



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์

A Study of Solar Rotation Rate Using Sunspot Tags

ชื่อนิสิต นางสาว อัญพิทยกุล เอกตาแสง

เลขประจำตัว 6033449323

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิทยาศาสตร์นิตชั้นปีที่ 4

เรื่อง

การวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ โดยใช้วิธีศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์

อัญพิทยกุล เอกตาแสง

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สนธิ วิจารณ์วรรณลักษณ์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ชื่อโครงการ การวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์
 A Study of Solar Rotation Rate Using Sunspot Tags

ชื่อนิสิต นางสาว อัญพิทยกุล เอกตาแสง เลขประจำตัว 6033449323

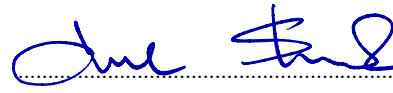
ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2563

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ. ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์
 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาฟิสิกส์ ปีการศึกษา 2563

คณะกรรมการได้รับรองรายงานฉบับนี้แล้ว


ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อำนวย สาธานนท์)


กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ ทลิมกำนิต)


อาจารย์ที่ปรึกษา
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์)

ชื่อโครงการ การวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์
A Study of Solar Rotation Rate Using Sunspot Tags

ชื่อนิสิต นางสาว อัญพิทยกุล เอกตาแสง

เลขประจำตัว 6033449323

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2563

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ. ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์

บทคัดย่อ

โครงการวิทยาศาสตร์ เรื่อง “การวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์” มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ โดยใช้สิ่งที่สามารถสังเกตได้ง่ายจากโลก อันได้แก่ จุดมืดบนดวงอาทิตย์ ในการโครงการนี้ได้พยายามถ่ายภาพดวงอาทิตย์ โดยใช้กล้องโทรทรรศน์แบบ Newtonian ที่มีความยาวโฟกัส 650 มิลลิเมตร และนำภาพถ่ายที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์แต่เนื่องจากในระยะเวลาของการทดลองไม่สามารถถ่ายภาพของจุดดำได้ จึงได้นำภาพดวงอาทิตย์ จาก “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun” มาทำการคำนวณผลที่ได้คือ ดวงอาทิตย์มีอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองเฉลี่ย 13.8 องศาต่อวัน และไม่เท่ากันในแต่ละละติจูด การที่ดวงอาทิตย์มีอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองไม่เท่ากันนั้น เป็นผลเนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซขนาดใหญ่ ไม่ใช่วัตถุแข็งเกร็ง ดังนั้นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนจึงมีเพียงแรงหนีศูนย์กลางนั้น อัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองจึงไม่เท่ากันในทุกตำแหน่งและด้วยผลของการหมุนรอบตัวเองที่ไม่เท่ากันในทุกตำแหน่งนี้ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์ ซึ่งการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กนี้ทำให้เกิด “จุดมืด” นั้นเอง

ชื่อโครงการ การวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์
A Study of Solar Rotation Rate Using Sunspot Tags

ชื่อนิสิต นางสาว อัญพิทยกุล เอกตาแสง **เลขประจำตัว** 6033449323

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2563

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ. ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์

Abstract

The objective of the project “A study of solar Rotation Rate Using Sunspot” is to find rotation period of the sun by using something that could be observed from Earth called “Sunspot”. In this study, Newtonian telescope which focus 650 mm was used to take a photo of the sun. Then the pictures were analyzed to calculate the rotational speed of the sun. Because of the solar images could not be taken during the observation due to the lack of sunspots, the solar images from “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun” were used to calculation. The result is that the average rotational speed of the sun is 13.8 degree per day. Unequal period of rotation is because the sun is a large ball of gas so there is only viscous force make the rotational at different latitude unequal. The unequal rotational period then causes the magnetic field of sun fluctuated then sunspot has created.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือ คำแนะนำ และ การให้คำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการครั้งนี้ ในส่วนของงบประมาณในการทำวิจัย ความรู้ทางวิชาการ เทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูล รวมไปถึง ประสบการณ์ในการทำงาน จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อำนาจ สาธานนท์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด คณะกรรมการสอบโครงการ ที่ช่วยตรวจสอบ รวมทั้ง ให้คำแนะนำ ในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อำนาจ สาธานนท์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้กล้องโทรทัศน์และเทคนิคการถ่ายภาพวัตถุท้องฟ้า รวมถึงให้ความช่วยเหลือ ในด้านทฤษฎีและการวิเคราะห์ ผลของโครงการ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อุดมศิลป์ ปิ่นสุข ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิธีในการถ่ายภาพดวงอาทิตย์ และ ข้อมูลเกี่ยวกับดวงอาทิตย์

ขอขอบคุณ นาย สุวินิตย์ วุฒสังข์ เจ้าหน้าที่สารสนเทศดาราศาสตร์ชำนาญการ จากสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้คำแนะนำ เกี่ยวกับการใช้กล้องโทรทัศน์ การปรับโฟกัสของกล้องเพื่อถ่ายภาพดวงอาทิตย์โดยเฉพาะ รวมทั้งคำแนะนำอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

ขอขอบคุณทุกกำลังใจจากครอบครัว และเพื่อน ๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ ผู้ทำโครงการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์ในการเรียนการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับดาราศาสตร์ และผู้ที่สนใจ ไม่น่าก็น้อย หากมีจุดบกพร่องหรือข้อผิดพลาดประการใดผู้ทำโครงการต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย และพร้อมจะรับฟังเพื่อแก้ไขโครงการให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สารบัญ

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	4
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	5
กิตติกรรมประกาศ	6
สารบัญ	7
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	9
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	9
1.3 แผนการดำเนินงาน	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความเป็นมาของดวงอาทิตย์	11
2.1.1 กำเนิดดวงอาทิตย์	11
2.1.2 โครงสร้างของดวงอาทิตย์	12
2.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์บนดวงอาทิตย์	13
2.3 จุดมืดบนดวงอาทิตย์	13
2.3.1 สนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์	13
2.3.2 การกำเนิดจุดมืดบนดวงอาทิตย์	14
2.4 การคำนวณอัตราการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์	16
2.5 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์และการหมุนภาพดวงอาทิตย์	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	
3.1 การเตรียมกล้องโทรทรรศน์	24
3.1.1 ส่วนประกอบของกล้องโทรทรรศน์	24
3.1.2 การประกอบกล้องโทรทรรศน์	24
3.1.3 การจัดกล้องเล็งและกล้องให้อยู่ในแนวเดียวกัน	25
3.2 การใช้กล้องสังเกตดวงอาทิตย์	26
3.2.1 การนำดวงอาทิตย์เข้ากล้อง	27
3.2.2 การถ่ายภาพดวงอาทิตย์ ด้วยกล้องโทรศัพที่มีมือถือ	28
3.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์	28
3.4 ขั้นตอนการทำโครงการ	29

บทที่ 4 ผลการศึกษาและ อภิปรายผลการศึกษา	
4.1 ผลการถ่ายภาพดวงอาทิตย์	30
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากคลังภาพของ “Laboratory of X-ray astronomy of the sun”	
5.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ภาพถ่ายจาก “Laboratory of X-ray astronomy of the sun” และคำนวณการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์	33
5.2 ผลการเขียนตำแหน่งของจุดมืดบนวงกลมดวงอาทิตย์จำลอง	34
5.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจุดมืด	39
5.4 ผลการคำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์	40
5.5 ผลการเขียนโค้ด VBA คำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์	41
บทที่ 6 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการศึกษา	42
6.2 ปัญหาที่พบ	42
6.3 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43
ภาคผนวก	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ดวงเดียวที่อยู่ในระบบสุริยะ และอยู่ใกล้โลกของเรามากที่สุด องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดวงอาทิตย์เป็นก๊าซไฮโดรเจน ที่ใจกลางของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงอันเป็นผลมาจากการเกิด “ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน” บริเวณใจกลางของดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน ทำให้บริเวณใจกลางของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 15 ล้านเคลวิน เนื่องจากดวงอาทิตย์อยู่ใกล้โลกของเรามากที่สุด ทำให้สัดส่วนพลังงานที่โลกได้รับเกือบทั้งหมดจึงมาจากดวงอาทิตย์ หรืออาจกล่าวได้ว่า ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก ไม่ว่าจะเป็นในแง่ของอิทธิพลต่อสิ่งมีชีวิต กล่าวคือ สิ่งมีชีวิตใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์ในการทำกิจกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพืชที่ใช้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างอาหาร สัตว์ที่ใช้แสงอาทิตย์ในการควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย และในแง่ของอิทธิพลต่อสิ่งไม่มีชีวิต เช่น การเกิดวัฏจักรน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นกระบวนการที่จะสามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทดแทนพลังงานจากถ่านหินและปิโตรเลียมที่กำลังจะหมดไปอีกด้วย

แม้ว่าจะมีการนำแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง สมบัติบางประการของดวงอาทิตย์กลับไม่ชัดเจน ดังนั้น การศึกษาจุดมืดบนดวงอาทิตย์เพื่อหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ จึงจะเป็นประโยชน์ในการนำไปเปรียบเทียบกับผลการสังเกตการณ์ที่ได้จากดวงอาทิตย์ เพื่อให้เราารู้สมบัติของดวงอาทิตย์และ รู้จักดวงอาทิตย์มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาบนดวงอาทิตย์ที่ส่งผลให้เกิดจุดมืดบนดวงอาทิตย์ ศึกษาการใช้กล้องโทรทรรศน์เพื่อดูดวงอาทิตย์อย่างปลอดภัยและถ่ายภาพดวงอาทิตย์ รวมทั้งการวิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ และ คำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ที่ละจุดที่แตกต่างกัน เพื่อให้เป็นแหล่งศึกษาในวิชาที่เกี่ยวข้อง

1.3 แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของดวงอาทิตย์ และองค์ประกอบของดวงอาทิตย์รวมถึงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์
2. ศึกษาเกี่ยวกับโลก เช่น การหมุนของโลก ตำแหน่งของโลกและดวงอาทิตย์และการโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลกเป็นต้น
3. ศึกษาการถ่ายภาพวัตถุท้องฟ้า และ การใช้กล้องโทรทรรศน์
4. ศึกษาภาพถ่ายดวงอาทิตย์จากคลังภาพของ “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun”
5. ถ่ายภาพดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาเดียวกันในแต่ละวัน เพื่อศึกษาหากมีจุดมืดปรากฏบนดวงอาทิตย์
6. วิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ที่ถ่ายเอง และภาพถ่ายดวงอาทิตย์จาก “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun”
7. คำนวณหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์โดยใช้การวิเคราะห์จากจุดมืดบนดวงอาทิตย์ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กรณีภาพที่ถ่ายเอง และภาพที่ได้จากคลังข้อมูล
8. จัดทำรายงาน และนำเสนอผลงาน

	รายการ	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
1	ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของดวงอาทิตย์ และองค์ประกอบของดวงอาทิตย์รวมถึงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์	←→							
2	ศึกษาเกี่ยวกับโลก เช่น การหมุนของโลก ตำแหน่งของโลกและดวงอาทิตย์ และการโคจรรอบดวงอาทิตย์ ของโลก เป็นต้น	←→							
3	ศึกษาการถ่ายภาพวัตถุท้องฟ้า และการใช้กล้องโทรทรรศน์		←→						
4	ศึกษาภาพถ่ายดวงอาทิตย์จากคลังภาพของ SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)		←→						
5	ถ่ายภาพดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาเดียวกันในแต่ละวัน เพื่อจัดทำคลังภาพถ่ายดวงอาทิตย์			←→					
6	วิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ที่ถ่ายเอง และภาพถ่ายดวงอาทิตย์จาก SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)			←→					
7	คำนวณหาอัตราเร็วของดวงอาทิตย์โดยใช้การวิเคราะห์จากจุดมืดบนดวงอาทิตย์					←→			
8	จัดทำรายงาน				←→				
9	นำเสนอผลงาน							←→	

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับความรู้เกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของดวงอาทิตย์ การวางตัวของดวงอาทิตย์และโลกในระบบสุริยะ ทฤษฎีการเกิดจุดมืดบนดวงอาทิตย์ การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อหาอัตราเร็วของดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังได้ประสบการณ์ในการถ่ายภาพวัตถุท้องฟ้า และ อาจเป็นประโยชน์ในการเรียนการสอนในวิชาที่เกี่ยวข้องหรือผู้สนใจในหัวข้อนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาของดวงอาทิตย์

2.1.1 กำเนิดดวงอาทิตย์

ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์หลายท่านเชื่อว่าเอกภพของเราถือกำเนิดมาจากการระเบิดครั้งใหญ่ที่เรียกว่า “บิกแบง” ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 13,000 – 14,000 ล้านปีมาแล้ว ในยุคเริ่มต้นนั้นเอกภพอยู่ในรูปของพลังงานที่มีอุณหภูมิสูงมาก เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิของเอกภพจะลดลง ทำให้เอกภพขยายไปเรื่อย ๆ แรงแม่เหล็กจะยึดเหนี่ยวพลังงานและสสาร ให้กลายเป็นก้อนก๊าซหรือ ดาวฤกษ์ กลุ่มของดาวฤกษ์จะถูกแรงแม่เหล็กดึงให้ไปอยู่บริเวณแกนกลางของกาแล็กซี่ มีหลักฐานระบุว่าดวงอาทิตย์ไม่ได้ถือกำเนิดมาจากการระเบิดของบิกแบงโดยตรง เนื่องจากหากวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุนับดวงอาทิตย์พบว่า มีส่วนประกอบนอกเหนือจาก ไฮโดรเจน และฮีเลียม โดยมีธาตุโลหะอยู่มาก ซึ่งทำให้สันนิษฐานได้ว่า ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์รุ่นที่ 3 เนื่องจากดาวฤกษ์รุ่นที่ 1 จะมีส่วนประกอบเพียงไฮโดรเจนและฮีเลียมเท่านั้น ระบบสุริยะเองก็อยู่ในกาแล็กซี่ที่เรียกว่า “ทางช้างเผือก” โดยที่ระบบสุริยะ มีดวงอาทิตย์เป็นแกนกลาง และ ล้อมรอบด้วยดาวเคราะห์ 8 ดวง ได้แก่ ดาวพุธ ดาวศุกร์ โลก ดาวอังคาร ดาวพฤหัสบดี ดาวเสาร์ ดาวยูเรนัส ดาวเนปจูน และวัตถุบริวารอีกจำนวนมาก



รูปที่ 1 ระบบสุริยะ

(ที่มา : ระบบสุริยะ - ทวีตภพสยบจักรวาล ประวัติความเป็นมาและสาระน่ารู้, chunkychickenrusholme.com)

ดวงอาทิตย์ถือกำเนิดขึ้นเมื่อประมาณ 5,000 ล้านปีก่อน โดยมีตำแหน่งอยู่ที่มุมหนึ่ง ห่างจากศูนย์กลางของกาแล็กซี่ทางช้างเผือกเป็นระยะ 25,000 ปีแสง เป็นดาวฤกษ์ชั้น G2 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,392,000 กิโลเมตร เป็นดาวที่เกิดจากกลุ่มก๊าซขนาดมหึมา ประกอบด้วย ไฮโดรเจนประมาณ 75% และฮีเลียมประมาณ 25% และ 0.1% เป็นโลหะ ภายในแกนของดวงอาทิตย์มีปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน กล่าวคือ ปฏิกิริยา หลอมรวมไฮโดรเจน กลายเป็นฮีเลียม เป็นปฏิกิริยาคายพลังงานทำให้ที่แกนกลางของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงถึง 15 ล้านเคลวิน โดยในทุก ๆ 1 วินาที ที่แกนกลางของดวงอาทิตย์ จะเปลี่ยนไฮโดรเจน 700 ล้านตัน ทำให้กลายเป็นฮีเลียม 695 ล้านตัน น้ำหนักที่หายไปถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงาน และรังสีต่างๆ ส่งผ่านไปยังพื้นผิว ที่ระยะทางการแผ่รังสีมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิลดลงตามรัศมีของดวงอาทิตย์

2.1.2 โครงสร้างของดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 4 ชั้น ได้แก่ แก่นปฏิกิริยานิวเคลียร์ (fusion core) ชั้นแผ่รังสี (Radiative Zone) ชั้นก๊าซร้อนหมุนวน (Convective Zone) และ ชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์

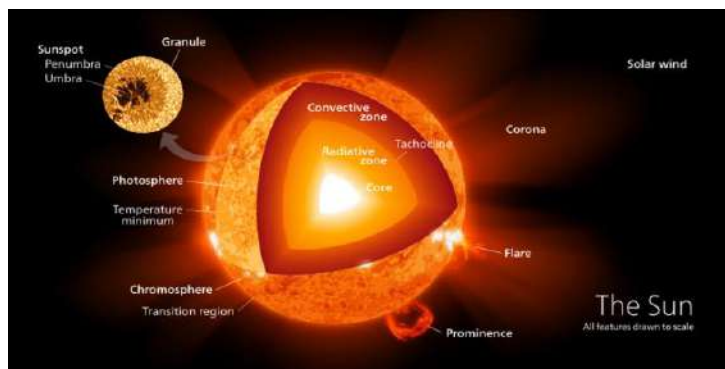
1. แก่นปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Fusion core) อยู่ใจกลางของดวงอาทิตย์ถึงระยะประมาณ 0.25 เท่าของรัศมีของดวงอาทิตย์ เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน หลอมอะตอมไฮโดรเจนให้กลายเป็นฮีเลียม และปลดปล่อยพลังงานออกมา
2. ชั้นแผ่รังสี (Radiative Zone) ชั้นแรกถัดจากชั้นแกนกลางของดวงอาทิตย์ สสารในชั้นนี้ร้อนจนก๊าซมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้า และถ่ายเทพลังงานด้วยวิธีการแผ่รังสีเท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทพลังงานด้วยวิธีการนำหรือการพาความร้อน เนื่องจากความดันสูงมาก
3. ชั้นก๊าซร้อนหมุนวน (Convective Zone) ในชั้นนี้ก๊าซเป็นตัวกลางในการพาความร้อน โดยการหมุนวนจากระดับต่ำกว่าขึ้นไปผิวและวนกลับลงมาใหม่อยู่ตลอดเวลา เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นแผ่รังสีจนถึงผิวของดวงอาทิตย์
4. บรรยากาศของดวงอาทิตย์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชั้น คือ

