden* och b är den galaktiska *latituden* (se figur 1.1 och 1.2). Koordinatsystemet är centrerat kring solen. $b = 0^\circ$ motsvarar riktningar i det galaktiska planet. Latituden $b = 90^\circ$ kallas den Galaktiska Nordpolen. Longituden l mäts moturs från riktningen från solen mot det galaktiska centrumet, som alltså har koordinaterna $(l = 0, b = 0)$. I galaxens centrum finns något väldigt speciellt; en stor massa som är ungefär tre miljoner gånger tyngre än solen. Vi vet idag att det är ett väldigt massivt svart hål. Från detta område, kallat Sagittarius A, har astronomer detekterat stark radio- och röntgenstrålning.



Figur 1.1: Illustration av det galaktiska koordinatsystemet, med longitud (l) och latitud (b). **C** markerar det galaktiska centret, **S** solen.

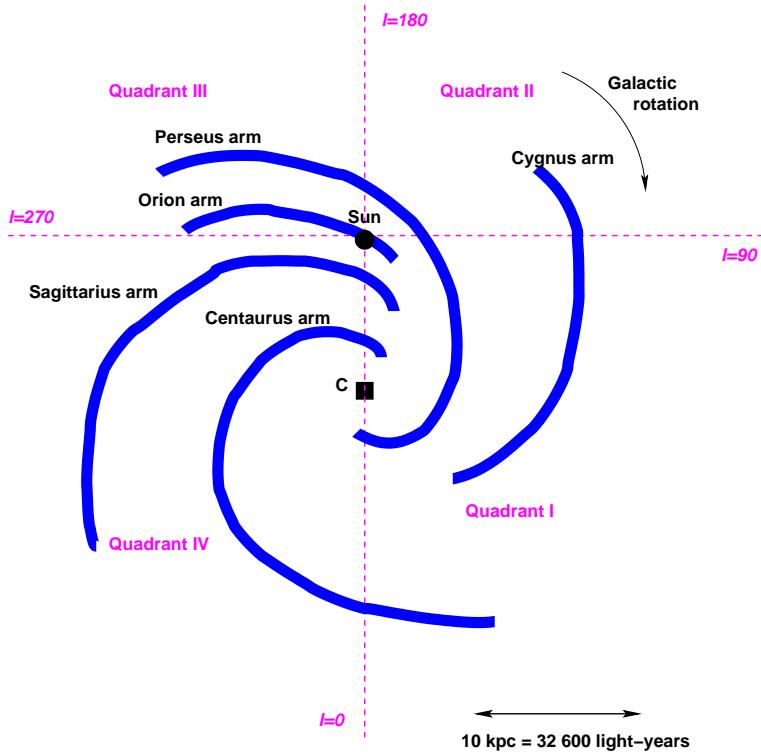
Galaxen kan delas in i fyra kvadranten betecknade med Romerska tal:

Kvadrant I	$0^\circ < l < 90^\circ$
Kvadrant II	$90^\circ < l < 180^\circ$
Kvadrant III	$180^\circ < l < 270^\circ$
Kvadrant IV	$270^\circ < l < 360^\circ$

I första och fjärde kvadranten så observerar vi framförallt den inre delen av vår galax. Kvadranterna tre och fyra innehåller materia som är längre bort från galaxens centrum än Solen.

¹1 kpc = 1 kiloparsec = 10^3 pc; 1 parallax-sekund (parsec, pc) = $3.086 \cdot 10^{16}$ m.

²1 ljusår (ly) = $9.4605 \cdot 10^{15}$ m



Figur 1.2: En skiss över Vintergatans spiralstruktur. Galaxens centrum är vid punkten **C**. De fyra kvadranterna är markerade som Quadrant I till IV.

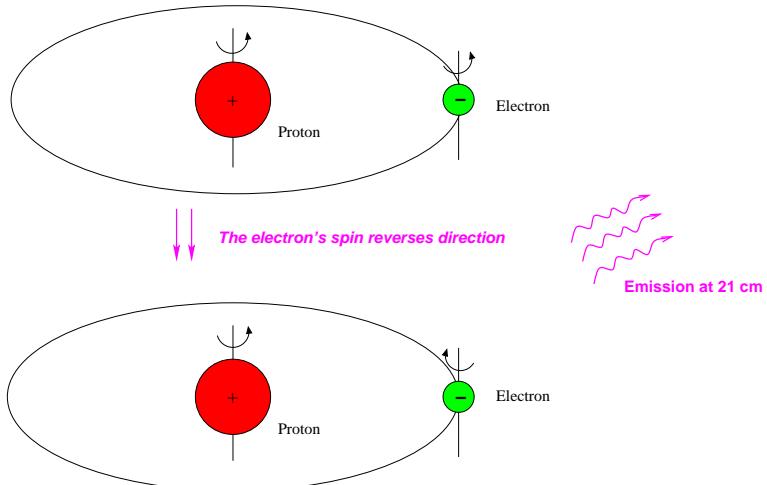
1.3 Radiovågor från atomärt väte

Den största delen av gasen i Vintergatan är i form av atomärt väte (H). Väte är den enklaste atomen, den har bara en proton och en elektron. Atomärt väte skickar ut radiovågor med våglängden $\lambda = 21$ cm (eller en frekvens på $f = c/\lambda = 1420$ MHz, där $c \simeq 300000$ km/s är ljusets hastighet). Det är denna signal som vi vill mäta med SALSA.

