

סולמות זמנים שמשיים ו'משוואת הזמן' באסטרונומיה המודרנית ובזו של הקדמונים

הרצאה 'בסמינר ללוח העברי וזמני היום בהלכה' - אוניברסיטת בר אילן,
חדר המחלקה למתמטיקה (בנין מספר 216), קומה עליונה.
זמן: יום שלישי, ט"ו בסיוון תשע"ו - 21/6/16, בשעה 17:15 (עד כ- 18:15).
גרסה: 21/06/2016 11:54 - לא מוגה – לא להפצה

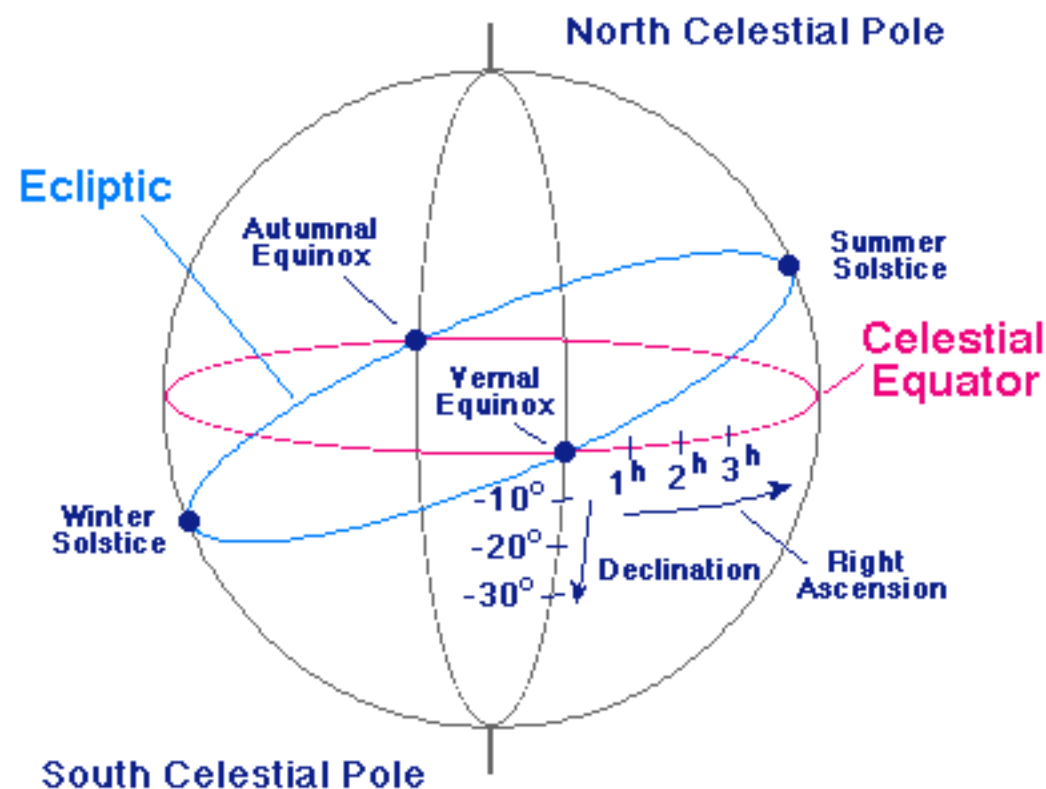
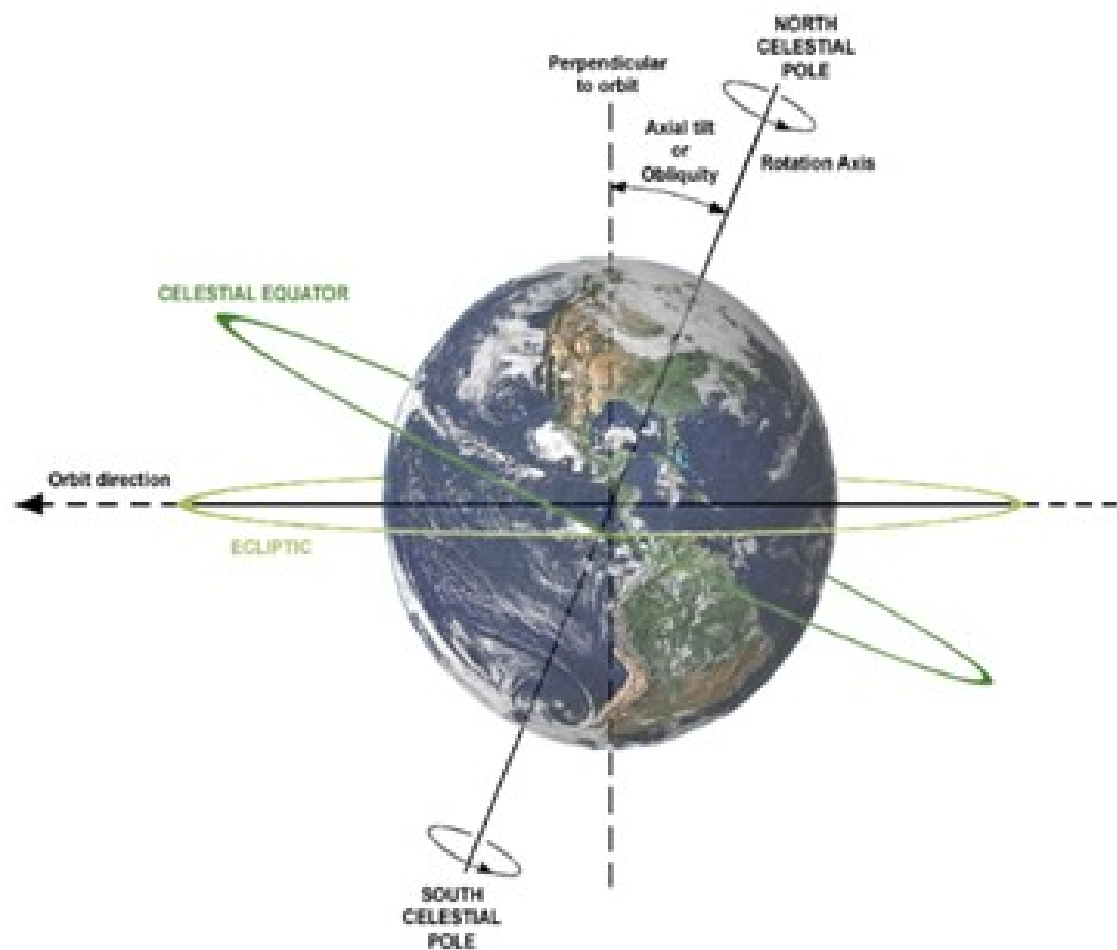
אינג' יעקב לוינגר
judithl@post.tau.ac.il

