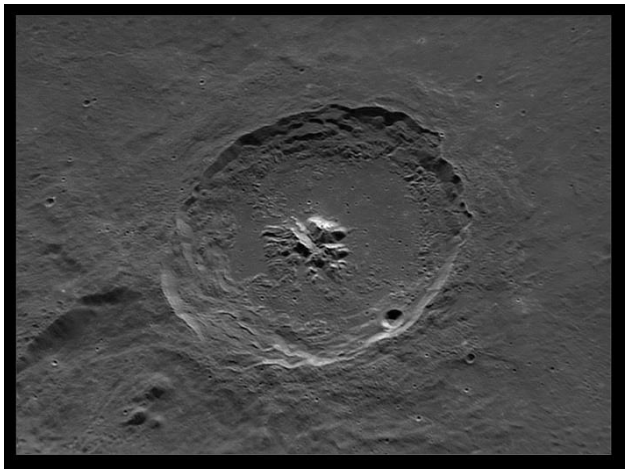
מכון ויצמן למדע

מדרשת פיינברג

תכנית רוטשילד ויצמן

"זריחה על המדבר"



חישוב מאפיינים פיזיים של מכתש על הירח באמצעות צילום CCD-
רקע מדעי תאורטי ומבנית הוראה לשימוש מורי פיסיקה בכיתותיהם

:

מגישים: גילעד גרניט ת"ז 300483419

איתי יחזקאלי ת"ז 300225752

תאריך: ה' תשרי תשפ"א, 23/9/2020

מרצה: ד"ר אמנון חזן

מנחה מדעי: ד"ר רוני מועלם

תוכן

מבוא 1

פרק 1. רקע תיאורטי למורי פיסיקה 2

1.1. אופטיקה של טלסקופים 2

1.2. צילום אסטרונומי וCCD 5

1.3. הירח והיווצרות מכתשים על פניו 8

1.4. אסטרואידים, מטאורים, מטאוריטים ושביטים 10

אסטרואיד 10

שביט 11

מטאור 11

מטאוריט 12

1.5. תהליך היווצרות של מכתשים 13

פרק 2 – צילום מכתש תיאופילוס, 3.9.19 וחישוב ממדיו 16

2.1. מצפה הכוכבים במכון ויצמן 16

2.2. תהליך הפקת הצילומים 19

2.3. שיטות חישוב של ממדי מכתש 21

שיטת יחסים למציאת קוטר מכתש 21

שיטות חישוב קוטר ועומק המכתש על ידי צל 22

פרק 3 – מערך שיעורים להוראה בכיתה 27

3.1. מבנית הוראה 27

נושא המשימה: 27

מטרות המשימה: 27

מקום ברצף ההוראה: 27

אוכלוסיית היעד: 27

חלוקה לקבוצות: 27

3.2. מערך ההוראה של יחידת הלימוד 27

שיעור ראשון – מבוא+ סדנת אזור הדמדומים 28

סדנת איזור הדמדומים: 28

שיעור שני – מכתשים: 29

שיעור שלישי – מבוא תאורטי+ חישוב ממדי מכתש 29

שיעור רביעי – סיכום המשימה: 30

3.3. מחוון : 31
סיכום 33
ביבליוגרפיה 35
נספחים 37

רשימת איורים

איור 1 : תרשים טלסקופ גלילאו 4
איור 2 : תרשים טלסקופ ניוטון 4
איור 3 : תרשים טלסקופ מסוג Catadioptric 5
איור 4 : תרשים דוגמה למבנה של CCD (Spectral instruments, 2020) 7
איור 5 : מכתש קפלר כפי שצולם על ידי Lunder orbiter 4 8
איור 6 : מכתש מייזר, צולם על ידי אפולו 11 9
איור 7 : מראה של הצד הרחוק לעומת הצד הקרוב של הירח, האחרון משמאל 10
איור 8 : צילומים של ארבעת האסטרואידים הגדולים ביותר. 10
איור 9 : צילום על ידי הגשושית Deep impact של השביט 103P/Hartly 11
איור 10 : צילום של מטאור במטר הליאונידים 12
איור 11 : מטאוריט מתכתי אשר נחת באוסטרליה בשנת 1910 13
איור 12 : צילום מכתש תיאופילוס על ידי אפולו 16 (AS16-M-0692) 16
איור 13 : מבנה המאיץ על מצפה הכוכבים בראשו 16
איור 14 : הטלסקופ במצפה הכוכבים 17
איור 15 : מראה מתוך הטלסקופ על סביבתו, כולל הירח ונוגה 18
איור 16 : צילום מסך של תוכנת השליטה בטלסקופ 18
איור 17 : חלק מתהליך הכנת הטלסקופ 19
איור 18: תמונה של מכתש תיאופילוס 20
איור 19 : תמונת מלוא הירח 22
איור 20 : חיתוך מתאר הצורה הכללית של מכתש 23
איור 21 : הדגמה של המושג של מרחק זוויתי 23
איור 22 : המחשת של הגיאומטריה המפושטת בחישוב להלן 24
איור 23 : איור המציג את שיטת הקירוב המחושבת. 26

רשימת טבלאות

טבלה 1 : נתונים של פילטרים סטנדרטים בצילום אסטרונומי (Bessel,2005).....8
טבלה 2 : תוצאות של קוטר המכתש הראשוני כתלות בקוטר וצפיפות האסטרואיד 15
טבלה 3 : קוטר האסטרואיד אשר היה יוצר מכתש פשוט בקוטר 100 ק״מ בקירוב 15

מבוא

מטרתה של עבודה זו היא לתרום תרומה קטנה לתחום הוראת הפיסיקה. עבור פרויקט הסיום שלנו בחרנו נושא מתחום האסטרונומיה התצפיתית, שניתן לחקור בקלות, גם ללא ציוד יקר ערך. בעבודה זו נציג מגוון שיטות שבאמצעותן ניתן לחשב את ממדיו של מכתש שעל פני הירח, בעזרת צילום תמונה בזמן המתאים. רצוננו הוא להעניק למורה את כל הידע והכלים הדרושים לו כדי לעסוק בנושא זה כחלק מההוראה בכיתה. לפיכך, עבודה זו מחולקת לשני חלקים מרכזיים. בחלק הראשון, החלק התאורטי, נקיף את כל הנושאים שלדעתנו חשוב להכיר בטרם ניגשים לתצפית במכתשי הירח ולצילום אסטרונומי. נפתח בהסבר על עקרון הפעולה של הטלסקופ, על סוגיו השונים ועל ההיסטוריה שלו וכן נסקור את הנושא של צילום אסטרונומי, בייחוד באמצעות שימוש בחיישני CCD. לאחר מכן נספק רקע על הירח ועל המכתשים שעל פניו. לא ניתן לדבר על מכתשי הפגיעה שמעטרים את פני הירח בלי לעסוק בגופים שגורמים אותם. לכן נעסוק באסטרואידים ואגב כך בגופים הקטנים הנוספים שנעים במערכת השמש ובשמותיהם השונים- השביטים, המטאורים והמטאוריטים. אז נסביר את תהליך היווצרות המכתש במהלך פגיעת האסטרואיד. לאחר הרקע הזה נספר על מצפה הכוכבים שבמכון ויצמן למדע ועל התצפית שביצענו שם לשם חישוב ממדי מכתש תיאופילוס שעל פני הירח. לסיום החלק התאורטי נסקור מספר שיטות בהן השתמשנו (ובהם אנו מציעים למורים להשתמש עם תלמידיהם) לחישוב ממדי המכתש מתוך התמונות שצילמנו.

