

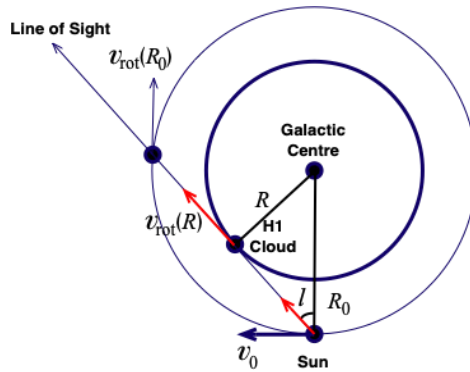
Galaktik karanlık maddeyi radyo teleskop kullanarak keşfetmek

Evren büyük miktarda karanlık madde içerir. Galaksi diskindeki gazın teğetsel dönme hızını ölçerek Galaksideki karanlık maddeyi keşfedeceksiniz. Samanyolu diskindeki gaz, $f_0 = 1420.40575$ MHz durağan frekansına karşılık gelen spin flip geçişi ile tespit edilebilen nötral atomik hidrojen (HI) içerir. Galaksideki gazın dönme hızı, bu geçişin Doppler kayması kullanılarak ölçülebilir.

Göreviniz, size sağlanan radyo teleskobunu kullanarak Galaktik düzlemde farklı boylamlarda Galaktik diskteki gazdan yayılan 1419.0 MHz ile 1421.0 MHz arasındaki radyo salma tayflarını ölçmektir. Bu verileri analiz ederek Samanyolunun dönme eğrisini ölçeceksiniz. Ölçülen dönme hızlarına dayanarak, farklı Galaktik-merkezli mesafeler içinde kalan kütleyi tahmin edecek, bunları karşılık gelen yarıçaplar içindeki bilinen baryonik kütle ile karşılaştıracak ve herhangi bir farkı karanlık maddeye atfedeceksiniz.

Teorik Bilgiler

Galaksi'deki tüm gazın, Galaktik Merkez'den farklı mesafelerde çembersel yörüngelerde saat yönünde (Kuzey Galaktik Kutbu'ndan bakıldığında) aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi hareket ettiğini varsayın. Güneş'in konumunda gazı ($v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$)'lik bir dönme hızıyla hareket ettiğini düşünün. Bu hızda dönen referans sistemine yerel durağan standardı (LSR-local standard of rest) denir. Güneş'in LSR'ye göre hareket ettiğini unutmayın.



Boylam ℓ yönündeki görüş doğrultusu boyunca gözlem yaparken, gözlemci Galaktik Merkez'den farklı mesafelerdeki gazdan gelen salmayı görür. Gazın dönme hızının $v_{\text{rot}}(R)$ artan yarıçapla önemli ölçüde artmadığını varsayarsak, toplam hız vektörü gözlem doğrultusunda olan gaz, görüş doğrultusu hızının maksimum net büyüklüğüne sahip olacaktır, $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$. Geometriye göre,

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

burada $R = R_0 \sin \ell$, R_0 Güneş'in Galaktik Merkez'den uzaklığıdır (8.5 kpc) ve $v_{\text{rot}}(R)$ Galaktik Merkez'den R mesafedeki gazın teğetsel dönme hızıdır. Gözlenen HI salma çizgisi verilerini kullanarak $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ 'yi çıkaracağız. $20 < \ell < 90$ derece galaktik boylamlar için, bu maksimum kırmızıya kaymış salmaya karşılık gelir.

Hem Güneş hem de Dünya LSR'ye göre hareketsiz olmadığından, gözlenen HI çizgi hızları (a) Dünya'nın dönmesi, (b) Güneş etrafındaki dolanması ve (c) Güneş'in LSR'ye göre hareketi için düzeltilmelidir. Bu hareketler, gözlemcinin konumuna, bakış yönüne ve gözlem tarih ve saatine bağlı olan bir görüş doğrultusu düzeltme hızı (v_{corr}) şeklinde birleşir. Ölçülen hızların ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) LSR'ye göre hızlara dönüştürülebilmesi için (v_{corr}) hesaplama araçları sağlanacaktır, böylece

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

$v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ niceliği, f_0 'dan maksimum kırmızıya kaymış olan gözlenen frekans f_{obs} kullanılarak belirlenebilir, böylece

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

Dolayısı ile Galaktik diskten gelen HI salma gözlemleri, Samanyolu'nun dönme eğrisini, $v_{\text{rot}}(R)$, belirlememize olanak tanır ve bu da Galaktik Merkez'den çeşitli mesafelerdeki (R) içeride kalan kütleyi bulmak için kullanılabilir.

