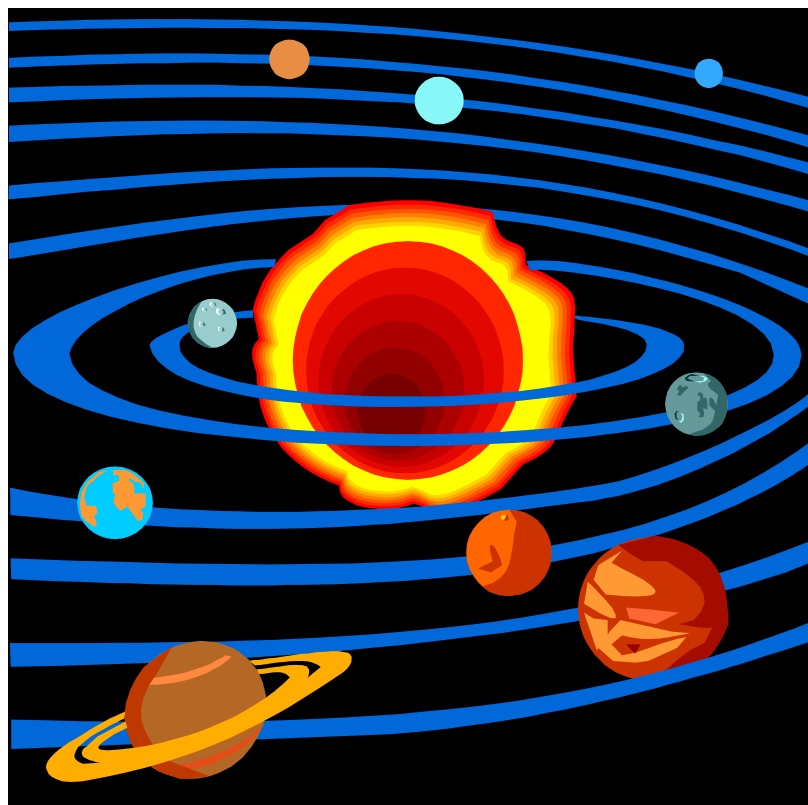


מכניקה

כבידה - מבוא וחוקי קפלר



❖ השקפות שונות באשר לתיאור מבנה היקום:

(1) המודל הגיאוצנטרי (תלמי)

(2) המודל ההליוצנטרי (קופרניקוס).

❖ שלושת חוקי הכבידה של קפלר

בני האדם פיתחו מודלים שונים לתיאור היקום, שהשתנו ממקום למקום ומתקופה לתקופה. ישנן מספר תופעות שמימיות ותצפיות, שכל מודל, המתאר את היקום, היה צריך להסביר: (I) הכוכבים זורחים במזרח ושוקעים במערב.



שקיעה

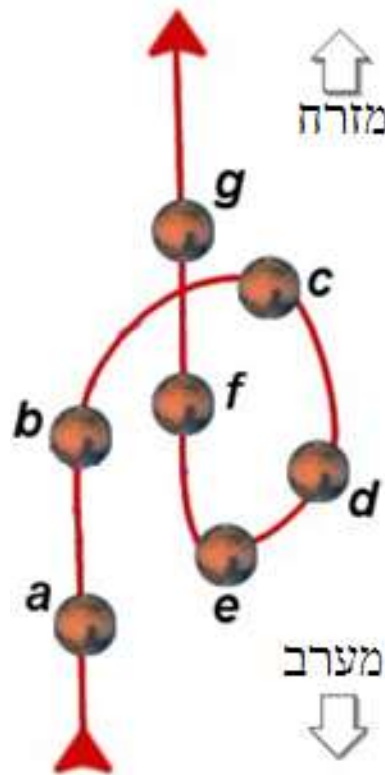


זריחה

(II) הירח נע לאט בין הכוכבים.

תופעות שמימיות (המשך)

III כוכבי הלכת (פלנטות) נעים אף הם על רקע הכוכבים, אך תנועתם הנצפית מכדור הארץ מסובכת להסבר: לפעמים נראה שהם הופכים את מגמתם ומבצעים לולאות.