בחלקה השני של העבודה נציג מהלך הוראה שלם שפיתחנו ואנו מציעים למורים ליישם בכיתותיהם. מהלך ההוראה ניגש לנושא העבודה ממגוון זויות שונות. הוא נושק לתוכנית הלימודים באופטיקה, אך איננו נשאר רק בגבולות הגיזרה שלה אלא מרחיב אותה. אנו מקווים שמי שיקראו את העבודה ואת מהלך ההוראה יחושו כמונו שיש כאן מכלול נושאים ופעילויות שיכולים לתרום רבות לתלמידי הפיסיקה ולהעניק להם תובנות פיסיקליות ואף חינוכיות החורגות בהרבה מהנושא הטכני של העבודה ושמשתלם להשקיע לשם כך את זמן ההוראה הכה יקר עבורנו המורים.

פרק 1. רקע תיאורטי למורי פיסיקה

1.1. אופטיקה של טלסקופים

בחלק זה אנו נסקור בקצרה את ההיסטוריה ונתעמק בפיסיקה של טלסקופים אשר הינם כלי עבודה חיוני בתחומי האסטרונומיה ואסטרופיסיקה. למעשה תחומים אלו ככל הנראה לא היו קיימים ללא המצאת הטלסקופ. אנו מניחים כי הקורא הינו בעל ידע מעל הבסיס בתחומים של: אופטיקה, מכניקה, אלקטרומגנטיות, אלגברה וטריגונומטריה. אנו נרחיב רק על התחומים אשר אינם נלמדים בדרך כלל במסגרת בתוכנית הלימודים בתיכון.

התיעוד הראשון להמצאת הטלסקופ הוא על ידי האנס ליפרשי (Hans Lipperhey) בסביבות שנת 1608 (King, 1955). הוא שופר בהמשך על ידי גלילאו גליליי ויוהנס קפלר בפרק זמן קצר וכך נפתח העידן של אסטרונומיה אשר איננה מוגבלת ביכולות של העין האנושית בלבד. טלסקופים אלו כולם היו "טלסקופים שוברי אור" משמע הם השתמשו במערכת של עדשות במטרה לאסוף אור, למקדו ולהגדיל את המטרה אשר עוקבים אחריה בטלסקופ. אייזיק ניוטון ב-1668 המציא סוג חדש של טלסקופ אשר השתמש במראות קעורות במטרה לאסוף ולמקד את האור הנכנס ולכן נקרא "טלסקופ מחזיר אור". במאה ה-19 התפתח סוג שלישי של טלסקופים, המכונה טלסקופ קטדיופטרי (Catadioptric) אשר משלב אלמנטים של החזרה ושבירה בתוכו וכך פותר חלק מהבעיות של כל אחד מהם[1].

במאות השנים הבאות הטלסקופים נשארו בתחום האור הנראה עם שיפורים שונים עם התקדמות בטכנולוגיית הייצור והידע של חומרים, ורק עם גילוי מקורות רדיו בחלל בתחילת המאה ה-20 נפתח העידן של אסטרונומיה באור לא נראה. גם כיום במאה ה-21 טלסקופים באור נראה מהווים חלק חשוב בחקר החלל. חיפוש מהיר באתר של נאס"א (NASA) או איס"א (ESA)- סוכנויות החלל של ארה"ב ואירופה, בהתאמה, יחשוף בפני המחפש מכלול גדול של טלסקופים באור נראה אשר מובילים את המחקר של החלל החיצון[2].

לשלושת סוגי הטלסקופים המוזכרים לעיל משותפים שני עקרונות בסיסיים: 1) עובדים בעיקר בתחום האור הנראה, 2) ניתנים להסברה על בסיס אופטיקה גיאומטרית. החשיבות של שני עקרונות אלו היא כי אנו מסוגלים ללמד את עקרון הפעולה של טלסקופים לתלמידים בשכבות גיל שונות, להדגים אותו בבניית מודל מתפקד בכיתה על ידי המורה או התלמידים אפילו, וכמובן להשתמש בכמות התמונות הגדולה מאוד מתחומי האסטרונומיה התצפיתית על מנת לספק לתלמידים השראה.

אילו סיבות יש לאסטרונומים להשקיע בטלסקופים כשברצונם לבצע תצפיות אסטרונומיות? ניתן לסכם אותן ברשימה קצרה אך לא ממצה:

1. איסוף אור – עדשה או מראה גדולה יכולות לאסוף אור רב יותר מאשר העין האנושית.
2. הגדלה זוויתית – המערכת האופטית מאפשרת להגדיל שטח קטן בכיפת השמיים.
3. הגדלת טווח החישה – ניתן לבנות גלאים אשר יגלו אור בלתי נראה לעין האנושית.
4. תיעוד – שימוש במצלמה במקום בעין מאפשר תיעוד ושימור של העצם לשימוש עתידי.

---

[1] פירוט מורחב יותר יהיה בפרק הבא כאשר נציין את התכונות והיכולות של הטלסקופ שבמצפה הכוכבים במכון ויצמן, בו השתמשנו לתצפית שלנו.

[2] בולטים ברשימה זו בין השאר טלסקופי החלל ע"ש "האבל" וע"ש "קפלר", טלסקופ KECK בהוואי ו VLT בצ'ילה.

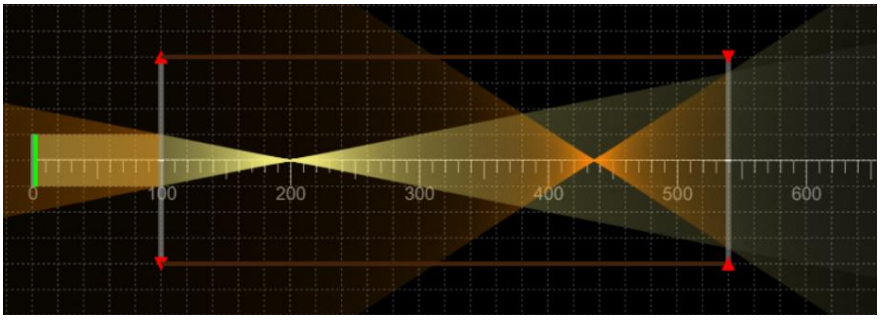
ניתן לומר באופן כללי כי ככל שהטלסקופ יהיה בעל קוטר גדול יותר, נוכל לצפות באמצעותו בעצמים חיוורים יותר, וככל שהחיישן יהיה רגיש יותר הוא יספק לנו איכות גבוהה יותר של תמונה. אמירה כזו היא אמנם כוללנית מאוד, ומן הסתם לא מדוייקת לחלוטין, אבל היא נכונה בתור כלל אצבע.
למעשה, לא בכל מקרה נעדיף להגדיל את קוטר העדשה או את רגישות החיישן, גם לכך יש חסרונות. ראשית כל, המחיר- כמו בכל תחום, מכשיר משוכלל יותר עולה יותר, וכשמדובר בטלסקופים העלות מאמירה באופן משמעותי ביותר. ברבים מהמקרים העלות לא שווה את התועלת, הכל עניין של השימוש המיועד באותו הטלסקופ. בימינו ניתן לרכוש טלסקופים במחירים סבירים ביותר שניתן לצפות באמצעותם בקטלוג רחב למדי של עצמים שמימיים, המספיק בודאי למטרות חינוכיות.
שנית, הפרעות – הפרעות אטמוספריות או אלקטרוניות לפעולת הטלסקופ מחמירות משמעותית עם העלייה ברגישות של המערכת.