Teleskop Güç Çıkışının Kalibrasyonu:

Bir kaynaktan alınan radyo salması, genellikle bir kaynağın katı açısı içerisinde belirli bir frekansta aynı şiddette salacak olan (varsayımsal) bir karacısının eşdeğer sıcaklığı T^{src} (parlaklık sıcaklığı olarak adlandırılır) cinsinden ifade edilir. Rayleigh-Jeans yaklaşımında, $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$ olarak ifade edilir, burada P , sıcaklığı T^{src} olan bir kaynaktan, genişliği Δf olan bir frekans bandında alınan ortalama güçtür. Radyo astronomide güç ve sıcaklık eşdeğer olarak kullanılır.

Bir teleskop tarafından alınan radyo gücünün eşdeğer sıcaklığı, teleskopun çözünürlüğü ile ilgili olan ve ışın alanı olarak adlandırılan bir katı açısı içinde T^{src} 'nin ortalamasıdır. Bu eşdeğer sıcaklık, anten sıcaklığı T_{ant} olarak adlandırılır. Ayrıca, tüm teleskop sistemi, alıcı sıcaklığı olarak adlandırılan T_{recv} ile tanımlanan bir miktar gürültü gücü de ekler. Anten sıcaklığı ve alıcı sıcaklığı birlikte sistem sıcaklığını

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

oluşturur ve bu, teleskop tarafından ölçülen toplam güce karşılık gelir. Teleskop, G_R kazanç faktörü ile güçlendirilmiş gücü kaydeder, böylece basitleştirilmiş bir modelde

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

olarak ifade edebiliriz, burada P_{out} , G_R , T_{ant} ve T_{recv} frekansın fonksiyonlarıdır.

Böylece her frekansta, ölçülen P_{out} 'dan T_{ant} 'yi belirlemek için belirlenmesi gereken iki bilinmeyen vardır: G_R ve T_{recv} . Bu iki bilinmeyeni, teleskopu, görüş alanını tamamen doldurduğu varsayılan ve bilinen anten sıcaklıklarına sahip iki standart kaynağa yöneltmek ve alınan güçleri ölçerek belirleyeceğiz.

Teleskopu aşağıdaki yerlere yönelteceğiz:

- Anten sıcaklığı $T_{\text{ground}} = 300$ K olarak varsayılan 'yer'e ve
- Galaktik düzlemden uzakta, anten sıcaklığı $T_{\text{sky}} = 5$ K olarak varsayılan 'gökyüzü'nün soğuk bir kısmına.

Bu kalibrasyon sıcaklıklarının, ilgili bantta frekanstan bağımsız olduğu varsayılabilir. Böylece her frekansta aşağıdaki iki denklemleri çözmek gerekir:

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

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

Bu denklemleri çözecek ve frekansa bağlı T_{recv} ve G_R 'yi belirleyecek araçlar sağlanacaktır, bu da daha ileri ölçümler için T_{ant} 'yi elde etmek için kullanılabilir. Hem Yer hem de Gökyüzü ölçümlerini yapmak, düzgün kalibre edilmiş bir HI salma çizgisi tayfı elde etmek için gereklidir.

Teleskopumuzun düşük açısal çözünürlüğü olduğundan, Galaksimizdeki HI gazından tamamen arınmış bir gökyüzü bölgesine yöneltebilirsiniz. Galaktik düzlemin dışındaki gazdan gelen salma ve diğer gürültü kaynakları gökyüzü ölçümünü etkileyebilir. Kalibrasyon sırasında böyle bir tayfsal aralığı maskeleyeceğiz.

HI salma çizgisi, belirli bir frekansta ve yönde arka plana göre radyo yoğunluğunda bir artış olarak ortaya çıkar. Bilinen bir G_R ve T_{recv} verilmek üzere, Δf bir frekans bandında (Hz cinsinden) T_{sys} 'lık bir sistem sıcaklığı gözleyen bir radyo teleskobun, r.m.s. gürültü sıcaklığı σ_T ile ifade edilen duyarlılığı,

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

ile verilir ve burada t_{int} (saniye cinsinden) entegrasyon süresidir.

