

מכון ויצמן למדע
תכנית רוטשילד ויצמן

ניסויי קאסיני ורומר למדידת זמן המחזור של צדק ומהירות האור

עבודת גמר ללימודי תואר שני בתכנית רוטשילד ויצמן

נעם חבר דוד פרל ואריק שרייבר

מנחים : מר אילן מנוליס וד"ר אמנון חזן

אוקטובר 2016

תוכן עניינים

4.....	1. מבוא.....
6.....	2. רקע תיאורטי.....
6.....	2.1. צדק - מאפיינים כלליים.....
7.....	2.2. האטמוספירה של צדק.....
8.....	2.3. הכתם האדום הגדול.....
10.....	2.4. הירחים של צדק.....
11.....	2.5. מדידת מהירות הסיבוב העצמי של צדק.....
11.....	2.5.1. מערכות המיפוי של צדק.....
11.....	2.5.2. מדידת זמן הסיבוב העצמי של צדק על ידי קאסיני.....
13.....	2.6. מדידת מהירות האור על ידי רומר.....
13.....	2.6.1. הדיון אודות מהירות האור.....
13.....	2.6.2. הניסיונות למדידת מהירות האור.....
16.....	2.6.3. התפתחות מדידת מהירות האור מרומר עד ימינו.....
18.....	3. כלים ושיטות לתצפית בצדק וירחיו.....
18.....	3.1. טלסקופ.....
19.....	3.2. מצלמת ה- CCD.....
19.....	3.3. מערך הנתונים של אוניברסיטת גלזגו.....
20.....	4. מדידות.....
20.....	4.1. הגדרת ותזמון הליקויים של ירחי צדק.....
21.....	4.2. התצפיות שלנו על ליקויי איו.....
26.....	4.3. מדידת מהירות האור בשיטת רומר.....
31.....	5. מסקנות.....
32.....	6. סיכום.....
34.....	7. מערך שיעורים בנושא ניסוי רומר למדידת מהירות האור.....
34.....	7.1. הקדמה.....
34.....	7.1.1. רציונל.....
34.....	7.1.2. מטרות הפעילות.....
34.....	7.1.3. קהל היעד.....
34.....	7.1.4. רצף הפעילות.....

35	7.1.5 אופי הפעילות
35	7.1.6 הנחיות למורה
36	7.2 שיעור פתיחה
36	7.2.1 רקע למורה
40	7.2.2 מצגת מלווה לשיעור הפתיחה :
41	7.3 שיעור 2 - מדידת זמן המחזור של איו באמצעות סימולציה
41	7.3.1 דפי עבודה לתלמידים
45	7.4 שיעור 3 - מדידת מהירות האור בשיטת רומר
45	7.4.1 תקציר למורה בנושא מדידת מהירות האור על ידי רומר
49	7.4.2 מצגת מלווה שיעור - מדידת מהירות האור על ידי רומר
51	7.4.3 דפי עבודה לתלמיד - מדידת מהירות האור בשיטת רומר
53	7.5 שיעור 4 - סיכום ותיאור מדידת מודרניות של מהירות האור
54	7.6. העברת פיילוט בכיתה
54	7.6.1 תיאור המסגרת
55	7.6.2 ממצאים ומסקנות
59	ביבליוגרפיה
61	נספחים
61	נספח א' - הצעה לפעילות : היכרות עם הסטלריום
66	נספח ב' - דפי עבודה עם תשובות תלמיד : מדידת זמן המחזור של איו
70	נספח ג' - מצגת לשיעור המבוא : צדק וירחיו
82	נספח ד' - מצגת להסבר שיטת המדידה של רומר
88	נספח ה' - מצגת סיכום והתפתחות מדידת מהירות האור המודרנית (כולל הערות למורה)

1. מבוא

עבודה זו מבקשת להתחקות אחרי המדידות האסטרונומיות ההיסטוריות של רומר וקאסיני הנוגעות לכוכב הלכת צדק ולהציע פעילות לתלמידים המשחזרת את הפעולות שהובילו למדידה הכמותית הראשונה של מהירות האור.

בעבודה שלושה חלקים. החלק התיאורטי עוסק בצדק וירחיו וכן סוקר את הניסויים ההיסטוריים של קאסיני למדידת זמן הסיבוב העצמי של צדק ושל רומר למדידת מהירות האור.

החלק המעשי מציג את הכלים והשיטות לביצוע תצפית על צדק וירחיו ואת מדידת מהירות האור שביצענו בעזרת מאגר נתוני הכניסות והיציאות של איו מהצל של צדק.

החלק הדידקטי מציג את מערך הפעילות שאנו מציעים למורים בנושא ניסוי רומר. בפעילות זו התלמידים משתמשים בסימולציה למדידת זמן המחזור של איו. הם נתקלים בתופעה של שינויים בזמן המחזור ובעזרת ליווי מסיקים שהשינויים נובעים ממהירותו הסופית של האור. לאחר מכן התלמידים משתמשים באותה סימולציה למדידת מהירות האור בדרכו של רומר. מטרות הפעילות היא להכיר לתלמיד את ניסוי רומר בדרך חווייתית ומסקרנת, להקנות לו כלים של שימוש בסימולציה וגיליון אלקטרוני ולקרב את התלמיד לפיזיקה דרך תחום האסטרונומיה והתצפיות.

תודות

ברצוננו להודות למנחים ולתוכנית רוטשילד-ויצמן על ההזדמנות שזכינו לה במהלך הלימודים ובתהליך העבודה על פרויקט הגמר בפרט:

1. מר אילן מנוליס - מנהל מצפה הכוכבים במכון ויצמן. אילן אישר וליווה את הפרויקט, למרות הנושא המורכב והתמורות שחלו בו, תמך כיוון ולימד לאורך יותר משנה במקצועיות, אכפתיות והרתמות שלא יכולנו לצפות לה. לצד מסירותו אילן ידע לדרוש מאתנו הירתמות ומקצועיות בכל פרט של העבודה: משלב הרקע התיאורטי עבור במדידות, בצילומים במצפה ובניתוח התוצאות ועד לכתיבה מדעית ע"פ כללים מדויקים וקפדניים. אילן היה זמין תמיד לשאלותינו הרבות, גם כאשר היה שרוי בחופשת מחלה והיה אתנו בקשר מתמיד. על כך תודה מכל הלב!

אין ספק שלמדנו והתקדמנו בזכותך, אילן, ולבטח תישאר חקוק בליבנו בהמשך דרכינו המקצועית. אנו מודים לך גם על הסיור והתצפית שערכת לנו בשעות הלילה במצפה הכוכבים - היה מרתק!

2. ד"ר אמנון חזן - המנחה הפדגוגי של הפרויקט. מהמפגש הראשון אמנון ידע לתמוך לחזק ולעודד. עוד לפני ההתערבות המקצועית בבניית תוצר פדגוגי משמעותי, ידע אמנון לכוון ולתמוך בקשיים שחווינו בחלק המדעי בחכמה ועדינות גם כאשר כמעט והרמנו ידיים. אמנון, היית לנו מנחה תומך ומפרגן לצד עמידה איתנה על דרישות העמידה בזמנים כנציג המחלקה להוראת המדעים במכון.

בשלב ההנחיה על התוצר הפדגוגי הבהרת לנו את חשיבות ההפעלה בכיתה והסקת המסקנות וכמו כן את בניית דפי ההנחיה והרקע למורה ובכך עזרת לנו בבניית פרויקט בו אנו מאמינים וכבר דוחפים לשימוש פרקטי בקרב חברינו המורים המשועים להכוונה מסוג זה במסגרת ה-30%. על כל אלו אנו מודים ומברכים על בחירתך והסכמתך להנחות אותנו.

3. גיובאני קאסיני ואולה רומר - הפרויקט הזה הפגיש ביננו לבין הדמויות המרתקות הללו. למרות פער של יותר מ-300 שנה, זכינו לחוש דרך העבודה את המסירות והעבודה הקפדנית שלכם במדידת זמני המחזור של איו במצפה הכוכבים ההוא בפריז. לרומר - על הניסוי אותו הגית בחכמתך פורצת הדרך עוד לפני עידן המחשב והאקסל, ממנו למדנו כמה חשובה החשיבה מחוץ לתבניות הקבועות מראש. שמחים אנו להעביר לתלמידנו את משנתך ומבטיחים להחדיר אותך לתודעה במהירות השואפת למהירות האור..

2. רקע תיאורטי

2.1. צדק - מאפיינים כלליים

צדק (Jupiter בלועזית) הוא כוכב הלכת הגדול ביותר במערכת השמש. הוא כוכב הלכת החמישי במרחקו מהשמש ושייך לקבוצת ענקי הגז הכוללת גם את שבתאי, אורנוס ונפטון הרחוקים יותר. קוטרו של צדק 142,984 ק"מ בקו המשווה - גדול פי 11 מקוטר כדור הארץ ונפחו גדול פי 1,300. צפיפותו הממוצעת היא 1.33 גרם לסמ"ק שהיא צפיפות נמוכה ביחס לצפיפות הממוצעת בכדור הארץ בשל היותו ענק גזי בעל הרכב כימי דומה לזה של השמש. מסתו הכוללת עדיין גדולה מאוד: פי 318 מזו של כדור הארץ, וכמעט פי 2.5 ממסתם של כל שאר כוכבי הלכת במערכת השמש יחדיו. לא בכדי הוא נחשב ל"מלך" כוכבי הלכת. יש לציין שאף על פי שצדק מרשים בגודלו, נתגלו כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש להם מסות גדולות משמעותית.

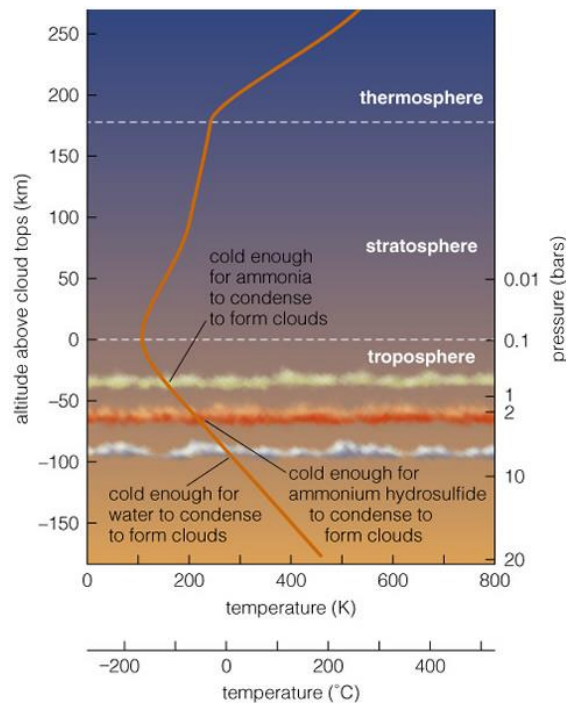


איור 1: צולם ב-21 באפריל 2014 על ידי מצלמת השדה הרחב של טלסקופ החלל האבל.
קרדיט: NASA / ESA / A. Simon, Goddard Space Flight Center.

לצדק קצב הסיבוב המהיר ביותר בין כוכבי הלכת במערכת השמש. זמן הסיבוב העצמי שלו הוא 9 שעות, 55 דקות ו-30 שניות בלבד. כתוצאה מכך ומן העובדה שזהו כדור עשוי מגזים שונים, כלומר גוף לא מוצק, רדיוסו גדול יותר באזור קו המשווה וצורתו פחוסה מעט; רדיוסו בקו המשווה הוא 71,370 ק"מ ואילו רדיוסו בקוטב הוא 66,750 ק"מ בלבד, מה שנותן מקדם פחיסות של 0.065 בהשוואה לפחיסות של כדור הארץ, שהוא 0.00335. ניתן להבחין בפחיסות זו אפילו כאשר צופים בו בטלסקופ פשוט. צדק משלים הקפה סביב השמש אחת ל-11.86 שנה במהירות ממוצעת של 13.06 ק"מ לשנייה. צדק מוקף בטבעות דקות ביותר כאשר הטבעת העיקרית מצויה במרחק של 1.72 עד 1.81 רדיוסי צדק והיא מכילה בעיקר חלקיקי אבק קטנים ממילימטר. צדק הוא בדרך כלל העצם הרביעי בבהירותו הנראית ברקיע לאחר השמש, הירח ונוגה. מבחינת מבנה ניתן לחלק את צדק לשלושה חלקים עיקריים: הליבה, החלק הפנימי והחלק החיצוני. משערים שהליבה מכילה ניקל וברזל ורדיוסה כ-10,000 ק"מ. מעל הליבה מצויה שכבת מימן במצב של נוזל מתכתי (מימן דחוס כך שהקשרים המולקולריים שלו נותקו והאלקטרונים שבו משותפים לכל האטומים) שמגיעה כמעט עד ל-80% מהרדיוס של צדק. מעל שכבת המימן המתכתי מצויה האטמוספירה של צדק, אותה אנו רואים ועל מאפייניה נרחיב.

2.2. האטמוספירה של צדק

האטמוספירה של צדק היא הגדולה באטמוספירות שבמערכת השמש ומשתרעת על פני כ-5,000 ק"מ. כיון שצדק הוא ענק-גז קשה לקבוע בדיוק את הגבול התחתון של האטמוספירה, אך הוא נמצא באזור שבו הגז הופך בהדרגה לנוזל (נהוג להגדיר אותו בנקודה בה הלחץ האטמוספרי הוא 10 בר, כפי שניתן לראות ב-**Error! Reference source not found.** מהתחתונה לעליונה, שכבות האטמוספירה הן הטרופוספירה, הסטרטוספירה, התרמוספירה והאקזוספירה שבהדרגה מתמוזגת עם החלל שסביב הפלנטה. כפי שניתן לראות ב-**Error! Reference source not found.** לכל שכבה גרדיינט טמפרטורה אופייני :



איור 2: התפלגות הלחץ והטמפרטורה על פי שכבות האטמוספירה השונות: הטרופוספירה, הסטרטוספירה והתרמוספירה של צדק.

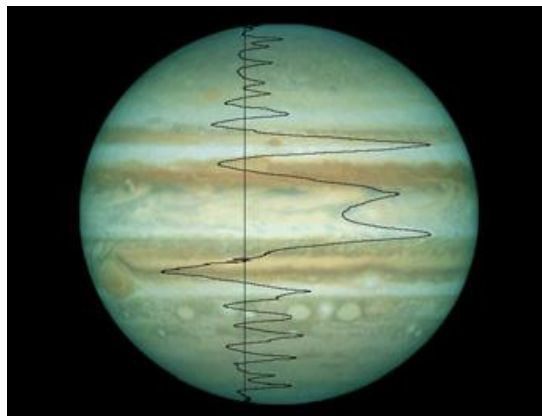
הרכב האטמוספירה של צדק דומה להרכב של השמש. האטמוספירה מורכבת ברובה המוחלט ממימן מולקולרי (H_2) ומהליום, ביחס של בערך 90%-10% לטובת המימן, כאשר בשמש יש יחסים של 73.46% מימן ו-24.85% הליום. ניתן למצוא באטמוספירה של צדק גם תרכובות פשוטות של יסודות שונים בצירוף מימן כדוגמת מים, מימן גופרתי (H_2S), מתאן (CH_4) ואמוניה (NH_3).

לצדק מאפיינים תצפיתיים בולטים ומרהיבים - שכבות צבעוניות של עננים וכתמי מערבולות. תופעות אלו מקורן בטרופוספירה ובה נתמקד. כפי שניתן לראות ב-**Error! Reference source not found.** בטרופוספירה מצויות שלוש שכבות של עננים: ענני אמוניה בשכבה העליונה, תחתם

ענני מימן גופרתי ואמוניה (ammonium hydrosulfide) ובשכבה התחתונה ענני מים.

סיבובו המהיר של צדק סביב צירו, המורכב בעיקר מגז נוזל, גורם לחיכוך בין השכבות השונות באטמוספירה ולאפקט קוריוליס מוגבר. כתוצאה מכך הזרמים, או הרוחות על פני צדק נמתחות כך שהן מקבילות לקו המשווה שלו, נעות בכיוונים מנוגדים ויוצרות את המראה המפוספס

שאנחנו מכירים, ושמותף גם לשבתאי. אצל צדק הרצועות העיקריות כה בולטות שאפילו בטלסקופ חובבים קטן ניתן לראותן, מדרום ומצפון לקו המשווה.

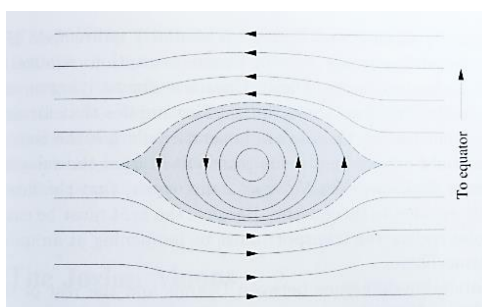


איור 3: מדידות של מהירות הרוחות בצדק. הקו האנכי מציין מהירות אפס, וניתן להבחין במהירויות המנוגדות באזורים ובחגורות (מתוך www.nasa.gov).

הפסים על פני צדק מחולקים לשתי קבוצות: הבהירים נקראים 'אזורים' (Zones) והכהים נקראים 'חגורות' (Belts). כפי שניתן לראות ב. **Error! Reference source not found.** הרצועה העבה בקו המשווה היא בהירה ולכן נקראת האזור המשווני (Equatorial Zone ובקיצור EZ). דרומית אליה מצויה חגורה כהה, והיא נקראת בהתאם החגורה הדרום-משוונית (SEB) וכן הלאה. באזורים יש ריכוזים גבוהים יותר של אמוניה, העננים נמצאים בגובה רב יותר והטמפרטורה נמוכה יותר מאשר בחגורות. בגלל הרוחות בין השכבות הרכב הרצועות ומיקומן דינמי, ובשנים האחרונות אף נצפו מספר פעמים שאחת החגורות העיקריות דהתה או נעלמה לחלוטין.

2.3. הכתם האדום הגדול

על פני צדק ניתן לראות עשרות רבות של מערבולות, כאשר הגדולה מכולן היא הכתם האדום הגדול. הכתום הוא סופה אנטי ציקלונית (כלומר סופה שבה הלחץ גבוה מסביבתה ושילוב של זרימה מלחץ גבוה לנמוך ואפקט קוריוליס מקבלים תנועה סיבובית) הממוקמת 22 מעלות מדרום לקו המשווה של צדק (בחגורה הדרום משוונית). היא סובבת בניגוד לכיוון השעון בזמן מחזור של כחמישה ימי ארץ.



איור 4 : הכתם האדום הגדול הוא סופה אנטי-ציקלונית הממוקמת בין שתי רצועות אטמוספירה הנעות בכיוונים מנוגדים. (Image credit: An Introduction to Modern Astrophysics (p.835), by Bradley & Dale)

ממדי הסופה הם בין 24 ל-40 אלף ק"מ ממזרח למערב ובין 12 ל-14 אלף ק"מ מצפון לדרום. בדיקות אינפרא אדום מראות שהכתם קר יותר מהעננים הממוצעים בצדק ותקרת הכתם גבוהה בכ-8 ק"מ משאר העננים בצדק. מרכז הכתם חם מקצותיו ב-3-4 מעלות והלחץ שם הוא בין 200 ל-500 מיליבר. כפי שניתן לראות ב-**Error! Reference source not found.** מצפון לכתם יש זרמי סילון חזקים מערבה ומדרומו זרמים מזרחה, מה שמגביל את מקומו על קו רוחב קבוע ומונע ממנו להתפזר. לעומת זאת, קו האורך של הכתם משתנה אך בגלל הסיבוב העצמי הלא אחיד של צדק קשה להגדיר את מיקומו ואת התזוזה שלו בדיוק. ניתן להגיד בוודאות שהכתם לא מסתובב בדיוק עם מערכת העננים בה הוא נמצא אלא 'נסחף' (Drifts) בקצב משתנה.

הכתם הוא סופה בעלת אורך חיים ארוך של לפחות 150 שנה (יש הטוענים שגילה למעלה מ-300 שנה ושכבר קאסיני צפה בה במאה ה-17), אך יש כמה תמורות במאפיינים שלו. אורך האליפסה של הכתם הולך ומצטמצם (מ-40 אלף ק"מ לפני מאה שנים ל-24 אלף ק"מ בימינו), יש האצה של מהירות הרוחות בכתם (הן בטווח של 150 מטר לשנייה ויותר!) ותקופת הסיבוב העצמי של הכתם קטנה (מעשרה ימים לסדר גודל של חמישה ימים למחזור). זאת גם בעקבות הצטמקות הכתם אך גם בעקבות סיבות נוספות.

מקור הצבע האדום של הכתם הוא בשכבה העליונה של הכתם המורכבת מחלקיקי אצטילן ואמוניה בגודל של 400 ננומטר, העוברים תהליך בקרינה האולטרה סגולה שקיימת בגבהים אלו, וביחס מסוים יוצרים את הגוון האדום. הגוון המדויק תלוי באחוזי האמוניה והאצטילן, בגובה השכבה ובכמות הקרינה שהיא סופגת. הסיבוב של הכתם בעצם "סוגר" את החלקיקים ומאפשר להם להתערבב לקבלת התערובת האדומה. מתחת לשכבה העליונה רוב הכתם מורכב מעננים לבנים.

הכתם נעלם ומתגלה בטווח האור הנראה בעקבות השפעה של החגורה המשוונית הדרומית - כאשר היא נראית באור הנראה הכתם לא נראה והפוך. התקופות של הנראות וההיעלמות באות במרווחים לא קבועים.

מתחת לנקודה האדומה הגדולה יש שלשה אזורי סערה סגלגלים לבנים. האסטרונומים צופים בהם רק בארבעים השנים האחרונות. כמו הנקודה האדומה הגדולה, גם מוצאם עודנו בגדר תעלומה.

מחקר שהתפרסם ממש לאחרונה (יולי 2017) מצא כי הכתם חם יותר בכ-400 מעלות מהאטמוספירה שסביבו. המחקר מציע שלכתם יש תפקיד מרכזי בחימום השכבה העליונה של האטמוספירה של צדק, שאת הטמפרטורה הגבוהה שלה (930°C) לא ידעו להסביר עד היום. המחקר מציע שהכתם מעביר חום מהחלק התחתון של האטמוספירה לחלק העליון באמצעות גלים אקוסטיים וגלי כבידה אטמוספריים.

2.4. הירחים של צדק

מאז ומתמיד צפו האסטרונומים בצדק אך היה זה גלילאו גליליי שהביט בצדק לראשונה מבעד לטלסקופ בשנת 1610. בתצפיותיו הוא גילה את ארבעת הירחים הגדולים של צדק הידועים היום בשם "הירחים הגליליאניים". כמעט בו זמנית ובאופן נפרד לחלוטין גילה את ארבעת הירחים האסטרונום הגרמני סימון מריוס ואף העניק להם את השמות בהם אנו קוראים להם היום: איו, אירופה, גנימד וקליסטו על שם המאהבות (והמאהבים) של זאוס (המקביל היווני ליופיטר במיתולוגיה הרומית).

ארבעת הירחים הללו הם עולמות בפני עצמם, בעלי הרכבים ומאפיינים שונים. **איו**, הקרוב לצדק שבירחים הגליליאניים הוא בעל קוטר ממוצע של 3,643 ק"מ (מעט גדול יותר מהירח), ומרחק ממוצע מצדק של 421,800 ק"מ. הקרבה לצדק יוצרת באיו כוחות גאות ושפל חזקים מאוד, ותועדה בו פעילות געשית רבה (כולל התפרצויות געשיות שהגיעו לגובה של 300 ק"מ מעל פניו). למעשה, הוא הגוף הפעיל ביותר מבחינה געשית במערכת השמש. איו נעול כבידתית לצדק, ומפנה אליו תמיד את אותו צד. לאיו ליבת מתכת שסביבה מעטפת סלעית, ואף אטמוספירה דלילה המורכבת מגופרית דו חמצנית שמקורה בהרי הגעש, גופרית, חמצן, נתרן, אשלגן וכלור ושמותרשת בה תופעה דומה לזוהר הקוטב שמתרחש בכדור הארץ.



איור 5: ארבעת הירחים הגליליאניים באותו קנה מידה. משמאל לימין: איו, אירופה, גנימד וקליסטו (התמונה מויקיפדיה)

אירופה הוא הירח השני במרחקו מצדק והקטן ביותר מבין ארבעת הירחים הגליליאניים. קוטרו הממוצע 3,121 ק"מ (מעט קטן מהירח) והמאפיין הבולט שלו הוא שפניו מכוסים שכבת קרח-מים דקה שתחתיה ככל הנראה מים נוזלים בעובי של עשרות ק"מ. פני השטח שלו חלקים מאוד (אין מכתשים או הרים גבוהים מק"מ, ככל הנראה בגלל שתחת פניו יש אוקיינוס אדיר) ומשתנים לעתים וניתן להבחין בחריצים או קווים כהים החוצים אותו בכל הכיוונים והנוצרים ככל הנראה בגלל כוחות הגאות והשפל שמפעיל צדק על הירח. לאירופה אף אטמוספירה דלילה ביותר המורכבת בעיקר מחמצן.

גנימד, הירח הגליליאני השלישי, הוא הירח הגדול ביותר במערכת השמש כולה. קוטרו הממוצע כ-5,268 ק"מ - גדול יותר מכוכב הלכת חמה (מרקורי)! גנימד הוא גוף הרבה פחות פעיל מאיו ואירופה, ועל פניו שכבת קרח בה נראים מכתשי פגיעה רבים. לגנימד ליבת ברזל נוזלי, וככל

הנראה בין השכבות הסלעיות והקרחיות העוטפות את ליבתו מצויות שכבות של מים נוזלים. גם לגנימד אטמוספירה דלילה, דומה לזו של אירופה.

הירח הרחוק ביותר מבין הארבעה הוא **קליסטו**, הנמצא במרחק ממוצע של 1,882,700 ק"מ מצדק. קליסטו קטן מגנימד (קוטרו הממוצע 4,820 ק"מ) והוא מורכב בעיקר מסלעים וקרח וסביבו שכבת קרח עתיקה ומצולקת במספר רב של מכתשי פגיעה. המרחק הרב של קליסטו מצדק גורם לכך שכוחות הגאות והשפל על פניו חלשים, והוא הכי פחות פעיל מבין ארבעת הירחים. בעקבות חקירת השדה המגנטי של צדק והשפעותיו על הירחים משערים שייתכן ויש גם לקליסטו אוקיינוס מתחת לפני השטח.

מלבד ארבעת הירחים הגליליאניים לצדק עוד ירחים רבים. סך הכול נצפו 67 ירחים ידועים בשם נכון להיום כאשר חלקם הם אסטרואידיים שנלכדו במשיכתו. ל-51 מירחים אלו קוטר קטן מעשרה ק"מ, והם נתגלו רק לאחר שנת 1975. הירחים מחולקים לקבוצות לפי מרחקם מצדק ומישור הסיבוב שלהם, אך מספרם הרב של הירחים והגיוון במאפייניהם מקשים על חלוקה מסודרת וברורה.

2.5. מדידת מהירות הסיבוב העצמי של צדק

2.5.1. מערכות המיפוי של צדק

סיבוב צדק סביב עצמו מאופיין בסיבוב דיפרנציאלי – כלומר לא כל חלקיו מסתובבים במהירות זוויתית שווה. קו המשווה האטמוספרי של צדק משלים סיבוב בזמן מחזור שקצר בחמש דקות מזמן המחזור של הקוטב האטמוספרי. הסיבוב הדיפרנציאלי נובע מהעובדה שצדק הוא לא כוכב לכת מוצק אלא גזי ונוזלי. לכן, כשרוצים לציין מיקום, כפונקציה של הזמן, על צדק אפשר להשתמש באחת משלוש השיטות הקיימות.

שתי השיטות הראשונות מתייחסות לפני השטח הנראים של צדק ומשמשות לציין מיקום על פנים אלו.

השיטה הראשונה מתייחסת לקוי הרוחב בין מינוס עשר לפלוס עשר מעלות מקו המשווה. זמן הסיבוב שלה הוא תשע שעות חמישים דקות ושלושים שניות.

השיטה השנייה מתייחסת לקוי הרוחב מצפון לעשר מעלות ומדרום למינוס עשר מעלות מקו המשווה. זמן המחזור שלה הוא תשע שעות חמישים וחמש דקות וארבעים שניות.

השיטה השלישית לא מתייחסת לפניו הנצפים של צדק אלא למגנטוספירה שלו, אותה אפשר לדמות באמצעות טלסקופי רדיו. שיטה זאת נחשבת לשיטה הרשמית והמדויקת יותר ובעצם מתארת את סיבוב החלק הפנימי יותר של צדק. זמן המחזור שלה הוא תשע שעות חמישים וחמש דקות ועשרים שניות

2.5.2. מדידת זמן הסיבוב העצמי של צדק על ידי קאסיני

בשנת 1672 פרסם האסטרונום הצרפתי סניור קאסיני מאמר בשם :

"A Relation of the Return of a Great Permanent Spot in the Planet Jupiter, Observed by Signor Cassini, One of the Royal Parisian Academy of the Sciences"

בעיתון המדעי Philosophical Transactions. במאמר (שנכתב בגוף שלישי) מסביר קאסיני כיצד חישב את זמן הסיבוב העצמי של צדק.

קאסיני פותח בסיווג שני סוגי כתמים שאפשר לראות על הדסקה של צדק. הסוג הראשון הוא הצל של הירחים של צדק – הוא בטוח שזה צל הירחים כי תנועתם מתאימה בדיוק לתנועת המוכרת של הירחים. הסוג השני לא מתאים לתנועת הירחים והוא כנראה דומה לכתמים שרואים על הירח (מכתשים) או על השמש (כתמי שמש). תנועת כתמים אלו נראית לא קבועה – כשהם במרכז הדיסק הם נעים מהר יותר מאשר בקצותיו ואז הם גם נראים בולטים וחדים הרבה יותר. הוא מאמין שכתמים אלו הם שטוחים ונמצאים על הפנים של צדק.

בסוג השני של הכתמים נמצא גם הכתם הענק שקאסיני והוק גילו. בקיץ 1665 קאסיני צפה בכתם וגילה שזמן ההקפה שלו לוקח תשע שעות וחמישים ושש דקות. קאסיני הכין אפרמיס (יומן מיקומים לחיזוי תצפיות) עבור הזמנים בהם הכתם נמצא בדיוק במרכז הדיסק (מבחינת הרוחב). הוא המשיך לצפות בכתם עד תחילת 1666 ואימת את האפרמיס שהכין. בתחילת אותה שנה צדק כבר התקרב לשמש ולא ניתן היה לצפות בו. כשצדק התרחק שוב מהשמש קאסיני לא זיהה את הכתם והניח שהוא נעלם לנצח כמו שכתמי שמש נעלמים.

