

การค้นหามสสารมืดในกาแล็กซีโดยใช้กล้องโทรทรรศน์วิทยุ

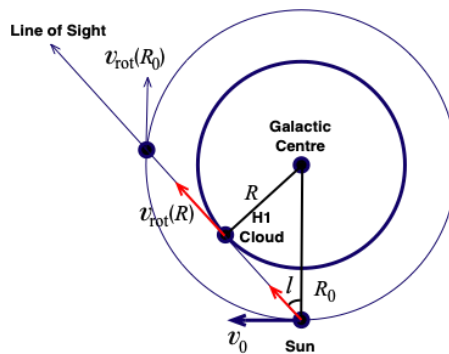
(Uncovering Galactic Dark Matter Using a Radio Telescope)

เอกภพประกอบด้วยสสารมืด (dark matter) จำนวนมาก เราสามารถค้นพบสสารมืดในกาแล็กซีของเราโดยการวัดความเร็วการหมุนในแนวสัมผัสของแก๊สในจานของกาแล็กซีเรา แก๊สในจานของกาแล็กซีทางช้างเผือก (Milky Way) มีไฮโดรเจนอะตอมที่เป็นกลาง (HI) โดยการตรวจจับเส้นสเปกตรัมที่มาจากการเปลี่ยนสถานะสปิน (spin flip) ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ที่วัดได้บนกรอบนิ่ง (rest frequency) $f_0 = 1420.40575$ MHz ความเร็วในการหมุนของแก๊สในกาแล็กซีวัดได้จากการเลื่อนดอปเพลอร์ (Doppler shift) ไปจากความถี่

งานของนักเรียนคือการวัดสเปกตรัมของการแผ่รังสีวิทยุระหว่าง 1419.0 MHz และ 1421.0 MHz ที่ปล่อยออกมาจากแก๊สในจานกาแล็กซีที่ลองจิจูดต่าง ๆ ในระนาบกาแล็กซี (galactic plane) โดยใช้กล้องโทรทรรศน์วิทยุ (radio telescope) ที่เตรียมไว้ให้ นักเรียนจะวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้เพื่อหาเส้นโค้งการหมุน (rotation curve) สำหรับกาแล็กซีทางช้างเผือก โดยการวัดอัตราเร็วของการหมุนจะทำให้เราสามารถประมาณมวลที่อยู่ในรัศมีที่วัดจากศูนย์กลางกาแล็กซี (galacto-centric radius) ค่าต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลแบรีออน (baryonic mass) ในกาแล็กซีภายในรัศมีที่สอดคล้องกันซึ่งมีค่าที่ทราบแล้ว จะทำให้เราสามารถประมาณการมีอยู่ของสสารมืดจากผลต่างของมวลเหล่านี้

พื้นฐานทางทฤษฎี

สมมติว่าแก๊สทั้งหมดในกาแล็กซีเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา (เมื่อมองจากขั้วเหนือของกาแล็กซี) ในวงโคจรรูปวงกลมที่ระยะห่างต่าง ๆ เมื่อวัดจากศูนย์กลางกาแล็กซีซึ่งแสดงในภาพด้านล่าง ถ้าพิจารณาว่าแก๊สที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์มีความเร็วในการหมุน ($v_0 = 220$ km s⁻¹) เราเรียกกรอบอ้างอิงหมุนที่หมุนด้วยความเร็วนี้เรียกว่า กรอบนิ่งมาตรฐานของท้องถิ่น (local standard of rest, LSR) สังเกตว่า ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่เทียบกับ LSR



เมื่อสังเกตตามแนวเส้นสายตาไปยังลองจิจูด ℓ ต่าง ๆ ผู้สังเกตจะเห็นการแผ่รังสีจากแก๊สที่ระยะห่างต่าง ๆ จากจุดศูนย์กลางกาแล็กซี เมื่อสมมติว่าความเร็วในการหมุน $v_{\text{rot}}(R)$ ของแก๊สไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้น ความเร็วของแก๊สจะมีขนาดสูงสุดเมื่อเวกเตอร์ความเร็วรวมขนานไปกับทิศทางตามแนวเส้นสายตา (line-of-sight velocity) $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$ โดยใช้เรขาคณิต