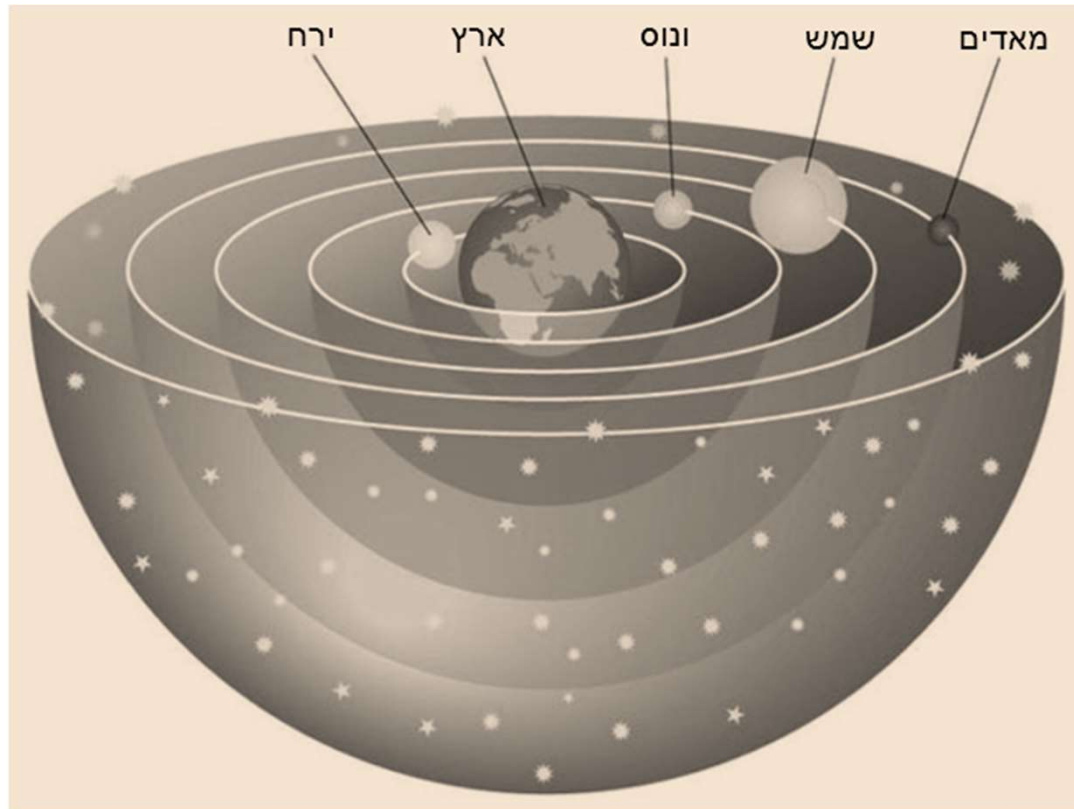


תנועת נסיגה של כוכב הלכת מאדים
התמונה הנ"ל הינה הרכבה של מספר תמונות שצולמו כל מספר ימים.
הכוכבים ברקע נראים עומדים במקומם, בעוד כוכב הלכת מאדים
(הנקודות הכתומות הגדולות) נע על רקע הכוכבים הרחוקים.
בתמונה, נראה מאדים זז "קדימה", "אחורה" ו"קדימה".

היקום לפי היוונים: מודל גיאוצנטרי

ביוון, ערש הדמוקרטיה, התפתחו השקפות שונות באשר לתיאור היקום. היוונים הסבירו את התנועות האלה כך: הם מיקמו כל פלנטה, את השמש ואת הירח על פני כדורים שקופים משותפי מרכז, כך שכל כדור הסתובב בקצב המתאים לו ובכך קידם את הגוף השמימי על מסלולו. מרכז היקום הוא כדור הארץ. מודל כזה נקרא **מודל גיאוצנטרי**.

מודל זה **לא הצליח להסביר** את התנועה המיוחדת של כוכבי הלכת.

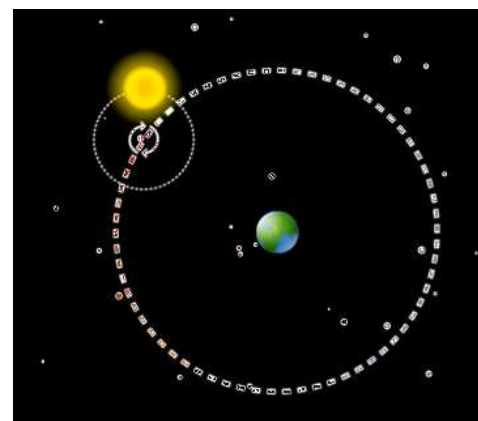
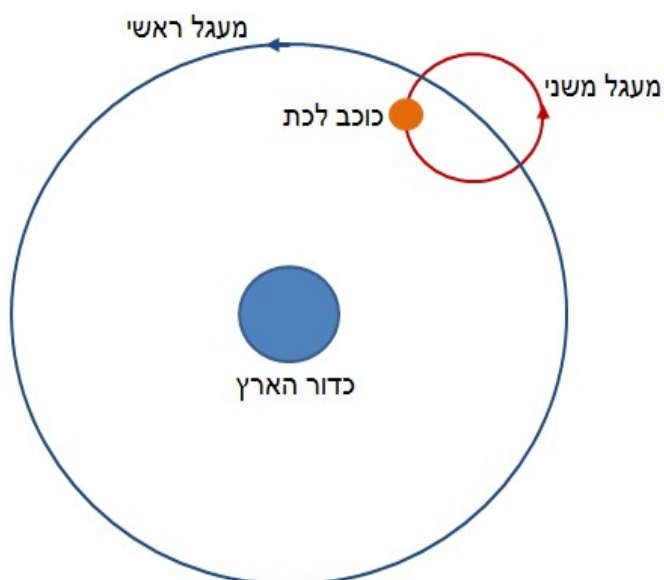


התנועה האחורית – אפולוניוס ותלמי

כדי להסביר את התנועה המורכבת של הפלנטות הציע האסטרונום אפולוניוס בסוף המאה השלישית לפני הספירה מודל, הכולל מעגלים משניים (אפיציקלים).

לפי הצעתו, כל פלנטה נעה על גבי מעגל קטן (המעגל המשני). מרכזו של המעגל הזה מסתובב סביב כדור הארץ במעגל גדול (הראשוני).