כפי שכתבנו קודם, טלסקופים אופטיים ניתנים להסבר מספק תוך שימוש בעקרונות האופטיקה הגיאומטרית. העקרונות אשר נמצאים בתוכנית הלימודים, (עבור מי שמלמדים אופטיקה גיאומטרית בתיכון) הם שלושת החוקים הבאים:

1. מהלך קרני אור הינו בקווים ישרים.
2. חוק ההחזרה.
3. חוק השבירה של סנל.

שלושת חוקים אלו מאפשרים להסביר באופן כמעט מלא את התופעות האופטיות הנדרשות להבנת הפעולה של טלסקופ אופטי רגיל. לצורך הבנת תופעות מורכבות יותר כמו אברציות (עיוותים) אופטיות נדרש להיכנס להיבטים של התורה הגלית ותכונת הקיטוב של אור.
לצורך חלק מהסרטוטים האופטיים שיובאו להלן השתמשנו בהדמיה הזמינה באינטרנט באתר (Ray Optics Simulation, 2020) , הכלי נבחר בשל היותו חינמי, מבוסס דפדפן וקל מאוד לשימוש.
תמונות מדגימות לחלקים השונים הניתנים לייצוג על ידי ההדמיה מופיעות בנספח 1.
כעת, נכנס להסבר מלא יותר של סוגי הטלסקופים האופטיים הנפוצים אשר ציינו, נתייחס ליתרונות ולחסרונות שלהם, ונוסיף סרטוט של טלסקופ פשוט מכל סוג:

1. טלסקופ שובר אור:
   1.1. מבנה: טלסקופ זה משתמש במערך של עדשות המוחזקות בצינור סגור.
   1.2. יתרונות: כל העדשות בעלות אותו ציר אופטי, קל לתחזוקה יחסית, ניתן לשים מספר עדשות ברצף לקבלת הגדלה גדולה יותר.
   1.3. חסרונות: אורכי גל שונים מתרכזים במישורי מוקד שונים (עיוותים כרומטיים), עדשות גדולות הן כבדות מאוד ומגבירות עיוותים נוספים, הטלסקופים ארוכים יחסית.
   1.4. סרטוט: דוגמה לטלסקופ של גלילאו, עדשת העצם היא עדשה מרכזת חזקה בעוד עדשת העינית היא עדשה מפזרת חלשה, כך שהצופה יכול לראות דמות מדומה.



איור 1 : תרשים טלסקופ גלילאו

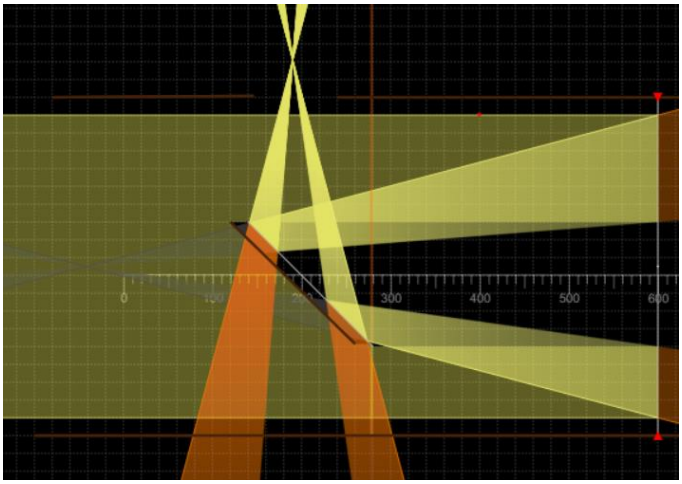
2. טלסקופ מחזיר אור :

2.1. מבנה : טלסקופ זה משתמש במראה כדורית או פרבולית, בדרך כלל בתחתית הטלסקופ הממקד את הקרן לעינית המוסטת מציר הטלסקופ.

2.2. יתרונות : מראות הן קלות יותר מעדשות, יש להן אובדן אנרגיה נמוך יותר, מאפשר לבנות מערכת קומפקטית יותר.

2.3. חסרונות : המיקוד אינו בציר ישר, עיוותים מונוכרומטיים של שדה נפוצים, בדרך כלל מערכת פתוחה מחייבת ניקיון תדיר, חסימה של חלק משדה הראיה.

2.4. סרטוט : דוגמה לטלסקופ של ניוטון, ישנה מראה קעורה בבסיס הממקדת את קרני האור דרך מראה מישורית לנקודת מוקד בניצב לציר האופטי (בדרך כלל תהייה עדשה קטנה באזור זה במטרה להפוך את הדמות למדומה ו / או להגביר את ההגדלה).



איור 2 : תרשים טלסקופ ניוטון

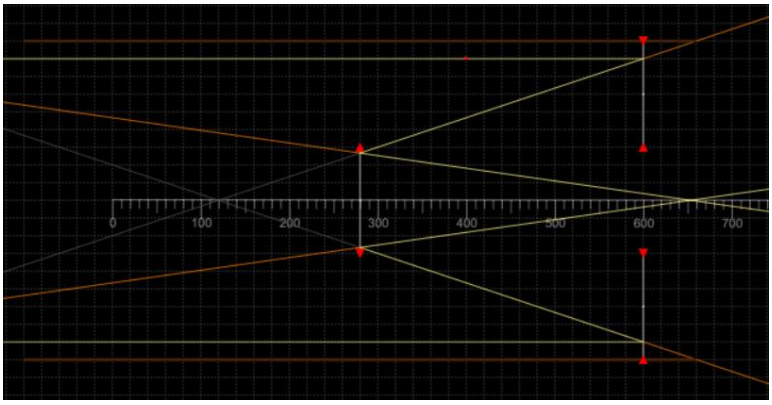
3. טלסקופ קטדיופטרי :

3.1. מבנה : טלסקופ המשלב מראות ועדשות יחדיו, כאשר מראה מול המפתח מרכזת את האור דרך לוחית קדמית אשר משלבת מראה ועדשה.

3.2. יתרונות : מערכת קומפקטית, מתקן עיוותים של שדה ראייה.

3.3. חסרונות : הקטנה בשדה הראייה, מערכת מורכבת ורגישה.

3.4. סרטוט : דוגמה לטלסקופ מסוג Schmidt–Cassegrain Catadioptric, בבסיס הטלסקופ ישנה מראה קעורה עם חור במרכזה, מול חור זה ישנה מראה קמורה הממקדת את האור מעבר למפתח המוחזר מהמראה הראשית.



איור 3 : תרשים טלסקופ מסוג קטדיופטרי

לשם שלמות[3] העיסוק בנושא כדאי להתייחס גם לעובדה כי האור הנראה הינו גל אלקטרומגנטי אשר העין האנושית רגישה אליו רק בתחום מסוים. תחום זה, "התחום הנראה" נחשב מצומצם יחסית ומתפרש על אורכי גל של בין 400 ל-700 ננומטר (או תדירויות 750 ל-430 טרה-הרץ). לעיתים נהוג להגדיר טווח מעט רחב יותר מזה כתחום הנראה, כך שכוללים בתוכו גם חלקים מהתחומים האולטרה סגול והאינפרה אדום, 320-1000 ננומטר (Romanishin, 2006).

