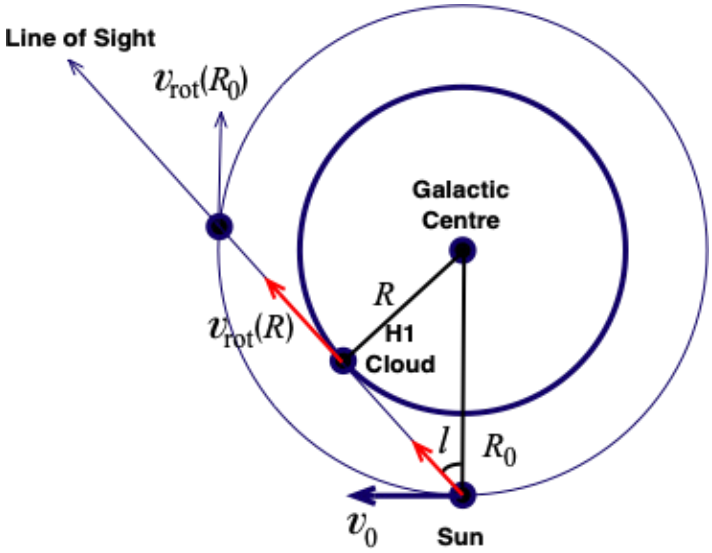
کشف ماده تاریک کهکشانی با استفاده از تلسکوپ رادیویی

کیهان حاوی مقدار قابل‌توجهی مادهٔ تاریک است. در این پژوهش، هدف شناسایی مادهٔ تاریک موجود در کهکشان راه‌شیری از طریق اندازه‌گیری سرعت چرخش مماسی گاز در دیسک کهکشانی است. گاز موجود در این ناحیه، عمدتاً از هیدروژن اتمی خنثی (HI) تشکیل شده که به‌واسطهٔ گذار اسپین–فلیپ قابل آشکارسازی است. این گذار دارای فرکانس سکون برابر 1420.40575 مگاهرتز ($f_0 = 1420.40575 MHz$) بوده و تغییرات این فرکانس، به‌علت انتقال دوپلر، امکان محاسبهٔ سرعت مداری گاز را فراهم می‌آورد.

در این پروژه، شما موظفید با بهره‌گیری از یک تلسکوپ رادیویی، طیف تابش رادیویی هیدروژن خنثی در بازهٔ فرکانسی 1419.0 تا 1421.0 مگاهرتز را در طول‌های مختلف کهکشانی در صفحه‌ی کهکشان اندازه‌گیری کنید. داده‌های به دست‌آمده برای استخراج منحنی چرخش کهکشانی مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. سپس بر اساس سرعت‌های مداری محاسبه‌شده، جرم محصور در فواصل مختلف از مرکز کهکشان تعیین می‌گردد. این مقادیر با جرم باریونی شناخته‌شده در همان شعاع‌ها مقایسه شده و هرگونه اختلاف موجود به حضور مادهٔ تاریک نسبت داده خواهد شد.

پیش‌زمینه تئوری

فرض کنید تمام گاز موجود در کهکشان، همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، در مدارهای دایره‌ای و در جهت ساعت‌گرد و در فواصل مختلف از مرکز کهکشان حرکت می‌کند. گاز واقع در موقعیت خورشید دارای سرعت چرخش \(v_0=220 \, \mathrm{kms}^{-1}\) است. چارچوب مرجعی که با این سرعت می‌چرخد، استاندارد محلی سکون (*Local Standard of Rest* یا LSR) نامیده می‌شود. توجه داشته باشید که خورشید نسبت به LSR نیز دارای حرکت است.



هنگامی که درخط دید به سمت یک طول کهشکانی خاص و در صفحه‌ی کهکشان رصد انجام می‌شود، ناظر تابشی را از گاز واقع در فواصل مختلف از مرکز کهکشان دریافت می‌کند. با این فرض که **سرعت چرخش** $v_{\mathrm{rot}}(R)$ گاز با افزایش شعاع به‌طور قابل توجهی افزایش نمی‌یابد، گازی که بردار سرعت کل آن دقیقاً در راستای خط دید باشد، بیشینهٔ سرعت شعاعی در راستای ما نسبت به LSR، یعنی $v_{\mathrm{LSR}}^{\max}$ را خواهد داشت. بر اساس روابط هندسی داریم:

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

که در آن $R = R_0 \sin \ell$ و R_0 فاصله‌ی خورشید از مرکز کهکشان (معادل ۸٫۵ کیلوپارسک) و $v_{\mathrm{rot}}(R)$ سرعت چرخش مماسی گاز در فاصلهٔ R از مرکز کهکشان است. مقدار $v_{\mathrm{LSR}}^{\max}(\ell)$ از داده‌های خط تابش HI استخراج خواهد شد. برای طول‌گراهای کهکشانی $20 < \ell < 90$ درجه، این بیشینهٔ سرعت متناظر با بیشینهٔ انتقال به سرخ مشاهده‌شده است.

