

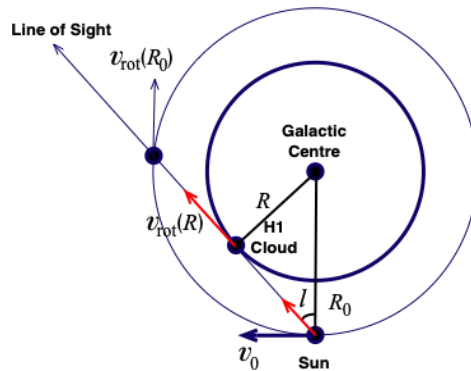
Avdekking av galaktisk mørk materie ved hjelp av et radioteleskop

Universet inneholder en stor andel mørk materie. Du vil oppdage den mørke materien i vår galakse ved å måle den tangentielle rotasjonshastigheten til gass i skiven av vår galakse. Gassen i Melkeveiens skive inneholder nøytralt atomært hydrogen (HI) som kan oppdages ved hjelp av dets spinn-flip-overgang, som tilsvarer en hvilefrekvens på $f_0 = 1420.40575$ MHz. Rotasjonshastigheten til gassen i galaksen kan måles ved hjelp av dopplerverskyvningen av denne overgangen.

Din oppgave er å måle spektrene av radioemisjon mellom 1419.0 MHz og 1421.0 MHz som sendes ut av gass i den galaktiske skiven ved forskjellige lengdegrader i det galaktiske planet ved hjelp av et radioteleskop som er stilt til din disposisjon. Du vil analysere disse dataene for å måle rotasjonskurven for Melkeveien. Basert på de målte rotasjonshastighetene, vil du estimere den innesluttete massen innenfor forskjellige galaktosentriske avstander, sammenligne dem med den kjente baryoniske massen i galaksen innenfor tilsvarende radier og tilskrive eventuelle forskjeller til mørk materie.

Teoretisk bakgrunn

Anta at all gass i Galaksen beveger seg med klokken i sirkulære baner i forskjellige avstander fra det galaktiske sentrum, som vist i figuren nedenfor. Gass beveger seg med en rotasjonshastighet ($v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$) ved Solens posisjon. Referanserammen som roterer med denne hastigheten kalles den lokale hvilestandard (LSR). Merk at Solen beveger seg i forhold til LSR.



Ved observasjon langs siktelinjen mot lengdegrad ℓ , ser observatøren emisjon fra gass på forskjellige avstander fra det galaktiske sentrum. Hvis vi antar at rotasjonshastigheten $v_{\text{rot}}(R)$ til gassen ikke øker betydelig med økende radius, vil gassen hvis totale hastighetsvektor er langs observasjonsretningen ha en maksimal netto verdi for siktelinjehastighetene, $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$. Geometrisk sett,

$$v_{\text{rot}}(R) = v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell) + v_0 \sin(\ell),$$

hvor $R = R_0 \sin \ell$, R_0 er avstanden fra Solen til det galaktiske sentrum (8,5 kpc) og $v_{\text{rot}}(R)$ er den tangensielle rotasjonshastigheten til gass på avstand R fra det galaktiske sentrum. Vi vil utlede $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ ved hjelp av observerte HI-emisjonslinjedata. For galaktiske lengdegrader $20 < \ell < 90$ grader tilsvarer dette den maksimale rødforskjøvede emisjonen.