בעשרות השנים האחרונות התרחב המחקר התצפיתי שנעזר בטלסקופים המודדים קרינה אלקטרומגנטית שמחוץ לתחום הנראה. כך נחשפו סוגים שונים של עצמים שמימיים שפולטים קרינה אך ורק בתחומים אלו של הספקטרום. בכל זאת, למרות כל ההתפתחויות והתגליות האפשריות כאשר צופים באורכי גל אשר אינם באור הנראה, ישנן מספר סיבות פיסיקאליות שבגינן ישנה עדיפות להתמקדות בתצפית באורכי גל דוקא בתחום הנראה:

1. האטמוספירה שלנו שקופה יחסית לקרינה בתחום זה (ולקרינת רדיו) לכן ניתן לצפות לחלל מכדור הארץ, ולא להידרש לטלסקופ חלל. זאת בניגוד לשאר הקרינה האלקטרומגנטית שנחסמת כמעט לחלוטין בהגיעה לאטמוספירת כדור הארץ.
2. העצמים המרכזיים בהרבה מקרים לצפייה הינם כוכבים, אשר רובם פולטים את רוב הקרינה האלקטרומגנטית שלהם בתחום הנראה, בצורה של קרינת גוף שחור.
3. מספר רב של מולקולות ואטומים הם בעלי מעברים אלקטרונים אשר פולטים קרינה אופיינית הניתנת לזיהוי בכלים ספטרומטרים בתחום הנראה, וכך ניתנים לגילוי בתצפית.

1.2. צילום אסטרונומי ו CCD

צילום אסטרונומי, או באנגלית Astrophotography הוא שם למכלול השיטות בהן נעשה שימוש החל מהמאה ה-19 (בעיקר בסופה) במטרה לתעד מידע אסטרונומי. טרם שיטות תיעוד אלו אסטרונומים יכלו להסתמך על העיניים שלהם וכישורי הציור שלהם על מנת לתעד את אשר נקלט דרך עינית הטלסקופים שלהם. בעת שילוב של שיטות שונות של צילום חלו שתי התפתחויות משמעותיות:

1. חשיפה ארוכה – חומר צילום מאפשר לאגור אור לאורך פרק זמן ארוך, תוך תכנון מקדים, ובכך לגלות עצמים חיוורים יותר מסף הגילוי של העין האנושית.

[3] ישנה תכונה נוספת של האור המשפיעה על התצפית האסטרונומית, קיטוב האור, אך דיון בה חורג מהגבולות שחשבנו שהינם רלונטיים לצרכים של עבודה זו.

2. יכולת לשיתוף מידע עקבי – בצילום לא נכנסת הטיה של הצופה או סובייקטיביות שלו לגבי הפרטים של העצם הנצפה, משמע המידע אובייקטיבי וניתן להשוואה בקלות יתרה עם תוצאות של צופים אחרים.

ראוי לציין תוצאה נוספת ולא צפויה של התפתחות הצילום האסטרונומי- היכולת לחלוק תמונות ומידע עם אנשים שאינם אנשי מקצוע ובכך לעודד התעניינות בנושא. כיום הדבר ברור מאליו- ניתן למצוא כתבות בנושאים אסטרונומיים באתרי חדשות כמעט מידי יום, באתרים רבים כגון האתר (Astronomy picture of the day, 2020) ניתן למצוא מאות תמונות מרשימות בצורה נגישה לקהל הרחב וכן עוד דוגמאות רבות. אך בעבר הרחוק זה לא היה המצב. האפשרות לשתף תמונות אותנטיות של תצפיות בעצמים אסטרונומיים האיצה מאוד את המגמה של התעניינות הציבור הרחב בתחום האסטרונומיה התצפיתית.

מה נדרש מאסטרונום לצורך צילום אסטרונומי, האם זו פעולה פשוטה של חיבור מצלמה לטלסקופ? באופן עקרוני כן, אך אם המטרה של האסטרונום היא לא רק להפיק תמונות יפות אלא גם לייצר מידע אסטרופיסיקלי אשר יאפשר לחקור שאלות לגבי העצם הנצפה נדרש לעשות משהו עם האור המגיע דרך הטלסקופ. קיימות שתי שיטות עיקריות במחקר לניתוח האור הנכנס והמרתו למידע:

ספקטרוסקופיה – מדידת ספקטרום

1. במדידה ספקטרוסקופית האור הנאסף מועבר דרך רכיב (מנסרה או שריג עקיפה) במערכת האופטית אשר גורם לנפיצה של האור, ופיצול שלו כתלות באורך הגל במטרה לקבל את הספקטרום המלא של העצם.
2. היתרון במדידה זו הוא בקבלת מידע מאוד מפורט על כיצד האנרגיה של עצם מתפלגת כתלות באורך הגל של האור, spectral energy distribution.
3. החיסרון מבחינה תצפיתית הוא כי נפיצת האור מחלישה משמעותית את האור המגיע לחיישן, ולכן קשה למדוד מטרות בעלות בהירות נמוכה מאוד.

פוטומטריה – מדידת (ספירת) פוטונים

1. במדידה פוטומטרית האור הנאסף מועבר על רכיב אשר מאפשר ספירה ישירה של כמות הפוטונים המגיעה מעצם נצפה דרך הטלסקופ.
2. היתרון במדידה זו הוא יכולת למדוד את מלוא עוצמת האור, גם ממטרות בעלות בהירות נמוכה גם במדידה בעלת משך זמן קצרה יחסית.
3. החיסרון הוא איבוד של כל המידע הקיים בספקטרום, היות ובמערכת הפשוטה זו אנו לא יכולים להבדיל בין פוטון כחול לאדום.

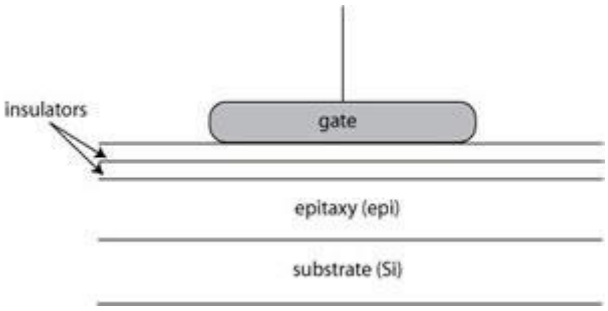
שתי השיטות הן למעשה משלימות אחת של השנייה במחקר האסטרונומי.

בעבודה זו אנו נתמקד בשימוש בשיטה של פוטומטריה היות וזו השיטה אשר בה מדדנו את אור הירח דרך הטלסקופ שבמצפה הכוכבים במכון וייצמן, כפי שיתואר בהמשך.