از آن‌جا که خورشید و زمین هر دو نسبت به LSR ساکن نیستند، لازم است سرعت‌های خط HI مشاهده‌شده برای موارد زیر تصحیح شوند:
الف) چرخش زمین
ب) حرکت مداری زمین به دور خورشید
ج) حرکت خورشید نسبت به LSR

این حرکات در مجموع یک سرعت تصحیح راستای خط دید ($v_{\rm corr}$) ایجاد می‌کنند که به موقعیت ناظر، جهت مشاهده و تاریخ و زمان رصد بستگی دارد. ابزارهای لازم برای محاسبهٔ $v_{\rm corr}$ در اختیار شما قرار داده می‌شود تا بتوان سرعت‌های اندازه‌گیری‌شده ($v^{\rm obs}_{\rm Earth}$) را به سرعت‌های نسبت به LSR تبدیل کرد:

$$v_{\rm LSR} = v^{\rm obs}_{\rm Earth} + v_{\rm corr}.$$

مقدار $v^{\rm obs}_{\rm Earth}$ از طریق **فرکانس مشاهده‌شده** $f_{\rm obs}$ که بیشترین انتقال به سرخ را نسبت به فرکانس سکون f_0 دارد، به‌دست می‌آید:

$$v^{\rm obs}_{\rm Earth} = c\left[\frac{f_0 - f_{\rm obs}}{f_0}\right].$$

بنابراین، مشاهدات تابش HI از قرص کهکشانی این امکان را فراهم می‌آورد که منحنی چرخش کهکشان راه‌شیری $v_{\rm rot}(R)$به‌دست آید؛ منحنی‌ای که می‌توان از آن برای برآورد جرم محصور در فواصل مختلف R از مرکز کهکشان استفاده کرد.

کالیبراسیون خروجی توان تلسکوپ:

انتشار رادیویی دریافتی از یک منبع معمولاً بر حسب دمای معادل $T^{\rm src}$ (که دمای روشنایی نامیده می‌شود) یک جسم سیاه (فرضی) که همان شدت را در یک فرکانس معین بر روی زاویه جامد منبع منتشر می‌کند، بیان می‌شود. در رژیم ریلی-جینز، $P = k_{\rm B}T^{\rm src}\Delta f$، که در آن P توان متوسط دریافتی از یک منبع با دمای $T^{\rm src}$ در یک باند فرکانسی با عرض Δf است. توان و دما به طور معادل در رادیو-نجوم استفاده می‌شوند.

دمای معادل توان رادیویی دریافتی توسط یک تلسکوپ میانگینی از $T^{\rm src}$ بر روی زاویه جامدی به نام مساحت پرتو است که به وضوح تلسکوپ مربوط می‌شود. این دمای معادل دمای آنتن نامیده می‌شود، $T_{\rm ant}$. علاوه بر این، کل سیستم تلسکوپ نیز مقداری نویز توان اضافه می‌کند که توسط دمای گیرنده، $T_{\rm recv}$ توصیف می‌شود. دمای آنتن و دمای گیرنده با هم دمای سیستم،

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

را تشکیل می‌دهند که به توان کل اندازه‌گیری شده توسط تلسکوپ مربوط می‌شود. تلسکوپ توان را پس از تقویت توسط یک ضریب بهره $G_{\rm R}$ ثبت می‌کند به طوری که در یک مدل ساده می‌توانیم بیان کنیم

$$P_{\rm out} = k_{\rm B}G_{\rm R}\left[T_{\rm ant} + T_{\rm recv}\right]\Delta f\,,$$

که در آن $P_{\rm out}$، $G_{\rm R}$، $T_{\rm ant}$ و $T_{\rm recv}$ همگی تابعی از فرکانس هستند.

