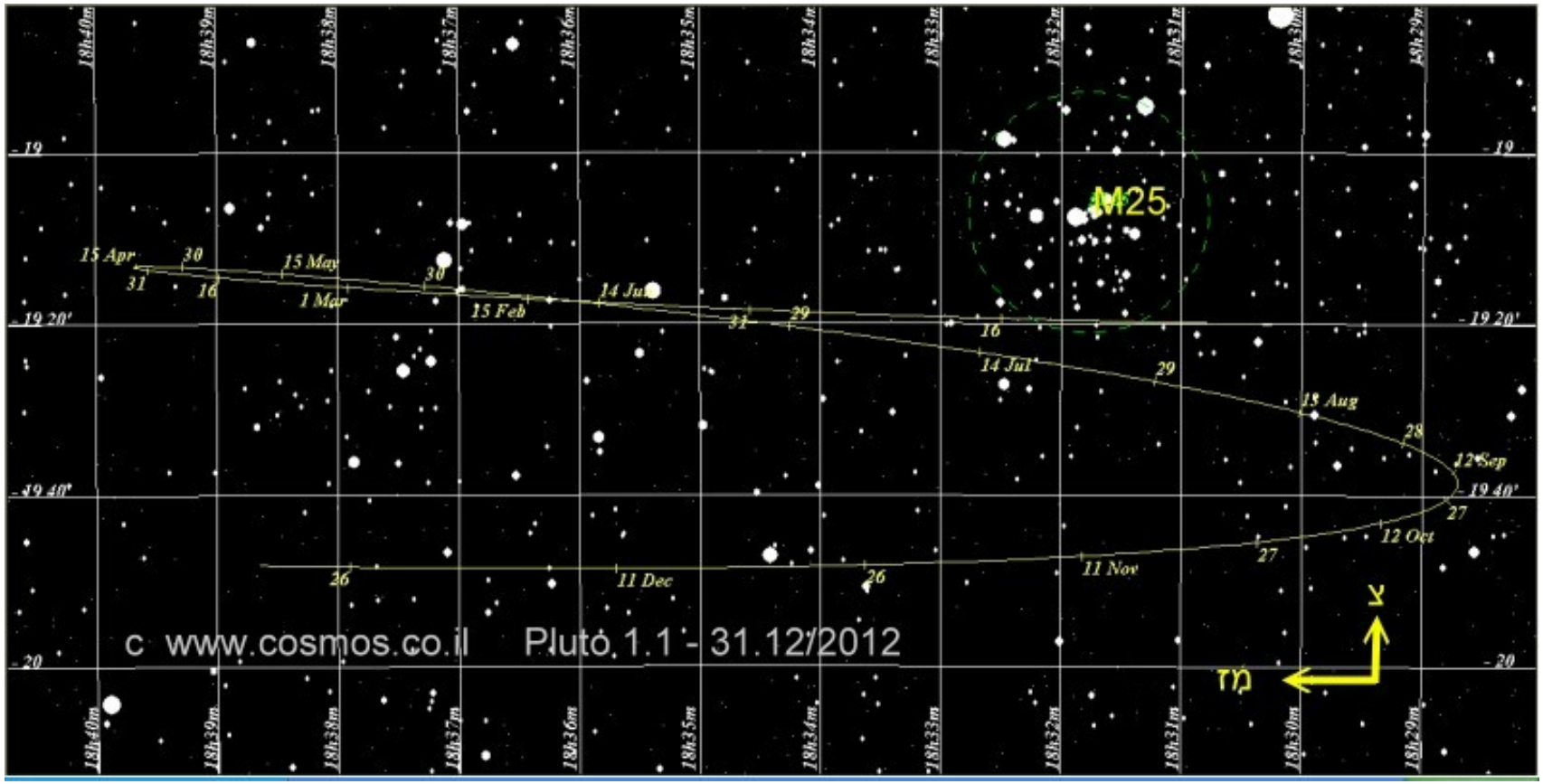
תנועת כוכבי הלכת על כיפת השמים

תנועת כוכבי הלכת בשמים נובעת משלוש סיבות:
סיבוב כדור הארץ סביב צירו (תנועה יומית)
הקפת כדור הארץ את השמש
הקפת כוכבי הלכת את השמש