תוכן השקפים

1. מערכות קואורדינטות למיקום השמש על סֵפֶרֶת השמים: מערכת המלקה והמשווה,
2. השמשות על סֵפֶרֶת השמים, האמתית ושתי האמצעיות ומהירות תנועותיהן,
3. זווית השעה, ויתר הגדלים האסטרונומיים על משווה השמים,
4. הגדרת 'הזמן האמתי' ו'הזמן האמצעי' ו'משוואת הזמן' באמצעות השמש האמתית והאמצעית,
5. 'משוואת (= השוואת) הזמן' וביטוייה המתמטי, ואופן חישובה. כינויה באסטרונומיה של הקדמונים,
6. 'משוואת הזמן' המודרנית, וערכיו הקיצוניים
7. 'משוואת הזמן' של הקדמונים,
8. לאילו מטרות חישוביות שמשה 'משוואת הזמן' את הקדמונים,
9. שתי מהפכות במניית הזמן, הקשורות ב'משוואת הזמן': השעונים המכניים (מהמאה ה-14) והזמן האמצעי של פלמסטיד – Flamsteed (מהמאה ה-17),
10. שני סוגי סולם 'זמן אמצעי' של הקדמונים: זה שבאלמגסט (Almagest) וזה ב'לוחות על יד' (Handy Tables),
11. מקום ציר ה-x בעקומת משוואת הזמן של הקדמונים, בשתי השיטות של הזמן האמצעי
12. סולם הזמן הממוצע של הלוח העברי – הדעות העיקריות בנידון,
13. מקורות

1. מערכות קואורדינטות למיקום השמש על ספרת השמים: מערכת המלקה והמשווה

המישורים של המלקה ומשווה השמים חותכים זה את זה בזווית של כ- 23.5 מעלות. מסיבה זו שונה מהירות השמש על מסלולה שעל המלקה ממהירות 'מקומה' שעל המשווה, הנקראת עלייה ישרה α . זו נמדדת מנקודת האביב, אחת משתי נקודות החיתוך בין המלקה לבין משווה השמים.



2. השמשות על סִפְרַת השמים, האמתית ושתי האמצעיות ומהירות תנועותיהן

• השמש האמתית נעה במהלך תנועתה השנתית לאורך המלקה, במהירות משתנית של כ- 1° /ביום, בכיוון מן המערב למזרח. את מקומה על המלקה מודדים מ'נקודת האביב'.

• מוגדרות שתי שמשות אמצעיות:

• השמש האמצעית שעל המלקה. מריצים אותה על המלקה, במהירות השנתית הממוצעת של השמש והיא מתלכדת עם השמש האמתית בשתי נקודות:

• בפריהליון (=נקודה הקרובה ביותר של השמש מהארץ)

• ובאפהליון (=נקודתה הרחוקה של השמש מהארץ)

= גובה השמש' בלשון רמב"ם, הלקדה"ח יב ב).

