

团队考试阅读材料

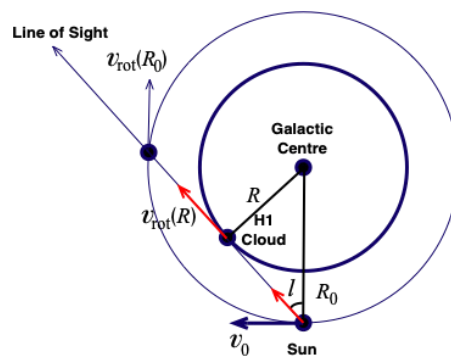
利用射电望远镜揭示银河系中的暗物质

宇宙中包含大量的暗物质。您将通过测量银盘中气体的切向旋转速度来揭示银河系中的暗物质。银盘中的气体包含中性原子氢（HI），可以通过其自旋翻转跃迁检测到，对应的静止频率为 $f_0 = 1420.40575$ MHz。可通过测量该跃迁的多普勒频移来测量银河系中气体的旋转速度。

您的任务是使用提供给您的射电望远镜，测量银盘上不同银经处由银盘中的气体发出的 1419.0 MHz 到 1421.0 MHz 之间的射电辐射光谱。您将分析这些数据，以测量银河系的旋转曲线。根据测得的旋转速度，您将估算距离银心不同半径内包含的质量，将其与相应半径内已知的普通重子物质的质量进行比较，并将二者之间的差异归因于暗物质。

理论背景：

假设银河系中的所有气体都以顺时针方向在不同半径的圆轨道上绕银心运动，如下图所示。考虑在太阳位置以旋转速度 $v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$ 运动的气体。以此速度绕银心旋转的参考系称为“本地静止标准”（LSR）。请注意，太阳相对于 LSR 也是运动的。



观测者沿视线方向观测银经 ℓ 时，会看到来自距离银心不同半径处的气体发出的辐射。假设气体的旋转速度 $v_{\text{rot}}(R)$ 并没有随着半径的增加而显著增加，且总速度矢量恰好沿着观测方向的气体的表观视向速度取到最大值 $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$ 。根据几何关系，

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

其中， $R = R_0 \sin \ell$ ， $R_0 = 8.5 \text{ kpc}$ 是太阳到银心的距离， $v_{\text{rot}}(R)$ 是距离银河系中心 R 处气体的切向旋转速度。我们将使用观测到的 HI 发射线数据推断 $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ ：对于银经 $20^\circ < \ell < 90^\circ$ ，它对应于发射线的最大红移。

太阳和地球相对于 LSR 都不是静止的，因此通过 HI 线测得的速度必须进行校正，包括：(a) 地球的自转，(b) 地球绕太阳的公转，以及 (c) 太阳相对于 LSR 的运动。这些运动可合成为一个视线校正速度 v_{corr} ，它取决于观测者的位置、观测方向以及观测的日期和时间。您将获得工具来计算 v_{corr} ，以便将测量的速度 $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ 转换为相对于 LSR 的速度，使得

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

设静止频率 f_0 发生最大红移后的频率为 f_{obs} ，则 $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ 可用 f_{obs} 的观测结果来确定，即

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

因此，对银盘的 HI 发射的观测使我们得以确定银河系的旋转曲线 $v_{\text{rot}}(R)$ ，并用它来推断距离银心不同半径 R 内所包含的质量。

望远镜输出功率的校准：

从一个源接收到的无线电辐射通常用“亮温度” T^{src} 来表示，其定义如下：如果源在给定频率的辐射强度与某一温度的假想的绝对黑体在该频率的辐射强度相等，则该黑体的温度称为源在该频率下的亮温度。在瑞利-金斯区域，有 $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$ ，其中 P 是从温度为 T^{src} 的源在宽度为 Δf 的频率区间内接收到的平均功率。在射电天文学中，功率和温度这两个概念是等效使用的。