بنابراین در هر فرکانس، دو مجهول برای تعیین وجود دارد، $G_{\rm R}$ و $T_{\rm recv}$، برای تعیین $T_{\rm ant}$ از $P_{\rm out}$ اندازه‌گیری شده. ما این دو مجهول را با نشانه‌گیری تلسکوپ به دو منبع استاندارد که فرض می‌شود کاملاً دید تلسکوپ را پر می‌کنند و دماهای آنتن شناخته‌شده‌ای دارند، و اندازه‌گیری توان‌های دریافتی تعیین خواهیم کرد.

ما تلسکوپ را به سمت

- `زمین` که فرض می‌شود دمای آنتن $T_{\rm ground} = 300$ K دارد، و

- بخشی سرد از 'آسمان' دور از صفحه کهکشانی با دمای آنتن فرضی $T_{\rm sky} = 5$ K نشانه‌گیری خواهیم کرد.

این دماهای کالیبراسیون می‌توانند مستقل از فرکانس در باند مورد نظر فرض شوند. بنابراین لازم است که معادلات زیر را در هر فرکانس حل کنید

$$P_{\rm out}^{\rm ground} = k_{\rm B} G_{\rm R} \left[T_{\rm ground} + T_{\rm recv}\right] \Delta f$$

$$P_{\rm out}^{\rm sky} = k_{\rm B} G_{\rm R} \left[T_{\rm sky} + T_{\rm recv}\right] \Delta f \,.$$

ابزارهایی به شما ارائه خواهد شد که این معادلات را حل کرده و $T_{\rm recv}$ وابسته به فرکانس و $G_{\rm R}$ را تعیین می‌کنند که می‌توانند برای به دست آوردن $T_{\rm ant}$ برای اندازه‌گیری‌های بیشتر استفاده شوند. توجه داشته باشید که انجام هر دو اندازه‌گیری زمین و آسمان برای به دست آوردن طیف خط انتشار HI به درستی کالیبره شده ضروری است.

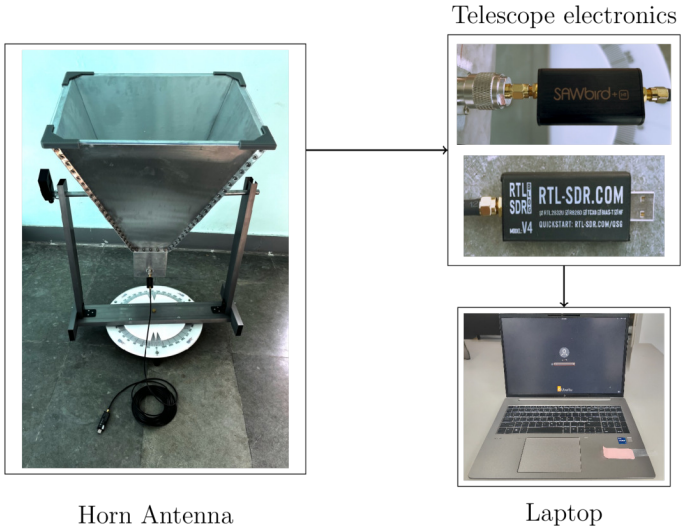
از آنجا که تلسکوپ ما وضوح زاویه‌ای پایینی دارد، ممکن است برای شما سخت باشد که به ناحیه‌ای از آسمان کاملاً خالی از گاز HI از کهکشان ما نشانه‌گیری کنید. انتشار از گاز خارج از صفحه کهکشانی و سایر منابع نویز ممکن است بر اندازه‌گیری آسمان تأثیر بگذارد. ما چنین محدوده طیفی را در طول کالیبراسیون ماسک خواهیم کرد.

خط انتشار HI به صورت افزایشی در شدت رادیویی نسبت به پس‌زمینه در یک فرکانس و جهت معین ظاهر می‌شود. با توجه به $G_{\rm R}$ و $T_{\rm recv}$ شناخته‌شده، حساسیت به صورت دمای نویز r.m.s، σ_T، یک تلسکوپ رادیویی که دمای سیستم $T_{\rm sys}$ را مشاهده می‌کند، در یک باند فرکانسی Δf (بر حسب هرتز)، به صورت زیر داده می‌شود

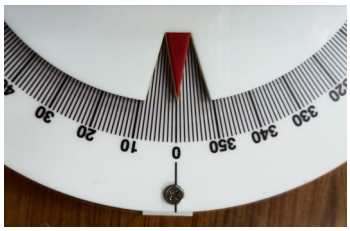
$$\sigma_T = \frac{T_{\rm sys}}{\sqrt{\Delta f \times t_{\rm int}}},$$

که در آن $t_{\rm int}$ زمان انتگرال‌گیری بر حسب ثانیه است.