Siden både Solen og Jorden ikke er i ro i forhold til LSR, må observerte HI-linjehastigheter korrigeres for (a) Jordens rotasjon, (b) dens omløp rundt Solen, og (c) Solens bevegelse i forhold til LSR. Disse bevegelsene kombineres til en siktlinje-korreksjonshastighet (v_{corr}), som avhenger av observatørens plassering, synsretning, og dato og tidspunkt for observasjonen. Du vil bli gitt verktøy for å beregne (v_{corr}), slik at målte hastigheter ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) kan konverteres til LSR-hastigheter, slik at

$$v_{\text{LSR}} = v_{\text{Earth}}^{\text{obs}} + v_{\text{corr}}.$$

Størrelsen $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ kan bestemmes ved hjelp av den observerte frekvensen f_{obs} som er maksimalt rødforskjøvet fra f_0 , slik at

$$v_{\text{Earth}}^{\text{obs}} = c \left[\frac{f_0 - f_{\text{obs}}}{f_0} \right].$$

Observasjoner av HI-emisjon fra den galaktiske skiven gjør det dermed mulig å bestemme Melkeveiens rotasjonskurve, $v_{\text{rot}}(R)$, som kan brukes til å utlede den innesluttete massen ved forskjellige avstander (R) fra

det galaktiske sentrum.

Kalibrering av teleskopets effektmåling:

Mottatt radiostråling fra en kilde uttrykkes vanligvis i form av en ekvivalent temperatur T^{src} (kalt lysstyrketemperatur) av et (hypotetisk) svart legeme som ville utstråle samme intensitet ved en gitt frekvens over kildens romvinkel. I Rayleigh-Jeans-regimet er $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$, hvor P er gjennomsnittlig effekt mottatt fra en kilde med temperatur T^{src} i et frekvensbånd med bredde Δf . Effekt og temperatur brukes ekvivalent i radioastronomi.

Den ekvivalente temperaturen av radioeffekten mottatt av et teleskop er et gjennomsnitt av T^{src} over en romvinkel kalt "beamen", som er relatert til teleskopets oppløsning. Denne ekvivalente temperaturen kalles antenntemperaturen, T_{ant} . I tillegg tilfører hele teleskopsystemet også noe støyeffekt, beskrevet av den såkalte mottakertemperaturen, T_{recv} . Sammen utgjør antenntemperaturen og mottakertemperaturen systemtemperaturen,

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + T_{\text{recv}},$$

som tilsvarende den totale effekten målt av teleskopet. Teleskopet registrerer effekt etter at den er forsterket med en forsterkningsfaktor (også kalt "gain") G_R slik at i en forenklet modell kan vi uttrykke

$$P_{\text{out}} = k_B G_R [T_{\text{ant}} + T_{\text{recv}}] \Delta f,$$

hvor P_{out} , G_R , T_{ant} og T_{recv} alle er funksjoner av frekvens.

Ved hver frekvens er det dermed to ukjente som må bestemmes, G_R og T_{recv} , for å kunne bestemme T_{ant} fra den målte P_{out} . Vi vil bestemme disse to ukjente ved å peke teleskopet mot to standardkilder, forutsatt at de fyller teleskopets synsfelt fullstendig og har kjente antenntemperaturer, og måle effekten som mottas.

Vi vil peke teleskopet mot

- 'bakken' som antas å ha en antenntemperatur $T_{\text{ground}} = 300$ K, og
- en kald del av 'himmelen' borte fra det galaktiske planet med en antatt antenntemperatur $T_{\text{sky}} = 5$ K.

Disse kalibreringstemperaturene kan antas å være uavhengige av frekvensen i det aktuelle båndet. Dermed må man løse følgende to ligninger ved hver frekvens

$$P_{\text{out}}^{\text{ground}} = k_B G_R [T_{\text{ground}} + T_{\text{recv}}] \Delta f$$

$$P_{\text{out}}^{\text{sky}} = k_B G_R [T_{\text{sky}} + T_{\text{recv}}] \Delta f.$$

Du vil få verktøy som vil løse disse ligningene og bestemme den frekvensavhengige T_{recv} og G_R som kan brukes til å få T_{ant} for videre målinger. Merk at både bakke- og himmelmålingene er essensielle for å få et riktig kalibrert HI-emisjonslinjespektrum.

Fordi teleskopet vårt har lav vinkeloppløsning, kan det være vanskelig å peke mot et område på himmelen som er helt fritt for HI-gass fra vår galakse. Stråling fra gass utenfor det galaktiske planet og andre støykilder kan påvirke himmelmålingen. Vi vil maskere slike spektralområder under kalibreringen.

