

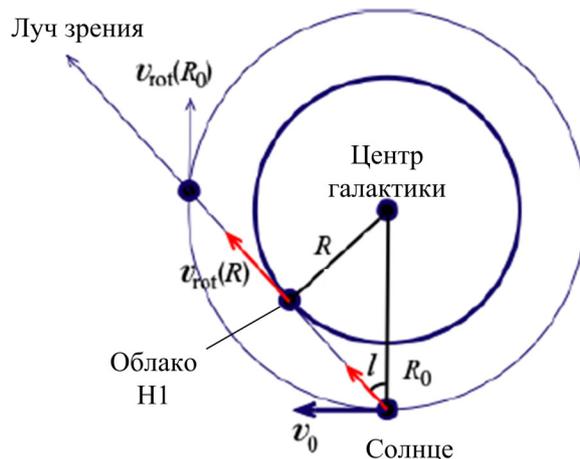
Открытие темной материи Галактики с помощью радиотелескопа

Вселенная состоит из огромного количества тёмной материи. Вы обнаружите тёмную материю в нашей Галактике, измерив тангенциальную скорость вращения газа в её диске. Газ в диске Млечного Пути содержит нейтральный атомарный водород (HI), который можно обнаружить с помощью спин-флип перехода, соответствующего частоте покоя $f_0 = 1420,40575$ МГц. Скорость вращения газа в Галактике можно измерить, используя доплеровское смещение этого перехода.

Ваша задача — измерить спектры радиоизлучения в диапазоне частот 1419,0–1421,0 МГц, испускаемого газом диска Галактики на разных долготах в плоскости Галактики, с помощью предоставленного вам радиотелескопа. Вы проанализируете эти данные и определите кривую вращения Млечного Пути. Основываясь на измеренных скоростях вращения, вы оцените массу, находящуюся в пределах различных галактоцентрических расстояний, сравните её с известной барионной массой Галактики в пределах соответствующих радиусов и припишете любые различия тёмной материи.

Теоретическая основа

Предположим, что весь газ в Галактике движется по часовой стрелке (если смотреть с Северного Галактического полюса) по круговым орбитам на разных расстояниях от центра Галактики, как показано на рисунке ниже. Рассмотрим газ, вращающийся со скоростью ($v_0 = 220 \text{ км с}^{-1}$) в точке расположения Солнца. Система отсчёта, вращающаяся с этой скоростью, называется локальным стандартом покоя (local standard of rest, LSR). Обратите внимание, что Солнце движется относительно LSR.



При наблюдении вдоль луча зрения в направлении долготы ℓ наблюдатель принимает излучение газа на разных расстояниях от центра Галактики. Предполагая, что скорость вращения газа $v_{\text{rot}}(R)$ не увеличивается существенно с увеличением радиуса, газ, полный вектор скорости которого направлен вдоль направления наблюдения, будет иметь максимальную суммарную величину скорости вдоль луча зрения, $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$. Из геометрии,

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

где $R = R_0 \sin \ell$, R_0 - расстояние от Солнца до Галактического центра (8,5 кпк) и $v_{\text{rot}}(R)$ - тангенциальная скорость вращения газа на расстоянии R от Галактического центра. Мы выведем $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ используя наблюдаемые данные по линиям излучения HI. Для галактических долгот $20 < \ell < 90$ градусов это соответствует максимальному смещению излучения в красную область спектра.

Поскольку и Солнце, и Земля не покоятся относительно LSR, наблюдаемые скорости линий HI должны быть скорректированы с учетом (а) вращения Земли, (б) ее вращения вокруг Солнца и (с) движения Солнца относительно LSR. Эти движения складываются в скорость коррекции луча зрения (v_{corr}), которая зависит от местоположения наблюдателя, направления луча зрения, а также даты и времени наблюдения. Вам будут предоставлены инструменты для вычисления (v_{corr}), чтобы измеренные скорости ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) можно было преобразовать в скорости относительно LSR, так что

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

Величину $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ можно определить, используя наблюдаемую частоту f_{obs} , которая максимально смещена в красную область от f_0 , так что

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

. Таким образом, наблюдения за излучением HI из галактического диска позволяют нам определить кривую вращения Млечного Пути, $v_{\text{rot}}(R)$, которую можно использовать для вывода заключенной массы на различных расстояниях (R) от галактического центра.

