

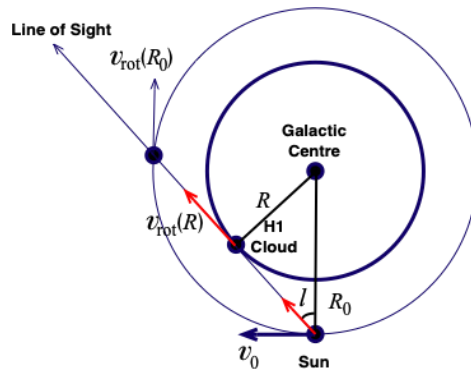
Откриване на галактичната тъмна материя с помощта на радиотелескоп

Вселената се състои от голямо количество тъмна материя. Вие ще откриете тъмната материя в нашата Галактика, като измерите тангенциалната скорост на въртене на газа в диска на нашата Галактика. Газът в диска на Млечния път съдържа неутрален атомен водород (HI), който може да бъде открит чрез неговия spin-flip преход, съответстващ на честота в покой $f_0 = 1420.40575$ MHz. Скоростта на въртене на газа в Галактиката може да бъде измерена с помощта на Доплеровото отместване на този преход.

Вашата задача е да измерите спектрите на радиоизлъчването между 1419.0 MHz и 1421.0 MHz, излъчвано от газа в галактичния диск при различни дължини в галактичната равнина, използвайки предоставения ви радиотелескоп. Вие ще анализирате тези данни, за да измерите кривата на въртене на Млечния път. Въз основа на измерените скорости на въртене, ще оцените вписаната маса в рамките на различни галактоцентрични разстояния, ще ги сравните с известната барионна маса в Галактиката в съответните радиуси и ще получената разлика ще бъде обяснена с наличието на тъмна материя.

Теоретична част

Приемаме, че целият газ в Галактиката се движи по посока на часовниковата стрелка в кръгови орбити на различни разстояния от Галактическия център, както е показано на фигурата по-долу. Разгледайте газ, движещ се с ротационна скорост ($v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$) около мястото на Слънцето. Отправната система, въртяща се с тази скорост, се нарича местен стандарт за покой (LSR). Обърнете внимание, че Слънцето се движи спрямо LSR.



Когато наблюдаваме по зрителния лъч на дължина ℓ , наблюдателят вижда емисия от газ на различни разстояния от галактичния център. Приемайки, че ротационната скорост $v_{\text{rot}}(R)$ на газа не се увеличава значително с увеличаване на радиуса, газът, чийто вектор на скоростта е изцяло по зрителния лъч, ще има максималната лъчева скорост $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$. От геометрични съображения,

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

където $R = R_0 \sin \ell$, R_0 е разстоянието на Слънцето от галактичния център (8.5 kpc) и $v_{\text{rot}}(R)$ е тангенциалната ротационна скорост на газа на разстояние R от галактичния център. Ще определим $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$, използвайки наблюдателните данни от емисионната линия на HI. За галактически дължини $20^\circ < \ell < 90^\circ$ градус, това съответства на максимално червено отместена емисия.

Тъй като както Слънцето, така и Земята не са в покой спрямо LSR, наблюдаваните скорости на HI линията трябва да бъдат коригирани за (a) въртенето на Земята, (b) нейното въртене около Слънцето и (c) движението на Слънцето спрямо LSR. Тези движения се комбинират в корекционна лъчева скорост (v_{corr}), която зависи от местоположението на наблюдателя, посоката на наблюдение и датата и времето на наблюдение. Ще ви бъдат предоставени инструменти за изчисляване на (v_{corr}), така че измерените скорости ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) да могат да бъдат преобразувани в отправната система на LSR съгласно

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

Величината $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ може да бъде определена, използвайки наблюдаваната честота f_{obs} , която е максимално червено отместена от f_0 , при което

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

По този начин наблюденията на HI емисия от галактичния диск ни позволяват да определим кривата на въртене на Млечния път, $v_{\text{rot}}(R)$, която може да бъде използвана за определяне на вписаната маса на различни разстояния (R) от Галактичния център.

Калибриране на мощността на телескопа:

Приетото радиоизлъчване от източник обикновено се изразява чрез еквивалентна температура T^{src} (наречена яркостна температура) на (хипотетично) абсолютно черно тяло, което би излъчвало със същия интензитет при дадена честота в рамките на ъгловата площ на източника. В режима на Рейли-Джинс, $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$, където P е средната мощност, получена от източник с температура T^{src} в честотен диапазон с ширина Δf . Мощността и температурата се използват като еквивалентни в радиоастрономията.