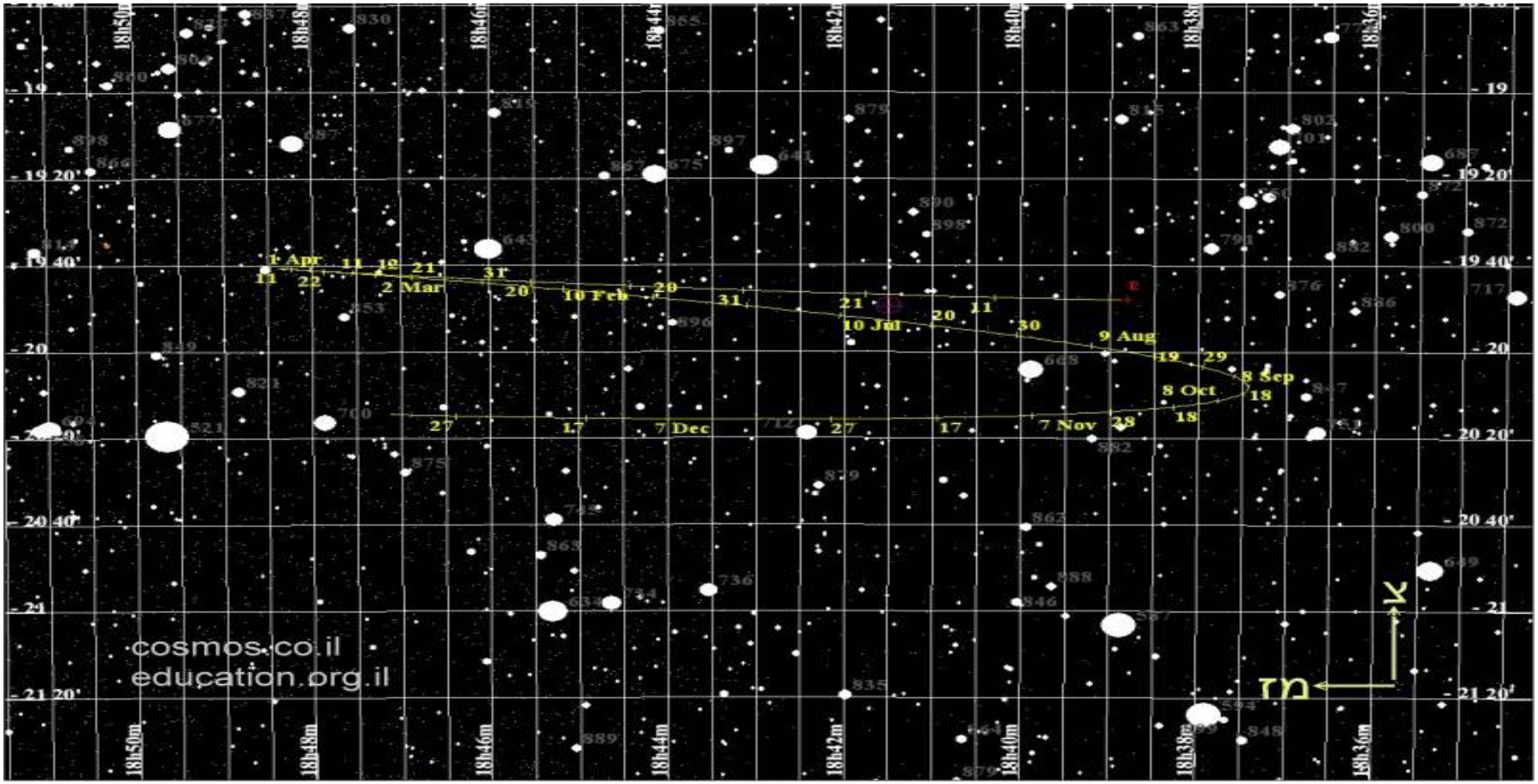
תנועה קדומנית

מוגדרת כתנועה של כוכב הלכת ממערב למזרח ביחס לכוכבי השבת

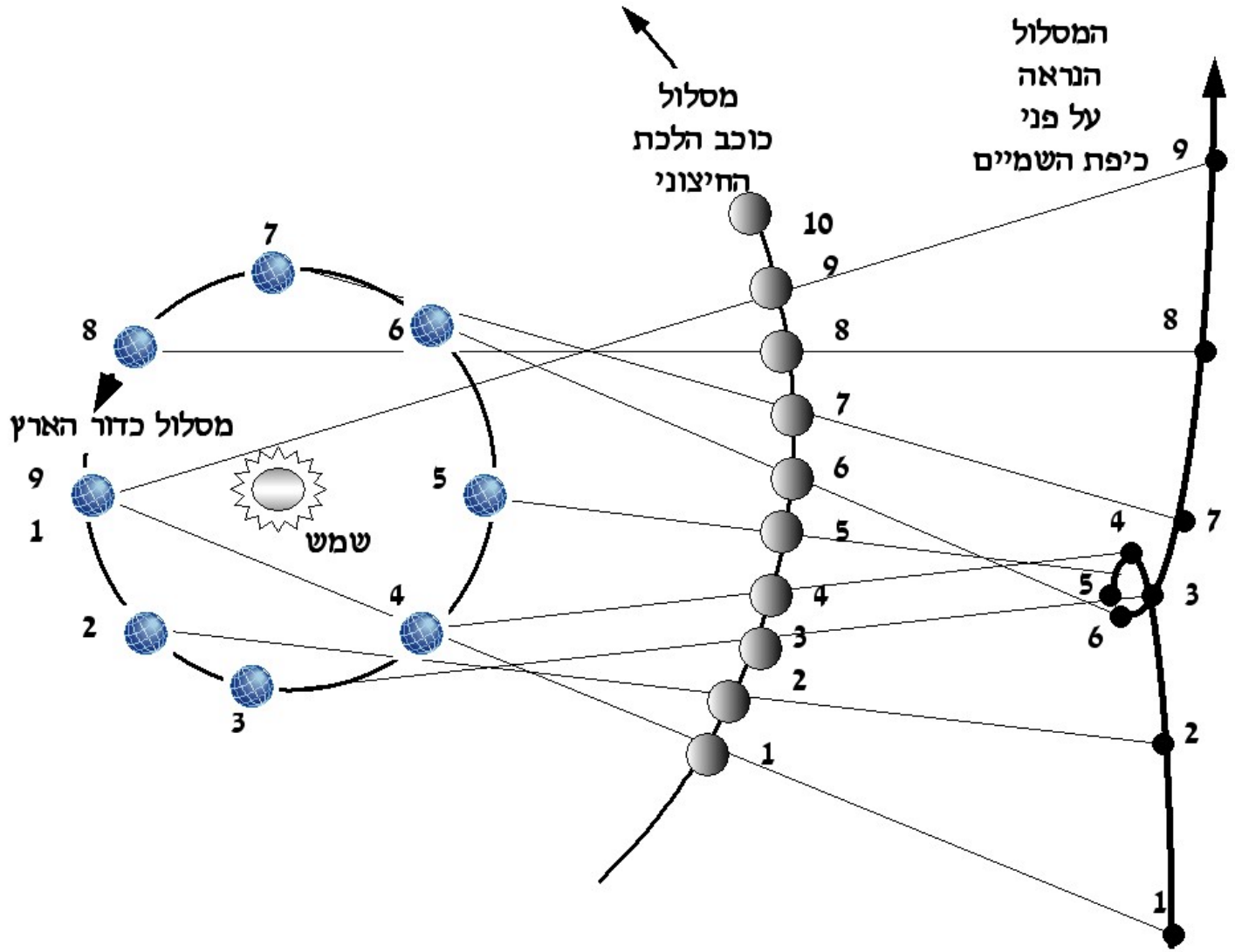


תנועה אחורנית

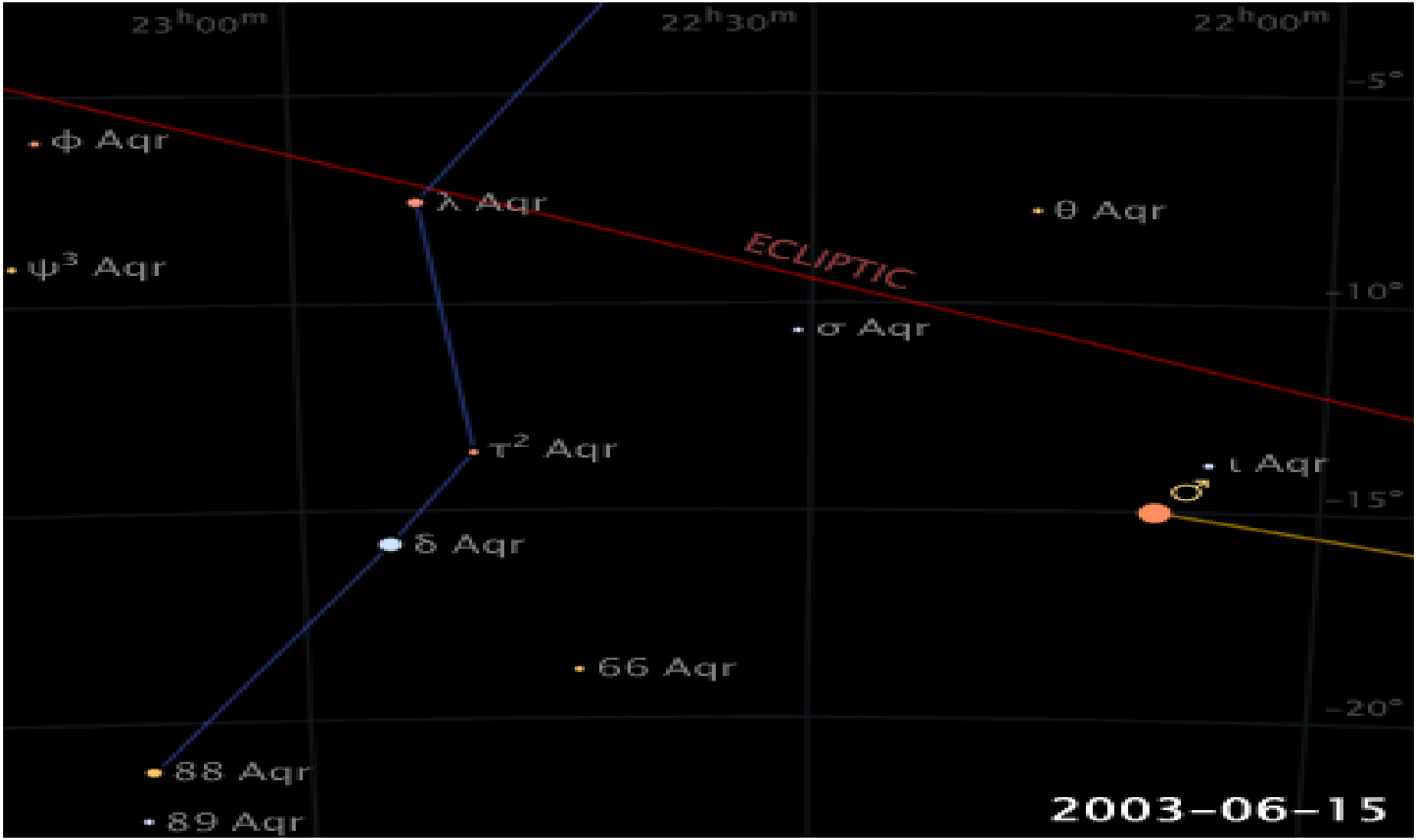
מוגדרת כתנועה ממזרח למערב ביחס לכוכבי השבת



תנועה קדומנית ואחורנית



תנועה אחורנית



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Apparent_retrograde_motion_of_Mars_in_2003.gif •