כעת נדון בכלי הצילום האסטרונומי המודרני המשמש למדידות פוטומטריות, חיישן ה CCD. Charged Coupled Device או בראשי תיבות CCD הוא סוג של גלאי מוליך למחצה רגיש לאור אשר קיים במצלמות דיגיטליות רבות המשמשות לצרכים יומיומיים. ניתן לבנות רכיבים רגישים

ביותר, יעודיים לשימוש אסטרונומי. ישנם חיישנים המתאימים לצילום אסטרונומי בתחום הנראה או בתחומים הבלתי נראים, בהתאם לצרכים המתוכננים של הטלסקופ. בעבר אסטרונום נדרש להשתמש במצלמה עם סרט צילום רגיש ביותר, לוחות צילום מזכוכית, מכפילי-אור ועוד שיטות רבות ושונות לאגירה והמרה של האור המגיע מעצמים תצפיתיים בשמיים. כל אדם אשר התנסה בצילום בעזרת הטכנולוגיה הישנה מודע למורכבות ולקושי בשימוש בכלים כאלו, לכן כבר מסוף המאה ה-20 החל מעבר לחיישנים אלקטרונים שונים מבוססי מוליכים למחצה. אנו מתמקדים בCCD, חיישן נפוץ ביותר, בו גם השתמשנו בתצפית שערכנו במסגרת עבודה זו.

CCD משמש בתור כלי בתחום של מדידות אסטרונומיות הנקרא "פוטומטריה" (פוטו – אור, מטריה – מדידה). לאחר מדידה בעזרת החיישן, הנתונים עוברים עיבוד שבמהלכו הופכים את המדידה לתמונה. כאמור, פוטומטריה הינה מדידה ישירה של כמות הפוטונים המגיעה מעצם נצפה דרך הטלסקופ. חיישן ה-CCD בנוי מרכיב מוליך למחצה המיוצר על וופר סיליקון, אשר בתהליך הייצור שלו חולק למערך דו ממדי של ריבועים. כל ריבוע כזה מכונה "פיקסל" והוא מתוכנן בצורה כזו שהוא טעון חשמלית בשל שילוב של סוגים שונים של שכבות מוליך למחצה. כאשר פוטון נקלט בפיקסל כזה על המשטח משתחרר אלקטרון, כתוצאה מהאפקט הפוטואלקטרי. המטען המשתחרר נאסף בשער לוגי (כמו בקבל) ונמדד על ידי האלקטרוניקה של המצלמה. המתח החשמלי שנמדד מתכונתי לכמות האלקטרונים בפיקסל אשר כאמור לעיל תלוי בכמות הפוטונים שפגעו בו. קריאה של המתח ביחד עם מיקום הפיקסל על הגלאי מוביל ליצירת התמונה הנראית על מסך המחשב לאחר סיום המרת האות.



איור 4: תרשים דוגמה סכמתי למבנה של CCD (Spectral instruments, 2020)

על ידי מדידה של עוצמת האות הכולל המגיע מעצם נצפה בשילוב הערכה של המרחק שלו מהצופה ניתן לבצע הערכה של עוצמת מקור האור (או להפך אם העוצמה ידועה אך המרחק לא), תוך שימוש בכלים מוכרים כמו חוק ריבוע המרחק. זוהי מדידה בסיסית בתחום של פוטומטריה.

בפוטומטריה נוהגים להשתמש בפילטרים (Broad band filters) אשר מאפשרים לחסום חלקים גדולים של הספקטרום האלקטרומגנטי ומאפשרים רק לתחום מסוים לעבור. הפילטרים אשר נוהגים להשתמש בהם מרוכזים בטבלה הבאה:

סימון (שם)	λ	Δλ
	ננומטר - nm	
U (Ultraviolet)	366	65
B (Blue)	436	89

(Visual) V	545	84
(Red) R	641	158
(Infra-red) I	798	154

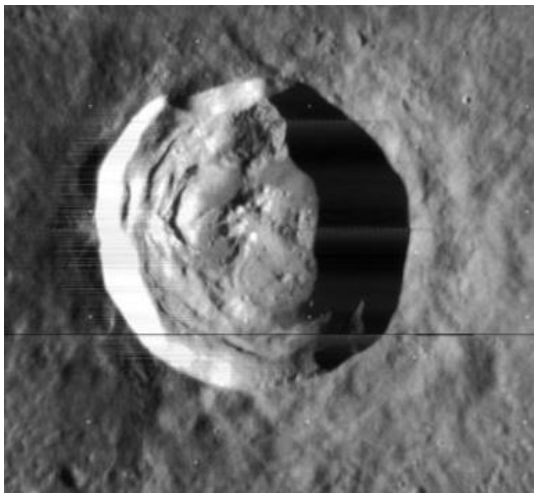
טבלה 1 : נתונים של פילטרים סטנדרטים בצילום אסטרונומי (Bessel,2005)

רשימת הפילטרים הזו חלקית ביותר, אך הינה מספקת לצורכי עבודה זו, ולצורך הדיון המצומצם שלנו בכלים אלו[4].

השימוש בפילטרים מוסיף רובד נוסף של מידע למדידה הפוטומטרית. המושג הנקרא אינדקס הצבע של העצם הוא בעצם המדידה של העוצמה של העצם עם אחד מהפילטרים הללו והוא מסומן לפי האות המגדירה את הפילטר. במאגרי מידע אסטרונומים רבים ניתן למצוא נתונים לגבי כוכב מסוים, המחולקים למדידות שהתבצעו בפילטרים שונים. מתוך ההבדלים בין הנתונים הנאספים באמצעות פילטרים שונים ניתן ללמוד על תכונותיו של הכוכב ביתר פירוט. (Johnson & Morgan, 1953).

1.3. הירח והיווצרות מכתשים על פניו

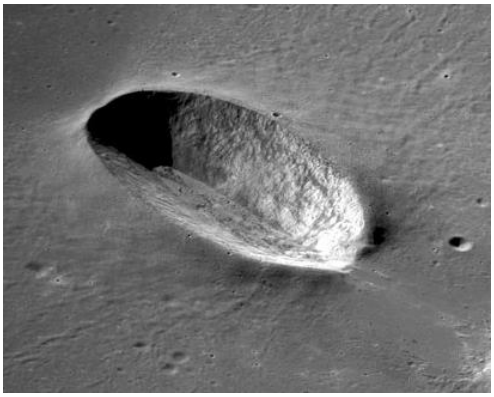
הירח הוא הלווין הטבעי הקבוע היחיד של כדור הארץ, ונוצר בסמיכות להיווצרות כדור הארץ כאשר המודל המקובל לתהליך היווצרותו הוא המודל של ההתנגשות הגדולה. מודל זה טוען שכדור הארץ הקדום ספג התנגשות כמעט חולפת (glancing collision) מקדם- כוכב לכת, או פרוטופלנטה, אשר בדרך כלל מכונה "תיאה". כתוצאה מהתנגשות זו כמויות מסה גדולות מתוך מסת כדור הארץ הקדום ומסתה של תיאה הועפו לחלל ונכנסו למסלול סביב כדור הארץ. מסה זו, שהכילה בעיקר חלקים מהקרום הקדום של כדור הארץ, התגבשה בסופו של תהליך, בעקבות כוחות משיכה, לעצם שאנו מכירים בתור הירח. מאז היווצרו הירח סובב את כדור הארץ במסלול מעגלי בקירוב, ברדיוס ההולך וגדל בשל שילוב של תופעת הגיאות והשפל בשל ההשפעה ההדדית של כוח הכבידה בין הירח לכדור הארץ. בשל קרבתו של הירח וגודלו היחסי (בקירוב רבע מקוטר כדור הארץ) הירח "זכה" לחוות התנגשויות רבות עם אסטרואידים אשר אחרת היו פוגעים בכדור הארץ. התנגשויות אלו השאירו סימנים על פני הירח בצורת מכתשים רבים ושונים.