望远镜接收到的无线电功率的等效温度，是 T^{src} 在被称为“波束面积”的立体角上的平均值，这与望远镜的分辨率有关。这种等效温度称为“天线温度” T_{ant} 。此外，整个望远镜系统还会增加一些噪声功率，这由所谓的“接收机温度” T_{recv} 描述。天线温度和接收机温度共同构成“系统温度”

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

这对应于望远镜测量的总功率。望远镜记录的功率在被增益因子 G_R 放大后可以用简化模型表示为

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

其中 P_{out} 、 G_R 、 T_{ant} 和 T_{recv} 都是频率的函数。

因此，在每个频率下，为了从测量的 P_{out} 中确定 T_{ant} ，需要确定的未知量有两个： G_R 和 T_{recv} 。我们将望远镜指向两个标准源来确定这两个未知量，假设它们完全填满望远镜的视野且具有已知的天线温度，并测量接收到的功率。

我们将把望远镜指向

- “地面”，假设对应的天线温度为 $T_{\text{ground}} = 300 \text{ K}$ ，以及
- “天空”，即远离银盘的较冷区域，假设对应的天线温度为 $T_{\text{sky}} = 5 \text{ K}$ 。

可以假设这些校准温度在待测频段内与频率无关。因此，需要在每个频率下求解以下两个方程

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

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

您将获得工具来求解这些方程，并确定与频率相关的 T_{recv} 和 G_R ，这些量可用于进一步测量 T_{ant} 。请注意，为了获得正确校准的 HI 发射线光谱，对“地面”和“天空”的测量是必不可少的。

由于我们的望远镜的角分辨率较低，您可能会发现很难指向完全没有银河系 HI 气体的天空区域。来自银盘面外的气体发射和其他噪声源可能会影响对“天空”的测量。我们将在校准期间屏蔽此类光谱范围。

在给定频率和方向上，HI 发射线表现为无线电强度相对于背景的超出。给定已知的 G_R 和 T_{recv} ，观测系统温度 T_{sys} 的射电望远镜的灵敏度以均方根噪声温度 σ_T 表示，在频率区间 Δf （以 Hz 为单位）中，由下式给出

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

其中 t_{int} 是以秒为单位的积分时间。

设备和软件：



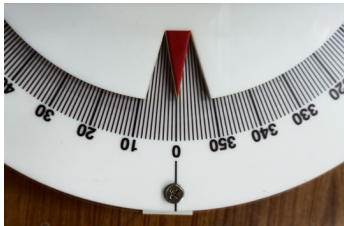
Horn Antenna

Telescope electronics



Laptop

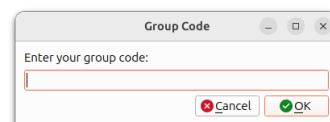
- 一台射电望远镜，即安装在地平式支架上的喇叭天线。方位角可以通过支架底座上的量角器刻度盘来测量。高度角可以使用如下所示的数字倾角仪来测量。



- 望远镜内的电子装置，用于放大信号、过滤所需的频率范围并输出光谱。
- 一台配备了软件的笔记本电脑，具有读取和显示、数据记录、校准和分析望远镜的输出等功能。

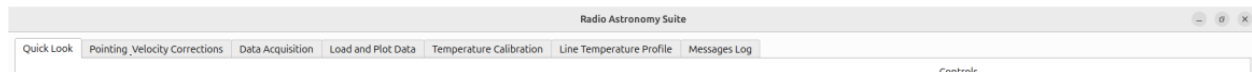
望远镜和软件的使用：

- 您的望远镜已经过调节，对准了正北方向，确保水平刻度盘的零点与桌上的“N”标记重合。
- 双击笔记本电脑显示屏上的图标“Galactic Rotation Curve”以启动程序。



- 输入您的团队代码，并按“OK”。
- 桌面上出现一个文件夹，以您的团队代码命名。您需要将所有数据文件存储在此文件夹中。
- 系统启动，您会看到白色 LED 灯亮起。