$$\lambda = 21 \text{ cm} \Rightarrow f = c/\lambda = 1420 \text{ MHz} \quad (1.1)$$

Vätelinjen uppkommer när elektronens spinn byter riktning från att vara parallellt till antiparallellt med protonens (se figur 1.3). Det resulterar i att atomen går ner till det lägre energitillståndet, (se fig 1.3). Spinn är en kvantmekanisk egenskap hos partiklar som enklast kan förklaras med att partikeln roterar kring sin egen axel. För väteatomen kan man räkna ut att den totala energin är mindre då spinnen är anti-parallel. Eftersom naturen alltid strävar mot att vara i ett så lågt energitillstånd som möjligt, kommer väteatomer där spinnen är parallella att gå över i det lägre energitillståndet med en viss sannolikhet. Övergången sker spontant ungefär efter tio miljoner år för en väteatom, men eftersom det finns så otroligt många väteatomer i universum blir vätelinjen väldigt stark.

Den Holländske astronomen H.C. van de Hulst förutspådde teoretiskt att 21 cm linjen skulle finnas år 1945. Linjen detekterades för första gången år 1951 av tre forskargrupper i USA, Holland och Australien (se Appendix B).



Figur 1.3: Illustration av 21 cm övergången hos väteatomen, vilken orsakas av energiändringen då elektronens spinn ändras från parallellt till antiparallellt jämfört med protonens.

1.4 Dopplereffekten

Genom att observera radiovågor från väte så kan vi lära oss om rörelsen för vätgasmolnen i Vintergatan. Det är nämligen möjligt att relatera den observerade *frekvensen till hastigheten hos det strålande molnet*, genom den så kallade *Dopplereffekten*.

Denna effekt, uppkallad efter den österrikiske fysikern Christian Johann Doppler (1803–1853), finns också i vår vardag; till exempel om du står still på gatan och en ambulans färdas *mot* dig. Då hör du ambulansens sirener med *en högre frekvens (tonhöjd)* än om ambulansen varit parkerad på gatan. På samma sätt så blir tonen lägre om ambulansen åker *från* dig. Eftersom ljudvågor färdas genom luften för att nå dig så kan du tänka dig att vågorna pressas samman när ambulansen rör sig mot dig. Därför blir våglängden kortare och du hör en högre frekvens. Detta är dopplereffekten.

Vi kan använda dopplereffekten för att relatera den frekvens som vi observerar till hastigheten hos det strålande vätgasmolnet genom en matematisk formel:

$$\boxed{\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{v}{c}} \quad (1.2)$$

där

Δf	= $f - f_0$	frekvensskiften,
f		observerad frekvens
f_0		vilofrekvens
v		hastighet, > 0 om objektet vi observerar rör sig bortåt < 0 om det rör sig mot oss.

För att observera radiovågor från vätegas i Vintergatan så ställer vi in mottagaren i vårt radioteleskop att mäta på frekvenser nära vilofrekvensen för vätelinjen, d.v.s. den frekvens vi skulle se om det inte fanns någon relativ rörelse. Moln med olika hastighet visar sig då vid olika

frekvenser. Frekvensen skiftas uppåt eller nedåt beroende på om gasen rör sig mot os eller från oss.

Kapitel 2

Vintergatans rörelse och struktur

I detta kapitel så beskriver vi hur SALSA kan användas för att mäta Vintergatans rörelse och struktur. Vi förklarar först hur vi kan mäta rotationskurvan, d.v.s. rotationshastigheten för gas på olika avstånd från galaxens centrum. Med hjälp av denna kunskap så gör vi sedan en karta över Vintergatan.

2.1 Vintergatans rotationskurva

En rotationskurva är en funktion som beskriver rotationshastigheten V för galaxen vid olika avstånd R från dess centrum, och betecknas vanligen $V(R)$. För att konstruera rotationskurvan från mätningar med SALSA så måste vi först förstå hur den hastighet som vi observerar (genom Dopplereffekten) relaterar till gasmolnens rörelse i galaxen. Anta att vi pekar vårt radioteleskop mot ett gasmoln i galaxen, d.v.s. vi observerar längs den gröna linjen i figur 2.1. För framtida beräkningar så ger vi här en förklaring på de storheter som betecknas i figuren:

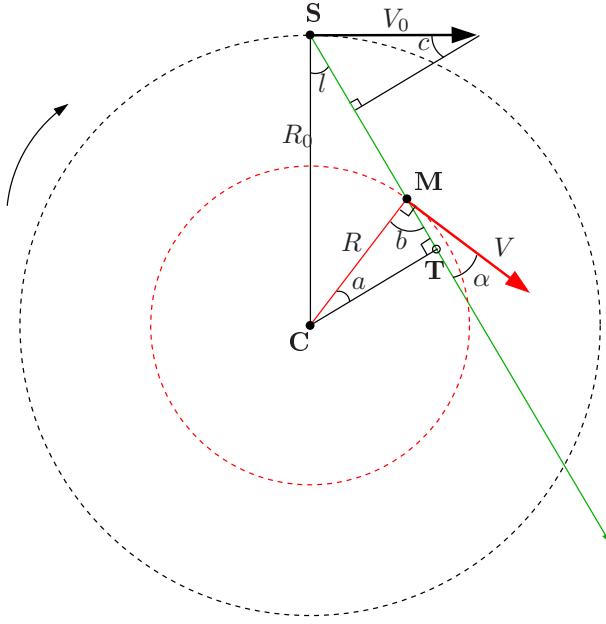
V_0	Solens hastighet runt galaxens centrum, d.v.s. 220 km/s
R_0	Avståndet mellan Solen och galaxens centrum, d.v.s. 8.5 kpc
l	Vald galaktisk longitud för vår observation
V	Hastigheten för gasmolnet
R	Avståndet mellan gasmolnet och galaxens centrum

Det kan finnas många moln i denna riktning, men i denna härledning så bryr vi oss bara om det moln som finns vid positionen M i figur 2.1. Eftersom både solen och molnet rör sig så mäter vi inte molnets hastighet direkt. Vi mäter istället den relativ hastigheten, V_r , mellan oss och molnet, projicerad på siktlinjen. Med vinklarna angivna i figure 2.1 så kan vi skriva ner detta som

$$V_r = V \cos \alpha - V_0 \sin c. \quad (2.1)$$

För att vi ska kunna använda denna ekvation så måste vi relatera vinklarna till det galaktiska koordinatsystemet som vi beskrev i avsnitt 1.2. Vi vet att summan av vinklarna i en övre rätvinkliga triangeln måste vara 180° , vilket innebär att vi kan relatera vinkeln c till den galaktiska longituden l på följande vis:

$$(90 - l) + 90 + c = 180 \Rightarrow c = l. \quad (2.2)$$



Figur 2.1: Vintergatans geometri. **C** markerar galaxens centrum, **S** är Solens position, och **M** är ett gasmoln som vi vill observera. Pilen vid sidan visar åt vilket håll galaxen roterar. Pilarna visar hastigheten för Solen (V_0) och för gasmolner (V).

Vi vill nu relatera även vinkeln α till longituden l . Vi ser att vinkeln mellan V och R är rät och kan skrivas som summan av a och α , d.v.s $90^\circ = b + \alpha$. Vidare ser vi från triangeln **CMT** att $b = 90^\circ - a$. Sammantaget ger detta

$$90 = 90 - a + \alpha \quad \Rightarrow \quad a = \alpha \quad (2.3)$$

Från de två trianglarna **CST** och **CMT** ser vi att vi kan skriva avståndet mellan galaxens centrum (**C**) och tangentpunkten (**T**) på två olika sätt:

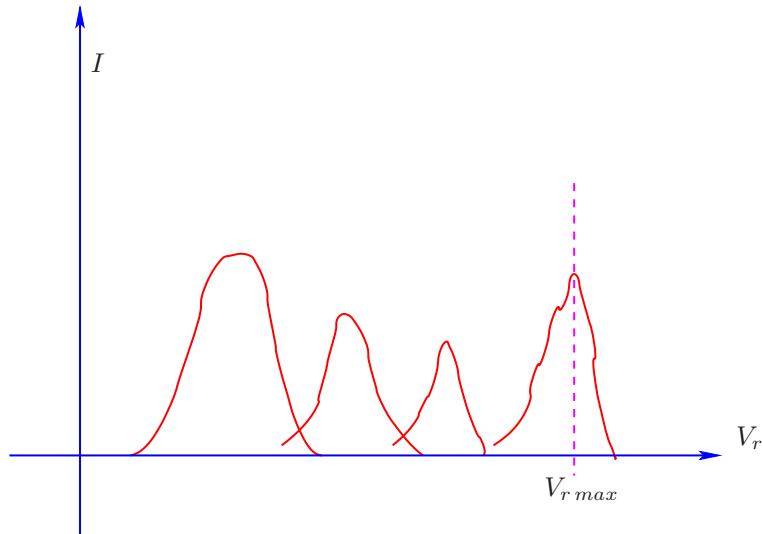
$$\mathbf{CT} = R_0 \sin l = R \cos a \quad \Rightarrow \quad \cos a = \frac{R_0 \sin l}{R} \quad (2.4)$$

Genom att använda ekvationerna 2.2, 2.3 och 2.4 så kan vi nu skriva om ekvation 2.1 såhär:

$$V_r = V \frac{R_0}{R} \sin l - V_0 \sin l. \quad (2.5)$$

Denna ekvation fungerar för alla longituder l . Men, att bara mäta V_r för ett givet l är inte tillräckligt för att lösa denna ekvation för att få fram både V och R . Därför begränsar vi oss till de värden på l som ligger i den första kvadranten, och vi använder endast den maximala hastigheten som vi mäter i varje spektrum. Hur kan detta göra vårt problem lättare att lösa?