HI-emisjonslinjen vises som et overskudd i radiointensitet i forhold til bakgrunnen ved en gitt frekvens og retning. Gitt en kjent G_R og T_{recv} , er følsomheten uttrykt som r.m.s. støytemperatur, σ_T , for et radioteleskop som observerer en systemtemperatur T_{sys} , i et frekvensbånd Δf (i Hz), gitt ved

$$\sigma_T = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\Delta f \times t_{\text{int}}}},$$

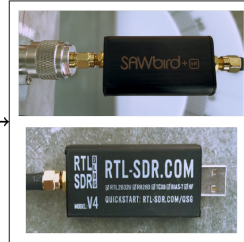
hvor t_{int} er integrasjonstiden i sekunder.

Utstyr og programvare:



Horn Antenna

Telescope electronics



Laptop

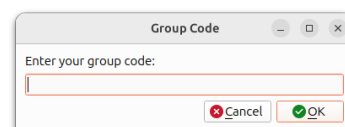
- Et hornantenne-radioteleskop på en asimut/høyde-montering. Asimutvinkelen kan måles med vinkelmålerskalaen ved foten av monteringen. Høydevinkelen kan måles ved hjelp av det digitale inklinometeret som vist nedenfor.



- Teleskopet inkluderer elektroniske enheter som forsterker signalet, filtrerer det ønskede frekvensområdet og produserer et spektrum.
- En bærbar datamaskin utstyrt for å lese og vise, gjøre dataopptak, og kalibrere og analysere dataene som teleskopet genererer.

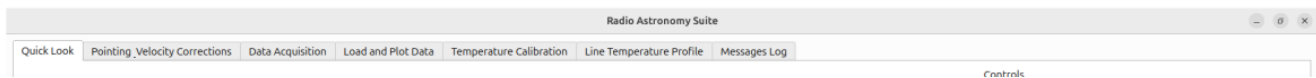
Bruk av teleskopet og programvaren:

- Teleskopoppsettet ditt er allerede opplinjert mot nord. Sørg for at nullgraden på den horisontale skiven sammenfaller med "N" (nord) - merket på bordet.
- Dobbeltklikk på ikonet - "Galactic Rotation Curve" på laptopskjermen for å starte programmet.



- Skriv inn gruppekoden din og trykk "OK".
 - En mappe med gruppekoden din vil vises på skrivebordet. Du må lagre alle datafiler i denne mappen.

- Systemet vil bli slått på og du vil se en hvit LED-lampe lyse.
- Grensesnittet "Radio Astronomy Suite" vil åpnes.



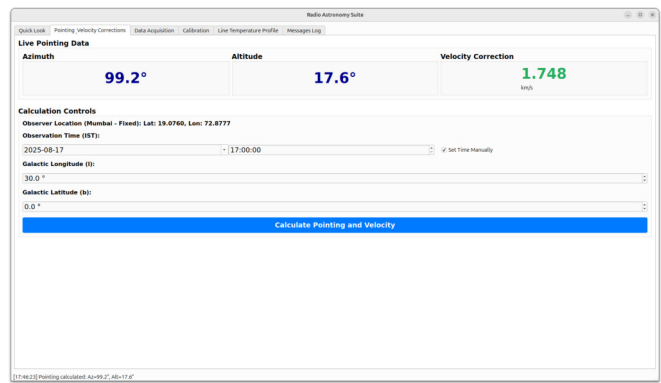
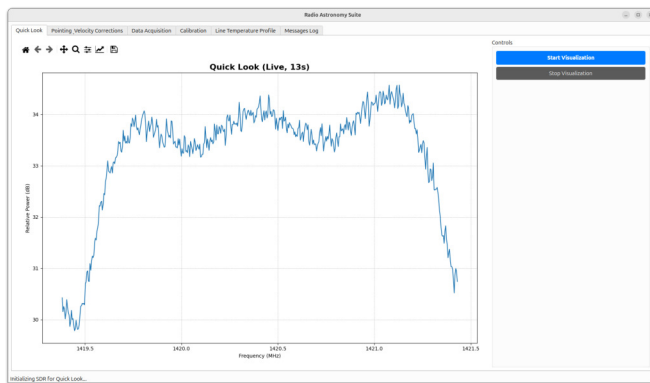
"Radio Astronomy Suite" har følgende faner:

• Fane 1: Hurtigoversikt

Fane 1 gir en rask systemsjekk for å verifisere at radiosignalet blir riktig registrert. Den kjører en kode som plottes det mottatte signalet (relativ effekt) på Y-aksen mot den observerte frekvensen på X-aksen.

1. Pek først teleskopet mot himmelen og deretter mot bakken, og observer den resulterende endringen i signalamplitude.
2. Koden overvåker det direkte signalspekteret i 60 s, men **lagrer ikke** dataene.

Informert umiddelbart veileder hvis signalamplituden forblir uendret når teleskopets retning varieres.

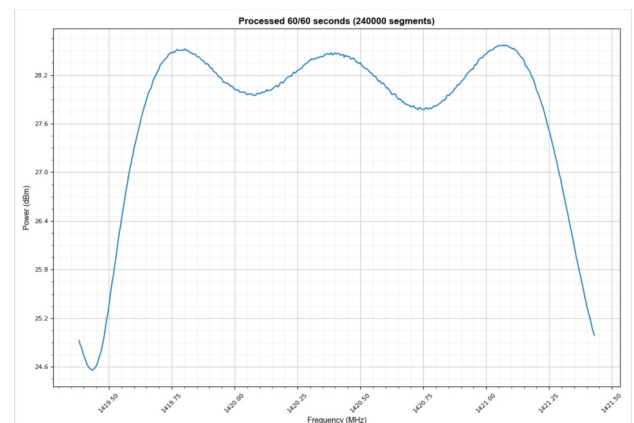
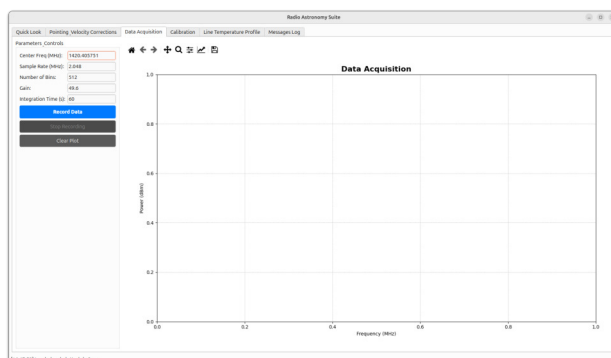


• Fane 2: Peking og hastighetskorrigering

Fane 2 konverterer spesifisert galaktisk lengdegrad og breddegrad til høyde og asimut for gjeldende dato og tid. Skriv inn ønskede galaktiske koordinater for å få ut tilsvarende høyde- og asimutverdier, sammen med hastighetskorreksjonen, v_{corr} .

• Fane 3: Datainnhenting

Fane 3 lar deg registrere data. Den har tre knapper: (i) Registrer data, (ii) Stopp registrering, og (iii) Tøm plott.



Ved å klikke på **Registrer data** starter dataopptak med en integrasjonstid på 60 s i retningen teleskopet for øyeblikket peker. En dialogboks vil vises, som ber deg om å navngi og lagre spektrumdataene i en fil. Hvis du ønsker å starte målingen på nytt før pågående eksponering er fullført, bruk knappen **Stopp registrering**. Knappen **Tøm plott** fjerner det viste plottet fra skjermen.

Forholdsregel: Ikke pek teleskopet mellom asimut 0° og 40° (eller mellom 240° og 360°) når høyden er under 40° for å unngå forstyrrende signaler fra en nærliggende mobilmastantenne.