- 界面“Radio Astronomy Suite”打开。



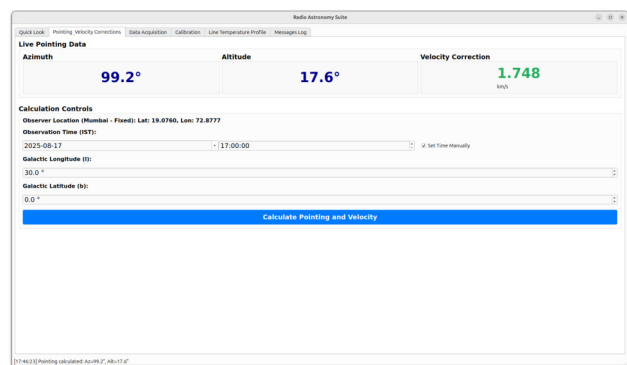
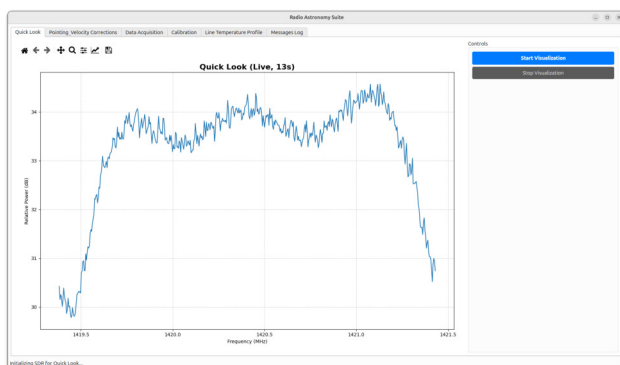
“Radio Astronomy Suite” 具有以下标签页：

• 标签页 1：快速查看

标签页 1 提供快速系统检查，以验证无线电信号是否被正确记录。它将运行绘图脚本，X 轴为观测的频率，Y 轴为接收到的信号的相对功率。

- 首先将望远镜指向天空，然后指向地面，观察信号幅度的变化。
- 脚本将对实时信号的光谱进行 60 秒的监控，但不保存数据。

如果改变望远镜指向时，信号幅度保持不变，请立即通知监考人员。

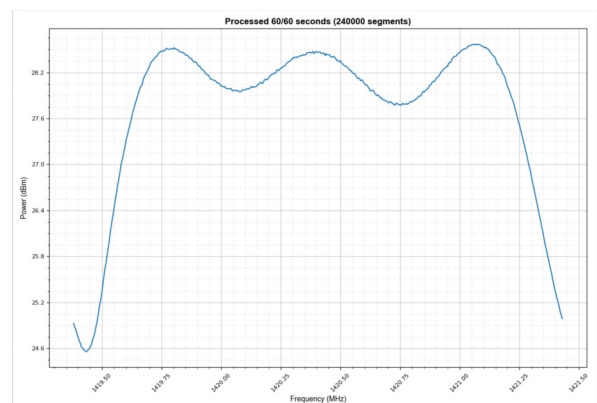
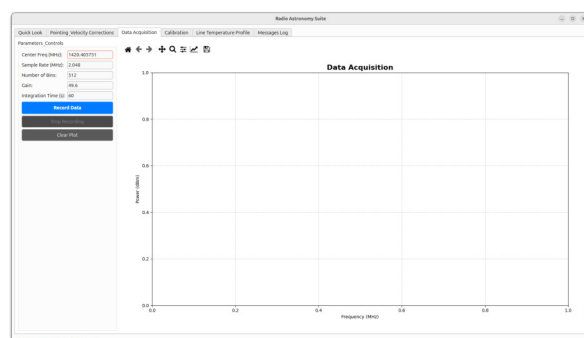


• 标签页 2：望远镜指向以及速度校正

标签页 2 可将给定的银经和银纬转换为当前日期和时间的高度角和方位角。输入所需的银道坐标，以获取相应的高度角和方位角值，以及速度校正 v_{corr} 的值。

• 标签页 3：数据采集

标签页 3 允许您记录数据。它有三个按钮：(i) 记录数据（Record Data），(ii) 停止记录（Stop Recording），和 (iii) 清除图像（Clear Plot）。



