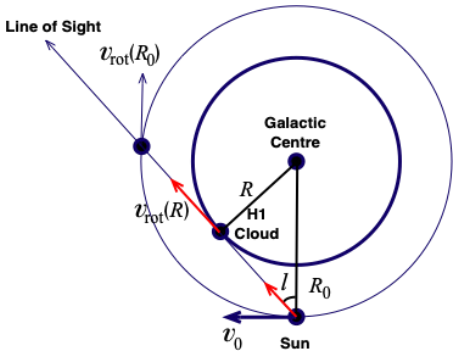
전파 망원경으로 은하계 암흑 물질 발견하기

우주는 많은 양의 암흑 물질로 이루어져 있다. 여러분들은 우리 은하 원반에 있는 가스의 접선 회전 속도를 측정하여 우리 은하의 암흑 물질을 발견해 볼 것이다. 우리 은하 원반의 가스는 중성 수소(HI)를 포함하고 있는데, 정지 주파수 f_0 =1420.40575MHz에 해당하는 중성 수소의 스핀 플립 전이선을 통해 검출된다. 은하에서 기체의 회전 속도는 이 전이 방출선의 도플러 이동으로부터 측정할 수 있다.

여러분의 과제는 주어진 전파 망원경을 사용하여 은하면의 다른 은경에서 은하 원반의 가스가 방출하는 1419.0MHz와 1421.0MHz 사이의 전파 방출 스펙트럼을 측정하는 것이다. 이 데이터를 분석하여 우리 은하계의 회전 곡선을 측정할 것이다. 측정된 회전 속도를 바탕으로 은하 중심으로 부터 거리를 달리하며 그 내부에 포함된 질량을 추정하고, 우리 은하의 해당 반경 내에서 알려진 바리온 질량과 비교하여 그 차이를 암흑 물질에 기인한 것으로 추산할 것이다.

이론적 배경

아래 그림과 같이 은하의 모든 가스가 은하 중심으로부터 서로 다른 거리에 있는 원형 궤도를 (은하의 북극에서 볼 때) 시계 방향으로이동한다고 가정해 보자. 태양의 위치에서 회전 속도(v_0 =220 km s^{-1})로 움직이는 가스를 생각해 보자. 이 속도로 회전하는 기준 프레임을 국부표준정지좌표계(loca standard of rest, LSR)이라고 한다. 태양은 LSR을 기준으로 움직인다는 점에 유의하라.



은경 ℓ 방향을 시선 방향으로 두고 은경을 따라 관측할 때, 관측자는 은하 중심으로부터 다른 거리에 있는 가스의 방출을 관측하게 된다. 가스의 회전 속도 $v_{\rm rot}(R)$ 가 반지름이 증가함에 따라 크게 증가하지 않는다고 가정하면, 가스의 총 속도 벡터가 관측자의 관측 시선 방향과 나란한 가스가 시선 방향 속도에서 가장 최대 값을 $v_{\rm LSR}^{\rm max}$를 갖게 된다. 기하학적으로 표현하면,

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

이고, 여기에서 $R = R_0 \sin \ell$, R_0은 은하 중심으로부터 태양의 거리(8.5 kpc)이며, $v_{\rm rot}(R)$은 은하 중심으로부터 R 거리에서 가스의 접선방향 회전 속도이다. 여러분은 관측된 HI 방출선 데이터를 사용하여 $v_{\rm LSR}^{\rm max}(\ell)$를 추론할 것이다. 은경 $20 < \ell < 90$ 도의 경우, 최대 적색편이 방출에 해당된다.

태양과 지구가 LSR에 대해 정지되어 있지 않기 때문에, 관측된 HI선의 속도는 (a) 지구의 자전, (b) 지구의 태양 주위 공전, (c) LSR에 대한 태양의 운동에 대해 보정되어야 한다. 이러한 움직에 대한 보정은 관측자의 위치, 시선 방향, 관측 날짜 및 시간에 따라 달라지는 시선 방향 보정 속도($v_{\rm corr}$)에 포함된다. 여러분에게 측정된 속도($v_{\rm Earth}^{\rm obs}$)를 LSR에 대한 속도, $v_{\rm LSR}$로 변환할 수 있도록 계산 도구($v_{\rm corr}$)가 제공되므로 다음과 같이 변화할 수 있다.