Ekipman ve yazılım:



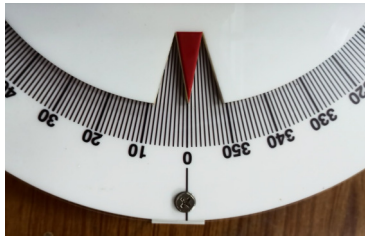
Horn Antenna

Telescope electronics



Laptop

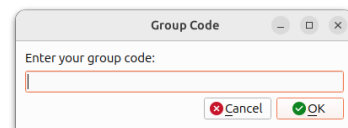
- Alt-azimut yuvalı bir korna anten radyo teleskopu. Azimut, yuvanın tabanındaki açıölçer ölçeği ile ölçülebilir. Yükseklik, aşağıda gösterildiği gibi dijital eğim ölçer kullanılarak ölçülebilir.



- Teleskop, sinyali güçlendiren, istenen frekans aralığını filtreleyen ve bir tayf çıktısı sağlayan elektronik birimlere sahiptir.
- Teleskoptan gelen çıktıyı okumak, görüntülemek, veri kaydetmek, kalibre etmek ve analiz etmek için donatılmış bir dizüstü bilgisayar.

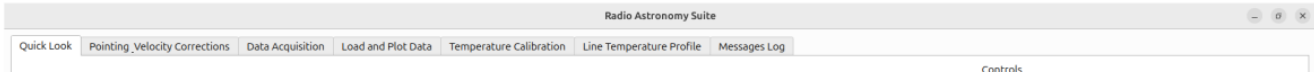
Teleskop ve yazılımın kullanımı:

- Teleskop kurulumunuz zaten Kuzey ile hizalanmıştır. Yatay kadrandaki sıfır derecenin masadaki “N” (kuzey) işareti ile çakıştığından emin olun.
- Programı başlatmak için dizüstü bilgisayar ekranındaki “Galactic Rotation Curve” simgesine çift tıklayın.



- Grup kodunuzu girin ve “OK” tuşuna basın.
 - Masaüstünde grup kodunuzla bir klasör görünecektir. Tüm veri dosyalarınızı bu klasörde saklamanız gerekmektedir.

- o Sistem açılacak ve beyaz bir LED'in yandığını göreceksiniz.
- o “Radio Astronomy Suite” arayüzü açılacaktır.



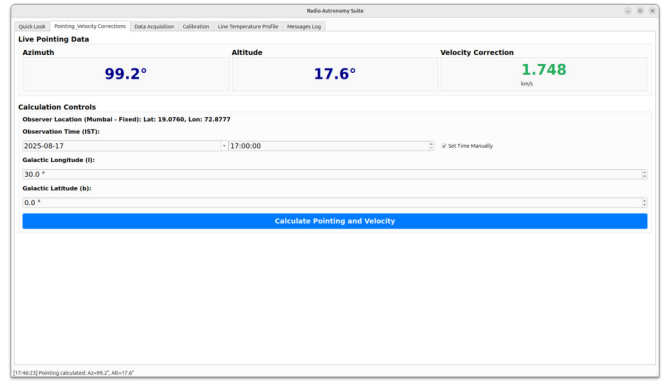
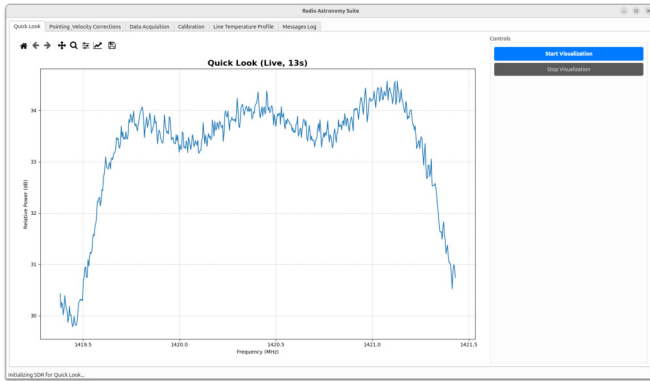
“Radio Astronomy Suite” aşağıdaki sekmelere sahiptir:

• Sekme 1: Hızlı Bakış

Sekme 1, radyo sinyalinin düzgün bir şekilde kaydedildiğini doğrulamak için hızlı bir sistem kontrolü sağlar. Alınan sinyali (görelî güç) Y eksenine karşı gözlenen frekansı X eksenine çizen bir kod çalıştırır.