Еквивалентната температура на радиомощността, приета от телескоп, е средната стойност на T^{src} в рамките на пространствен ъгъл, наречен площ на лъча, който е свързан с разделителната способност на телескопа. Тази еквивалентна температура се нарича антенна температура, T_{ant} . В допълнение, цялата телескопна система добавя и някаква мощност поради шум, описваща се чрез т.нар. температура на приемника, T_{recv} . Заедно антенната температура и температурата на приемника се събират до системната температура,

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

която съответства на общата мощност, измерена от телескопа. Телескопът записва мощността след като тя е усилена с коефициент на усиление G_R , така че в опростен модел можем да изразим

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

където P_{out} , G_R , T_{ant} и T_{recv} са функции на честотата.

Така за всяка честота има две неизвестни, които трябва да бъдат определени, G_R и T_{recv} , за да се определи T_{ant} от измерената P_{out} . Ще определим тези две неизвестни, като насочим телескопа към два стандартни източника, приемайки, че те изцяло запълват зрителното поле на телескопа и имат известни антенни температури, и измерим получените мощности.

Ще насочим телескопа към

- 'земята', за която се приема, че има антенна температура $T_{\text{ground}} = 300$ K, и
- студена част от 'небето' далеч от галактичната равнина с антенна температура, приета за $T_{\text{sky}} = 5$ K.

Може да се приеме, че тези калибрационни температури не зависят от честотата в интересувания ни диапазон. Така трябва да се решат следните две уравнения при всяка честота

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

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

Ще ви бъдат предоставени инструменти, които решават тези уравнения и определят зависещите от честотата T_{recv} и G_R , които могат да се използват за получаване на T_{ant} за по-нататъшни измервания. Обърнете внимание, че извършването както на измервания на Земята, така и на небето, е от съществено значение за получаване на правилно калибриран спектър на HI емисионната линия.

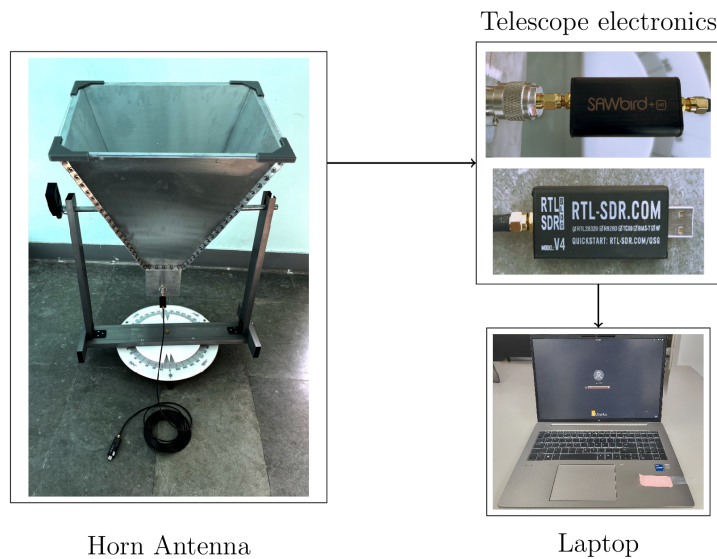
Поради ниската ъглова разделителна способност на нашия телескоп, може да ви е трудно да насочите към област от небето, напълно свободна от HI газ от нашата Галактика. Емисията от газ извън галактичната равнина и други източници на шум може да повлияе на измерването на небето. Ще маскираме това по време на калибрирането.

Емисионната линия HI се проявява като излишък в радиоинтензитета спрямо фона при дадена честота и посока. При известни G_R и T_{recv} , чувствителността, изразена като средноквадратична шумова температура, σ_T , на радиотелескоп, който наблюдава системна температура T_{sys} , в честотен диапазон Δf (в Hz), се дава от

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

където t_{int} е времето за интегриране в секунди.

Оборудване и софтуер:



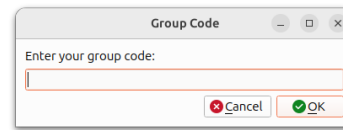
- Рогова антена радиотелескоп на алт-азимутална монтировка. Азимутът може да се измерва с помощта на скалата на транспорта в основата на монтировката. Височината може да се измерва с помощта на цифровия ъгломер, както е показано по-долу.



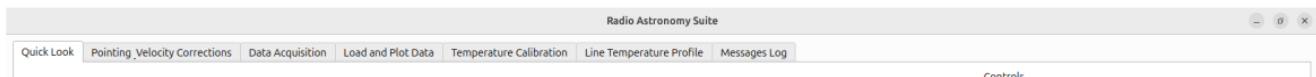
- Телескопът включва електронни устройства, които усилват сигнала, филтрират желания честотен диапазон и формират спектър.
- Лаптоп, оборудван за четене и показване, записване на данни, калибриране и анализиране на изхода от телескопа.