ב19 לינואר 1672 קאסיני צפה בצדק בשעה 4:45 בבוקר הוא זיהה שוב את הכתם קצת אחרי המרכז. לפי התקדמות הכתם הוא חישב שהכתם היה במרכז בדיוק בשעה 4:35. קאסיני ניגש להכין אפרמיס חדש לתקופה הקרובה ואז הוא הבין שיש לו באפרמיס הישן תצפית של הכתם במרכז הדיסק בדיוק 6 שנים לפני ב19 לינואר 1666.

קאסיני חישב: עברו מאז שש שנים שמתוכם אחת הייתה עם 366 ימים והשאר עם 365: סה"כ 2191 ימים, שהם 52584 שעות. זמן ההקפה של הכתם הוא תשע שעות חמישים וחמש דקות ועוד מספר שניות. מכיוון שהוא הבין שהכתם עשה מאז מספר שלם של הקפות קיימות שתי אפשרויות:

א. עברו 5294 הקפות וכל זמן הקפה הוא תשע שעות חמישים וחמש דקות וחמישים ושמונה שניות.

ב. עברו 5295 הקפות וכל זמן הקפה הוא תשע שעות חמישים וחמש דקות וחמישים ואחת שניות.

כלומר קאסיני צמצם את השגיאה בזמן הסיבוב ל שבע שניות בלבד.

קאסיני ניגש מיד להכין אפרמיס חדש ומדויק ובמשך כחודשיים כל התחזיות התאימו בדיוק. ב3 במרץ הוא זימן שני מדענים מהאקדמיה למדע לתצפית לפי החישובים והכתם הופיע במרכז הדיסק בדיוק לפי החישוב. קאסיני הבין שניתן עכשיו לחשב את הזמנים המדויקים להופעת הכתם במרכז הדיסק לכל השנים הבאות. הוא מציין שבשביל לעשות זאת חייבים להתחשב כמובן בתנועת כדור הארץ סביב השמש-שמשפיעה על התאריכים והשעות (כדור הארץ מקיף את השמש במשך 365.2422 ימים – ולכן כל ארבע שנים, כמעט, מוסיפים יום לשנה). וגם במיקומו של צדק (הוא לא מסביר מדוע) – הערה זאת היא כנראה ההתחלה לעבודתו של רומר עוזרו האישי של קאסיני שחישב באמצעות הסטיות שנובעות ממיקומו של צדק את מהירות האור. לפי ההבנה הפשוטה קאסיני ידע שיש למיקומו של צדק השפעה על הזמנים אבל לא הבין ממה היא נובעת.

בסוף המאמר קאסיני אומר שבגלל הדיוק הרב של הזמנים בהם מופיע הכתם במרכז הדיסק אפשר להשתמש בהם כמעין שעון עולמי ובכך לדעת את קו האורך בו נמצא הצופה על פי הסטייה בזמן מהזמן המחושב להופעת הכתם במרכז הדיסק.

2.6. מדידת מהירות האור על ידי רומר

2.6.1. הדיון אודות מהירות האור

בעת העתיקה השאלה לגבי מהירות האור התנהלה במקביל לשאלה באיזו מהירות אנו רואים. היו טיעונים לגבי "קרני ראייה" היוצאות מהעין ומגיעות לעצם ולעומתם שסברו שהעצם שולח את דמותו והיא נכנסת לעינינו. אריסטו הגה רעיון נוסף לפיו הראייה מתאפשרת בשל שקיפות שמתרחשת בו זמנית, (כלומר במהירות אינסופית).

כבר במאה ה-17 הדיון על מהירות האור החל לעלות על הפרק ועלתה השאלה אם מהירות האור אינסופית או סופית וניתנת למדידה. אריסטו בגישתו השאיר חותמו ואותו חיזק קפלר הגרמני שסבר שהאור חסר מסה ומשקל לכן הדחיפה מהמקור לא מתמודדת עם שום התנגדות ולכן מהירות האור אינסופית. גם דקארט חיזק את גישתו של אריסטו בתאוריה לפיה האור מתבטא כלחץ שעובר דרך חומר במהירות אינסופית ובעת ליקוי לבנה הוכיח על דרך השלילה שאם מהירות האור הייתה סופית אז בזמן הליקוי הירח, השמש וכדור הארץ לא היו בקו ישר. דקארט הניח שאם האור עובר את המרחק מכדה"א לירח בשעה (כדוגמה בלבד), הלוך חזור בשעתיים הירח בזמן זה כבר "יצא" מהליקוי בשל התקדמות כדה"א במשך שעתיים ותיווצר זווית של 33 מעלות לכיוון הירח - יחסית לקו בין השמש לכדה"א. במצב זה לא יתקיים ליקוי הלבנה וכך פסל דקארט על דרך השלילה את האפשרות שמהירות האור היא סופית. טעותו של דקארט נבעה מההנחה שהאור עובר את המרחק בשעה, שהוא זמן ארוך בהרבה מהזמן הנכון (שנייה אחת), מה שבפועל יוצר סטייה בלתי ניתנת להבחנה ב"יציאה" מהקו הישר בין השמש, כדה"א והירח. הויגנס, כבר בתקופתו של דקארט, הצביע על כך שאם דקארט היה מניח פרק זמן קצר יותר, כ-10 שניות, הזווית שתיווצר, כעשירית מעלה, קטנה מידי מכדי "לשבור" את הקוויות הדרושה לליקוי הלבנה.

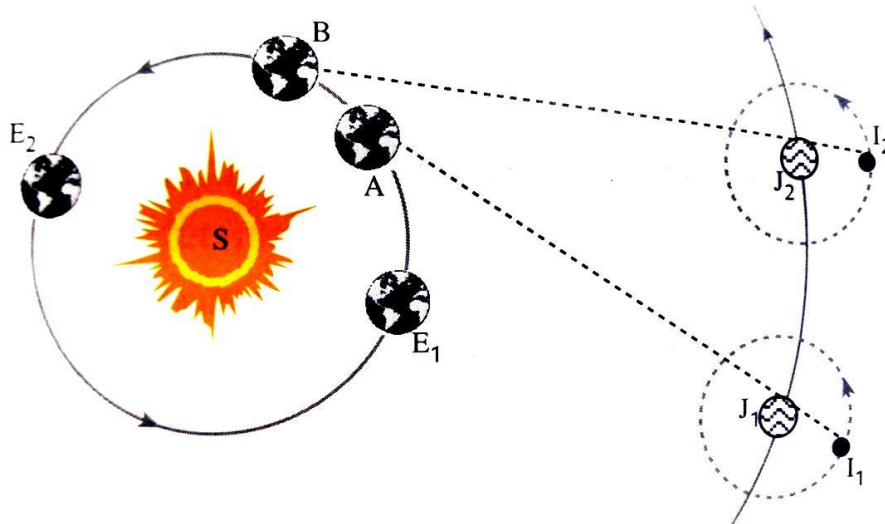
2.6.2. הניסיונות למדידת מהירות האור

גלילאו היה הראשון לתכנן את מדידת מהירות האור אך בשל האינקוויזיציה, גילו ומצב ראייתו לא הספיק (לדבריו הוא דווקא כן ניסה). בספרו שפרסם 1632 ("שיח על שתי תפיסות עולם של תלמי ושל קופרניקוס") בפרק הראשון מתאר גלילאו את הניסוי בו ניסה למדוד את מהירות האור. הוא ועוזרו היו מרוחקים 2 ק"מ האחד מהשני על שתי גבעות ליד פירנצה. כל אחד היה מצויד בפנס מאחורי תריס. גלילאו תכנן למדוד את הזמן בו עובר האור את המסלול הלוך וחזור (4 ק"מ). כאשר עוזרו ראה את האור היוצא מהפנס של גלילאו, הוא פתח את התריס של פנסו ושלח אלומה חזרה לגלילאו, שמדד את הזמן. המדידות הראו זמנים שונים וגלילאו הבין שמהירות האור גדולה ובלתי ניתנת למדידה במרחקים כאלו. גם ניסיונות במרחקים גדולים יותר בעזרת טלסקופ לא צלחו אך למרות זאת הוא היה בטוח שהמהירות היא סופית. 30 שנה לאחר מותו של גלילאו ב-1670 הגיע לפריז ז'אן דומיניק קאסיני כדי לנהל את מצפה הכוכבים שם. יד ימינו של קאסיני, ז'אן פיקר הביא עמו, באחד מסיריו לגיוס חוקרים צעירים, צעיר דני בשם אולה רומר. רומר, בן 21, הגיע למצפה וזכה לצפות בכל תוצאות המדידות והתצפיות של צדק וירחיו. קאסיני היה מומחה ידוע לצדק וירחיו ולגבי הירח איו במיוחד (כמו

שפירטנו בפרק 2.5.2). קאסיני חזר ומדד את זמן הקפת איו את צדק. המדידות היו תמיד סביב 42.5 שעות. לעיתים יותר ולעיתים פחות. קאסיני חשב שחוסר הדיוק נובע מתנועתו של איו, או מבעיות במדידה. אך רומר הצעיר והשנון החל לחשוב בכיוון חדש. הוא סבר שהבעיה אינה נובעת מתנועתו של איו אלא מתנועתו של כדור הארץ. כשרומר עיין בתוצאת המדידה מחורף ומקיץ 1676 הבין סופית שהמרחק של כדור הארץ מצדק משפיע על הופעת איו ויציאתו מאזור הצל של צדק. הוא הניח שככל שמתרחקים מצדק הופעת הירח המרוחק תתעכב ואף ידע לחשב את הזמן לפי תוצאות קודמות. הוא יצא נגד התחזית של קאסיני לגבי הופעת איו בזמן מסוים וטען שאיו ייראה ויצא מאזור הצל של צדק עשר דקות מאוחר יותר מהזמן שקאסיני צפה. ואכן רומר צדק. קאסיני במעמדו הגבוה בקרב הקהילה המדעית פסל את טענותיו של רומר, והמשיך לדבוק בחוסר היכולת לנבא במדויק את הופעת איו ויציאתו מאזור הצל של צדק.

רומר חזר לדנמרק. רק לאחר כ-50 שנה הוכחו טענותיו של רומר כנכונות וכבר היה ניתן לחשב את מהירות האור שאכן הייתה גבוהה רק במעט מהחישוב של רומר. תרשים 4 מתאר את התופעה עליה התבסס ההסבר של רומר

בתרשים הנקודות E_1 ו E_2 מציינות את הנקודות בהן כדור הארץ הכי קרוב לצדק והכי רחוק מצדק במהלך השנה. הנקודות A ו-B הן שתי נקודות כלליות בהן כדור הארץ נמצא בשלב בו הוא מתרחק מצדק. באיור מסומנים קווים מקווקיים שמציינים את קצה שדה הראיה של הירח איו מכדור הארץ (כלומר את המיקום בו איו יצא מליקוי) מדידת המחזור מתבצעת מיציאת איו מהאזור המוצל עד ליציאתו הבאה מהאזור המוצל. בזמן היותו בנקודות A ו-B. האור שיוצא מאיו בנקודה I_2 עובר דרך ארוכה יותר לכדור הארץ הנמצא בנקודה B מאשר האור שיוצא מאיו בנקודה I_1 שמגיע לכדור הארץ שנמצא בנקודה A. הפרשי הזמנים הגדולים ביותר נצפים באותן תקופות של השנה בהן קצב ההתרחקות של כדור הארץ מאיו הוא הגדול ביותר.



איור 6: הרעיון שבבסיס של רומר להסבר הפרשי הזמנים בליקוי של איו (מתוך: "אופטיקה - תורת האור והראיה" מאת יגאל גלילי ואמנון חזן).

רומר הבין כי הסטייה במדידת זמן המחזור של איז סביב צדק נובעת מהשתנות המרחק של כדה"א מצדק. כאמור, מדידת המחזור מתבצעת מיציאת איז מהאזור המוצל עד ליציאתו הבאה מהאזור המוצל. זמן זה מתארך כאשר כדור הארץ מתרחק, מ A ל B באיור 6 לעיל.

רומר עקב, מדד וגילה את התארכות זמן המחזור בהפרש של חצי שנה. הוא מדד את הסטיות של כל זמני המחזור וסיכם אותן, כך שהסטייה המצטברת אפשרה לו כדי להגיע לדיוק מקסימלי. הסטייה המצטברת במהלך חצי השנה היא תוצאה של ההתרחקות (האנכית) של כדור הארץ מצדק בתקופה זו, וגודלה נמדד על ידי רומר: 22 דקות. התרחקות זו שווה בדיוק לקוטר המסלול של כדור הארץ (איור 6).

קוטר מסלול כדור הארץ סביב השמש היה כבר מוערך בזמנו בכ-286 מיליון ק"מ. רומר נעזר בנתון זה וחישב את מהירות האור ע"י חלוקת מרחק זה בתוספת המצטבר של זמן המחזור בין הנקודות הקיצוניות, הקרובה והרחוקה:

$$c_{romer} = \frac{2.86 \cdot 10^6}{22 \cdot 60} \cong 2.17 \cdot 10^5 \frac{km}{s}$$

נפרט את אופן איסוף הנתונים והחישוב של מהירות האור בניסוי של רומר.

זמני המחזור של איז כפי שנמדדו במהלך חצי שנה (N מדידות) יסומנו: $T_0, T_1 \dots T_N$. את המרחק

שמתרחק כדור הארץ מצדק בין שתי מדידת זמן המחזור נסמן: $d_1, d_2 \dots d_N$, כאשר הקשר בין הפרש המרחקים והפרש מדידת זמני המחזור יהיה פשוט:

$$T_1 - T_0 = d_1 / c$$

...

$$T_N - T_{N-1} = d_N / c$$

אם נחבר את סדרת המשוואות נקבל:

$$T_N - T_0 = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_N}{c}$$

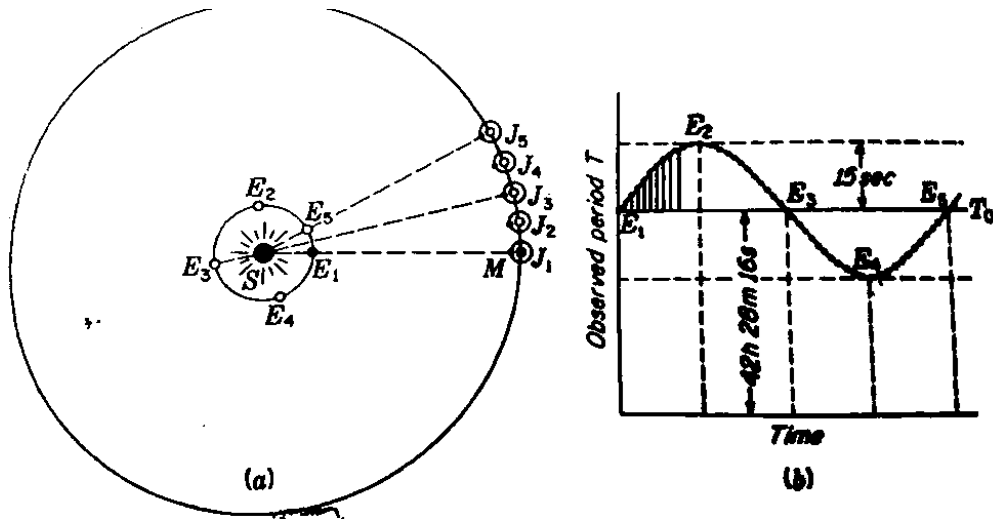
האגף השמאלי של המשוואה הוא ההתארכות המצטברת של זמני המחזור (22 דקות). באגף הימני נחלק את ההתארכות הכוללת, השווה לקוטר מסלול כדה"א סביב השמש (D_E) חלקי מהירות האור.

$$d_1 + d_2 + \dots + d_N = D_E$$

$$T_N - T_0 = \frac{D_E}{c}$$

באופן זה חישב רומר את מהירות האור, וקיבל כאמור מהירות של 217,000 ק"מ בשנייה. מהירות זו נמדדה ועודכנה עד ימינו אנו, אך עדיין עומדת בסדר גודל מתאים ונכון. בהמשך ניסו מדענים לחזור על מדידותיו של רומר. שינוי זמן המחזור היה בין 14 ל 28 דקות. גם הקוטר של מסלול כדה"א נמדד בדיוק גדול יותר עם השנים לכ-300 מיליון ק"מ. אמנם רומר בתוצאת ניסויו החסיר

כ- 83,000 ק"מ לשנייה מהמהירות הידועה כיום (כ-300,000 ק"מ לשנייה) אבל תרם מידע עם ודאות למהירות האור כסופית ואף כיוון לסדר הגודל הנכון של מהירות האור. איור 3 מתאר את אופן החישוב.



איור 7 - הקשר בין מיקומי כדור הארץ וצדק (ביחס לשמש) וזמן המחזור הנצפה של איו (מתוך: "Fundamentals of Optics", מאת denkins&white).

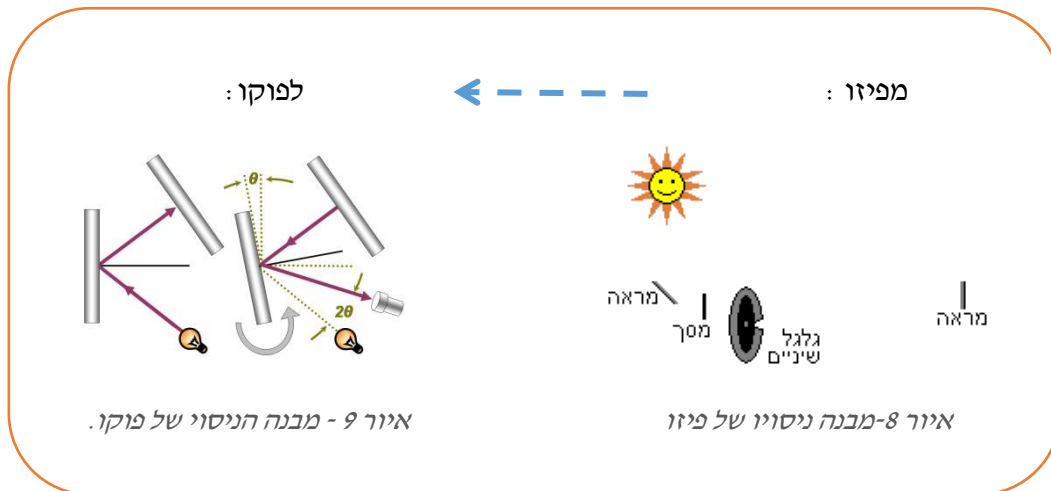
בחלק השמאלי של האיור (a) ניתן לראות את המיקומים של כדור הארץ (E_n) ושל צדק (J_n) ביחס לשמש (המיקום של איו הוא בקרוב טוב המיקום של צדק). בכל תצפית של יציאה או כניסה של איו לליקוי האור שמגיע מאיו עובר את המרחק JE_n . ההפרש בין מרחק JE_n ל- jE_{n+1} (כלומר ההפרש בין המרחק של צדק מכדור הארץ בליקוי ביציאה מליקוי אחד ליציאה הבאה מליקוי) חלקי מהירות האור ייתן את הפרש הזמנים הנמדד בין זמני מחזור של איו. אפשר לראות בצד ימין של האיור (b) גרף המתאר את זמן המחזור הנצפה של איו כפונקציה של הזמן (בתקופה של קצת יותר משנה ארצית). כאשר כדור הארץ נמצא במיקומים 1 ו-3 שבאיור הוא נע כמעט אנכית לקו המחבר בינו לבין צדק ולכן המרחק ביניהם כמעט ולא משתנה בזמן מחזור אחד של איו וזמן המחזור הנמדד הוא זמן המחזור "האמיתי". כאשר כדור הארץ נמצא במיקומים 2 ו-4 הוא נע במקביל לקו המחבר אותו לצדק ולכן המרחק ביניהם משתנה באופן הניכר ביותר תוך זמן מחזור אחד של איו ומקבלים זמן מחזור מקסימלי (במיקום מספר 2 כאשר כדור הארץ מתרחק מצדק) או מינימאלי (במיקום 4 כאשר כדור הארץ מתקרב לצדק).

2.6.3 התפתחות מדידת מהירות האור מרומר עד ימינו

בתת פרק זה נתאר את ההתפתחות שחלה במדידת מהירות האור עד לימינו.

- ג'ימס ברדלי, 1727: 50 שנה לאחר פרסום תגליתו של רומר, ברדלי גילה כי מיקומם של הכוכבים בשמיים משתנה לפי כיוון תנועתו של כדור הארץ. ההסבר שהוא נתן לתופעה היה חיבור וקטורי של מהירות האור והמהירות המשיקית של הצופה. מדידה זו ידועה בתור אברציה כוכבית – הסתה של מיקום כוכב נצפה ע"י צופה מכדור הארץ הנובעת מתנועת כדה"א ומהירות האור. ברדלי, שהבין שהסתת המיקום האמיתי נובעת מהיחס בין מהירות האור ומהירותו המשיקית של כדה"א נעזר בתגליתו לחישוב מהירות האור. רק לאחר מדידה זו התקבלה טענתו של רומר כי מהירות האור היא סופית. בחישוביו בשנת 1728 הגיע לתוצאה של 301,000 ק"מ לשנייה.

- **דלמבר, 1809** : באמצעות תצפיות מדויקות יותר על איו, הגיע למהירות האור המדויקת יותר, מעט יותר מ-300,000 ק"מ לשנייה.
- **היפו פיזו, 1849** : הגה רעיון למדידת מהירות האור על פני כדור הארץ. בהצבת 2 מראות המרוחקות 8,600 מטר האחת מהשנייה וגלגל שיניים עם חריץ אשר מהירות סיבובו ניתנת לשליטה ומדידה (תרשים 1) חישב פיזו את מהירות האור כ 315,000 ק"מ לשנייה. פוקו, חברו ללימודים של פיזו, שיפר את הרעיון ובעזרת 2 מראות מסתובבות במהירות ידועה ומדידת הזווית שבה הקרן חוזרת (תרשים 2) הצליח לחשב את מהירות האור בדיוק רב יותר, 298,000 ק"מ לשנייה.



- **אלברט אברהם מייקלסון, 1882** : לאחר הגיית הרעיון לשילוב עדשות לניסוי של פוקו, המליץ למקד את קרן האור להרחיק בין המראות למרחק של 600 מטר ובכך לשפר את הדיוק. מייקלסון מדד מהירות מדויקת של 299,853 ק"מ לשנייה. בשנת 1926 חזר מייקלסון עם חברו מורלי על המדידה בצורה מדויקת יותר ומצא את המהירות 299,796 ק"מ לשנייה עם טעות מרבית של 4 ק"מ לשנייה.
- **לואיס איסון וגורדן סמיטס, 1947** : יצרו "חלל תהודה" לתוכו הוכנסו גלים עם תדר ידוע הם מדדו את אורך הגל הנוצר, וחישבו את מהירות האור בדיוק מרשים של 3 ק"מ לשנייה. מהירות האור בשלב זה התייצבה על 299,792 ק"מ לשנייה.
- **קייט פרום, 1958** : הוסיף רמת דיוק נוספת בעזרת אינטרפרומטר רדיו שאפשר לו למדוד את מהירות האור : 299,792.5 ק"מ לשנייה בדיוק של 0.1 ק"מ לשנייה!
- **אוונסון, 1973** : בעזרת מערכת לייזר הצליח לשפר הדיוק עוד יותר והגיע במדידותיו לערך : 299,792.458 ק"מ לשנייה. בדיוק של 0.001 (מטר אחד לשנייה)!

מהירות האור ברמת הדיוק הגבוהה ביותר, ממנה נגזרת הגדרת המטר (1983), מתקבלת ממשוואות מקסוול. מקסוול הראה שמהירות האור בריק :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

ϵ_0 - מקדם דיאלקטרי של הריק, μ_0 - מקדם המגנטיות של הריק.

3. כלים ושיטות לתצפית בצדק וירחיו

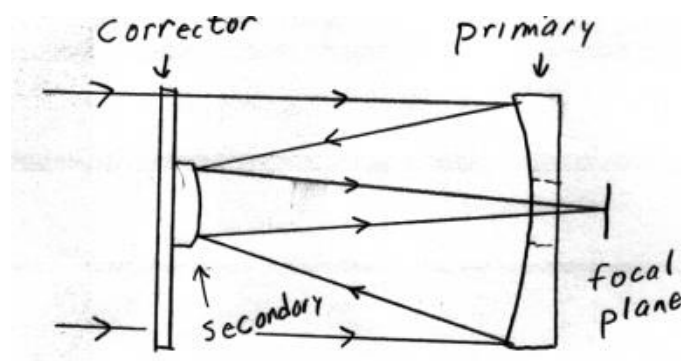
אחרי שהכרנו את ניסויים של קאסיני ורומר החלטנו לשחזר את הניסוי של רומר ולמדוד בעצמנו את מהירות האור על ידי תזמון יציאות של איו מהצל של צדק. כמו שראינו בפרק 2.6.2 מספיקים, בעיקרון, ארבעה תזמונים של היציאות והכניסות של איו מהצל - שני תזמוני יציאה מהצל בשלב בו כדור הארץ מתרחק מצדק ושני תזמוני כניסה לצל בשלב בו הוא מתקרב. כשהתחלנו לנסות לבצע תצפיות של יציאת איו מהצל התברר לנו שזה לא פשוט. בשביל לצפות באירוע כזה חייבים, בתר התחלה, שהוא יתרחש בלילה (ביום כמובן לא רואים אף גרם שמים פרט לשמש). גם כאשר האירוע מתרחש בלילה לא תמיד אפשר לחזות בו-עננים, אובך, גשם וקרבה לירח - כל אלה גורמים שיכולים לפגוע בתצפית. לבסוף, גם כאשר כל התנאים מתאימים לא תמיד המצפה פנוי עבור התצפית שלנו.

החלטנו ליצור קשר עם אוניברסיטת גלזגו (ראו פרק 3.3) ולקבל מהם נתונים של זמני הכניסות והיציאות של איו מהצל. בתמורה לנתונים דרשו נציגי המאגר בגלזגו שנשלח להם נתונים של שתי תצפיות שאנחנו נבצע. לכן נדרשנו בסוף לבצע שתי תצפיות מוצלחות בהם נתזמן את היציאה של איו מהצל של צדק. בפרק זה אנחנו מציגים את הכלים והשיטות הקשורים בתצפיות אלו. בפועל הצלחנו לבצע רק תצפית אחת מוצלחת של יציאת איו מהצל. ולכן, בעקבות אי שיתוף פעולה מצידה של גלזגו, את תאריכי היציאות והכניסות מהצל לקחנו מהאתר של CELA (ועדת הקישור הצרפתית בין מורים ואסטרונומים).

3.1. טלסקופ

הטלסקופ שיש במצפה של מכון ויצמן הוא מתוצרת החברה האמריקאית Meade מודל LX200 ACF.

טלסקופ זה הוא מסוג קטדיופטרי, כלומר, מורכב מ-3 אלמנטים - עדשה קדמית, מראה ראשית וכן מראה משנית המחזירה את קרני האור אל מרכז המוקד המצוי בחלק האחורי של המכשיר (ראה איור). באמצעות מבנה כזה ניתן להגדיל את אורך המוקד בפועל בלי להאריך פיזית את אורך הטלסקופ. מפתח הטלסקופ הוא 16 אינץ' (כ-41 ס"מ). שדה הראייה שלו הוא 11.1×16.6 דקות קשת באורך מוקד של $f/7$.



איור 10: מבנה סכמתי של טלסקופ קטדיופטרי

3.2. מצלמת ה- CCD

מצלמת ה- CCD במצפה הינה מסוג ST8-XME מתוצרת חברת Santa Barbara Instrument Group (SBIG) בעלת רזולוציה של 1,020 x 1,530 פיקסלים. מצלמת CCD היא בפועל מטריצה של תאים פוטואלקטריים (פיקסלים) שמתרגמים אור (פוטונים) לזרמים חשמליים. כאשר פוטון פוגע בפיקסל הוא מעביר את האנרגיה שלו לאלקטרון שנמצא באטום המתכת הנמצאת בפיקסל והאלקטרון משתחרר (זהו האפקט הפוטואלקטרי). האלקטרונים משתחררים נאגרים במעין בורות פוטנציאל. כאשר קוראים את התמונה בעצם סופרים את האלקטרונים שנאגרו בכל פיקסל ומתרגמים אותם לעוצמת אור- כלומר כמות האלקטרונים פרופורציונית לכמות הפוטונים שפגעו בפיקסל. בעזרת המצלמה והפילטרים (מסננים) אפשר לקבל מידע רב על האור הנקלט בטלסקופ (לפי אורכי גל, שטף פוטונים וכו'). איכות המצלמה תלויה במספר הפיקסלים ובמספר הרמות (גוונים) שהמצלמה יודעת לקרוא – כלומר עד כמה היא רגישה למספר הפוטונים המדויק. אנחנו השתמשנו במצלמה כמצלמה "רגילה" על מנת לקבל תמונה ברורה של צדק וירחיו ומיקום הכתם האדום הגדול. ליצירת התמונות השתמשנו בפילטר מסוג H-Alpha, המעביר אורכי גל בתחום צר של 656.3 ננומטרים.

3.3. מערך הנתונים של אוניברסיטת גלזו

שנת 2015 הוכרזה על ידי אונסק"ו כשנת האור (וטכנולוגיות מבוססות-אור) הבינלאומית. במסגרת שנה זו ואירועיה המרובים ברחבי העולם השיקה אוניברסיטת גלזו ניסוי אזרחי למדידת מהירות האור. הרעיון הוא לשלב מדידות רבות של זמני ליקויי הירחים של צדק על ידי אסטרונומים חובבים ומומחים מכל העולם, וזאת על מנת לשחזר את הניסוי ההיסטורי של רומר. על פי אתר הניסוי, נתוני המדידות יהיו פתוחים לצפייה לקהל הרחב וגם ישמשו בתכניות לימודים במערכת החינוך הסקוטית.