4.1 ชั้นโฟโตสเฟียร์ (Photosphere) บริเวณตั้งแต่ผิวของดวงอาทิตย์จนถึงความสูงประมาณ 850 กิโลเมตร เรียกได้ว่าเป็นชั้นส่องสว่างของดวงอาทิตย์ มีอุณหภูมิทั่วไปประมาณ 5,700 – 5,800 เคลวิน ชั้นโฟโตสเฟียร์ประกอบด้วย “แกรนูล” (Granule) ซึ่งเป็นเซลล์ของแก๊สร้อนหมุนวนด้วยการพาความร้อน ปรากฏการณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น จุดบนดวงอาทิตย์ (Sun spot) และ ปรากฏการณ์ลุกจ้าบนดวงอาทิตย์ (Solar Flare) ล้วนเกิดขึ้นในชั้นนี้ แสงจากโฟโตสเฟียร์เป็นสเปกตรัมต่อเนื่อง (Continuous Spectrum)

4.2 โครโมสเฟียร์ (Chromosphere) เป็นบรรยากาศชั้นกลางของดวงอาทิตย์ มีความหนาประมาณ 2000 กิโลเมตร และมีอุณหภูมิประมาณ 25,000 เคลวิน เราสามารถมองเห็นพวยแก๊สได้เวลาเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง แต่โดยปกติเราไม่สามารถมองเห็นชั้นโครโมสเฟียร์ได้เนื่องจากชั้นโฟโตสเฟียร์มีความสว่างมาก แสงจากโครโมสเฟียร์เป็นสเปกตรัมแบบเปล่งออกบางเส้น (Emission Spectrum)

พวยแก๊ส และการลุกจ้า เมื่อแก๊สร้อนบนดวงอาทิตย์พุ่งตัวเหนือชั้นโครโมสเฟียร์ ขึ้นมาหลายหมื่น กิโลเมตร “พวยแก๊ส” (Prominences) จะเคลื่อนที่เข้าสู่อวกาศด้วยความเร็วประมาณ 1,000 กิโลเมตรต่อวินาที ในบางครั้งมีการระเบิดใหญ่ที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ เรียกว่า การลุกจ้า (Solar flare) ทำให้เกิดกลุ่มพลังงานสูงเรียกว่า “พายุสุริยะ” (Solar storm)

4.3 คอโรนา (Corona) เป็นบรรยากาศชั้นบนสุดของดวงอาทิตย์ มีรูปร่างตามสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ แม้ว่าชั้นคอโรนาจะมีความเบาบาง แต่มีอุณหภูมิสูงถึง 2 ล้านเคลวิน อะตอมที่อยู่ในชั้นนี้จึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก ในบางครั้งดวงอาทิตย์มีการปล่อยก้อนมวลจากคอโรนา (Corona Mass Ejection : CME) สู่อวกาศ ถ้าอนุภาคของ CME มีความหนาแน่นมากและเดินทางมายังโลกก็จะจัดว่าเป็นพายุสุริยะประเภทหนึ่งเช่นกัน

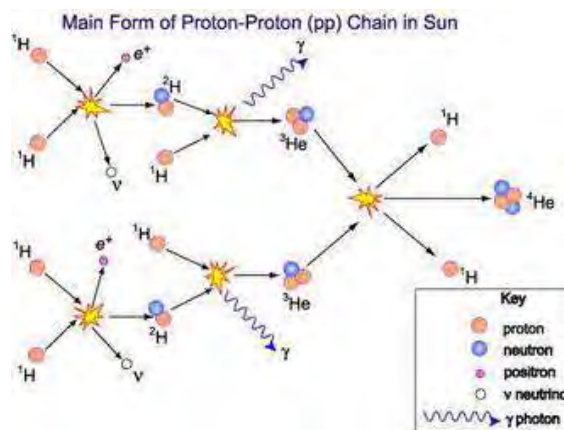


รูปที่ 2 โครงสร้างของดวงอาทิตย์

(ที่มา : ดวงอาทิตย์มีอะไรน่าสนใจบ้าง (1) : คอลัมน์ ฟิสิกส์ธรรมดาสาระมันส์, matichon.co.th)

2.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์บนดวงอาทิตย์

อย่างที่กล่าวในหัวข้อที่แล้วว่า บริเวณแกนของดวงอาทิตย์มีกระบวนการนิวเคลียร์ฟิวชันเกิดขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้อะตอมไฮโดรเจนบนดวงอาทิตย์หลอมรวมเป็นฮีเลียม การเกิดกระบวนการเช่นนี้ได้ นั้น มาจาก แรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ ทำให้มวลสารกดทับกันที่แกนกลาง เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า “ปฏิกิริยาลูกโซ่โปรตอน-โปรตอน” (P-P Chain) โดยโปรตอนของไฮโดรเจน 6 ตัว รวมกันเป็นฮีเลียม 1 อะตอม และโปรตอนของไฮโดรเจน 2 ตัว พร้อมปลดปล่อยพลังงาน



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาลูกโซ่โปรตอน – โปรตอน (P-P Chain)

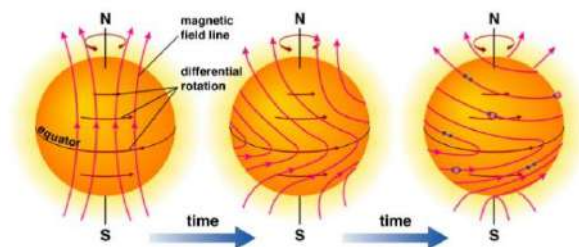
(ที่มา : Chain Reaction | by Brian Koberlein)

2.3 จุดมืดบนดวงอาทิตย์

2.3.1 สนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์

สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์เกิดจากการเคลื่อนที่ของพลาสมา (Plasma) กล่าวคือ สถานะของสสารที่อะตอมของไฮโดรเจนสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นประจุเนื่องจากความร้อนที่สูงมากที่แกนกลางของดวงอาทิตย์ การเคลื่อนที่ของพลาสมาทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าภายในดาวฤกษ์ การเคลื่อนที่นี้ เกิดขึ้นจากการพาความร้อน อันเป็นรูปแบบการถ่ายเทพลังงานอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ทางกายภาพของสสาร โดยในสภาวะปกติ สนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์จะวางตัวในแนวเหนือใต้ แต่

เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มของพลาสมาซึ่งไม่ใช่วัตถุแข็งเกร็งจึงอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองในแต่ละละติจูดจึงไม่เท่ากัน ทำให้ที่บริเวณศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์มีอัตราเร็วมากกว่าที่ขั้วของดวงอาทิตย์ เมื่อที่ศูนย์สูตรเคลื่อนที่ไป สนามแม่เหล็กก็จะถูกดึงไปด้วย ทำให้รูปร่างของสนามแม่เหล็กเกิดความแปรปรวน ดังแสดงในรูปที่ 4 เรียกว่า “การเบี่ยงเบนของสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์” เมื่อเวลาผ่านไปรูปร่างของสนามแม่เหล็กจะพันกันอยู่ในแนวตะวันออกตะวันตก และจะมีสนามบางส่วนแตกตัวออกมาจากกลุ่มก้อน สนามแม่เหล็กพุ่งทะลุผิวออกมาทำให้เกิดเป็นจุดบนดวงอาทิตย์



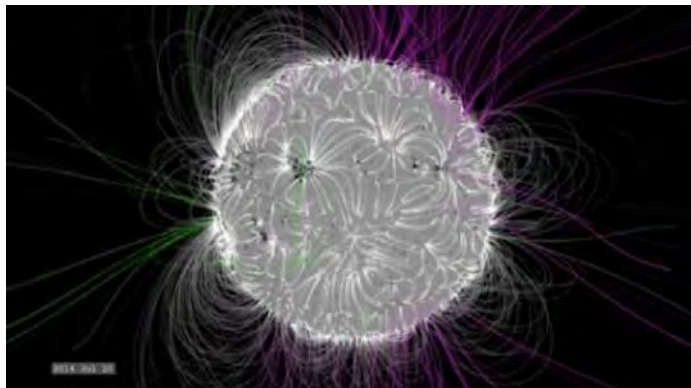
Copyright © Addison Wesley

รูปที่ 4 การแปรผันของสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์

(ที่มา : The Sun's Magnetic Poles Have Flipped...Solar Max is Here! - The Sun Today with C. Alex Young, Ph.D.)

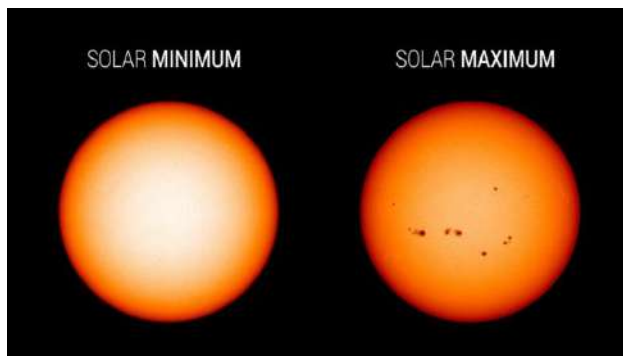
2.3.2 การกำเนิดจุดมืดบนดวงอาทิตย์

จุดมืด กำเนิดมาจากการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์ อย่างที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่แล้วว่า เนื่องจากอัตรา การหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ในแต่ละละติจูดไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของสนามแม่เหล็ก หรือ ทำให้ สนามแม่เหล็กเบี่ยงเบนไป สนามแม่เหล็กบางส่วนจะแตกทะลุผิวของดวงอาทิตย์ขึ้นมา เกิดเป็นขั้วแม่เหล็กพุ่งขึ้นจากผิว ในบริเวณที่ สนามแม่เหล็กมีกำลังสูง เส้นแรงแม่เหล็กที่แตกออกมาจะกักอนุภาคแก๊สร้อนที่พุ่งขึ้นมาไว้ไม่ให้ออกนอกเขตของเส้นแรงแม่เหล็ก ร้อนเย็นตัวลงก็จะจมลงที่ตำแหน่งเดิม ทำให้เรามองเห็นเป็นสีคล้ำ หรือ เป็นสีดำ เนื่องจากบริเวณนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของดวงอาทิตย์ ในบริเวณที่มีจุดมืดเป็นคู่ สนามแม่เหล็กจะพุ่งขึ้นออกจากจุดมืดหนึ่ง และ โค้งกลับเข้าไปในอีกจุดมืดหนึ่ง ทำให้จุดมืดสองที่อยู่ใกล้กันนี้มีขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกันเสมอ รูปร่างเหมือนเกือกม้าที่อยู่บนดวงอาทิตย์ เรียกรูปร่างของสนามแม่เหล็ก แบบนี้ว่า “สนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์” (Bipolar) ส่วนในกรณีที่มีจุดมืดเพียงจุดเดียวสนามแม่เหล็กส่วนมากจะเคลื่อนที่สาด ออกไปในอวกาศ ไม่วกกลับเข้ามา เรียกว่า “สนามแม่เหล็กแบบเปิด” และเป็นส่วนหนึ่งของลมสุริยะ



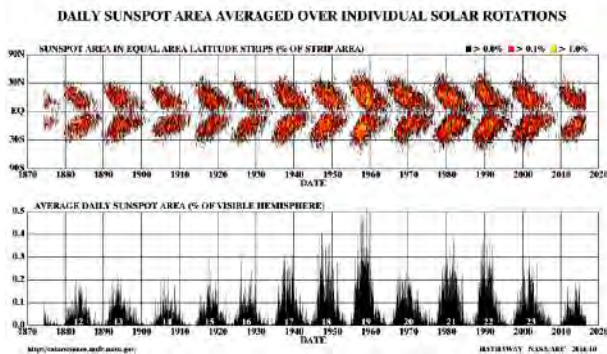
รูปที่ 5 สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ขณะที่มองเห็นจุดมืด
(ที่มา : Understanding the Magnetic Sun | NASA)

ปริมาณจุดมืดบนดวงอาทิตย์มีไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลา บางครั้งเห็นจุดมืดบนดวงอาทิตย์มีมาก และในบางเวลาอาจไม่เห็นเลย เป็นผลมาจากการเบี่ยงเบนของสนามแม่เหล็ก โดยในช่วงที่มีการเบี่ยงเบนน้อย จุดมืดจะมีน้อย หรือ อาจไม่มีจุดมืดเลย เรียกช่วงที่พบจุดมืดได้น้อยว่า “Solar minimum” และในช่วงที่มีการเบี่ยงเบนของสนามแม่เหล็กมาก จะเห็นจุดมืดมีจำนวนมาก เรียกช่วงนี้ว่า “Solar maximum” โดยจะมีช่วงของการแปรผันแบบนี้เป็นวัฏจักร เรียกว่า “วัฏจักรของจุดมืด” (Sunspot cycle) ซึ่งมีความยาวประมาณ 11 ปี



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงจุดมืดบนดวงอาทิตย์ในช่วงต่างๆ
(ที่มา : What Will Solar Cycle 25 Look Like? | NASA)

หากเราพิจารณาดำแหน่งของการเกิดจุดมืด ในช่วงที่เป็นรอบของวัฏจักรใหม่จะพบว่า จุดมืดที่เกิดขึ้นมักเกิดที่ตำแหน่งละติจูดประมาณ 35 องศา ทั้งซีกเหนือและซีกใต้ และจะวนรอบดวงอาทิตย์ตามการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ โดยจะเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณศูนย์สูตรเล็กน้อย หลังจากที่จุดมืดนี้หายไป จุดมืดที่เกิดใหม่จะเกิดที่ละติจูดเข้าใกล้ศูนย์สูตรมากขึ้น หากนำตำแหน่งของจุดมืดมาเขียนแผนภูมิ โดยให้แกนตั้งเป็นละติจูด และแกนนอนเป็นเวลา ที่เวลาเก็บข้อมูลยาวนานพอ จะเห็นว่า แผนภูมิจะมีลักษณะเหมือนโบมะกอก หรือผีเสื้อมาเรียงเกาะต่อกัน เรียกแผนภูมินี้ว่า แผนภูมิรูผีเสื้อ (Butterfly)



รูปที่ 7 แผนภูมิรูปผีเสื้อ แสดงตำแหน่งละติจูดที่เกิดจุดมืดในช่วงเวลาหนึ่ง (บน) แผนภูมิแสดงพื้นที่รวมของจุดมืดบนดวงอาทิตย์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ผิวหน้าของดวงอาทิตย์ เฉพาะด้านที่มองเห็น(ล่าง)

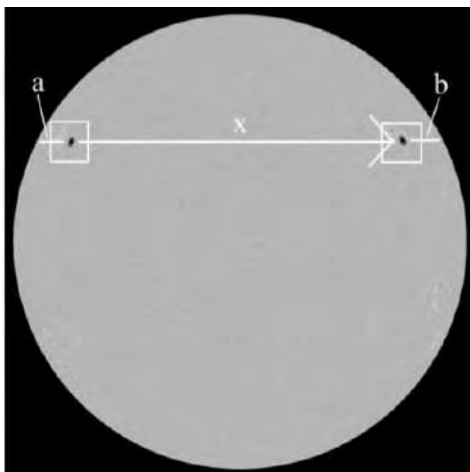
(ที่มา : Butterfly diagram (top) of the frequency of sunspots forming at... | Download Scientific Diagram ,researchgate.net)

2.4 การคำนวณอัตราการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์

การมีจุดมืดบนดวงอาทิตย์ทำให้เราสามารถหาความเร็วในการโคจรรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ได้จากภาพถ่ายของดวงอาทิตย์ โดยให้จุดมืดบนดวงอาทิตย์เป็นตำแหน่งอ้างอิงที่ละติจูดต่างๆ ของดวงอาทิตย์ แล้วให้ x เป็นระยะห่างของ จุดมืด a ที่สังเกตเห็นเมื่อจุดมืดโผล่จากด้านหนึ่งของดวงอาทิตย์ และจุดมืด b เป็นจุดมืดเดียวกันเมื่อเวลาผ่านไป Δt และ $d = a + b + x$ จะสามารถหาอัตราเร็วเชิงมุมของจุดมืด ($\omega_{spot,synodic}$) ได้จาก

$$\omega_{spot,synodic} = \frac{1}{\Delta t} \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{2(a+x)}{d} \right) - \cos^{-1} \left(1 - \frac{2a}{d} \right) \right] \tag{1}$$

- เมื่อ a คือ ระยะจากขอบซ้ายถึงจุดมืดตำแหน่งแรก
- b คือ ระยะจากขอบขวาถึงจุดมืดตำแหน่งที่สองเมื่อเวลาผ่านไป Δt
- d คือ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของระนาบที่ตัดตั้งฉากกับแกนหมุนของดวงอาทิตย์ผ่านจุดมืดทั้งสอง
- Δt คือ เวลาระหว่างจุดมืดทั้งสองจุด



รูป 8 แสดงการหาค่า a และ b และ x เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายของดวงอาทิตย์ (ที่มา : Rotation period of the Sun and the sunspot activity | cesar , cesar.esa.int)

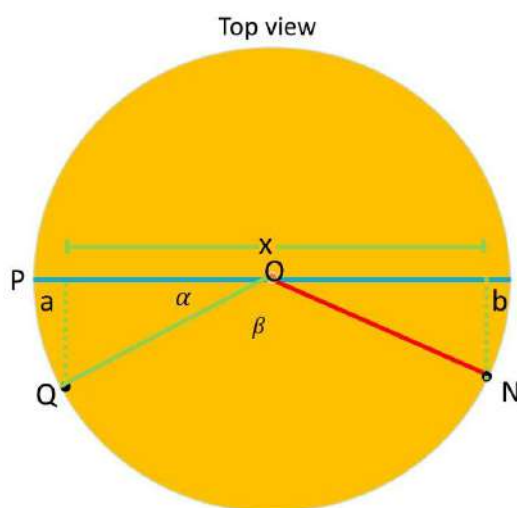
ซึ่งอัตราเร็วเชิงมุมที่หามาได้นั้นเป็นอัตราเร็วเชิงมุมที่สังเกตได้จากโลก ไม่ใช่อัตราเร็วของการโคจรรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ สามารถหา อัตราเร็วการโคจรของดวงอาทิตย์ได้จาก

$$\omega_{sid} = \omega_{spot,synodic} + \omega_{earth} \quad (2)$$

เมื่อ ω_{earth} คือ อัตราเร็วเชิงมุมของการหมุนรอบตัวเองของโลก (องศาต่อวัน)

เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มแก๊สดังนั้นอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองจึงไม่เท่ากันในแต่ละละติจูด ในการหาอัตราเร็วเฉลี่ยการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องหาในทุก ๆ ละติจูดที่สามารถหาได้แล้วนำมาเฉลี่ยกัน