Използване на телескопа и софтуера:

- Вашата установка на телескопа вече е юстирана на север. Уверете се, че нула градуса на хоризонталния циферблат съвпада с маркировката "N" (север) на масата.
- Щракнете двукратно върху иконата - "Galactic Rotation Curve" на екрана на лаптопа, за да стартирате програмата.



- Въведете вашия групов код и натиснете "OK".
 - На десктопа ще се появи папка с вашия групов код. Трябва да съхранявате всички ваши файлове с данни в тази папка.
 - Системата ще се включи и ще видите бял LED индикатор да светва ON.
 - Интерфейсът "Radio Astronomy Suite" ще се отвори.



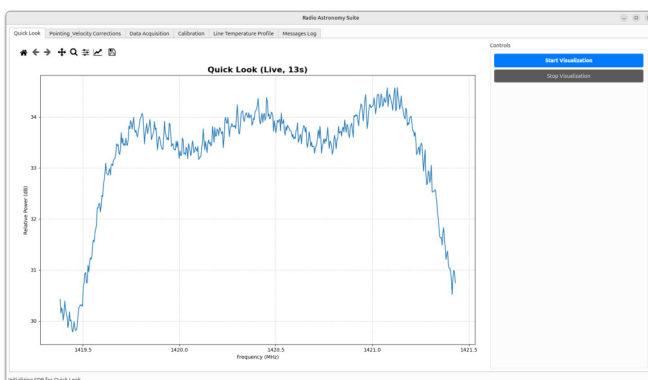
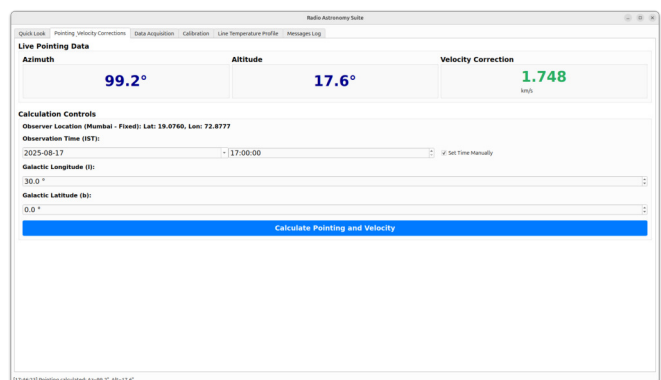
"Radio Astronomy Suite" има следните раздели:

• Таб 1: Бърз преглед

Таб 1 предоставя бърза системна проверка, за да се увери, че радиосигналът се записва правилно. Той изпълнява код, който изобразява получения сигнал (относителна мощност) по оста Y спрямо наблюдаваната честота по оста X.

1. Насочете телескопа първо към небето, а след това към земята, и наблюдавайте получената промяна в амплитудата на сигнала.
2. Кодът наблюдава спектъра на сигнала на живо в продължение на 60 секунди, но **не** запазва данните.

Незабавно информирайте квестора, ако амплитудата на сигнала остане непроменена, когато насочването на телескопа се променя.

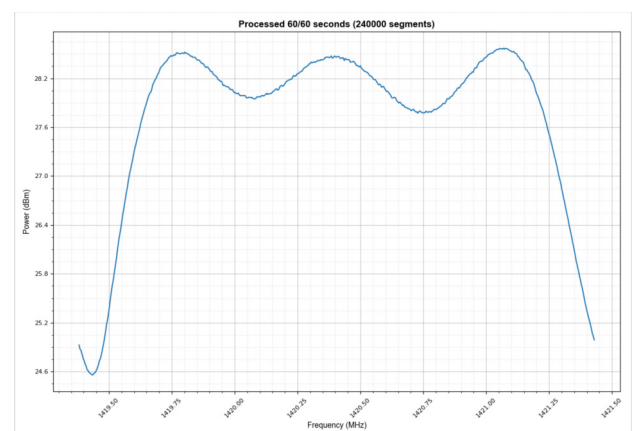
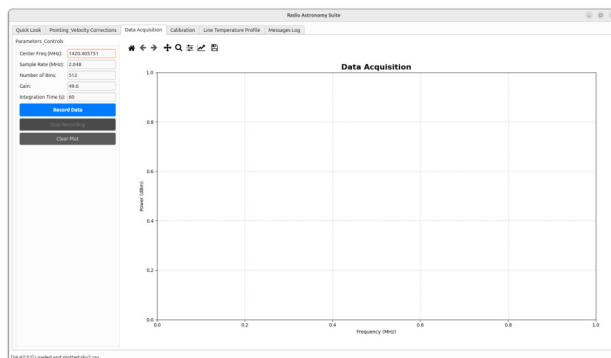



• Таб 2: Корекция на насочване и скорост

Таб 2 преобразува зададените галактични дължина и ширина във височина и азимут за текущата дата и час. Въведете желаните галактични координати, за да получите съответните стойности на височина и азимут, заедно с корекцията на скоростта, v_{corr} .