For å måle 21-cm HI-stråling fra galakseskiven ved en gitt galaktisk lengdegrad, utfør følgende trinn:

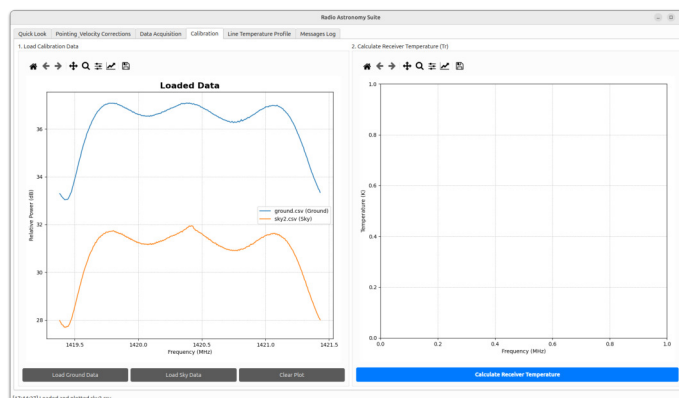
1. Bruk først Fane 2 til å beregne og notere høyde, asimut og v_{corr} for den galaktiske lengdegraden du ønsker å observere.
2. Pek deretter teleskopet mot ønsket plassering med galaktisk lengdegrad " ℓ " på himmelen og registrer spekteret.
3. Lagre spekteret med filnavnet **ℓ .csv**.

Deretter utfører du følgende trinn sekvensielt for å gjøre kalibreringsmålinger.

1. Pek teleskopet mot 'bakken', registrer og lagre spektrumet med filnavnet **ground.csv**.
2. Pek mot 'himmelen', bort fra det galakseplanet, registrer og lagre spektrumet med filnavnet **sky.csv**.

• Fane 4: Kalibrering

Fane 4 brukes til å utføre kalibrering.



1. Først må du laste inn **bakke-** og **himmel-**data ved å klikke på de tilsvarende knappene og velge de riktige filene. Når de er lastet inn, vil diagrammet til venstre vise den relative effektmålingen for både himmel og bakke.
2. Deretter klikker du på **"Kalibrer forsterkning og få T_{recv} "**. Dette vil generere et diagram av T_{recv} som en funksjon av frekvens i panelet til høyre. Du vil da kunne se data som består av støyfluktuasjoner, og eventuelt også en kontaminerende emisjonslinje fra HI-gass som befinner seg innenfor teleskopets synsfelt når du foretar 'himmel'-kalibreringsmålingen.
3. **Klikk** på begge sider av den kontaminerende HI-linjen for å definere et område som skal maskeres (vist som et grått skyggelagt område). Koden vil deretter tilpasse en jevn kurve til resten av dataene, og vise den resulterende frekvensavhengige T_{recv} som en grønn stiplet linje.

• Fane 5. HI-linjeanalyse

Denne fanen benytter kalibreringen oppnådd i Fane 4 til å trekke ut HI-linjeemisjonsspekteret fra målingene tatt i Fane 3 over forskjellige galaktiske lengdegrader.

For hver måling ved en gitt lengdegrad, vil du utføre følgende trinn:

1. Last inn filen **ℓ .csv**.

2. Klikk på knappen "Line temperature profile", og en ny fane med tittelen "HI Line Temperature" vil åpnes. Du vil se en graf over HI-linjetemperaturen etter å ha anvendt forsterkning og T_{recv} -kalibrering. I tillegg er det trukket fra et basis-nivå tilsvarende himmelbakgrunnen på 5 K.
3. Den mest rødforskjøvede frekvensen (f_{obs}) som tilhører HI-linjen kan estimeres som den laveste frekvensen som har en temperatur 5 K over det omkringliggende basis-nivået. Identifiser f_{obs} for hver måling.

Dersom du i det siste trinnet ser en flat skulder på omtrent 5 K i linjetemperaturprofilen på den røde siden av emisjonslinjen bør du utføre målingen for denne lengdegraden en gang til.