Jo, i varje riktning så kan vi detektera strålning från flera gasmoln samtidigt. Eftersom molnen rör sig med olika relativ hastigheter så ser vi flera komponenter i vårt spektrum, se t.ex. figur 2.2. Vi antar nu att moln som är längre bort från galaxens centrum än solen rör sig med samma eller lägre hastighet som de moln närmare centrum, som vi väntar oss



Figur 2.2: Ett spektrum kan innehålla flera hastighetskomponenter, där varje komponent motsvarar ett moln med en viss relativ hastighet.

från normal Kepleriansk rörelse, (se Appendix. A.2). Detta innebär att komponenten med den **högsta hastigheten**, $V_{r,\max}$, kommer från ett moln som befinner sig **vid tangentpunkten** (**T**), eftersom den maximala möjliga projicerade hastigheten uppmäts när projiceringsvinkeln är 0 grader. För ett moln vid tangentpunkten så ser vi från figur 2.1 att molnets position ges av

$$R = R_0 \sin l. \quad (2.6)$$

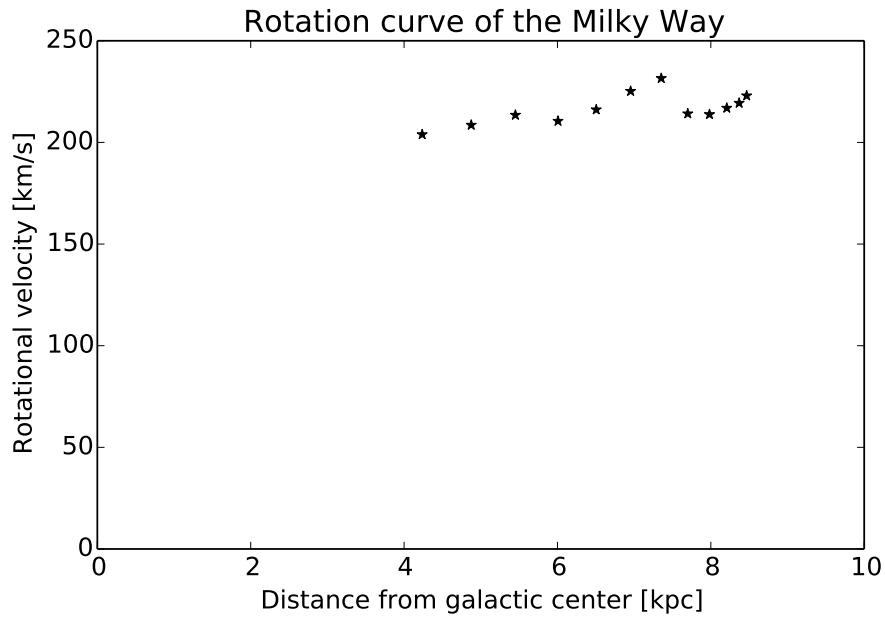
Detta förenklar ekvation 2.5 så att vi nu, för ett moln vid tangentpunkten, kan beräkna hastigheten som

$$V = V_{r,\max} + V_0 \sin l. \quad (2.7)$$

Vi kan alltså använda SALSA för att mäta $V_{r,\max}$ vid flera olika l i första kvadranten. Genom att angärda ekvationerna 2.6 och 2.7 så kan vi beräkna rotationskurvan $V(R)$. Det är rimligt att anta att rotationskurvan är densamma även i de andra tre kvadranterna.

2.1.1 Att mäta rotationskurvan med SALSA

Efter att ha läst föregående avsnitt så bör du ha en ide om hur du kan mäta rotationskurvan med SALSA. Instruktioner för hur du använder teleskopet finns i dokumentet *SALSA bruksanvisning* som du hittar på SALSA-hemsidan. När du har observerat några spektra vid olika längder, skriv ner den maximala hastigheten för varje spektrum och rita upp rotationskurvan. Det enklaste sättet att få fram hastigheter är att använda pekaren direkt i kontrollprogrammet och notera värdena från grafen, men du kan också använda mer avancerade verktyg såsom Matlab. Instruktioner för hur du tar fram mätvärden från dina spektra finns i dokumentet *SALSA bruksanvisning*. För att rita upp rotationskurvan så kan du använda något program som du är van vid. Ett enkelt och gratis program är det Excel-likt LibreOffice Calc, där du kan skriva in dina beräknade värden på V och R i ett kalkylark och sedan använda en **xy**-chart för



Figur 2.3: En rotationskurva uppmätt med SALSA.

att rita upp rotationskurvan. Ditt resultat bör likna figur 2.3. Observera att rotationskurvan är nästan platt! Detta är ett indirekt bevis för mörk materia i vår galax. Du kan också jämföra dina resultat med resultaten i Appendix A.