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

여기에서 $v_{\rm Earth}^{\rm obs}$ 는 f_0에서 최대로 적색편위된 관측 주파수 $f_{\rm obs}$를 사용하여 다음식으로 결정할 수 있다.

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

따라서 은하 원반에서 HI 방출을 관측하면 은하의 회전 곡선인 $v_{\rm rot}(R)$을 결정할 수 있으며, 이를 통해 은하 중심으로부터 다양한 거리(R)에서 둘러싸고 있는 질량을 유추할 수 있다.

망원경 출력 보정:

어떤 전파원으로 부터의 전파 방출을 수신할 때 일반적으로 주어진 주파수에서 전파원의 입체각에 걸쳐 동일한 세기를 방출하는 (가상적인) 흑체의 등가 온도 $T^{\rm src}$ (밝기 온도라고 함)로 표현하는 것이 일반적이다. 레일리-진스 영역에서 $P = k_{\rm B} T^{\rm src} \Delta f$ 이며, 여기에서 P는 Δf 의 주파수 구간에서 온도 $T^{\rm src}$의 전파원으로 부터 받은 평균 power(전력 또는 출력)이다. 전파 천문학에서는 전력 또는 출력과 온도를 동등하게 사용한다.

망원경이 수신한 전파 전력의 등가 온도는 빔 면적(beam area)이라고 불리는 입체각에 대한 $T^{\rm src}$ 의 평균이며, 이는 망원경의 분해능과 관련된다. 이 등가 온도를 안테나 온도, $T_{\rm ant}$ 라고 한다. 또한, 전체 망원경 시스템은 수신기 온도, $T_{\rm recv}$ 로 기술되는 잡음 출력을 추가한다. 안테나 온도와 수신기 온도를 합하면 시스템 온도,

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

가 되고, 이것이 망원경에 의해 측정된 총 출력에 해당된다. 망원경은 이득(gain) 인자 $G_{\rm R}$ 에 의해 증폭된 후 전력을 기록하는데, 단순화된 모델에서

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

이며, 여기서 $P_{\rm out}$, $G_{\rm R}$, $T_{\rm ant}$ 및 $T_{\rm recv}$ 는 모두 주파수의 함수이다.

따라서 각 주파수에서 측정된 $P_{\rm out}$로부터 $T_{\rm ant}$를 구하기 위해서는 $G_{\rm R}$과 $T_{\rm recv}$ 라는 두 개의 미지수를 결정해야 한다. 이 두 미지수를 결정하기 위해서 망원경을 두 개의 표준 전파원으로 향하게 하고, 두 전파원이 망원경 시야를 완전히 채우고 안테나 온도를 알고 있다고 가정한 후, 수신 전력을 측정하여 이 두 미지수를 결정한다.

망원경을 향하게 할 곳은,

- "ground" 안테나 온도가 $T_{\rm ground}$ =300 K라고 가정되는 'ground', 그리고
- "sky" 은하 평면에서 멀리 떨어진 차가운 부분으로, 이 때 가정된 안테나 온도는 $T_{\rm sky}$ =5 K.

이러한 캘리브레이션을 위한 교정 온도는 관심 대역의 주파수와 무관하다고 가정할 수 있다. 따라서 각 주파수에서 다음 두 방정식을 풀면 된다.

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

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

여러분에게 이러한 방정식을 풀고 주파수에 따른 $T_{\rm recv}$ 및 $G_{\rm R}$ 결정할 도구가 제공될 것이고, 이를 사용하여 추가 측정을 위한 $T_{\rm ant}$ 를 얻을 수 있다. 적절하게 보정된 HI 방출선 스펙트럼을 얻으려면 ground와 sky 측정을 모두 하는 것이 필수적이다.