עמידה

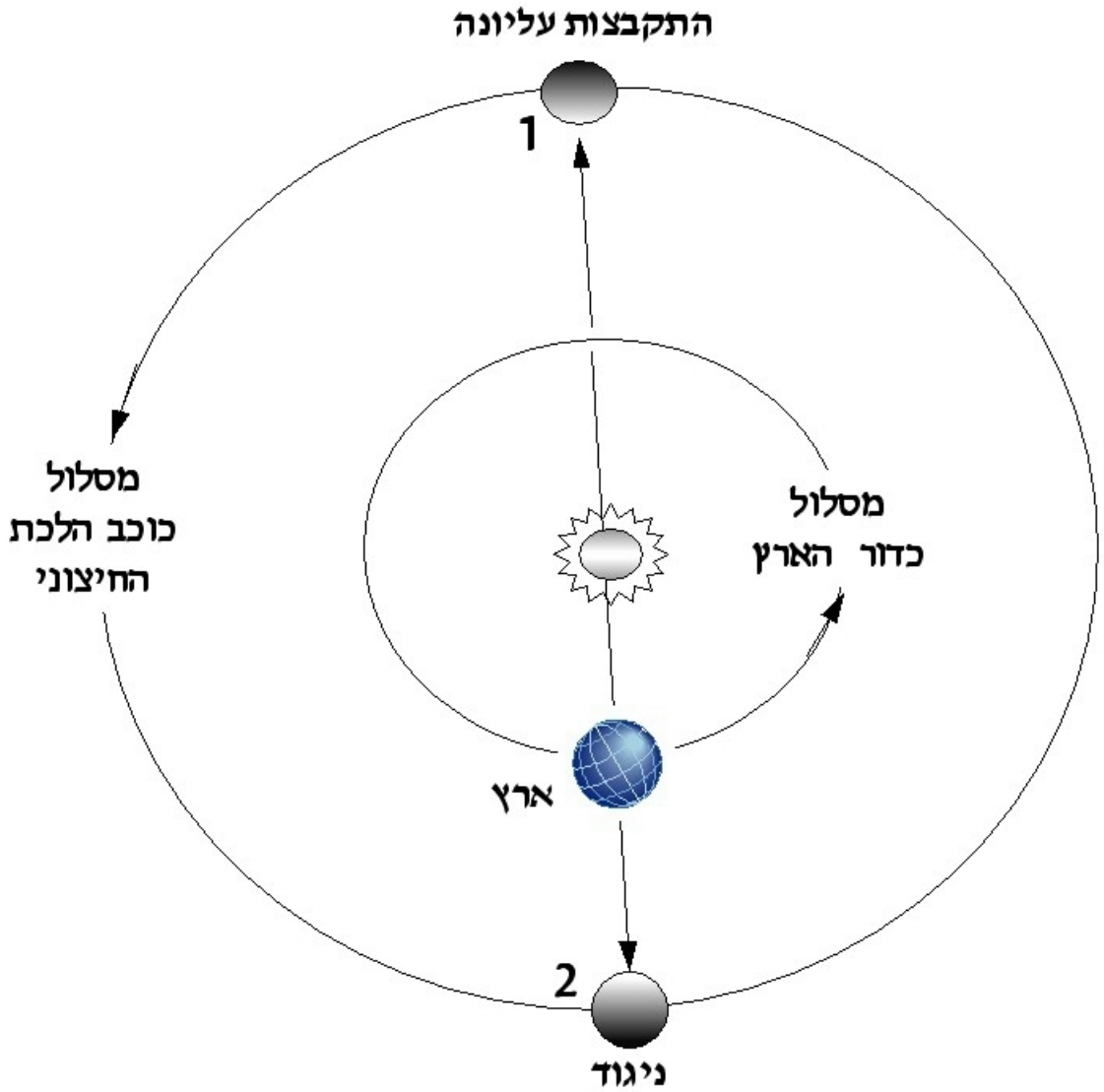
מצב שבו כוכב הלכת מצוי בין תנועה קדומנית לאחורנית ולהיפך

אלונגציה

ההפרש בין העלייה הישרה של שני גופים. בדרך כלל, נמדד מהשמש

האלונגציה המירבית היא 180 מעלות, אפשרית רק לכוכבי לכת חיצוניים

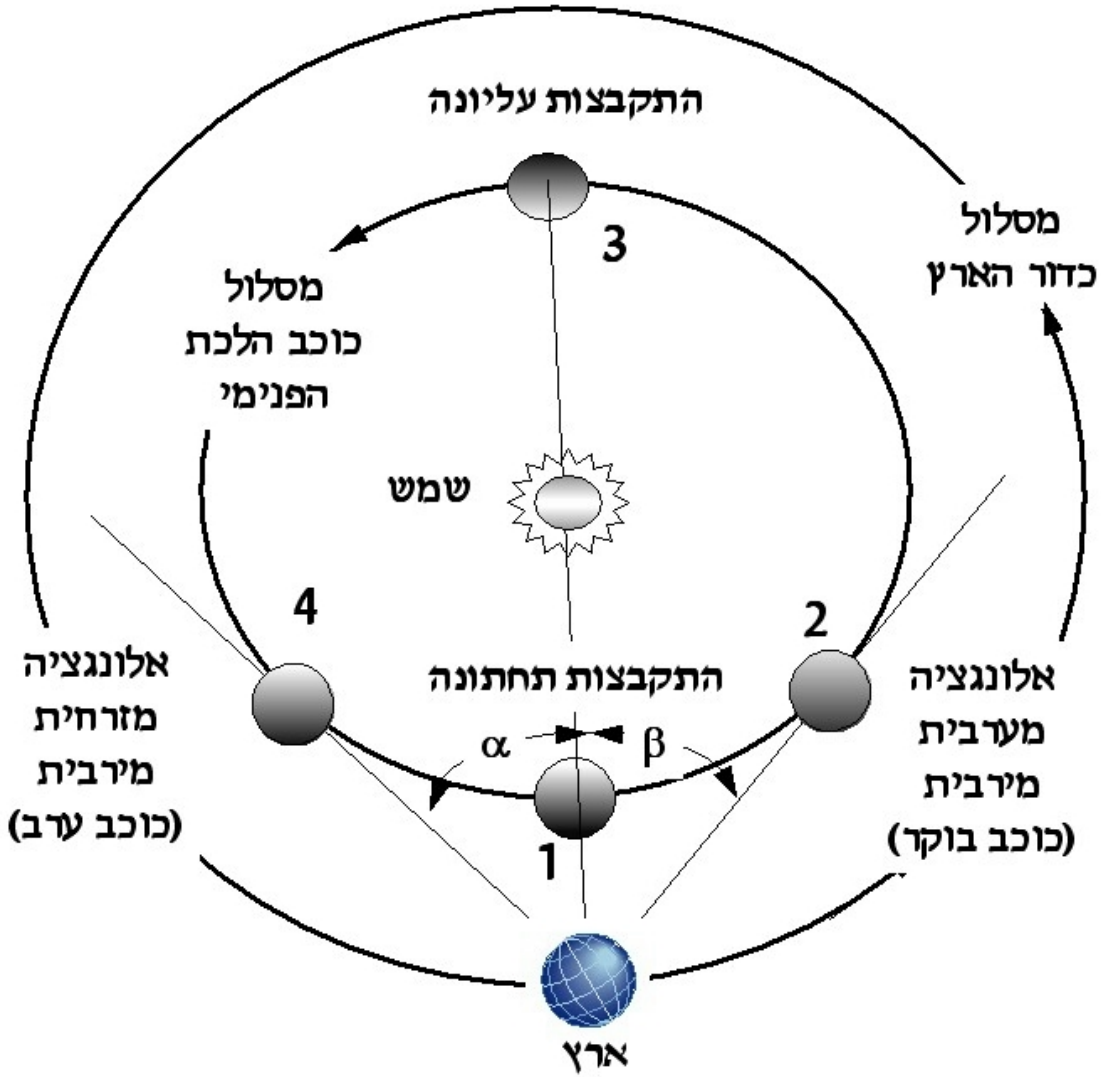
אלונגציה של כוכבי לכת חיצוניים



- יכולה לקבל כל ערך, אבל נהוג לציין את האלונגציה מ-0 עד 180 -/+ מעלות מהשמש

אלונגציה של כוכבי לכת פנימיים

האלונגציה מוגבלת לגודל
הזוויתי בו רואים את
המסלול של כוכבי הלכת



ניגודים

- כאשר כוכב הלכת, כדור הארץ והשמש מצויים בקו אחד וכדור הארץ
- באמצע
- נכון רק לגבי כוכבי הלכת החיצוניים
- ניגוד חל כאשר ההפרש בין העלייה הישרה של כוכב הלכת והשמש הוא 12h

התקבצויות

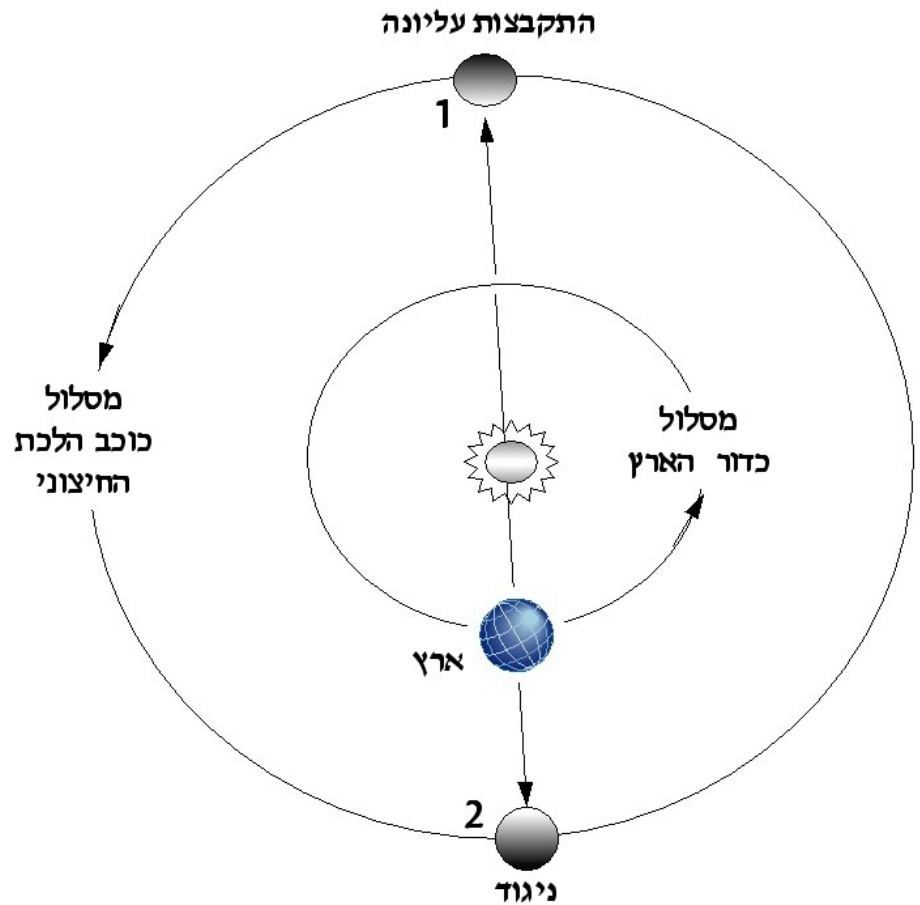
התקבצויות בין שני גרמי שמים מוגדרת כאשר לשניהם אותה עלייה ישרה
התקבצויות יכולות להיות בין:

- גופים במערכת השמש לבין עצמם
- גופים במערכת השמש לבין כוכבי שבת או גרמי שמים מחוץ למערכת השמש

לעתים מוגדרת ההתקבצות גם כאשר המרחק הזוויתי בין שני הגופים הוא מינימלי

כאשר המרחק בין מרכזי הגופים קטן מרדיוס הגוף הקרוב אלינו - התכסות

התקבצויות כוכבי הלכת עם השמש



התקבצות – כאשר לכוכב הלכת והשמש אותו קו רוחב

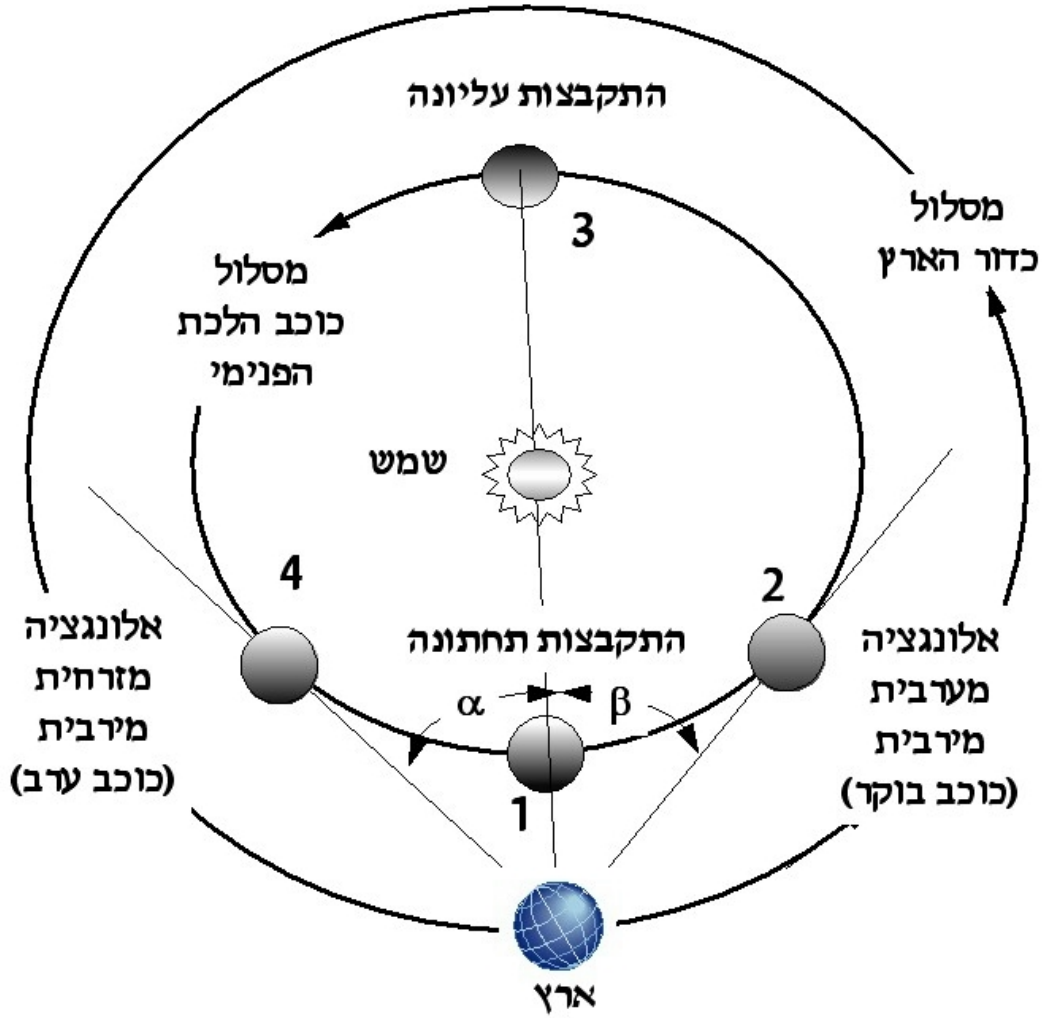
כאשר השמש קרובה יותר אלינו: התקבצות עליונה

במקרה של כוכבי לכת חיצוניים אפשרית רק התקבצות עליונה

כאשר השמש רחוקה יותר מאיתנו זו התקבצות תחתונה.

התקבצות תחתונה אפשרית לכל כוכבי הלכת

התקבצויות כוכבי הלכת הפנימיים עם השמש



כאשר השמש רחוקה יותר:
התקבצות תחתונה

כאשר השמש קרובה יותר:
התקבצות עליונה

התכסויות

- התכסויות הן כאשר גוף אחד מכסה גוף שני. ההתכסות מתרחשת כאשר המרחק הזוויתי בין שני מרכזי גופים קטן מרדיוס הגוף הקרוב יותר. החישוב נעשה עבור התקבצות גיאוצנטריות כאשר תיקון הפרלקסה הטופוצנטרית יראה אם תחול התקבצות עבור צופה לאחר התיקון הפרלקסה.

סוגי התקבצויות

- יש כמה סוגי התכסויות. מטבע הדברים, הגוף המכסה הוא הקרוב יותר. יש כמה סוגי התכסויות:

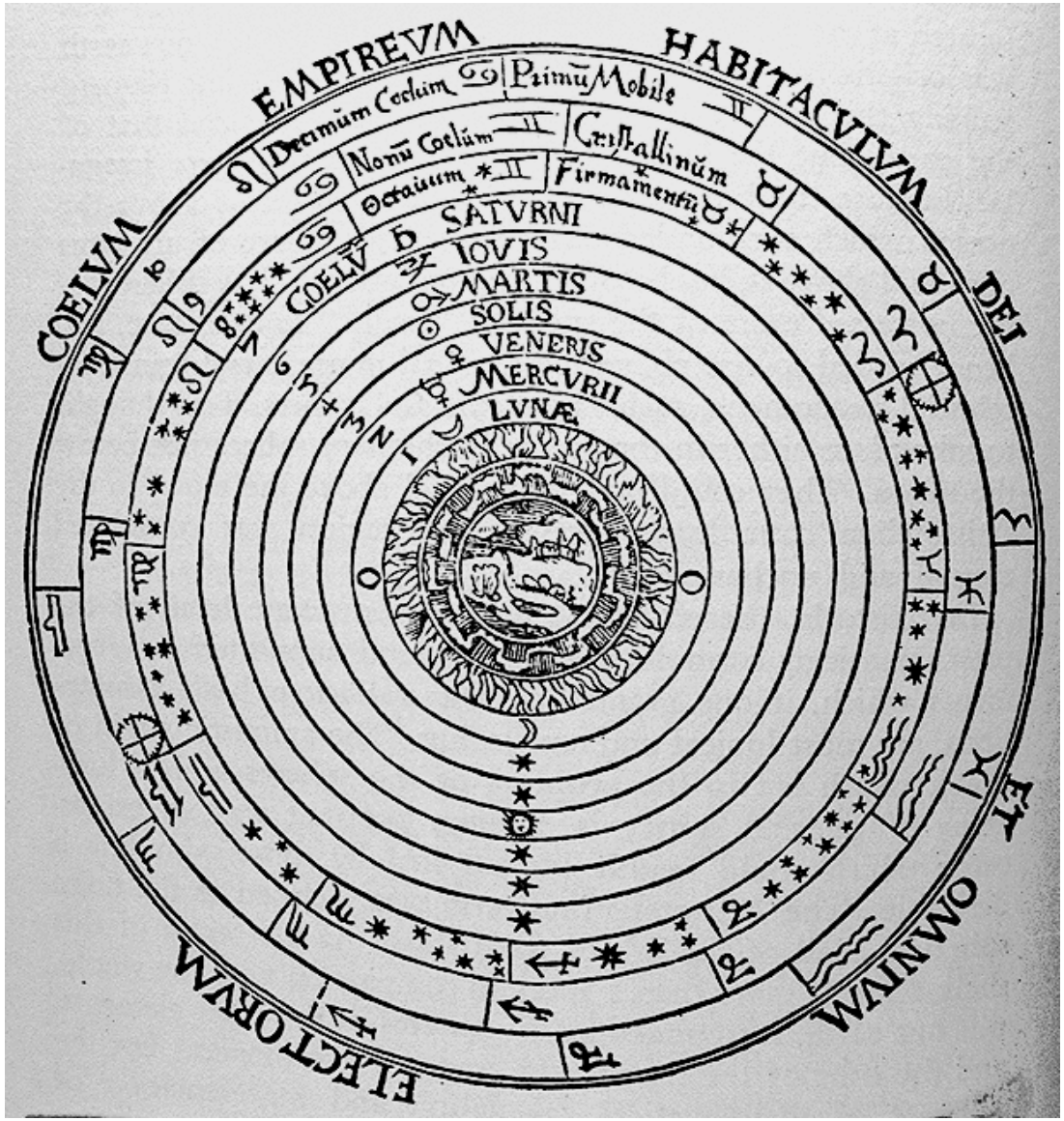
כאשר הירח הוא הגוף המכסה
- ליקוי חמה – הירח מכסה את השמש
- התכסויות כוכבי לכת וירחיהם בירח
- התכסויות אסטרואידים בירח
- התכסויות כוכבים בירח