2.2 Kartläggning av Vintergatan

Nu vill vi ta reda på *var* gasen som vi observerat befinner sig. Låt oss därför återgå till ekvation 2.5. När vi tog fram rotationskurvan så använde vi bara den högsta hastighetskomponenten i varje spektrum, och vi antog att denna kommer från ett gasmoln vid tangentpunkten. Detta antagande gjorde det möjligt att lösa ekvation 2.5 i första kvadranten. Nu ska vi använda *alla hastighetskomponenter* som vi ser i varje spektrum, och vi vill kunna observera i alla riktningar, inte bara i första kvadranten. Nu kan vi använda vår kunskap om rotationskurvan som vi tagit fram i avsnitt 2.1.1. Från vår uppmätta rotationskurva så antar vi nu att gasen i Vintergatan roterar *differentiellt*, d.v.s. att rotationshastigheten är konstant oavsett avstånd från centrum, och att den är samma som solens hastighet. Vi antar alltså att

$$V(R) = \text{constant} = V_0. \quad (2.8)$$

Med detta antagande så förenklas ekvation 2.5 till

$$V_r = V_0 \sin l \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right). \quad (2.9)$$

Denna ekvation kan skrivas om till ett uttryck för molnets position R som funktion av kända (eller observerbara som V_r) storheter och vi får

$$R = \frac{R_0 V_0 \sin l}{V_0 \sin l + V_r}. \quad (2.10)$$

Nu vill vi skapa en karta över Vintergatan från de moln vi detekterat. Från våra mätningar av den relativa hastigheten V_r för varje moln så kan vi beräkna avståndet mellan molnet och galaxens centrum. Eftersom vi vet vilken riktning vi observerat (vår galaktiska longitud l) så kan vi få fram molnets position.

Det är viktigt att notera att om du observera i kvadrant II eller III, då finns det bara en möjlig position för det strålande gasmolnet. Men, om du observerar i kvadrant I eller IV, då kan det finnas *två möjliga positioners* som motsvarar l or R : antingen närmare oss än tangentpunkten T (d.v.s punkten som markerats med **M** i figur 2.1), eller längre bort, vid skärningen mellan linjen **ST** och den inre cirkeln (se figur 2.1). **Du kanske vill rita upp detta för att vara säker på att det stämmer.**

Denna tvetydighet för positioner kan också visas matematiskt. Låt r vara avståndet från solen till molnet, d.v.s. avståndet mellan punkterna **S** och **M** i figur 2.1. Genom att använda cosinussatsen på triangeln **CSM** så får vi följande samband:

$$R^2 = R_0^2 + r^2 - 2R_0 r \cos l. \quad (2.11)$$

Detta är en andragradsekvation i r , som har två möjliga lösningar. Om vi kallar dessa lösningar $r = r_+$ and $r = r_-$, så kan vi skriva ner ett allmänt uttryck för lösningarna som

$$r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l} + R_0 \cos l. \quad (2.12)$$

I kvadranterna II och III så är R alltid större än R_0 och $\cos l < 0$, vilket innebär att det finns en och endast en positiv lösning r_+ . Den negativa lösningen är inte fysikaliskt intressant här (vi tittar inte genom jorden) och därför ignoreras vi den. I kvadranterna I och IV så kan det finnas två möjliga positiva lösningar. I sådana fall så är det inte möjligt att bestämma vilken som är rätt utan att göra fler observationer. För att reda ut vilken lösning som är sann så kan vi observera igen mot samma galaktiska longitud men med en liten (några grader) vinkel även i latitud. Om det tvetydiga molnet är långt bort så bör det nu försvinna. Om molnet är nära så bör det fortfarande synas, även om vi observerar i en riktning aningen ut från galaxens plan. Här kan du behöva prova dig fram för att hitta rätt latitud för att reda ut tvetydigheten.

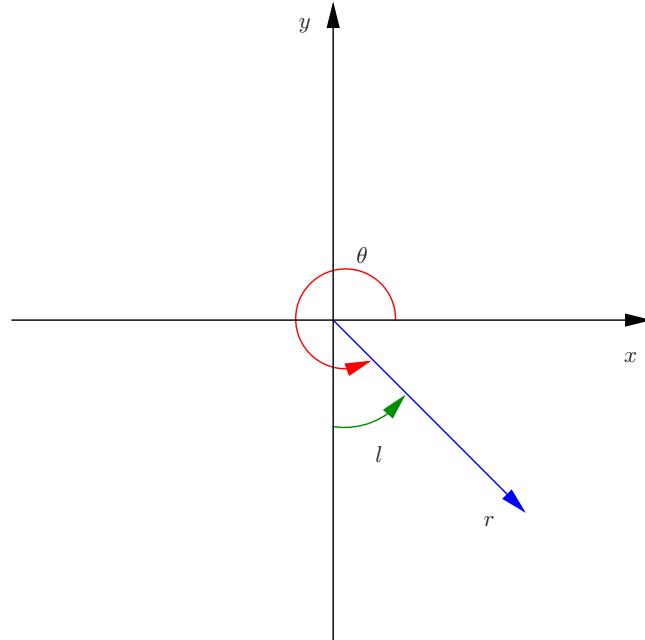
2.2.1 Att konvertera från (r, l) till kartesiska koordinater

För att rita upp en karta så kan det vara opraktiskt att använda koordinaterna r (avståndet till molnet från solen) och l (galaktisk longitud) för att beskriva molnets position. Istället så är det oftast smidigare att konvertera till kartesiska koordinater (x, y) . För att göra detta så måste vi relatera (r, l) till (x, y) .