تجهیزات و نرم‌افزار:



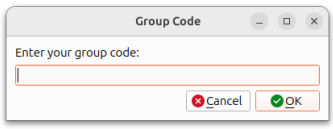
- یک تلسکوپ رادیویی آنتن شاخی بر روی پایه آلت-آزی‌موت. آزی‌موت را می‌توان با مقیاس نقاله در پایه پایه اندازه‌گیری کرد. ارتفاع را می‌توان با استفاده از شیب‌سنج دیجیتال همان‌طور که در زیر نشان داده شده است اندازه‌گیری کرد.



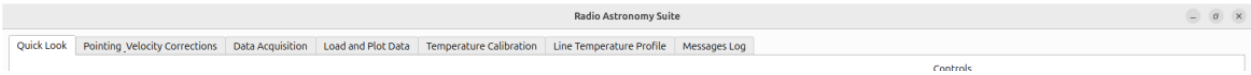
- تلسکوپ شامل واحدهای الکترونیکی است که سیگنال را تقویت می‌کند، محدوده فرکانس مورد نظر را فیلتر می‌کند و یک طیف خروجی می‌دهد.
- یک لپ‌تاپ مجهز به خواندن و نمایش، ضبط داده‌ها، کالیبره کردن و تحلیل خروجی از تلسکوپ.

استفاده از تلسکوپ و نرم‌افزار:

- تنظیمات تلسکوپ شما قبلاً با شمال هم‌راستا شده است. مطمئن شوید که درجه صفر بر روی صفحه افقی با علامت "N" (شمال) بر روی میز هم‌زمان است.
- برای شروع برنامه، دوبار بر روی آیکون "Galactic Rotation Curve" در صفحه لپ‌تاپ کلیک کنید.



- کد گروه خود را وارد کرده و "OK" را فشار دهید.
  - یک پوشه با کد گروه شما بر روی دسکتاپ ظاهر خواهد شد. شما باید تمام فایل‌های داده خود را در این پوشه ذخیره کنید.
  - سیستم روشن خواهد شد و شما یک سوئیچ LED سفید را روشن خواهید دید.
  - رابط "Radio Astronomy Suite" باز خواهد شد.



"مجموعه رادیو نجوم" دارای تب‌های زیر است:

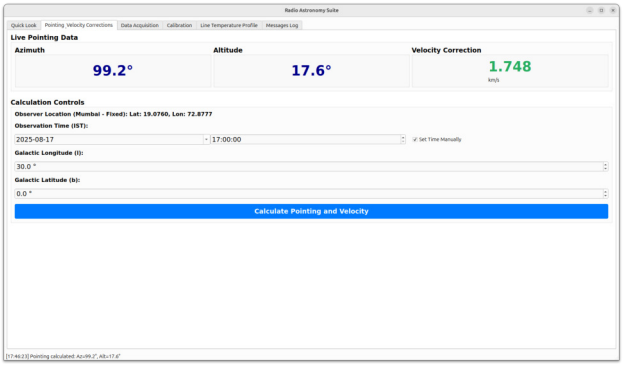
- **تب 1: نگاه سریع**

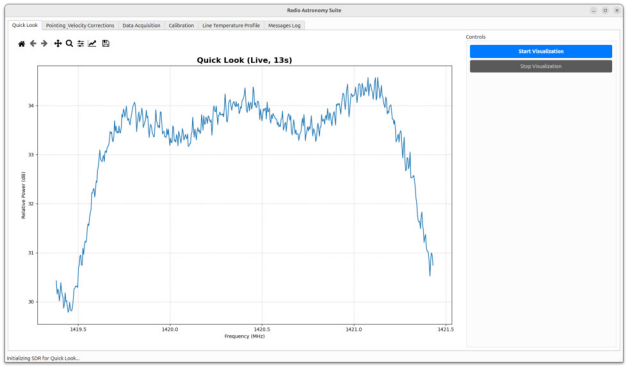
تب 1 یک بررسی سریع سیستم را فراهم می‌کند تا تأیید کند که سیگنال رادیویی به درستی ضبط می‌شود. این تب کدی را اجرا می‌کند که سیگنال دریافت شده (توان نسبی) را بر روی محور Y در مقابل فرکانس مشاهده شده بر روی محور X ترسیم می‌کند.

1. ابتدا تلسکوپ را به سمت آسمان و سپس به سمت زمین نشانه‌گیری کنید و تغییرات حاصل در دامنه سیگنال را مشاهده کنید.