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

โดยที่ $R = R_0 \sin \ell$ และ R_0 คือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกาแล็กซีของดวงอาทิตย์ (8.5 kpc) และ $v_{\text{rot}}(R)$ คือความเร็วในการหมุนแบบสัมผัสของแก๊สที่ระยะห่าง R จากจุดศูนย์กลางกาแล็กซี เราจะสามารถหาค่า $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ โดยอาศัยข้อมูลจากเส้นสเปกตรัมเรืองแสงของ HI เราจะพบการเลื่อนไปทางแดงสูงสุดในช่วงลองจิจูดกาแล็กซี $20^\circ < \ell < 90^\circ$ องศา

เนื่องจากทั้งดวงอาทิตย์และโลกไม่ได้อยู่นิ่งเทียบกับ LSR ความเร็วของเส้น HI ที่สังเกตได้จะต้องมีการแก้ไข (correction) เนื่องจาก (a) การหมุนของโลก, (b) การโคจรรอบดวงอาทิตย์, และ (c) การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เทียบกับ LSR การเคลื่อนที่เหล่านี้รวมกันเป็นค่าความเร็วแก้ไข (correction velocity) ตามแนวเส้นสายตา (v_{corr}) ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผู้สังเกต, ทิศทางการมอง, และเวลาที่ทำการสังเกต นักเรียนจะได้รับเครื่องมือในการคำนวณ (v_{corr}) เพื่อปรับแก้ความเร็วที่วัดได้ ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) ให้เป็นความเร็วเทียบกับ LSR v_{LSR} โดยใช้สมการ

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

ปริมาณ $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ สามารถกำหนดได้โดยใช้ความถี่ที่สังเกตได้ f_{obs} ซึ่งมีการเลื่อนแดงสูงสุดจาก f_0 ผ่านสมการ

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

ดังนั้น การสังเกตการแผ่รังสี HI จากแผ่นกาแล็กซีทำให้เราสามารถกำหนดเส้นโค้งการหมุนของทางช้างเผือก $v_{\text{rot}}(R)$ ซึ่งสามารถใช้อนุมานมวลที่อยู่ภายในที่ระยะห่างต่างๆ (R) จากจุดศูนย์กลางกาแล็กซี

การสอบเทียบกำลังขาออกของกล้องโทรทรรศน์วิทยุ:

การรับคลื่นวิทยุจากแหล่งกำเนิดมักแสดงในรูปอุณหภูมิยังผล (equivalent temperature) T^{src} หรือที่เรียกว่า อุณหภูมิความสว่าง (brightness temperature) ของวัตถุ (สมมติ) ซึ่งจะปล่อยความเข้มสัญญาณที่ความถี่หนึ่ง ๆ เท่ากันโดยตลอดมุมตัน (solid angle) จากแหล่งกำเนิด ในช่วงเรย์ลี-จินส์ (Rayleigh-Jeans regime) $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$ โดยที่ P คือกำลังเฉลี่ยที่รับได้จากแหล่งกำเนิดที่มีอุณหภูมิ T^{src} ในช่วงความถี่ที่มีความกว้าง Δf กำลังและอุณหภูมิถูกใช้เทียบเท่ากันในดาราศาสตร์วิทยุ (radio astronomy)