Du är förmodligen bekant med *polära koordinater*, som vanligen skrivs

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases} \quad (2.13)$$

där r är avståndet från origo och θ är rotationsvinkeln, och x and y är kartesiska koordinater. Dessa polära koordinater är väldigt lika våra koordinater (r, l) , se figur 2.4. Vi ser att $\theta =$



Figur 2.4: Illustration av polära (r, θ) och våra (r, l) koordinater.

$270^\circ + l$, eller $\theta = l - 90^\circ$. Detta innebär att vi kan konvertera våra positioner från (r, l) till kartesiska (x, y) genom ekvationerna

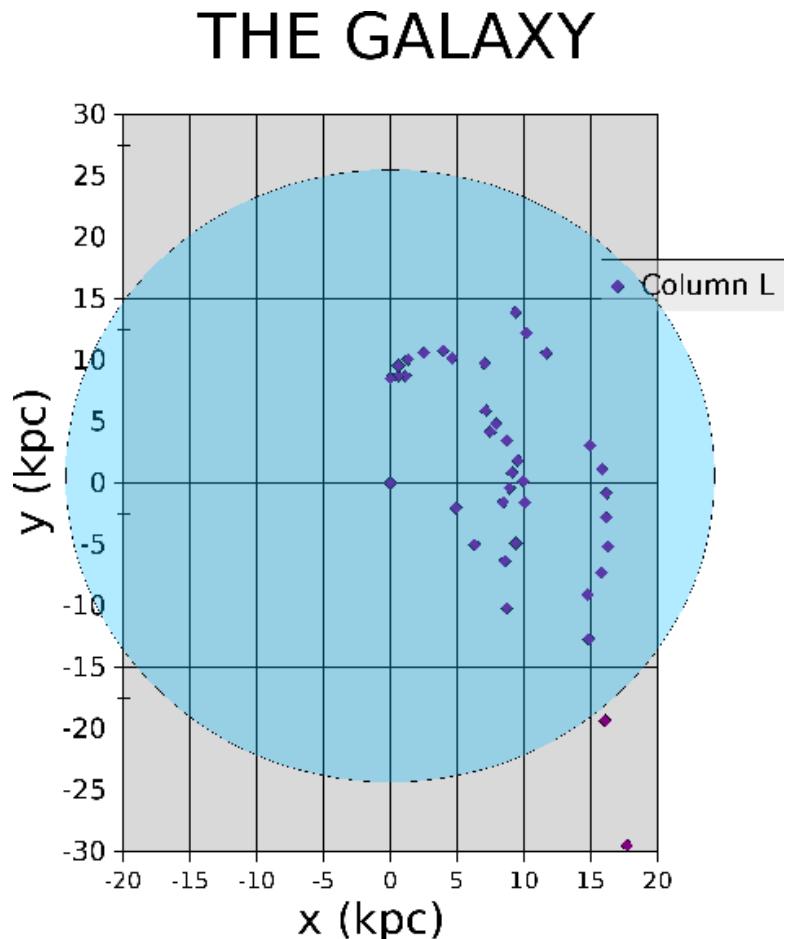
$$\begin{cases} x = r \cos(l - 90^\circ) \\ y = r \sin(l - 90^\circ) \end{cases} \quad (2.14)$$

Detta format är vanligtvis det mest praktiska för att rita upp en karta.

2.2.2 Att göra en karta med SALSA

Efter att ha läst föregående avsnitt så bör du ha en idé om hur du kan skapa en karta från uppmätta hastigheter. Dessa mätningar görs på samma sätt som du gjorde i avsnitt 2.1.1, men nu kan du mäta i alla kvadranten. Du kan nu också använda alla hastighetskomponenter i dina spektra. Återigen så finns instruktioner för hur du använder teleskopet i dokumentet *SALSA bruksanvisning* som du hittar på SALSA-hemsidan. När du har observerat några spektra vid olika longituder, skriv ner den vilka hastigheter som du ser i varje spektrum. Det enklaste sättet att få fram hastigheter är att använda pekaren direkt i kontrollprogrammet och notera värdena från grafen, men du kan också använda mer avancerade verktyg såsom Matlab. Instruktioner för hur du tar fram mätvärden från dina spektra finns i dokumentet *SALSA bruksanvisning*.

När du har en lista över uppmätta hastigheter för flera longituder så kan du använda ekvation 2.12 för att hitta positionen för molnen. Notera att observationer i kvadranten I och IV kan behöva kompletteras med ytterligare observationer för att reda ut eventuella tvetydigheter, se föregående avsnitt.



Figur 2.5: En karta över en del av Vintergatan gjord med data från SALSA. Kartan har ritats med *xy*-chart in LibreOffice. Vi kan tydligt se delar av spiralarmarna. Den blå cirkeln representerar galaxens utsträckning, med en diameter på ca 50 kpc.

För att göra din slutliga karta så kan du använda ditt favoritprogram. Återigen så är ett enkelt och gratis program det Excel-likt LibreOffice Calc, där du kan skriva in dina beräknade värden (x, y) i ett kalkylark och sedan använda en *xy*-chart för att rita upp din karta. Din slutliga karta liknar troligen figur 2.3, men kartans exakta utseende kommer att bero på de riktningar du observerat. Du kanske också vill jämföra med kartan om omslaget till detta dokument.