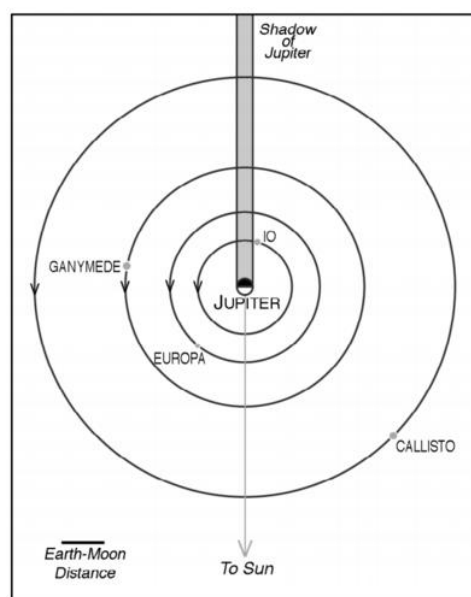
על המעוניינים להשתתף בניסוי לצפות ולתזמן, בדיוק של דקה ומטה, כניסה או יציאה של אחד מארבעת הירחים הגליליאניים לאזור הצל של צדק. ניתן גם לתזמן אירועי כניסה או יציאה מאחורי צדק עצמו (הסתרות) וכן אירועים אחרים (התקבצות שני ירחים, טרנזיטים). על הצופים לפרט את הירח בו צפו, את טיב האירוע (כניסה/יציאה, ליקוי/הסתרה) וכן את זמן האירוע, מקום התצפית, סוג הטלסקופ והמצלמה ומצב השמיים. כיון שמדובר באיסוף תצפיות רבות (בתקווה) ומיצוען אין צורך בדיוק מאוד גדול בזמנים.

כמו שכתבנו בתחילת פרק זה, לצורך שחזור החישוב של רומר בעבודה זו פנינו לאחראים על הניסוי מאוניברסיטת גלזו בבקשה לקבל את הנתונים שאספו בינתיים והם נענו אך ביקשו שנוסיף מדידות משלנו למאגר. מאחר שהתקשינו לעמוד במשימה זאת, ובשל חוסר היענות של האחראים מגלזו לסייע לנו, ויתרנו על השימוש במאגר נתונים זה.

4. מדידות

4.1. הגדרת ותזמון הליקויים של ירחי צדק

כפי שהסברנו בפרקים הקודמים (ראו פרק 2.6.2), כדי לשחזר את מדידת מהירות האור נרצה למדוד את זמני המחזור של ירחי צדק בדיוק גבוה ככל הניתן. על מנת למדוד זמן מחזור אנו זקוקים לנקודה קבועה במסלול (כל חזרה לנקודה היא מחזור אחד), ובמסלולי הירחים של צדק הנקודות בהם הם חולפים לפני או מאחורי הדסקה של צדק יכולים לשמש כנקודות כאלו. ליקוי הוא אירוע אסטרונומי בו גרם שמיים נכנס לאזור הצל של גרם שמיים אחר ובמקרה שלנו מדובר בכניסה של הירחים הגליליאניים לצל של צדק הנוצר כתוצאה מהארת השמש על כוכב הלכת. באמצעות מעקב מדויק אחרי זמני הליקויים של ירחי צדק אנו יכולים ללמוד על מיקומם ועל מסלולם סביב צדק. לכאורה ניתן היה לעקוב אחר מסלולי הירחים של צדק גם באמצעות תזמון הטריזיטים (מעברים) שלהם על פני צדק או מעבריהם מאחורי צדק (הסתרות) אך למעשה קביעת זמן ההתרחשות של אירועים אלו הוא סבוך ולא מדויק (ובנוסף קשה מאוד להבחין בירח כאשר הוא עובר על-פני דסקת כוכב הלכת, עקב הקונטרסט הנמוך של הירח מפני צדק). הליקוי מתחיל בחדירת הירח לאזור הצל ומסתיים בהופעתו חזרה כאשר הוא יוצא מאזור זה. אנו נבקש לתזמן במדויק את זמני הכניסה או היציאה עצמם שהם אירועים מתמשכים (עובר זמן מהרגע שירח מתחיל את כניסתו לאזור הצל ועד שהוא מוצל במלואו וכך גם עבור היציאה). משך זמן הכניסה/היציאה עצמו משתנה בין הירחים, כאשר עבור איו, הירח הקרוב ביותר לצדק, מדובר בכ-4.5 דקות, עבור אירופה בכ-6 דקות ועבור גנימד וקליסטו המרוחקים יותר - בין רבע שעה לשעתיים. השוני נובע ממהירותם הנמוכה של הירחים החיצוניים יותר, (על פי חוקי קפלר), מקוטרים הגדול יותר וכן מהתרחבות הצל של צדק ככל שמתרחקים ממנו. מדובר באירוע קצר (ודאי עבור איו ואירופה) ולכן כדי לצפות בו נצטרך לדעת מראש את זמני התרחשותו.



איור 11: מסלולי ירחי צדק והצל שמטיל צדק.

אנו נתמקד בתצפיותינו בליקויים של איו בלבד משום שזמן המחזור שלו הוא הקצר ביותר ולכן ליקוי שלו הוא האירוע השכיח ביותר ונוכל לאסוף עליו את מירב הנתונים. יתרון נוסף בתזמון הליקויים של איו הוא שמשך הכניסה והיציאה שלו הם הקצרים ביותר ולכן השגיאה בתזמונה תהיה קטנה יותר.

בכוונתנו לתעד את כל הליקוי של איו, אך כדי לבצע את החישובים הדרושים לנו נצטרך תזמון מדויק של רגע הכניסה או היציאה מהצל. על מנת לתזמן את האירועים הללו בצורה מדויקת ככל האפשר נצטרך להגדיר אותם באופן ברור: נגדיר את רגע הכניסה של איו לצל להיות אותו רגע שבו כל הדסקה של איו נעלמת בצל של צדק. זהו הרגע שבו נראה את "הנימה האחרונה" (last speck) של איו נעלמת בצלו של צדק. בחרנו להגדיר כך את רגע הכניסה משום שבניגוד לרגע של ההשקה הראשונה לצל שיכול להיות נתון לתזמונים שונים של צופים שונים (האם כבר נגע בצל או שעדיין לא), רגע ההיעלמות של איו בצל הוא רגע יותר 'חד' מבחינה תצפיתית. את רגע היציאה נגדיר, מאותם שיקולים, כרגע בו מופיעה שוב נימת האור הראשונה של איו.

ליקוי של ירחי צדק איננו תמיד אפשרי לצפייה. ראשית, צריך שצדק עצמו יהיה מעל לאופק בלילה (כלומר - באלונגציה גדולה, במרחק זוויתי גדול מהשמש). אם הוא מתחת לאופק לא ניתן לראותו, ואם הוא מעל האופק ביום אור השמש לא מאפשר תצפית. גם כאשר צדק מופיע בשמי הלילה, צדק עצמו (ולא הצל שלו) עלול להסתיר את הירח בזמן כניסתו או יציאתו מהצל לצופה מכדור הארץ. למשל, כאשר צדק נמצא קצת לפני הניגוד שלו ביחס לשמש (opposition) לא ניתן לצפות ביציאות של איו וכאשר צדק מעט אחרי הניגוד לא ניתן לצפות בכניסות של איו¹.

לאור נתונים אלו עלינו לתכנן בקפידה רבה את מועדי התצפית. לצורך כך ניעזר באתר האינטרנט "sky&telescope.com", המאפשר חישוב של מועדים אלו עבור צופה בכל נקודה על פני כדור הארץ. על הקשיים הנוספים בהם נתקלנו בקביעת מועדי התצפית נרחיב בפרק המדידות.

4.2. התצפיות שלנו על ליקויי איו

כאמור לעיל, נתבקשנו להוסיף תצפיות משלנו למאגר של אוניברסיטת גלזגו. בחרנו להתמקד בליקויים של איו השכיחים והפשוטים יותר לתזמון. במיקום בזמן בו ערכנו את התצפיות (ינואר עד אפריל 2016, מכון ויצמן) היה ניתן לצפות ביציאה של איו מהצל של צדק (egress), וניסינו לתפוס כמה שיותר אירועים כאלו בצורה ברורה. כפי שהוסבר בפרק 3.3 - לא תמיד הליקוי אפשרי לצפייה, וגם כאשר הוא היה זמין גילינו שקשיי מזג אויר, זמינות הטלסקופ ואי דיוקים בטבלאות שהסתמכנו עליהן הפכו את המשימה ללא פשוטה ונדרשו לא מעט ניסיונות על מנת "ללכוד" את היציאה של איו. מניסיונות אלו למדנו על המורכבות שבתכנון תצפית אסטרונומית ועל הדרכים להתמודד עם הקשיים הכרוכים בה.

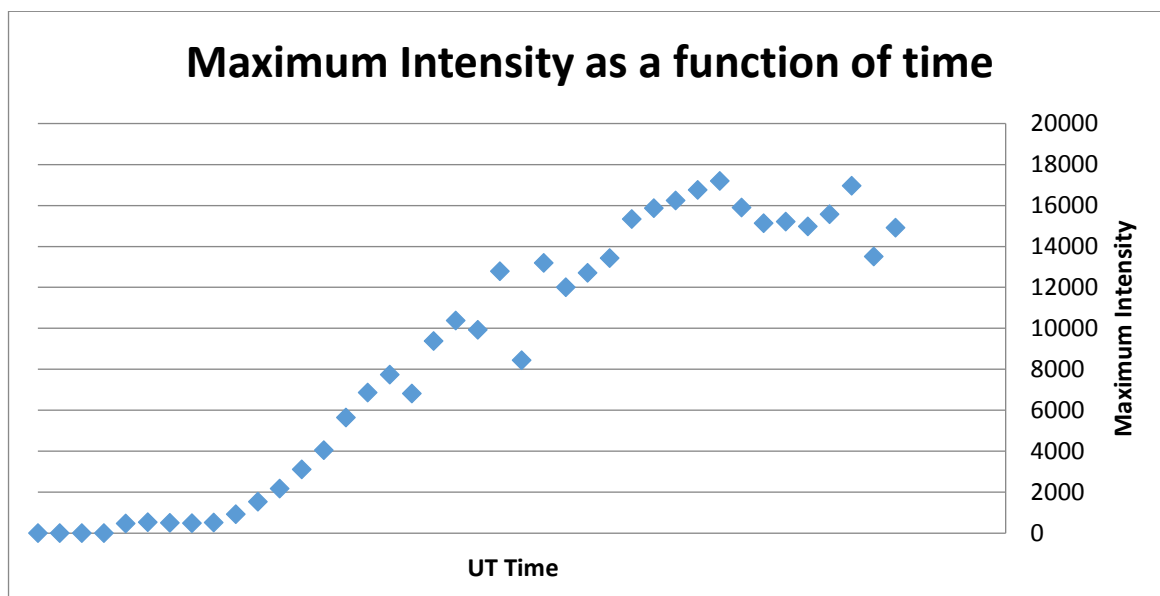
¹ על פי E, J, Westfall, במאמרו (2005) *Timing the Eclipses of Jupiter's Galilean Satellites*, עמוד 1.

כמובן שעל מנת למדוד את מהירות האור בשיטה של רומר הזדקקנו למאגר של נתונים. בתת פרק זה נתאר תצפית אחת שערכנו אנחנו ואת הנתונים והמסקנות שהפקנו ממנה. נתמקד בתצפית מוצלחת שנערכה ב-18.4.16, בין השעות 16: 52 ל- 17: 00 (UT time). ראשית נציג את מדידות עוצמת האור כתלות בזמן שקיבלנו מהתצפית. עוצמת האור חשובה לצורך קביעת הזמן המדויק בו איו יוצא במלוא היקפו מהצל של צדק. להלן מדידות עוצמת האור (ביחידות ארביטרריות, מ- 0 עד 63,999) של איו במשך זמן ההתגלות שלו, בטבלה ובגרף. הזמנים המצוינים הם של תחילת הצילום, כאשר אורך כל צילום הוא 6 שניות, והמרווח בין הצילומים הוא 12.6 שניות (זהו הזמן שלוקח לתוכנה להוריד את התמונה מהמצלמה).

Io Egress From Shadow	
UT (Exposure Start)	Time Maximum Intensity
16:52:45.70	0
16:52:58.10	0
16:53:10.77	0
16:53:23.21	0
16:53:35.89	473
16:53:48.43	534
16:54:01.24	502
16:54:13.82	496
16:54:26.29	525
16:54:38.93	920
16:54:51.54	1534
16:55:04.05	2185
16:55:16.63	3115
16:55:29.20	4047
16:55:41.78	5652
16:55:54.33	6868
16:56:06.97	7739
16:56:19.54	6821
16:56:32.07	9375
16:56:44.65	10386
16:56:57.26	9932
16:57:09.74	12790
16:57:22.40	8452
16:57:35.01	13202
16:57:47.64	12009
16:58:00.33	12711
16:58:12.88	13424
16:58:25.61	15340
16:58:38.26	15863
16:58:50.82	16235

16:59:03.43	16759
16:59:15.99	17198
16:59:28.56	15900
16:59:41.11	15130
16:59:53.82	15210
17:00:06.47	14979
17:00:19.16	15569
17:00:32.26	16954
17:00:44.85	13503
17:00:57.46	14915

טבלה 1: הבהירות של איו במשך זמן יציאתו מהצל של צדק.



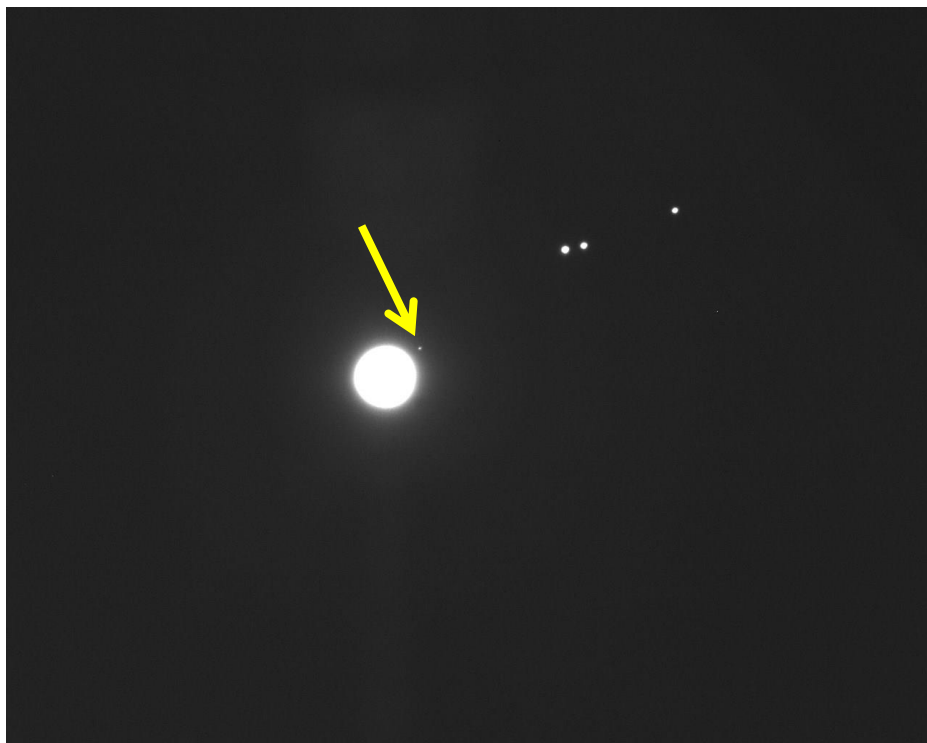
איור 12: גרף הבהירות של איו כפונקציה של הזמן, במשך זמן יציאתו מהצל של צדק.

ניתן לראות בבירור שעוצמת האור הולכת ועולה, והסיבה לכך היא שאיו איננו נקודתי אלא יש לו גודל זוויתי (מנקודת ראותנו גודלו 1.2 שניות קשת) ולכן הוא מתגלה בהדרגה, עד ליציאה מלאה ועוצמת הארה מקסימלית.

הנתונים שהצגנו עובדו מתוך תמונות, נציג כאן שלוש תמונות המציגות את ההתגלות של איו :



תמונה 1 : צילום מספר 1. איו בצל של צדק ולכן לא נראה. מצד ימין למעלה נראים אירופה, גנימד וקליסטו (מימין לשמאל).



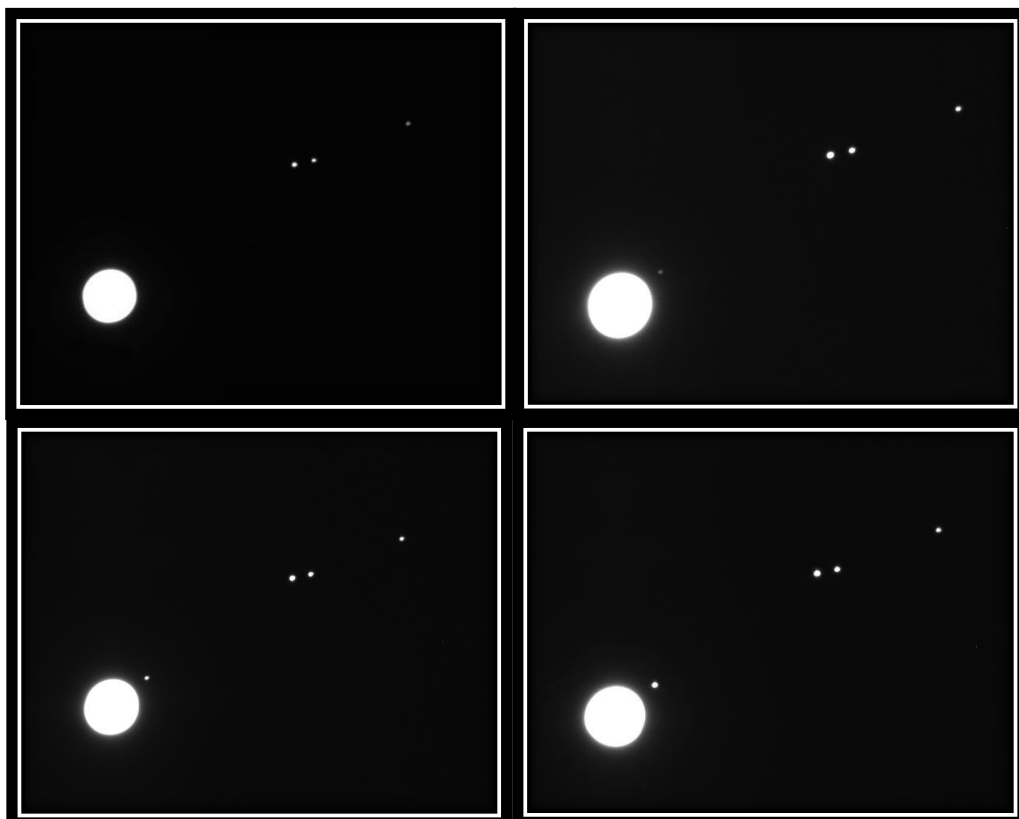
תמונה 2 : צילום מספר 10. ניתן להבחין באיו (מסומן בחץ הצהוב) ביציאתו מהצל של צדק, כשהוא עדיין לא בעוצמה מקסימלית. עוד ניתן לראות שעל מנת להבחין באיו החלש יש לצפות בתמונה בניגודיות גבוהה יותר.



תמונה 3 : צילום מספר 30. ניתן להבחין בבירור באיו, המאיר בעוצמה כמעט מקסימלית.

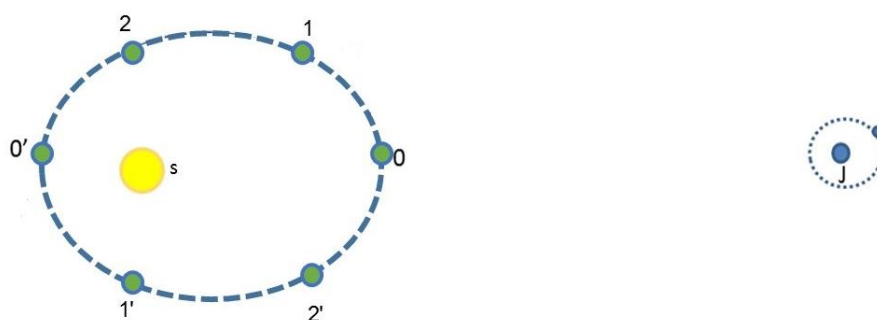
על מנת להבחין בירחי צדק (המאירים בעוצמה חלשה יחסית לצדק) יש להגביר מאוד את הניגודיות של התמונות, עד שצדק נראה ככתם אור ולא ניתן להבחין בפרטים שעל פניו ובשכבות האטמוספירה שלו. תמונה בניגודיות נמוכה הייתה אמנם מאפשרת תמונה מפורטת של צדק אך מעלימה את ירחיו. תמונה המשלבת את שתי התופעות חייבת להיות מורכבת.

נציג את התמונות גם יחד כרצף, על מנת להבחין טוב יותר בתהליך הופעתו של איו :



4.3. מדידת מהירות האור בשיטת רומר

כפי שציינו בפרק 3.3 לא הצלחנו לצרף את זמני הופעת איו שמדדנו למערך הנתונים של אוניברסיטת גלוגו, ולכן נאלצנו להשתמש בנתונים ישנים יותר. מצאנו באתר של CELA (ועדת הקישור הצרפתית בין מורים ואסטרונומים) בסיס נתונים של זמני הליקויים של איו בשנים 1995-1996. בתקופה של בסיס הנתונים כדור הארץ מבצע שתי הקפות סביב השמש. מכיוון שהמדידה דורשת השוואה בין זמנים בהם כדור הארץ מתקרב לצדק לזמנים בהם הוא מתרחק ממנו, בסיס הנתונים הזה מאפשר לנו שלוש השוואות כאלו. כאן נפרט את החישוב לפי המדידה שמשווה בין המחצית השנייה של שנת 1995 (בה כדור הארץ מתרחק מצדק מנקודה 0 לכיוון נקודה 0') למחצית הראשונה של שנת 1996 (בה כדור הארץ מתקרב לצדק מנקודה 0' לנקודה 0).



איור 13: איו (מסומן ב-I), צדק (מסומן ב-J), כדה"א (בירוק, במיקומים שונים) והשמש (מסומנת ב-S). המיקומים השונים של כדור הארץ ממחישים את המיקום שלו ביחס לשמש בזמני יציאת איו מהצל של צדק (מיקומים 0, 1 ו-2) כשהוא מתרחק מצדק, וכחצי שנה אחר כך בזמני כניסת איו לצל (מיקומים 0', 1' ו-2') כשהוא מתקרב לצדק. כשכדור הארץ מתרחק מצדק זמן המחזור הנמדד של איו הוא זמן המחזור האמיתי ועוד הזמן שלקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התרחק מצדק בזמן זה (בקירוב המרחק בין מיקום 0 ל-1 או המרחק בין 1 ל-2). כשכדור הארץ מתקרב לצדק זמן המחזור הנמדד של איו הוא זמן המחזור האמיתי פחות הזמן שייקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התקרב לצדק בזמן זה (בקירוב המרחק בין מיקום 0' ל-1' או המרחק בין 1' ל-2').

מספר מדידה	תאריך ושעת יציאה מהצל	מספר מדידה	תאריך ושעת יציאה מהצל	מספר מדידה	תאריך ושעת יציאה מהצל
00	02/06/95 08:06	34	01/08/95 12:20	68	30/09/95 16:40
01	04/06/95 02:34	35	03/08/95 06:48	69	02/10/95 11:09
02	05/06/95 21:03	36	05/08/95 01:17	70	04/10/95 05:37
03	07/06/95 15:31	37	06/08/95 09:56	71	06/10/95 00:06
04	09/06/95 10:00	38	08/08/95 14:15	72	07/10/95 18:35
05	11/06/95 04:28	39	10/08/95 08:44	73	09/10/95 13:04
06	12/06/95 22:57	40	12/08/95 03:12	74	11/10/95 07:33
07	14/06/95 17:25	41	13/08/95 21:41	75	13/10/95 02:01
08	16/06/95 11:54	42	15/08/95 16:10	76	14/10/95 20:30

09	18/06/95 06:22	43	17/08/95 10:39	77	16/10/95 14:59
10	20/06/95 00:51	44	19/08/95 05:08	78	18/10/95 09:28
11	21/06/95 19:20	45	20/08/95 23:26	79	20/10/95 03:57
12	23/06/95 13:48	46	22/08/95 18:05	80	21/10/95 22:26
13	25/06/95 08:17	47	24/08/95 12:34	81	23/10/95 16:54
14	27/06/95 02:45	48	26/08/95 07:03	82	25/10/95 11:23
15	28/06/95 21:14	49	28/08/95 01:32	83	27/10/95 05:52
16	30/06/95 15:43	50	29/08/95 20:00	84	29/10/95 00:21
17	02/07/95 10:11	51	31/08/95 14:29	85	30/10/95 18:50
18	04/07/95 04:40	52	02/09/95 08:58	86	01/11/95 13:18
19	05/07/95 23:09	53	04/09/95 03:27	87	03/11/95 07:47
20	07/07/95 17:37	54	05/09/95 21:56	88	05/11/95 02:16
21	09/07/95 12:06	55	07/09/95 16:25	89	06/11/95 20:45
22	11/07/95 06:35	56	09/09/95 10:54	90	08/11/95 15:13
23	13/07/95 01:03	57	11/09/95 05:22	91	10/11/95 09:42
24	14/07/95 19:32	58	12/09/95 23:51	92	12/11/95 04:11
25	16/07/95 14:01	59	14/09/95 18:20	93	13/11/95 22:40
26	18/07/95 08:30	60	16/09/95 12:49	94	15/11/95 17:09
27	20/07/95 02:58	61	18/09/95 07:18	95	17/11/95 11:37
28	21/07/95 21:27	62	20/09/95 01:47	96	19/11/95 06:06
29	23/07/95 15:56	63	21/09/95 20:15	97	21/11/95 00:35
30	25/07/95 10:24	64	23/09/95 14:44	98	22/11/95 19:04
31	27/07/95 04:53	65	25/09/95 09:13		
32	28/07/95 23:22	66	27/09/95 03:42		
33	30/07/95 17:51	67	28/09/95 22:11		

חשוב לציין שבאותה שנה הזמן בו כדור הארץ וצדק היו קרובים ביותר (בניגוד) היה סמוך מאד ליום הארוך ביותר בשנה. יוצא שבזמן הניגוד כדור הארץ נמצא קרוב מאד ל"קצה האליפסה" של המסלול שלו (כלומר הנקודה 0 היא גם הנקודה בה ארץ וצדק הכי קרובים וגם הנקודה בה כדור הארץ רחוק ביותר מהשמש). תזמון כזה כמובן לא קורה כל שנה מכיוון ששנתו של צדק היא בערך 12 שנים של ארץ. עובדה זו מסייעת לנו להשתמש בקירוב של המרחק שכדור הארץ עבר בתקופת המדידה – המרחק שהוא עובר בחצי שנה.

להלן נתוני הזמנים של התקופות הרלוונטיות :

מספר מדידה	תאריך ושעת כניסה לצל	מספר מדידה	תאריך ושעת כניסה לצל	מספר מדידה	תאריך ושעת כניסה לצל
00	14/01/96 19:09	34	14/03/96 23:15	68	14/05/96 03:18
01	16/01/96 13:38	35	16/03/96 17:44	69	15/05/96 21:46
02	18/01/96 08:06	36	18/03/96 12:12	70	17/05/96 16:15
03	20/01/96 02:35	37	20/03/96 06:40	71	19/05/96 10:43
04	21/01/96 21:03	38	22/03/96 01:29	72	21/05/96 05:11
05	23/01/96 21:03	39	23/03/96 19:37	73	22/05/96 23:40
06	25/01/96 10:00	40	25/03/96 14:05	74	24/05/96 18:08

07	27/01/96 04:29	41	27/03/96 08:34	75	26/05/96 12:36
08	28/01/96 22:57	42	29/03/96 03:02	76	28/05/96 07:05
09	30/01/96 17:25	43	30/03/96 21:30	77	30/05/96 01:33
10	01/02/96 11:54	44	01/04/96 15:59	78	31/05/96 20:01
11	03/02/96 06:22	45	03/04/96 10:27	79	02/06/96 14:30
12	05/02/96 00:51	46	05/04/96 04:55	80	04/06/96 08:58
13	06/02/96 19:19	47	06/04/96 23:24	81	06/06/96 03:26
14	08/02/96 13:48	48	08/04/96 17:52	82	07/06/96 21:55
15	10/02/96 08:16	49	10/04/96 12:20	83	09/06/96 16:23
16	12/02/96 02:45	50	12/04/96 06:48	84	11/06/96 10:52
17	13/02/96 21:13	51	14/04/96 01:17	85	13/06/96 05:20
18	15/02/96 15:41	52	15/04/96 19:45	86	17/06/96 23:48
19	17/02/96 10:10	53	17/04/96 14:13	87	16/06/96 18:17
20	19/02/96 04:38	54	19/04/96 08:42	88	18/06/96 12:45
21	20/02/96 23:07	55	21/04/96 03:10	89	20/06/96 07:14
22	22/02/96 17:35	56	22/04/96 21:38	90	22/06/96 01:42
23	24/02/96 12:03	57	24/04/96 16:07	91	23/06/96 20:11
24	26/02/96 06:32	58	26/04/96 10:35	92	25/06/96 14:39
25	28/02/96 01:00	59	28/04/96 05:03	93	27/06/96 09:08
26	29/02/96 19:29	60	29/04/96 23:31	94	29/06/96 03:36
27	02/03/96 13:57	61	01/05/96 18:00	95	30/06/96 22:04
28	04/03/96 08:25	62	03/05/96 12:28	96	02/07/96 16:33
29	06/03/96 02:54	63	05/05/96 06:56		
30	07/02/96 21:22	64	07/05/96 01:25		
31	09/03/96 15:50	65	08/05/96 19:53		
32	11/03/96 10:19	66	10/05/96 14:21		
33	13/03/96 04:47	67	12/05/96 08:50		

הסבר על חישוב מהירות האור:

$t_0 = 02/06/95 08:06$: נסמן את המועד הראשון בטבלה של יציאה מהצל :

$t_1 = 04/06/95 02:34$: ואת המועד השני בטבלה של יציאה מהצל :

הפרש הזמנים בין שתי היציאות מהצל יסומן ב - Δt_1 :

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = 1.7694 \text{ day}$$

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקויים שווה לזמן המחזור של הקפת אין את צדק (להלן T) ועוד הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התרחק מצדק בזמן המחזור הזה (נסמן ב T_1). כלומר :

$$\Delta t_1 = T + T_1$$

כעת נחזור על אותו תהליך עבור הפרש הזמנים בין המועד השלישי של יציאה מהצל ($t_2 = 05/06/95 21:03$) לשני ונקבל :

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = 1.7701 \text{ day}$$

וכמוכן שגם פה $\Delta t_2 = T + \tau_2$. אם נחבר את שני הפרשי הזמנים נקבל :

$$\Delta t_2 + \Delta t_1 = T + \tau_2 + (T + \tau_1) = 2T + \tau_2 + \tau_1 = 3.5395 \text{ day}$$

נשים לב ש :

$$\Delta t_2 + \Delta t_1 = t_2 - t_1 + (t_1 - t_0) = t_2 - t_0$$

ולכן כדי לחשב את סכום הפרשי הזמן $\Delta t_2 + \Delta t_1$ נזדקק רק ל- t_2 ול- t_0 .