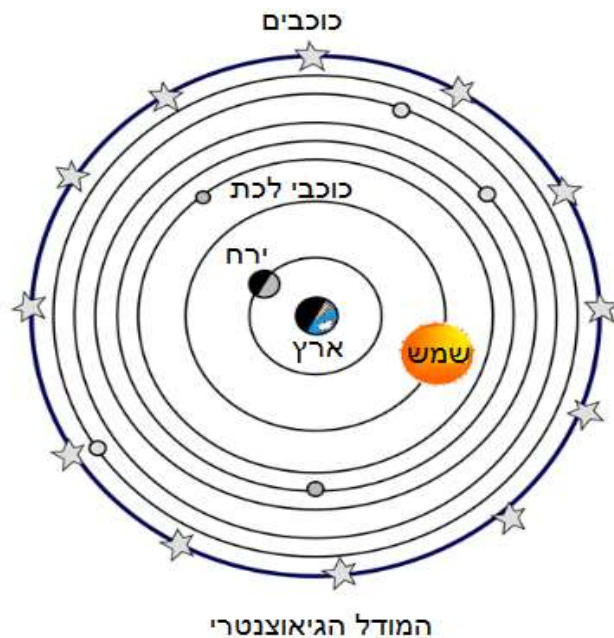
האסטרונום החשוב של העת העתיקה, פתולומיאוס קלאודיוס (הקרוי תלמי, חי במצרים במאה השנייה לספירה), אימץ דעה זו וקידם אותה (כפי שמורחב בשקף הבא).



http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=Plxed3JVOnI

תלמי (קלאודיוס פתולומיאוס)

קלאודיוס תלמי, אסטרונום, גיאוגרף ומתמטיקאי מצרי ממוצא יווני, שחי ופעל באלכסנדריה שבמצרים במאה השנייה לספירה, ליקט את כל הרעיונות של קודמיו לכדי תורת יקום מורכבת למדיי, אך מדויקת די הצורך מבחינה תצפיתית, שאפשרה לחזות ולחשב בדיוק טוב יחסית את מיקומן של הפלנטות, השמש והירח.



שתי הנחות היסוד בתורתו של תלמי היו:

1. גיאוצנטריות- הארץ נמצאת במרכז המערכת.

2. תנועות במעגלים ובמהירויות קבועות

(כולל רעיון האפיציקלים)

חמשת כוכבי הלכת, שהיו מוכרים בתקופתו של תלמי, הם:

כוכב חמה (מרקורי), נוגה (ונוס), מאדים (מרס),

צדק (יופיטר) ושבתאי (סאטורן).

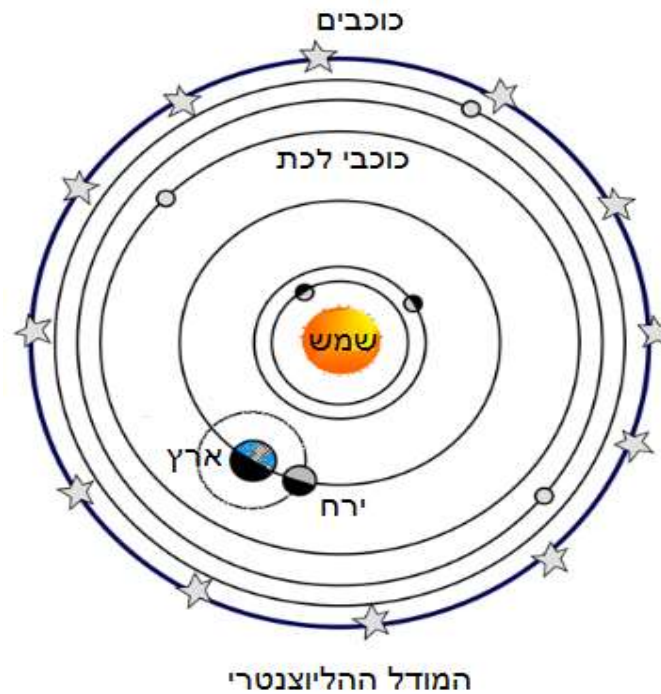
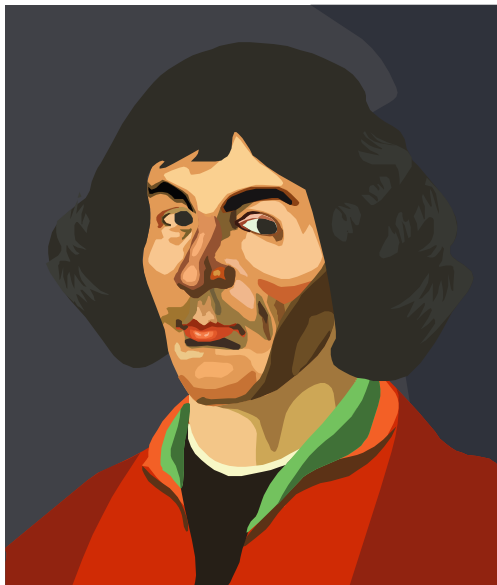
המודל הגיאוצנטרי התקבל בקרב מדעני העולם, מכיוון שהייה אינטואיטיבי ומתאים להשקפה הדתית, לפיה

האדם ניצב במרכז היקום. המודל היה מורכב למדי, אך הצליח לנבא את מקום הכוכבים ותחזיותיו הלמו

היטב את התצפיות.