Калибровка выходной мощности телескопа:

Принимаемое радиоизлучение от источника обычно выражается через эквивалентную температуру T^{src} (называемую яркостной температурой) (гипотетического) чёрного тела, которое излучалось с той же интенсивностью на заданной частоте в телесном угле источника. В режиме Рэля-Джинса $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$, где P — средняя мощность, принимаемая от источника с температурой T^{src} в частотном интервале полосой Δf . Мощность и температура используются в радиоастрономии как эквивалентные понятия.

Эквивалентная температура мощности радиоизлучения, принимаемого телескопом, представляет собой среднее значение T^{src} по телесному углу, называемому площадью луча, которая связана с разрешением телескопа. Эта эквивалентная температура называется температурой антенны, T_{ant} . Кроме того, вся система телескопа также добавляет некоторую мощность шума, описываемую так называемой температурой приёмника, T_{recv} . Вместе температура антенны и температура приёмника дают температуру системы,

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

, которая соответствует полной мощности, измеренной телескопом. Телескоп регистрирует мощность после ее усиления с коэффициентом усиления G_R таким образом, что в упрощенной модели мы можем выразить

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

где P_{out} , G_R , T_{ant} и T_{recv} являются функциями частоты.

Таким образом, на каждой частоте необходимо определить две неизвестные величины: G_R и T_{recv} , чтобы определить T_{ant} по измеренному значению P_{out} . Мы определим эти две неизвестные величины, направив телескоп на два стандартных источника, предполагая, что они полностью заполняют поле зрения телескопа и имеют известные температуры антенн, и измерив принимаемую мощность.

Мы направим телескоп на

- «Землю», которая, как предполагается, имеет температуру антенны $T_{\text{ground}} = 300$ К, и
- холодную часть «неба» вдали от галактической плоскости с предполагаемой температурой антенны $T_{\text{sky}} = 5$ К.

Эти калибровочные температуры можно считать независимыми от частоты в интересующей полосе. Таким образом, необходимо решить следующие два уравнения на каждой частоте

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

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

. Вам будут предоставлены инструменты, которые позволят решить эти уравнения и определить зависящие от частоты T_{recv} и G_R , которые можно использовать для получения T_{ant} для дальнейших измерений. Обратите внимание, что проведение измерений как на Земле, так и на небе имеет важное значение для получения правильно откалиброванного спектра линии излучения HI.

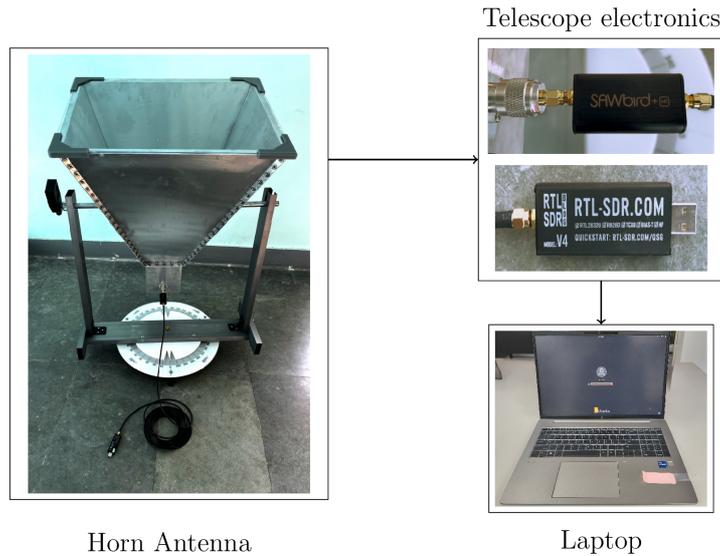
Из-за низкого углового разрешения нашего телескопа вам может быть сложно навести телескоп на область неба, полностью свободную от газа HI нашей Галактики. Излучение газа за пределами плоскости Галактики и другие источники шума могут повлиять на результаты измерений. Мы будем маскировать этот спектральный диапазон во время калибровки.