כאשר כוכבי הלכת וירחיהם הם הגוף המכסה
- התכסויות כוכבים בכוכבי הלכת וירחיהם
- התכסויות של כוכבי לכת בירחיהם (מעבר)
- התכסויות של ירחי כוכבי לכת בכוכבי הלכת
- התכסויות השמש בכוכבי לכת (מעברים של נוגה וכוכב חמה)

כאשר אסטרואידים הם הגוף המכסה
- התכסויות כוכבים באסטרואידים
- התכסויות כוכבי לכת, ירחים או אסטרואידים באסטרואידים (נדיר ביותר)

תלמי 90 -168 AD

המערכת הגיאוצנטרית



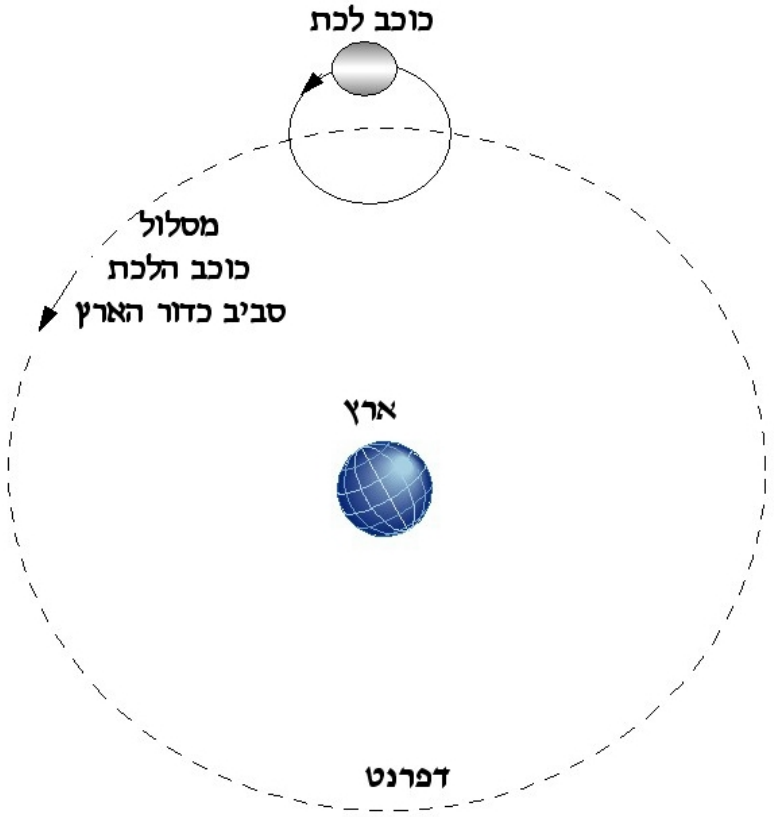
גיאו – ארץ

צנטר – מרכז

המערכת הגיאוצנטרית היא מערכת לפיה כדור הארץ מצוי במרכז היקום. פותחה על ידי פילוסופים יוונים כאפלטון, אך הגיעה לשכלול בימי תלמי במאה ה-2 לספירה

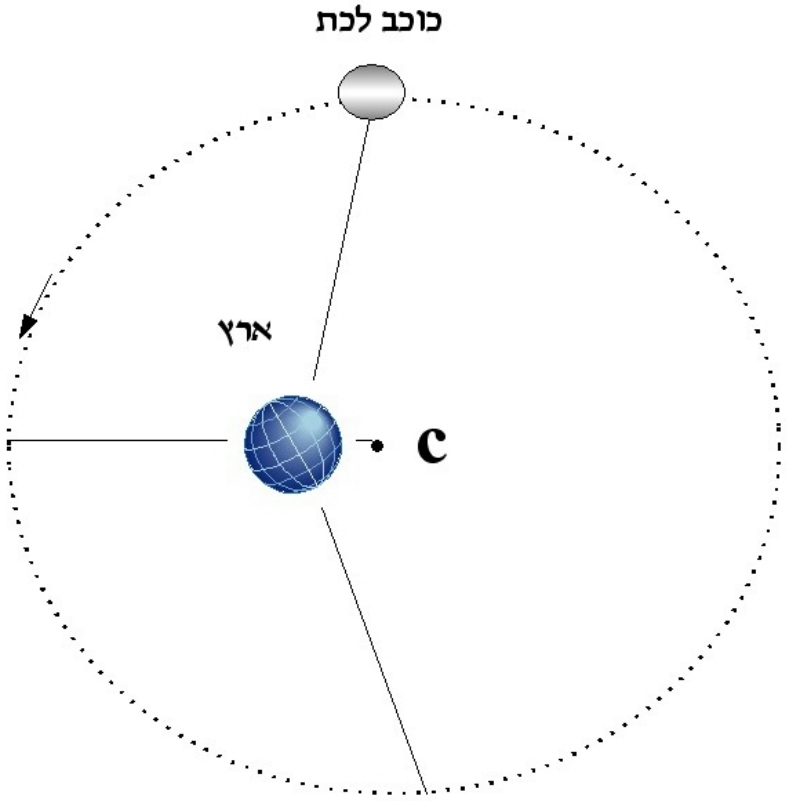
המערכת האפיציקלית

- נועדה להסביר: מדוע כוכבי לכת לעתים בהירים יותר ולעתים פחות.
- לפי המערכת האפיציקלואידית, כוכבי הלכת נעים סביב כדור הארץ כאשר מרכזם חג על מעגל הסב סביב כדור הארץ (דפרנט)



המערכת של תלמי - אקסצנטר

האקסצנטר נועד להתמודד עם העובדה שמסלולי כוכבי הלכת הם אליפטיים ולא סימטריים. לכן, הדפרנט לא סב סביב כדור הארץ, אלא כדור הארץ מצוי במרחק קטן ממרכז הדפרנט, C



חוקי קפלר

חוקי קפלר הגדירו באופן מתמטי את תנועתם של כוכבי הלכת סביב השמש. קפלר ניסח בתחילת המאה ה-17 3 חוקים ואלה הם:

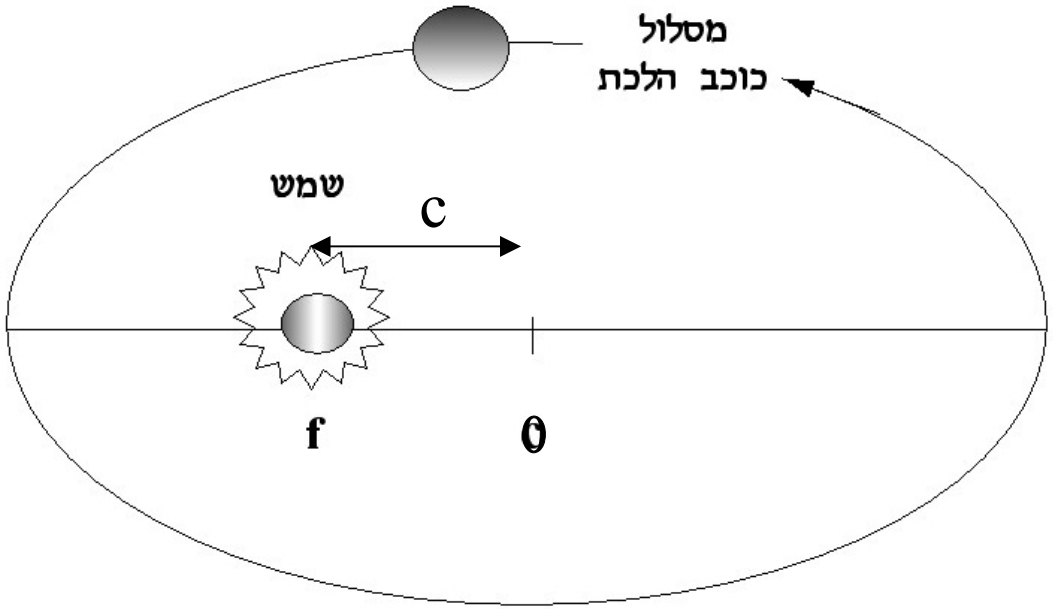
1. כוכבי הלכת נעים במסלולים אליפטיים שהשמש מצויה אחד ממוקדיהם.
2. הרדיוס - וקטור (הקו המחבר את כוכב הלכת לשמש), נע באופן כזה, שהוא חולף בזמנים שווים על פני שטחים שווים.
3. ריבועי הזמנים בהם מקיפים כוכבי הלכת סביב השמש הם מתכונתיים למעוקבים של מרחקם הממוצע מהשמש

החוק הראשון

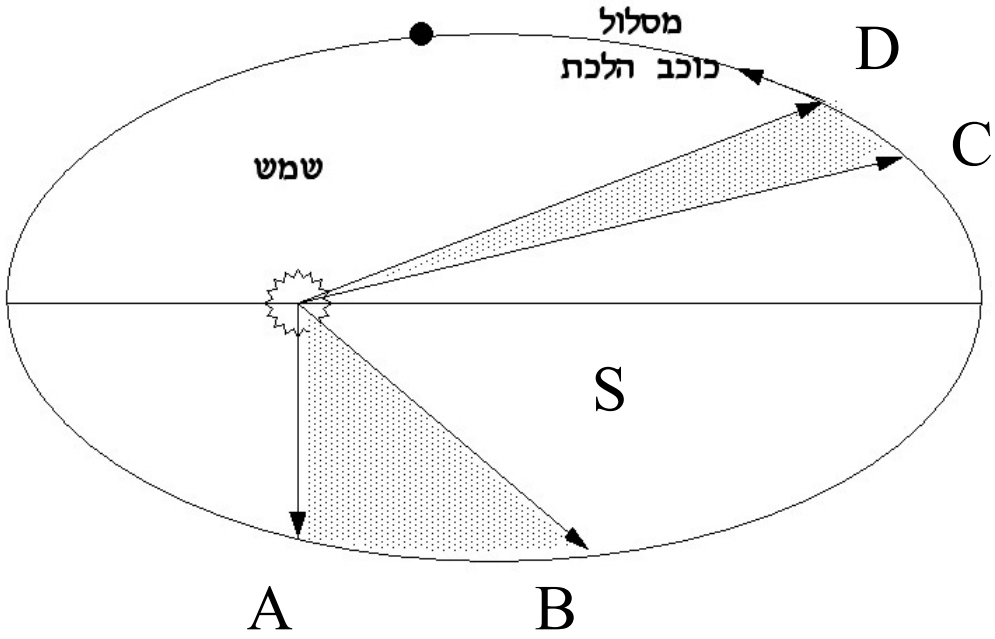
כוכבי הלכת סבים במסלול אליפטי כאשר השמש מצויה באחד המוקדים

האקסצנטריות של האליפסה e

מחצית הציר הארוך של האליפסה = α



החוק השני



- ניקח שתי נקודות, A, B על מסלול כוכב הלכת
- ושתי נקודות נוספות, C ו-D על מסלולו
- נניח שפרק הזמן שהכוכב נע מנקודה A ל-B
- זהה לפרק הזמן שבו הוא נע מ-C ל-D, כך ש:

$$\Delta t_{A-B} = \Delta t_{C-D}$$

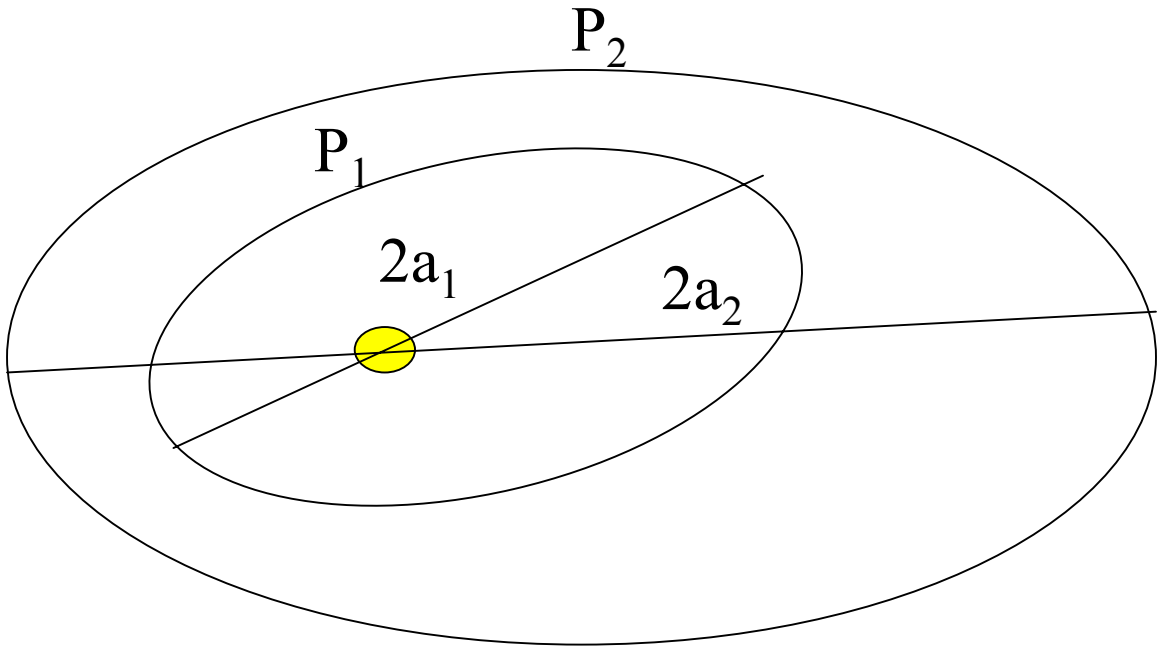
- אזי, השטחים הנוצרים בין כל צמד הנקודות ומהשמש שווה:

$$A_{ASB} = A_{CSD}$$

החוק השלישי

- יש יחס בין מרחק כוכב הלכת מהשמש, a לפרק הזמן שבו הוא מקיף אותו, P, כך שאם יש לנו 2 כוכבי לכת, יתקיים:

$$\frac{P_1^2}{a_1^3} = \frac{P_2^2}{a_2^3}$$



ניסוח החוק השלישי

יהי:

P = זמן המחזור שהגוף משלים הקפה סביב השמש.

a = מחצית הציר הארוך של האליפסה בה הגוף מקיף את השמש.

G = קבוע הכבידה העולמי.

Mo = מסת השמש.

Mp = מסת כוכב הלכת או גרם השמים המקיף את השמש.

$$P^2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot a^3}{G\left(M_0 + M_p\right)}$$