איור 5 : מכתש קפלר כפי שצולם על ידי Lunar orbiter 4

[4] סרטון המסביר את אופן היישום של כלים אלו : https://www.youtube.com/watch?v=-dmiS_6YrGU

אך מה קובע את הגודל וצורת המכתש? מניסויים רבים שנעשו במעבדות והדמיות מחשב[5] נמצא כי צורת המכתש תהייה בקירוב מעגלית כל עוד זווית הפגיעה אינה קטנה מזווית מסוימת, בשל האופן בו האנרגיה משתחררת במהלך הפגיעה של האסטרואיד. במקרים בהם הזווית קטנה מתקבלים מכתשים אליפטיים מוארכים. אם זווית הפגיעה של הגוף הפוגע היא כמעט אנכית ביחס לפני הקרקע יכול להיווצר רכס מרכזי במרכז המכתש בדומה לנתז החוזר כאשר מטפטפים טיפות מים על פני שלולית.



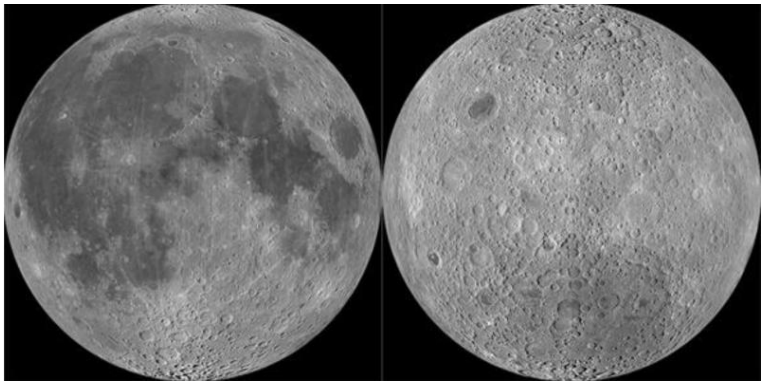
איור 6 : מכתש מייזר בעל הצורה המוארכת, צולם על ידי אפולו 11, 1969

ראשית נתאר את התהליך בצורה תמציתית. תהליך קביעת גודל המכתש מתחיל עם מכתש בגודל הגוף הפוגע. האנרגיה של הפגיעה מועברת לחומר הסובב את החומר אשר נפגע על ידי האסטרואיד בצורה של המרה לאנרגיות תנועה חום ואלסטית בקרקע הנפגעת. חלק מהחומר הנפגע מאודה וחלקו מותך ומשתחרר מאזור הפגיעה בצורה של פיצוץ וגל הלם אשר מרחיבים את גודל המכתש הראשוני. ניתן למצוא מכתשים שגודלם פי כמה מגודלו של האסטרואיד הפוגע. לאחר מכן חלק מהחומר חוזר וממלא את תחתית המכתש ומעניק לו צורה מעט יותר דומה לקערה. המכתש אותו אנחנו צילמנו במטרה לחשב את ממדיו נקרא מכתש תיאופילוס (Theophilus). צורתו כמעט עגולה ובמרכזו ישנו מעין רכס של פסגות.

תוואי שטח נוסף האופייני לטופוגרפיה של הירח, בנוסף למספר הרב של המכתשים שעל פניו, הוא האזורים המכונים "ימות" (Mare). הם קיבלו את שמם על ידי צופים בטלסקופים הראשונים אשר חשבו כי אזורים כהים אלו על פני הירח הינם גופי מים גדולים. כיום אנו יודעים שהימות נוצרו בהתפרצויות געשיות בעבר הרחוק והן למעשה היקוות של אגני לבה גדולים, כיום אגני בזלת.

הירח נעול כבידתית לכדור הארץ בנעילת גאות, בשל אותן תופעות של גאות ושפל שהוזכרו מוקדם יותר. בשל כך הירח מפנה אל כדור הארץ רק צד אחד וקבוע, משמע משך הסיבוב העצמי של הירח סביב צירו שווה למשך הקפתו אותנו. בעבר נהגו לקרוא לצד הלא נצפה של הירח "הצד האפל של הירח" לעומת "הצד המואר", אך שם זה הוא שגוי ויש להשתמש במונחים "הצד הקרוב" לעומת "הצד הרחוק", היות וכל חלקי הירח מוארים על ידי אור השמש במידה שווה במהלך הקפתו את כדור הארץ.

[5] סרטון הדמיה לדוגמה של היווצרות מכתש פשוט https://www.youtube.com/watch?v=_IaHyqM3DqQ



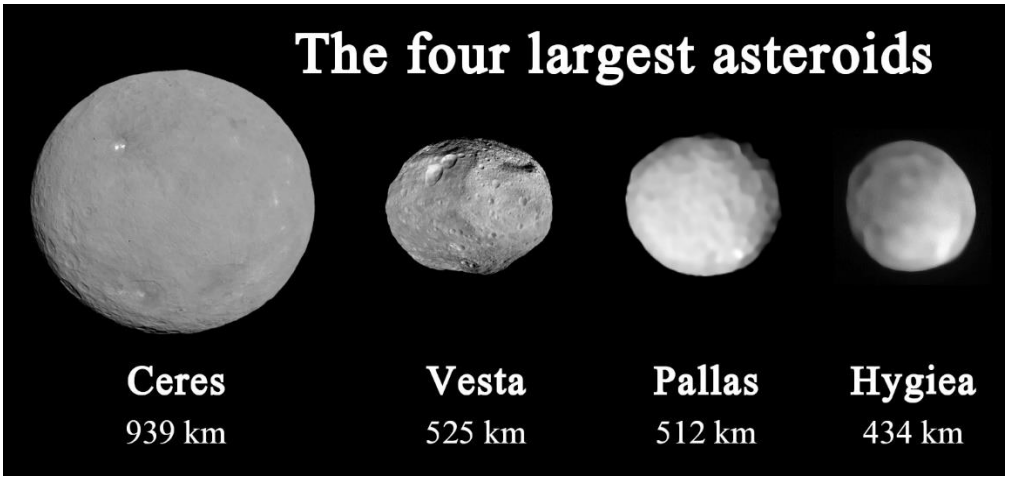
איור 7: מראה של הצד הרחוק (מימין) לעומת הצד הקרוב (משמאל) של הירח. שני הצדדים של הירח מוארים במידה שווה על ידי השמש במהלך הקפת הירח את כדור הארץ. בגלל נעילת הגאות שכוח המשיכה נועל בה את הירח, רק צד אחד של הירח, הצד הקרוב, פונה תמיד לכיוון כדור הארץ. את צידו השני, הרחוק, של הירח לא ניתן לראות באופן ישיר. על אף שבכל רגע נתון ניתן לראות רק 50 אחוז מפני הירח, בעקבות תופעה המכונה ליברציה אנו לא רואים למעשה תמיד בדיוק את אותה מחצית של הירח. תזוזות קטנות שונות מאפשרות לצופה מכדור הארץ לראות במהלך מחזור של 30 שנה 59 אחוז מפני הירח.