พิสูจน์สมการที่ 1



รูปที่ 9 แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ โดย Q และ N คือตำแหน่งของจุดมืดเดียวกันเมื่อเวลาผ่านไป

$$\Delta t$$

กำหนดให้ $P\hat{O}Q = \alpha$, $P\hat{O}N = \beta$ และ $d = a + x + b$

จากการแปลงพิกัด คาร์ทีเซียนเป็นพิกัดทรงกลม $x = r \cos \theta$ เมื่อ θ เป็นมุมใดๆ และ เส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเป็นสองเท่าของรัศมี $d = 2r$ จะได้ว่า

$$\alpha = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2a}{d} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2(a+x)}{d} \right) \quad (4)$$

จากสูตรอัตราเร็วเชิงมุม $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ จะได้ว่า

$$\omega = \frac{\beta - \alpha}{\Delta t} \quad (5)$$

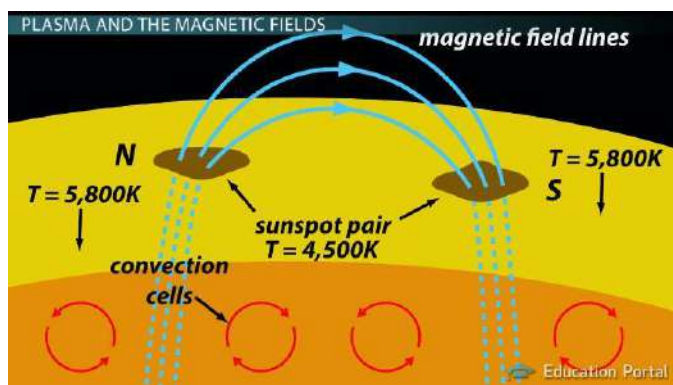
แทนค่าสมการที่ 5 และ 6 ในสมการที่ 7 จะได้สมการสำหรับการหาอัตราเร็วของจุดมืดที่เคลื่อนที่บนผิวของดวงอาทิตย์ดังนี้

$$\omega = \frac{1}{\Delta t} \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{2(a+x)}{d} \right) - \cos^{-1} \left(1 - \frac{2a}{d} \right) \right] \quad (6)$$

พิจารณาหน่วยของสมการ

เนื่องจากหน่วยของ \cos^{-1} เป็น องศา ดังนั้นหน่วยของ สมการที่ 6 จึงเป็น องศาต่อหน่วยเวลา

หากพิจารณาสมการที่ 6 จะเห็นว่าสมการดังกล่าวเหมือนพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ของจุดมืดเท่านั้น คำถามที่น่าสนใจคือ เราสามารถแน่ใจได้อย่างไรว่าการเคลื่อนที่ของจุดมืดที่เรากำลังวิเคราะห์นั้นเป็นการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับการหมุนของดวงอาทิตย์ กล่าวคือ จะแน่ใจได้อย่างไรว่าการวิเคราะห์ที่เรากำลังทำ ทำให้รู้อัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ ไม่ใช่อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของจุดมืด คำตอบของคำถามอยู่ที่การกำเนิดจุดมืด



รูปที่ 10 ภาพตัดขวางของผิวดวงอาทิตย์ขณะกำลังเกิดจุดมืด

(ที่มา : Why Do Sunspots Occur? - Video & Lesson Transcript | Study.com)

ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้วว่าจุดมืดกำเนิดมาจากความแปรปรวนของสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์ ทั้งนี้ทำให้สนามแม่เหล็กพุ่งขึ้นจากดวงอาทิตย์ และพุ่งลงเข้าไปในเนื้อของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 10 เปรียบสนามแม่เหล็กที่พุ่งขึ้นมาเป็นเข็ม และเนื้อของดวงอาทิตย์เป็นกระดาษ การเกิดจุดมืดเหมือนเข็มที่แทงทะลุกระดาษ เมื่อเราขยับกระดาษ (ผิวดวงอาทิตย์) เข็ม (บริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความแปรปรวน) ก็จะเคลื่อนที่ไปด้วย จึงกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่ของจุดมืดคือการเคลื่อนที่ของผิวดวงอาทิตย์ ทั้งนี้การเลือกจุดมืดมาคำนวณนั้น ต้องเป็นจุดมืดที่มีขนาดใหญ่ หรือ มีการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กมากทำให้ใช้เวลานานกว่าจุดจะหายไป (มีช่วงชีวิตนาน) พอที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ทำการเก็บข้อมูล เนื่องจากจุดมืดขนาดเล็กเป็นจุดที่มีความแปรปรวนของสนามแม่เหล็กน้อยทำให้จุดอาจหายไป (มีช่วงชีวิตน้อย) แล้วเกิดใหม่ในระหว่างที่ทำการเก็บข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดความสับสนว่าจุดที่เรากำลังสังเกตนั้นเป็นจุดเดียวกันกับที่เราสังเกตไปก่อนหน้านี้หรือไม่

2.5 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์และการหมุนภาพดวงอาทิตย์

หากเราถ่ายภาพดวงอาทิตย์จากกล้องโทรทรรศน์ เราจะพบว่าดวงอาทิตย์ไม่ได้หมุนไปแนวระนาบของผู้สังเกต แต่หมุนไปในทิศทางต่างกัน ขึ้นอยู่กับเวลาและละติจูดของผู้สังเกต ในการวิเคราะห์อัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์เราจำเป็นต้อง

หมุนดวงอาทิตย์ให้อยู่กรอบที่เรากำหนด เพื่อที่จะได้สังเกตการณ์เคลื่อนที่ของจุดมืดที่อยู่ในแนวตะวันออกและตะวันตก ซึ่งทำได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำให้ภาพอยู่ในแนวตะวันออกและตะวันตก ทำได้ 2 วิธี

1) พิจารณาจุดมืดที่เกิดในละติจูดเดียวกัน

เนื่องจากจุดมืดมักเกิดเป็นคู่หรือทำการเก็บข้อมูลในช่วงของ Solar maximum ในรูปที่ถ่าย ตำแหน่งของจุดมืดที่อยู่ถัดกันจะทำให้เราสามารถระบุตำแหน่งของแกนดวงอาทิตย์ได้ แล้วหมุนภาพเพื่อให้แนวการเคลื่อนที่อยู่ในแนว ตะวันออกและตะวันตก

2) พิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดมืด

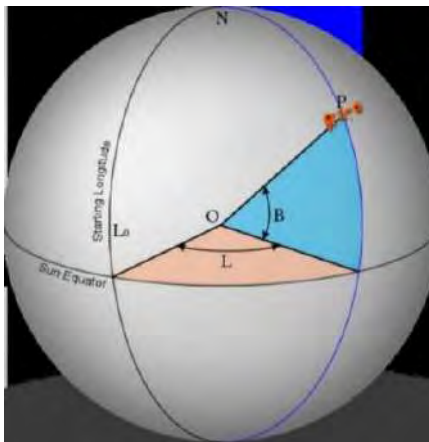
หากจุดมืดที่เราสังเกตได้เป็นจุดมืดเดี่ยว จะต้องทำการถ่ายภาพดวงอาทิตย์โดยใช้เวลาหลายวัน ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกันในทุกวัน เพื่อให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของจุดมืด ว่าจุดมืดนั้นเคลื่อนที่ไปมีลักษณะอย่างไร ทำได้โดยการ นำภาพถ่ายที่หลังไปซ้อนทับกับเวลาก่อนหน้า จะเห็นแนวการเคลื่อนที่ของจุดมืด ทำให้สามารถระบุทิศของแกนหมุนของดวงอาทิตย์ แล้วหมุนภาพเพื่อให้แนวการเคลื่อนที่อยู่ในแนวตะวันออกและตะวันตก



รูปที่ 11 การหมุนภาพดวงอาทิตย์ให้อยู่ในแนวตะวันออกและตะวันตกโดยต้องหมุนให้จุดมืดทับเส้น EW
(ที่มา : Rotation period of the Sun and the sunspot activity | cesar , cesar.esa.int)

ขั้นตอนที่ 2 หาพิกัดเฮลิโอกราฟิกของดวงอาทิตย์

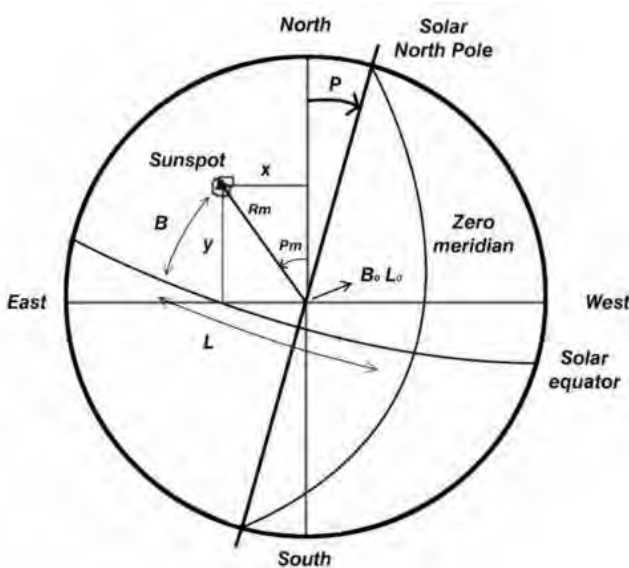
พิกัดเฮลิโอกราฟิก (Heliographic) เป็นพิกัดของดวงอาทิตย์ ในทำนองเดียวกันกับการกำหนดเส้นลองจิจูดและเส้นละติจูดบนโลก คือ ละติจูดของดวงอาทิตย์จะถูกแบ่งออกเป็นซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ กล่าวคือ 90 องศาเหนือ ถึง เส้นศูนย์สูตร และ จากเส้นศูนย์สูตร ถึง 90 องศาใต้ ส่วนลองจิจูดจะแบ่งเป็น 360 องศาไปทางทิศตะวันตกตามการหมุนของดวงอาทิตย์ เป็นที่ทราบกันดีว่าโลกมีแกนหมุนเอียง 23.5 องศา ขณะที่แกนหมุนของดวงอาทิตย์เอียง 7 องศา ถ้าแกนหมุนของดวงอาทิตย์ขนานกับแกนหมุนของโลก จะกล่าวได้ว่า เส้น EW ที่ขีดไว้ในขั้นตอนที่แล้วเป็นเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์



รูปที่ 14 การบอกตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดบนดวงอาทิตย์
(ที่มา : Heliographic Coordinate | cesar , cesar.esa.int)

ในการทำงานเดียวกันกับการบอกตำแหน่งบนโลกที่ได้มีการกำหนดละติจูดและลองจิจูด โดยละติจูด วัดจากเส้นศูนย์สูตรดวงอาทิตย์ไปทางขั้วเหนือและขั้วใต้ มีค่าระหว่าง 0 องศา ถึง 90 องศา ในซีกโลกเหนือ และ 0 องศา ถึง -90 องศา ในซีกโลกใต้ ลองจิจูด วัดจากเส้นลองจิจูดเริ่มต้น ไปทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกของเส้น โดยมีค่า 0 องศา ถึง 180 องศา หากวัดไปทางตะวันออก และ 0 องศา ถึง -180 องศา หากวัดไปทางตะวันตก และกำหนดให้อักขร B และ L แทน ละติจูด และลองจิจูดบนดวงอาทิตย์ ตามลำดับ หากพิจารณาจาก รูปที่ 13 จะเห็นว่า ตำแหน่งกึ่งกลางของโลกและดวงอาทิตย์ไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน จึงได้มีการกำหนดละติจูดเริ่มต้น B_0 คือ มุมระหว่างเส้นศูนย์สูตรดวงอาทิตย์ และ เส้นศูนย์สูตรโลก และ ลองจิจูดเริ่มต้น L_0 คือ ผลต่างระหว่างเส้นลองจิจูดเริ่มต้น ตำแหน่ง E

สูตรการแปลงพิกัดระหว่าง พิกัดเฮลิโอกราฟฟิก และพิกัดคาร์ทีเซียน



รูปที่ 15 แสดงตัวแปรต่างๆ ในพิกัดเฮลิโอกราฟฟิก และ พิกัดคาร์ทีเซียน
(ที่มา : Heliographic Coordinate | cesar , cesar.esa.int)

$$P_m = \tan^{-1} \left(\frac{X}{Y} \right) \quad (7)$$

$$\rho = \sin^{-1} \left(\frac{R_m}{R} \right) - \frac{\alpha}{2} \left(\frac{R_m}{R} \right) \quad (8)$$

ที่มา : Heliographic Coordinates (Cesar,2017)

เมื่อ R คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ในภาพที่เราทำการวิเคราะห์ (เป็นค่าคงที่หาเพียงครั้งเดียว)

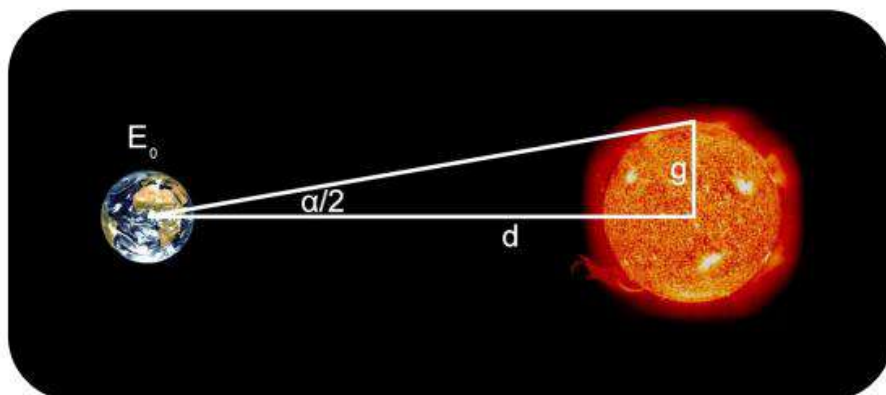
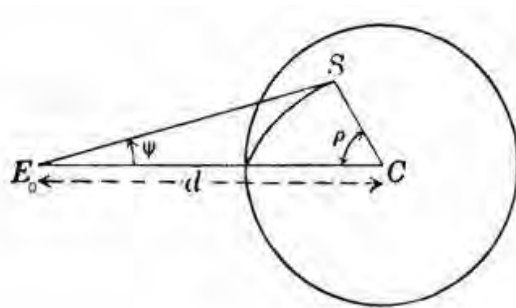
R_m มีค่าเท่ากับ $\sqrt{x^2+y^2}$

X คือ ระยะทางที่วัดจากแกนเหนือ-ใต้ไปจนถึงตำแหน่งของจุดมืด

Y คือ ระยะทางที่วัดจากแกนตะวันออก-ตะวันตกไปจนถึงตำแหน่งของจุดมืด

P_m คือ มุมที่จุดมืดทำกับแกน เหนือ-ใต้

ρ คือ ระยะทางบนสามเหลี่ยมวงกลมระหว่างจุดมืดกับตำแหน่งเสมือนของโลก (ดูรูปที่ 14)



รูปที่ 16 แสดงตัวแปรที่จำเป็นในการหาค่า ρ พิจารณาโดยใช้สามเหลี่ยมคล้าย

(ที่มา : Heliographic Coordinate | cesar , cesar.esa.int)

จากที่กล่าวไว้ในตอนต้นแกนของดวงอาทิตย์ทำมุมกับโลกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา เราสามารถหาค่าคงที่ที่จำเป็นในการคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

กำหนดให้

α แทน ความยาวรัศมีเชิงมุมของดวงอาทิตย์ของวันที่ทำการสังเกต (สามารถเปิดดูได้จาก Stellarium)

P แทน มุมที่แกนหมุนของดวงอาทิตย์ทำกับแกนเหนือ-ใต้ มีค่าเป็นบวกเมื่ออยู่ทางทิศตะวันออก และมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ทางทิศตะวันตก

B_0 แทน ละติจูดเฮลิโกราฟฟิกเริ่มต้น

L_0 แทน ลองจิจูดเฮลิโกราฟฟิกเริ่มต้น

B แทน ละติจูดเฮลิโกราฟฟิก

L แทน ลองจิจูดเฮลิโกราฟฟิก

$$\sin(B) = \sin(B_0) \cos(\rho) + \cos(B_0) \sin(\rho) \cos(P - P_m) \quad (9)$$

$$\sin(L - L_0) = \sin(P - P_m) \sin(\rho) \cos(B) \quad (10)$$

นอกจากสมการที่กล่าวมา มีอีกหนึ่งวิธีในการหาค่าต่างๆ โดยไม่ต้องทำการคำนวณ มีขั้นตอนดังนี้

1. ดาวนโพลกริดที่แน่นอนสำหรับวันที่ภาพที่นำมาวิเคราะห์ถูกถ่าย (<http://bass2000.obspm.fr/ephem.php>) ต้องใส่วันที่ และเวลาที่ทำการถ่ายภาพลงไป
2. จะต้องซ้อนกริดกับภาพที่เราต้องการวิเคราะห์ สามารถทำได้ด้วยมือโดยการปริ้นภาพและกริดออกมา แล้วเขียนตำแหน่งของจุดมืดลงไปบนกริด หรือจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกราฟฟิก ซ้อนทับภาพดวงอาทิตย์กับกริดก็ได้ ซึ่งวิธีนี้สามารถอ่านค่า ละติจูดของจุดมืดจากกริดได้เลย



รูปที่ 17 แสดงการซ้อนทับกันของภาพดวงอาทิตย์และกริดในพิกัดเฮลิโกราฟฟิก

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมกล้องโทรทรรศน์

3.1.1 ส่วนประกอบของกล้องโทรทรรศน์

- ขาตั้งกล้อง
- จานรองวางของ
- ปุ่มปรับการหมุนของกล้อง
- ตัวกล้อง และฝาครอบ
- อุปกรณ์สำหรับต่อ eyepiece
- eyepiece ขนาดต่างๆ
- กล้องเล็ก และตัวยึด



รูปที่ 18 แสดงกล้องและขาตั้งกล้อง (ซ้าย) ตัวยึด eyepiece และ eyepiece (ขวา)

หมายเหตุ กล้องโทรทรรศน์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้ เป็นกล้องโทรทรรศน์แบบ Newtonian Vixen รุ่น R130Sf ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มิลลิเมตร และมีความยาวโฟกัส 650 มิลลิเมตร

3.1.2 การประกอบกล้องโทรทรรศน์

- ขั้นตอนที่ 1 นำขาตั้งกล้องออกจากกล่อง หมุนตัวยึดที่ขาเพื่อปรับความยาวของขาให้สุด แล้วหมุนตัวยึดให้แน่น หลังจากนั้นให้กางขาตั้งออก