היקום של קופרניקוס

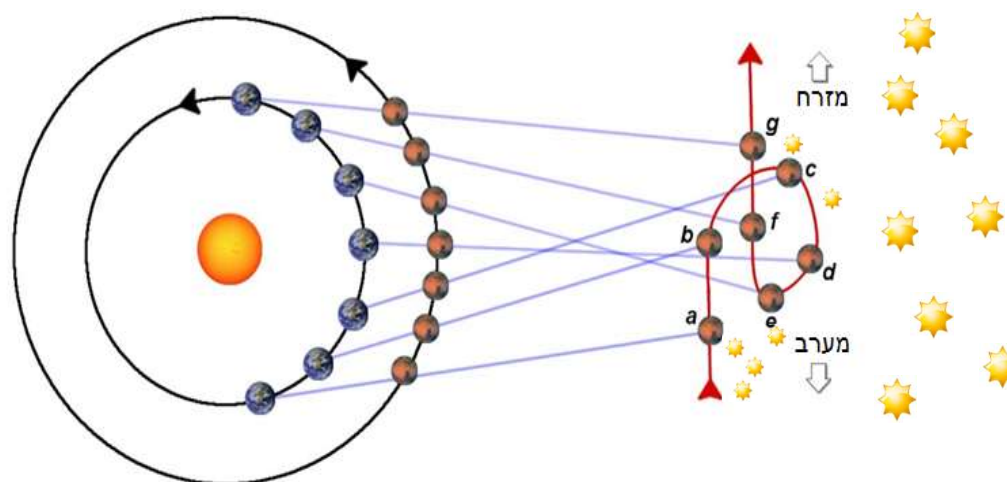
נזיר פולני בשם קופרניקוס חיפש מודל פחות מסורבל וכזה שיציג כיאות את כל הפלנטות. קופרניקוס ניסה לשנות כליל את נקודת המבט כדי לפשט את תמונת היקום: במקום שהארץ תשכון במרכז, תפסה השמש את המקום המכובד במרכז. ממודל גיאוצנטרי ליקום עבר אפוא קופרניקוס למודל של יקום **הליוצנטרי**.



https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=4wrTHOCRxy4

ההסבר של קופרניקוס לתנועת הנסיגה

תורתו של קופרניקוס הציגה בפשטות את תנועת הנסיגה, שנצפית לעיתים ביחס לפלנטות הרחוקות יותר מן השמש בהשוואה לארץ, בשילוב של שתי תנועות: הארץ מקיפה את השמש, ופלנטה אחרת מקיפה את השמש.



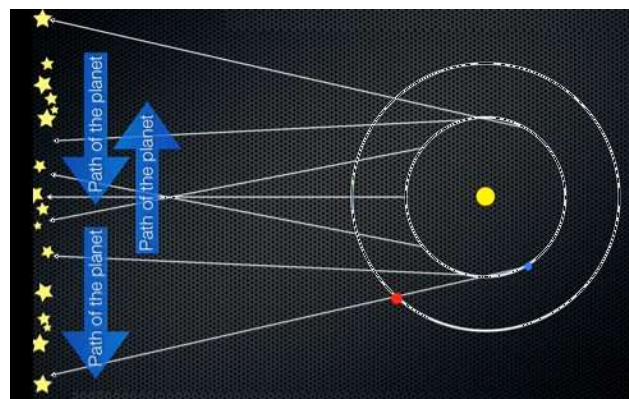
על פי המודל של קופרניקוס, ניתן להסביר את תנועת הנסיגה של כוכבי הלכת בכך שמהירות כדור הארץ שונה ממהירותם של כוכבי הלכת האחרים.