อุณหภูมิยังผลที่มาจากกำลังคลื่นวิทยุที่รับได้โดยกล้องโทรทรรศน์เป็นค่าเฉลี่ยของกำลัง T^{src} ที่วัดตลอดมุมตันที่เรียกว่าพื้นที่ลำแสง (beam area) ซึ่งสัมพันธ์กับความละเอียด (resolution) ของกล้องโทรทรรศน์ อุณหภูมิเทียบเท่านี้เรียกว่าอุณหภูมิสายอากาศ (antenna temperature) T_{ant} นอกจากนี้ ระบบกล้องโทรทรรศน์ทั้งหมดยังเพิ่มกำลังรบกวน (noise power) บ้าง ซึ่งอธิบายด้วยสิ่งที่เรียกว่าอุณหภูมิตัวรับ (receiver temperature) T_{recv} เมื่อนำมารวมกัน อุณหภูมิสายอากาศและอุณหภูมิตัวรับรวมกันเป็นอุณหภูมิระบบ (system temperature)

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

ซึ่งสอดคล้องกับกำลังทั้งหมดที่วัดได้โดยกล้องโทรทรรศน์ กล้องโทรทรรศน์บันทึกกำลังหลังจากที่ถูกขยาย (amplify) ด้วยตัวประกอบอัตราขยาย (gain factor) G_R เพื่อให้ในแบบจำลองอย่างง่ายเราสามารถแสดง

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

โดยที่ P_{out} , G_R , T_{ant} และ T_{recv} ทั้งหมดเป็นฟังก์ชันของความถี่

ดังนั้น ที่แต่ละความถี่ มีตัวแปรสองตัวที่ต้องกำหนดคือ G_R และ T_{recv} เพื่อหา T_{ant} จาก P_{out} ที่วัดได้ เราจะกำหนดตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งสองนี้โดยการชั่งกล้องโทรทรรศน์ไปที่แหล่งกำเนิดมาตรฐานสองแหล่ง โดยสมมติว่าแหล่งกำเนิดเหล่านี้เต็มมุมมองของกล้องโทรทรรศน์และมีอุณหภูมิสายอากาศที่ทราบค่า และวัดกำลังที่รับได้

เราจะชั่งกล้องโทรทรรศน์ไปที่

- 'พื้นดิน' ซึ่งสมมติว่ามีอุณหภูมิสายอากาศ $T_{\text{ground}} = 300 \text{ K}$ และ
- ส่วนที่เย็นของ 'ท้องฟ้า' ห่างจากกระนาบกาแล็กซีโดยสมมติว่ามีอุณหภูมิสายอากาศ $T_{\text{sky}} = 5 \text{ K}$

อุณหภูมิปรับเทียบเหล่านี้สามารถสมมติได้ว่าไม่ขึ้นกับความถี่ในแถบความถี่ที่สนใจ ดังนั้น นักเรียนจะต้องแก้สมการสองข้อต่อไปนี้ที่แต่ละความถี่

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

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

นักเรียนจะได้รับเครื่องมือที่จะแก้สมการเหล่านี้และคำนวณค่า T_{recv} ที่ขึ้นกับความถี่และ G_R ซึ่งสามารถใช้เพื่อหา T_{ant} สำหรับการวัดต่อไป สังเกตว่า การวัดทั้งพื้นดินและท้องฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการได้สเปกตรัมเส้นการแผ่รังสี HI ที่ปรับเทียบอย่างเหมาะสม

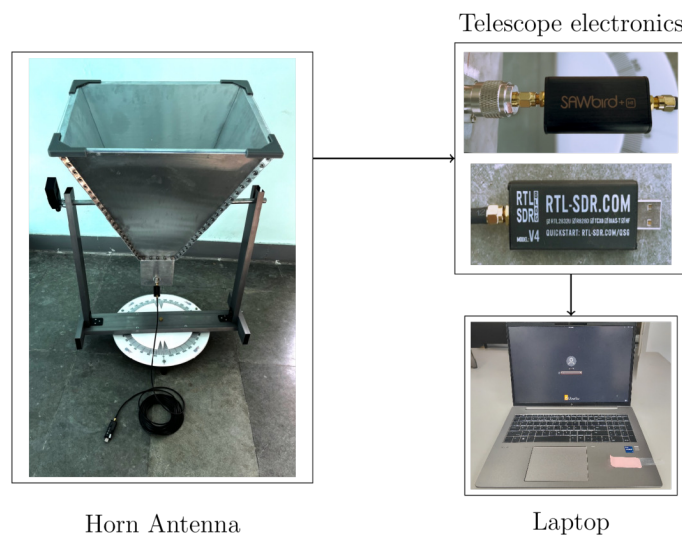
เนื่องจากกล้องโทรทรรศน์ของเรามีความละเอียดเชิงมุม (angular resolution) ต่ำ นักเรียนอาจพบว่า เป็นกฏยากที่จะเข้าไปยังบริเวณของท้องฟ้าที่ปราศจากแก๊ส HI จากกาแล็กซีของเรา การแผ่รังสีจากแก๊สนอกกระนาบกาแล็กซีและแหล่งรบกวนอื่น ๆ อาจส่งผลต่อการวัดท้องฟ้า เราจะปิดบังช่วงสเปกตรัมดังกล่าวระหว่างการปรับเทียบ (calibration)