ขั้นตอนที่ 2 นำจานรองวางของประกอบเข้ากับแกนของขากล้อง เพื่อยึดให้ขาตั้งคงที่ และใช้สำหรับวางอุปกรณ์อื่นๆ แล้วประกอบปุ่มปรับการหมุนของกล้องเข้ากับขาตั้งกล้อง ทดลองหมุนปุ่มปรับการหมุนของกล้อง เพื่อให้แน่ใจว่าประกอบอย่างถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 3 นำตัวกล้องยึดเข้ากับขาตั้ง ต้องทำให้แน่ใจว่าได้ยึดกล้องไว้กับขาตั้งอย่างดีแล้วเพื่อไม่ให้กล้องตกหรือส่ายระหว่างการสังเกตการณ์ หลังจากแน่ใจว่ายึดกล้องดีแล้วให้นำ กล้องเล็งยึดกับตัวยึด แล้วนำไปติดที่ตัวกล้อง

ขั้นตอนที่ 4 ประกอบส่วนของตัวยึด eyepiece เข้ากับกล้องแล้วนำ eyepiece ไปยึดกับตัวกล้อง



รูปที่ 19 กล้องก่อนการประกอบ (ซ้าย) และการประกอบตัวยึด eyepiece และ eyepiece เข้ากับกล้อง (ขวา)

3.1.3 การจัดกล้องเล็งและกล้องให้อยู่ในแนวเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 1 ปรับกล้องโดยให้มองเห็นวัตถุใดก็ได้ ที่มีระยะอยู่ห่างจากผู้สังเกตพอสมควร เช่น ยอดไม้ที่อยู่ไกลๆ ในเวลากลางวัน หรือ แสงของหลอดไฟที่มีระยะไกล ในเวลากลางคืน เป็นต้น เมื่อมองเห็นวัตถุแล้ว ให้ปรับโฟกัสของกล้องเพื่อให้สามารถมองเห็นวัตถุได้ชัดเจน



รูปที่ 20 ตัวอย่างภาพที่มองเห็นได้จากกล้องเมื่อทำการปรับโฟกัสก่อนการจัดแนวกล้องและกล้องเล็ง



รูปที่ 21 ภาพที่เห็นเมื่อปรับภาพให้อยู่ตรงกลางของกล้องใหญ่

ขั้นตอนที่ 2 มองวัตถุผ่านกล้องเล็ก หมุนปรับตัวยึดของกล้องเล็กให้ตำแหน่งของเส้นอ้างอิงที่ตัดกันอยู่ตรงกลางของวัตถุที่มองเห็นผ่านกล้องใหญ่



รูปที่ 22 การเล็งวัตถุให้อยู่ตรงกลางของกล้องเล็ก

ขั้นตอนที่ 3 มองภาพจากกล้องเล็ก แล้วหมุนกล้องให้ตำแหน่งของเส้นอ้างอิงที่ตัดกันไปอยู่ที่วัตถุอื่น แล้วมองวัตถุผ่านกล้องใหญ่ วัตถุที่มองจะต้องอยู่ตรงกลางของกล้องใหญ่ ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นให้ทำขั้นตอนที่ 1-2 ซ้ำจนกว่าจะเห็นวัตถุอยู่ตรงกลางของทั้งกล้องเล็กและกล้องใหญ่

3.2 การใช้กล้องสังเกตดวงอาทิตย์

เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ร้อนที่ส่งผ่านพลังงานมายังโลก ทำให้เราไม่สามารถมองดวงอาทิตย์ผ่านกล้องโดยตรงได้ จำเป็นต้องมีตัวกรอง หรือที่เรียกว่า “ฟิลเตอร์” เพื่อกรองรังสีบางส่วนทำให้เรามองดวงอาทิตย์ได้โดยไม่เป็นอันตรายกับดวงตาของเรา ในที่นี่ได้ใช้ กระจกดำ META 11FW 2DIN ในการมองดวงอาทิตย์ผ่านกล้องเล็กและใช้ฟิลเตอร์แบบแบคพอร์เมอร์ ในการมองจากกล้องใหญ่

3.2.1 การนำดวงอาทิตย์เข้ากล้อง

ขั้นตอนที่ 1 ปิดฝาครอบกล้อง เปิดเพียงเฉพาะส่วนที่ติดตั้งฟิลเตอร์ไว้เท่านั้น ใช้กระจกดำปิดส่วนปลายของกล้องแล้ว ไขแล้วหมุนกล้องเพื่อให้ดวงอาทิตย์เข้ากล้องโดยมองจากกล้องแล้ว ห้าม หันกล้องไปทางดวงอาทิตย์ โดยไม่ปิดฝาครอบกล้องก่อนเป็นอันขาด นอกจากจะเป็นอันตรายกับดวงตาแล้วยังอาจทำให้กล้องเสียหายได้



รูปที่ 23 การปิดฝากล้องขณะใช้กล้องมองดวงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 2 มองดวงอาทิตย์ผ่าน eyepiece แล้วปรับให้ดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลาง พร้อมทั้งปรับโฟกัส เพื่อให้มองเห็นดวงอาทิตย์ได้ชัดเจน สังเกตได้จากขอบของดวงอาทิตย์จะต้องเรียบเหมือนเส้นวงกลม



รูปที่ 24 การใช้กล้องส่องดวงอาทิตย์ ต้องมองผ่านกระจกดำ เพื่อป้องกันดวงตาได้รับความเสียหายจากการมอง

3.2.2 การถ่ายภาพดวงอาทิตย์ ด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ

ทำได้โดยการยึดโทรศัพท์เข้ากับตัวยึด แล้วนำไปยึดที่ eyepiece แล้วปรับตัวยึดด้านหลังเพื่อให้ภาพจากกล้องโทรศัพท์ชนเข้ากับกล้อง หลังจากนั้นให้กดโฟกัสที่ขอบของวัตถุแล้ว สามารถถ่ายภาพได้เลย หากใช้ eyepiece ที่ยาวต้องยึดโทรศัพท์มือถือให้ห่างจาก eyepiece และถ้าใช้ eyepiece สั้นให้ยึดโทรศัพท์มือถือให้ใกล้ eyepiece มากที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 25 การยึดโทรศัพท์กับตัวยึด



รูปที่ 26 การยึดโทรศัพท์กับกล้องเพื่อถ่ายภาพ

3.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์

วิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ โดยใช้เว็บไซต์ <http://bass2000.obspm.fr/ephem.php> เพื่อหาค่าคงที่ที่จำเป็น และ หมุนภาพถ่ายดวงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับกราฟฟิก แล้วคำนวณอัตราการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ โดยใช้ สมการที่ 1 และ สมการที่ 2 หรือ คำนวณโดยใช้สมการที่ 7 – สมการที่ 10

3.4 ขั้นตอนการทำโครงการงาน

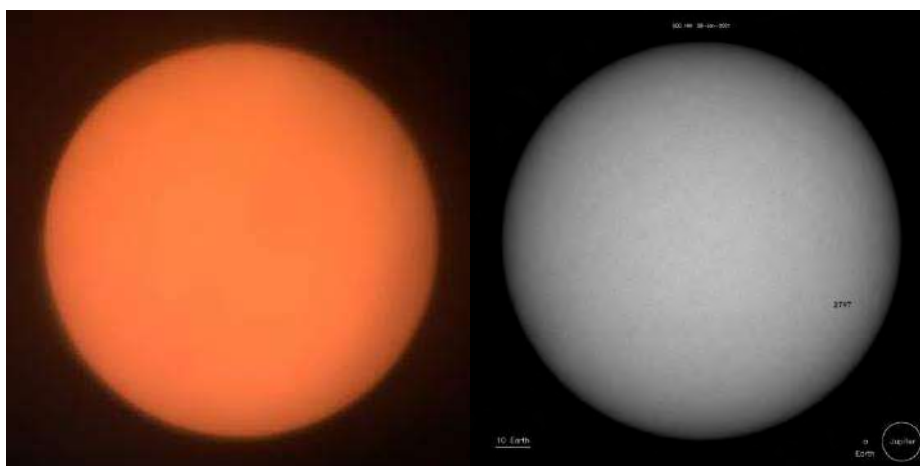
- 3.4.1 ตรวจสอบภาพถ่ายดวงอาทิตย์ จาก SOHO ผ่านเว็บไซต์
https://soho.nascom.nasa.gov/data/synoptic/sunspots_earth/
- 3.4.2 ถ่ายภาพดวงอาทิตย์วันที่มีจุดมืด โดยทำการถ่ายภาพจนกว่าจุดมืดจะหายไป เพื่อวิเคราะห์หาแกนหมุนของดวงอาทิตย์ในวันที่ทำการเก็บข้อมูล
- 3.4.3 หาค่าคงที่ที่จำเป็น โดยใช้เว็บไซต์ <http://bass2000.obspm.fr/ephem.php>
- 3.4.4 ซ้อนทับภาพของกริดที่ได้จากเว็บไซต์ <http://bass2000.obspm.fr/ephem.php> กับภาพของดวงอาทิตย์ที่มีจุดมืด
- 3.4.5 ใช้ค่า ละติจูดและลองจิจูด ของกริด เพื่อวัดระยะ และหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ หรือ คำนวณค่าคงที่ต่างๆ ละติจูดและ ลองจิจูด ใน พิกัดเฮลิโอกราฟีค โดยใช้สมการที่อยู่ในหัวข้อที่ 2.5 แล้ว นำค่าที่ได้คำนวณหาอัตราเร็วการหมุนของดวงอาทิตย์ (หากต้องการคำนวณด้วยตัวเองให้ ข้าม ข้อ 3.4.3 และ 3.4.4)
- 3.4.6 พิจารณารูปร่างของสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์ในวันที่ทำการสังเกต
- 3.4.7 เขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์กับละติจูด
- 3.4.8 เขียนเล่มรายงานผล

บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการศึกษา

4.1 ผลการถ่ายภาพดวงอาทิตย์

จากการดูดวงอาทิตย์ด้วยกล้องโทรทรรศน์พบว่า ไม่สามารถมองเห็นจุดมืดได้ แม้ว่าในวันนั้นภาพจาก SOHO จะแสดงให้เห็นว่ามีจุดมืด ก็ตาม เป็นผลมาจากการที่จุดมืดมีขนาดเล็กเกินไปที่กำลังขยายของกล้องโทรทรรศน์ที่นำมาสังเกตจะมองเห็นได้ แสดงผลภาพถ่ายที่ถ่ายจากกล้องโทรทรรศน์ เปรียบเทียบกับ ภาพจาก SOHO ดังต่อไปนี้

วันที่ 28 มกราคม 2564



รูปที่ 24 แสดงภาพถ่ายดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับภาพจาก SOHO มีจุดมืด ชื่อ 2797 วันที่ 28 มกราคม 2564 เวลา 15.34 น.

วันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2564



รูปที่ 25 แสดงภาพถ่ายดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับภาพจาก SOHO ไม่พบจุดมืด วันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เวลา 15.19 น.

วันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2564



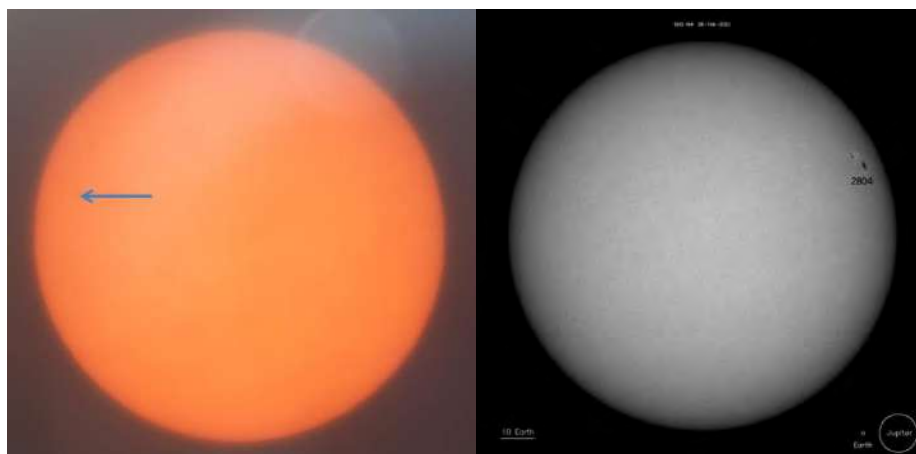
รูปที่ 26 แสดงภาพถ่ายดวงอาทิตย์เปรียบเทียบภาพจาก SOHO มีจุดมืด 2803 , 2804 และ 2805 วันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2564 เวลา 15.04 น.

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2564



รูปที่ 27 แสดงภาพถ่ายดวงอาทิตย์เปรียบเทียบภาพจาก SOHO มีจุดมืด 2804 และ 2805 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2564 เวลา 10.50 น.

วันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2564



รูปที่ 28 แสดงภาพถ่ายดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับภาพจาก SOHO มีจุดมืด 2804 วันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2564 เวลา 11.13 น.

จากรูปที่ 28 ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องโทรทรรศน์มองเห็นจุดมืด 2804 แต่ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากวันถัดมา ไม่สามารถมองเห็นจุดมืดนี้ผ่านกล้องโทรทรรศน์ จึงไม่สามารถหาแกนหมุนของดวงอาทิตย์ได้ และไม่สามารถระบุตำแหน่งที่ชัดเจนของจุดมืดได้ เนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์ภาพที่ถ่ายได้ ตั้งใจในการวัดอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์จึงจะวิเคราะห์โดยใช้ภาพถ่ายดวงอาทิตย์จากคลังภาพของ “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun” (https://tesis.lebedev.ru/en/sun_pictures.html) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม 2564 แสดงในบทถัดไป

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายดวงอาทิตย์จากคลังภาพของ

“Laboratory of X-ray astronomy of the Sun”

5.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ภาพถ่ายจาก “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun” และคำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์

5.1.1 ดาวน์โหลดภาพถ่ายดวงอาทิตย์จากคลังภาพ “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun”

(https://tesis.lebedev.ru/en/sun_pictures.html)

5.1.2 เขียนตำแหน่งของจุดมืดลงไปในวงกลมดวงอาทิตย์จำลอง เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของจุดมืด

5.1.3 พิมพ์ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แล้วลากเส้นตั้งฉากกับแกนหมุนของดวงอาทิตย์ ผ่านจุดมืด สังเกตจุดมืดสองจุดที่อยู่บนเส้นที่ลาก

5.1.4 บันทึกวันที่และเวลาที่ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ที่จุดมืดทั้งสองถูกถ่ายโดยดูข้อมูลจาก

https://tesis.lebedev.ru/en/sun_pictures.html แล้วหาผลต่างของเวลาของภาพทั้งสอง

5.1.5 วัดระยะ a , x , b อย่างน้อย 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราเร็วการหมุนของดวงอาทิตย์พร้อมทั้งเขียนโค้ด VBA เพื่อช่วยในการคำนวณ

5.1.6 นำภาพถ่ายดวงอาทิตย์ไปซ้อนทับกับกริด แล้วบันทึกค่าละติจูดของจุดมืด

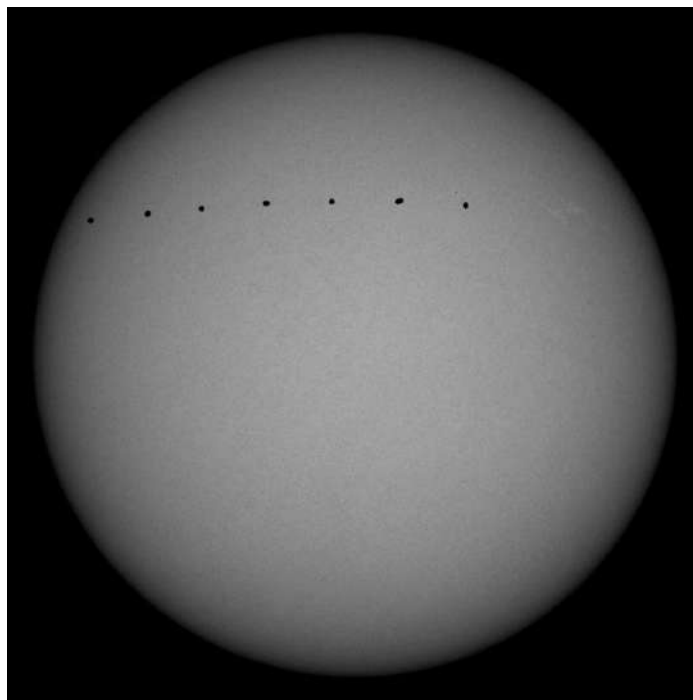
5.1.7 หาความคลาดเคลื่อน ที่เกิดจากการคำนวณ แล้วบันทึกลงในตาราง

5.1.7 เขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์กับละติจูด

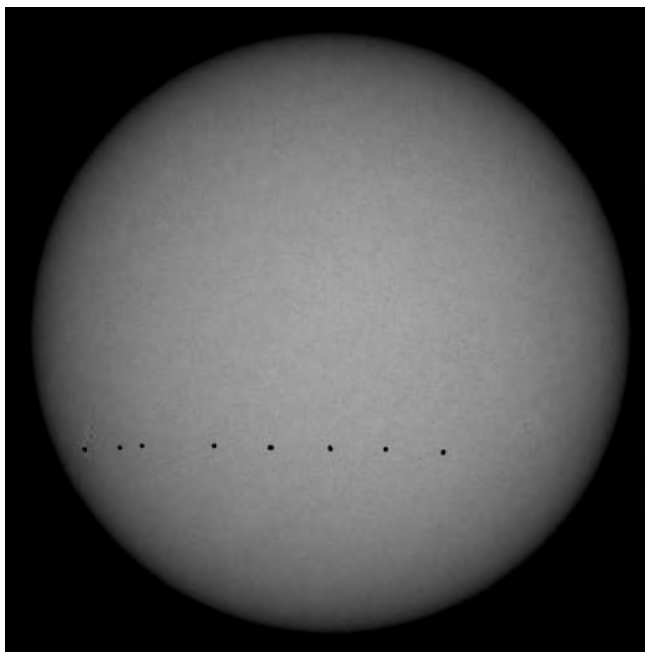
5.1.8 สรุปผล และเขียนรายงาน

5.2 ผลการเขียนตำแหน่งของจุดมีตบนวงกลมดวงอาทิตย์จำลอง

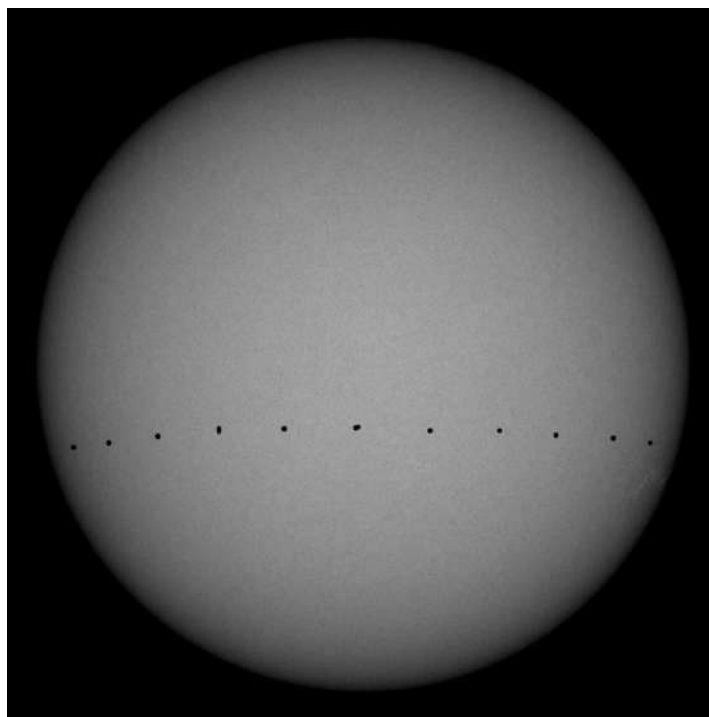
จุดที่ 1 ระหว่างวันที่ 23 – 29 มีนาคม พ.ศ. 2564