• השמש האמצעית שעל משווה השמים. נעה על 'משווה

השמים' במהירות זהה לשמש האמצעית שעל המלקה,

ונפגשת עמה, באסטרונומיה המודרנית, בנקודות האביב

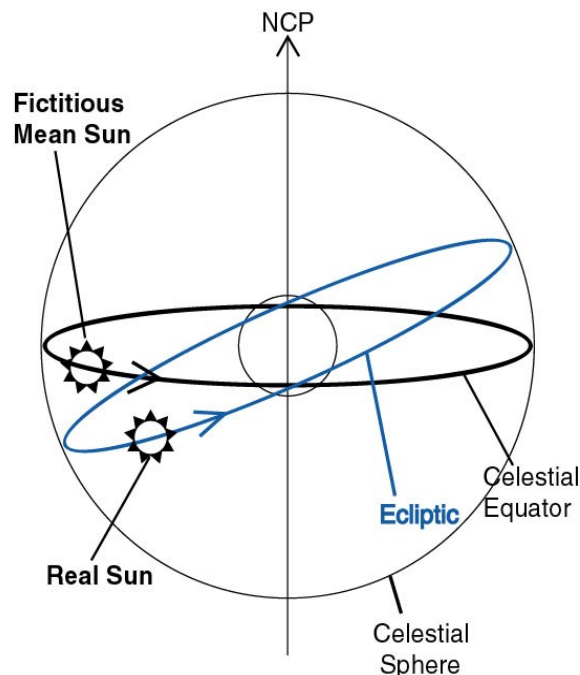
והסתיו. כאן מתפצלת השמש האמצעית שעל המלקה לשתי

שמשות אמצעיות, האחת ממשיכה דרכה על המלקה והשנייה

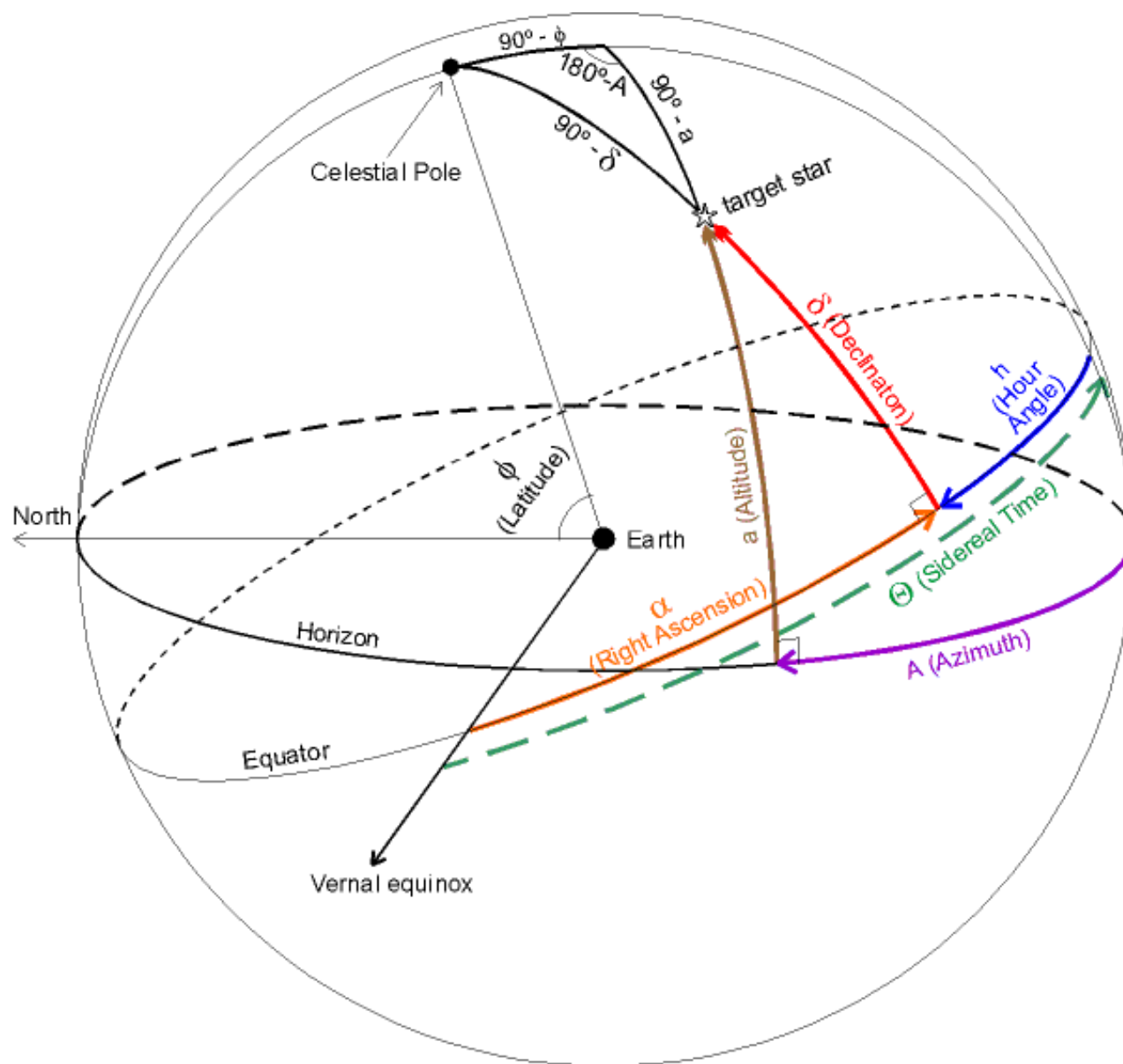
ממשיכה מהלכה על 'משווה השמים' ובאמצעותה מודדים את