Эмиссионная линия HI проявляется как избыток интенсивности радиоизлучения относительно фона на заданной частоте и направлении. При известных G_R и T_{recv} чувствительность, выраженная в виде среднеквадратичной шумовой температуры σ_T радиотелескопа, наблюдающего системную температуру T_{sys} в частотном интервале Δf (в Гц), определяется по формуле

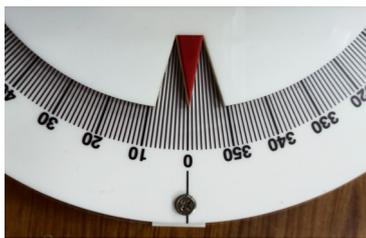
$$\sigma_T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta f \times t_{int}}},$$

где t_{int} — время интегрирования в секундах.

Оборудование и программное обеспечение:



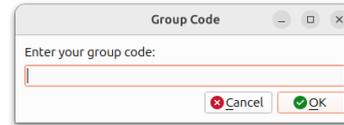
- Радиотелескоп с рупорной антенной на азимутальной монтировке. Азимут можно измерить с помощью шкалы транспортира у основания монтировки. Высоту можно измерить с помощью цифрового инклинометра, как показано ниже.



- Телескоп включает в себя электронные блоки, которые усиливают сигнал, фильтруют нужный диапазон частот и выводят спектр.
- Ноутбук, оснащенный функциями считывания и отображения данных, записи, калибровки и анализа выходных данных телескопа.

Использование телескопа и программного обеспечения:

- Ваш телескоп уже настроен на север. Убедитесь, что нулевой градус на горизонтальной шкале совпадает с отметкой «N» (север) на столе.
- Дважды щелкните значок «Кривая вращения Галактики» на экране ноутбука, чтобы запустить программу.



- Введите код группы и нажмите «ОК».
 - На рабочем столе появится папка с вашим кодом группы. В ней необходимо сохранить все ваши файлы данных.
 - Система включится, и вы увидите загоревшийся белый светодиод.
 - Откроется интерфейс «Radio Astronomy Suite».



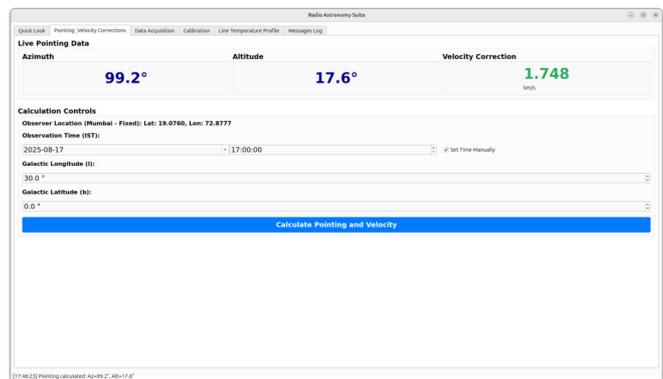
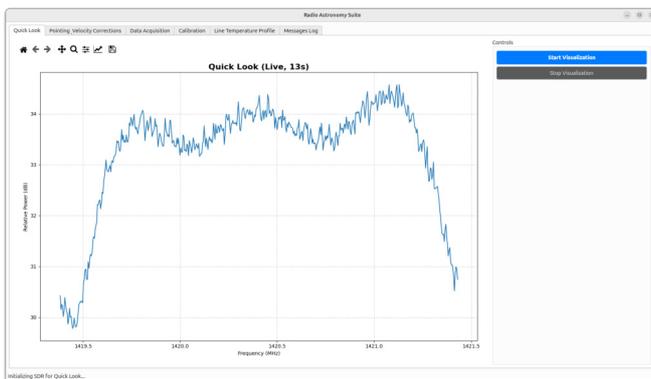
«Радиоастрономический пакет (Radio Astronomy Suite)» имеет следующие вкладки:

- **Вкладка 1: Быстрый просмотр (Tab 1: Quick Look)**

Вкладка 1 обеспечивает быструю проверку системы для подтверждения корректности записи радиосигнала. Она запускает код, который отображает полученный сигнал (относительную мощность) по оси Y в зависимости от наблюдаемой частоты по оси X.

1. Направьте телескоп сначала на небо, а затем на землю и наблюдайте за изменением амплитуды сигнала.
2. Код отслеживает спектр сигнала в режиме реального времени в течение 60 с, но **не** сохраняет данные.

Немедленно сообщите руководителю, если амплитуда сигнала остается неизменной при изменении наведения телескопа.

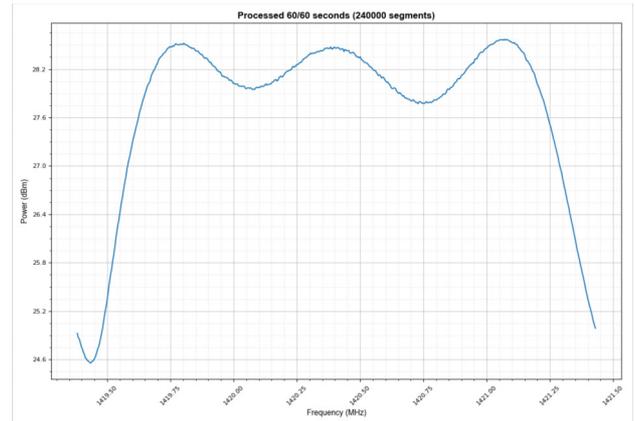
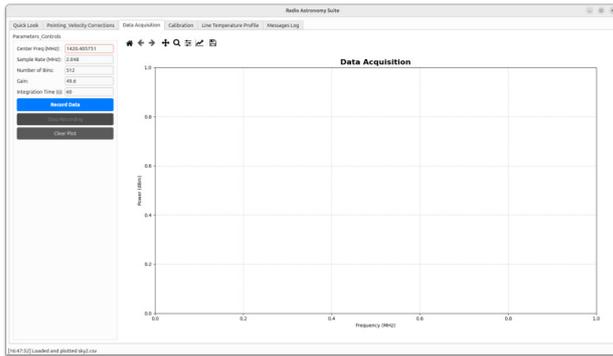


- **Вкладка 2: Наведение и коррекция скорости (Tab 2: Pointing and Velocity Correction)**

Вкладка 2 преобразует указанные галактическую долготу и широту в высоту и азимут для текущей даты и времени. Введите нужные галактические координаты, чтобы получить соответствующие значения высоты и азимута, а также поправку к скорости v_{corr} .

- **Вкладка 3: Сбор данных (Tab 3: Data Acquisition)**

Вкладка 3 позволяет записывать данные. Она имеет три кнопки: (i) «Записать данные», (ii) «Остановить запись» и (iii) «Очистить график».



Нажатие кнопки «**Записать данные**» запускает сбор данных в течение 60 с в направлении, в котором в данный момент направлен телескоп. Появится диалоговое окно с предложением присвоить имя спектральным данным и сохранить их в файл. Чтобы перезапустить измерение до завершения текущей экспозиции, нажмите кнопку «**Остановить запись**». Кнопка «**Очистить график**» удаляет отображаемый график с экрана.