סרטונים על תנועת הנסיגה

<http://www.youtube.com/watch?v=piBBQTkoQ9c>



http://www.youtube.com/watch?v=72FrZz_zJFU&feature=player_embedded

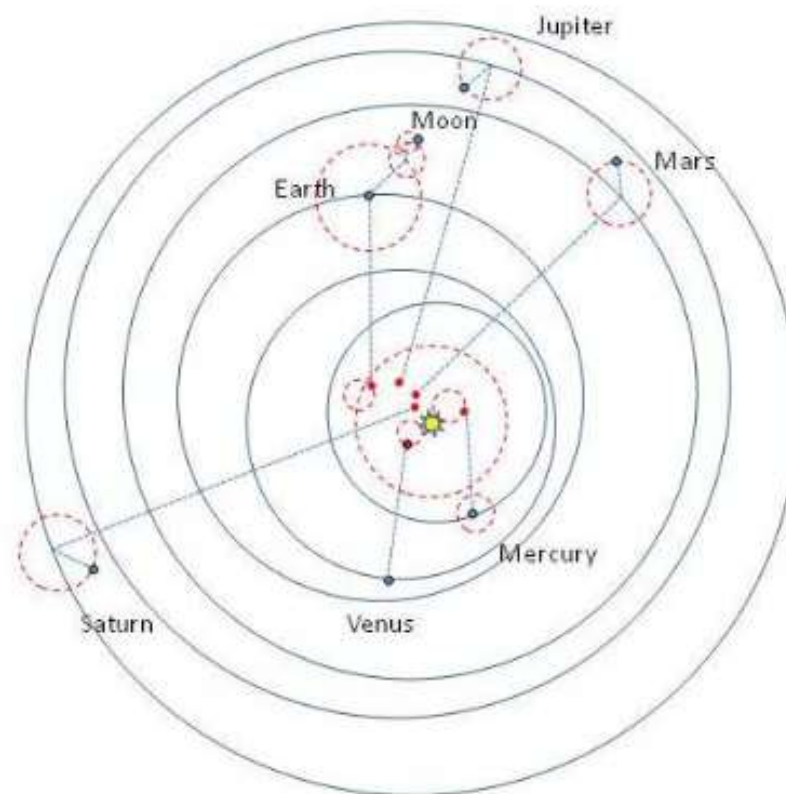


מודל תלמי ומודל קופרניקוס

למרות רעיון המהפכני של קופרניקוס להציב את השמש במרכז היקום, הוא המשיך להשתמש בנתונים של תלמי, ולדבוק במסלולים מעגליים, וכתוצאה מכך המודל שלו היה לא פחות מסובך מזה של תלמי.



המודל של תלמי



המודל של קופרניקוס

טיכו ברהה: בין קופרניקוס לקפלר

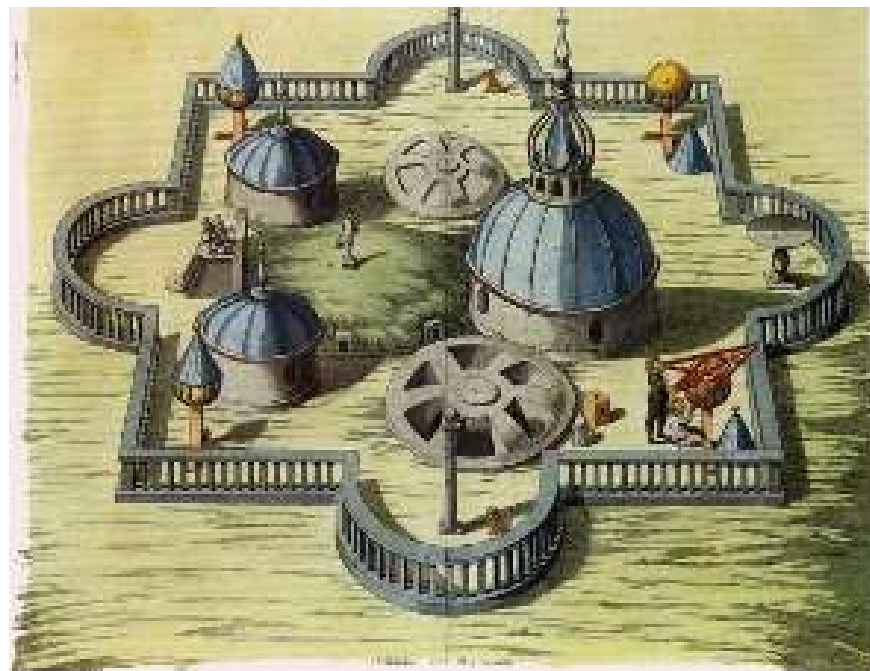
תורתו של קופרניקוס, עם כל מהפכותה, לא ענתה על כל השאלות שעלו באשר לתנועתן של כל הפלנטות, ועל עוד כמה שאלות פתוחות, כגון: אם כדור הארץ מסתובב מדוע איננו נופלים ממנו? איך יתכן שכדור הארץ הגדול והכבד יכול להסתובב סביב השמש? לשם כך נדרשה מהפכה נוספת אותה ביצע יוהנס קפלר, על סמך תצפיות שביצע אסטרונום דני מחונן בשם טיכו ברהה.



טיכו בראהה (1546 - 1601)

עבודתו התצפיתית של טיכו ברהה

גדולתו של טיכו ברהה הייתה בתצפיות האסטרונומיות המדויקות שערך במשך למעלה מעשרים שנה. עבודתו כללה תצפיות מקיפות על השמש, הירח, הפלנטות, כלל הכוכבים ועוד, והיא הייתה מדויקת יותר מן העבודות שהיו מקובלות עד אז. בזכותה נחשב טיכו ברהה עד היום לגדול האסטרונומים. נזכיר שבתקופתו עדיין לא הומצא הטלסקופ, ובעזרת מכשיר פשוט הצליח טיכו ברהה להגיע לדיוק של כדקת קשת.