הזמן האמצעי המודרני. השמש האמצעית שעל המשווה של

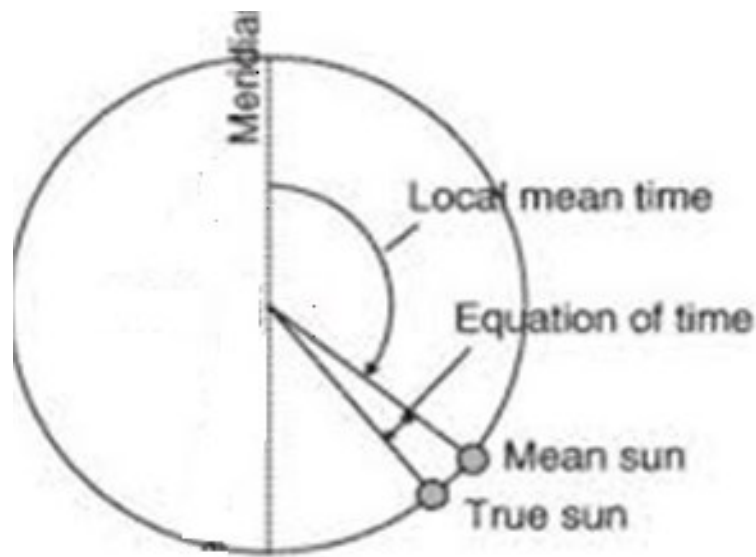
הקדמונים הוגדרה באופן שונה במקצת – ראה להלן.



3. זווית השעה, ויתר הגדלים האסטרונומיים על משווא השמים



4. הגדרת 'הזמן האמתי' ו'הזמן האמצעי' ו'משוואת הזמן' באמצעות השמש האמתית והאמצעית,



זווית שעה של השמש: נמדדת בכיוון השעון, מן המצהר (=מרידיאן):

עד גוף השמש האמתית = TT = true time = זמן אמתי

עד גוף השמש האמצעית = TM = mean time = זמן אמצעי

משוואת הזמן = ET (Equation of Time) = $TT - TM$

5. 'משוואת (= השוואת) הזמן' וביטוי המתמטי, ואופן חישובה

- 'משוואת הזמן' ET היא הזמן שמוסיפים לזמן האמצעי המקומי שעל השעונים, הנעים בקצב אחיד (כגון השעונים המכניים והדיגיטליים המודרניים) כדי לקבל את הזמן המקומי האמתי (אלה שעל שעוני השמש).

(נמצאים אלמנאכים ישנים, בעיקר צרפתיים, המגדירים כמובא כאן את ET -).

- לדוגמה: אם השעון המודרני (המכויל להציג את הזמן המקומי) מראה שעה 11:47 בצהריים, ומשוואת הזמן היא +13 דקות, אז הזמן האמתי המקומי הוא חצות.

- הנוסחה לחישוב משוואת הזמן ET היא: (באסטרונומיה המודרנית מוסיפים אברים קטנים נוספים, בגלל תופעות שלא היו מוכרים לקדמונים, כגון תופעת האברציה, הקשורה למהירות האור, ועוד):