เส้นการแผ่รังสี HI ปรากฏเป็นความเข้มของคลื่นวิทยุที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพื้นหลังที่ความถี่และทิศทางที่กำหนด เมื่อทราบค่า G_R และ T_{recv} ความไว (sensitivity) ที่แสดงเป็นอุณหภูมิสัญญาณรบกวน r.m.s. (r.m.s. noise temperature) σ_T ของกล้องโทรทรรศน์วิทยุที่สังเกตอุณหภูมิระบบ T_{sys} ในช่วงความถี่ Δf (ในหน่วย Hz) กำหนดโดย

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

โดยที่ t_{int} คือเวลาในการรวมสัญญาณในหน่วยวินาที

เครื่องมือและซอฟต์แวร์ :



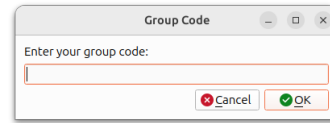
- กล้องโทรทรรศน์วิทยุที่ใช้สายอากาศฮอร์น (horn antenna) บนฐานยึดที่ระบุมุมเงยและมุมทิศ การวัดมุมทิศทำได้ด้วยแป้นโพแทสเซียมที่ฐานของฐานยึด การวัดมุมเงยทำได้จากเครื่องวัดความเอียงดิจิทัลตามที่แสดงด้านล่าง



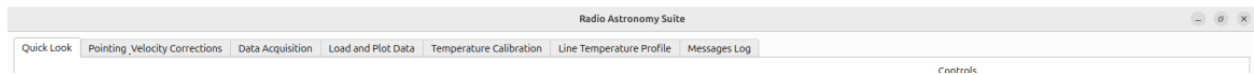
- กล้องโทรทรรศน์ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ, กรองความถี่ในย่านที่ต้องการ, และให้สัญญาณออกเป็นสเปกตรัม
- แลปท็อปที่มีอุปกรณ์สำหรับอ่านและแสดงผล, บันทึกข้อมูล, สอบเทียบ (calibrate)} และวิเคราะห์ผลจากกล้องโทรทรรศน์วิทยุ

การใช้งานกล้องโทรทรรศน์และซอฟต์แวร์ :

- กล้องโทรทรรศน์จัดให้พร้อมใช้งานและวางให้ตรงกับทิศเหนือแล้ว ตรวจสอบให้แน่ใจว่าศูนย์องศาบนหน้าปัดแนวอนตรงกับเครื่องหมาย "N" (ทิศเหนือ) บนโต๊ะ
- ดับเบิลคลิกที่ไอคอน - "Galactic Rotation Curve" บนหน้าจอแลปท็อปเพื่อเริ่มโปรแกรม



- ป้อนรหัสกลุ่มของนักเรียนและกด "OK"
 - โฟลเดอร์ที่มีรหัสกลุ่มของนักเรียนจะปรากฏบนหน้าจอ (desktop) นักเรียนต้องเก็บไฟล์ข้อมูลทั้งหมดของคุณในโฟลเดอร์นี้
 - ระบบจะเปิดการทำงานและนักเรียนจะเห็นไฟ LED สีขาวติดสว่าง
 - อินเทอร์เน็ต "Radio Astronomy Suite" จะเปิดขึ้น