1. Teleskobu önce gökyüzüne, ardından yere doğru yöneltin ve sinyal genliğindeki değişikliği gözlemleyn.
2. Kod, canlı sinyal tayfını 60 s boyunca izler, ancak **veriyi kaydetmez**.

Teleskop yönü değiştirildiğinde sinyal genliği değişmeden kalırsa derhal görevliye bildirin.

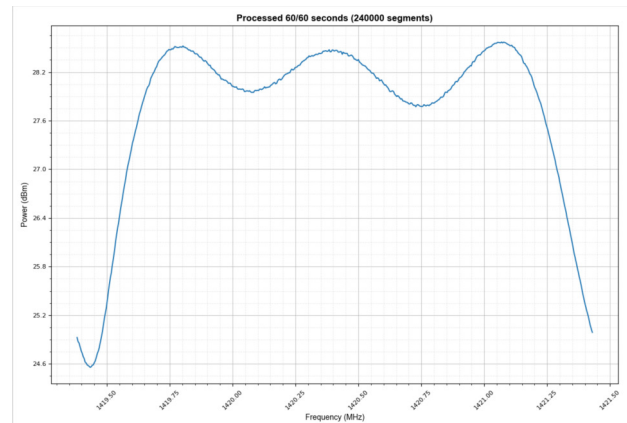
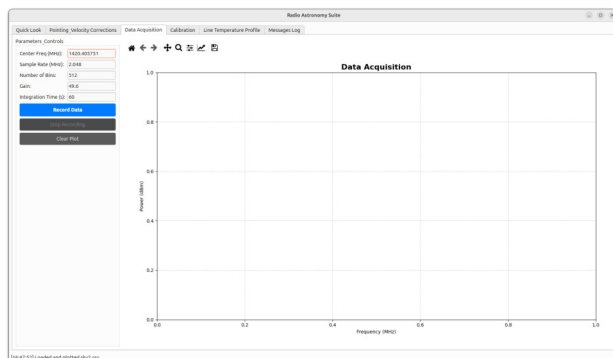


• Sekme 2: Yöneltilme ve Hız Düzeltmesi

Sekme 2, belirtilen Galaktik boylam ve enlemi mevcut tarih ve saat için yükseklik ve azimuta dönüştürür. İstenen Galaktik koordinatları girerek, karşılık gelen yükseklik ve azimut değerlerini, v_{corr} hız düzeltmesi ile birlikte elde edin.

• Sekme 3: Veri Toplama

Sekme 3, verileri kaydetmenizi sağlar. Üç düğmesi vardır: (i) Veri Kaydet, (ii) Kaydı Durdur ve (iii) Grafiği Temizle.



Veri Kaydet düğmesine tıklayınca, teleskobun şu anda baktığı yönde 60 saniyelik bir entegrasyon süresi için veri toplamaya başlar. Bir iletişim kutusu açılarak size tayf verilerini adlandırıp bir dosyaya kaydetmenizi isteyecektir. Devam eden bir pozlama tamamlanmadan önce ölçümü yeniden başlatmak isterseniz, **Kaydı Durdur** düğmesini kullanın. **Grafiği Temizle** düğmesi, ekrandaki grafiği kaldırır.

Önem: Mekanın yakınında bulunan bir mobil kule anteninden gelen girişim sinyallerini engellemek için yükseklik 40° 'ın altında olduğunda, teleskobu 0° ile 40° (veya 240° ile 360°) azimut aralığına yöneltmeyin.