$$ET = L - \alpha + \text{constant}$$

= L = Sun's mean longitude on equator, אורך השמש האמצעית שעל המשווה

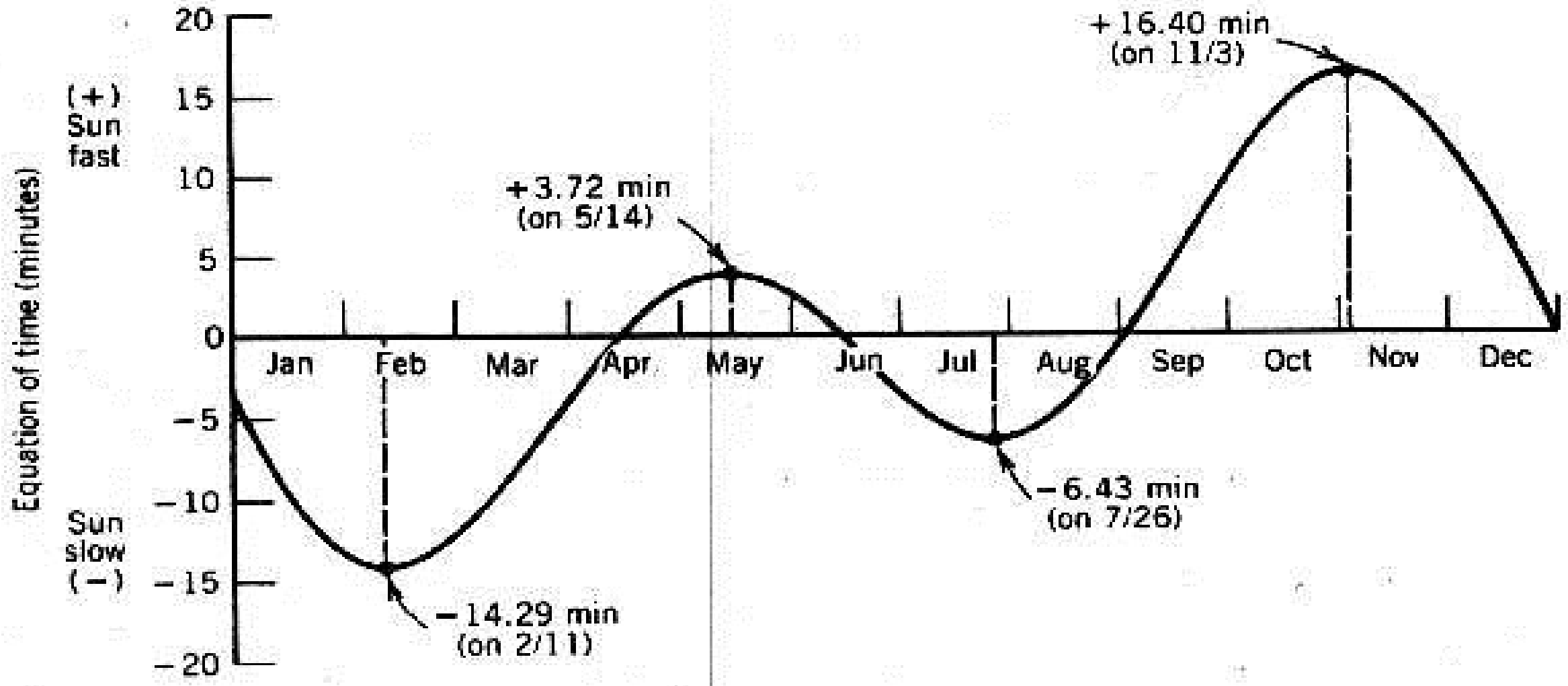
= α = right ascension of true sun. העלייה הישרה של השמש האמתית

הקדמונים כינו את משוואת הזמן לפעמים 'משוואת אורך היממה', כי באמצעותה תקנו את האורך המשתנה של היממה האמתית.

6. 'משוואת הזמן' המודרנית, וערכיו הקיצוניים

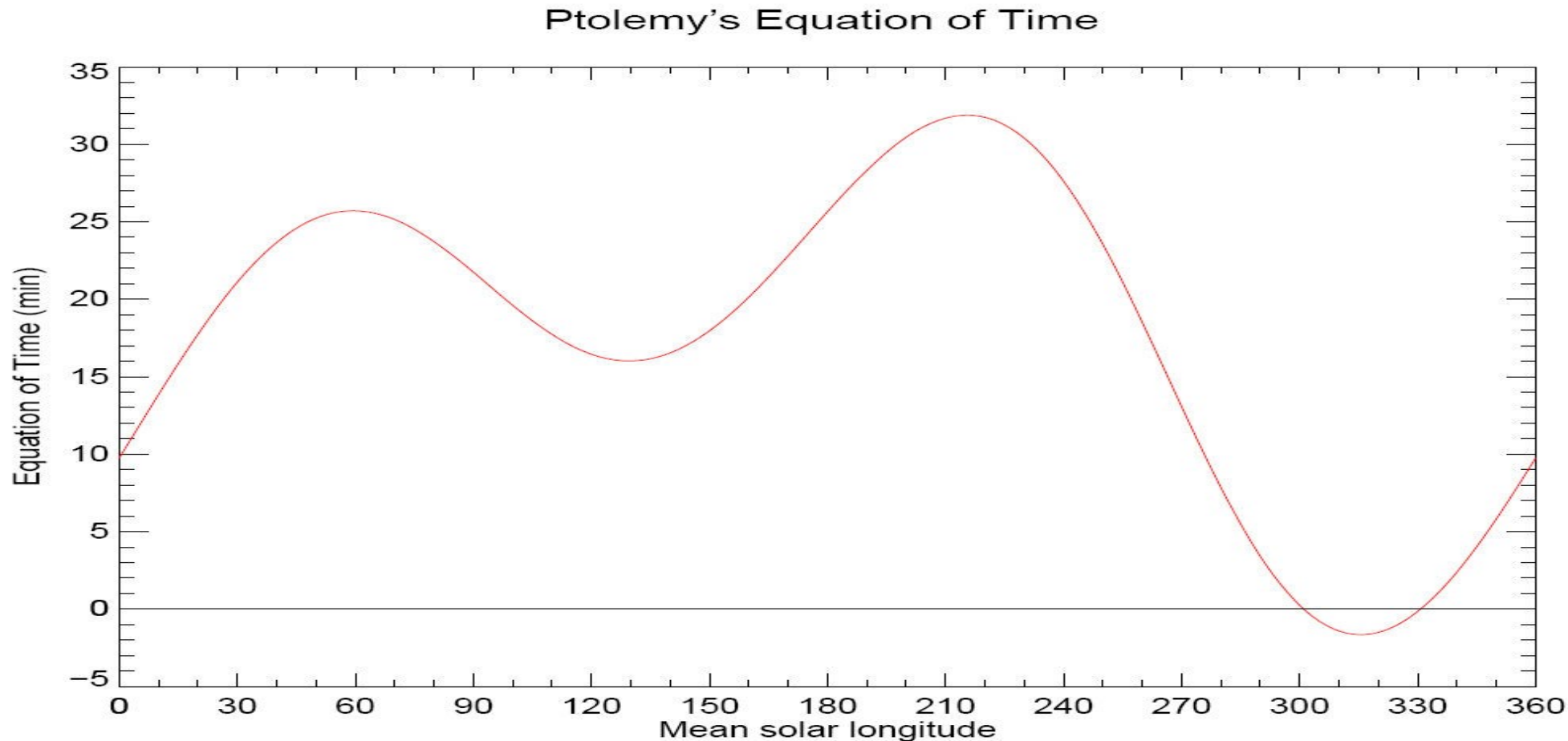
עקומת משוואת זמן המודרנית.