โปรแกรม "Radio Astronomy Suite" มีแท็บดังต่อไปนี้:

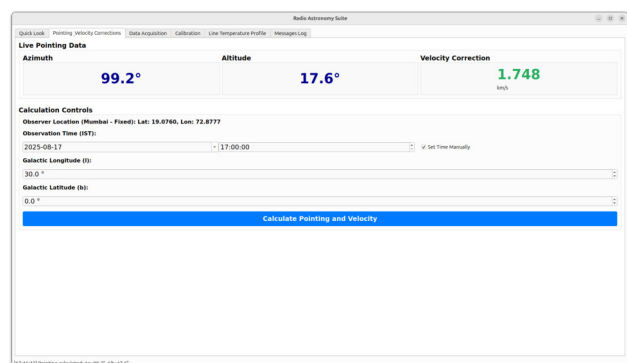
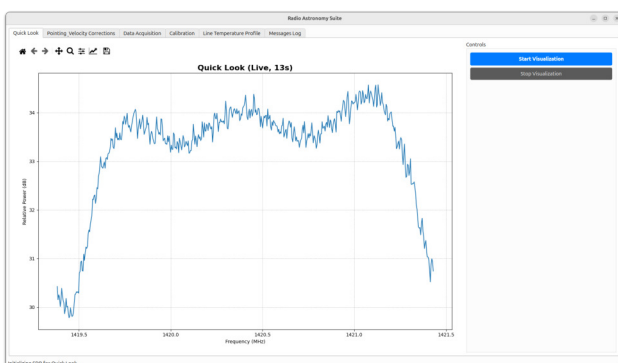
• แท็บ 1: การดูอย่างรวดเร็ว

แท็บ 1 ใช้ในการตรวจสอบระบบอย่างรวดเร็วเพื่อยืนยันว่าสัญญาณวิทยุจะถูกบันทึกอย่างถูกต้อง แท็บนี้รันโค้ดที่พล็อตสัญญาณที่รับได้ (ในรูปของกำลังสัมพัทธ์) บนแกน Y เทียบกับเวลาที่สังเกตได้บนแกน X

1. ให้นักล่องโทรทรรศน์ไปที่ท้องฟ้าก่อนแล้วจึงหันไปทางพื้นดิน ให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของสัญญาณที่เกิดขึ้น

2. โค้ดจะตรวจสอบสเปกตรัมของสัญญาณแบบเรียลไทม์เป็นเวลา 60 วินาที แต่ยังไม่ได้นับที่ข้อมูล

แจ้งกรรมการผู้ดูแลทันทีหากแอมพลิจูดของสัญญาณไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อหันกล้องโทรทรรศน์ไปยังทิศต่าง ๆ

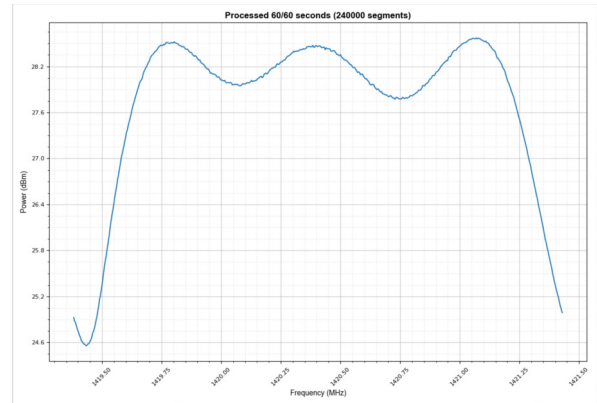
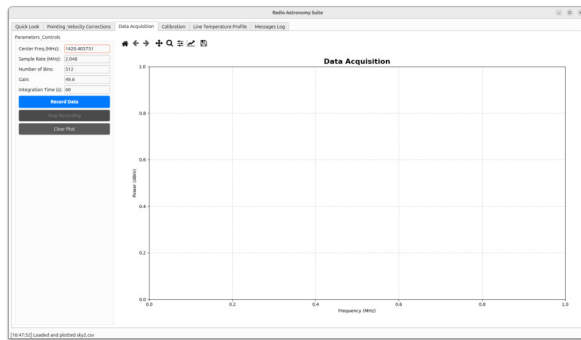