החוק השלישי של קפלר מקרה כללי

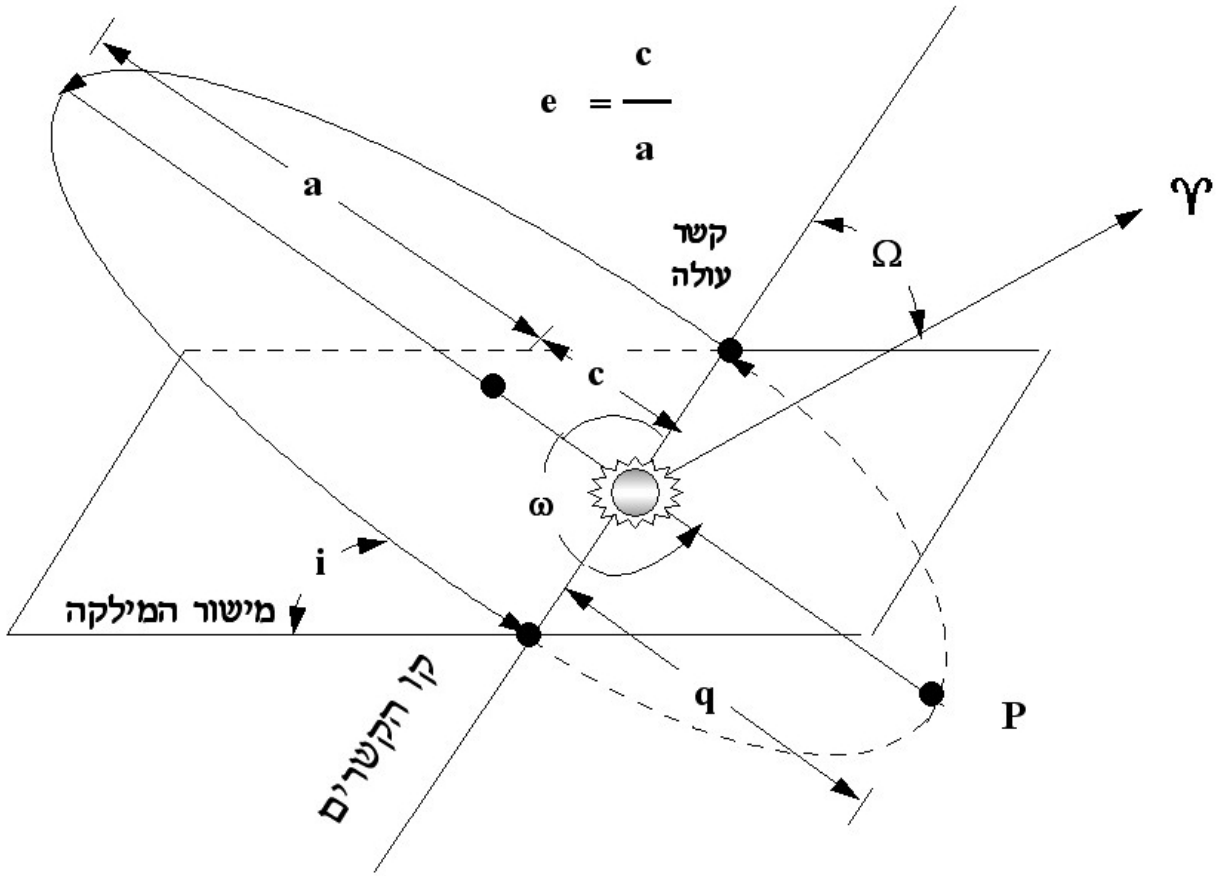
בהינתן
a נמדד ביחידות אסטרונומיות
P נמדד בשנים
M0 = יחידה
Mp<<M0

$$P^2 = \frac{a^3}{M_0 + M_p}$$

$$P^2 = a^3$$

אלמנטים של מסלול

- מגדירים את מישור גרם השמים סביב השמש וביחס לכיפת השמים כפי שנראית מכדור הארץ

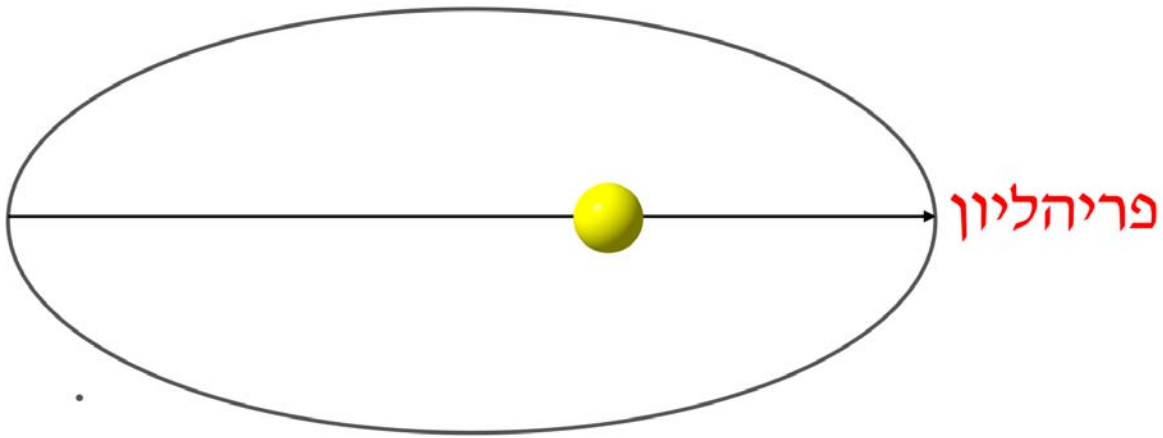


אלמנטים של מסלול

פריאפסיס	(periapsis) - נקודה במסלול ההקפה של גוף מסוים סביב גוף שני, שבה המרחק בין שני הגופים הוא הקטן ביותר. (במקרה בו גרם השמים מקיף את השמש, נקודת הפריאפסיס מכונה - פריהליון)
אפאפסיס	(apapsis) - נקודה במסלול ההקפה של גוף מסוים סביב גוף שני, שבה המרחק בין שני הגופים הוא הגדול ביותר. (במקרה בו גרם השמים מקיף את השמש, נקודת האפאפסיס מכונה - אפהליון).
קו האפסידים	(line of apsides) - הקו המחבר את נקודות הפריאפסיס והאפאפסיס נקרא - קו האפסידים. (נתקלנו בו בפרק הדן בתנועות הירח).
P	- פרק הזמן שבו משלים גרם השמים הקפה שלמה סביב השמש. נמדד ביחידות של יום (24 שעות) או שנה ארצית בת 365.25 ימים.
e	- אקסצנטריות האליפסה שבה סובב גרם השמים סביב השמש.
a	- אורך מחצית הציר הארוך של האליפסה, שבה נע גרם השמים סביב השמש (נמדד ביחידות אסטרונומיות).
q	- המרחק בין גרם השמים לשמש בעת הפריהליון (נמדד ביחידות אסטרונומיות).
i	(inclination) - נטיית מישור הסיבוב של גרם השמים סביב השמש. הנטייה נמדדת יחסית למישור המילקה במעלות קשת.
Ω	קו האורך של הקשר העולה (longitude of the ascending node) - הזווית (במעלות קשת), הנמדדת בין נקודת שוויון האביב, לבין הקשר העולה של גרם השמים (הנקודה בו הוא חוצה את מישור המילקה לכיוון צפון). הזווית נמדדת לכיוון מזרח מנקודת השוויון.
ω	הנתון של הפריהליון (argument of perihelion) - הזווית (במעלות קשת), הנמדדת בין הקשר העולה לנקודת הפריהליון, לכיוון מזרח.
T	- נקודת הזמן שבו מגיע גרם השמים לנקודת הפריהליון במסלולו (מבוטאת בדרך כלל בתאריך יוליאני או בתאריך אזרחי).

אנומליה

הזווית שעבר גוף המקיף גוף אחר מנקודת הפריהליון של מסלולו



אנומליה אמיתית

לשם הדיון, נניח מקרה פרטי של סיבוב של גוף בעל מסה זניחה סביב השמש

הזווית v שיצרה תנועתו של הגוף הנע סביב השמש במסלול אליפטי שהשמש מצויה באחד ממוקדי האליפסה, כאשר הבסיס הוא הקו בין השמש לבין נקודת הפריהליון והזווית נוצרת על ידי הרדיוס וקטור המחבר בין השמש לגוף