שיעור משוואת הזמן המודרנית הוא: עד ± 16 דקות.



7. 'משוואת הזמן' של תלמי על פי נתוני ספרו 'אלמגסט' וערכיו הקיצוניים

ערכי משוואת הזמן של תלמי באלמגסט הם תמיד חיוביים והם בשיעור 0 עד כ-33 דקות זמן, (פרט לערכים שליליים זניחים כשאורך המזדמנים כשאורך השמש האמצעי בין 300 ל-330). תמיד יש להוסיףם לזמן האמצעי כדי לקבל את הזמן האמתי. לחלופין - תמיד יש להוסיףם לזמן ה'עיקר' הנקוב ב-26 בפברואר שנה יוליאנית 746 - בתוספת ימים אמצעיים שלמים, כדי לקבל את הערכים האסטרונומיים בתאריך אחר של השנה.



8. לאילו מטרות חישוביות שמשה 'משוואת הזמן' את הקדמונים

1. הזמן בשימוש האזרחי היומיומי של הקדמונים היה **הזמן האמתי**, היינו זה שמוצג על שעוני השמש. רק במדע האסטרונומיה השתמשו בזמן האמצעי.

רק החל מהמאה ה-14 התחילו להשתמש בשעונים מכניים, שמהלכם קבוע בכל ימות השנה, היינו הם מציגים את הזמן האמצעי. אז התעוררה הבעיה להתמיר (= transform) את זמן האמצעי של השעון המכני לזמן האמתי שבשימוש האזרחי.

זה נעשה על ידי כיוון השעון המכני פעמים אחדות בשבוע לחצות היום האמתי, באמצעות לוח משוואת הזמן שליווה כל שעות מכני.

2. פעולה חישובית חשובה באמצעות משוואת הזמן הייתה קביעת נתוני הירח (שתנועתו מהירה ולכן יש להתחשב לגביו, גם בטווחי זמנים קצרים שמשכם כחצי שעה), כגון זמנו של המולד האמצעי בחודש כלשהו, מתוך נתוני המולד האמצעי בעונה אחרת של השנה. לגבי חישוב זה אינו מספיק להוסיף כפולות של החודש הירחי האמצעי בין שני המועדים, אלא יש להתחשב גם **במשוואת הזמן** בין שניהם, כדי להתחשב באורכם המשתנה של היממות האמתיות. זה מה שעשינו כשבדקנו את מציאתו של מולד הלוח העברי בתחילת תשרי (ספטמבר) בשנה 2 למניינו, מתוך המולד האמצעי של תלמי, שנקבע ב"עיקר" של האלמגסט, ב-26 בפברואר של שנת 746- למניין היוליאני, היא השנה 1 לנבונאסר, ביום 1 לחודש ת'ות' המצרי. כאן הוספנו לזמנו של מולד תלמי, 23 דקות בגין משוואת הזמן, כדי לקבל את המולד של הלוח העברי בתשרי.

9. שתי מהפכות במניית הזמן, הקשורות ב'משוואת הזמן': השעונים המכניים (מהמאה ה-14) והזמן האמצעי של פלמסטיד – Flamsteed (מהמאה ה-17)

הסברנו לעיל שהזמן בשימוש האזרחי היה עד סוף המאה ה-17 הזמן האמתי, שנמנה מחצות היום האמתי המקומי שבכל מקום. האלמנטים הקדומים מתקופה זו החל משנת נקבו בהתחלה את הנתונים האסטרונומיים לפי סולם הזמן האמתי. מסולם זה קבעו את שני סוגי הזמן האמצעי שנתאר להלן.