点击“记录数据”（Record Data）按钮开始数据采集，积分时间为 60 秒，方向为望远镜当前指向的方向。将弹出一个对话框，提示您将光谱数据命名并保存到文件中。如果您希望在正在进行的曝光完成之前重新开始测量，请点击“停止记录”（Stop Recording）按钮。“清除图像”（Clear Plot）按钮将从屏幕上移除显示的图表。

注意事项：当仰角低于 40° 时，请勿将望远镜指向方位角 0° 和 40° 之间（或 240° 和 360° 之间），以防接收到来自场地附近移动通信塔天线的干扰信号。

为测量给定银经的银盘 21 厘米 HI 发射，请执行以下步骤：

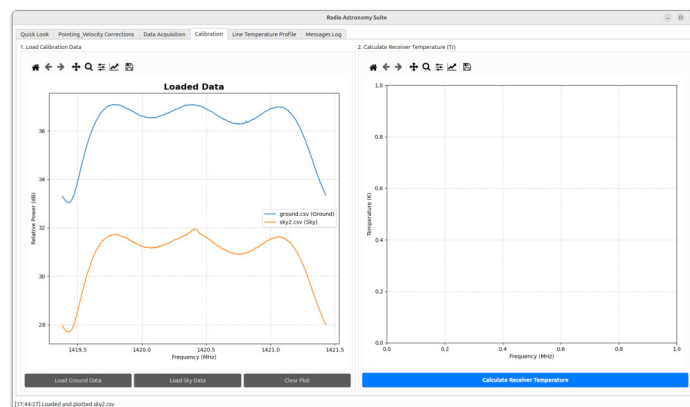
1. 首先使用标签页 2 计算并记下您希望观测的银经对应的高度角、方位角和 v_{corr} 。
2. 然后将望远镜指向希望观测的银经 “ ℓ ” 在天空中的对应位置，并记录光谱。
3. 保存光谱，文件名为 ℓ .csv。

接下来，按顺序执行以下步骤以获得校准测量：

1. 将望远镜指向“地面”，记录并保存光谱，文件名为 **ground.csv**。
2. 将望远镜指向远离银盘面的“天空”，记录并保存光谱，文件名为 **sky.csv**。

标签页 4：定标（或称校准，Calibration）

标签页 4 用于执行定标操作。



1. 首先，您必须通过点击相应的按钮并选择合适的文件来加载**地面**和**天空**数据。加载后，左侧的图将显示天空和地面的相对功率输出。
2. 接下来，点击“**标定增益并获得 T_{recv}** ”（**Calibrate gain and obtain T_{recv}** ）按钮。这将在右侧生成 T_{recv} 随频率变化的曲线图。您应该能看到由噪声波动组成的数据，以及在“天空”校准测量期间望远镜视场内可能存在的 HI 线（如果有的话），它是定标过程中需扣除的干扰线（contaminating line）。
3. 点击干扰线的任意一侧（either side）以选择要屏蔽的区域，该区域将被灰色阴影覆盖。程序将对其余数据拟合一条平滑曲线，并将得到的 T_{recv} 随频率的变化关系显示为绿色虚线。

• 标签页 5：HI 线分析

此标签页基于从标签页 4 中获得的定标数据，功能是从不同银经处的测量结果中提取 HI 发射谱线。

对于各个银经上的测量数据，您将执行以下步骤：

1. 加载文件 ℓ .csv。
2. 点击“**温度轮廓**”（**Line temperature profile**）按钮，将打开一个名为“HI 线温度”（HI Line Temperature）的新标签页。您将看到标定增益并进行 T_{recv} 校准之后的 HI 线温度图。此外，已减去对应于 5 K 的天空背景基底。

3. HI 线的最大红移频率 f_{obs} ，可估算为比紧邻基线 (immediate baseline) 值高出 5 K 温度的最低频率。请对每次测量，找出 f_{obs} 。

在最后一步中，如果您在发射线的温度轮廓的红端看到大约 5 K 的平坦曲线，请再次进行该谱线的测量。