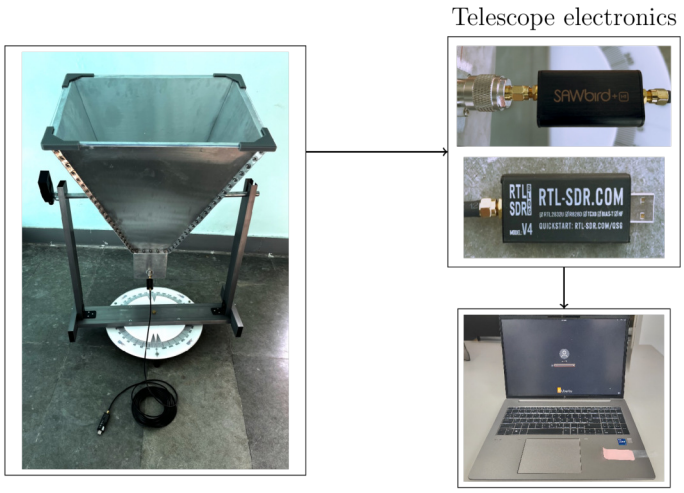
이번에 사용하는 망원경의 각분해능이 낮기 때문에, 여러분들은 우리 은하의 HI 가스가 전혀 없는 하늘 영역을 찾아서 포인팅하는것이 어렵다고 여길 것이다. 은하면 외부 가스 및 기타 잡음원이 sky 측정에 영향을 미칠 수도 있는데, 이러한 영향을 주는 스펙트럼 부분은 보정 과정에서 마스킹을 할 것이다.

HI 방출선은 주어진 주파수와 방향에서 배경 복사에 비해 전파 강도 초과로 나타난다. 주어진 $G_{\rm R}$ 과 $T_{\rm recv}$ 에서, 주파수 빈 Δf (Hz 단위)에서 시스템 온도 $T_{\rm sys}$ 관측하는 전파 망원경의 rms 잡음 온도 σ_T 로 표현된 감도는 다음과 같다.

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

여기서 $t_{\rm int}$ 초 단위의 적분 시간입니다.

장비 및 소프트웨어:



- 경위대식 가대에 설치된 혼 안테나 전파 망원경. 방위각은 가대 바닥에 있는 각도기로 측정된다. 고도는 아래 그림과 같이 디지털 경사계를 사용하여 측정한다.

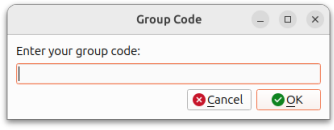




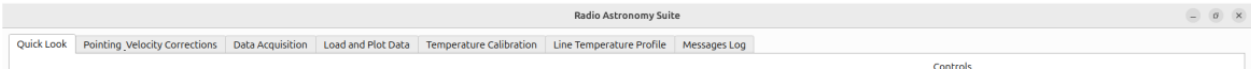
- 망원경에는 신호를 증폭하고, 원하는 주파수 범위를 필터링하고, 스펙트럼을 출력하는 전자 장치가 포함되어 있다.
- 노트북은 망원경으로부터의 출력을 읽고 표시하고, 데이터를 기록하고, 교정하고 분석하는 기능을 갖추고 있다.

망원경과 소프트웨어 사용법:

- 망원경은 이미 북쪽을 기준으로 정렬되어 있다. 수평 다이얼의 0도가 테이블의 "N"(북쪽) 표시와 일치하는지 확인하시오.
- 노트북 화면에서 "Galactic Rotation Curve" 아이콘을 두 번 클릭하여 프로그램을 시작하시오.



- 그룹 코드를 입력하고 "확인"을 누르시오.
    - 그룹 코드가 있는 폴더가 바탕 화면에 나타날 것이다. 모든 데이터 파일을 이 폴더에 저장해야 한다.
    - 시스템의 전원이 켜지면 흰색 LED 스위치가 켜지는 것을 볼 수 있다.
    - "Radio Astronomy Suite" 이라는 인터페이스가 열리게 될 것이다.



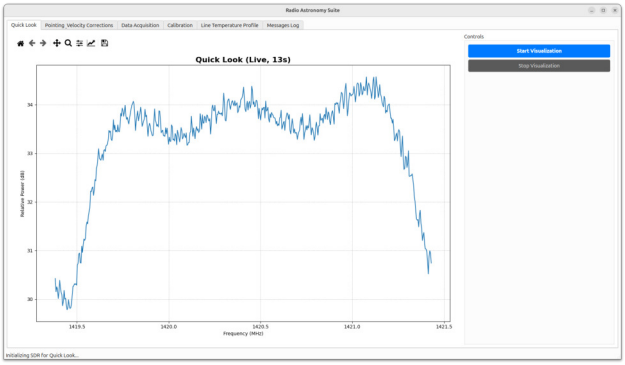
“Radio Astronomy Suite"에는 다음과 같은 탭들이 있다:

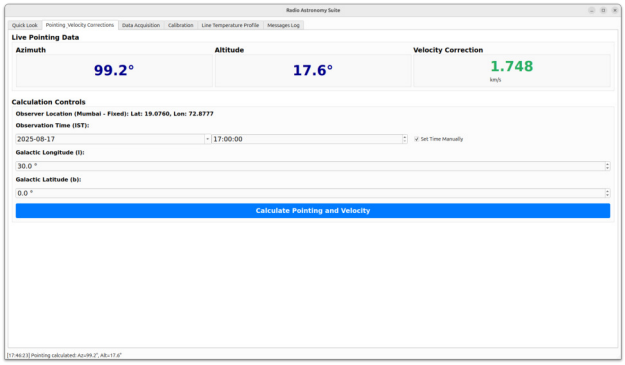
- **탭 1: 빠른 보기 Quick Look**

  탭 1은 라디오 신호가 제대로 기록되고 있는지 확인하기 위한 빠른 시스템 점검을 제공한다. 수신된 신호(상대 출력; relative power)를 Y축에, 관측된 주파수를 X축에 플롯하는 코드를 실행한다.

  1. 먼저 망원경을 하늘(sky)로 향하게 한 다음 지면(ground)으로 향하게 하고, 신호 진폭의 변화를 관찰한다.
  2. 코드는 60초 동안 실시간 신호 스펙트럼을 모니터링하지만 **데이터를 저장하지 않는다**.

  망원경의 방향을 변경해도 신호 진폭이 변하지 않으면 즉시 감독자에게 알리시오.



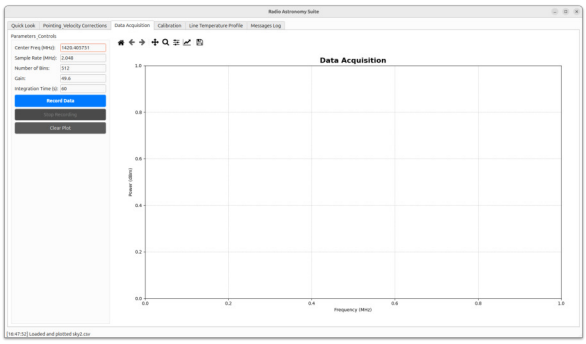


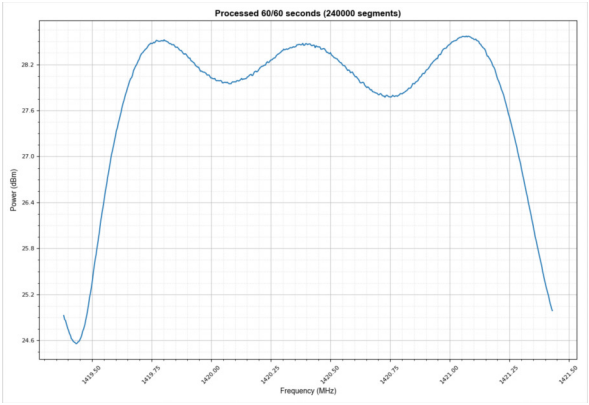
- **탭 2: 포인팅 및 속도 보정 Pointing and Velocity Correction**

  탭 2는 지정된 은경과 은위를 현재 날짜와 시간에 대한 고도와 방위각으로 변환한다. 원하는 은하 좌표를 입력하여 해당 고도와 방위각 값, 그리고 속도 보정(velocity correction) v_{corr}을 얻으시오.

- **탭 3: 데이터 수집 Data Acquisition**

  탭 3에서는 데이터를 기록할 수 있다. 세 개의 버튼이 있다: (i) 데이터 기록(Record Data), (ii) 기록 중지(Stop Recording), (iii) 플롯 지우기(Clear Plot).





Record Data 버튼을 클릭하면 망원경이 현재 가리키고 있는 방향으로 60초 동안 데이터 수집이 시작된다. 대화 상자(dialog box)가 나타나 스펙트럼 데이터를 저장할 파일의 이름을 지정하도록 요청한다. 진행 중인 노출이 완료되기 전에 측정을 다시 시작하려면 **Stop Recording** 버튼을 사용하라. **Clear Plot** 버튼은 화면에서 표시된 플롯을 제거한다.