• Таб 3: Събиране на данни

Таб 3 ви позволява да записвате данните. Той има три бутона: (i) Запис на данни, (ii) Спиране на записа и (iii) Изчистване на графиката.



Натискането на **Запис на данни** започва събиране на данни за време на интегриране от 60 секунди в посоката, към която в момента е насочен телескопът. Ще се появи диалогов прозорец, който ще ви подкани да именувате и запазите спектралните данни във файл. Ако желаете да рестартирате измерването преди приключването на текущата експозиция, използвайте бутона **Спиране на записа**. Бутонът **Изчистване на графиката** премахва показаната графика от екрана.

Внимание: Не насочвайте телескопа между азимут 0° и 40° (или между 240° и 360°), когато височината е под 40° , за да предотвратите смущаващи сигнали от антена на мобилна кула, разположена близо до мястото.

За да измерите 21-см HI емисия от галактичния диск при дадена галактична дължина, изпълнете следните стъпки:

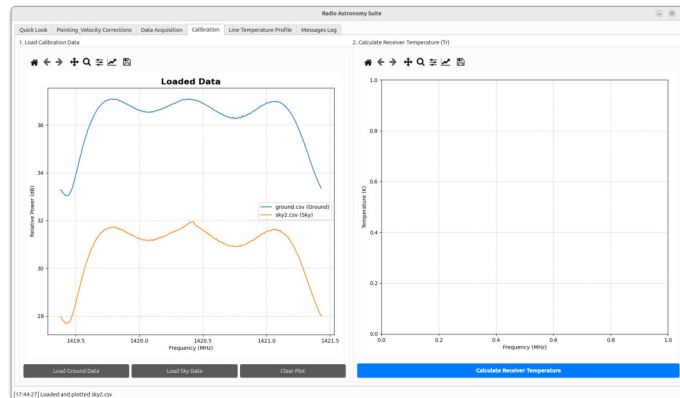
1. Първо използвайте Таб 2, за да изчислите и запишете височината, азимута и v_{corr} за галактичната дължина, която искате да наблюдавате.
2. След това насочете телескопа към желаното местоположение с галактична дължина " ℓ " в небето и запишете спектъра.
3. Запазете спектъра с име на файла ℓ .**csv**.

След това изпълнете последователно следните стъпки, за да получите калибрационни измервания.

1. Насочете телескопа към 'земята', запишете и запазете спектъра с име на файла **ground.csv**.
2. Насочете към 'небето', далеч от галактичната равнина, запишете и запазете спектъра с име на файла **sky.csv**.

• Таб 4: Калибриране

Таб 4 се използва за извършване на калибриране.



1. Първо трябва да заредите данните за **земята** и **небето**, като кликнете върху съответните бутони и изберете подходящите файлове. След зареждането, графиката вляво ще покаже относителната изходна мощност както за небето, така и за земята.
2. След това кликнете върху "**Калибрирайте усилването и получите T_{recv}** ". Това ще генерира графика на T_{recv} като функция на честотата в десния панел. Трябва да видите данни, състоящи се от шумови флукутации, заедно със замърсяваща HI линия (ако има такава) в ползрението на телескопа, докато правите калибриращото измерване на 'небето'.
3. **Кликнете** от двете страни на замърсяващата линия, за да определите област, която да бъде маскирана (показана като сива засенчена област). Кодът след това ще напасне гладка крива към останалата част от данните и ще покаже получената честотно зависима T_{recv} като зелена пунктирна линия.

• Таб 5. Анализ на линията HI

Този таб прилага калибрирането, получено в Раздел 4, за извличане на спектъра на емисията на линията HI от измерванията, направени в Таб 3 при различни галактически дължини.

За всяко измерване при дадена дължина ще извършвате следните стъпки:

1. Заредете файла **l.csv**.
2. Щракнете върху бутона "Line temperature profile" (Профил на температурата на линията) и ще се отвори нов раздел, озаглавен "HI Line Temperature" (Температура на линията HI). Ще видите графика на температурата на линията HI след прилагане на калибрирането на усилването и T_{recv} . В допълнение е изваден паразитния сигнал, съответстващ на фона на небето от 5 K.
3. Най-червеноотместената честота (f_{obs}), принадлежаща на линията HI, може да бъде оценена като най-ниската честота, която има температура 5 K над паразитния сигнал. Идентифицирайте f_{obs} за всяко измерване.

В последната стъпка, в случай че видите плоско рамо от около 5 K в профила на температурата на линията от червената страна на емисионната линия, извършете измерването за тази дължина още веднъж.