Belirli bir Galaktik boylamda Galaktik diskten gelen 21-cm HI salmasını ölçmek için aşağıdaki adımları uygulayın:

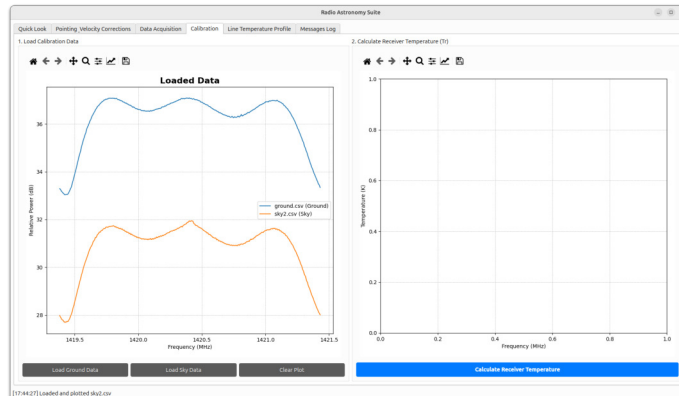
1. Önce Tab 2'yi kullanarak gözlemlemek istediğiniz Galaktik boylam için yükseklik, azimut ve v_{corr} 'yi hesaplayın ve yazın.
2. Daha sonra teleskobu gökyüzündeki istenen Galaktik boylam " ℓ " konumuna yöneltin ve tayfını alın.
3. Tayfı ℓ .csv dosya adıyla kaydedin.

Sonrasında, kalibrasyon ölçümlerini elde etmek için aşağıdaki adımları sırasıyla uygulayın.

1. Teleskobu 'yere' yönlendirin, tayfı alın ve **ground.csv** dosya adıyla kaydedin.
2. Galaktik düzlemden uzakta bir 'gökyüzüne' yöneltin, tayfı alın ve **sky.csv** dosya adıyla kaydedin.

• Sekme 4: Kalibrasyon

Sekme 4, kalibrasyon yapmak için kullanılır.



1. Öncelikle, ilgili düğmelere tıklayarak ve uygun dosyaları seçerek **yer** ve **gökyüzü** verilerini yüklemelisiniz. Yüklendikten sonra, sol taraftaki grafik hem gökyüzü hem de yer için göreceli güç çıktısını gösterecektir.
2. Sonra, "**Kazanç kalibre et ve T_{recv} elde et**" ("**Calibrate gain and obtain T_{recv}** ") üzerine tıklayın. Bu, sağ panelde frekansın bir fonksiyonu olarak T_{recv} grafiğini oluşturacaktır. 'Gökyüzü' kalibrasyon ölçümü yaparken teleskop görüş alanında (varsa) karışan bir HI çizgisi ile birlikte gürültü dalgalanmalarından oluşan verileri görmelisiniz.
3. Karışan çizginin her iki tarafına **tıklayarak** maskelenecek bir bölge tanımlayın (gri gölgeli alan olarak gösterilir). Kod daha sonra verilerin geri kalanına pürüzsüz bir eğri oturtacak ve ortaya çıkan frekansa bağlı T_{recv} 'i yeşil kesikli bir çizgi olarak gösterecektir.

• Sekme 5. HI Çizgi analizi

Bu Sekme, farklı Galaktik boylamlar için Sekme 3'te alınan ölçümlerden HI çizgi salma tayfını çıkarmak için Sekme 4'te elde edilen kalibrasyonu uygular.

Belirli bir boylamdaki her ölçüm için aşağıdaki adımları gerçekleştireceksiniz:

1. ℓ .csv dosyasını yükleyin.

2. “Çizgi sıcaklık profili” (“Line temperature profile”) düğmesine tıklayın ve “HI Çizgi Sıcaklığı” (“HI Line Temperature”) başlıklı yeni bir Sekme açılacaktır. Kazanç ve T_{recv} kalibrasyonunu uygulandıktan sonra HI çizgi sıcaklığının bir grafiğini göreceksiniz. Ayrıca, 5 K’lık gökyüzü arka planına karşılık gelen bir temel çıkarılmış olacaktır.
3. HI çizgisine ait en fazla kırmızıya kaymış frekans (f_{obs}), anlık temel değerinin 5 K üzerinde bir sıcaklığa sahip olan en düşük frekans olarak tahmin edilebilir. Her ölçüm için f_{obs} ’yi belirleyin.

Son adımda, salma çizgisinin kırmızı tarafında çizgi sıcaklık profilinde yaklaşık 5 K’lık düzleşme görürseniz, o boylam için ölçümü tekrar gerçekleştirin.