האסטרונום המלכותי הבריטי פלמסטיד Flamsteed הציע בשנת 1671 להנהיג את סולם הזמנים האמצעי הנהוג היום, בה משוואת הזמן מחושבת מהנוסחה:

$E = L - \alpha$, ובעיקרון זה סולם זמן שבתוקף עד היום הזה. משוואת הזמן המודרנית יכולה להיות חיובית או שלילית, כפי שהצגנו זאת לעיל:

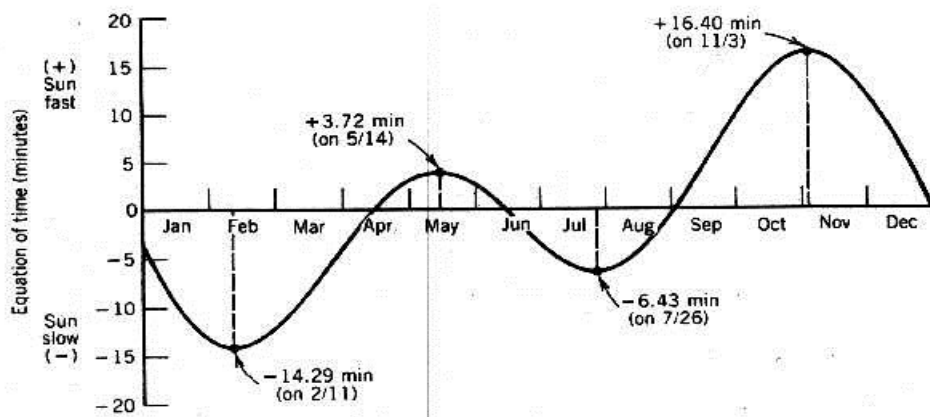
זה לקח כמאה שנה עד שהתחילו לכוון את השעונים

לפי שיטה חדשה זו בפועל. לפעמים טועים

ומייחסים את שעות המולד של הלוח העברי

כמבוטא בסולם זמן האמצעי המודרני של

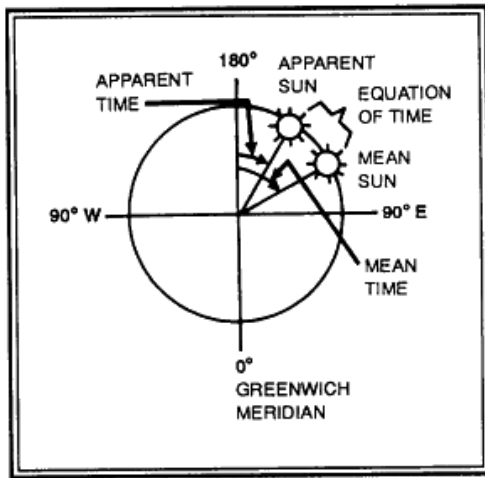
פלמסטיד ושוכחים שזה הונהג רק במאה ה-18.



10. שני סוגי סולם 'זמן אמצעי' של הקדמונים: זה שבאלמגסט (Almagest) וזה ב'לוחות על יד' (Handy Tables)

הסברנו לעיל שהזמן האמצעי הוא 'זווית השעה' של גוף שמימי דמיוני, שנע על משווה השמים, הנקרא 'שמש אמצעית'. יש אפשרויות שונות להריץ גוף דמיוני זה על המשווה, בייחס לשמש האמתית.

Figure 7-14. Mean and apparent solar time



• **סולם זמן האמצעי של האלמגסט של תלמי:** השמש האמצעית מתחילה לנוע על המשווה ממקום של השמש האמתית עליה, קרוב ל-26 בפברואר, בשנת 746- היוליאנית, בתאריך העיקר של האלמגסט. בתאריך זה משוואת הזמן = 0. זה היה סולם הזמן האמצעי גם של **אל-בתאני** ורוב האסטרונומים הקדמונים.