주의사항: 고도 40° 이하일 때 망원경을 방위각 0°에서 40° 사이(또는 240°에서 360° 사이)로 가리키지 마시오. 이 장소 근처에 이동통신 기지국 안테나가 있으므로 간섭 신호를 방지하기 위함이다.

주어진 은경에서 은하 원반의 21cm HI 방출을 측정하려면 다음 단계를 수행해야 한다:

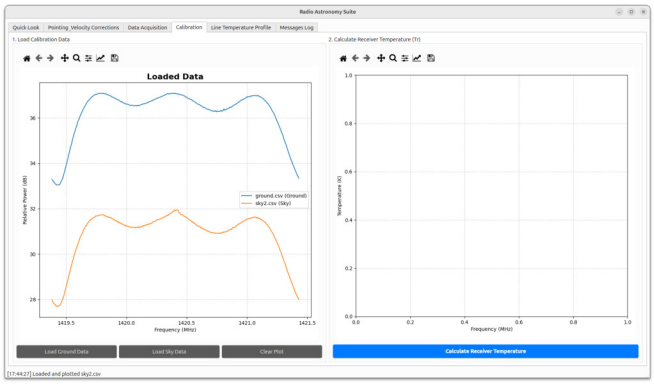
1. 먼저 탭 2를 사용하여 관측하려는 은경의 고도, 방위각 및 v_{corr}을 계산하고 기록하시오.
2. 그런 다음 하늘에서 원하는 위치의 은경 "ℓ"으로 망원경을 가리키고 스펙트럼을 기록하시오.
3. 스펙트럼을 ℓ**.csv** 파일 이름으로 저장하시오.

다음으로, 보정 측정을 얻기 위해 다음 단계를 순서대로 수행하시오.

1. 망원경을 '지면(ground)'으로 가리키고 스펙트럼을 기록하여 **ground.csv** 파일 이름으로 저장하시오.
2. 은하 평면으로 부터 떨어져 있는 '하늘(sky)'로 망원경을 가리키고 스펙트럼을 기록하여 **sky.csv** 파일 이름으로 저장하시오.

- **탭 4: Calibaration**

  탭 4는 보정(calibration)을 수행하는 데 사용됩니다.



1. 먼저, 해당 버튼을 클릭하고 적절한 파일을 선택하여 **지상(ground)** 및 **하늘(sky)** 데이터를 로드해야 한다. 데이터가 로드되면 왼쪽 그래프에 하늘과 지상의 상대 출력(power output)이 표시된다.
2. 다음으로, "**Calibrate gain and obtain** T_{recv}"을 클릭한다. 그러면 오른쪽 패널에 주파수에 따른 T_{recv}의 그래프가 생성된다. 하늘 보정(sky calibration) 측정을 수행하는 동안 망원경 시야 내에 있

는 잡음 변동(noise fluctuation)과 함께 오염(contaminating)된 HI 선(있는 경우)이 포함된 데이터를 볼 수 있다.

3. **오염된 선의 양쪽**을 클릭하여 마스킹(masking)할 영역을 정의한다(회색 음영 영역으로 표시). 그러면 코드가 나머지 데이터에 매끄러운 곡선을 맞추고, 결과로 주파수에 대한 $T_{\rm recv}$을 녹색 점선으로 표시한다.

- **탭 5. HI 선 분석 HI Line analysis**

  이 탭에서는 탭 3에서 얻은 다양한 은경에서의 HI 선 방출 스펙트럼에 탭 4에서 얻은 보정(calibration)을 적용한다.

  주어진 은경에서 각 측정을 위해 다음 단계를 수행한다:

  1. 파일 ℓ**.csv**를 로드한다.

  2. "선 온도 프로파일(line temperature profile)" 을 클릭하면 "HI Line Temperature"라는 제목의 새 탭이 열린다. 이 탭에서는 이득(gain)과 $T_{\rm recv}$ 보정을 적용한 후의 HI 선 온도 그래프를 볼 수 있다. 이것은 또한, 5 K의 하늘 배경(sky backgroound)에 해당하는 기준선(baseline)이 제거된 스펙트럼이다.