2. کد طیف سیگنال زنده را به مدت 60 ثانیه نظارت می‌کند، اما **داده‌ها را ذخیره نمی‌کند.**

در صورت عدم تغییر دامنه سیگنال هنگام تغییر جهت تلسکوپ، بلافاصله به سرپرست اطلاع دهید.



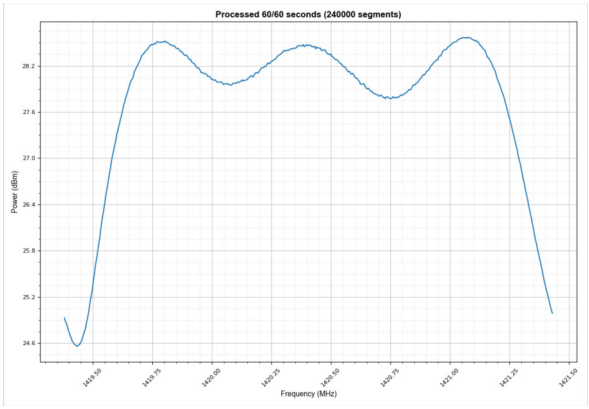


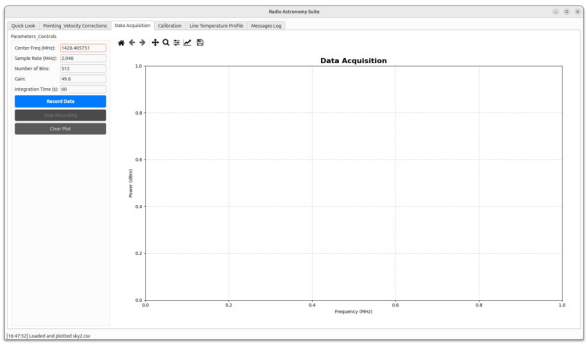
- **تب ۲: تصحیح جهت‌گیری و سرعت**

تب ۲ طول و عرض کهکشانی مشخص شده را به ارتفاع و سمت برای تاریخ و زمان فعلی تبدیل می‌کند. مختصات کهکشانی مورد نظر را وارد کنید تا مقادیر ارتفاع و سمت متناظر، به همراه تصحیح سرعت، v_{corr} به دست آید.

- **زبانه ۳: جمع‌آوری داده‌ها**

زبانه ۳ به شما اجازه می‌دهد داده‌ها را ثبت کنید. این زبانه دارای سه دکمه است: (i) ثبت داده‌ها، (ii) توقف ثبت، و (iii) پاک کردن نمودار.





با کلیک بر روی **ثبت داده‌ها** جمع‌آوری داده‌ها برای مدت زمان یکپارچه‌سازی ۶۰ ثانیه در جهتی که تلسکوپ در حال حاضر به آن اشاره می‌کند، آغاز می‌شود. یک کادر محاوره‌ای ظاهر می‌شود که از شما می‌خواهد نام داده‌های طیف را وارد کرده و آن را در یک فایل ذخیره کنید. اگر می‌خواهید قبل از اتمام هرگونه نوردهی در حال انجام، اندازه‌گیری را مجدداً شروع کنید، از دکمه **توقف ثبت** استفاده کنید. دکمه **پاک کردن نمودار** نمودار نمایش داده شده را از صفحه حذف می‌کند.

احتیاط: تلسکوپ را بین آزیموت 0° و 40° (یا بین 240° و 360°) زمانی که ارتفاع زیر 40° است، قرار ندهید تا از تداخل سیگنال‌ها از آنتن برج موبایل واقع در نزدیکی محل جلوگیری شود.

برای اندازه‌گیری انتشار ۲۱ سانتی‌متری HI از دیسک کهکشانی در طول جغرافیایی کهکشانی معین، مراحل زیر را انجام دهید:

1. ابتدا از زبانه ۲ برای محاسبه و یادداشت ارتفاع، آزیموت و v_{corr} برای طول جغرافیایی کهکشانی که می‌خواهید مشاهده کنید، استفاده کنید.

2. سپس تلسکوپ را به مکان مورد نظر در طول جغرافیایی کهکشانی "ℓ" در آسمان هدایت کرده و طیف را ثبت کنید.

3. طیف را با نام فایل ℓ**.csv** ذخیره کنید.