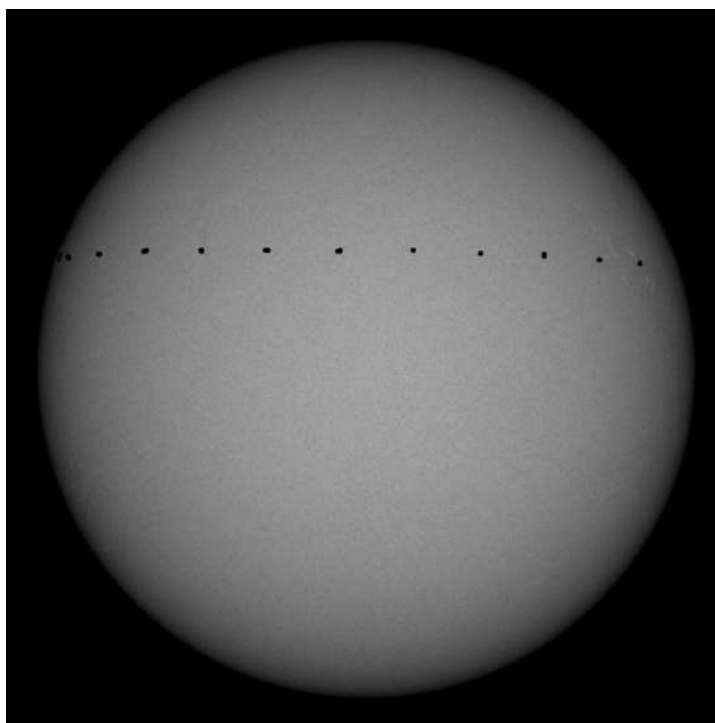
จุดที่ 2 ระหว่างวันที่ 16 – 23 เมษายน พ.ศ. 2564



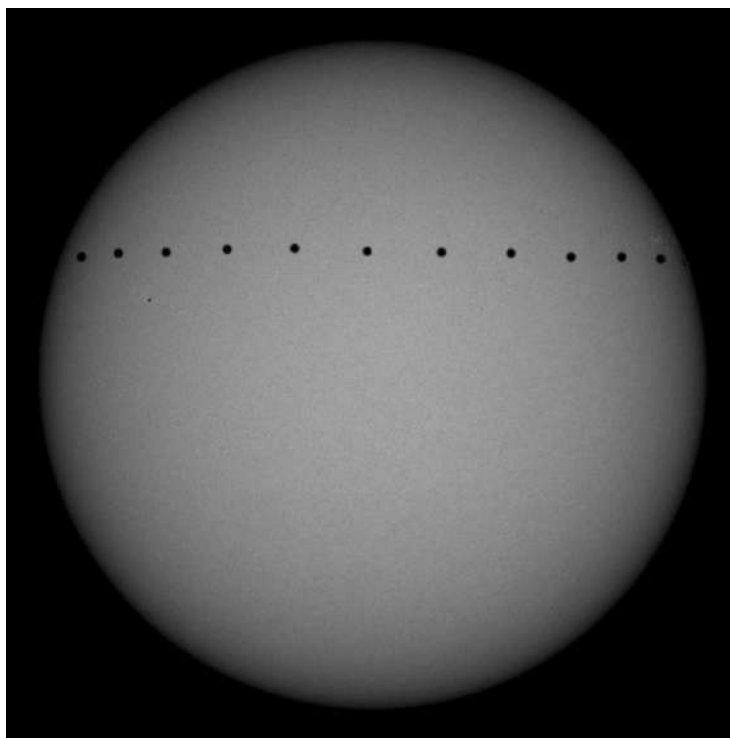
จุดที่ 3 ระหว่างวันที่ 20 – 30 เมษายน พ.ศ. 2564



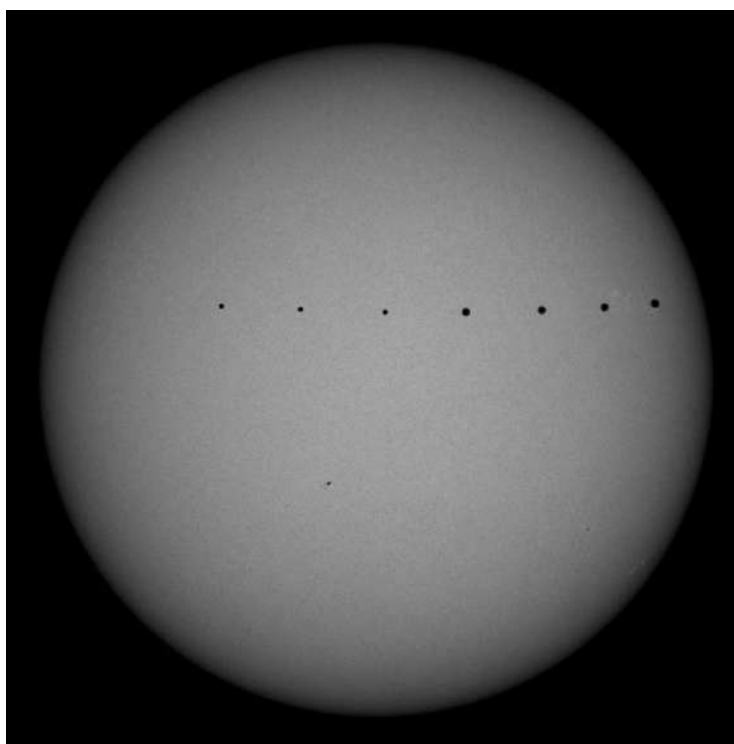
จุดที่ 4 ระหว่างวันที่ 7 – 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2564



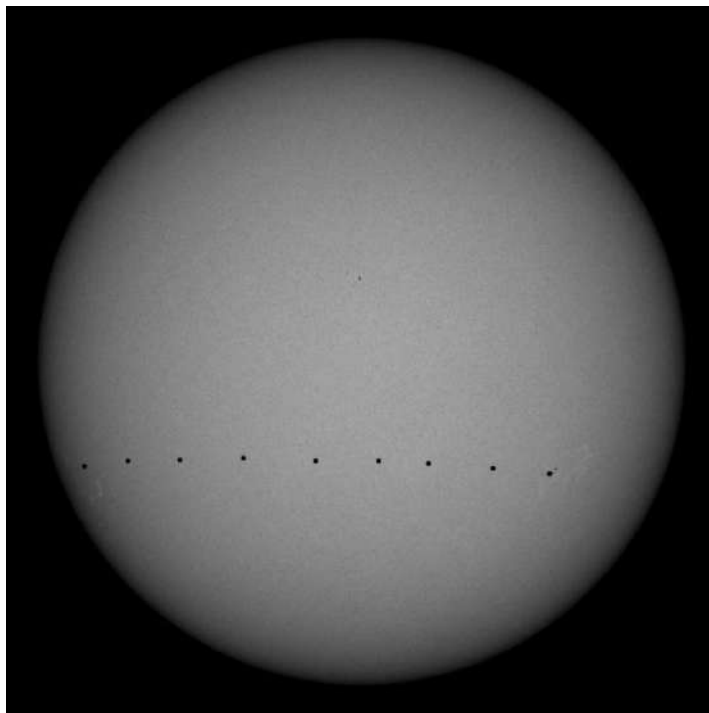
จุดที่ 5 ระหว่างวันที่ 18 - 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2564



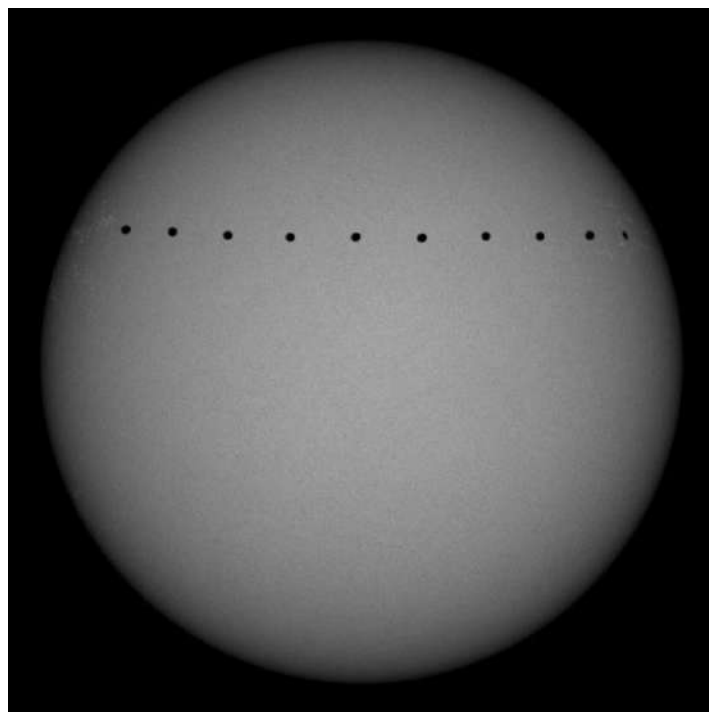
จุดที่ 6 ระหว่างวันที่ 30 พฤษภาคม - 6 มิถุนายน พ.ศ. 2564



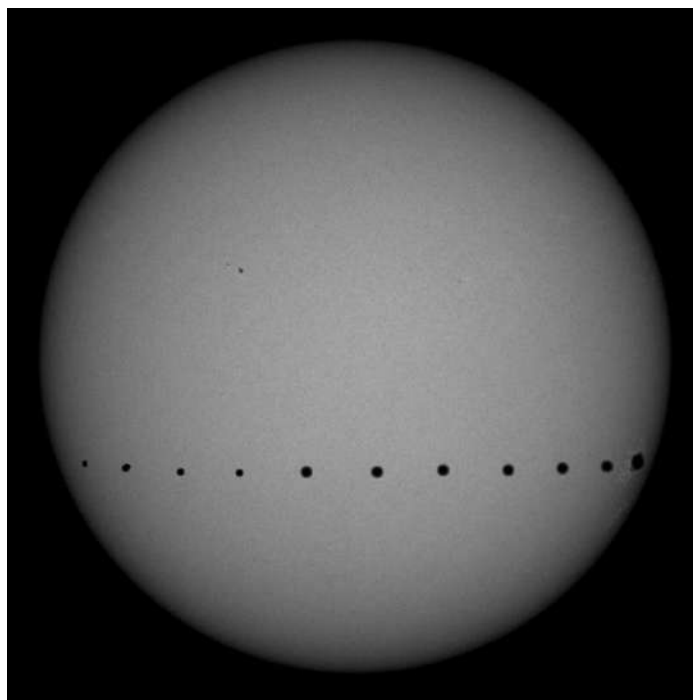
จุดที่ 7 ระหว่างวันที่ 1 - 9 มิถุนายน พ.ศ. 2564



จุดที่ 8 ระหว่างวันที่ 14 - 23 มิถุนายน พ.ศ. 2564



จุดที่ 9 ระหว่างวันที่ 25 มิถุนายน - 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2564



5.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจุดมืด

จากการเขียนตำแหน่งของจุดมืดบนวงกลมดวงอาทิตย์จำลองทำให้เราเห็นการเคลื่อนที่ของจุดมืดว่ามีทิศการเคลื่อนที่อย่างไร จะเห็นได้ว่า จุดมืดนั้นไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากขอบด้านหนึ่งของวงกลม ไปยังอีกข้างหนึ่ง ซึ่งมีเหตุผลมาจาก แกนดวงอาทิตย์ โน้มเข้าหาโลก (B_0) ทำให้เห็นจุดเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง แต่จะเห็นว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดมืดนั้นมีความสมมาตรซ้ายขวาจึงส่งผลต่อการคำนวณอัตราเร็วการหมุนของดวงอาทิตย์ได้น้อย โดยจะต้องเลือกจุดมืดที่อยู่ในระนาบเดียวกัน กล่าวคือ สร้างเส้นตั้งฉากกับแกนหมุนของดวงอาทิตย์โดยให้ขนานกับเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ ผ่านจุดมืด และเลือกจุดมืดที่อยู่ใกล้เส้นมากที่สุด 2 จุดมาคำนวณหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ แสดงจุดมืดที่ถูกเลือก ดังตารางที่ 1 ต่อไปนี้

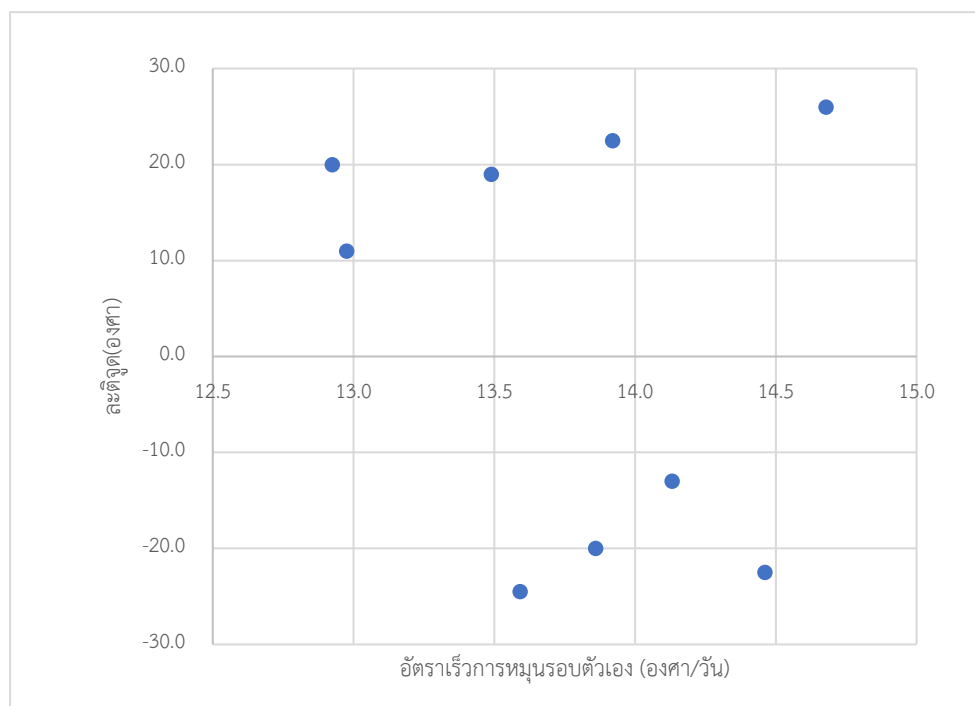
ตารางที่ 1 แสดงจุดมืดที่นำมาใช้คำนวณอัตราการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์

จุดที่	จุดที่เลือก 1		จุดที่เลือก 2		ผลต่างเวลา (วัน)
	วันที่	เวลา	วันที่	เวลา	
1	25 มีนาคม 2564	22.58 UT	29 มีนาคม 2564	22.52 UT	3.996
2	16 เมษายน 2564	22.52 UT	23 เมษายน 2564	22.58 UT	7.004
3	22 เมษายน 2564	22.52 UT	29 เมษายน 2564	22.52 UT	7.000
4	8 พฤษภาคม 2564	22.52 UT	17 พฤษภาคม 2564	22.52 UT	9.000
5	18 พฤษภาคม 2564	22.52 UT	29 พฤษภาคม 2564	22.52 UT	11.000
6	30 พฤษภาคม 2564	22.52 UT	5 มิถุนายน 2564	23.22 UT	5.979
7	1 มิถุนายน 2564	22.52 UT	8 มิถุนายน 2564	22.52 UT	7.000
8	15 มิถุนายน 2564	22.52 UT	22 มิถุนายน 2564	22.52 UT	7.000
9	26 มิถุนายน 2564	22.52 UT	3 กรกฎาคม 2564	22.52 UT	7.000

5.4 ผลการคำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์

ตารางที่ 2 แสดงอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์และละติจูด

จุดที่	a_{avg} (cm)	b_{avg} (cm)	x_{avg} (cm)	d (cm)	T (วัน)	อัตราเร็วการหมุนรอบ ตัวเอง (องศา/วัน)	ความคลาดเคลื่อน (องศา/วัน)	ละติจูด (องศา)	ความคลาดเคลื่อน (องศา)
1	2.90	3.97	5.80	12.67	4.0	14.7	0.5	26.0	0.1
2	0.67	3.77	8.45	12.88	7.0	13.6	0.3	-24.5	0.1
3	2.42	1.37	9.78	13.67	7.0	14.1	0.5	-13.0	0.1
4	0.93	1.72	10.75	13.40	9.0	12.9	0.3	20.0	0.1
5	0.43	0.45	12.13	13.02	11.0	13.5	0.6	19.0	0.1
6	3.60	2.10	7.93	13.63	6.0	13.0	0.5	11.0	0.1
7	0.63	3.77	8.80	13.20	7.0	13.9	0.3	-20.0	0.1
8	2.27	1.48	9.08	12.83	7.0	13.9	0.5	22.5	0.1
9	1.52	2.00	9.63	13.13	7.0	14.5	0.4	-22.5	0.1



รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเร็วการหมุนรอบตัวเอง (องศาต่อวัน) กับละติจูด (องศา)

5.4 ผลการเขียนโค้ด VBA คำนวณอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์

5.4.1 ฟังก์ชัน RO

เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณอัตราการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ โดยต้องใส่ตัวแปร a , b , d , x , t มีโค้ด VBA ดังรูปที่ 35

```
Function RO(a, b, d, x, t) As Double
    Dim s, r, o, p, q, l, j, k, m As Double

    s = 1 - (2 * (a + x) / d)
    r = 1 - (2 * a / d)
    o = WorksheetFunction.Acos(s)
    p = WorksheetFunction.Acos(r)
    j = o * 180 / 3.1416
    k = p * 180 / 3.1416
    q = (j - k) / t
    m = q + (360 / 365)
    RO = m
End Function
```

รูปที่ 35 โค้ด VBA ของฟังก์ชัน RO

โดยตัวแปร a , b , d , x , t เป็นตัวแปรเดียวกันกับสมการที่ 1

5.4.2 ฟังก์ชัน ddw

เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ โดยพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตัวแปร 4 ตัว ได้แก่ ระยะขอบซ้าย (a) ระยะขอบขวา (b) ระยะห่างระหว่างจุดทั้งสอง (x) และ เวลา (t)

```
Function ddw(a, b, d, x, t, da, db, dd, dx, dt) As Double
    Dim e, f, de, df, m, n, y, dy, k, l, dw As Double
    e = 1 - (2 * (a + x) / d)
    f = 1 - (2 * a / d)
    de = 2 * (((a + x) * dd) + (d * (da + dx))) / (d * d)
    df = 2 * ((a * dd + d * da)) / (d * d)
    m = WorksheetFunction.Acos(e)
    n = WorksheetFunction.Acos(f)
    y = (m - n)
    k = (df / Sqr(1 - (f * f))) * (df / Sqr(1 - (f * f)))
    l = (de / Sqr(1 - (e * e))) * (de / Sqr(1 - (e * e)))
    dy = Sqr(k + l)
    dw = (180 / 3.1416) * ((y * dt) + (t * dy)) / (t * t)
    ddw = dw
End Function
```

รูปที่ 36 โค้ด VBA ของฟังก์ชัน ddw

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ นั้น สามารถหาได้โดยการถ่ายภาพดวงอาทิตย์ และนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ โดยการหาพารามิเตอร์ที่ จำเป็นเพื่อแปลงพิกัดจากพิกัดแบบคาร์ทีเซียน เป็นพิกัดเฮลิโอกราฟฟิก หลังจากได้ตำแหน่งในพิกัดเฮลิโอกราฟฟิกแล้วให้เขียนจุดของดวงอาทิตย์โดยยึดตำแหน่งในพิกัดเฮลิโอกราฟฟิก หรือสามารถทำได้โดยดาวน์โหลด กริดของวันและเวลาที่ทำการถ่ายภาพ จากเว็บไซต์ <http://bass2000.obspm.fr/ephem.php> แล้วนำภาพดวงอาทิตย์ไปซ้อนทับกริด โดยให้แกนเหนือใต้ของรูปที่ถ่าย ซ้อนทับกับแกนของพิกัดเฮลิโอกราฟฟิก ก็จะได้รูปดวงอาทิตย์ที่ผ่านการวิเคราะห์ และหมุน หรือคำนวณหาตำแหน่งของจุดมืดในพิกัดเฮลิโอกราฟฟิกโดยใช้สมการที่เกี่ยวข้อง หลังจากได้ภาพดวงอาทิตย์แล้ว จะสามารถหาอัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ได้โดยการใช้สมการที่ 1 หรือ ใช้ฟังก์ชัน RO และ ddw ในการหาอัตราเร็ว การหมุนรอบตัวเอง และ หาความคลาดเคลื่อน ตามลำดับ

เนื่องจากไม่สามารถถ่ายภาพดวงอาทิตย์ได้จึงทำการวิเคราะห์ภาพจาก “Laboratory of X-ray astronomy of the Sun” โดยใช้ภาพตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2564 จากการเขียนตำแหน่งของจุดมืดลงบนวงกลมดวงอาทิตย์จำลองพบว่า เส้นทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ไม่ได้เป็นเส้นตรงแต่เป็นเส้นโค้งอันเป็นผลมาจากการที่แกนของดวงอาทิตย์โน้มเข้าหาโลก แม้ว่าจุดมืดจะเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งแต่ยังมีสมมาตรซ้ายและขวา การเลือกจุดมืดที่จะนำมาคำนวณจึงมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยเลือกจุดมืดที่อยู่ในระนาบเดียวกัน ทั้งนี้พบว่า อัตราเร็วการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ไม่เท่ากันในแต่ละละติจูด โดยเฉลี่ย ระหว่างละติจูด ± 30 องศา มีอัตราเร็ว 13.8 องศา ต่อ วัน และมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ± 0.4 องศาต่อวัน

6.2 ปัญหาที่พบ

1. เนื่องจากระยะเวลาที่ทำการถ่ายภาพดวงอาทิตย์นั้น เป็นช่วง Solar minimum ทำให้จุดมืดมีขนาดเล็กและไม่สามารถถ่ายภาพที่สามารถระบุตำแหน่งของจุดมืดเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้
2. ฟิวเตอร์ที่ใช้ในการถ่ายภาพดวงอาทิตย์ มีผิวที่ไม่เรียบซึ่งส่งผลต่อความชัดของภาพดวงอาทิตย์ที่ได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

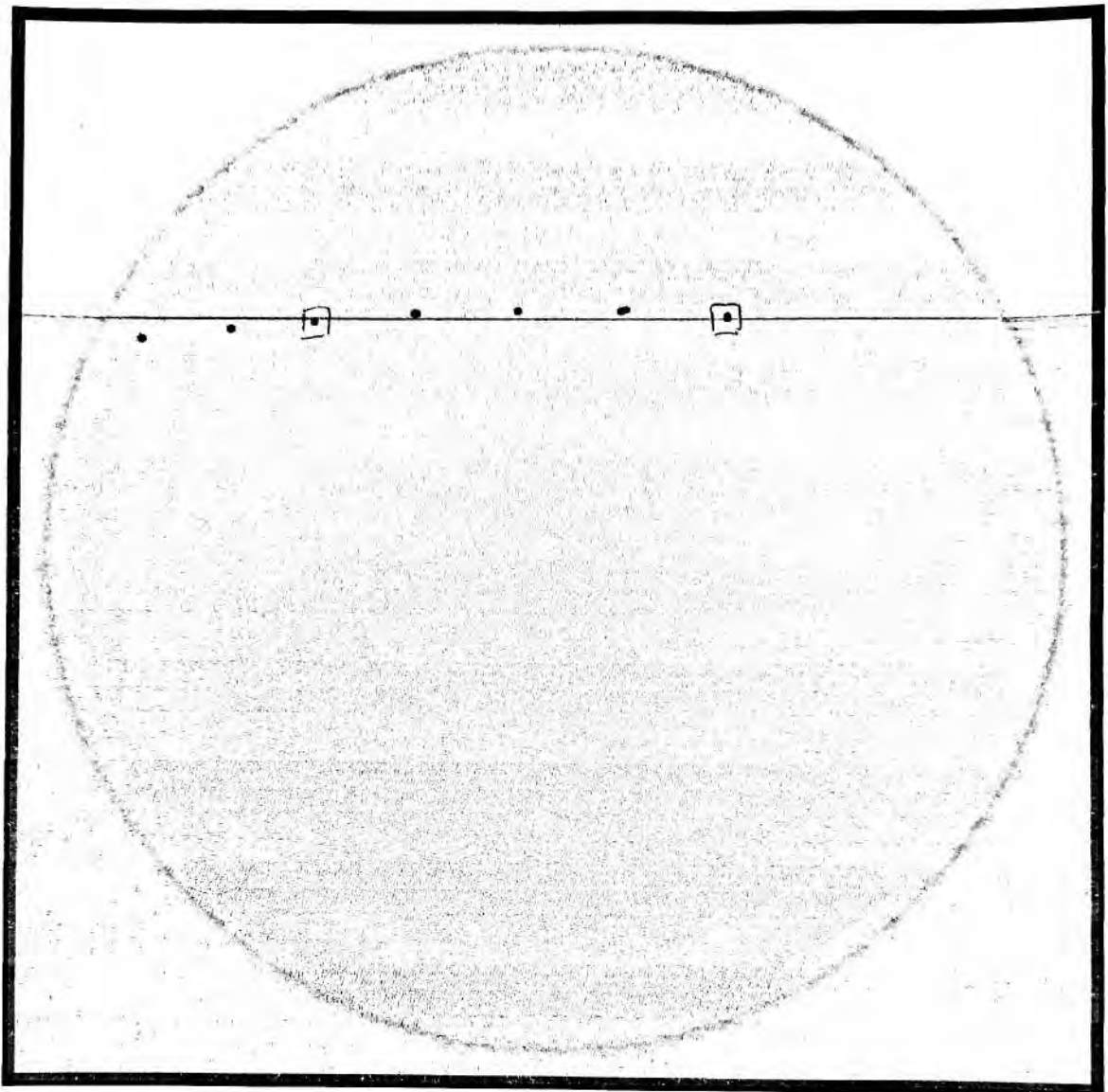
ในการถ่ายภาพดวงอาทิตย์ควรทำในช่วง Solar maximum จุดมืดจะมีจำนวนมากกว่าและมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งจะช่วยให้ถ่ายภาพดวงอาทิตย์ได้ง่ายกว่า และใช้ฟิวเตอร์แบบอื่นในการถ่ายภาพ เพื่อจะให้เห็นจุดมืดที่ชัดเจนมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] CESAR./(2017).//*Rotation period of the Sun and the sunspot activity.*/สืบค้นจาก http://cesar.esa.int/upload//teachers_guide_sun_33.pdf
- [2] Tsung-Ching Chen./2014.//*Using Sidereal Rotation Peroid Expressions to calculate the sun's Rotation Peroid through Observation of Sunspot (research).*//Hindawi Publishing corporation:/ Hindawi Publishing corporation
- [3] H. W. Babcock./(1961).//The topology of the sun's magnetic field and the 22-year cycle.//*The Astrophysical Journal.*/133/(2),/572-587
- [4] C. E. St. John./(2003).//The present condition of the problem of Solar Rotation.//*Publications of the Astronomical Society of the Pacific.*/30/(178),/23-49
- [5] K. J. Li, W. Feng,X.J.Shi,J. L. Kie,P.X. Gao, and H. F. Liang./(2014).//Long-term variations of solar differential rotation and sunspot activity.//*Solar Physics,*/289/(3),/759-768
- [6] S.Haulitschke & H.Strecker.2018.Astrophysical lab course, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg.
- [7] Laboratory of X-ray astronomy of the Sun, LPI RAS, Russia./2020./Solar Today./ https://tesis.lebedev.ru/en/xras_laboratory.html [August 27,2020]
- [8] Learning center of Earth Science and Austronomy./2019./ดวงอาทิตย์./ <http://www.lesa.biz/astronomy/solar-system/sun> [August 27, 2020]
- [9] Laboratory of X-ray astronomy of the Sun.(2016).Sun Image , สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2563. จาก https://tesis.lebedev.ru/en/sun_pictures.html?m=9&d=10&y=2016)
- [10] NASA (2016).Understanding the Magnetic Sun, สืบค้นเมื่อ 25 เมษายน 2564. จาก <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/understanding-the-magnetic-sun/>
- [11] CESAR./(2017).//*Heliographic Coordinate.*/สืบค้นจาก https://cesar.esa.int/upload/201712/heliographic_coordinates_booklet_248.pdf

ภาคผนวก

จุดที่ 1 ระหว่างวันที่ 23 มีนาคม 2564 ถึง 29 มีนาคม 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 25 มีนาคม 2564 เวลา 12.58 UT.

จุดที่เลือก 2 วันที่ 29 มีนาคม 2564 เวลา 12.52 UT.

ค่า $a_1 = \dots 2.90 \text{ cm} \dots$ ค่า $a_2 = \dots 2.90 \text{ cm} \dots$ ค่า $a_3 = \dots 2.90 \text{ cm} \dots$

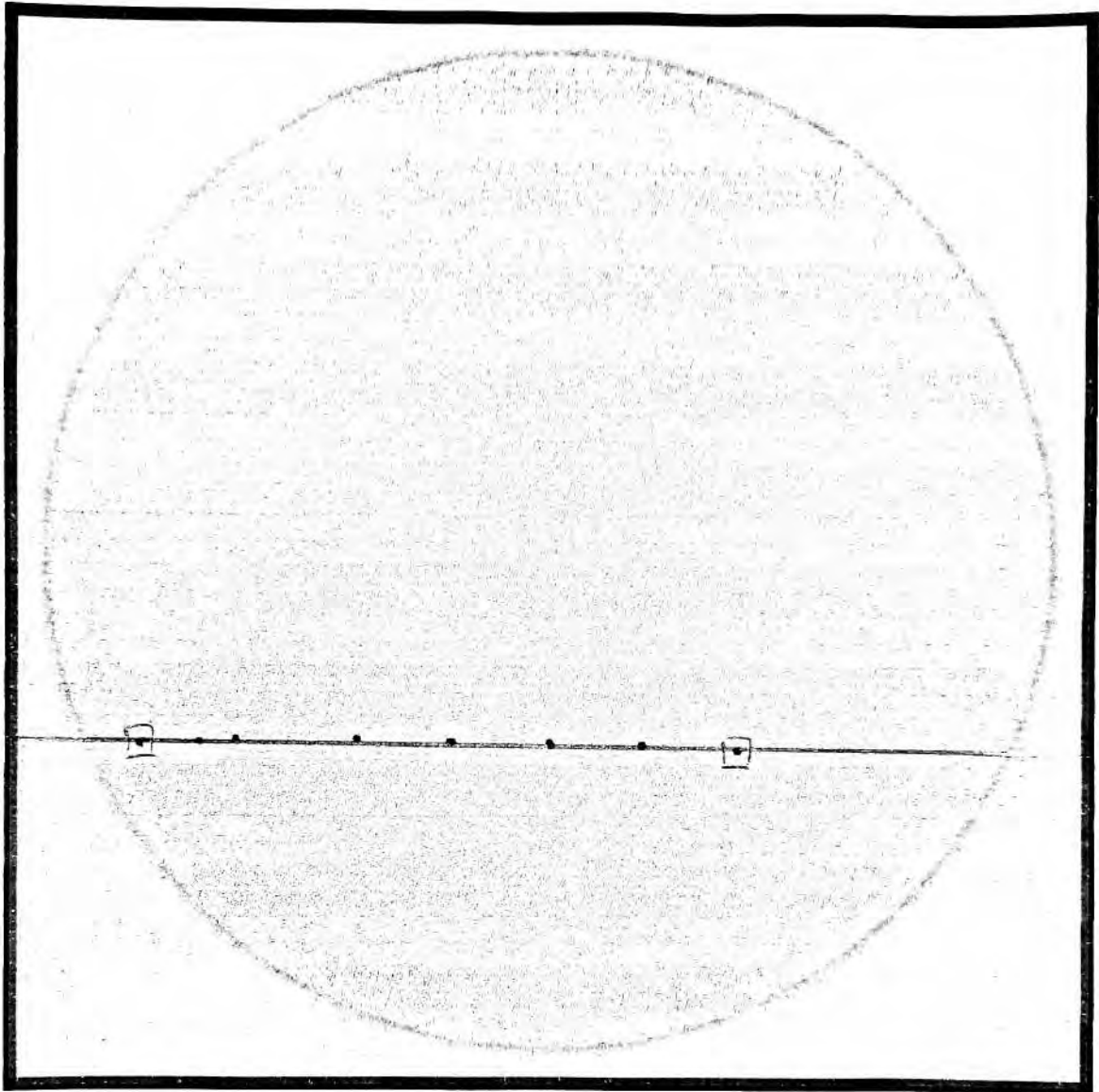
ค่า $b_1 = \dots 4.00 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_2 = \dots 3.90 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_3 = \dots 3.90 \text{ cm} \dots$

ค่า $x_1 = \dots 5.80 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_2 = \dots 5.80 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_3 = \dots 5.80 \text{ cm} \dots$

ค่า $a_{\text{avg}} = \dots 2.90 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_{\text{avg}} = \dots 3.93 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_{\text{avg}} = \dots 5.80 \text{ cm} \dots$

ค่า $\Delta t = \dots 4.0 \dots \text{ปี}$

จุดที่ 2 ระหว่างวันที่ 16 เมษายน 2564 ถึง 23 เมษายน 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 16 เมษายน 2564 เวลา 22:52 U.T.

จุดที่เลือก 2 วันที่ 23 เมษายน 2564 เวลา 22:58 U.T.