Bilagor

Bilaga A

Rotationskurvor

En rotationskurva visar den cirkulära hastigheten som funktion av radien. Inom astronomi använder man en galax rotationskurva för att räkna ut dess massa. Här diskuterar vi tre exempel på rotationskurvor och visar dem i figur A.1.

A.1 Stelkroppsrörelse

Tänk dig en roterande stel kropp, tex en cd-skiva. Den roterar med konstant vinkelhastighet $\Omega = \frac{V}{R} = \text{konstant}$. Hastigheten är alltså proportionell mot radien:

$$V \propto R. \quad (\text{A.1})$$

A.2 Keplersk rotation: Solsystemet

I solsystemet har planeterna en försumbar massa i jämförelse med solens massa. Därför är masscentrum i solsystemet väldigt nära solens centrum. Centrifugalaccelerationen från planeternas hastigheter balanserar gravitationsaccelerationen:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM}{R^2} \quad (\text{A.2})$$

där M är massan och G gravitationskonstanten. Man säger att rotationskurvan är *Keplersk* och hastigheterna minskar när radien ökar.

$$V_{\text{Keplerian}}(R) = \sqrt{\frac{GM}{R}}. \quad (\text{A.3})$$

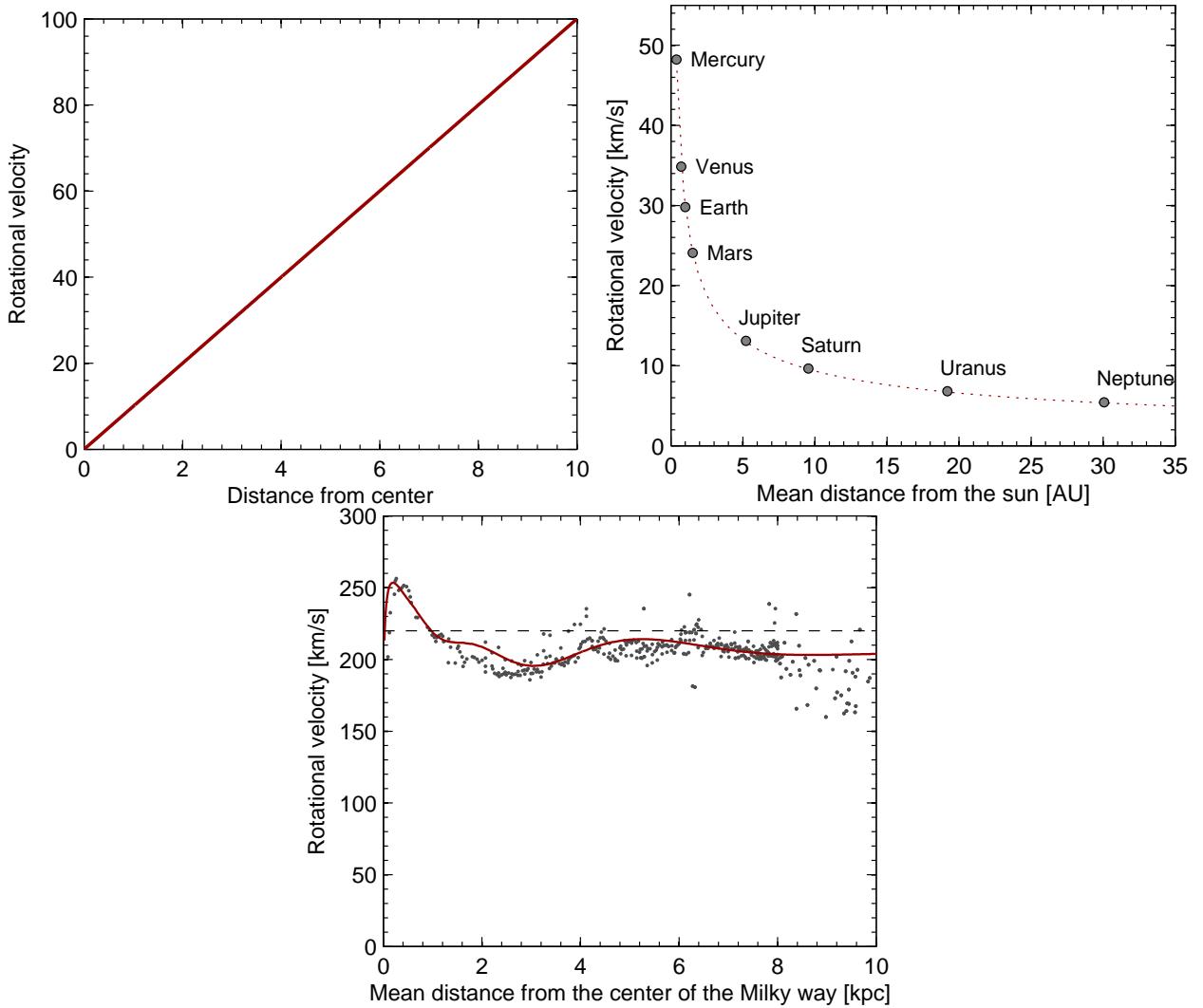
A.3 Rotationskurvan för en spiralgalax

Rotationskurvorna för de flesta galaxer är konstanta efter en viss radie (platta") till skillnad från solsystemet där rotationskurvan minskar med radien.

$$V_{\text{Galaxy}}(R) = \text{constant} \quad (\text{A.4})$$

Vinkelhastigheten, Ω , varierar med $\Omega \propto 1/R$. Materia nära centrum roterar med en högre vinkelhastighet, jämfört med materia längre ut i en galax.