כעת, נרחיב את אותה פעולה על כל 96 המחזורים שעברו בפרק הזמן שסוקרת הטבלה :

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_{95} = t_{95} - t_0 + 95T + \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{95} = 168.1465 \text{ days}$$

נסמן את הסכום $\sum_{i=1}^{95} \tau_i$ ב- τ_A שהוא בעצם הזמן הכולל שלוקח לאור לעבור מהנקודה שבה נמצא כדור הארץ ב- t_0 לנקודה בה נמצא כדור הארץ ב- t_{95} . יוצא שפרק הזמן שעבר מהיציאה הראשונה מהצל עד האחרונה הוא :

$$T_A \equiv t_{95} - t_0 + 95T + \tau_A = 168.1465 \text{ days}$$

את אותו תהליך בדיוק נבצע עבור התקופה של תחילת 1996 בה כדור הארץ מתקרב לצדק. הפעם הפרש זמנים בין יציאות מהצל / כניסות לצל שווה לזמן המחזור של הקפת איו פחות הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התקרב לצדק בזמן המחזור הזה, כלומר $\Delta t'_1 = T - \tau'_1$ ומכאן (באותו תהליך בדיוק) נקבל :

$$\Delta t'_1 + \Delta t'_2 + \Delta t'_3 + \dots + \Delta t'_{95} = t'_{95} - t'_0 + 95T - \tau'_1 - \tau'_2 - \dots - \tau'_{95} = 168.1215 \text{ days}$$

נסמן את הסכום $\sum_{i=1}^{95} \tau'_i$ ב- τ_B . יוצא שפרק הזמן שעבר מהכנסה הראשונה לליקוי עד האחרונה הוא :

$$T_B = t'_{95} - t'_0 + 95T - \tau_B = 168.1215 \text{ days}$$

נמצא את ההפרש בין T_A ל- T_B :

$$T_A - T_B = 95T + \tau_A - (95T - \tau_B) = \tau_A + \tau_B = 168.1465 \text{ days} - 168.1215 \text{ days} = 0.025 \text{ days}$$

מכיוון ש $\tau_A + \tau_B$ הוא הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עשה מנקודה [0] באיור עד נקודה [0'] וחזור עד [0]. נגדיר את D כמרחק שכדור הארץ (והאור) התרחקו מצדק

בפרק זמן T_A , ששווה גם למרחק שהם התקרבו לצדק בפרק הזמן T_B . יוצא, שהמרחק שכדור הארץ עבר בסכום הזמנים הללו הוא סכום המרחקים כלומר $2D$. אם נחלק את $2D$ ב $\tau_A + \tau_B$ נקבל את מהירות האור.

פרק הזמן $\tau_A + \tau_B$ הוא כמעט שנה (336 ימים). בשנה כדור הארץ מבצע הקפה שהקוטר שלה הוא בממוצע שתי יחידות אסטרונומיות ולכן הוא התרחק מצדק כ- $2 \cdot 1.510^8 km$. ולכן נקבל שמהירות האור היא :

$$c = \frac{2D}{\tau_A + \tau_B} = \frac{4AU}{0.025 \text{ day}} = \frac{4 \cdot 1.510^8 \text{ Km}}{0.025 \text{ day}} = 277,777,777 \frac{m}{sec}$$

נבדוק את הסטייה של התוצאה שקיבלנו מהערך הרשמי של מהירות האור :

$$\frac{299,792,458 - 277,777,777}{299,792,458} = 7.3\%$$

קיבלנו בשימוש באמצעים פשוטים ביותר ערך מדויק להפליא של מהירות האור עם סטייה של **7% בלבד**.

5. מסקנות

בעבודה זו ביקשנו להתחקות אחר ניסוייהם ההיסטוריים של קאסיני למדידת זמן המחזור של סיבובו העצמי של צדק ושל רומר למדידת מהירות האור. בחלק הראשון קראנו את המאמר המקורי של קסיני. למדנו כיצד בפשטות, גאונות וקצת מזל הוא הצליח למדוד את זמן המחזור העצמי של צדק בדיוק של עד שבע שניות. בחלק השני הצלחנו לשחזר את הניסוי למדידת מהירות האור שביצע רומר. השתמשנו במאגר נתוני כניסות ויציאות של איו מהצל של צדק בשנים 1995 – 1996 וקיבלנו ערך של מהירות האור $277,777,777 \frac{m}{sec}$ שסוטה רק ב-7% מהערך המופיע בספרות ימינו.

6. סיכום

במהלך השנה האחרונה העמקנו ידיעותינו בנושא צדק, ירחיו והתמקדנו בפיסה היסטורית חשובה למדע, בתחום חקר האור ומהירותו. למדנו סיכמנו וחזרנו על ניסוי של רומר משנת 1676. במקביל לסקירת הרקע הספרותי התנסינו עם מר אילן מנוליס בצילום הופעת הירח איו במצפה הכוכבים שבמכון וייצמן. התנסינו בשחזור ניסוי ההיסטורי של רומר. נעזרנו בנתונים המצויים באתרים אסטרונומיים ברשת ושחזרנו את מדידת מהירות האור בשיטתו של רומר.

במהלך השנה רכשנו ידע ומיומנות בתחומים רבים:

1. הכרות עם מצפה הכוכבים המשוכלל המצוי במכון וחווית הצילום בו.
2. עיבוד התמונה והוצאת נתונים רלוונטיים.
3. ניסיון לשיתוף פעולה עם מרכזי תצפית נוספים בעולם ושימוש במאגרי נתונים.
4. עבודה עם תוכנות להדמיית מצב השמיים והפקת דפי הסבר לתלמידים, לצורך השימוש בהן.
5. שימוש באקסל לאגירת הנתונים והפקת חישובים באמצעותם.
6. המרת הידע לצורך פיתוח מערך שיעור עבור המורים לפיסיקה ותלמידיהם.
7. כתיבת עבודה מדעית תוך שיתוף פעולה עם מנחה ועבודת צוות ביננו.
8. יכולת סיכום והצגה של פרויקט מורכב מול סטודנטים ואנשי הסגל האקדמי.

מטרתנו כמורים לפיסיקה בתיכון הינה לפתח יחידת לימוד שתהייה נגישה למורים וכוללת דפי עבודה והנחיות לתלמיד ולמורה.

התהליך אותו עברנו ואנו מעוניינים לשתף בו מורים אחרים מהווה נושא לימוד רלוונטי ומסקרן היכול להשתלב בלימודי ההעשרה הניתנים במסגרת ה 30% בתוכנית הלימודים החדשה ללימודי הפיסיקה ברמת 5 יחיל בתיכון.

המרכיב הדידקטי

פיתוח מערך שיעורים בנושא
מדידת מהירות האור על ידי רומר

7. מערך שיעורים בנושא ניסוי רומר למדידת מהירות האור

7.1 הקדמה

7.1.1 רציונל

כחלק מתכנית הלימודים בפיזיקה לומדים התלמידים את הפרקים העוסקים באופטיקה גאומטרית ובגלים אלקטרומגנטיים. בשני הפרקים הללו מוזכרת מהירות האור כבדרך אגב והמורים המגדילים לעשות אף מציינים את מדידת מהירות האור על ידי רומר. מעטים, אם בכלל, המורים שמבינים באמת כיצד מדד רומר את מהירות האור, ומהי הגדולה שבפשטות המדידה הזו.

אחרי שלמדנו לעומק את המהלך ההיסטורי והמדעי שהתרחש בתקופת קאסיני ורומר החלטנו לפתח פעילות שניתן להעביר הכיתה שיפגיש את התלמידים, בדרך חווייתית ומושכת, העוסקת במדידה ההיסטורית של מהירות האור שביצע רומר.

הרעיון של הפעילות הוא להעמיד את התלמידים "במקומו" של רומר: התלמידים מודדים את זמן המחזור של הירח איו סביב צדק ומגלים שהוא לא קבוע ואז מתבקשים לשער מדוע. לאחר שהבינו שההבדלים בין שמני המחזור קשורים במרחק המשתנה של כדור הארץ מצדק הם משתמשים במידע לחשב את מהירות האור, בדיוק כמו שרומר עשה.

7.1.2 מטרות הפעילות

- התלמידים ימדדו את זמן המחזור של איו באמצעות סימולציה ממוחשבת.
- התלמידים יעלו השערות באשר לגורמים המשפיעים על זמן המחזור.
- התלמידים יחשבו את מהירות האור בשיטתו של רומר.
- התלמידים יכירו את הרקע ההיסטורי והמדעי הקשור לרומר ומדידותיו.
- התלמידים יחשפו לנושא האסטרונומיה והתצפיות.

7.1.3 קהל היעד

קהל היעד שלנו הוא תלמידי כיתות י' בתחילת דרכם בשיעורי הפיזיקה. מכיוון שהנושא של מהירות האור שייך ל-30% שנלמדים ונבדקים באופן פנימי בבתי הספר הפעילות שלנו יכולה להתאים למורים המחפשים גיוון בהוראה ונושאים להעמקה מעבר לתכנית הרגילה.

7.1.4 רצף הפעילות

הפעילות מתוכננת ל-6 שיעורים, על פי הרצף הבא שיעור ראשון (שעה אחת) - הקדמה על מערכת השמש, צדק וירחיו וליקויים. שיעור שני (2 שעות) - מדידת זמן המחזור של איו באמצעות סימולציה והעלאת השערות לגורמים להבדל.

- שיעור שלישי (שעה אחת) - הכרת שיטת המדידה של מהירות האור על פי רומר.
- שיעור רביעי (שעה אחת) - מדידת מהירות האור על ידי התלמידים בשיטת רומר.
- שיעור חמישי (שעה אחת) - מדידות מהירות האור בדרכים אחרות וסיכום.

מומלץ להרחיב את הפעילות על ידי שימוש בסימולציית סטלריום (החומר מצורף לעבודה) וכן להוסיף תצפיות אמתיות.

7.1.5 אופי הפעילות

השיעור הראשון השלישי והחמישי מתבצעים במליאה והמורה מעביר אותם בעזרת שימוש במצגת. השיעורים השני והרביעי מתבצעים בעבודה אישית (או בזוגות) של התלמידים מול מחשב ובשימוש בדפי העבודה.

7.1.6 הנחיות למורה

כמו שכתבנו ברציונל המערך עוסק בחומר שרוב המורים לא בקיאים בו. לשם כך כתבנו דפי רקע למורים, אותם עליהם לקרוא לפני הפעילות. שיטת המדידה של רומר עלולה לבלבל את מי שלא שולט בחומר היטב ולכן כדאי מאוד לוודא הבנה מלאה לפני העברת המערך.

7.2 שיעור פתיחה

7.2.1 רקע למורה

לעבודה מצורפת מצגת מבוא על צדק וירחיו, להלן רקע מקדים למורה:

מערכת השמש, צדק וירחיו

הערות נלוות ורקע למצגת המבוא:

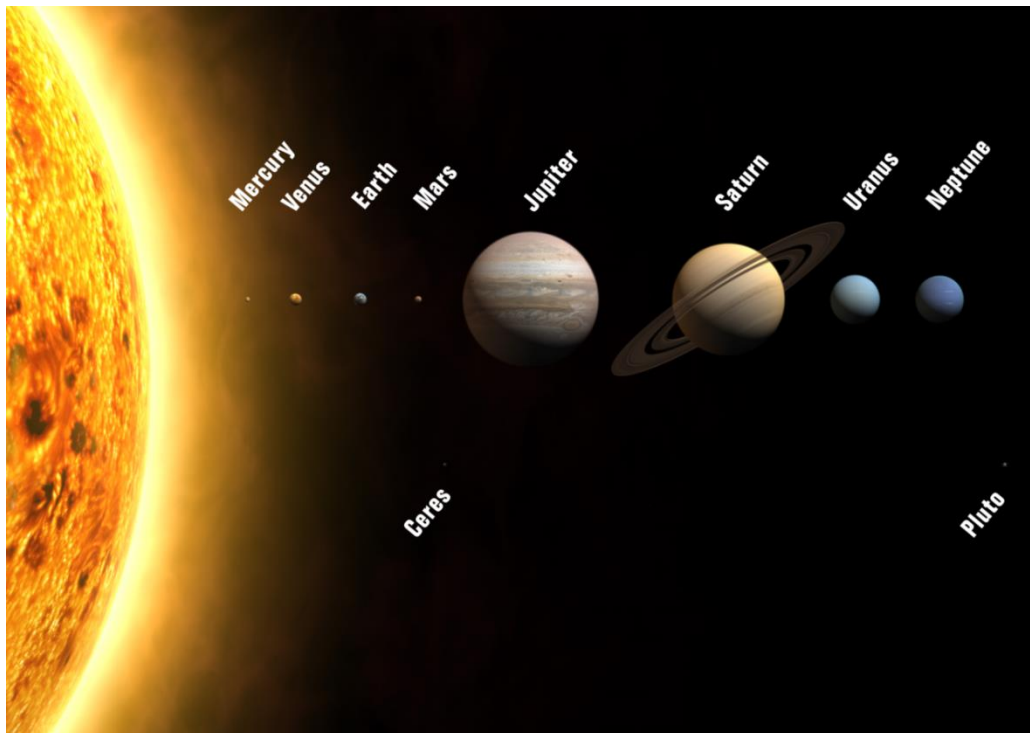
מערכת השמש

אמנם הנושא שלנו הוא צדק וירחיו, אך טוב לפתוח בהיכרות כללית עם מערכת השמש ועם מושגים בסיסיים באסטרונומיה שההיכרות איתם הכרחית במערך כזה: **כוכב**, **כוכב לכת** ו**לויין**. לדעתנו מומלץ ללמד אותם לפי ה'היררכיה' הבאה (אלו אינן ההגדרות המלאות לכל גוף):

- כוכב - גרם שמיים כדורי המייצר קרינה על ידי היתוך גרעיני.
- כוכב לכת - גרם שמיים שבדרך כלל מקיף כוכב, והוא אינו מסיבי מספיק כדי לייצר קרינה עצמית, אך הוא כן מסיבי כדי ליצור צורה הקרובה לכדורית. חשוב להדגיש את ההבדל העצום בין כוכב לכוכב לכת (star & planet).
- לויין - גוף קטן יותר המקיף כוכב לכת. ישנם שני סוגי לויינים: לויין טבעי הנקרא **ירח**, ולויין מלאכותי מעשה ידי אדם (תקשורת, גשושיות).

במערכת השמש שלנו יש כוכב אחד (השמש), 8 כוכבי לכת, והרבה מאוד לויינים (טלסקופ החלל האבל, הירח שלנו, Juno). בנוסף יש במערכת השמש שלנו גופים קטנים יותר: כוכבי לכת ננסיים, אסטרואידים ושביטים. אין צורך להתעכב עליהם במערך זה.

צדק - מאפיינים כלליים



צדק (Jupiter בלועזית) הוא כוכב הלכת הגדול ביותר במערכת השמש. הוא כוכב הלכת החמישי במרחקו מהשמש ושייך לקבוצת ענקי הגז הכוללת גם את שבתאי, אורנוס ונפטון הרחוקים יותר. קוטרו של צדק 142,984 ק"מ בקו המשווה - גדול פי 11 מקוטר כדור הארץ ונפחו גדול פי 1,300. צפיפותו הממוצעת היא 1.33 גרם לסמ"ק שהיא צפיפות נמוכה ביחס לצפיפות הממוצעת בכדור הארץ בשל היותו ענק גזי בעל הרכב כימי דומה לזה של השמש. מסתו הכוללת עדיין גדולה מאוד: פי 318 מזו של כדור הארץ, וכמעט פי 2.5 ממסתם של כל שאר כוכבי הלכת במערכת השמש יחדיו. לא בכדי הוא נחשב ל"מלך" כוכבי הלכת. יש לציין שאף על פי שצדק מרשים בגודלו, נתגלו כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש להם מסות גדולות משמעותיות.



כוכב הלכת צדק. צולם ב-21 באפריל 2014 על ידי מצלמת השדה הרחב של טלסקופ החלל האבל.

קרדיט: NASA / ESA / A. Simon, Goddard Space Flight Center.

לצדק קצב הסיבוב המהיר ביותר בין כוכבי הלכת במערכת השמש. זמן הסיבוב העצמי שלו הוא 9 שעות, 55 דקות ו-30 שניות בלבד. כתוצאה מכך ומן העובדה שזהו כדור עשוי מגזים שונים, כלומר גוף לא מוצק, רדיוסו גדול יותר באזור קו המשווה וצורתו פחוסה מעט; רדיוסו בקו המשווה הוא 71,370 ק"מ ואילו רדיוסו בקוטב הוא 66,750 ק"מ בלבד, מה שנותן מקדם פחיסות של 0.065 (לעומת מקדם הפחיסות של כדור הארץ, שהוא 0.00335). ניתן להבחין בפחיסות זו אפילו כאשר צופים בו בטלסקופ פשוט. צדק משלים הקפה סביב השמש אחת ל-11.86 שנה במהירות ממוצעת של 13.06 ק"מ לשנייה. צדק מוקף בטבעות דקות ביותר כאשר הטבעת העיקרית מצויה במרחק של 1.72 עד 1.81 רדיוסי צדק והיא מכילה בעיקר חלקיקי אבק קטנים ממילימטר. צדק הוא בדרך כלל העצם הרביעי בבהירותו הנראית ברקיע לאחר השמש, הירח ונוגה. מבחינת מבנה ניתן לחלק את צדק לשלושה חלקים עיקריים: הליבה, החלק הפנימי והחלק החיצוני. משערים שהליבה מכילה ניקל וברזל ורדיוסה כ-10,000 ק"מ. מעל הליבה מצויה שכבת מימן במצב של נוזל מתכתי (מימן דחוס כך שהקשרים המולקולריים שלו נותקו והאלקטרונים שבו משותפים לכל האטומים) שמגיע הכמעט עד ל-80% מהרדיוס של צדק. מעל שכבת המימן המתכתי מצויה האטמוספירה של צדק, אותה אנו רואים ועל מאפייניה נרחיב.

הירחים של צדק

מאז ומתמיד צפו האסטרונומים בצדק אך היה זה גלילאו גליליי שהביט בצדק לראשונה מבעד לטלסקופ בשנת 1610. בתצפיותיו הוא גילה את ארבעת הירחים הגדולים של צדק הידועים היום בשם "הירחים הגליליאניים". כמעט בו זמנית ובאופן נפרד לחלוטין גילה את ארבעת הירחים האסטרונום הגרמני סימון מריוס ואף העניק להם את השמות בהם אנו קוראים להם היום: איו, אירופה, גנימד וקליסטו על שם המאהבות (והמאהבים) של זאוס (המקביל היווני ליופיטר במיתולוגיה הרומית).

ארבעת הירחים הללו הם עולמות בפני עצמם, בעלי הרכבים ומאפיינים שונים. **איו**, הקרוב לצדק שבירחים הגליליאניים הוא בעל קוטר ממוצע של 3,643 ק"מ (מעט גדול יותר מהירח), ומרחק ממוצע מצדק של 421,800 ק"מ. הקרבה לצדק יוצרת באיו כוחות גאות ושפל חזקים מאוד, ותועדה בו פעילות געשית רבה (כולל התפרצויות געשיות שהגיעו לגובה של 300 ק"מ מעל פניו). למעשה, הוא הגוף הפעיל ביותר מבחינה געשית במערכת השמש. איו נעול כבידתית לצדק, ומפנה אליו תמיד את אותו צד. לאיו ליבת מתכת שסביבה מעטפת סלעית, ואף אטמוספירה דלילה המורכבת מגופרית דו חמצנית שמקורה בהרי הגעש, גופרית, חמצן, נתרן, אשלגן וכלור ושמתרחשת בה תופעה דומה לזוהר הקוטב שמתרחש בכדור הארץ.



ארבעת הירחים הגליליאניים בקנה מידה אחיד. משמאל לימין: איו, אירופה, גנימד וקליסטו (התמונה מויקיפדיה)

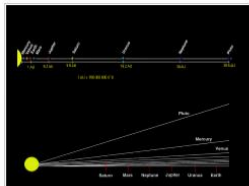
אירופה הוא הירח השני במרחקו מצדק והקטן ביותר מבין ארבעת הירחים הגליליאניים. קוטרו הממוצע 3,121 ק"מ (מעט קטן מהירח) והמאפיין הבולט שלו הוא שפניו מכוסים שכבת קרח-מים דקה שתחתיה ככל הנראה מים נוזלים בעובי של עשרות ק"מ. פני השטח שלו חלקים מאוד (אין מכתשים או הרים גבוהים מק"מ, ככל הנראה בגלל שתחת פניו יש אוקיינוס אדיר) ומשתנים לעתים וניתן להבחין בחריצים או קווים כהים החוצים אותו בכל הכיוונים והנוצרים ככל הנראה בגלל כוחות הגאות והשפל שמפעיל צדק על הירח. לאירופה אף אטמוספירה דלילה ביותר המורכבת בעיקר מחמצן.

גנימד, הירח הגליליאני השלישי, הוא הירח הגדול ביותר במערכת השמש כולה. קוטרו הממוצע כ-5,268 ק"מ - גדול יותר מכוך הלכת חמה (מרקורי)! גנימד הוא גוף הרבה פחות פעיל מאיו ואירופה, ועל פניו שכבת קרח בה נראים מכתשי פגיעה רבים. לגנימד ליבת ברזל נוזלי, וככל הנראה בין השכבות הסלעיות והקרחיות העוטפות את ליבתו מצויות שכבות של מים נוזלים. גם לגנימד אטמוספירה דלילה, דומה לזו של אירופה.


הירח הרחוק ביותר מבין הארבעה הוא **קליסטו**, הנמצא במרחק ממוצע של 1,882,700 ק"מ מצדק. קליסטו קטן מגנימד (קוטרו הממוצע 4,820 ק"מ) והוא מורכב בעיקר מסלעים וקרח וסביבו שכבת קרח עתיקה ומצולקת במספר רב של מכתשי פגיעה. המרחק הרב של קליסטו מצדק גורם לכך שכוחות הגאות והשפל על פניו חלשים, והוא הכי פחות פעיל מבין ארבעת הירחים. בעקבות חקירת השדה המגנטי של צדק והשפעותיו על הירחים משערים שייתכן ויש גם לקליסטו אוקיינוס מתחת לפני השטח.

מלבד ארבעת הירחים הגליליאניים לצדק עוד ירחים רבים. סך הכל נצפו 67 ירחים ידועים בשם נכון להיום כאשר חלקם הם אסטרואידים שנלכדו במשיכתו. ל-51 מירחים אלו קוטר קטן מעשרה ק"מ, והם נתגלו רק לאחר שנת 1975. הירחים מחולקים לקבוצות לפי מרחקם מצדק ומישור הסיבוב שלהם, אך מספרם הרב של הירחים והגיוון במאפייניהם מקשים על חלוקה מסודרת וברורה.


7.2.2 מצגת מלווה לשיעור הפתיחה:




4



3



2



1



8




7




6




5



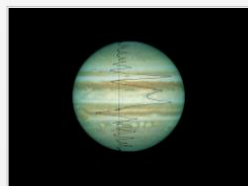
12




11



10



9



16



15



14



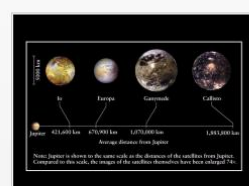
13



20



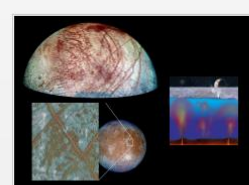
19




18




17




24



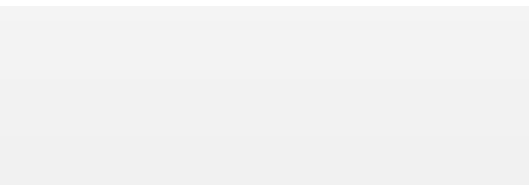
23



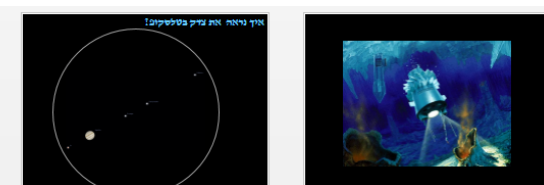
22



21



26



25

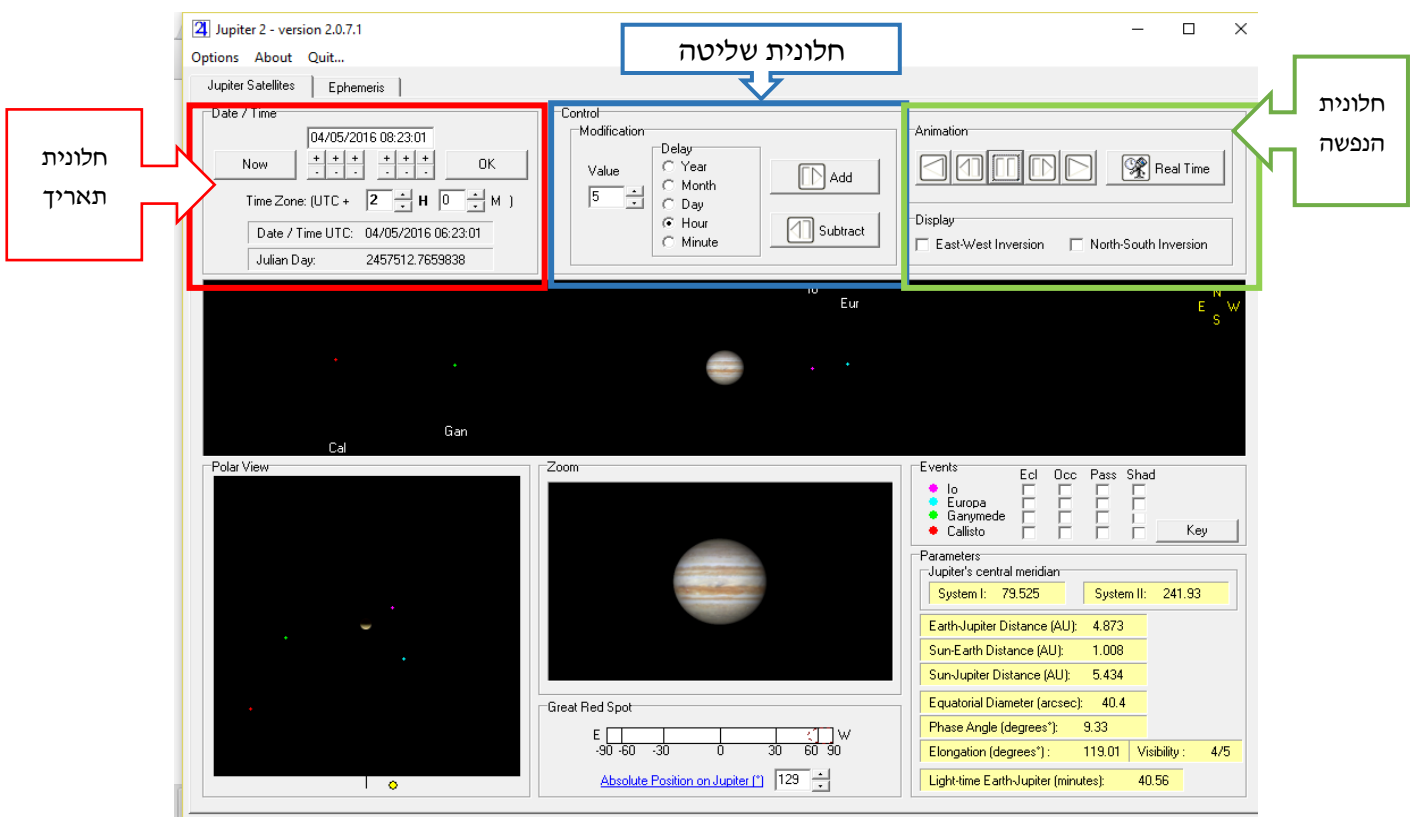
7.3 שיעור 2 - מדידת זמן המחזור של אינו באמצעות סימולציה

7.3.1 דפי עבודה לתלמידים

דף משימה ראשון - חישוב זמן המחזור של אינו

בשיעורים הקודמים הכרנו את צדק וירחיו, למדנו על ליקויים וטרנזיטים וניסינו להעריך באמצעותם את זמן המחזור של אינו. ננסה היום למדוד את זמן המחזור של אינו בצורה מדויקת ככל שניתן, ונגלה תופעה מעניינת.

נשתמש בתכנה Jupiter.2 המותקנת במחשבים. היכנסו אליה (התכנה ניתנת להורדה חינם בכתובת <http://www.astrosurf.com/rondi/jupiter>):



1. התרשים בחלון העליון מראה את צדק וירחיו.

כתבו מה מסמן כל קיצור?

Io _____ Eur _____ Gan _____ Cal _____

2. בחלונת התאריך הזינו את התאריך 7/3/2016 ואת השעה 15:00:

קעת בחלונת ה-control בחרו ב'דקות' ובערך 1. זה יקדם את התמונה כל פעם בדקה אחת. לחצו על play בחלונת האנימציה. מה קורה לאינו? תארו במילים שלכם את המתרחש עד השעה 8:00 באותו התאריך.

3. כעת העבירו בחלונית השליטה את קצב הקפיצות לשעה אחת ולחצו על play. עקבו אחר איו. כמה הקפות הוא מבצע מה-7/3/16 בשעה 8:00 עד ה-16/3/16 בשעה 05:00 ?