מצפה הכוכבים של טיכו ברהה באיִן שבדנמרק

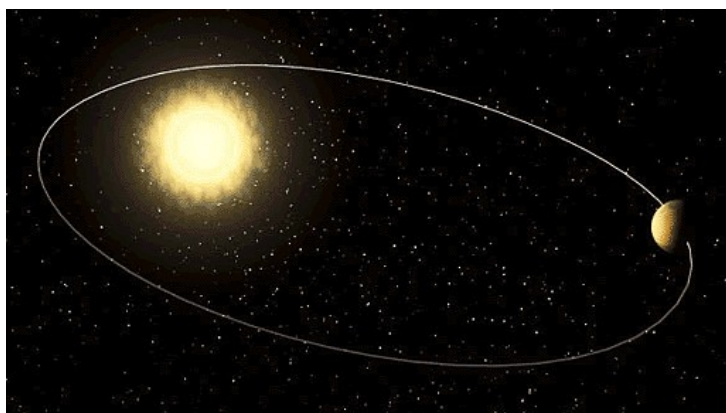
טיכו ברהה הזמין את המתמטיקאי הגרמני יוהנס קפלר לעבוד איתו במצפה הכוכבים בפראג ולעבד את תוצאות התצפיות. קפלר היה מתמטיקאי ופיזיקאי דגול, שידע לנתח ולהסיק מסקנות מהנתונים הרבים והמדויקים שקיבל לידייו והצליח לנסח את חוקי התנועה של כוכבי הלכת, התקפים עד היום.



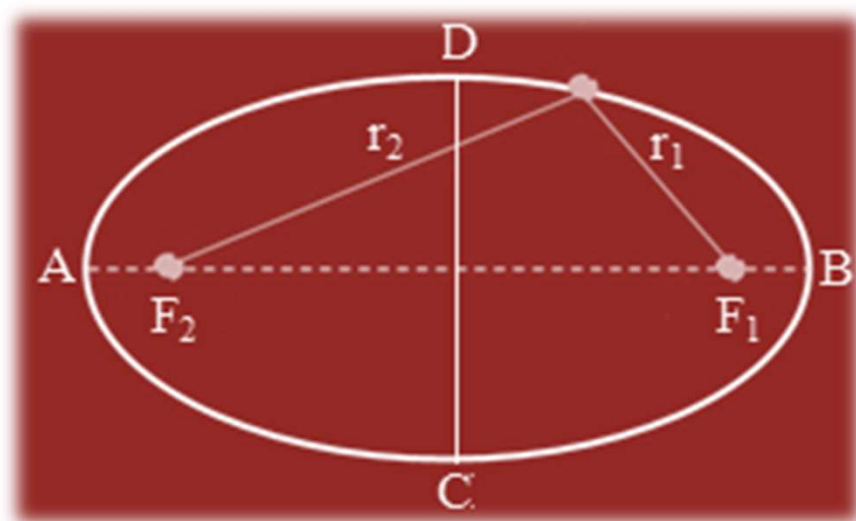
יוהנס קפלר (1571 - 1630)

קפלר וניתוח התצפיות

קפלר מצא שמיקומה של פלנטה על-פי תוצאות התצפיות של טיכו ברהה אינו תואם את המסלול המעגלי של הפלנטה על-פי התיאוריה של קופרניקוס. קפלר הבין שחולשתה של התיאוריה של קופרניקוס נעוצה בהנחה שהפלנטות נעות סביב השמש במעגלים. קפלר חיפש אפוא עקום אחר לתיאור תנועתן של הפלנטות והגיע למסקנה שעקום זה הוא אליפסה.



אליפסה היא אוסף הנקודות במישור, שסכום מרחקיהן, r_1 ו- r_2 , משתי נקודות קבועות F_1 ו- F_2 , הוא גודל קבוע. שתי הנקודות נקראות **מוקדי האליפסה**, הקטע AB נקרא **הציר הראשי** של האליפסה והקטע CD – **הציר המשני**. ככל שהמוקדים F_1 ו- F_2 מתקרבים זה לזה, צורת האליפסה הולכת ומתקרבת לצורתו של מעגל. כאשר F_1 מתלכד עם F_2 , האליפסה הופכת למעגל. הקטע המחבר את אחד המוקדים של האליפסה עם נקודה על היקפה נקרא **רדיוס-וקטור**.

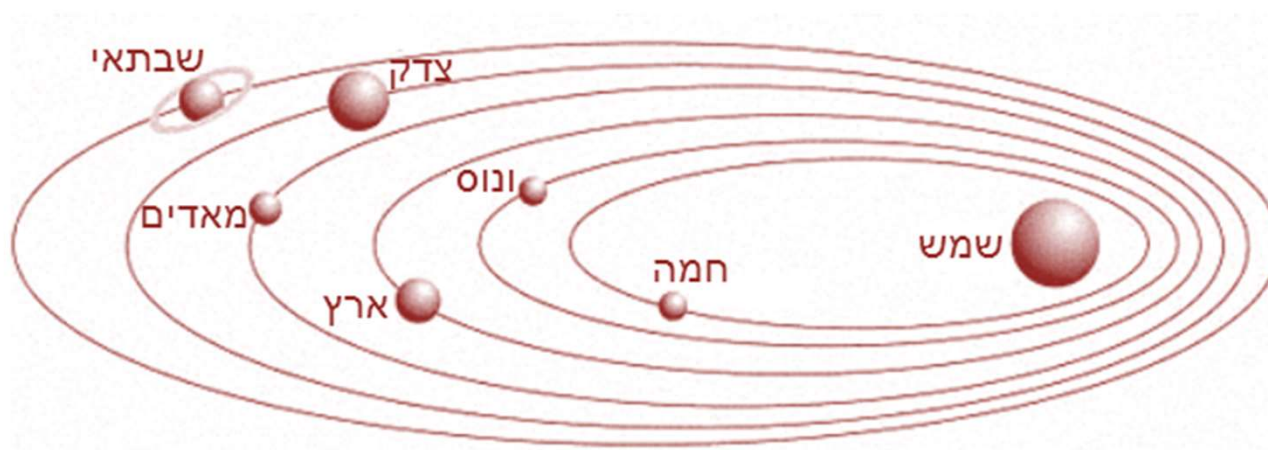


https://www.youtube.com/watch?v=XBxDDXG3sTQ&feature=player_detailpage

חוקי קפלר (I)