ค่า $a_1 = \dots 0.70 \text{ cm} \dots$ ค่า $a_2 = \dots 0.65 \text{ cm} \dots$ ค่า $a_3 = \dots 0.65 \text{ cm} \dots$

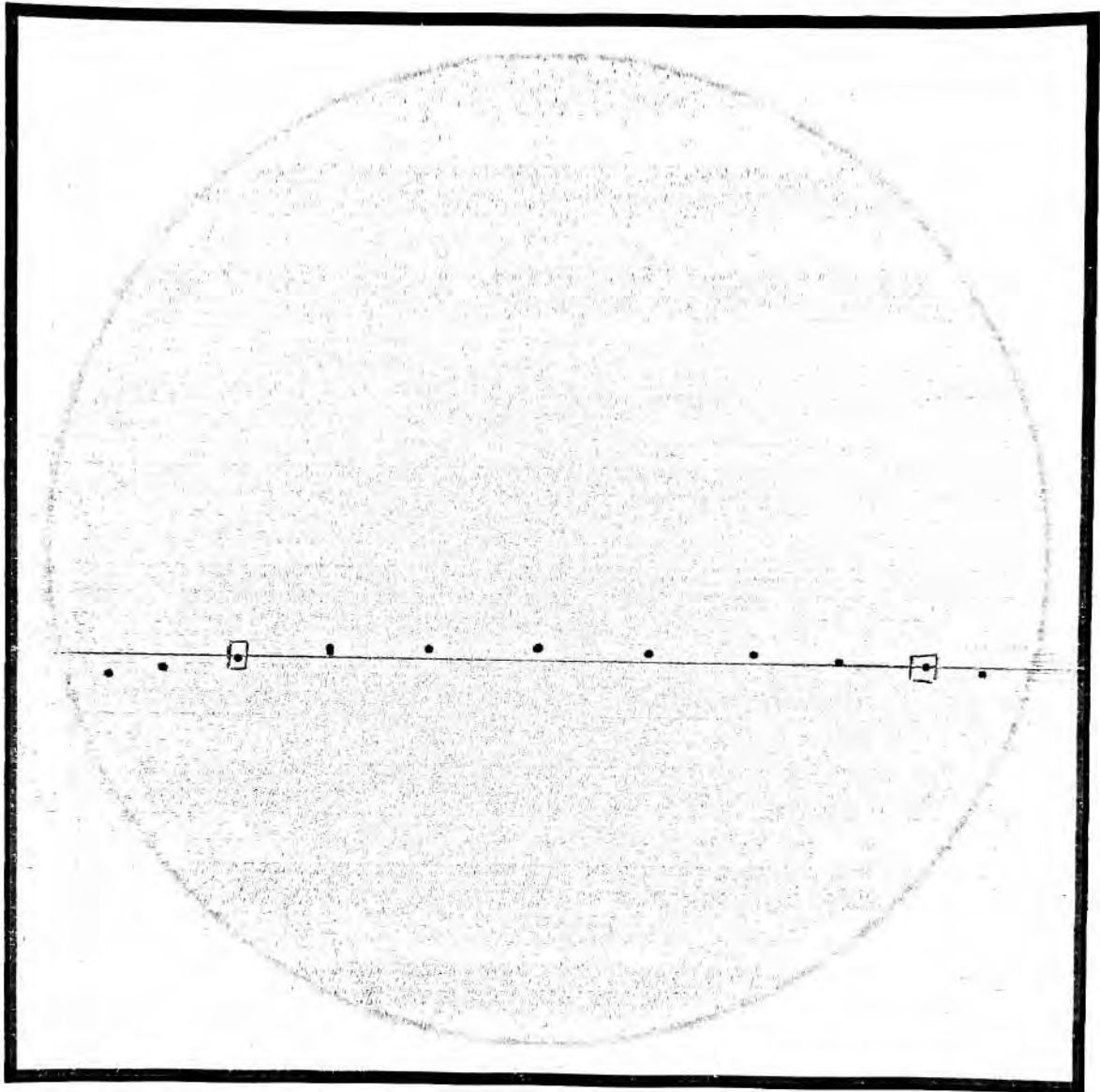
ค่า $b_1 = \dots 3.70 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_2 = \dots 3.80 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_3 = \dots 3.80 \text{ cm} \dots$

ค่า $x_1 = \dots 8.45 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_2 = \dots 8.45 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_3 = \dots 8.45 \text{ cm} \dots$

ค่า $a_{\text{avg}} = \dots 0.67 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_{\text{avg}} = \dots 3.77 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_{\text{avg}} = \dots 8.45 \text{ cm} \dots$

ค่า $\Delta t = \dots 7.0 \dots$ วัน

จุดที่ 3 ระหว่างวันที่ 20 เมษายน 2564 ถึง 30 เมษายน 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 22 เมษายน 2564 เวลา 22.52 UT

จุดที่เลือก 2 วันที่ 29 เมษายน 2564 เวลา 22.52 UT

ค่า $a_1 = \dots 2.40 \text{ cm} \dots$ ค่า $a_2 = \dots 2.45 \text{ cm} \dots$ ค่า $a_3 = \dots 2.40 \text{ cm} \dots$

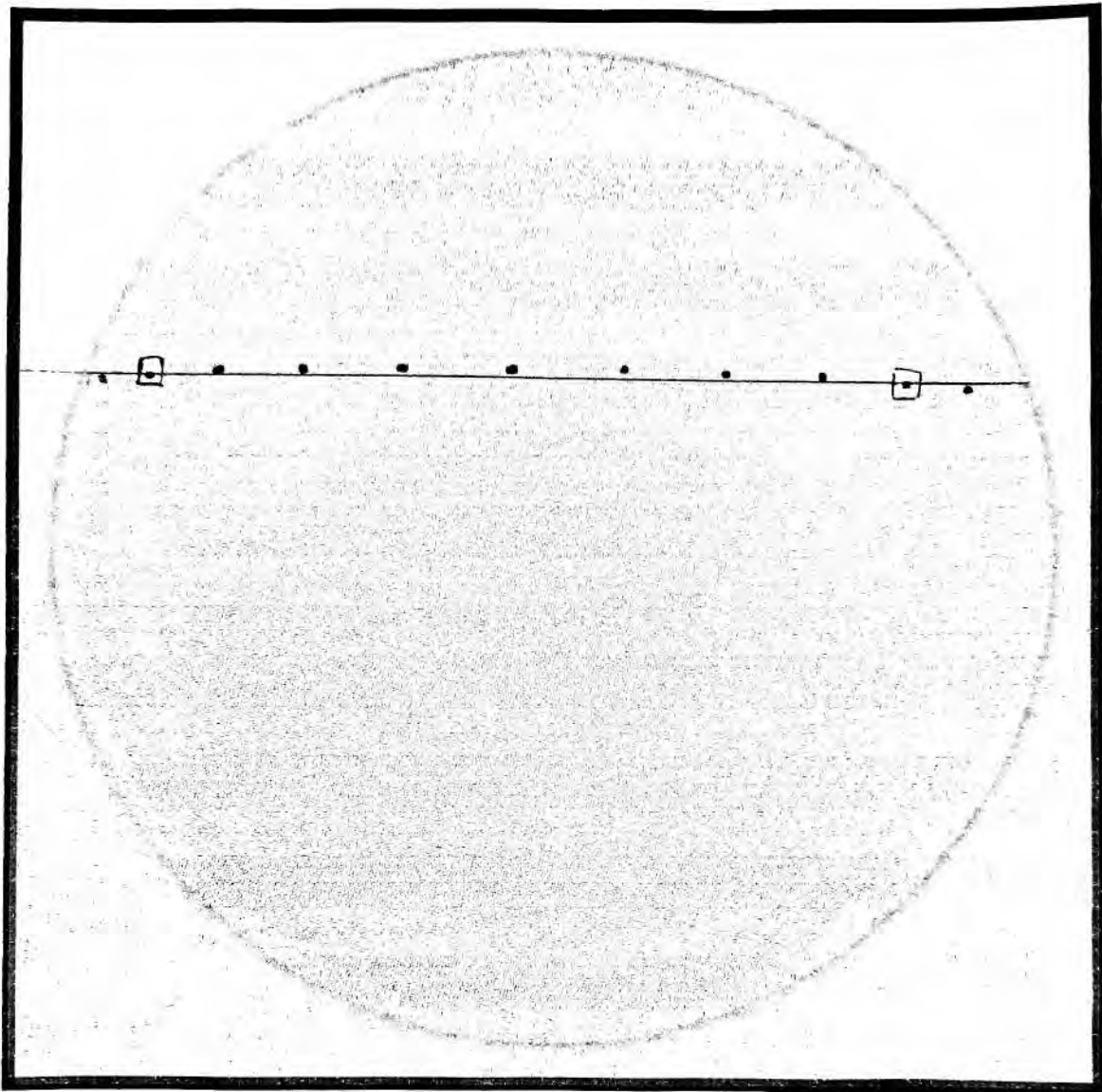
ค่า $b_1 = \dots 1.50 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_2 = \dots 1.50 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_3 = \dots 1.40 \text{ cm} \dots$

ค่า $x_1 = \dots 9.75 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_2 = \dots 9.80 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_3 = \dots 9.80 \text{ cm} \dots$

ค่า $a_{\text{avg}} = \dots 2.42 \text{ cm} \dots$ ค่า $b_{\text{avg}} = \dots 1.47 \text{ cm} \dots$ ค่า $x_{\text{avg}} = \dots 9.78 \text{ cm} \dots$

ค่า $\Delta t = \dots 7.0 \text{ วัน} \dots$

จุดที่ 4 ระหว่างวันที่ 7 พฤษภาคม 2564 ถึง 18 พฤษภาคม 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 8 พฤษภาคม 2564 เวลา 22.52 UT.

จุดที่เลือก 2 วันที่ 17 พฤษภาคม 2564 เวลา 22.52 UT.

ค่า $a_1 = 0.95 \text{ cm}$ ค่า $a_2 = 0.90 \text{ cm}$ ค่า $a_3 = 0.95 \text{ cm}$

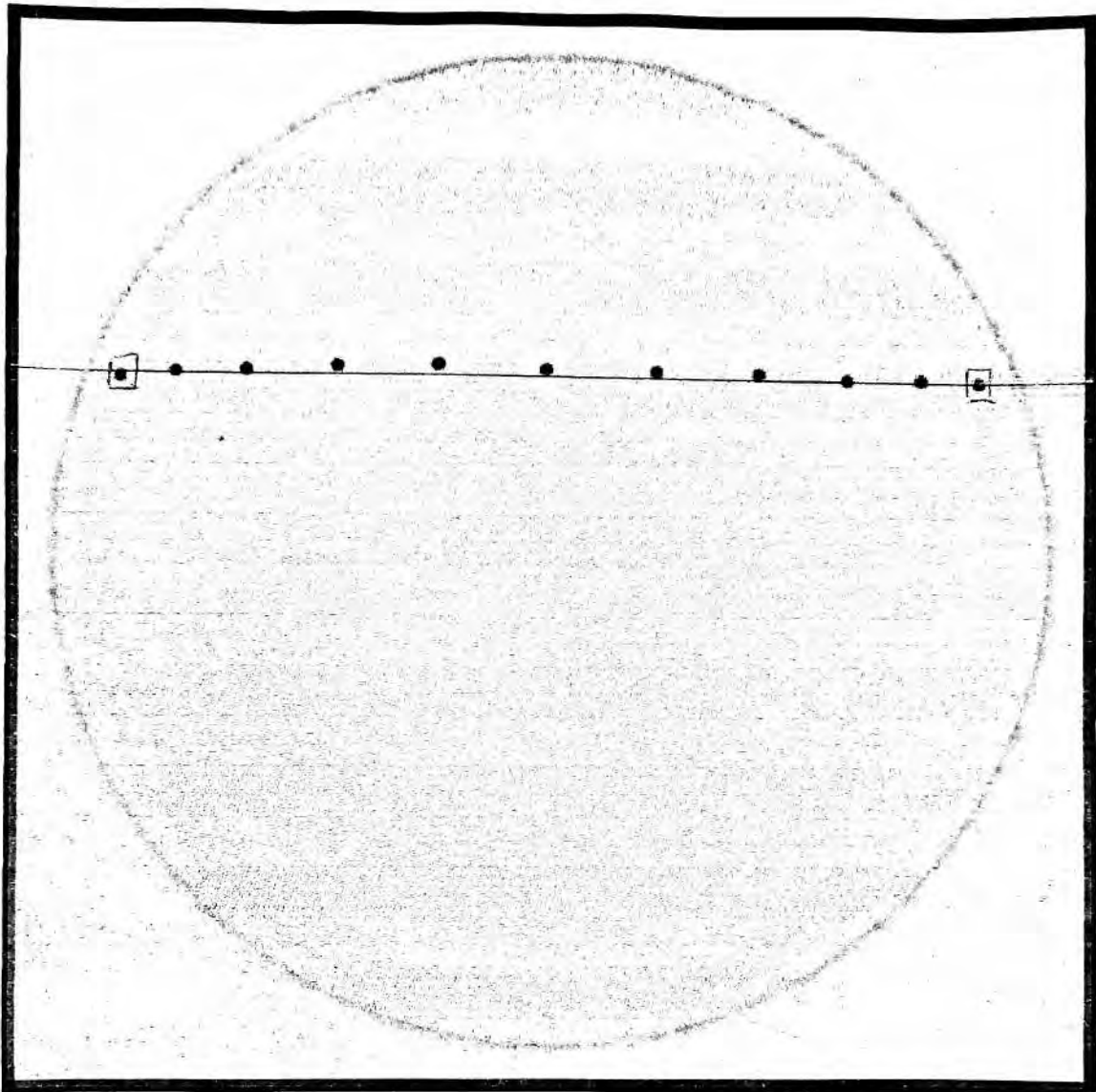
ค่า $b_1 = 1.70 \text{ cm}$ ค่า $b_2 = 1.70 \text{ cm}$ ค่า $b_3 = 1.75 \text{ cm}$

ค่า $x_1 = 10.75 \text{ cm}$ ค่า $x_2 = 10.75 \text{ cm}$ ค่า $x_3 = 10.75 \text{ cm}$

ค่า $a_{\text{avg}} = 0.93 \text{ cm}$ ค่า $b_{\text{avg}} = 1.72 \text{ cm}$ ค่า $x_{\text{avg}} = 10.75 \text{ cm}$

ค่า $\Delta t = 9.0 \text{ ชม.}$

จุดที่ 5 ระหว่างวันที่ 18 พฤษภาคม 2564 ถึง 29 พฤษภาคม 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 18 พฤษภาคม 2564 เวลา 22.52 น.

จุดที่เลือก 2 วันที่ 29 พฤษภาคม 2564 เวลา 22.52 น.

ค่า $a_1 = 0.45 \text{ cm}$ ค่า $a_2 = 0.40 \text{ cm}$ ค่า $a_3 = 0.45 \text{ cm}$

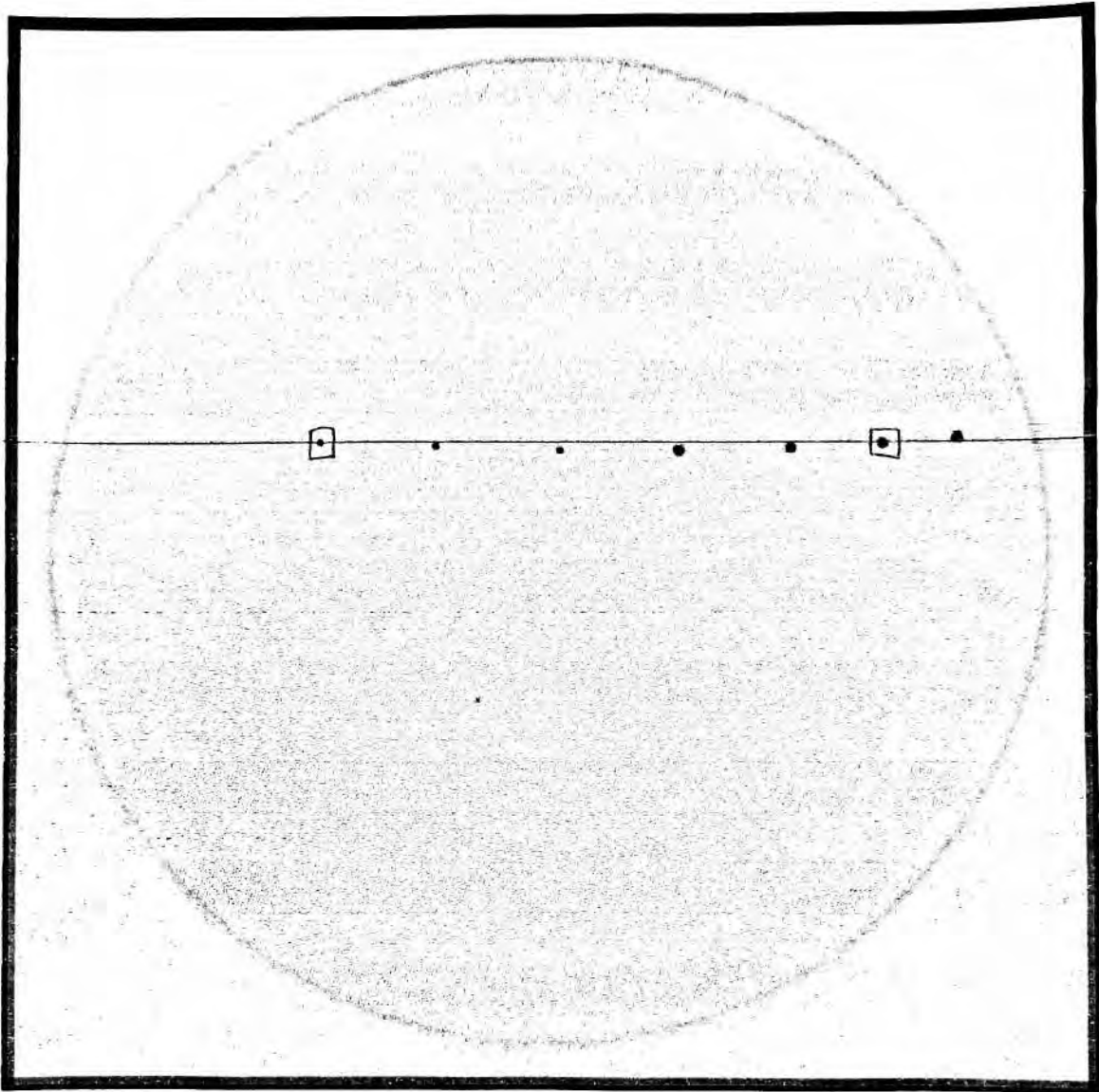
ค่า $b_1 = 0.50 \text{ cm}$ ค่า $b_2 = 0.40 \text{ cm}$ ค่า $b_3 = 0.45 \text{ cm}$

ค่า $x_1 = 12.15 \text{ cm}$ ค่า $x_2 = 12.10 \text{ cm}$ ค่า $x_3 = 12.15 \text{ cm}$

ค่า $a_{\text{avg}} = 0.43 \text{ cm}$ ค่า $b_{\text{avg}} = 0.45 \text{ cm}$ ค่า $x_{\text{avg}} = 12.13 \text{ cm}$

ค่า $\Delta t = 11.0 \text{ วินาที}$

จุดที่ 6 ระหว่างวันที่ 30 พฤษภาคม 2564 ถึง 6 มิถุนายน 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 30 พฤษภาคม 2564 เวลา 22.52 UT

จุดที่เลือก 2 วันที่ 5 มิถุนายน 2564 เวลา 23.22 UT

ค่า $a_1 = 3.60 \text{ cm}$ ค่า $a_2 = 3.60 \text{ cm}$ ค่า $a_3 = 3.60 \text{ cm}$