4. **נרצה למדוד את זמן ההקפה המדויק של איו.** לצורך כך נבצע מדידה של מספר רב של זמני מחזור. הסבירו מדוע מדידה בצורה כזו תדייק את המדידה:

5. **וכעת - למדידה עצמה!**
תחילה לחצו על play, הניחו לאיו לבצע הקפה נוספת ורשמו את הזמן המדויק בו איו יוצא מהצל של צדק. (ניתן לראות באיור התחתון משמאל את מיקומו של איו מאחורי צדק). ניתן להיעזר בשינוי זמן הקפיצה ובכפתור קדימה ואחורה בחלונית השליטה על מנת לקבוע בדיוק את היציאה של איו מהצל של צדק.

כעת לחצו על play וספרו ארבעים סיבובים בדיוק של איו סביב צדק. כתבו את התאריך ואת השעה המדויקים בהם איו יוצא מהצל של צדק לאחר 40 סיבובים:

6. בעזרת תוכנת אקסל או באופן ידני חשבו את זמן המחזור של איו (הפרש הזמנים חלקי 40):



יפה מאוד! חישבתם את זמן המחזור של איו סביב צדק. גשו למורה, הראו לו את החישובים שלכם ותוכלו לעבור לשלב הבא של המדידות...

דף משימה שני - חישוב זמן המחזור של איו בזמנים שונים - חלק ב'

1. עברו לתאריך 1/12/16. בתקופה זאת של השנה ניתן לצפות באיו כאשר הוא נכנס לצל של צדק אך לא כאשר הוא יוצא. באיזו שעה בדיוק נכנס איו לצל של צדק בתאריך זה?

2. כעת לחצו על play וספרו ארבעים סיבובים בדיוק של איו סביב צדק. כתבו את התאריך והשעה המדויקת בהם איו נכנס לצל של צדק לאחר 40 סיבובים.

באופן דומה לשלב הקודם, חשבו שוב את זמן המחזור של איו:

3. האם זמני המחזור שווים?, דומים? או שונים לחלוטין?

4. חשבו את הפרש הזמנים בין זמן המחזור שנמדד על פי 40 ההקפות הראשונות לזמן שנמדד על פי 40 ההקפות השניות. בטאו הפרש זמנים זה בימים, שעות דקות ושניות:

5. הבעיה שכעת גיליתם העסיקה אסטרונומים רבים שמדדו את זמן המחזור של איו! האם איו משנה את זמן המחזור שלו? מה לדעתכם יכול להסביר את הפרש הזמנים הנ"ל?

דונו עם המורה/בפורום כיתתי בתשובות האפשריות שהעליתם לבעיה. לאחר הדיון – תוכלו להמשיך לסעיף הבא.

6. היכנסו לאתר www.solarsystemscope.com בו ניתן לראות את מצב הפלנטות (כוכבי הלכת) במערכת השמש. הכניסו את תאריך תחילת המדידה הראשונה שביצעתם בחלונית התאריכים. בדקו את המיקומים של צדק ושל כדור הארץ. לאחר מכן הזינו את תאריך תחילת המדידה השנייה ובדקו שוב את המיקומים של צדק וכדור הארץ. מה ההבדל במיקומים בין שני המצבים? האם הוא יכול לספק הסבר להפרש בין זמני המחזור שהתקבלו במדידות?

7.4 שיעור 3 - מדידת מהירות האור בשיטת רומר

7.4.1 תקציר למורה בנושא מדידת מהירות האור על ידי רומר

רקע למורה - מדידת מהירות האור על ידי רומר

תקציר זה נועד לסייע למורה בהבנת תהליך מדידת מהירות האור שביצע רומר. התקציר כולל סקירה קצרה של מדידות מהירות האור לפני רומר ופירוט החישוב של מהירות האור באותה שיטה שבה, כנראה, חישב רומר את המהירות. רומר עצמו כתב כמה מאמרים בנושא, ורובם לא שרדו. ככל הנראה הוא השתמש בשיטות שונות לחישוב המהירות בכל מאמר. אנחנו בחרנו בשיטה בה הוא השתמש במאמר ששרד, שיטה שהיא יחסית פשוטה. נציין שבמאמר זה רומר לא באמת מחשב את המהירות אלא מציב לה גבול מינימאלי. בספרות ישנם תיאורים שונים של שיטת המדידה – אנחנו מצאנו כי הם לא מדויקים, או חלקיים, ולכן חשוב לפרט את המדידה באופן מדויק.

הדיון אודות מהירות האור

בעת העתיקה השאלה לגבי מהירות האור התנהלה במקביל לשאלה באיזו מהירות אנו רואים. היו טיעונים לגבי "קרני ראייה" היוצאות מהעין ומגיעות לעצם ולעומתם שסברו שהעצם שולח את דמותו והיא נכנסת לעינינו. אריסטו הגה רעיון נוסף לפיו הראיה מתאפשרת בשל שקיפות שמתרחשת בו זמנית, ולגביה אין מהירות.

כבר במאה ה-17 הדיון על מהירות האור החל לעלות על הפרק ועלתה השאלה אם מהירות האור אינסופית או סופית וניתנת למדידה. אריסטו בגישתו השאיר חותמו ואותו חיזק קפלר הגרמני שסבר שהאור חסר מסה ומשקל לכן הדחיפה מהמקור לא מתמודדת עם שום התנגדות ולכן מהירות האור אינסופית. גם דקארט חיזק את גישתו של אריסטו בתאוריה לפיה האור מתבטא כלחץ שעובר דרך חומר במהירות אינסופית ובעת ליקוי לבנה הוכיח על דרך השלילה שאם מהירות האור הייתה סופית אז בזמן ליקוי לבנה הירח השמש וכדור הארץ לא היו בקו ישר. דקארט הניח שאם האור עובר את המרחק מכדור הארץ לירח בשעה (כדוגמה בלבד), הלוך חזור בשעתיים הירח בזמן זה כבר "יצא" מהליקוי בשל התקדמות כדה"א במשך שעתיים ותיווצר זווית של 33 מעלות לכיוון הירח, יחסית לקו בין השמש לכדה"א. לא יתקיים ליקוי הלבנה וכך הוא פסל על דרך השלילה את האפשרות שמהירות האור היא סופית. ההנחה שהאור עובר את המרחק בשעה היא ההסבר לטעותו של דקארט שבחר הנחה בסיסית מוטעית והרי האור עובר את המרחק בשנייה אחת מה שבפועל יוצר סטייה בלתי ניתנת להבחנה ב"יציאה" מהקו הישר בין השמש כדה"א והירח.

הויגנס, כבר בתקופתו של דקארט, הצביע על כך שאם דקארט היה מניח פרק זמן קצר יותר, כ-10 שניות, הזווית שתיווצר, כעשירית מעלה, קטנה מידי מכדי "לשבור" את הקוויות הדרושה לליקוי הלבנה.

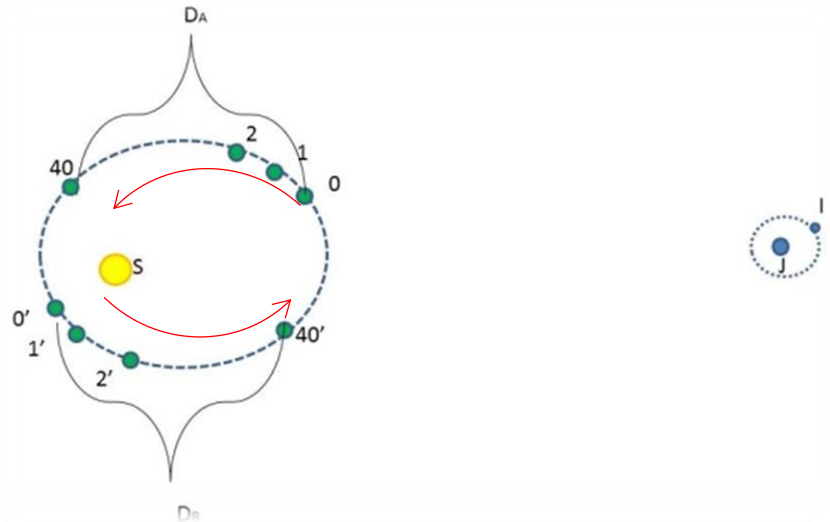
הניסיונות למדידת מהירות האור

גלילאו היה הראשון לתכנן את מדידת מהירות האור אך בשל האינקוויזיציה, גילו ומצב ראייתו לא הספיק. בספרו שפרסם ב-1632 ("שיח על שתי תפיסות עולם של תלמי ושל קופרניקוס") בפרק הראשון מתאר גלילאו את הניסוי בו ניסה למדוד את מהירות האור. הוא ועוזרו היו מרוחקים 2 ק"מ האחד מהשני על שתי גבעות ליד פירנצה. כל אחד היה מצויד בפנס מאחורי תריס. גלילאו תכנן למדוד את הזמן בו עובר האור את המסלול הלוך וחזור (4 ק"מ). כאשר עוזרו ראה את האור היוצא מהפנס של גלילאו, הוא פתח את התריס של פנסו ושלה אלומה חזרה לגלילאו, שמדד את הזמן. המדידות הראו זמנים שונים וגלילאו הבין שמהירות האור גדולה ובלתי ניתנת למדידה במרחקים כאלו. גם ניסיונות במרחקים גדולים יותר בעזרת טלסקופ לא צלחו אך למרות זאת הוא היה בטוח שהמהירות היא סופית.

30 שנה לאחר מותו של גלילאו ב-1670 הגיע לפריז ז'אן דומיניק קאסיני כדי לנהל את מצפה הכוכבים שם. יד ימינו של קאסיני, ז'אן פיקר הביא עמו, באחד מסיעוריו לגיוס חוקרים צעירים, צעיר דני בשם אולה רומר. רומר, בן 21, הגיע למצפה וזכה לצפות בכל תוצאות המדידות והתצפיות של צדק וירחיו. קאסיני היה מומחה ידוע לצדק וירחיו ולגבי הירח היו במיוחד. קאסיני חזר ומדד את זמן הקפת איו את צדק. המדידות היו תמיד סביב 42.5 שעות. לעיתים יותר ולעיתים פחות. קאסיני חשב שחוסר הדיוק נובע מתנועתו של איו, או מבעיות במדידה. אך רומר הצעיר והשנון החל לחשוב בכיוון חדש. הוא סבר שהבעיה אינה נובעת מתנועתו של איו אלא מתנועתו של כדור הארץ. כשרומר עיין בתוצאות המדידה מחורף ומקיץ 1676 הבין סופית שהמרחק של כדור הארץ מצדק משפיע על הופעת איו ויציאתו מאזור הצל של צדק. ככל שמתרחקים מצדק הופעת הירח המרוחק תתעכב וידע אף לחשב את הזמן לפי תוצאות קודמות. הוא יצא נגד התחזית של קאסיני לגבי הופעת איו בזמן מסוים וטען שאיו ייראה ויצא מאזור הצל של צדק עשר דקות מאוחר יותר מהזמן שקאסיני צפה. ואכן רומר צדק. קאסיני במעמדו הגבוה בקרב הקהילה המדעית פסל את רומר וטענותיו, המשיך לדבוק בחוסר היכולת לנבא במדויק את הופעת איו ויציאתו מאזור הצל של צדק. רומר חזר לדנמרק. רק לאחר כ-50 שנה טענותיו של רומר הוכחו כנכונות וכבר היה ניתן לחשב את מהירות האור שאכן הייתה גבוהה רק במעט מהחישוב של רומר.

חישוב מהירות האור בעזרת הסימולציה Jupiter 2. בשיטת רומר

אנו נמדוד את מהירות האור באמצעות סימולציה (די מדויקת) של צדק וירחיו – Jupiter 2. את הסימולציה ניתן להוריד בחינם (הקישור מופיע בדף העבודה לתלמיד). דף העבודה לתלמיד מפורט מאד ומסביר שלב שלב את העבודה שיש לבצע על מנת לחשב את מהירות האור. כאן נסביר בפשטות את השיקולים שעומדים מאחורי החישוב על מנת שהמורה ישלוט בחומר בזמן הפעילות בכיתה.



איור 1 - השמש (בצהוב), כדור הארץ (במיקומים שונים על מסלולו סביב השמש), צדק (מימין) והירח שלו אינו (מסלול קטן סביב צדק). האיור מדגים את המיקומים השונים של כדור הארץ בדגש על המרחק שלו מצדק. הנקודות המסומנות במספרים ללא גרש מציינות את החלק במסלול בו כדור הארץ מתרחק מצדק. הנקודות המסומנות במספרים עם גרש מציינות את החלק במסלול בו כדור הארץ מתקרב לצדק. האיור לא מדויק מבחינת המרחקים והגדלים בין גרמי השמים. כמו כן הוא מזניח את התנועה של צדק בזמן שנה אחת ארצית.

תחילה נמדוד זמן מחזור אחד של ההקפה של אינו סביב צדק. נעביר את הסימולציה לתאריך בו צדק קרוב לכדור הארץ אבל הם בתהליך של התרחקות (17.3.16). תאריך כזה מתאים לנקודה 0 באיור. נמצא בעזרת שינוי הזמן בסימולציה את השעה המדויקת בה יוצא אינו מהצל של צדק (יציאה מליקוי). נסמן את שעת היציאה מהליקוי הראשון כ t_0 . כעת נקדם את הזמן בסימולציה (בכ-40 שעות) עד היציאה הבאה מהליקוי. בזמן זה כדור הארץ כבר התקדם ונמצא במקום רחוק יותר מצדק – נקודה 1 באיור. את זמן היציאה מהליקוי השני נסמן כ t_1 . הפרש הזמנים בין שתי היציאות מהליקויים יסומן ב Δt_1 כך ש:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0$$

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקויים שווה לזמן המחזור של הקפת אינו את צדק (להלן T) ועוד הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התרחק מצדק במשך זמן המחזור הזה (נסמן ב τ_1) כלומר

$$\Delta t_1 = T + \tau_1$$

חשוב לציין שזמן המחזור "האמיתי" (T), כלומר ללא תוספת הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התקדם, לא ידוע לנו. לכן אנחנו לא יכולים פשוט להחסיר את זמן המחזור "האמיתי" מהזמן הנמדד בפועל לקבלת הזמן שלקח לאור לעבור את המרחק.

כעת נחזור על אותו תהליך עבור הפרש הזמנים בין הליקוי השלישי (המתאים לנקודה 2 באיור ונסמן את הזמן שלו ב- t_3) לשני ונקבל :

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1$$

כמובן שגם כאן

$$\Delta t_2 = T + \tau_2$$

אם נחבר את שני הפרשי הזמנים נקבל :

$$\Delta t_2 + \Delta t_1 = T + \tau_2 + (T + \tau_1) = 2T + \tau_2 + \tau_1$$

נשים לב ש :

$$\Delta t_2 + \Delta t_1 = t_2 - t_1 + (t_1 - t_0) = t_2 - t_0$$

ולכן כדי לחשב את סכום הפרשי הזמן $\Delta t_2 + \Delta t_1$ נזדקק רק ל- t_2 ול- t_0 .

כעת נרחיב את אותה פעולה על כל 40 המחזורים שנריץ בסימולציה :

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_{40} = t_{40} - t_0 = 40T + \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{40}$$

נסמן את הסכום $\sum_{i=1}^{40} \tau_i$ ב- τ_A שהוא בעצם הזמן הכולל שלוקח לאור לעבור מהנקודה שבה נמצא כדור הארץ ב- t_0 לנקודה בה נמצא כדור הארץ ב- t_{40} . יוצא שפרק הזמן שעבר מהיציאה הראשונה מהליקוי עד האחרונה הוא :

$$T_A \equiv t_{40} - t_0 = 40T + \tau_A$$

את אותו תהליך בדיוק נבצע עבור תקופה בה כדור הארץ מתקרב לצדק (החל בתאריך 1.12.16). הנקודות המתאימות באיור הן '0' '1' '2'. הפעם הפרש זמנים בין ליקויים שווה לזמן המחזור של הקפת איו **פחות** הזמן הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התקרב לצדק בזמן המחזור הזה כלומר $\Delta t'_1 = T - \tau'_1$. ומכאן (באותו תהליך בדיוק) נקבל :

$$\Delta t'_1 + \Delta t'_2 + \Delta t'_3 + \dots + \Delta t'_{40} = t'_{40} - t'_0 = 40T - \tau'_1 - \tau'_2 - \dots - \tau'_{40}$$

נסמן את הסכום $\sum_{i=1}^{40} \tau'_i$ ב- τ_B . יוצא שפרק הזמן שעבר מהכנסה הראשונה לליקוי עד האחרונה הוא :

$$T_B = t'_{40} - t'_0 = 40T - \tau_B$$

נמצא את ההפרש בין T_B ל T_A :

$$T_A - T_B = 40T + \tau_A - (40T - \tau_B) = \tau_A + \tau_B$$

בעצם כך הצלחנו לחשב את הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק מ t_0 ל t_{40} ועוד הזמן שלוקח לאור לעבור בין t_0' ל t_{40}' , **ובלי לדעת את זמן המחזור "האמיתי" (T) שהתקזז בחיסור שני הפרשי הזמן $T_A - T_B$** .

בעזרת הסימולציה נבדוק בכמה התרחקו צדק וכדור הארץ בזמן T_A (נסמן ב D_A) ובכמה הם התקרבו בזמן T_B (נסמן ב D_B). בדף העבודה מפורטת הדרך לעשות זאת. מהירות האור היא כמובן המרחק ($D_A + D_B$) חלקי הזמן ($T_A - T_B = \tau_A + \tau_B$) בו התקדם האור מרחק זה, ולכן נקבל שמהירות האור היא :

$$c = \frac{D_A + D_B}{\tau_A + \tau_B} = \frac{D_A + D_B}{T_A - T_B}$$

לסיכום:

בתקופה בה כדור הארץ **מתרחק** מצדק - כאשר מחשבים את הפרש הזמנים בין 40 יציאות של איז מליקויים ($t_{40} - t_0$) מקבלים פרק זמן השווה ל-40 זמני מחזור של איז ($40T$) **ועוד** הזמן שלקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התרחק בינתיים מצדק (τ_A).

$$T_A = t_{40} - t_0 = 40T + \tau_A$$

בתקופה בה כדור הארץ **מתקרב** לצדק - כאשר מחשבים את הפרש הזמנים בין 40 יציאות של איז מליקויים ($t_{40'} - t_0'$) מקבלים פרק זמן השווה ל-40 זמני מחזור של איז ($40T$) **פחות** הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התקרב בינתיים מצדק (τ_B):

$$T_B = t_{40'} - t_0' = 40T - \tau_B$$

כשמחסיירים את שני הזמנים הללו מקבלים את הזמן שלקח לאור לעבור את המרחק (D_A) שכדור הארץ התרחק מצדק **ועוד** הזמן שלקח לאור לעבור את המרחק (D_B) שכדור הארץ התקרב לצדק:

$$T_A - T_B = \tau_A + \tau_B$$

אם נחלק את סכום המרחקים האלה בסכום הזמנים נקבל את מהירות האור:

$$c = \frac{D_A + D_B}{\tau_A + \tau_B}$$

7.4.2 מצגת מלווה שיעור - מדידת מהירות האור על ידי רומר

המצגת המלאה מופיעה בנספחים.

מצגת הסבר למדידת מהירות האור על ידי רומר

כאשר כדור הארץ מתרחק ממרכז מערכת שמש מורדים את זמן המחזור T ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן שאנו עובדים.

ניסוי רומר למדידת מהירות האור

בשנת 1676 הציח האסטרונום הדני אולה רומר לחשב את גודלה של מהירות האור בקירוב טוב. רומר שם לב שזמן המחזור של הירח אינו סבב בדק קצר בענני כוכבי לכת. הרעיון מתקרב לרעיון לעומת זמן המחזור כאשר כדור הארץ מתרחק מענק.

רומר הבין שההפרש בזמן המחזור לא קשור לטוב של אף אלא לזמן שלוקח לאור לעבור את הדרך שכדור הארץ נעשה במהלך זמן המחזור.

כאשר כדור הארץ מתרחק ממרכז מערכת שמש מורדים את זמן המחזור T ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן שאנו עובדים.

הפרש הזמנים בין שתי הנקודות מיליקיום מסומן ב- Δt_1 .

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקיום סומן לזמן המחזור של הקטפה אין את ערך הליקיום (T) ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן המחזור הזה (נסמן ב- t_1) כלומר $\Delta t_1 = T + t_1$

כאשר כדור הארץ מתרחק ממרכז מערכת שמש מורדים את זמן המחזור T ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן שאנו עובדים.

כאשר כדור הארץ מתרחק ממרכז מערכת שמש מורדים את זמן המחזור T ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן שאנו עובדים.

כאשר כדור הארץ מתרחק ממרכז מערכת שמש מורדים את זמן המחזור T ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן שאנו עובדים.

הפרש הזמנים בין שתי הנקודות מיליקיום מסומן ב- Δt_2 .

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקיום סומן לזמן המחזור של הקטפה אין את ערך הליקיום (T) ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן המחזור הזה (נסמן ב- t_2) כלומר $\Delta t_2 = T + t_2$

אם מניחים את הליקיום סומן כ- $t_1 = 0$ אז נקבל $\Delta t_1 = T + t_1$ ו- $\Delta t_2 = T + t_2$

הפרש הזמנים בין שתי הנקודות מיליקיום מסומן ב- $\Delta t_2 - \Delta t_1 = t_2 - t_1$

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקיום סומן לזמן המחזור של הקטפה אין את ערך הליקיום (T) ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן המחזור הזה (נסמן ב- t_1) כלומר $\Delta t_1 = T + t_1$

אם מניחים את הליקיום סומן כ- $t_1 = 0$ אז נקבל $\Delta t_1 = T + t_1$ ו- $\Delta t_2 = T + t_2$

הפרש הזמנים בין שתי הנקודות מיליקיום מסומן ב- $\Delta t_2 - \Delta t_1 = t_2 - t_1$

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקיום סומן לזמן המחזור של הקטפה אין את ערך הליקיום (T) ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן המחזור הזה (נסמן ב- t_1) כלומר $\Delta t_1 = T + t_1$

אם מניחים את הליקיום סומן כ- $t_1 = 0$ אז נקבל $\Delta t_1 = T + t_1$ ו- $\Delta t_2 = T + t_2$

הפרש הזמנים בין שתי הנקודות מיליקיום מסומן ב- $\Delta t_2 - \Delta t_1 = t_2 - t_1$

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקיום סומן לזמן המחזור של הקטפה אין את ערך הליקיום (T) ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן המחזור הזה (נסמן ב- t_1) כלומר $\Delta t_1 = T + t_1$

בפועל, מכיון ש- $\Delta t_2 - \Delta t_1 = t_2 - t_1$ הוא מודל קטן וקשה למדידה. רומר מדד ארבעים מחזורים בכל כיוון:

$$c = \frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{D + D'}{t_{40} + t'_{40}} = \frac{D + D'}{\Delta t_{40} - \Delta t'_{40}}$$

אבל המתמטיקה אותו הדבר...

מהירות האור היא פשוט הדרך שעבר האור לחלק לזמן שלוקח לו לעבור אותה:

$$c = \frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{D + D'}{t_{40} + t'_{40}} = \frac{D + D'}{\Delta t_{40} - \Delta t'_{40}}$$

אם מניחים את הליקיום סומן כ- $t_1 = 0$ אז נקבל $\Delta t_1 = T + t_1$ ו- $\Delta t_2 = T + t_2$

הפרש הזמנים בין שתי הנקודות מיליקיום מסומן ב- $\Delta t_2 - \Delta t_1 = t_2 - t_1$

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקיום סומן לזמן המחזור של הקטפה אין את ערך הליקיום (T) ועוד זמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ נעדר בזמן המחזור הזה (נסמן ב- t_1) כלומר $\Delta t_1 = T + t_1$

7.4.3 דפי עבודה לתלמיד - מדידת מהירות האור בשיטת רומר

ביצוע ניסוי רומר בעזרת סימולציה - חלק ג'

עוד במאה ה-17 ניסו מדענים למדוד את מהירות האור ולקבוע האם היא סופית. נרצה להשתמש במידע שצברנו על מחזורי איו על מנת לחשב את מהירות האור - כפי שעשה אסטרונום בשם רומר כבר אז.

לצורך חישוב המהירות דרושים לנו שני גדלים - המרחק שעבר האור והזמן שלקח לו לעבור אותו.

חישוב הזמן

כאשר מדדנו במדידה הראשונה 40 זמני מחזור של איו בעצם מדדנו את 40 זמני מחזור ועוד הזמן שלוקח לאור לעבור מהמיקום של כדור הארץ בתחילת המדידה עד המיקום בסוף המדידה (לאחר 40 מחזורים).

במדידה השנייה מדדנו בפועל 40 זמני מחזור פחות הזמן שלוקח לאור לעבור מהמיקום הראשוני של כדור הארץ למיקום הסופי.

יוצא שהפרש הזמנים בין שתי המדידות שווה לזמן שלוקח לאור לעבור את שני המרחקים הנ"ל. מהו הפרש הזמנים? שימו לב שמדובר בהפרש בין 40 זמני מחזור בכל פעם!

חישוב המרחק

בסימולציה jupyter.2 בחלק התחתון הימני של המסך ישנם מספר פרמטרים, ביניהם המרחק בין כדור הארץ וצדק. על מנת לחשב את המרחק שעבר האור במהלך המדידות נמצא את הפרש המרחקים בין כדור הארץ וצדק בתחילת וסוף המדידות. מלאו את הטבלה:

תאריך התחלה	מרחק צדק -ארץ (AU)	תאריך סיום	מרחק צדק -ארץ (AU)	הפרש מרחקים
				מדידה ראשונה
				מדידה שנייה

סכום הפרשי המרחקים ביחידות אסטרונומיות (AU): _____

סכום הפרשי המרחקים במטרים: _____

חישוב מהירות האור

מהירות האור היא המרחק שעבר האור חלקי הזמן שלקח לו לעבור את המרחק. לפי הנתונים שאספתם, חשבו את מהירות האור (ביחידות של מטרים לשנייה):


האם המהירות שקיבלתם קרובה לגודל הידוע של מהירות האור? חשבו את אחוז הסטייה:

ברכות! הצלחתם לשחזר חישוב היסטורי בעל חשיבות עצומה למדע

7.5 שיעור 4 - סיכום ותיאור מדידת מודרניות של מהירות האור



מצגת מלווה שיעור - מדידת מהירות האור מגלילאו עד ימינו
המצגת המלאה מופיעה בנספחים, כולל הערות למורה.

מדידת מהירות האור
סיכום פעילות חקר
כתה י'



★ 1



גלילאו גליליי
Galileo Galilei

נסיון עם
מראה

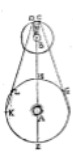
★ 2

אולה רומר (Ole Romer)
(1644 - 1710)

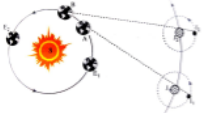



המרחק הרומרי בין הדיסקים השונים

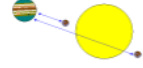
★ 3



6




5



4

הישושי רומר 1668-1677




8

מרומר עד לימינו. התקדמות במדידות האור..

- 1727 - ג'ימס ברדלי - אברציה כוכבית.
- 301,000 ק"מ לשנייה
- ג'וסף דלאמבר, 1809, באמצעות תצפיות מדויקות יותר על אינו, הגיע למהירות האור המדויקת יותר, מעט יותר מ-300,000 ק"מ לשעה.
- פיש, 1849, הגה רעיון למדידת מהירות האור על פני כדור הארץ. 315,000 ק"מ לשנייה. חבר, פוקו עזר בשיפור המערכת ודיקו 298,000 ק"מ לשל

9



מרו - 215,000 ק"מ

7

שיא הדיוק... קבוצת של הטבע.

- אונסון בשנת 1973 בעזרת מערכת ליזר הגדילה לשפר הדיוק עוד יותר והגיע במדידותיו לערך: 299,792,458 ק"מ לשנייה בדיוק של 0.001 (דיוק של מטר אחד לשנייה!)
- הגדרת המטר 1983: המרחק אותו עובר האור שניות. 1/299,792,458

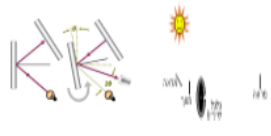
12

שיפור הדיוק. עד למטר..

- אלברט אברהם מייקלסון, 1882, שילוב עדשות ושיפור הדיוק 299,853 ק"מ לשנייה.
- 1926, מייקלסון מורלי, 299,796, דיוק 4 ק"מ.
- לואיס איסו ומורדו סמיטס, 1947, "חלל תהודה" הגיעו 299,792 עם דיוק של 3 ק"מ בשנייה.
- קייט פרום, 1958, הוסיף דיוק נוסף באמצעות אינטרפרומטר רדיו ומדד 299,792.5 ק"מ לשנייה. הדיוק 0.1 ק"מ בשנייה.

11

מפזר למנגנון פיזו-פוקו



10

7.6. העברת פיילוט בכיתה

7.6.1 תיאור המסגרת

על מנת לבחון את הפעילות שבנינו ואת תגובת תלמידים אליה העברנו אותה לתלמידים. בחנו את הפעילות ראשית כמורים המעבירים אותה, וגם אספנו את תגובות התלמידים בעזרת משוברים וראיונות. בפרק זה נתאר את ההפעלה בכיתה, את המסקנות שעלו מהפעלה זו ואת התיקונים שהכנסנו לפעילות בעקבות המסקנות הללו.