1.4. אסטרואידים, מטאורים, מטאוריטים ושביטים

המושגים: אסטרואידים, מטאורים ומטאוריטים הינם מושגים חשובים בהקשר להיווצרות מכתשים. אנשים רבים נוטים להשתמש בהם באופן לא מדויק. נעמוד על ההבדלים בין מונחים אלו לשם הבהירות. לשם השלמת הידיעות שלנו על גרמיי השמיים הקטנים נדון גם בשביטים.

אסטרואיד

זהו הכינוי לגרם שמיים אשר מקיף את השמש, העשוי בעיקר מסלע ומתכות. פירוש השם ביוונית הוא "דמוי כוכב". האסטרואיד הראשון אשר התגלה הוא 1-קרס (1-Ceres), בשנת 1801. אסטרואיד זה הוא עדיין האסטרואיד הגדול ביותר הידוע לנו במערכת השמש (קוטרו כ-940 ק"מ). כיום ידועים כמיליון אסטרואידים שונים שקוטרם בתחום שבין מספר מטרים למאות קילומטרים. המסלולים של אסטרואידים סביב השמש הם מעגליים בקירוב, כאשר חלקם הגדול נמצא בתחום שבין מסלולי כוכבי הלכת מאדים וצדק. אך ישנם אסטרואידים רבים גם מחוץ לאזור זה, המכונה חגורת האסטרואידים. עובדה שאמורה לעניין את כל מי שיקרא את השורות הללו היא קיומם של אסטרואידים הנעים במסלולים אליפטיים החוצים את מסלול כדור הארץ (French, 1998).

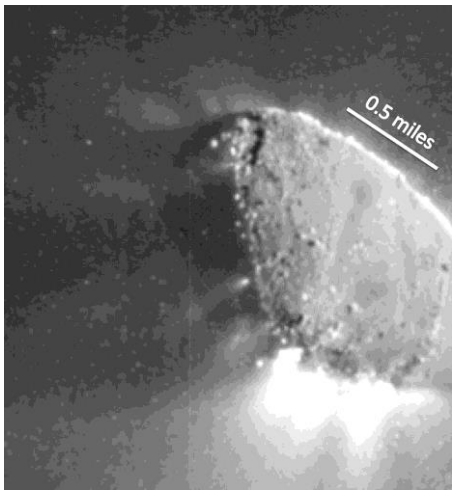


איור 8: צילומים של ארבעת האסטרואידים הגדולים ביותר הידועים לנו במערכת השמש.

שביט

שביטים הם גרמי שמיים ייחודיים המפורסמים כבר מהעת העתיקה בכך שהם היו מופיעים באופן פתאומי בשמי הלילה, ככוכבים בהירים, לעיתים בצורה יוצאת דופן, ונראים כבעלי זנב ארוך. לאחר תקופה קצרה של ימים או שבועות הם היו דועכים ונעלמים. לפיכך, מקור שמם באנגלית, comet , הוא מילה ביוונית שמשמעותה "להיות עם שיער ארוך". כיום אנו מכירים שביטים רבים שאינם ניצפים בהכרח מכדור הארץ בעין בלתי מזויינת. השביטים הם למעשה גופים שהרכבם דומה למדי להרכבם של האסטרואידים אך עם תכולה משמעותית של קרח מים, חנקן או פחמן דו חמצני. השביטים מאופיינים במסלולים אליפטיים מאוד סביב השמש, בעלי זמני מחזור הנעים בין שנים בודדות לאלפי שנים. כשהשביטים רחוקים מהשמש הם קפואים לחלוטין. כשהם מגיעים לחלק הקרוב לשמש במסלולם, הם מתחממים כתוצאה מקרינת השמש ומתחילים לשחרר חלקיקי חומר וגז קטנים. כתוצאה מרוח השמש הגז שמשתחרר נדחף בעצמה בכיוון מהשמש והלאה. המפגש של החלקיקים הטעונים חשמלית המגיעים מהשמש- רוח השמש- עם יונים הנפלטים מהשביט יוצרים שובל פלסמה שנדחפת גם היא מהשמש והלאה (אך בזווית שונה מהזווית של זנב האבק). זנבם (הכפול) של השביטים, שכמו שראינו ובניגוד לטעות נפוצה, איננו פונה בהכרח לכיוון ממנו הגיע השביט (כאשר השביט מתרחק מהשמש גרעין השביט נע בעקבות "זנבו"), מואר על ידי אור השמש, מה שיוצר את המחזה המרהיב. על אף שממדיהם של גרעיני השביטים עצמם קטן למדי אורכו של זנב השביט הוא לא פחות ממדהים. אורכו של זנב הפלסמה עשוי להגיע ל-100 מיליון קילומטרים- כשני שליש מהמרחק בין כדור הארץ לשמש ופי 100 מקוטרה של השמש.

השביט המפורסם ביותר הוא השביט על שמו של האלי בעל המחזור של כ-75 שנים. מקורם של השביטים עדיין נתון למחקר, אך המודל המוביל הוא כי מקורם באזורים מרוחקים מאוד בקצוות מערכת השמש כמו חגורת קויפר (Kuiper belt) או ענן אורט (Oort cloud). בשנת 2017 נתגלה בפעם הראשונה שביט אשר מקורו מחוץ למערכת השמש בשם אומוהמוה (Oumuamua'), שביט שני מסוג זה, בוריסוב, התגלה בשנת 2019.



איור 9 : צילום על ידי הגשושית Deep impact של השביט 103P/Hartly

מטאור

זהו השם לתופעה המוכרת של 'כוכבים נופלים', מקור המילה הוא מיוונית ופירושו "גבוה באוויר". חלקיקים קטנים של חומר הנעים בחלל מכונים מטאורידים. מקורם עשוי להיות שברי אסטרואידים או שביטים, או סתם חומר שנקלע לתווך הריק שבמערכת השמש. מטאורידים

הנמשכים לעבר כדור הארץ בהשפעת כוח הכבידה, ומתחילים ליפול אל עבר פניו פוגשים בדרכם באטמוספירה, מה שגורם לתהליך חימום משמעותי של העצם החודר והאוויר סביבו, המגיע לאלפי מעלות. הבהק הנוצר משריפתם של המטאורידים הוא מה שנראה על פני כדור הארץ ככוכב בנפילתו, בשלב זה העצם מכונה מטאור. רובם של המטאורים נשרפים כליל בתהליך החדירה לאטמוספירה ללא כל השפעה על פני כדור הארץ. במקרים חריגים, כמו למשל במקרה של האירוע בעיר הרוסית צ'ליאבינסק מה-15 בפברואר 2013, המטאור מצליח לשרוד את הכניסה לאטמוספירה ומגיע לפני כדור הארץ. בלילה ממוצע ניתן לראות במקומות חשוכים כ-5 מטאורים בשעה חוצים את השמיים, אך מספר פעמים בשנה, בתאריכים קבועים, ניתן לראות תופעה הנקראת 'מטר מטאורים' במהלכה כדור הארץ חוצה שאריות ממעבר של שביט וכתוצאה מכך יתכן קצב מטאורים של עשרות ואף מאות מטאורים נראים לעין בשעה. שמם של מטרי המטאורים הוא על פי קבוצת הכוכבים בה נמצאת הנקודה שממנה נדמה לצופה מפני כדור הארץ שהמטאורים מגיעים- נקודה זו מכונה נקודת ההקרנה (radiant).