החוק הראשון של קפלר (1609)

כוכבי הלכת נעים סביב השמש במסלול אליפטי, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיו.



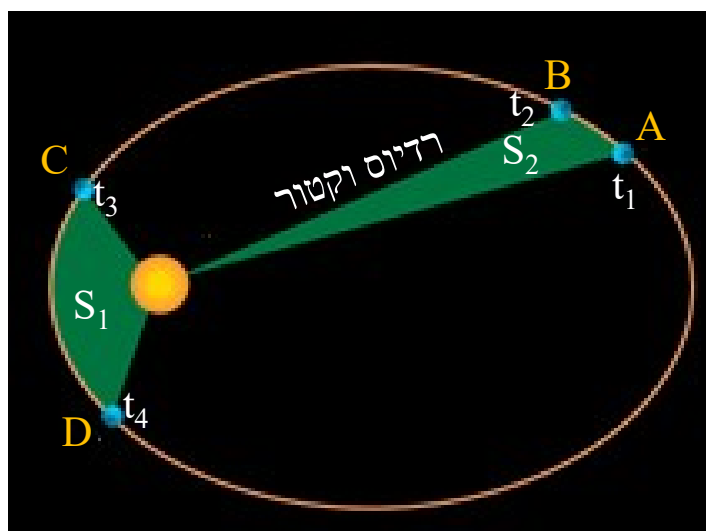
חוקי קפלר (II)

החוק השני של קפלר (חוק השטחים)

הרדיוס-וקטור (הישר המחבר בין השמש לכוכב לכת) מכסה במהלך תנועתו של כוכב הלכת שטחים

שווים בפרקי זמן שווים.

מכאן נובע שכוכב לכת אינו נע במהירות קבועה סביב השמש, אלא נע מהר יותר כשהוא מתקרב לשמש. בתרשים, בקטע CD מהירות הפלנטה גדולה יותר ממהירותה בקטע AB, כי בפרקי זמן שווים הרדיוס וקטור מן השמש אל הפלנטה מכסה בתנועתו שטחים שווים, $S_1 = S_2$.



$$t = t_2 - t_1 \Delta = t_4 - t_3$$

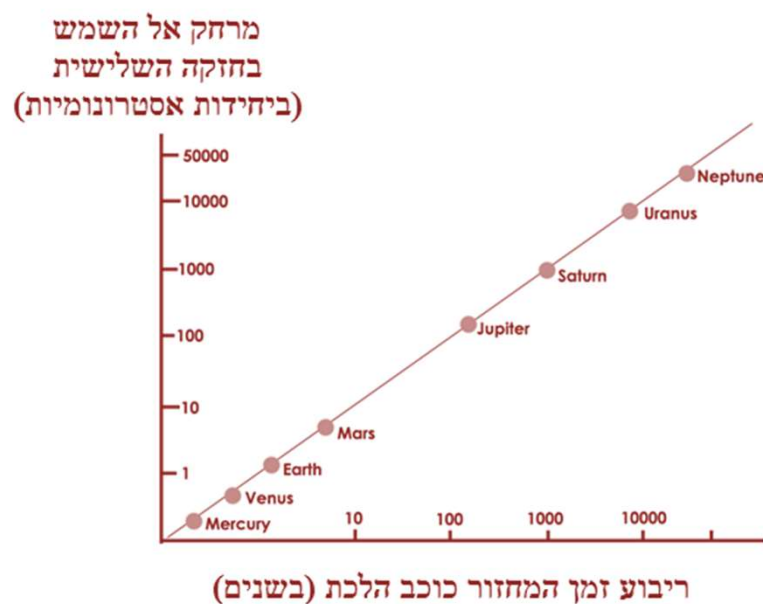
חוקי קפלר (III)

החוק השלישי של קפלר (חוק המחזורים) (1618)

ריבוע זמן המחזור (T) של כוכב לכת בתנועתו סביב השמש הינו ביחס ישר לחזקה השלישית של מרחקו הממוצע מן השמש (R).

$$T^2 = kR^3$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3$$



חוק זה מאפשר למצוא מרחק לא ידוע של פלנטה מן השמש, למשל ביחידות אסטרונומיות.