Меры предосторожности : Не наводите телескоп в направлении между азимутом 0° и 40° (или между 240° и 360°), когда угловая высота ниже 40° чтобы избежать помех от антенны мобильной вышки, расположенной вблизи места проведения мероприятия.

Чтобы измерить излучение НИ длиной 21 см от галактического диска на заданной галактической долготе, выполните следующие действия:

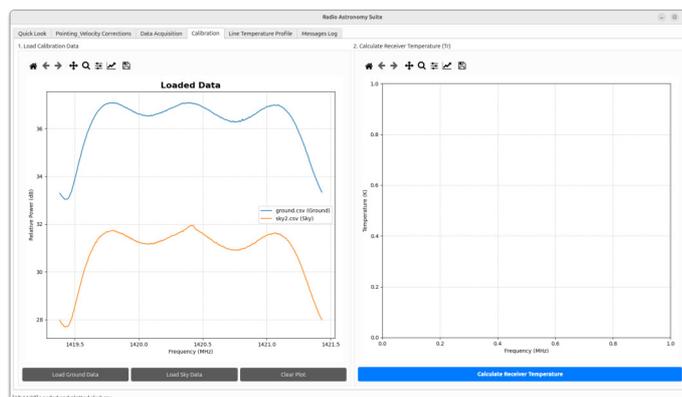
1. Сначала используйте вкладку 2, чтобы вычислить и записать высоту, азимут и v_{corr} для галактической долготы, которую вы хотите наблюдать.
2. Затем направьте телескоп на нужную точку галактической долготы « ℓ » на небе и запишите спектр.
3. Сохраните спектр под именем файла ℓ .**csv** .

Далее последовательно выполните следующие шаги для получения калибровочных измерений.

1. Направьте телескоп на «землю», запишите и сохраните спектр в файле с именем **ground.csv** .
2. Направьте телескоп на «небо» в стороне от галактической плоскости, запишите и сохраните спектр под именем файла **sky.csv** .

• **Вкладка 4: Калибровка (Tab 4: Calibration)**

Вкладка 4 используется для выполнения калибровки.



1. Сначала необходимо загрузить данные о **Земле** и **небе**, нажав соответствующие кнопки и выбрав нужные файлы. После загрузки на левом графике отобразится относительная выходная мощность для неба и Земли.

2. Затем нажмите « **Калибровать усиление и получить T_{recv}** ». В правой панели появится график зависимости T_{recv} от частоты. Вы должны увидеть данные, состоящие из шумовых флуктуаций, а также загрязняющую линию HI (если таковая имеется) в поле зрения телескопа во время калибровки по небу.
3. **Щёлкните** по обеим сторонам линии загрязнения, чтобы определить область, которую необходимо замаскировать (отображается серым цветом). Затем код подберёт плавную кривую к оставшимся данным и отобразит результирующую частотную зависимость T_{recv} в виде зелёной пунктирной линии.

- **Вкладка 5. Анализ линии HI (Tab 5. HI Line analysis)**

В этой вкладке применяется калибровка, полученная во вкладке 4, для извлечения спектра излучения линии HI из измерений, выполненных во вкладке 3 на разных галактических долготах.

Для каждого измерения на заданной долготе вам необходимо будет выполнить следующие шаги:

1. Загрузите файл ℓ **.csv**.
2. Нажмите кнопку «Профиль температуры линии», и откроется новая вкладка «Температура линии HI». Вы увидите график температуры линии HI после применения усиления и калибровки T_{recv} . Кроме того, была вычтена базовая линия, соответствующая фону неба температурой 5 K.
3. Частота с наибольшим красным смещением (f_{obs}), принадлежащая линии HI, может быть оценена как самая низкая частота, температура которой на 5 K выше значения базовой линии. Определите f_{obs} для каждого измерения.

На последнем этапе, если вы видите плоское плечо около 5 K в профиле температуры линии на красной стороне эмиссионной линии, выполните измерение для этой долготы еще раз.