• แท็บ 2: การชี้และการแก้ไขความเร็ว

แท็บ 2 ทำหน้าที่แปลงลองจิจูดและละติจูดกาแล็กซีที่ระบุให้เป็นมุมเงยและมุมทิศในวันที่และเวลาปัจจุบัน ป้อนพิกัดกาแล็กซีที่ต้องการเพื่อให้คำนวณมุมเงยและมุมทิศ พร้อมกับคำนวณค่าการแก้ไขความเร็ว v_{corr}

• แท็บ 3: การเก็บข้อมูล

แท็บ 3 ใช้เพื่อบันทึกข้อมูล และมีปุ่มสามปุ่ม: (i) บันทึกข้อมูล, (ii) หยุดการบันทึก, และ (iii) ล้างกราฟ



เมื่อคลิก **บันทึกข้อมูล** จะเริ่มการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 60 วินาทีในทิศทางที่กล้องโทรทรรศน์กำลังชี้อยู่ กลุ่มโต้ตอบ (dialog box) จะปรากฏขึ้นเพื่อให้นักเรียนตั้งชื่อและบันทึกข้อมูลสเปกตรัมลงในไฟล์ หากนักเรียนต้องการเริ่มการวัดใหม่ก่อนที่การเก็บข้อมูลที่กำลังดำเนินอยู่จะเสร็จสิ้น ให้ใช้ปุ่ม **หยุดการบันทึก** ปุ่ม **ล้างกราฟ** จะลบกราฟที่แสดงออกจากหน้าจอ

ข้อควรระวัง : อย่าให้กล้องโทรทรรศน์หันไประหว่างมุมทิศ 0° และ 40° (หรือระหว่าง 240° และ 360°) เมื่อมุมเงยน้อยกว่า 40° เพื่อป้องกันคลื่นรบกวนจากสัญญาณที่มาจากสายอากาศเครือข่ายมือถือที่ตั้งอยู่ใกล้บริเวณจัดงาน

เพื่อวัดการแผ่รังสี HI 21-cm ตามแนวแกนกาแล็กซีที่ลองจิจูดกาแล็กซีที่กำหนด จงทำตามขั้นตอนต่อไปนี้ :

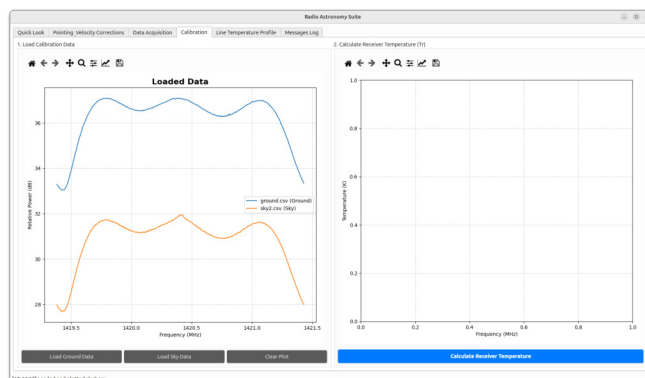
1. ใช้แท็บ 2 เพื่อคำนวณและจัดบันทึกมุมเงย มุมทิศ และ v_{CORR} สำหรับลองจิจูดกาแล็กซีที่นักเรียนต้องการสังเกต
2. หันกล้องโทรทรรศน์ไปยังตำแหน่งลองจิจูดกาแล็กซีที่ต้องการ " l " บนท้องฟ้าและบันทึกสเปกตรัม
3. บันทึกสเปกตรัมด้วยชื่อไฟล์ **l.csv**