יחידה אסטרונומית היא יחידת מרחק שימושית באסטרונומיה, השווה למרחק הממוצע של כדה"א מהשמש (150 מיליון ק"מ).

https://www.youtube.com/watch?v=6TGCPXhMLtU&feature=player_detailpage

התיאוריה ההליוצנטרית של קופרניקוס וחוקי קפלר זכו בניצחון מרשים כאשר גלילאו גליליי גילה ארבעה ירחים של צדק ולמעשה הוכיח בכך את קיומם של גרמי שמים, שאינם מקיפים את כדור הארץ. עובדה זו, יחד עם תצפיות אסטרונומיות אחרות, חיזקו מאוד את המודל ההליוצנטרי, עד לקבלתו המלאה על ידי אנשי המדע.



בטבלה שלפניך רשומים נתונים על ארבעה ירחים של כוכב הלכת צדק.
הנח שהירחים נעים במסלולים מעגליים.

הירח	רדיוס מסלול $\times 10^5 km$	זמן מחזור (ימים)
ירח מספר 1	4.22	1.77
ירח מספר 2	6.71	3.55
ירח מספר 3	10.7	7.16
ירח מספר 4	18.83	16.69



הראה כי ארבעה ירחים אלה מקיימים את החוק השלישי של קפלר. (שים לב: לא נדרש לשנות יחידות)

פתרון תרגיל 1

כוכב 1 :

$$\frac{T^2}{R^3} = k$$

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{1.77^2}{4.22^3} = 0.041$$

כוכב 2 :

$$\frac{T_2^2}{R_2^3} = \frac{3.55^2}{6.71^3} = 0.041$$

כוכב 3 :

$$\frac{T_3^2}{R_3^3} = \frac{7.16^2}{10.7^3} = 0.041$$

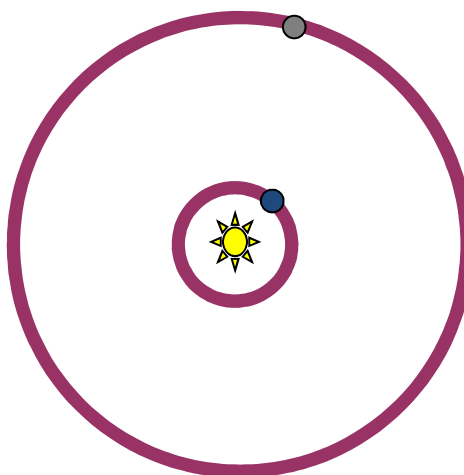
כוכב 4 :

$$\frac{T_4^2}{R_4^3} = \frac{16.69^2}{18.83^3} = 0.041$$

א. כוכב לכת חג סביב שמש מסוימת. קבע באיזו מבין שלוש הנקודות, תהיה מהירותו של כוכב הלכת – הקטנה ביותר, ובאיזו מבין שלוש הנקודות תהיה מהירותו – הגבוהה ביותר?



ב. שני כוכבי לכת חגים סביב אותה השמש, רדיוס האחד גדול פי ארבעה מרדיוס השני. מהו יחס זמני המחזור שלהם?



פתרון תרגיל 2

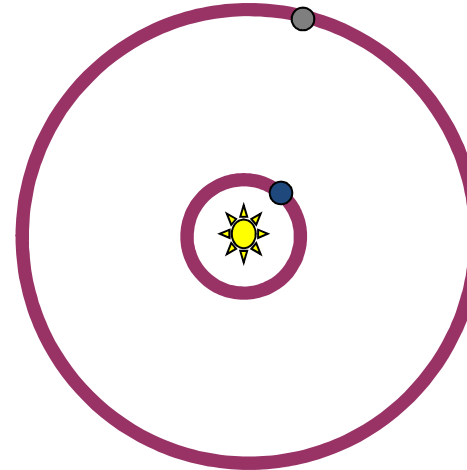
א. הנקודה הקרובה ביותר זקוקה לקשת גדולה יותר על מנת לתחום באותו פרק זמן את אותו השטח.

לכן ככל שהנקודה יותר קרובה המהירות הקווית גדולה יותר לכן:

$$v_C > v_B > v_A$$



ב.



$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3$$

$$r_1 = 4r_2$$

$$T_1 = nT_2$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 \Rightarrow \left(\frac{nT_2}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{4r_2}{r_2}\right)^3 = (n)^2 = (4)^3$$

$$\Rightarrow 4^3 = n^2 = 64 \Rightarrow n = 8$$

$$T_1 = 8T_2$$

❖ המודל הגיאוצנטרי של תלמי :

1. גיאוצנטריות- הארץ נמצאת במרכז המערכת.
2. תנועות במעגלים ובמהירויות קבועות (כולל רעיון האפיציקלים).

❖ המודל ההליוצנטרי של קופרניקוס:

הליוצנטריות- השמש שוכנת במרכז המערכת וכל השאר נע סביבה.

❖ קפלר נתח והסיק מסקנות מהנתונים הרבים ונסח את שלושת חוקי התנועה של כוכבי הלכת:

1. כוכבי הלכת נעים סביב השמש במסלול אליפטי, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיו.
2. הרדיוס-וקטור (הישר המחבר בין השמש לכוכב לכת) מכסה במהלך תנועתו של כוכב הלכת שטחים שווים בפרקי זמן שווים.
3. ריבוע זמן המחזור (T) של כוכב לכת בתנועתו סביב השמש הינו ביחס ישר לחזקה השלישית של מרחקו הממוצע מן השמש (R).

$$T^2 = kR^3$$