אנומליה אקסצנטרית

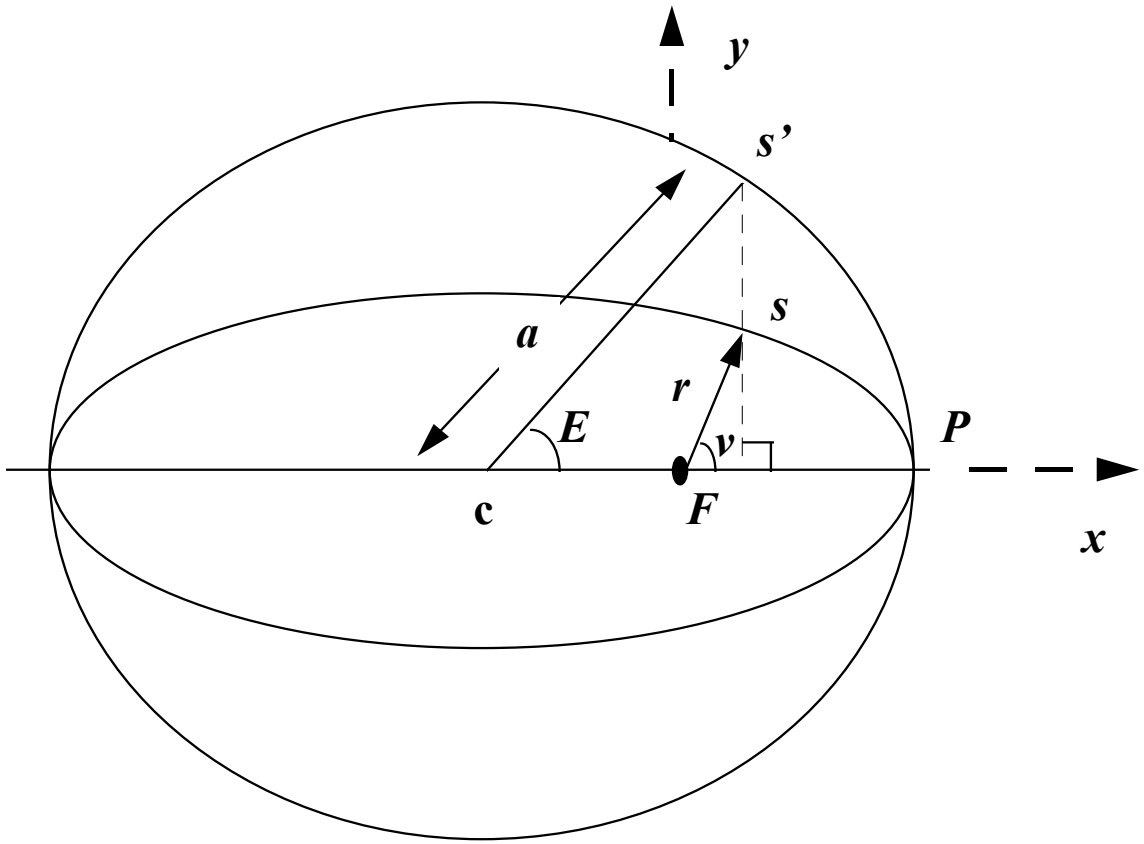
נניח גוף היפותטי הנע סביב השמש במסלול מעגלי, שרדיוסו שווה למחצית
הציר הארוך של האליפסה שבה נע גוף סביב השמש במסלול אליפטי

האנומליה האקסצנטרית E היא הזווית שעבר גוף היפותטי הנע במסלול מעגלי סביב השמש, כאשר השמש מצויה במרכז הציר הארוך של האליפסה והזווית נוצרת בין מרכז המעגל, לנקודת הפריהליון באותו הזמן שהגוף הקפלריאני עבר אנומליה v. הרדיוס וקטור הוא הקו העובר בין השמש לנקודה על המעגל המצויה בהמשך לנורמל לציר הארוך העובר בנקודה בה מצוי הגוף הנע במסלול אליפטי באותו פרק זמן

אנומליה ממוצעת

אנומליה ממוצעת, M, היא המהירות הזויתית הממוצעת בה נע גוף במסלול אליפטי סביב השמש המצויה באחד ממוקדיו ונמדדת מנקודת הפריהליון של מסלול

תאור מתמטי של האנומליה



יהי:

M = *אנומליה ממוצעת.*

E = *האנומליה האקסצנטרית*

e = *אקסצנטריות האליפסה.*

כאשר:

$$CF = ae$$

$$E - e \cdot \sin E = M$$

נמדד ברדיאנים!

משוואת המרכז

משוואת המרכז מבטאת את ההפרש בין האנומליה האמיתית, של גוף הנע במסלול אליפטי, לבין האנומליה הממוצעת שלו

במערכת צירים x ו- y שראשיתה במוקד F
כאשר $\boldsymbol{a}$= מחצית הציר הארוך של האליפסה.

$$x = a(\cos E - e)$$

$$y = a \cdot \sin E\sqrt{1 - e^2}$$

יהיה הקטע FP, רדיוס וקטור r בכל רגע ורגע

$$r = a(1 - e \cdot \cos E)$$

זמן מחזור סינודי של כוכב לכת

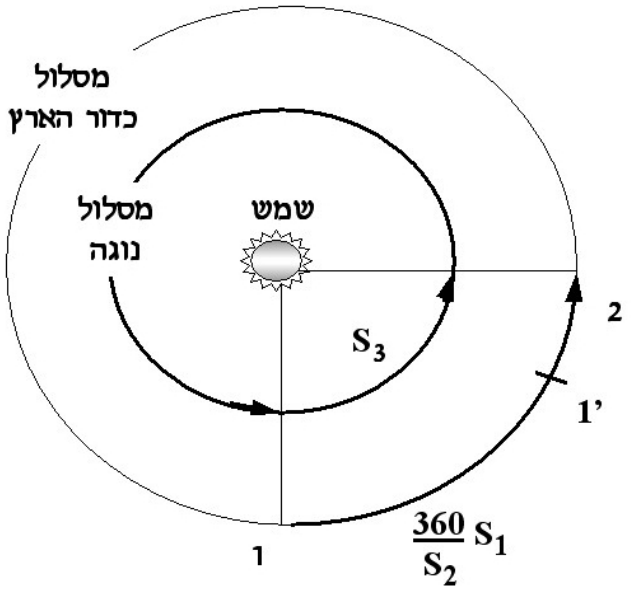
פרק הזמן בין שני התקבצויות עליונות או התקבצויות תחתונות עוקבות של כוכב לכת

תלוי ב:

זמן המחזור של כדור הארץ סביב השמש

זמן המחזור של כוכב הלכת סביב השמש

מחזור סינודי של כוכבי לכת פנימיים



אורך הקטע (במעלות קשת) שכוכב לכת עובר במסלולו ביום אחד = $\frac{360}{S}$

S1 פרק הזמן שבו נוגה מקיף את השמש (מחזור סידרי)
S2 פרק הזמן שבו כדור הארץ מקיף את השמש.
S3 פרק הזמן החולף בין שתי התקבצויות תחתונות של נוגה

כדי לדעת מהו אורך הקטע שכדור הארץ עובר בפרק הזמן S3 , נכפיל את פרק הזמן הזה באורך הקטע שכדור הארץ עובר ביום אחד

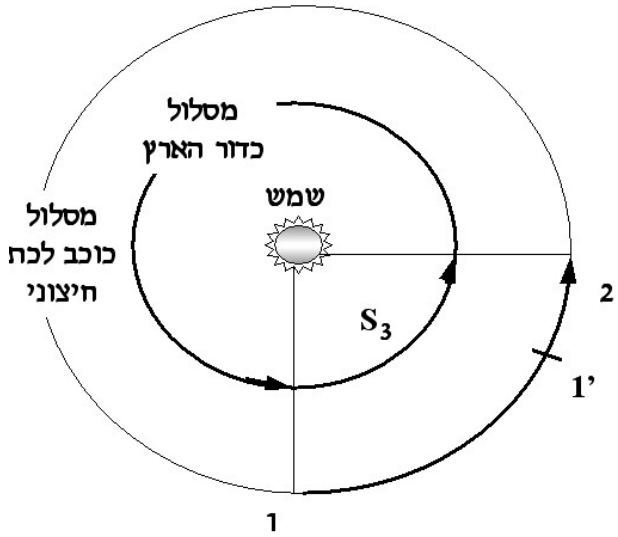
$$s_3 \frac{360}{s_2}$$

אורך הקטע הנוסף שעל נוגה לעבור עד לניגוד הבא $\left(s_3 - s_1\right)\frac{360}{s_1}$

נשווה את שני פרקי הזמן הנדרש להם להשלים את הקשת $\left(s_3 - s_1\right)\frac{360}{s_1} = s_3 \frac{360}{s_2}$

הביטוי בצורתו הסופית $\frac{1}{s_3} = \frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2}$

מחזור סינודי של כוכבי לכת חיצוניים



כעת, כוכב הלכת הוא כוכב הלכת הפנימי. נשאיר את ההגדרות עבור כדור הארץ:

S1 מחזור סידרי של כוכב לכת חיצוני

S2 מחזור סידרי של כדור הארץ

S3 המחזור הסינודי של כוכב הלכת החיצוני.

אורך הקטע הנוסף, החולף מהנקודה בה כדור הארץ משלים הקפה אחת סביב השמש, עד לניגוד הבא

$$\left(s_3 - s_2\right)\frac{360}{s_2}$$

הקטע שגומא כוכב הלכת בפרק הזמן $\boldsymbol{s}_3 \dfrac{360}{\boldsymbol{s}_1}$

והביטוי בצורתו הסופית

$$\frac{1}{\boldsymbol{s}_3} = \frac{1}{\boldsymbol{s}_2} - \frac{1}{\boldsymbol{s}_1}$$

התקבצויות גיאוצנטריות וטופוצנטריות

- ההתקבצויות תלויות במיקום הצופה על כדור הארץ.

- התקבצות גיאוצנטרית מחושבת עבור צופה היפותטי המצוי במרכז כדור הארץ.
- כדי לחשב את ההתקבצות עבור צופה המצוי על פני כדור הארץ (טופוצנטרית), יש לחשב את הפרלקסה הטופוצנטרית. ככל שהגופים המתקבצים – אחד או שניהם – קרובים יותר לכדור הארץ, הפרלקסה תגדל.