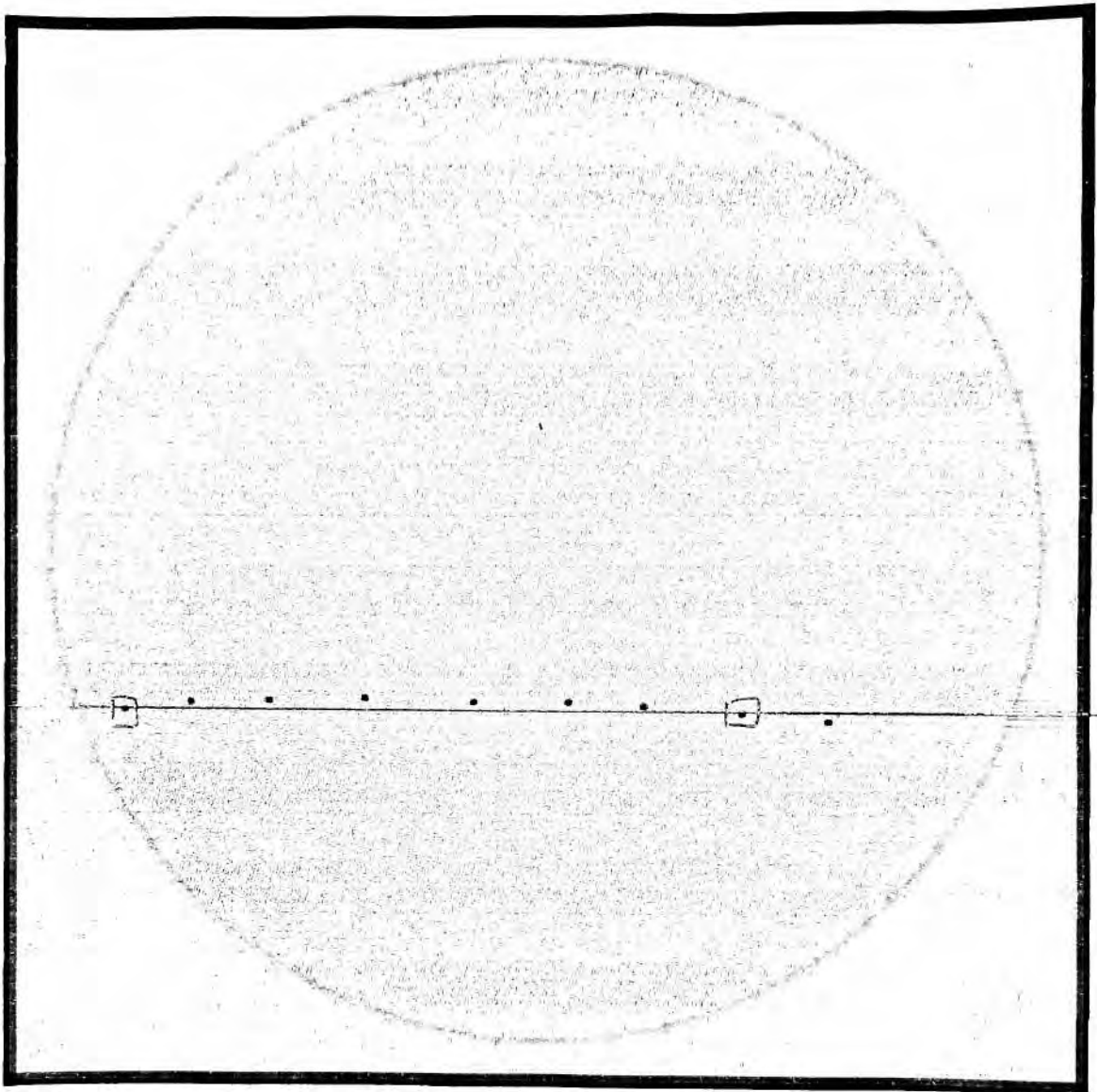
ค่า $b_1 = 2.10 \text{ cm}$ ค่า $b_2 = 2.10 \text{ cm}$ ค่า $b_3 = 2.10 \text{ cm}$

ค่า $x_1 = 7.95 \text{ cm}$ ค่า $x_2 = 7.95 \text{ cm}$ ค่า $x_3 = 7.95 \text{ cm}$

ค่า $a_{\text{avg}} = 3.60 \text{ cm}$ ค่า $b_{\text{avg}} = 2.10 \text{ cm}$ ค่า $x_{\text{avg}} = 7.93 \text{ cm}$

ค่า $\Delta t = 6.0 \text{ วัน}$

จุดที่ 7 ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน 2564 ถึง 9 มิถุนายน 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 1 มิถุนายน 2564 เวลา 22:52 UT

จุดที่เลือก 2 วันที่ 8 มิถุนายน 2564 เวลา 22:52 UT

ค่า $a_1 = \dots 0.65 \dots \text{cm}$ ค่า $a_2 = \dots 0.65 \dots \text{cm}$ ค่า $a_3 = \dots 0.60 \dots \text{cm}$

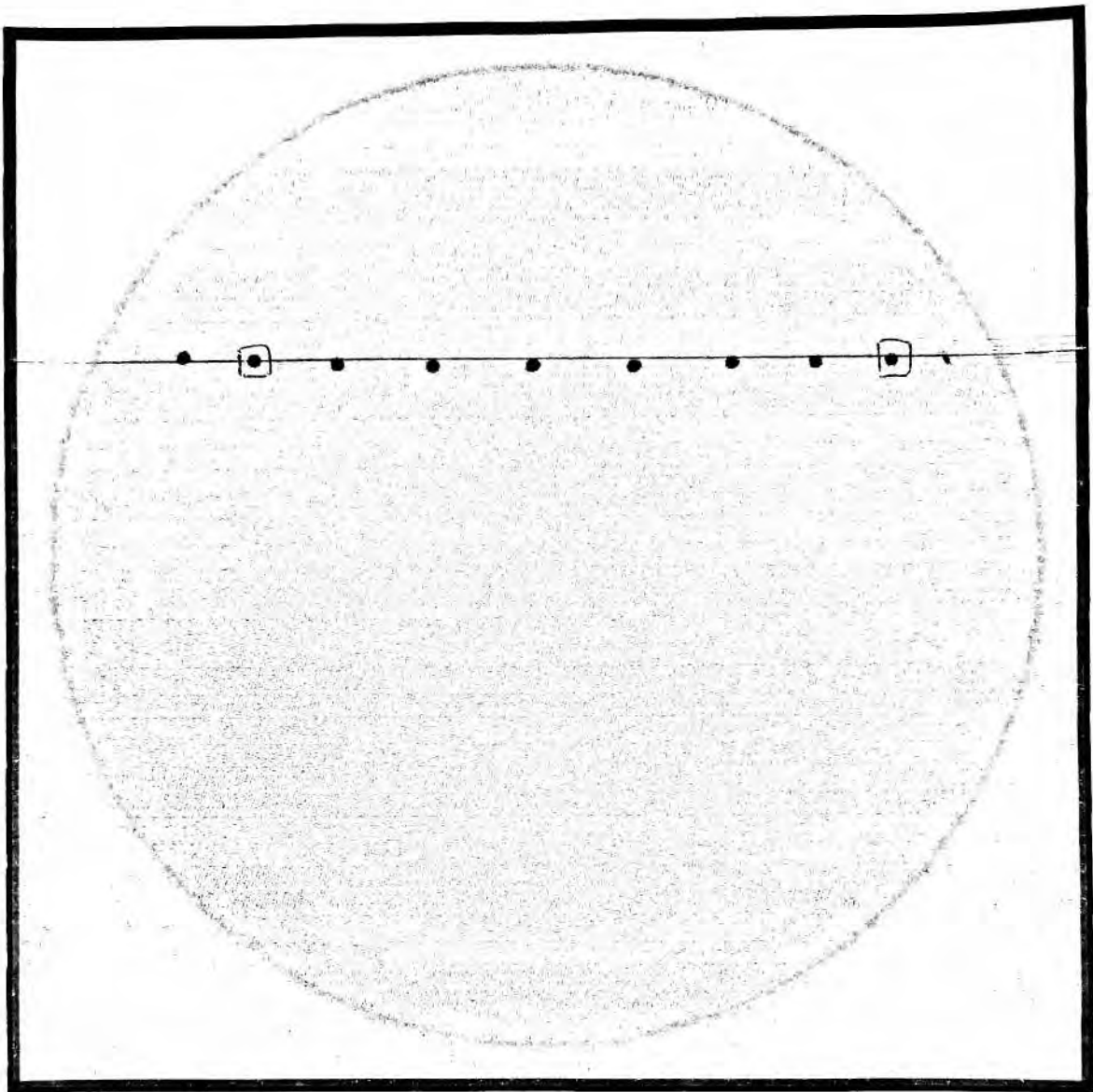
ค่า $b_1 = \dots 3.80 \dots \text{cm}$ ค่า $b_2 = \dots 3.75 \dots \text{cm}$ ค่า $b_3 = \dots 3.75 \dots \text{cm}$

ค่า $x_1 = \dots 8.80 \dots \text{cm}$ ค่า $x_2 = \dots 8.80 \dots \text{cm}$ ค่า $x_3 = \dots 8.80 \dots \text{cm}$

ค่า $a_{\text{avg}} = \dots 0.63 \dots \text{cm}$ ค่า $b_{\text{avg}} = \dots 3.77 \dots \text{cm}$ ค่า $x_{\text{avg}} = \dots 8.80 \dots \text{cm}$

ค่า $\Delta t = \dots 7.0 \dots \text{วินาที}$

จุดที่ 8 ระหว่างวันที่ 14 มิถุนายน 2564 ถึง 23 มิถุนายน 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 15 มิถุนายน 2564 เวลา 22.52 UT..

จุดที่เลือก 2 วันที่ 22 มิถุนายน 2564 เวลา 22.52 UT..

ค่า $a_1 = 2.30$ cm .. ค่า $a_2 = 2.25$ cm .. ค่า $a_3 = 2.25$ cm ..

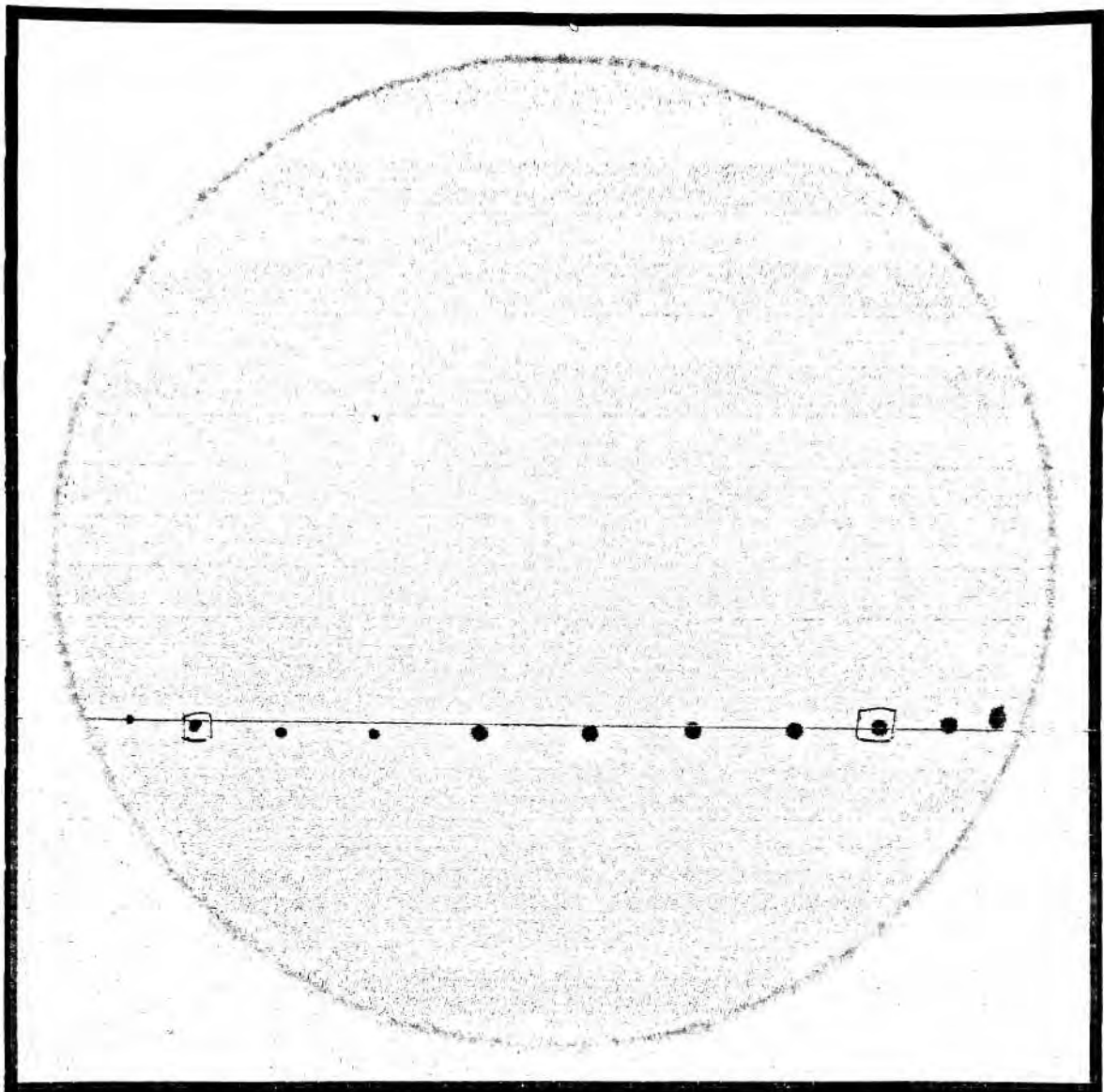
ค่า $b_1 = 1.50$ cm .. ค่า $b_2 = 1.50$ cm .. ค่า $b_3 = 1.45$ cm ..

ค่า $x_1 = 9.10$ cm .. ค่า $x_2 = 9.10$ cm .. ค่า $x_3 = 9.05$ cm ..

ค่า $a_{avg} = 2.27$ cm .. ค่า $b_{avg} = 1.48$ cm .. ค่า $x_{avg} = 9.08$ cm ..

ค่า $\Delta t = 7.0$ วัน

จุดที่ 9 ระหว่างวันที่ 25 มิถุนายน 2564 ถึง 5 กรกฎาคม 2564



จุดที่เลือก 1 วันที่ 26 มิถุนายน 2564 เวลา 12.52 UT

จุดที่เลือก 2 วันที่ 3 กรกฎาคม 2564 เวลา 22.52 UT

ค่า $a_1 = 1.45$ cm ค่า $a_2 = 1.55$ cm ค่า $a_3 = 1.55$ cm

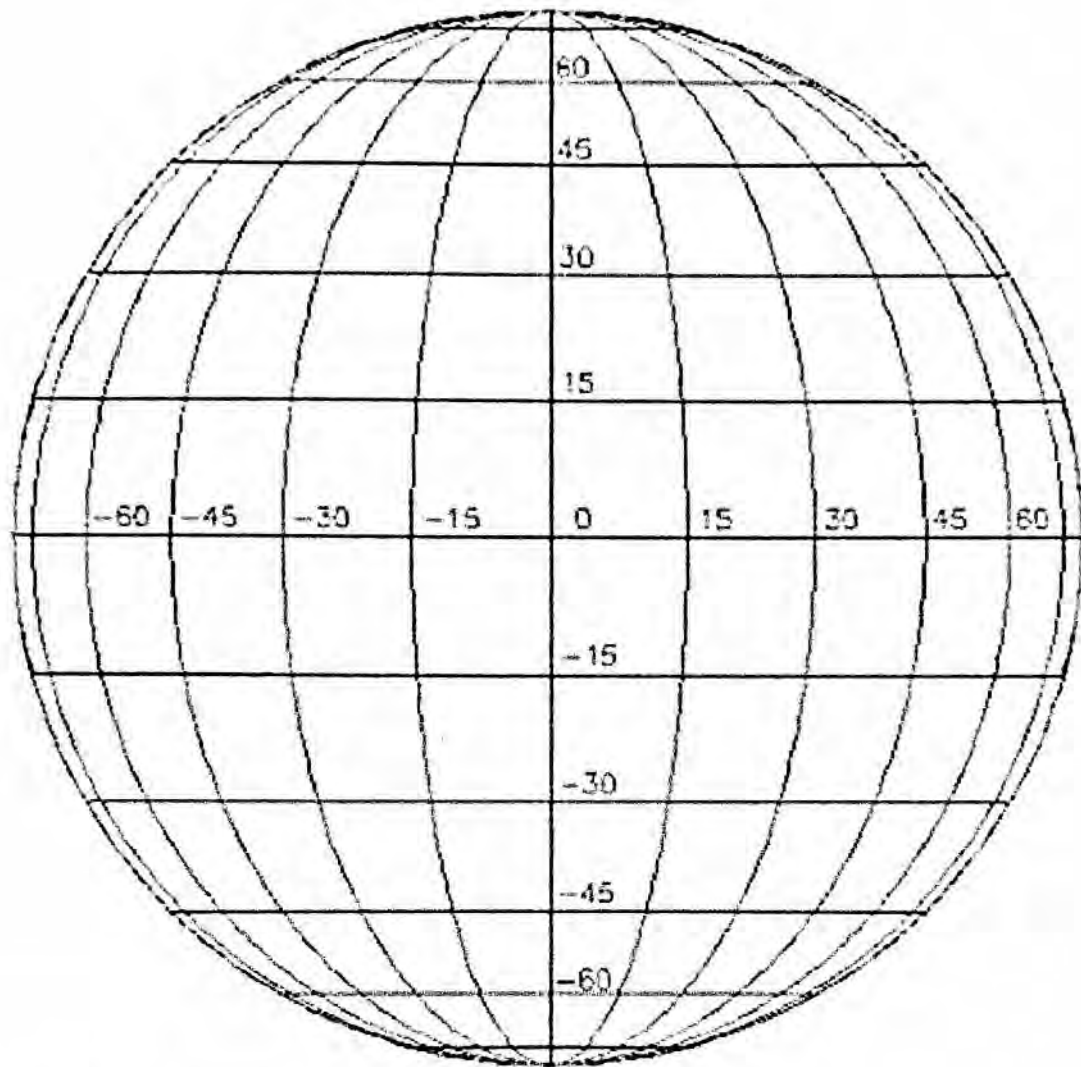
ค่า $b_1 = 2.00$ cm ค่า $b_2 = 2.00$ cm ค่า $b_3 = 2.00$ cm

ค่า $x_1 = 9.60$ cm ค่า $x_2 = 9.10$ cm ค่า $x_3 = 9.65$ cm

ค่า $a_{avg} = 1.52$ cm ค่า $b_{avg} = 2.00$ cm ค่า $x_{avg} = 9.62$ cm

ค่า $\Delta t = 7.0$ วัน

กริดสำหรับหาค่าละติจูดของจุดมืด



Solar Coordinates $B=+0$