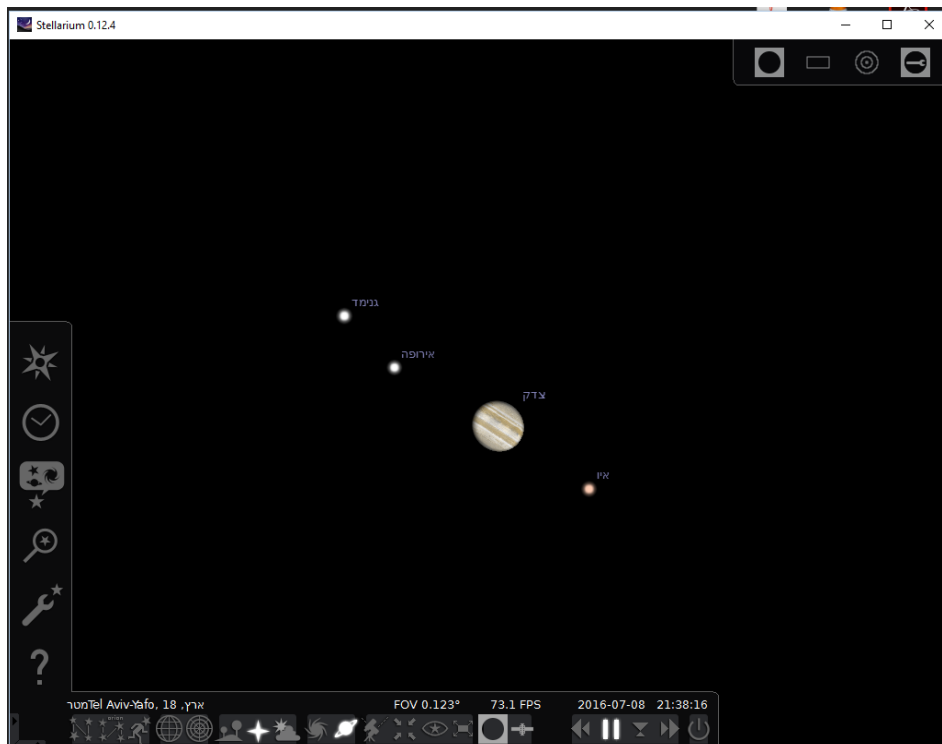
הפעילות שבנינו מיועדת לתחילת כיתה י', וכיוון שהגענו לסוף השנה בחרנו להעביר את הפיילוט בכיתה ט'. הפיילוט הועבר בבית הספר פלך בירושלים, במסגרת שיעורי פיזיקה של העתודה המדעית טכנולוגית - תכנית המיועדת למצטיינים במדעים. בכיתה היו 24 בנות שכבר יצא להן ללמוד אסטרונומיה במסגרת העתודה.

פירוט מערך השיעורים

הפעילות התחלקה לשלושה שיעורים:

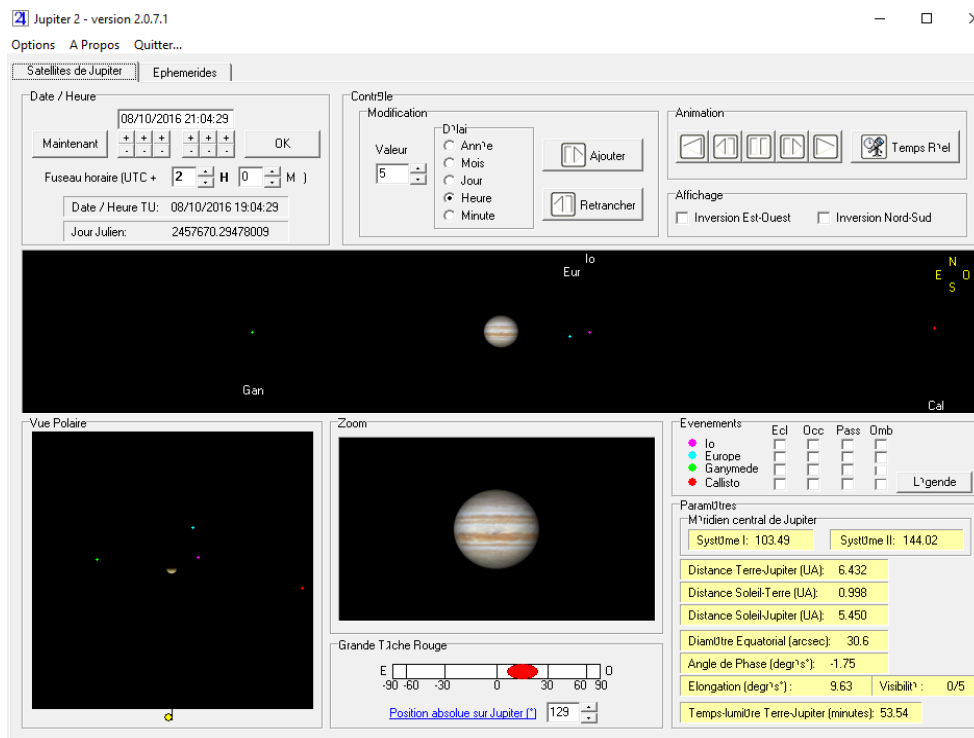
1. **שיעור מבוא** לצדק וירחיו - כיוון שהכיתה למדה אסטרונומיה בעבר, נערכה תזכורת קצרה הנוגעת למושגים בסיסיים באסטרונומיה, והרחבה בנושא צדק וירחיו על פי המצגת שבנינו.

לאחר מכן התלמידות הכירו את התכנה stellarium בעזרת דפי עבודה וחקרו בעזרתה את מערכת צדק וירחיו, כולל מדידת זמן המחזור של איו סביב צדק (הדפים מצורפים בנספחים) והכרת המושגים ליקוי וטרנזיט.



תמונה 1: מערכת צדק וירחיו כפי שנראית בתכנת הסטלריום.

2. **הצגת הבעיה** - בעזרת Jupiter 2.0 התלמידות מדדו 40 זמני מחזור של איזו בזמנים שונים בשנה ונתקלו בקושי שנתקל בו רומר במאה ה-17 (דפי הנחיה, כאמור, בנספחים). נערך דיון כיתתי בנושא והועלו השערות בנוגע לפתרון הבעיה. בסוף השיעור חולקו משובים בכתב לחלק מהתלמידות.



תמונה 2 : מערכת צדק וירחיו כפי שראית בתכנת Jupiter 2.0.

3. **שחזור מדידת מהירות האור** - בעזרת Jupiter 2.0 התלמידות מדדו את מהירות האור בשיטה של רומר, ולאחר מכן הוצגה המצגת המסבירה את המדידה ההיסטורית ונערך דיון סביבה. בסוף השיעור חולקו משובים בכתב להערכת התהליך כולו.

איסוף הנתונים

את הפיילוט בחנו הן מנקודת המבט שלנו כמורים, והן מנקודת המבט של התלמידים. רשמנו במהלך השיעורים הערות הנוגעות לקשיים/הצלחות שעלו משני הצדדים, וחילקנו משובים בסוף השיעור השני והשלישי. כמו כן נערכו שיחות קצרות עם מספר תלמידות.

7.6.2 ממצאים ומסקנות

שיעור המבוא

- מצגת המבוא עברה ללא קשיים - הנושא היה מושך והתלמידות נהנו מהגיוון שבבחירת הנושא והתלהבו שמקדישים זמן נכבד לאסטרונומיה. מתוך דברי התלמידות:

- ✓ "היה לי הרבה יותר מעניין ומהנה ביחידה זו ביחס לשאר השנה"
- ✓ "אשמח ללמוד עוד בנושאים אלו"
- ✓ "היה ממש מעניין (הרבה יותר מהידרוסטטיקה...)"

- היכרות עם stellarium - גילינו לשמחתנו שלרוב התלמידים אין צורך בהדרכה מפורטת מדי על התכנה, ושהכי טבעי לתת להם 'לשחק' ולגלות בעצמם את יכולותיה (התכנה מאוד ויזואלית). החיסרון היחיד בגישה זו הוא שבכיתה גדולה אין למורה יחיד יכולת לתת מענה לתלמידים שכן מתקשים. מספר מועט של תלמידות שהתקשו בדפי ההדרכה נאלצו להמתין למורה עד שיתפנה אליהן. בעקבות ההתנסות ההמלצה שלנו היא שאם מדובר בקבוצה גדולה יש צורך במדריך מפורט יותר על התכנה (אין צורך להסתבך, יש מדריך מפורט בכתובת הבאה: http://www.stellarium.org/wiki/index.php/Stellarium_User_Guide או לחילופין במדריך נוסף לקבוצה שיעזור בפתרון בעיות לתלמידים.



תמונה 3: תלמידות במהלך העבודה על הסטלריום

- עוד על סטלריום - התלמידים נהנו מאוד מההמחשה היפה שהתכנה מספקת ומהעבודה העצמאית בזוגות. הפעילות עם הסטלריום מומלצת בהחלט למי שיש זמן. מדברי התלמידות:

- ✓ "אהבתי לעבוד עם הסטלריום, אפשר לראות ולהבין בצורה ממשית את העבודה"
- ✓ "כיף לעבוד בצורה עצמאית בזוגות בצורה לא רגילה כמו כל שיעור"

3. האם בינתיים הייתם מגדירים את יחידת הלימוד הזאת (מבוא על צדק וירחיו, היכרות עם הסטלריום, ליקויים וטרנזיטים ומדידת זמני המחזור של איו) כמעניינת? מושכת? אנא פרטו - מה היה מעניין ומה פחות, מה הייתם משנים וכו'.

אהבתי את הנושא מאוד, והוא ממש סג'ן אולי. קצת מעניין אולי
כל הנושא של הטכניקה והשימוש, והשימוש היה מאוד מעניין
ועוד מעניין ופחות מזה והוא היה ממש מעניין.

תמונה 4: תשובה של תלמידה לאחת משאלות המשוב שחולק בתום השיעור

שיעור שני - הצגת הקושי

- הקושי העיקרי שהתעורר בשיעור זה, היה הצורך לשכנע חלק מהתלמידים שבכלל יש בעיה. הרבה מהם פתרו את ההפרש במדידת זמני המחזור ב"טעות מדידה", והסתפקו בתוצאות הקרובות יחסית שקיבלו. בעקבות כך התעורר דיון מעניין וחשוב שלא צפינו מראש - על דיוק במדידה, על טווח שגיאה אליו מצפים, ועל הדרך לדעת (אם יש דרך כזו) אם תוצאות מדידה חריגות מעידות על תגלית חדשה, או על טעות מדידה בלבד.
בעקבות השיעור הבנו שיש צורך להכין מראש גם את הדיון הזה, ולשכנע את התלמידים שמדובר בפער מדידות ששווה בדיקה (בדיוק כפי שרומר היה משוכנע שפערי המדידות שלו מסתירים מידע פיזיקלי)!
חשוב להבין שאם התלמידים לא משוכנעים שיש בעיה - תהיה להם פחות מוטיבציה להמשיך בחקר ולנסות לגלות את שורשי הבעיה.
- Jupiter 2.0 - למרות שחששנו שהתכנה הזו טכנית מדי ולא ויזואלית ומושכת כמו ה-stellarium, הופתענו לגלות שהיו כמה תלמידות שדווקא אהבו את הפשטות והדיוק של התכנה על פני הפירוטכניקה של הסטלריום. לדוגמא:
✓ "הייתי מעדיפה להשתמש רק בתכנה השנייה (Jupiter). התכנה הראשונה (stellarium) יפה אבל יש בה יותר מדי פרטים שמקשים על הריכוז".
✓ "הסימולציה הזו (jupiter) היתה נוחה יותר מהסטלריום"
- קושי שלא צפינו מראש הוא חישוב הפרשי השעות בין שני תאריכים רחוקים (כי מדדנו 40 הקפות של איו). היה זה אתגר חיובי, אך צריך לדעת שהוא יצוץ ולדעת לתת מענה פשוט לקבוצות שמסתבכות איתו (באמצעות תכנות שעושות זאת, אקסל, או חישוב ידני).
- הדיון אודות הסברים אפשריים לפער מדידת זמני המחזור - יש לאפשר זמן מספיק לדיון הזה, שמהווה את לב השיעור. להפתעתנו גילינו שתלמידות הציעו מעצמן לבדוק היכן נמצא צדק בזמן של כל מדידה למקרה שכוכבי לכת קרובים משפיעים עליו וכך הובלנו אותן לחיפוש באתר my solar system scope.

בעקבות השיעור אנו מבינים שאם יוקדש יותר זמן לדיון הזה בהחלט ייתכן שתלמידים יגיעו להצעות מעניינות!

שיעור שלישי - מדידת מהירות האור וסיכום

- בסופו של תהליך, לנו כמורים היתה ההרגשה שאמנם תלמידות רבות בכיתה נהנו ולמדו רבות מן הפעילות, אך מעטות בלבד הבינו את המדידה של רומר עד הסוף. בעינינו סיכום מפורט, הכולל מטלה/דו"ח מסכם של המהלך כולו הוא קריטי לפעילות שבנינו ולהבנה וסיפוק מלאים של התלמידים. לבנות שכן הבינו אכן היה אור של תגלית מדעית בעיניים - וזו היתה מטרתנו בבניית הפעילות. המסקנה העיקרית שלנו בעקבות הפיילוט היא שיש לחשוב כיצד להנחיל את ההרגשה הזו לחלק גדול יותר מן התלמידים!
- כיון ששיעור זה היה השיעור אחרון בשנה לא התאפשר לנו לתת מטלה מסכמת/דו"ח חקר על הפעילות - דבר שהיה מאוד עוזר לסכם את היחידה, במיוחד, כפי שהערנו לעיל, לתלמידים שלא הבינו עד הסוף את המדידות שהם ביצעו. כמו כן לא הספקנו להעביר את המצגת על מדידת מהירות האור המודרנית.

תיאור השינויים שהוכנסו לפעילות בעקבות הפיילוט

- הדגשת החשיבות של מטלה מסכמת - שיכולה להשתלב היטב בדרישה להערכה חלופית בפיזיקה.
- דיון מסודר על אודות שגיאות ודיוק במדידות.
- דיון ארוך יותר על פתרונות אפשריים לפער המדידות, ושימוש בתכנה My solar system scope רק לאחר הדיון הכיתתי, ובעקבות הצעות של התלמידים.
- הכנת דרך נוחה לחישוב הפרשי שעות בין תאריכים.
- המלצה לליווי יותר צמוד בכיתות גדולות, או לחלופין הצעת המדריך המפורט לסטלריום.
- העברת הפעילות עם הסטלריום לנספחים.
- שינויים ודיוקים בנוסח דפי העבודה והמצגות.

Anonymous (1676). *Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Roemer de l'Académie des sciences*. Journal des sçavans.

Astronomy on-line (1996). *Roemer and the Velocity of Light*. [Online]. Retrieved from: <http://www.eso.org/public//outreach/eduoff/aol/market/experiments/advanced/skills302.html>.

Barnard, E. E. (1881). *Jupiter. Observations of the Great Red Spot*. American Association for the Advancement of Science, Vol. 2, No. 28, pp. 9-10.

Cassini, S. (1672). *A Relation of the Return of a Great Permanent Spot in the Planet Jupiter, Observed by Signor Cassini*. Philosophical Transactions, Vol. 7, pp. 4039-4042.

Clea (2016). [Online]. Roemer and the Velocity of Light
Retrieved from: <http://www.acnice.fr/clea/CleaPresentation.html>.

Dale A. Ostlie & Bradley W. Carroll (2007). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Michigan. Pearson Addison-Wesley.

Jenkins, F A and White, H E , Fundamentals of Optics, 4E, McGraw-Hill, 1976.

Mathewson, S. (2016). Jupiter's Great Red Spot is Also Red Hot, Study Shows. *space.com*. [Online]. Retrieved from: <http://www.space.com/33551-jupiter-heats-up-great-red-spot.html>.

Roemer's hypothesis. *mathpages*. [Online]. Retrieved from <http://www.mathpages.com/home/kmath203/kmath203.htm>.

Romanishin, W. (2006). *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*. University of Oklahoma.

Spectral Instruments inc. (2015). *What Is A CCD?*. [Online]. Retrieved from: http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html.

Westfall, J, E. (2005). *Timing the Eclipses of Jupiter's Galilean Satellites*. Wikipedia. [Online]. Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Jupiter.

Wikipedia (2016). *Moons of Jupiter*. [Online]. Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/Moons_of_Jupiter

wikipedia (2016). *Jupiter*. [Online]. Retrieved from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Jupiter>

גליליי, ג. חזן, א. 2004. אופטיקה - תורת האור והראיה. ירושלים : האוניברסיטה העברית.

פת-אל, יגאל. אסטרו-לאב. [מקוון] אוחזר :

http://www.education.org.il/education/lab_terms.htm

נספחים

נספח א' - הצעה לפעילות: היכרות עם הסטלריום

כפי שכתבנו בחלק 7.1 - אנו מציעים למורים שיש להם זמן ורוצים להרחיב לפתוח את הלימוד בנושא מערכת השמש, צדק וירחיו וליקויים וטרנזיטים בעזרת התנסות של התלמידים בסטלריום. המסקנות שלנו מעבודה זו מתוארות בפרק 7.6. כאן מצורפים שני דפי עבודה לדוגמא:



דף ראשון - סטלריום - היכרות

הקדמה: מטרת דף עבודה זה לערוך היכרות עם תוכנת סטלריום, תכנה מקסימה ופשוטה מאוד. ניתן להוריד את התכנה ב - www.stellarium.org וכמובן גם כאפליקציה לנייד (לא תמיד חינם). במקום להסביר מה כל כפתור וכפתור עושה, תוכלו לשחק בעצמכן ולגלות, לפי השאלות המנחות שבדף. תיהנו!

1. היכנסו לתוכנה (היא מותקנת במחשבים) וודאו שהיא מראה לכם את השעה, התאריך והמיקום הנכונים (ישראל מספיק, לא צריך ירושלים דווקא).

2. מצאתם את השמש? ניתן לזוז בעזרת העכבר/החיצים ולעשות זאת עם "page up/down". האם יש עליה כתמי שמש היום? היכן וכמה? כדי לצפות בקלות מומלץ לעצור את התמונה.

3. למה לא רואים כוכבים נוספים מלבד השמש? רמז: שימו לב מה עושה לחיצה על "A"

4. האם תוכלו לאתר כוכבי לכת נוספים שנמצאים מעל האופק יחד עם השמש (כלומר - ביום)? מהם?

5. בדיוק בעוד שבוע, בשעה 16:55 יתרחש מעבר של כוכב הלכת חמה על פני השמש (נשתדל לצפות בו, זה יהיה בדיוק בזמן השיעור). כיצד אירוע זה קשור לשאלה הקודמת?

6. קבעו בעזרת התכנה מתי זמן השקיעה היום? ומתי צאת הכוכבים? תוכלו לוודא את תשובותיכם בעזרת חיפוש של זמני היום בהלכה.

כעת עברו לתחילת הלילה, כאשר השמש נמצאת מתחת לאופק וענו על השאלות הבאות (מומלץ להשאיר את האטמוספירה, כך תראו רק את הכוכבים הבהירים יותר).

7. איזה כוכב לכת רואים היום ממש בתחילת הלילה? ומתי הוא שוקע? ליד אילו קבוצות כוכבים הוא נמצא הלילה?

8. האם תוכלו להבחין בירחיו? מנו את שמותיהם ושרטטו אותם ביחס לכוכב הלכת.

9. אילו כוכבי לכת נוספים זורחים במהלך הלילה? מתי?

10. האם ניתן יהיה לצפות בירח הלילה? החל מאיזו שעה ומה תהיה צורתו? התקרבו אליו וצפו במכתשים שלו.

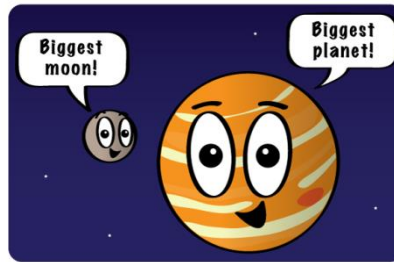
11. אם מסתכלים טוב על סיבובי הכוכבים בקצב מהיר (ולא מקבלים כאב ראש) ניתן להבחין בכוכב אחד שלא מסתובב עם שאר השמיים. האם תוכלו למצוא אותו (כדאי להסתכל ללא השפעות האטמוספירה)? מה שמו? למה הוא לא מסתובב?

רמז : חפשו בכיוון הצפון.

12. מלבד כוכבים, כוכבי לכת וירחים בהם צפינו בתכנה, באילו עוד גרמי שמיים ניתן לצפות בשמי הלילה? האם תוכלו למצוא אותם בסטלריום?

13. יש בסטלריום עוד אופציות רבות למשחק וחקירה. נסו, למשל, לשנות מיקום ולראות כיצד נראים שמי הלילה לצופה מן הירח או ממאדים, ומה שונה המראה שם מן המראה שאנו רואים מכדור הארץ.

דף שני - צדק וירחיו - חקירה באמצעות stellarium



מיהו כוכב הלכת ומיהו הירח שבתמונה?

1. פתחו את הסטלריום, ודאו שאתם במיקום ובזמן נכונים והריצו את התכנה כך שתציג את השמיים מעט אחרי השקיעה. מצאו את כוכב הלכת צדק והתקרבו אליו, כך שתוכלו להבחין בירחים הגליליאניים.
2. שרטטו את מצב צדק וירחיו בשעה 21:00.

3. לעתים לא ניתן להבחין בכל ארבעת הירחים. הריצו את השעון לשעה 22:30 וענו: היכן נמצא איו ומדוע לא ניתן להבחין בו?

4. באסטרונומיה אנו מבדילים בין שלושה אירועים היכולים להתרחש כאשר אנו צופים בשני גרמי שמיים: ליקוי מאורות, טרנזיט והסתרה.
חפשו באינטרנט ומצאו את ההגדרה של כל אירוע, והסבירו את ההבדל ביניהם.
ליקוי -

הסתרה -

טרנזיט -

5. ננסה למצוא בסטלריום אירועי ליקוי/טרנזיט. לצורך כך חשוב לדעת שהסטלריום יודע "לעקוב" אחרי כל גרם שמיים שתמצאו, אם מסמנים אותו ולוחצים על רווח. לחצו על צדק ואז על רווח, הריצו את הזמן קדימה והתבוננו כיצד התכנה עוקבת אחרי צדק. יפה, לא?

6. השתמשו בעקיבה על צדק או על ירחיו, ומצאו מתי יתרחש הטורנזיט הקרוב של איו? כמה זמן הוא יימשך? מצאו גם מתי וכמה זמן יהיה הטורנזיט הקרוב של אירופה.

שימו לב: ייתכן שלשם נוחות תצטרכו להעלים את השפעות האטמוספירה או את הקרקע - לחיצה על "A" או "G". כמובן שאם ליקוי/טורנזיט מתרחש ביום לא נוכל לצפות בו מכדור הארץ.

7. מצאו מתי יתרחש ליקוי/הסתרה של איו, וכמה זמן הוא נמשך:

8. כעת, ננסה לקבוע (כפי שעשו אסטרונומים במאה ה-17) את זמן המחזור של איו (כלומר הזמן שלוקח לו להקיף את צדק הקפה אחת). הסבירו כיצד הייתן חושבות לעשות זאת, ומדוע חייבים להשתמש בליקוי/בטורנזיט על מנת לחשב את הזמן הזה בצורה מדויקת.

9. מדדו את זמן המחזור של איו בצורה המדויקת ביותר שתוכלו, והסבירו את השיטות בהן השתמשתן על מנת לדייק את המדידה ככל הניתן.

10. השוו את הזמן שקיבלתן עם הנתונים על איו באינטרנט - האם המדידה שלכן היתה קרובה? מהו אחוז השגיאה של החישוב שלכן?



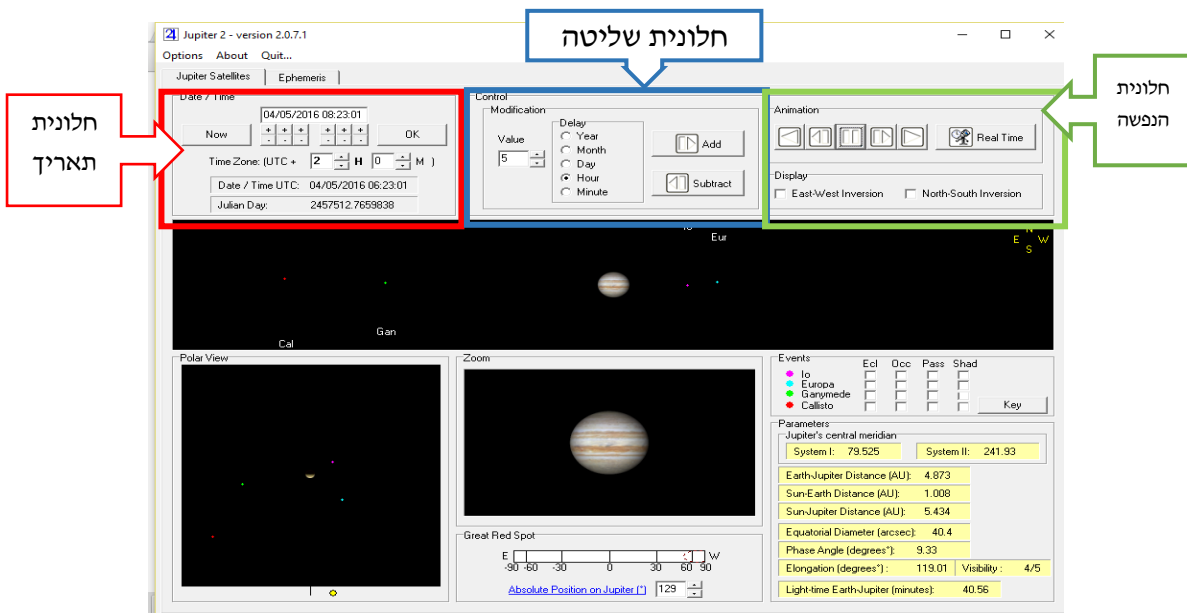
© Can Stock Photo - csp14745532

נספח ב' - דפי עבודה עם תשובות תלמיד: מדידת זמן המחזור של אינו

צירפנו כאן דפי עבודה עם תשובות של תלמיד לדוגמא, תשובות התלמיד בצבע אדום.

דף משימה - חישוב זמן המחזור של אינו

בשיעורים הקודמים הכרנו את צדק וירחיו, למדנו על ליקויים וטרנזיטים וניסינו להעריך באמצעותם את זמן המחזור של אינו. ננסה היום למדוד את זמן המחזור של אינו בצורה מדויקת ככל שניתן, ונגלה תופעה מעניינת. נשתמש בתכנה Jupiter.2 המותקנת במחשבים. היכנסו אליה (התכנה ניתנת להורדה חינם בכתובת <http://www.astrosurf.com/rondi/jupiter>):



1. התרשים בחלון העליון מראה את צדק וירחיו. כתבו מה מסמן כל קיצור?

Gan-Ganymede

Eur-Europa

Io-io

Cal-Callisto

2. בחלונית התאריך הזינו את התאריך 7/3/2016 ואת השעה 15:00:2
כעת בחלונית ה-control בחרו ב'דקות' ובערך 1. זה יקדם את התמונה כל פעם בדקה אחת. לחצו על play בחלונית האנימציה. מה קורה לאיו? תארו במילים שלכם את המתרחש עד השעה 8:00 באותו התאריך.
איו מתחיל להסתובב סביב צדק ובשעה 15:05 הוא נכנס מאחורי צדק ויוצא בשעה 32:07

3. כעת העבירו בחלונית השליטה את קצב הקפיצות לשעה אחת ולחצו על play. עקבו אחר איו. כמה הקפות הוא מבצע מה-7/3/16 בשעה 8:00 עד ה-16/3/16 בשעה 05:00?

5 הקפות

4. **נרצה למדוד את זמן ההקפה המדויק של איו.** לצורך כך נבצע מדידה של מספר רב של זמני מחזור. הסבירו מדוע מדידה בצורה כזו תדייק את המדידה:

מדידה של מספר זמני מחזור תדייק את התוצאה מכיוון שיכולים להיות סטיות או טעויות במדידה ומספר רק של מחזורים ידייקו את הממוצע של זמן ההקפה.

5. **וכעת - למדידה עצמה!**
תחילה לחצו על play, הניחו לאיו לבצע הקפה נוספת ורשמו את הזמן המדויק בו איו יוצא מהצל של צדק. (ניתן לראות באיור התחתון משמאל את מיקומו של איו מאחורי צדק). ניתן להיעזר בשינוי זמן הקפיצה ובכפתור קדימה ואחורה בחלונית השליטה על מנת לקבוע בדיוק את היציאה של איו מהצל של צדק.

17.3.16 בשעה 22:07

כעת לחצו על play וספרו ארבעים סיבובים בדיוק של איו סביב צדק. כתבו את התאריך ואת השעה המדויקים בהם איו יוצא מהצל של צדק לאחר 20 סיבובים:

20.4.16 בשעה 12:31

6. בעזרת תוכנת אקסל או באופן ידני חשבו את זמן המחזור של איו (הפרש הזמנים חלקי 40):

42.625 שעות = 1.7683 ימים

חישוב זמן המחזור של איזו בזמנים שונים - חלק ב'

1. עברו לתאריך 1/12/16. בתקופה זאת של השנה ניתן לצפות באיזו כאשר הוא נכנס לצל של צדק אך לא כאשר הוא יוצא. באיזו שעה בדיוק נכנס איזו לצל של צדק בתאריך זה?

1.12.16 בשעה 6:39

2. כעת לחצו על play וספרו ארבעים סיבובים בדיוק של איזו סביב צדק. כתבו את התאריך והשעה המדויקת בהם איזו נכנס לצל של צדק לאחר 20 סיבובים.

5.1.17 בשעה 16:19

באופן דומה לשלב הקודם, חשבו שוב את זמן המחזור של איזו:

42.533 שעות או 1.772208 ימים

3. האם זמני המחזור שווים?, דומים? או שונים לחלוטין?

זמני המחזור דומים אך לא שווים לחלוטין זה יכול לקרות עקב טעות במדידות או עקב כך שאיזו משנה את זמן מחזורו

4. חשבו את הפרש הזמנים בין זמן המחזור שנמדד על פי 20 ההקפות הראשונות לזמן שנמדד על פי 20 ההקפות השניות. בטאו הפרש זמנים זה בימים, שעות דקות ושניות:

ימים: 0.076666667

שעות: 1.84

דקות: 110.4

שניות: 6624

הבעיה שכעת גיליתם העסיקה אסטרונומים רבים שמדדו את זמן המחזור של איזו! האם איזו משנה את זמן המחזור שלו? מה לדעתכם יכול להסביר את הפרש הזמנים הנ"ל?

לדעתי איזו משנה את זמן המחזור שלו כתוצאה מכך של כוח משיכה מגורם שלישי שמעט אותו בתקופה זו בשנה ובכך נוצר זמן יותר ארוך או שאיזו אינו משנה את זמן המחזור שלו אלא שצדק משנה את זמן המחזור שלו עקב סיבה כלשהיא

דונו עם המורה/בפורום כיתתי בתשובות האפשריות שהעליתם לבעיה.

5. היכנסו לאתר www.solarsystemscope.com בו ניתן לראות את מצב הפלנטות (כוכבי הלכת) במערכת השמש.

הכניסו את תאריך תחילת המדידה הראשונה שביצעתם בחלונית התאריכים. בדקו את המיקומים של צדק ושל כדור הארץ.

לאחר מכן הזינו את תאריך תחילת המדידה השנייה ובדקו שוב את המיקומים של צדק וכדור הארץ. מה ההבדל במיקומים בין שני המצבים? האם הוא יכול לספק הסבר להפרש בין זמני המחזור שהתקבלו במדידות?