  3. HI 선 중 가장 많이 적색편이된 주파수($f_{\rm obs}$)는 즉각적인 기준선(immediate baseline) 값보다 5 K 높은 온도를 가진 가장 낮은 주파수로 추정할 수 있다. 각 측정에 대해 $f_{\rm obs}$를 식별하시오.

  마지막 단계에서, 방출선의 적색 파장 쪽에 약 5 K의 평평한 어깨(flat shoulder)가 보이는 경우, 해당 은경에 대한 측정을 다시 하시오.

그룹 대회 지침

망원경으로 가기 전에 요약 답안지 페이지가 들어 있는 봉투가 전달됩니다. 봉투에 그룹 코드를 적어 주세요.

- 이 시험에는 G01.1부터 G01.8까지 여덟 개의 질문이 있습니다. 이미 작성된 내용을 받았으며, 문제지는 이 지침과 함께 동봉되어 있습니다.
- 관측 테이블에서는 라디오 망원경과 관련 전자 기기, 헤드 토치, 필기 패드가 제공됩니다.
- 요약 답안지 페이지는 작은 봉투 S 안에 보관됩니다. **망원경 관측 데스크에 도착하여 시험이 공식적으로 시작될 때만 이 봉투(S)를 열 수 있습니다.**
- 데이터 수집 및 데이터 분석 세션의 시작과 끝에 휘슬이 울립니다.
- 관측 데스크에서의 데이터 수집 시간은 **35분**입니다.
- 데이터 분석을 위해 Powai Ball Room으로 이동합니다. 데이터 분석 시간은 **30분**입니다.
- 시험의 순서는 다음과 같습니다:

시간 (분:초)	기간	작업
00:00 – 35:00	35분	관측 데스크에서 데이터 수집
35:00 – 65:00	30분	Powai Ball Room에서 데이터 분석

- 데이터와 답안을 입력할 때는 펜을 사용해야 합니다. 그래프를 그릴 때는 연필을 사용해야 합니다.
- 데이터 수집 및 데이터 분석 세션 동안 지정된 테이블을 떠나지 않아야 합니다.
- 데이터 수집이 진행되는 동안에도 데이터 분석 작업을 계속할 수 있습니다.
- **시험 종료 시**:
  - 모든 사용된 시트에 그룹 코드와 페이지 번호를 올바르게 작성했는지 확인하세요.
  - 시트를 다음 순서로 정리하세요:
    요약 답안지 페이지(G01), 사용된 작업 시트(G01).
  - 위의 시트를 작은 봉투 S 안에 넣으세요. 요약 답안지 페이지는 사용 여부와 관계없이 봉투 S 안에 넣어야 합니다.
  - 작은 봉투를 큰 봉투 B 안에 넣으세요.
  - 기타 모든 시트, 즉 지침 시트, 작성 내용, 모든 문제지, 사용하지 않은 작업 시트는 큰 봉투 B 안에 직접 넣어야 합니다.
  - **작은 봉투 S의 내용물만 평가됩니다. 이 봉투에 넣지 않은 시트는 평가되지 않습니다.**
  - 봉투 B의 실을 묶으세요.

(G01) 전파 망원경을 사용한 은하 암흑 물질 탐사 [150 점]

(G01.1) 전파 망원경의 분해능을 추정하고, 그것의 포인팅 장치의 각도 정확도와 비교한다.

(G01.1a) 전파 망원경의 개구부(aperture) 치수(긴 길이 a, 짧은 길이 b)를 측정하고 미터 단위로 표현하시요. 여기서 각 치수에 해당하는 분해능 ($\theta^{\rm a}_{\rm res}$ 및 $\theta^{\rm b}_{\rm res}$) 를 각각 deg 단위로 추정하시오. 더 높은 분해능을 제공하는 치수에 체크 (✓) 하시오. **[7]**

(G01.1b) 위의 분해능와 비교하기 위해, 각도기($\theta^{\rm az}_{\rm min}$)와 디지털 경사계(inclinometer) ($\theta^{\rm alt}_{\rm min}$)의 최소 눈금(가장 작은 측정 단위)을 적으시오. **[2]**

(G01.2) 망원경 운영 소프트웨어를 열고 탭 1을 사용하여 시스템이 작동하는지 확인하라. 각 경도에 대해, **[25]**

- 탭 2를 사용하여 은하 좌표(은경 longitude ℓ, 은위 latitude $b = 0$)를 입력하고, Summary Answersheet의 표에 시간, 그에 해당하는 고도, 방위각 및 $v_{\rm corr}$을 기록하라.
- 이 고도와 방위각을 향하게 하고 탭 3을 사용하여 데이터를 'ℓ.csv'로 기록하라. (예: '30.csv'라는 파일은 은경 30°에 해당하는 데이터를 포함할 수 있다).