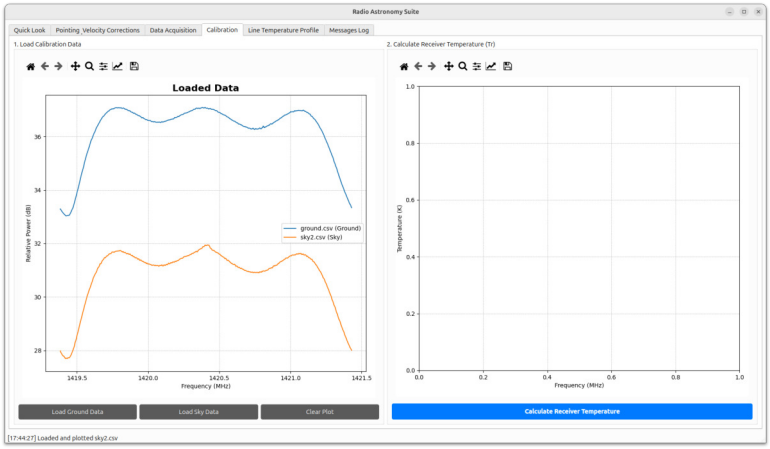
سپس، مراحل زیر را به ترتیب برای به‌دست آوردن اندازه‌گیری‌های کالیبراسیون انجام دهید.

1. تلسکوپ را به سمت «زمین» هدایت کرده، طیف را ثبت و با نام فایل **ground.csv** ذخیره کنید.

2. به سمت «آسمان»، دور از صفحه کهکشانی، اشاره کرده، طیف را ثبت و با نام فایل **sky.csv** ذخیره کنید.

- **زبانه ۴: کالیبراسیون**

زبانه ۴ برای انجام کالیبراسیون استفاده می‌شود.



1. ابتدا باید داده‌های **زمین** و **آسمان** را با کلیک بر روی دکمه‌های مربوطه و انتخاب فایل‌های مناسب بارگذاری کنید. پس از بارگذاری، نمودار سمت چپ خروجی نسبی توان را برای هر دو آسمان و زمین نمایش می‌دهد.

2. سپس، بر روی "**کالیبره کردن گین و به‌دست آوردن T_{recv}**" کلیک کنید. این کار نموداری از T_{recv} به عنوان تابعی از فرکانس در پانل سمت راست تولید می‌کند. شما باید داده‌هایی شامل نوسانات نویز و همچنین یک خط HI آلوده‌کننده (در صورت وجود) در نمای تلسکوپ هنگام انجام اندازه‌گیری کالیبراسیون 'آسمان' ببینید.

3. **روی** هر دو طرف خط آلوده‌کننده کلیک کنید تا ناحیه‌ای برای ماسک کردن تعریف شود (به صورت یک ناحیه سایه‌دار خاکستری نشان داده می‌شود). سپس کد یک منحنی صاف به بقیه داده‌ها برازش می‌دهد و T_{recv} وابسته به فرکانس حاصل را به صورت یک خط سبز خط‌چین نمایش می‌دهد.

- **زبانه ۵. تحلیل خط HI**

این زبانه کالیبراسیونی که در زبانه ۴ به دست آمده است را به کار می‌برد تا طیف انتشار خط HI را از اندازه‌گیری‌هایی که در زبانه ۳ در طول‌های کهکشانی مختلف انجام شده‌اند، استخراج کند.

برای هر اندازه‌گیری در یک طول جغرافیایی مشخص، مراحل زیر را انجام خواهید داد:

1. فایل ℓ.**csv** را بارگذاری کنید.

2. روی دکمه "پروفایل دمای خط" کلیک کنید و یک زبانه جدید با عنوان "دمای خط HI" باز خواهد شد. شما نموداری از دمای خط HI را پس از اعمال کالیبراسیون بهره و T_{recv} مشاهده خواهید کرد. علاوه بر این، یک خط پایه که مربوط به پس‌زمینه آسمان با دمای ۵ کلوین است، از آن کم شده است.

3. فرکانس با بیشترین انتقال به سرخ (f_{obs}) که به خط HI تعلق دارد، به عنوان کمترین فرکانسی که دمای آن ۵ کلوین بالاتر از مقدار خط پایه بلافاصله است، تخمین زده می‌شود. f_{obs} را برای هر اندازه‌گیری شناسایی کنید.

در مرحله نهایی، در صورتی که یک شانه تخت با دمای حدود ۵ کلوین در پروفایل دمای خط در سمت قرمز خط انتشار مشاهده کردید، اندازه‌گیری را برای آن طول جغرافیایی دوباره انجام دهید.