จากนั้น ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้ตามลำดับเพื่อการสอบเทียบ

1. หันกล้องไปยัง 'พื้นดิน' เก็บข้อมูลและบันทึกสเปกตรัมด้วยไฟล์ชื่อ **ground.csv**
2. หันกล้องไปยัง 'ท้องฟ้า' ในบริเวณที่ห่างจากระนาบกาแล็กซี เก็บข้อมูลและบันทึกสเปกตรัมไฟล์ชื่อ **sky.csv**

• แท็บ 4: การสอบเทียบ

แท็บ 4 ใช้สำหรับการสอบเทียบ (calibration)



1. โหลดข้อมูล **ground** และ **sky** โดยคลิกที่ปุ่มที่เกี่ยวข้องและเลือกไฟล์ที่เหมาะสม เมื่อโหลดแล้ว กราฟด้านซ้ายจะแสดงกำลังสัมพัทธ์ (relative power output) สำหรับทั้งท้องฟ้าและพื้นดิน

2. เมื่อคลิกที่ปุ่ม "Calibrate gain and obtain T_{recv} " โปรแกรมจะสร้างกราฟของ T_{recv} เป็นฟังก์ชันของความถี่ในกราฟด้านขวา ในขั้นตอนนี้นักเรียนจะเห็นข้อมูลที่ประกอบด้วยความผันผวนของคลื่นรบกวน พร้อมกับเส้นกราฟแสดงสัญญาณ HI ที่มีการปนเปื้อน (ถ้ามี) ที่กล้องโทรทรรศน์รับได้ขณะทำการสอบเทียบ 'ท้องฟ้า'

3. **คลิก** ที่ด้านใดด้านหนึ่งของเส้นข้อมูลที่มีการปนเปื้อนเพื่อกำหนดระดับสัญญาณที่จะถูกบัง (แสดงเป็นพื้นที่สีเทา) โค้ดจะทำการปรับเส้นโค้งของข้อมูลที่เหลือให้เรียบ และแสดงค่า T_{recv} ที่ความถี่ต่าง ๆ เป็นเส้นประสีเขียว

• แท็บ 5: การวิเคราะห์เส้น HI

แท็บนี้ใช้การเปรียบเทียบที่ได้จากแท็บ 4 เพื่อสกัดสเปกตรัมการปล่อยเส้น HI จากการวัดที่ทำในแท็บ 3 ตามลองจิจูดกาแล็กซีต่าง ๆ

สำหรับการวัดแต่ละครั้งที่ลองจิจูดที่กำหนด นักเรียนจะต้องทำตามขั้นตอนต่อไปนี้:

1. โหลดไฟล์ $l.csv$

2. คลิกปุ่ม "Line temperature profile" และแท็บใหม่ชื่อ "HI Line Temperature" จะเปิดขึ้น กราฟของอุณหภูมิเส้น HI ที่ใช้อัตราขยาย (gain) และ T_{recv} จาก calibration จะปรากฏขึ้นโดยมีหกลบเส้นฐาน (baseline) ที่สอดคล้องกับพื้นหลังของท้องฟ้า 5 K ออกไปแล้ว

3. ความถี่ของเส้น HI ที่มีการเลื่อนทางแดงมีค่ามากที่สุด (f_{obs}) สามารถประมาณได้จากความถี่ต่ำสุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าเส้นฐาน 5 K จงระบุ f_{obs} สำหรับการวัดแต่ละครั้ง

ในขั้นตอนสุดท้าย เมื่อเห็นเส้นกราฟรูปไหล่ (flat shoulder) ที่ประมาณ 5 K ของเส้นโปรไฟล์ของอุณหภูมิ (line temperature profile) ทางฝั่งสีแดงของสเปกตรัมเรืองแสง (emission spectrum) แล้ว ให้ลองวัดค่าลองจิจูดนั้นอีกครั้ง