표에 있는 모든 다른 은경에 대해 이 절차를 반복하라.

(G01.3) 망원경을 은하 평면에서 떨어진 하늘의 한 영역과 지면을 각각 향하게 하고 Tab 3을 사용하여 보정 데이터 'sky.csv'와 'ground.csv'를 기록하시오. 각 측정을 수행한 시간과 바라본 고도 및 방위각을 Summary Answersheet에 추가하시오. **[14]**

(G01.4) Tab 4에 해당하는 절차를 사용하여 이득(gain) 및 온도 보정(calibration)을 수행하시오. **[7]**

(G01.5) 이제 각 관측 'ℓ.csv'에 대해, 탭 5를 사용하여 5개의 다른 은경 ℓ에 대해 온도 스펙트럼(temperature spectrum)을 얻으시오.

(G01.5a) 주어진 은경 (ℓ)에서 관측는 HI 선 (기준선보다 5 K 높은 온도를 가짐) 중 가장 적색편이가 많이 일어난 주파수 $f_{\rm obs}$ 를 결정하고, Summary Answersheet에 주어진 표에 작성하시오. **[19]**

(G01.5b) $v^{\rm obs}_{\rm Earth}(\ell)$ 및 $v^{\rm max}_{\rm LSR}(\ell)$을 계산하고 Summary Answersheet에 주어진 표에 작성하시오. **[10]**

(G01.5c) 관측된 5개의 모든 은경에서 각각 $v^{\rm max}_{\rm LSR}$ 값을 사용하여 회전 속도 $v_{\rm rot}(R)$ 및 최대로 적색편이된 방출선에 해당하는 은하 반경을 계산하시오. 이 모든 값을 Summary Answersheet에 주어진 표에 작성하시오. **[10]**

(G01.6) 제공된 Summary Answersheet의 그래프 용지에 회전 속도 대 은하 중심 반지름(rotation velocity vs. Galacto-centric radius)을 플롯하고 이 점들을 통과하는 연속적인 곡선을 그리시오. **[6]**

(G01.6a) 구형 대칭 질량 분포를 가정하여 관측의 해당 반지름 내에 포함된 질량을 다음 공식으로 추정하시오: **[10]**

$$M_{\rm encl}(R) = \frac{v_{\rm rot}^2 R}{G},$$

여기서 R은 은하 중심 반지름, $v_{\rm rot}$은 회전 속도, G는 중력 상수이다. 답을 태양 질량 단위로 표현하시오.

(G01.6b) 은하수의 다양한 은하 중심 반지름 R에서 포함된 일반 바리온 물질의 질량은 Summary Answersheet에 주어진 그래프에서 $\odot$ 기호로 표시된다. 동일한 그래프 용지에 측정한 $M_{\rm encl}(R)$을 플롯하고, 각 측정 세트에 대해 두 개의 연속적이고 물리적으로 올바른 곡선을 그리시오. **[12]**

(G01.6c) 포함된 암흑 물질 질량 $M_{\rm dm}(R)$의 값을 계산하고 Summary Answersheet의 표에 기록하시오. **[10]**

(G01.7) 스펙트럼이 총 512개의 빈(bin)을 가지고 총 2.048 MHz의 주파수 범위를 커버한다고 가정할 때, 스펙트럼 빈(bin) 하나 당 관측의 감도를 온도 단위(K)로 추정하시오. **[9]**

(G01.8) 더 큰 개구부 크기의 혼 안테나로 관측을 수행할 경우, 다음 매개변수 중 어느 것이 개선될 지 선택하시오. Summary Answersheet에서 올바른 옵션에 체크하시오. **[9]**

A. 감도 σ_T for $T_{\rm ant}$=5 K
B. 각(angular) 분해능
C. $v_{\rm rot}$의 추정
D. 주파수 분해능