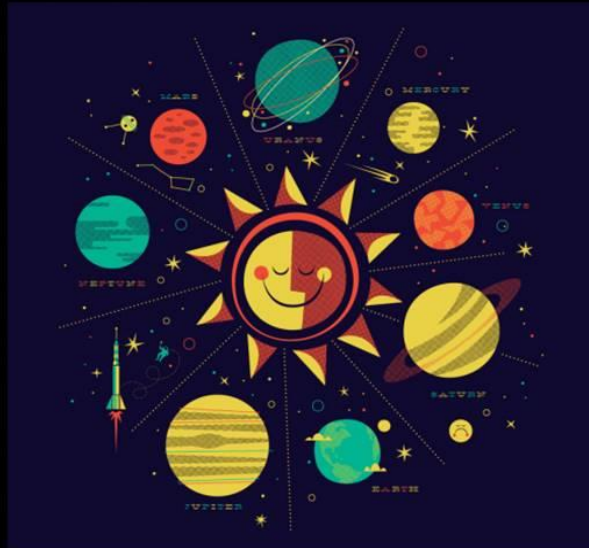
ניתן להסיק מהמיקום שכאשר כדור הארץ קרוב לצדק זמן המחזור של איו לפי המדידות ארוך יותר וכאשר כדהא רחוק זמן המחזור קצת יותר מכך.

מזה ניתן להסיק

1 שאולי כדהא משפיע מעט על איו ומאט אותו בעזרת כוח המשיכה שלו מכוון שזמן המחזור של איו ארוך יותר כאשר כדהא קרוב

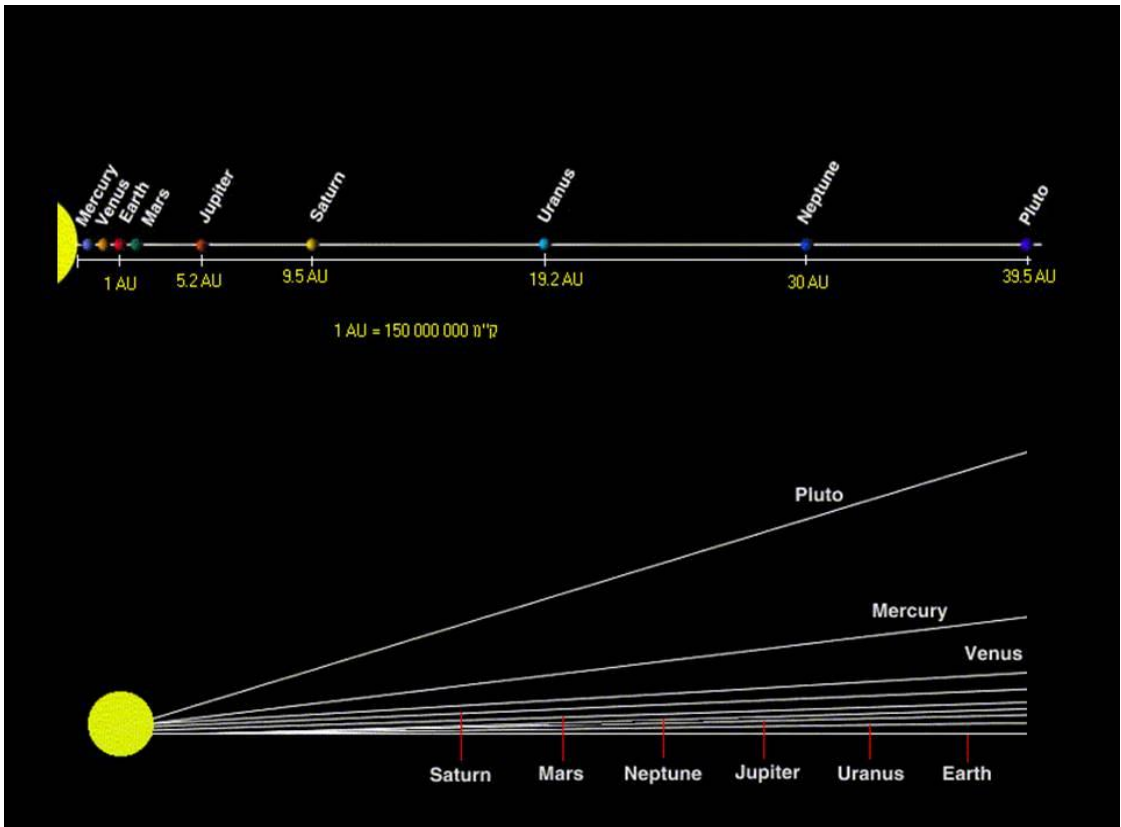
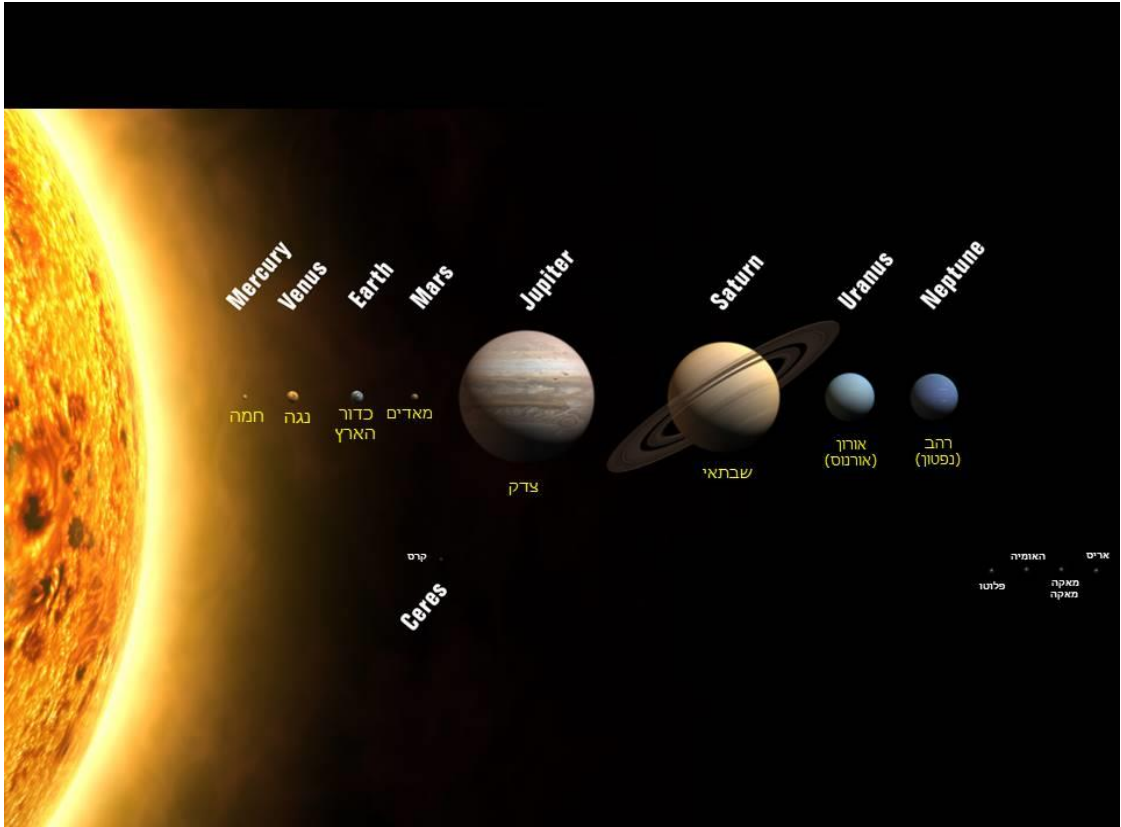
2 שמכוון שכדהא רחוק אולי קשה לראות במדויק את הזמן שאיו נכמס או יוצא מהצל וזה גורם לסטיות בזמן המחזור

מבוא למערכת השמש



כוכב וכוכב-לכת





צדק וירחיו

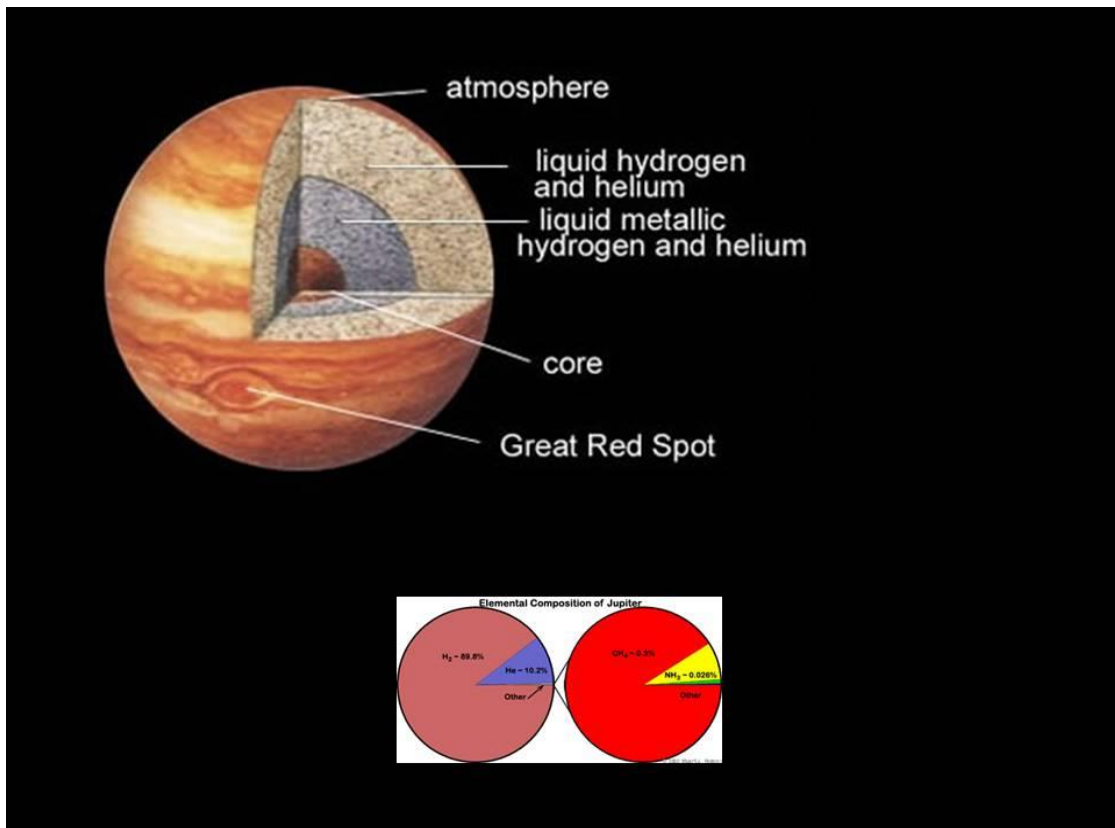


צולם ב-21 באפריל 2014 על ידי מעלמת השדה הרחב של טלסקופ החלל האבל



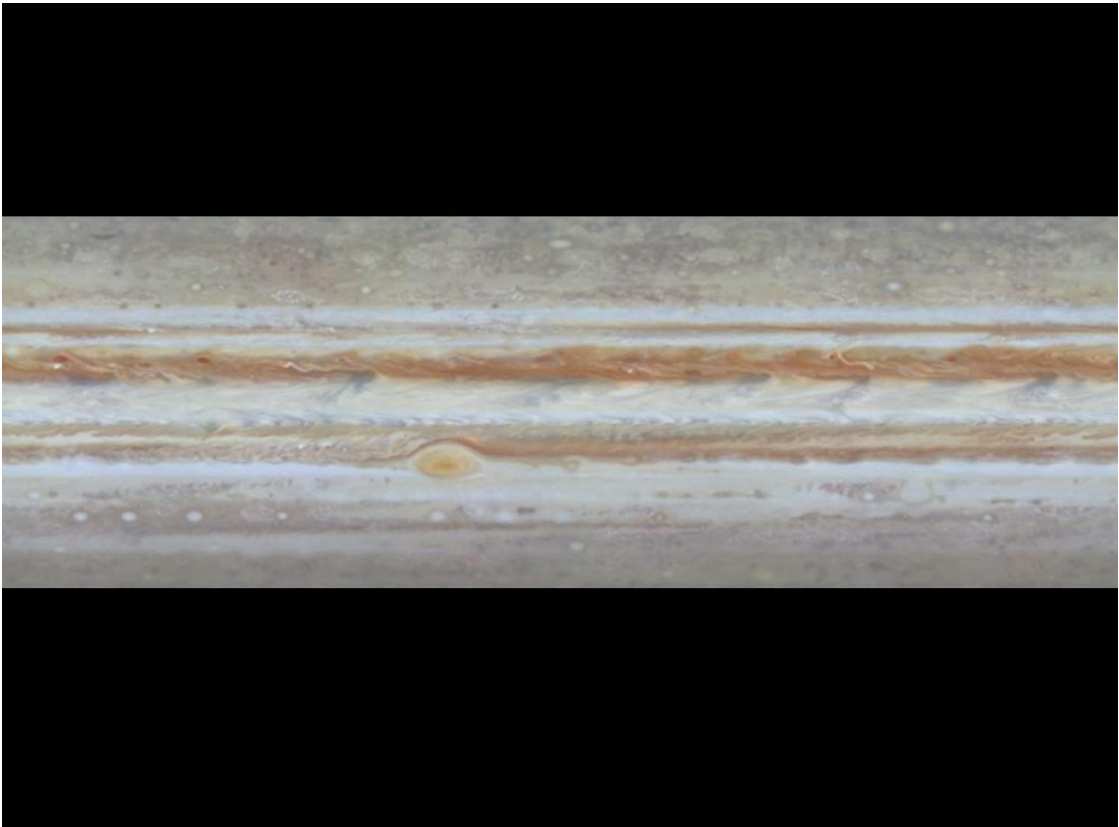
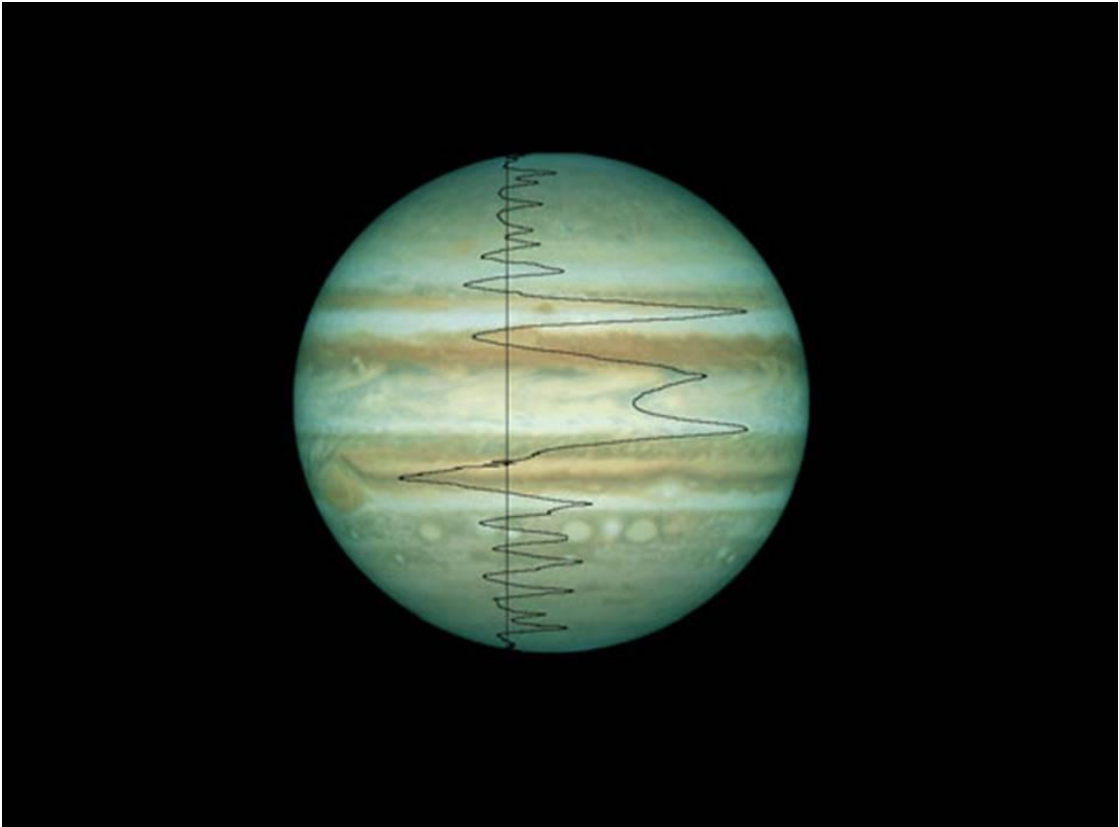
נפח כוכב הלכת צדק גדול מנפח
כדור הארץ פי 1300.

עם זאת מסתו גדולה מזו של
כדור הארץ פי 318 בלבד.

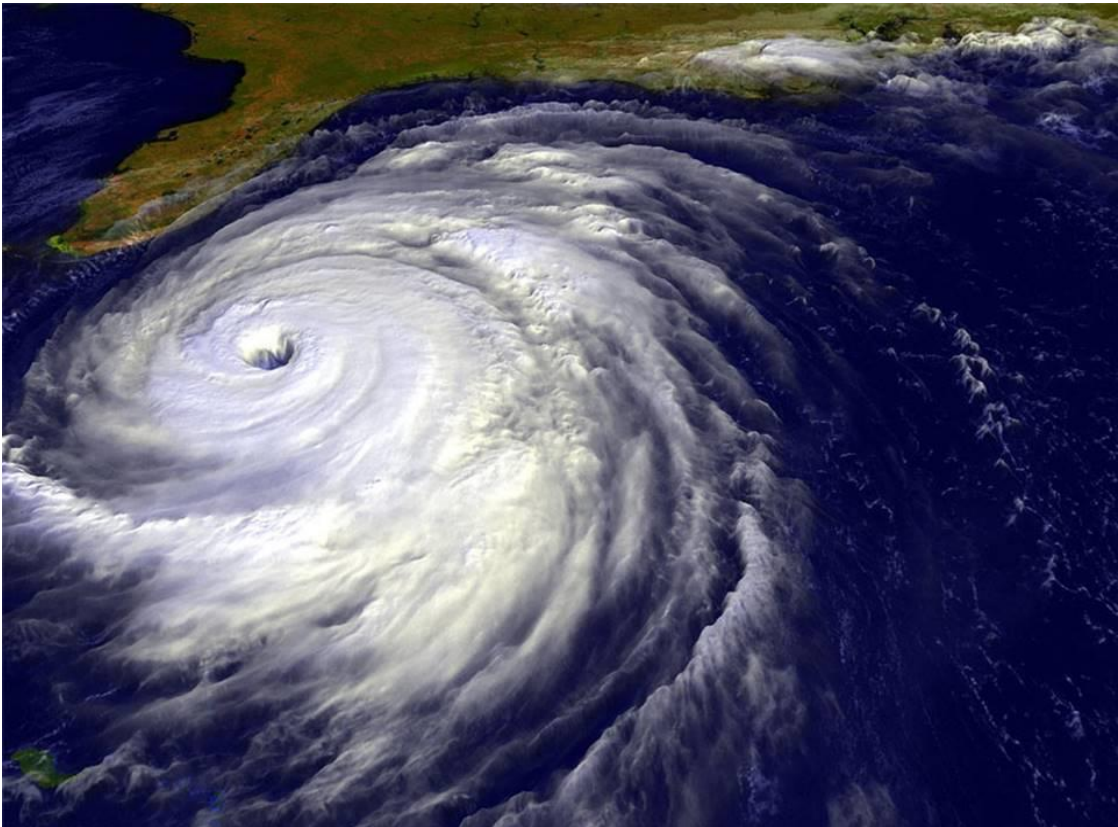


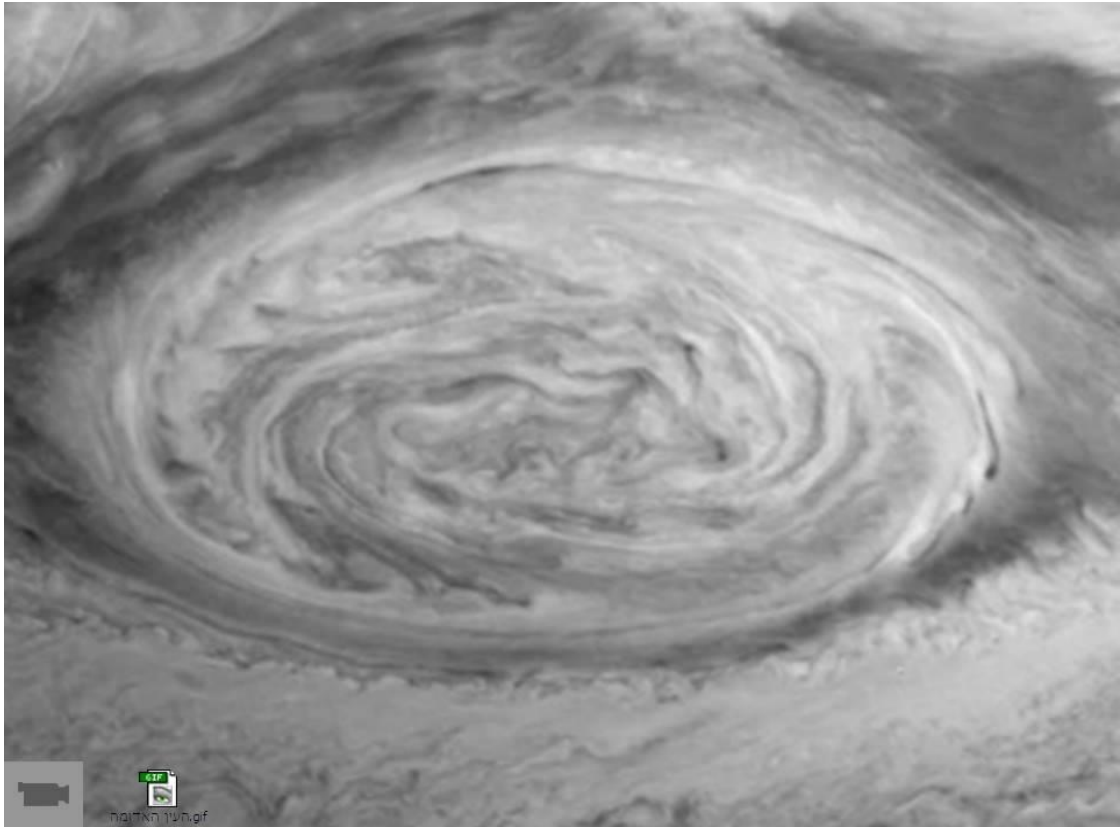

כמה זמן נמשך יום בצדק?

לצדק זמן הסיבוב העצמי הקצר ביותר מבין כוכבי הלכת: יום בצדק נמשך 9 שעות, 55 דקות ו-30 שניות בלבד!



הסופה הגדולה של צדק - הכתם האדום הגדול

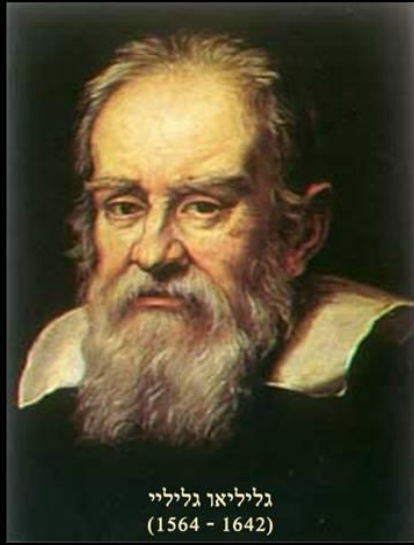




האם יש לצדק ירח?

לצדק יש הכי הרבה ירחים במערכת השמש! בעוד לנו
 בכדור הארץ יש רק ירח אחד, לצדק יש 67 ירחים
 ידועים בשם נכון להיום.

©2010 Nick Anthony Florenza & Carina Software. Voyager. All Rights Reserved - www.lunaplaner.com



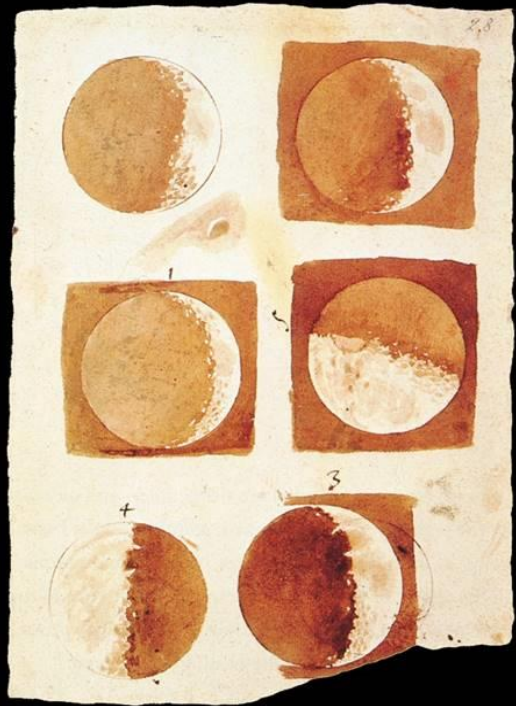
גליליאו גליליי
(1564 - 1642)

Scipio Pinasse.

Galileo Galilei, Hamilius, sermo della Ser. V. inuigilanti.
 Do audiamus, et de ogni spirito si bene ho sceler satisfare
 alario che non della lettera di Matematico nelle sue
 di di Padova.

Inuere d'auere determinato di presentare al Ser. Pinasse
 l'Archide et di p. essere di formamento inuigilanti di ogni
 ragazzo et in breua ma ritorna o serrette sino di breua que.
 Ho nuovo artificio nel maggior rispetto et scelp a disposizione
 di V. Ser. l'Archide scelerato nelle più re di te speculazioni di
 prospettiva la quantitate di supporte Legni et Vole dell' inuigilanti
 di V. Ser. et più di altro prima et ogni inuigilanti et di breua
 A numero et la qualita di V. Ser. di giudicare la sua spore
 pallestori alla caccia al combattimento o alla fuga, spore non
 nella cartoga sperta adere et particulari di breua ogni suo
 tutto et proporzionalmente.