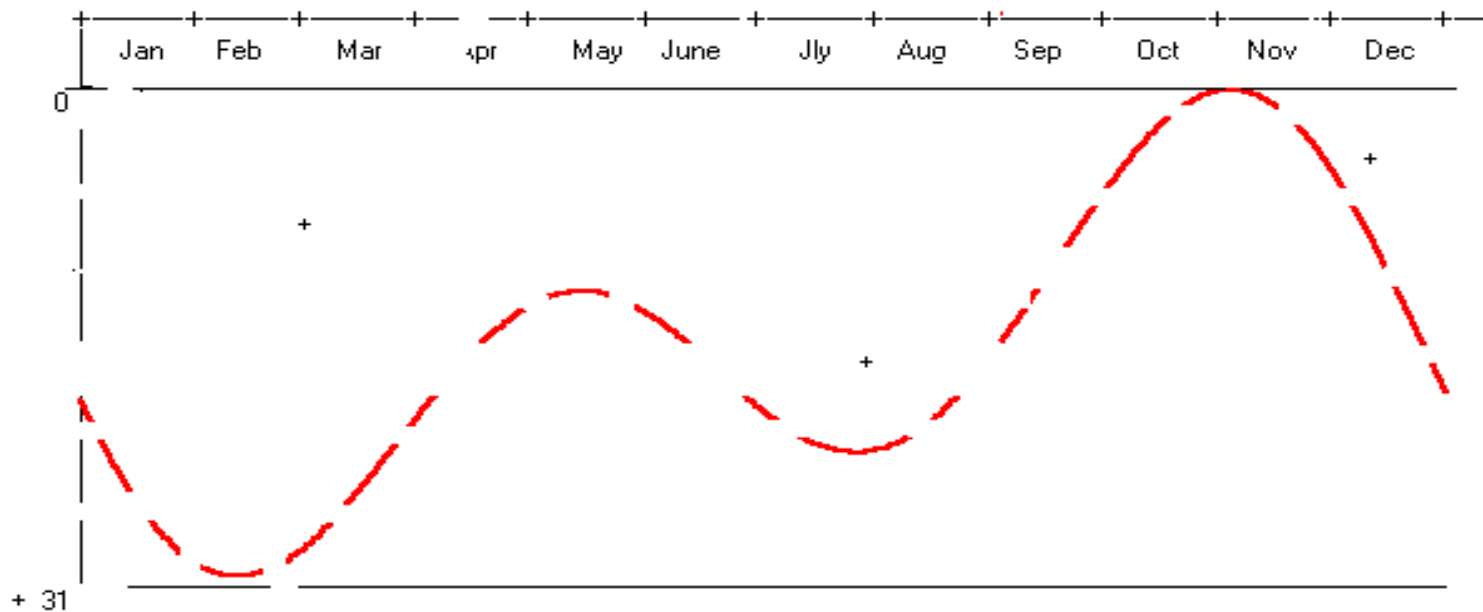
• **סולם זמן האמצעי של ה'לוחות על יד' של תלמי:** השמש האמצעית מתחילה לנוע על המשווה ממקום של השמש האמתית עליה, קרוב ל-12 בנובמבר בשנת 323-, תאריך העיקר של חיבור זה. בתאריך זה משוואת הזמן = 0.

שני סולמות זמן האמצעי היו בשימוש באסטרונומיה עד הנהגת שיטת פלמסטיד המודרנית לזמן האמצעי. שני סולמות הזמנים הנזכרים מגדרים בצורה שונה את עקומת משוואת הזמן.

11. מקום ציר ה-x בעקומת משוואת הזמן של הקדמונים, בשתי השיטות של הזמן האמצעי

1. לשיטת הזמן האמצעי של האלמגסט, המשיק התחתון בעקומה מהווה את ציר האיקס של עקומת משוואת הזמן. משוואת הזמן תהיה במשך כל השנה תוספת חיובית לזמן האמצעי לקבלת הזמן האמתי.

2. לשיטת הזמן האמצעי של ה'לוחות על יד', המשיק העליון מהווה את ציר ה של עקומת משוואת הזמן. משוואת הזמן תהיה במשך כל השנה תוספת שלילית לזמן האמצעי לקבלת הזמן האמתי.



12. סולם הזמן הממוצע של הלוח העברי

מתעוררת השאלה: באיזה סולם זמנים מבוטאים השעות והחלקים של הלוח העברי?

אין ספק שהם אינם מבוטאים בסולם זמן האמצעי המודרני, שהומצא בידי פלמסדיט רק בשנת 1671, זמן רב אחרי שפעלו חכמי העיבור. כשנקוב שהמולד בשעה פלונית, זו בוודאי אינה שעה זאת על שעוננו, גם אם מתחשבים בהפרש בין הזמן המקומי בירושלים לבין הזמן האזורי זמן גריניץ $+ 2$ שעות הנהוג בזמננו.

איידלר בדעה שמסתבר שהשעות והחלקים של לוחנו מבוטאים לפי סולם הזמנים של האלמגסט (משוואת זמן 0 ב-26 בפברואר של שנת -746), כי זה היה נפוץ בזמן חכמי העיבור ומקור המולד של הלוח העברי עצמו הוא זה של האלמגסט.

דעתי היא ששעות לוחנו מבוטאות בסולם זמנים ייחודי של הלוח, לפיו היום האמצעי מתחיל ב-12 בצהריים האמתיים בירושלים, (ושעות והחלקים שווים מנויים מזמן זה), מיום המולד וי"ד של שנה 2 למניינו. כי, וי"ד עצמו נקבע כנראה ממולד תלמי בתוספת משוואת הזמן (23 דקות) בין 'עיקר' האלמגסט בפברואר, למולד וי"ד בספטמבר. אין אפשרות חד-משמעית להמיר את שעות מולדות הלוח לסולם הזמן המודרני.

13. מקורות

מאמרו הנחשוני של א' רום Rome, 1939 בנידון, בצרפתית:
(לא ראיתי תרגום אנגלי):

- ***Le Problème de l'équation du temps chez Ptolémée.***

[*Rome, Adolphe*](#); Louvain : Société scientifique de Bruxelles,
1939. Extr. de : Annales de la Société scientifique de
Bruxelles, 1939, t. 59, série I, pp. 211-224.

מאמר י"י איידלר, באנגלית, כתב עת בד"ד 16, 2005,

- [*Ajdler, J. Jean. The equation of time in ancient Jewish astronomy.*](#) BDD - Bekhol Derakhekha Daehu 16 (2005) 5-56.