Vid stora radier är hastigheterna märkbart större än i det keplerska fallet. Detta är en indikation på att det existerar extra materia långt ut i galaxerna. Detta är ett indirekt sätt att visa att det finns mörk materia i galaxer.



Figur A.1: *Uppe till vänster:* Stelkroppsrörelse (till exempel en roterande cd skiva) *Uppe till höger:* Rotationshastigheterna för planeterna i solsystemet. Linjen motsvarar Keplers lag (ekvation. (A.3)) med vilken planeters rörelse stämmer bra överens. Avståndsskalan är utritad i så kallade *Astronomiska enheter* (AU) vilket är avståndet mellan jorden och solen. $1\text{AU} = 150 \cdot 10^6 \text{km}$. *Nedre bilden:* Vintergatans rotationskurva (prickar) och en modell som beskriver mätningarna (linje). Eftersom materialet i Vintergatan är utspridd över hela galaxen, följer inte rotationskurvan Keplers lag, som den skulle gjord om all materia var koncentrerad i mitten. (Data från Sofue et al, 2009)

Bilaga B

21 cm observationer: En tillbakablick

Historien kring upptäckten av 21 cm linjen är fascinerande eftersom den utspelar sig under andra världskriget då internationella vetenskapskontakter var svåra och många forskare fick kämpa för att upprätthålla sin forskning.

H.C. van de Hulst, en Holländsk student, presenterade en rapport vid ett möte i Leiden 1944 där han visade att en hyperfin övergång för neutralt väte producerar strålning med våglängden 21 cm. Van de Hulst var precis som andra forskare vid den här tiden isolerade på grund av nazisternas ockupation. En artikel publicerades 1945 i en Holländsk tidskrift.

Efter kriget började flera forskargrupper i olika länder bygga utrustning som kunde detektera 21 cm strålningen. Den observerades först av Ewen & Purcell den 21 mars 1951 i USA; och senare samma år i Holland av Muller & Oort i maj. Deras artiklar publicerades i samma utgåva av tidskriften *Nature* samma år. 1952 upptäckte även Christiansen och Hindman linjen i Australien.

Den första systematiska undersökningen av HI i vår Galax gjordes i Holland av van de Hulst, Muller och Oort. De använde en parabol från en tysk radarmottagare. Antennen var 7.5 m i diameter och vinkelupplösningen var ungefär 2 grader.



Figur B.1: H.I. ("Doc") Ewen tillsammans med sin hornantenn vid ett besök till NRAO-Green Bank i Maj 2001. Han hade inte sett sin antenn sedan 1956!. ("NRAO / AUI / NSF")

Litteraturförteckning

- [1] Bakker, C.J., van de Hulst, H.C., 1945, Nederl. Tijds. v. Natuurkunde 11, 201, (Bakker, “Ontvangst [reception] der radiogolven”; van de Hulst, “Herkomst [origin] der radiogolven”)
- [2] Burton, W.B., in Galactic and Extragalactic Radio Astronomy, 1988, Verschuur G.L., Kellermann, K.I. (editors), Springer-Verlag
- [3] Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., Laloë, F., 1986, Quantum Mechanics, Vol. 1 and 2, Wiley-VCH (see Chapters VII.C and XII.D about the hydrogen atom)
- [4] Ewen, H.I., Purcell, E.M., 1951, Nature 168, 356, Radiation from galactic hydrogen at 1420 Mc/s
- [5] Hulst, H.C. van de, Muller, C.A., Oort, J.H., 1954, B.A.N. 12, 117 (No. 452), The spiral structure of the outer part of the galactic system derived from the hydrogen emission at 21-cm wavelength
- [6] Lang, K.R., 1999, Astrophysical Formulae, Volume II, Space, Time, Matter, and Cosmology, Springer-Verlag
- [7] Muller, C.A., Oort, J.H. 1951, Nature 168, 357, The interstellar hydrogen line at 1420 Mc/s, and an estimate of galactic rotation
- [8] Peebles, P.J.E., 1992, Quantum Mechanics, Princeton University Press, p. 273–303
- [9] Rigden, J.S., 2003, Hydrogen, The Essential Element, chap. 7, Harvard University Press
- [10] Shklovsky, I.S., 1960, Cosmic Radio Waves, translated by R.B. Rodman and C.M. Varsavsky, Harvard University Press
- [11] Sofue, Y., Honma, M., and Omodaka, T. (2009). Unified Rotation Curve of the Galaxy – Decomposition into de Vaucouleurs Bulge, Disk, Dark Halo, and the 9-kpc Rotation Dip. PASJ, 61:227.