Apr. 7. di gennaio
 Giove si vede con * * * * *
 Apr. 8. con * * * * *
 Apr. 10. con * * * * *
 Apr. 11. con * * * * *
 Apr. 12. con * * * * *
 Apr. 13. con * * * * *
 Apr. 14. con * * * * *
 Apr. 15. con * * * * *
 Apr. 16. con * * * * *
 Apr. 17. con * * * * *
 Apr. 18. con * * * * *
 Apr. 19. con * * * * *
 Apr. 20. con * * * * *
 Apr. 21. con * * * * *
 Apr. 22. con * * * * *
 Apr. 23. con * * * * *
 Apr. 24. con * * * * *
 Apr. 25. con * * * * *
 Apr. 26. con * * * * *
 Apr. 27. con * * * * *
 Apr. 28. con * * * * *
 Apr. 29. con * * * * *
 Apr. 30. con * * * * *



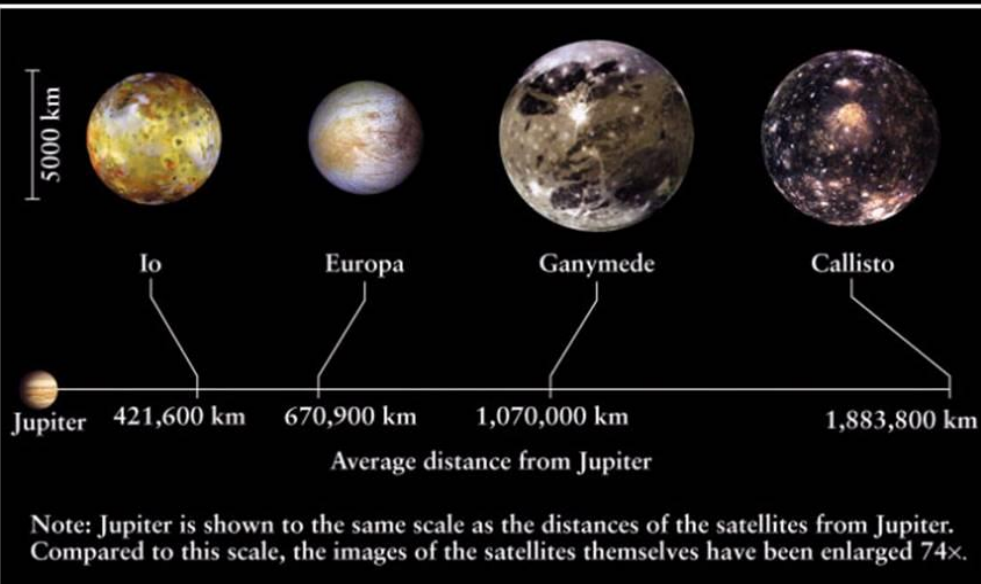
הירחים הגליליאנים

איו

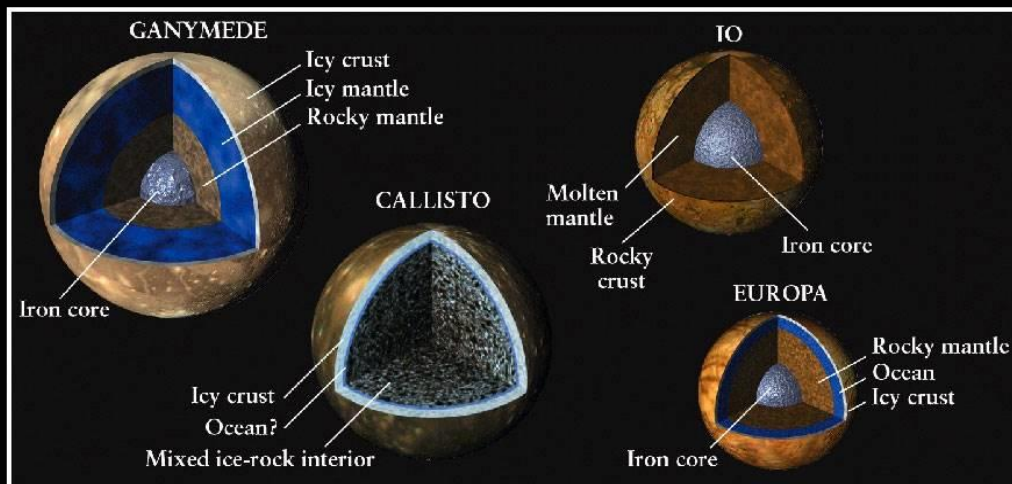
אירופה

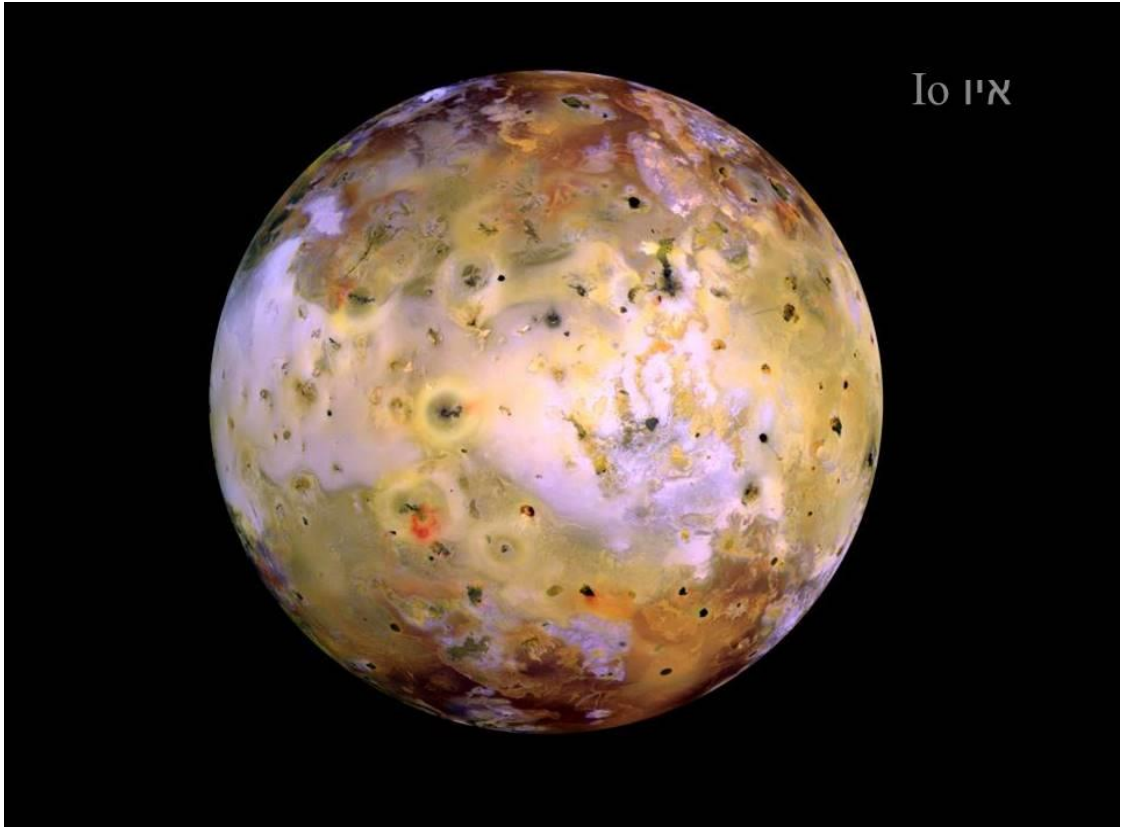
גנימד

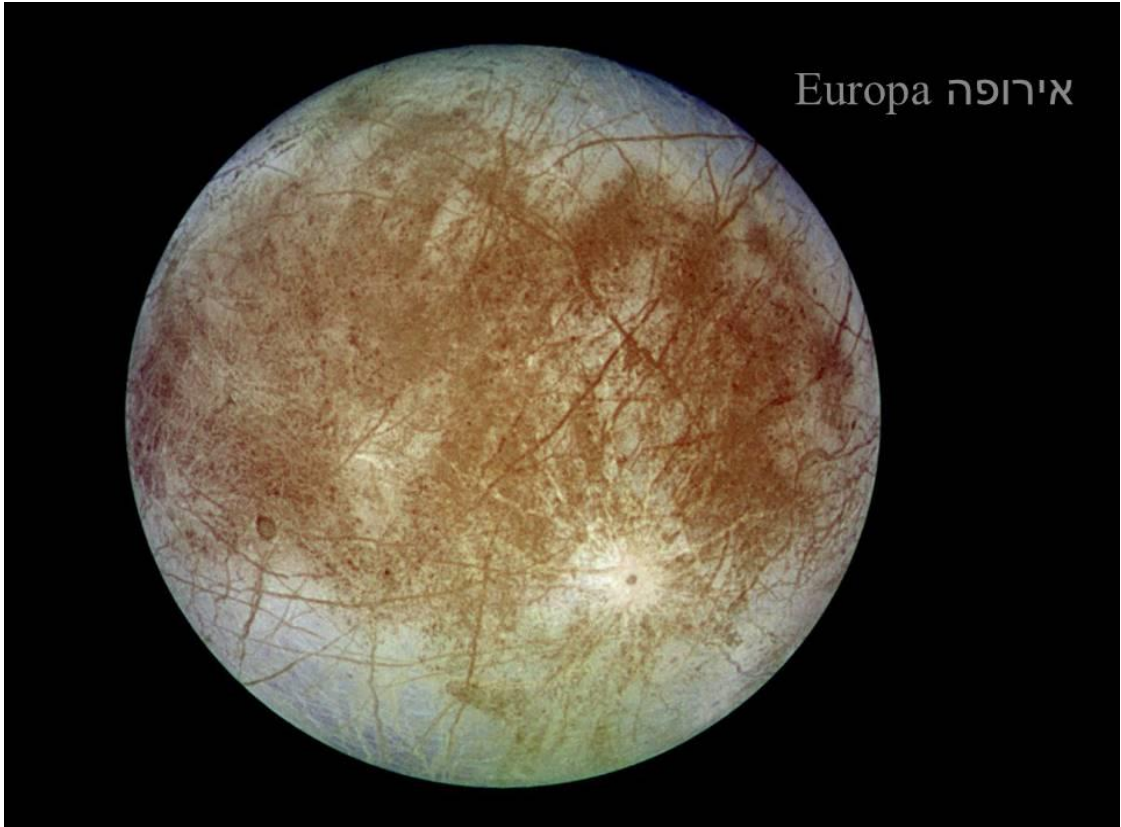
קליסטו



הירחים הגלייאניים







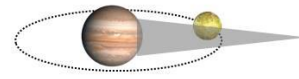
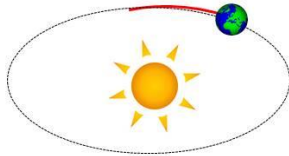
מצגת הסבר למדידת מהירות האור על ידי רומר

ניסוי רומר למדידת מהירות האור

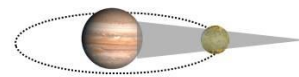
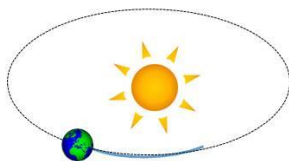


בשנת 1676 הצליח האסטרונום הדני אולה רומר לחשב את גודלה של מהירות האור בקירוב טוב.
רומר שם לב שזמן המחזור של הירח איו סביב צדק קצר במעט כאשר כדור הארץ מתקרב לצדק לעומת זמן המחזור כאשר כדור הארץ מתרחק מצדק.
רומר הבין שההפרש בזמני המחזור לא קשור לסיבוב של איו אלא לזמן שלוקח לאור לעבור את הדרך שכדור הארץ עושה במהלך זמן המחזור.

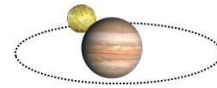
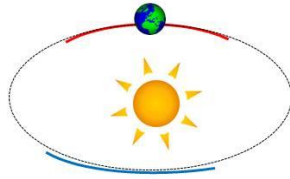
כאשר כדור הארץ **מתרחק** מצדק אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T
ועוד הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו
ביצע סיבוב שלם סביב צדק.



כאשר כדור הארץ **מתקרב** לאנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T
פחות הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן
שאיו ביצע סיבוב שלם סביב צדק.

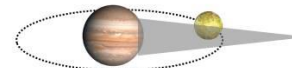
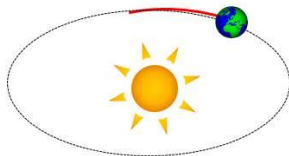


כאשר כדור הארץ **מתרחק** מצדק אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T **ועוד** הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו השלים מחזור.



כאשר כדור הארץ **מתקרב** לצדק אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T **פחות** הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו השלים מחזור.

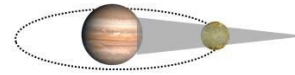
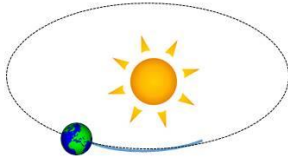
כאשר כדור הארץ **מתרחק** מצדק אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T **ועוד** הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו השלים מחזור.



הפרש הזמנים בין שתי היציאות מהליקויים יסומן ב Δt_1 כך ש- $\Delta t_1 = t_1 - t_0$.

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקויים שווה לזמן המחזור של הקפת אין את צדק (להלן T) **ועוד** הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התרחק מצדק בזמן המחזור הזה (נסמן ב τ_1) כלומר $\Delta t_1 = T + \tau_1$.

כאשר כדור הארץ מתקרב אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T פחות הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו השלים מחזור.

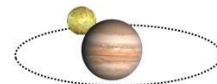
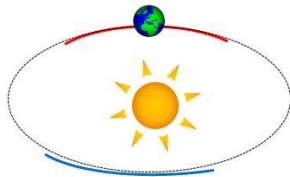


הפרש הזמנים בין שתי הכניסות מהליקויים יסומן ב Δt_1 כך ש $\Delta t_1 = t'_1 - t'_0$.

רומר הבין שהפרש הזמנים בין הליקויים שווה לזמן המחזור של הקפת אין את צדק (להלן T) פחות הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ התקרב לצדק בזמן המחזור הזה (נסמן ב τ_1) כלומר $\Delta t'_1 = T - \tau_1$.

כאשר כדור הארץ מתרחק מצדק אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T ועוד הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו השלים מחזור.

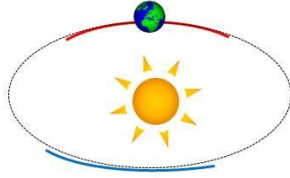
$$t_1 - t_0 = \Delta t_1 = T + \tau_1$$



כאשר כדור הארץ מתקרב לצדק אנחנו בעצם מודדים את זמן המחזור T פחות הזמן שלוקח לאור לעבור את המרחק שכדור הארץ עבר בזמן שאיו עבר השלים מחזור.

$$t'_1 - t'_0 = \Delta t'_1 = T - \tau'_1$$

אם מפחיתים את הזמן בין ליקויים כשכדור הארץ מתרחק מצדק מהזמן בין ליקויים כשכדור הארץ מתקרב לצדק מקבלים את סכום הזמנים שלקח לאור לעבור את המרחקים שעבר כדור הארץ.

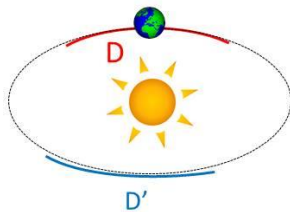


$$-t_1 - t_0 = \Delta t_1 = T + \tau_1$$

$$\Delta t_1 - \Delta t'_1 = \tau_1 + \tau'_1$$

$$t'_1 - t'_0 = \Delta t'_1 = T - \tau'_1$$

אם מפחיתים את הזמן בין ליקויים כשכדור הארץ מתרחק מצדק מהזמן בין ליקויים כשכדור הארץ מתקרב לצדק מקבלים את סכום הזמנים שלקח לאור לעבור את המרחקים שבר כדור הארץ.



נסמן את המרחקים :

$$\Delta t_1 - \Delta t'_1 = \tau_1 + \tau'_1$$

מהירות האור היא פשוט הדרך שעבר האור לחלק לזמן
שלקח לו לעבור אותה:

$$c = \frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{D + D'}{\tau_1 + \tau'_1} = \frac{D + D'}{\Delta t_1 - \Delta t'_1}$$

בפועל, מכיוון ש $\Delta t_1 - \Delta t'_1$ הוא גודל קטן וקשה למדידה.
חומר מדד ארבעים מחזורים בכל כיוון :

$$c = \frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{D + D'}{\tau_{40} + \tau'_{40}} = \frac{D + D'}{\Delta t_{40} - \Delta t'_{40}}$$

אבל המתמטיקה היא זהה ...

נספח ה' - מצגת סיכום והתפתחות מדידת מהירות האור המודרנית (כולל הערות למורה)

מדידת מהירות האור סיכום פעילות חקר כתה י'



מה קורה קודם? רעם או ברק? במי מבחינים קודם? מדוע...?

גליליאו גליליי

(1642 - 1564)



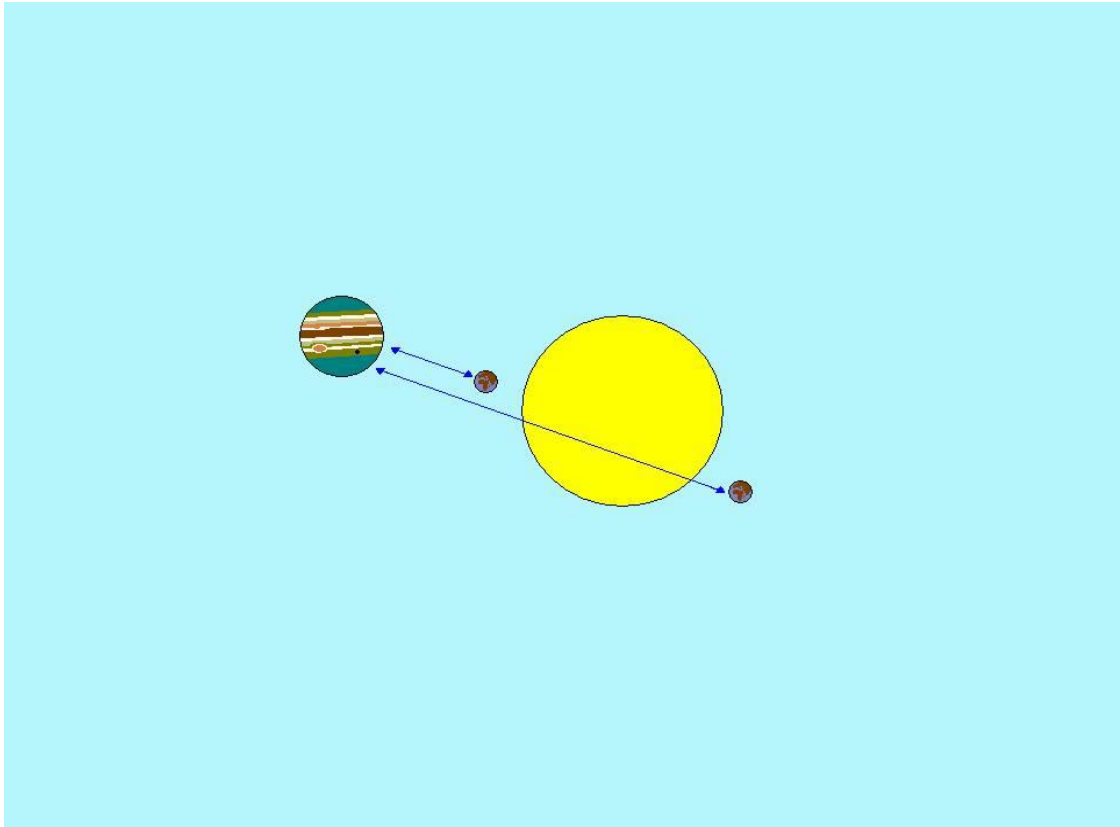
גלילאו היה הראשון לתכנן את מדידת מהירות האור אך בשל האינקוויזיציה, גילו ומצב ראייתו לא הספיק. בספרו שפירסם ב1632 ("שיח על שתי תפיסות עולם של תלמי ושל קופרניקוס") בפרק הראשון מתאר גלילאו את הניסוי בו ניסה למדוד את מהירות האור. הוא ועוזרו היו מרוחקים 2 ק"מ האחד מהשני על שתי גבעות ליד פירנצה. כל אחד היה מצויד בפנס מאחורי תריס. גלילאו תכנן למדוד את הזמן בו עובר האור את המסלול הלוך וחזור (4 ק"מ). כאשר עוזרו ראה את האור היוצא מהפנס של גלילאו, הוא פתח את התריס של פנסו ושלח אלומה חזרה לגלילאו, שמדד את הזמן. המדידות הראו זמנים שונים וגלילאו הבין שמהירות האור גדולה ובלתי ניתנת למדידה במרחקים כאלו. גם ניסיונות במרחקים גדולים יותר בעזרת טלסקופ לא צלחו אך למרות זאת הוא היה בטוח שהמהירות היא סופית.

**אולה רוֹמֶר (Ole Rømer)
(1644 - 1710)**

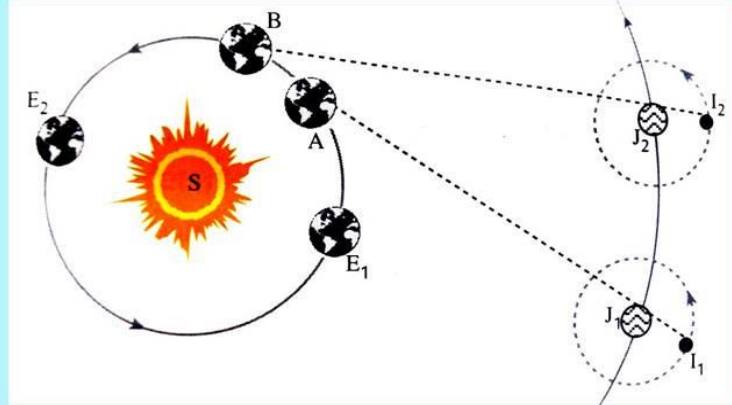


תנועת הירח איו על רקע כוכב הלכת צדק

רומר הצעיר והשנון החל לחשוב בכיוון חדש. הוא סבר שהבעיה אינה נובעת מתנועתו של איו אלא מתנועתו של כדור הארץ. כשרומר עיין בתוצאת המדידה מחורף ומקיץ 1676 הבין סופית שהמרחק של כדור הארץ מצדק משפיע על הופעת איו ויציאתו מאזור הצל של צדק. ככל שמתרחקים מצדק הופעת הירח המרוחק תתעכב וידע אף לחשב את הזמן לפי תוצאות קודמות.



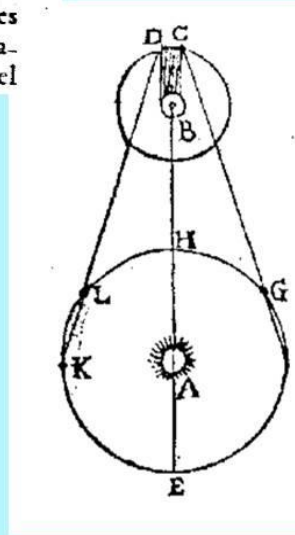
רומר הבין כי הסטייה במדידת זמן המחזור של איו סביב צדק נובעת משינוי המרחק של כדור"א מצדק. מדידת המחזור מתבצעת מיציאת איו מהאזור המוצל עד ליציאתו הבאה מהאזור המוצל. זמן זה מתארך כאשר כדור הארץ מתרחק, מ A ל B בשקף הבא.. רק לאחר כ-50 שנה טענותיו של רומר הוכחו כנכונות וכבר היה ניתן לחשב את מהירות האור שאכן הייתה גבוהה רק במעט מהחישוב של רומר



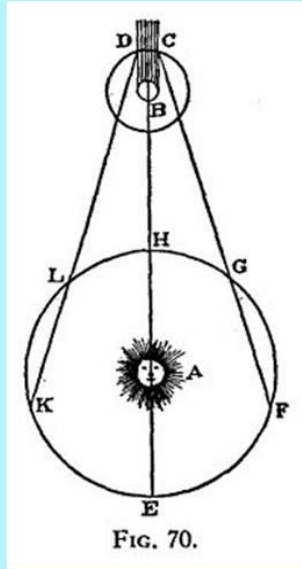
התרשים מתוך: "אופטיקה - תורת האור והראיה" מאת יגאל גילי ואמנון חזן. בתרשים הנקודות E1 ו E2 מציינות את הנקודות בהן כדור הארץ הכי קרוב לצד והכי רחוק מצדק במהלך השנה. הנקודות A ו B הן שתי נקודות כלליות בהן כדור הארץ נמצא בשלב בו הוא מתרחק מצדק. באיור מסומנים קווים מקווקיים שמציינים את קצה שדה הראיה של הירח או מכדור הארץ (כלומר את המיקום בו אינו יצא מליקוי) בזמן היותו בנקודות A ו B. האור שיוצא מאיו בנקודה J2 עובר דרך יותר לכדור הארץ הנמצא בנקודה B מאשר האור שיוצא מאיו כאשר הוא בנקודה J1 שמגיע לכדור הארץ שנמצא בנקודה A. הפרשי הזמנים הגדולים ביותר נצפים באותן תקופות של השנה בהן קצב ההתרחקות של כדור הארץ מאיו הוא הגדול ביותר.

*mouvement de la lumiere trouvé par M. Römer de
l'Academie Royale des Sciences.*

IL y a long-temps que les Philosophes sont en
peine de décider par quelque experience, si
l'action de la lumiere se porte dans un instant à
quelque distance que ce soit, ou si elle demande
du temps. Mr Römer de l'Academie Royale des
Sciences s'est avisé d'un moyen tiré des observa-
tions du premier satelite de Jupiter, par lequel



רומר עקב, מדד וגילה את התארכות זמן המחזור בהפרש של חצי שנה. הוא מדד את
הסטייה המצטברת בין כל מדידות זמני המחזור וסיכם אותן כדי להגיע לדיוק מקסימלי. כדי
שהפרש הדרכים יהיה מקסימלי, בין הנקודה הקרובה ביותר לצדק למרוחקת ביותר, כפי
שניתן לראות בכל אחד מהשקפים. הנוכחי מאחד המאמרים המקוריים בצרפתית.



מדד כ- 215,000 ק"מ

הוא הבין שזה הזמן שנדרש לאור לעבור את הדרך הנוספת השווה לקוטר מסלול כדור הארץ סביב השמש (שהיה כבר מוערך בזמנו בכ-286 מיליון ק"מ). רומר נעזר בנתון זה וחישב את מהירות האור ע"י חלוקת מרחק זה ב"כ השינוי בזמן המחזוריים בין הנקודות K-L לעומת G-F כל מעבר הוא במדידת 40 מחזורים של איו, בזמן התרחקות ברבע סיבוב של כדור"א במסלולו סביב השמש לעומת התקרבות. סה"כ רומר מדד, 22 דקות. הפרש זה הוא הזמן שהאור עובר את קוטר מסלול כדור"א סביב השמש. לאחר חלוקת הערכים גילה רומר את ערך מהירות האור הראשונה. 214000 ק"מ בשנייה.

חישובי רומר 1668-1677

The document is a handwritten ledger with two columns of text. The left column contains entries in Hebrew, and the right column contains entries in Latin. The entries are organized by year, with sub-headers for each year. The text includes dates, numerical values, and various abbreviations and symbols. The handwriting is in a cursive style typical of the 17th century.

Left Column (Hebrew):

- 1673.
 - Mar 20 17 0 0
 - Jan 15 13 25 20 Em. abal
- 1675
 - Jul 6 11 29 0
- 1677
 - Apr 12 6 7 0
 - Apr 14 2 46 0
 - Dec 27 6 3 0

Right Column (Latin):

- 1667.
 - Oct 22 10 41 35
 - Nov 26 7 6 9 0
 - Mar 19 5 1 4 6
 - Apr 27 7 42 30
 - May 4 9 44 30
 - Oct 14 11 13 0
 - Jan 16 12 42 56
 - Jan 10 14 32 14
 - Jan 12 8 59 22
 - Feb 11 10 59 6
 - Feb 20 7 20 2 6
 - Mar 7 7 59 25
 - Mar 14 9 52 30
 - Mar 23 6 17 14
 - Mar 29 13 43 30
 - Mar 30 8 14 4 6
 - Apr 6 10 11 22
 - Apr 13 12 9 9
 - Apr 22 8 24 28
 - Apr 29 20 30 6
 - Nov 23 5 37 5
 - 1672.
 - Feb 17 17 31 10
 - Feb 6 12 0 0
 - Feb 13 13 53 20
 - Feb 27 17 40 10
 - Mar 1 12 9 1
 - Mar 15 16 8 49
 - Mar 17 10 24 16
 - Mar 24 12 24 30
- 1673.
 - Apr 18 9 22 0
 - Apr 25 11 14 5
 - May 2 13 12 40
 - May 11 9 17 39
 - May 18 11 30 44
 - May 4 8 30 44
 - Oct 17 6 39 14
 - Jul 20 8 22 42
 - Jul 27 10 17 31
 - Oct 29 6 7 22
 - 1676.
 - Jan 12 10 56 11
 - Jan 7 9 49 50
 - Jan 19 11 45 55
 - Apr 22 8 11 13
 - Jun 9 12 29 24
 - Jun 16 14 16 14
 - Jul 9 14 21 54
 - Jul 19 10 47 0
 - Jul 25 12 37 10
 - Aug 26 11 31 50
 - Aug 11 9 24 30
 - Apr 18 8 44 0
 - Apr 25 8 45 0
 - Apr 26 11 51 26
 - Apr 29 8 17 30
 - Nov 5 6 59 0
 - 1677.
 - Jan 6 8 58 47

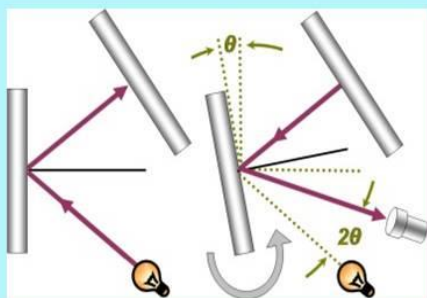
המדידות שרומר הצליח לצפות באיו. החלק הימני המרכזי 10 שנות מדידה.. ניתן לראות את חישוביו משמאל. הכתבים המקוריים הנ"ל נמצאו 200 שנה לאחר שנכתבו.

מרומר עד לימינו - התקדמות במהירות האור

- **ג'יימס ברדלי** - 1727 - אברציה כוכבית.
301,000 ק"מ לשנייה.
- **ג'וזף דלאמבר** – 1809 - באמצעות תצפיות מדויקות יותר על איו, הגיע למהירות האור המדויקת יותר, מעט יותר מ-
300,000 ק"מ לשנייה.
- **ארמן איפוליט לואי פיזו** – 1849 - הגה רעיון למדידת מהירות האור על פני כדור הארץ. 315,000 ק"מ לשנייה.
חברו פוקו עזר בשיפור המערכת ודייקו ל-298,000 ק"מ לשנ'.

ג'יימס ברדלי **1727**, 50 שנה לאחר פרסום תגליתו של רומר, ברדלי גילה כי מיקומם של הכוכבים בשמיים משתנה לפי כיוון תנועתו של כדור הארץ. ההסבר שהוא נתן לתופעה היה חיבור וקטורי של מהירות האור והמהירות המשיקית של הצופה. מדידה זו אברציה כוכבית, רק אז התקבלה טענתו של רומר כי מהירות האור היא סופית.

מפיזו למנגנון פיזו-פוקו



בהצבת 2 מראות המרוחקות 86,00 מטר האחת מהשנייה וגלגל שיניים עם חריץ אשר מהירות סיבובו ניתנת לשליטה ומדידה חישב פיזו את מהירות האור כ-315000 ק"מ בשנייה. לאון פוקו, חברו ללימודים, שיפר את הרעיון ובעזרת 2 מראות מסתובבות במהירות ידועה ומדידת הזווית שבה הקרן חוזרת הצליח לחשה את מהירות האור בדיוק רב יותר, 298,000 ק"מ בשנייה.

שיפור הדיוק

- אלברט אברהם מייקלסון - 1882 - שילוב עדשות ושיפור ל- 299,853 ק"מ לשנייה.
- ב-1926 הוא ומורלי משפרים ל- 299,796 ק"מ לשנייה.
- לואיס איסן וגורדן סמיטס - 1947 - "חלל תהודה" הגיעו ל-299,792 עם דיוק של 3 ק"מ בשנייה.
- קייט פרום - 1958 - שיפור נוסף באמצעות אינטרפורמטר רדיו ל - 299,792.5 ק"מ לשנייה.
- הדיוק - 0.1 ק"מ בשנייה.

אלברט אברהם מייקלסון, 1882, לאחר הגיית הרעיון לשילוב עדשות לניסוי של פוקו, המליץ למקד את הקרן אור. להרחיק בין המראות למרחק של 600 מטר ובכך לשפר את הדיוק. מייקלסון מדד מהירות מדוייקת של 299,853 ק"מ לשנייה. בשנת 1926 חזר מייקלסון עם חברו מורלי על המדידה בצורה מדוייקת יותר ומצא את המהירות 299,796 ק"מ לשנייה עם טעות מירבית של 4 ק"מ לשנייה.

לואיס איסן וגורדן סמיטס, 1947, יצרו "חלל תהודה" ובהכנסת גלים עם תדר ידוע הם מדדו את אורך הגל הנוצר, וחיסבו את מהירות האור בדיוק מרשים של 3 ק"מ בשנייה. מהירות האור בשלב זה התייצבה על 299,792 ק"מ בשנייה.

קייט פרום, 1958 - רמת דיוק נוספת בעזרת אינטרפורמטר רדיו שאיפשר למדוד את מהירות האור : 299,792.5 ק"מ לשנייה בדיוק של 0.1 ק"מ/שנ!

שיא הדיוק – עד למטר

- **אוונסון - 1973** - בעזרת מערכת לייזר הצליח לשפר הדיוק עוד יותר והגיע במדידותיו לערך:
299,792.458 ק"מ לשניה.
דיוק של 0.001 ק"מ (דיוק של מטר אחד לשנייה)!

הגדרת המטר 1983 :

המרחק אותו עובר האור ב- $1/299,792.458$ שניות.

מהירות האור ברמת הדיוק הגבוהה ביותר, ממנה נגזרת הגדרת המטר (1983), מתקבלת ממשוואות מקסוול. מקסוול הראה שמהירות האור בריק תלויה במקדם הפרמיביליות והמגנטיות.