איור 10 : צילום של מטאור במטר הליאונידים- במטר זה נראים המטאורים כאילו הם מגיעים מנקודה בשמיים שנמצאת בקבוצת אריה (Leo).

מטאוריט

זהו השם הניתן למטאור השורד את תהליך הכניסה לאטמוספירה של כדור הארץ, ונוחת על פניו. גודלם של מטאוריטים נע לרוב בין מילימטרים ועד מטרים בודדים. אין צורה כללית האופיינית למטאוריטים, צורתם מושפעת משמעותית מהרכבם הכימי. למטאוריטים מרכיב חשוב מאוד בחקר של מערכת השמש העתיקה בשל היותם מעין כמוסות זמן מהעבר הרחוק של היווצרות מערכת השמש. מציאת מטאוריט מאפשרת לנו לחקור חומר של גוף חוץ-ארצי במעבדות מתקדמות על פני כדור הארץ מבלי להידרש לשלוח חללית יקרה למשימה ממושכת בחלל לאיסוף דגימה.

איור 11: מטאוריט מתכתי אשר נחת באוסטרליה בשנת 1910

1.5. תהליך היווצרות של מכתשים

בסופו של פרק זה נתייחס לתהליך בו אסטרואיד הנע לו במסלול סביב השמש, נופל לכיוון גרם שמיים אחר כדוגמת הירח, מתנגש בו ויוצר מכתש. כמו כל תהליך בפיסיקה ניתן לבחון את רובו ככולו תחת המטרייה של המרות אנרגיה בין חלקים שונים של המערכת[6].

השלב הראשון הוא כמובן הלכידה הכבידתית של האסטרואיד ונפילה שלו לכיוון הכוכב לכת או הירח, בשלב זה ישנה אנרגיה פוטנציאלית כובדית המומרת לאנרגיה קינטית. ניתן לחשב באופן יחסית מדויק אנרגיה זו, ולצורך כך עלינו לקחת בחשבון גורמים רבים בין השאר:

1) אנרגיה פוטנציאלית כובדית – של האסטרואיד ביחס לירח, כדור הארץ והשמש, מחושבת על ידי הביטוי הבא[7]:

$$U_G = -\sum \frac{GM_i m}{r_i}$$

2) אנרגיה קינטית – האנרגיה הקינטית של האסטרואיד בתנועתו סביב השמש, מחושבת ע"פ:

$$K = \frac{GM_{sun}m}{2r_{sun}}$$

3) פרמטרים של המסלול – אלו גורמים הלוקחים בחשבון את הכיוון של המהירות, הזוויות, מישורי התנועה של כל הגופים המוזכרים לעיל, ועוד.

ניתן עקרונית לערוך את החישוב הזה, אך זה מסובך וחורג מגבולות העבודה. ניתן במקום זאת להעריך גודל ממוצע למהירות הפגיעה בירח של אסטרואיד (Grieve & Cintala, 1999) והיא 16 ק"מ בשנייה, ומתוך זה לחשב את האנרגיה של הגוף הפוגע בפשטות.

$$K = \frac{m}{2}v_{impact}^2 = 1.28\left(\frac{m}{10^{19}[kg]}\right)10^{27}[J]$$

השלב השני עקרונית הוא אובדן אנרגיה בחדירה לאטמוספירה, אך במקרה של הירח ניתן להזניח זאת, מכיוון שאין לירח אטמוספירה.

השלב השלישי הוא הפגיעה בקרקע במהלכה מתרחשים מספר תהליכים כמעט בו זמנית אשר ממירים את האנרגיה הקינטית של האסטרואיד לאנרגיות אחרות:

[6] סימולטור אינטרנטי המדמה פגיעה של אסטרואידים בכדה"א, הירח או מאדים (Impact calculator, 2020).

[7] את כל הנוסחות המופיעות כאן ניתן למצוא בדף הנוסחאות הרשמי לבגרות 5 יחידות בפיסיקה.

1) דחיסה של הקרקע – האסטרואיד דוחס את הקרקע בתהליך פלסטי, הסלע בשכבת הקרקע העלית נדחף לשכבות הסובבות את אזור הפגיעה, מקנה אנרגיה קינטית ואנרגיית חום כתוצאה מהמעוות.
2) גלים סיסמיים – דחיסת הקרקע גורמת ליצירת גלים בתת הקרקע אשר מתפשטים מאזור הפגיעה, מפזרים את האנרגיה אשר הם נושאים בכל נפח הירח.
3) זריקת פליטה – פליטה (ejecta) נורית במסלולים בליסטים כאשר הקרקע מתחילה "לקפוץ" בחזרה לתהליך הדחיסה אשר היא עברה קודם בצירוף לתנועת הגלים, כאשר נפח המסה המשוחרר גדול מנפח הגוף הפוגע ויוצר את המכתש הראשוני, אשר צורתו בקירוב אליפסה. חלקיקים אלו יכולים להיזרק למרחקים גדולים ביותר, ואף לברוח לחלל בתנאים מסוימים.
4) חימום והתכה – ישנה המרה משמעותית של אנרגיה לצורה של אנרגיית חום, אשר מספיקה בשביל להתיך חלק גדול מאסטרואיד עצמו, מהפליטה והחומר הנשאר במכתש הראשוני.
5) פליטת גוף שחור – העלייה בטמפרטורה בשל החימום גורמת לשחרור לא זניח של קרינת אור בצורה של בוהק ראשוני, בצירוף לפליטה מתמשכת בזמנים ארוכים יותר (היות והירח נתון בריק של החלל זהו ערוץ שחרור האנרגיה העיקרי המאפשר קירור של החומר במכתש).

יתכנו תהליכים נוספים על חמישה אלו, אך אלו העיקריים.

השלב הרביעי בתהליך הוא התייצבות המכתש, בשלב זה קירות המכתש יקרסו פנימה חזרה בשל שילוב של כוח הכבידה של הירח בשילוב מצבו המותך או מותך חלקית של החומר במכתש ובשל פעולות גומלין עם הסביבה של המכתש. החומר שקורס פנימה ממלא חלקית את קרקעית המכתש כך שמתקבלת צורה עם קרקעית שטוחה למדי[8].

ניתן להבין כי ניסיון למציאת קשר מתמטי תאורטי ישיר בין הפרמטרים של האסטרואיד לבין המכתש הסופי יהיה מורכב אם בכלל אפשרי. במקרים בהם פיסיקאים נתקלים בקשיים מסוג זה הפתרון הוא למצוא מודל פשוט יותר ולנסות לנסח קשר מתמטי מתאים.

במאמר (Collins, Melosh, & Marcus, 2005) למשל, מופיעה נוסחה אשר מקשרת מספר גורמים הקשורים לתכונות האסטרואיד והגוף הנפגע. קוטרו של המכתש הינו:

$$D_{tr} = 1.161\frac{L^{0.78}\cdot v_i^{0.44}}{g^{0.22}}\sqrt[3]{\left(\frac{\rho_i}{\rho_t}\right)sin(\theta)}$$

כאשר הגורמים במשוואה הם ρ_i צפיפות האסטרואיד, ρ_t צפיפות החומר באזור הפגיעה (נניח את הצפיפות הממוצעת של הירח), L זהו קוטר האסטרואיד בהנחה והוא כדורי, v_i גודל מהירות האסטרואיד, g תאוצת הכובד בפני השטח ו-θ היא הזווית הפגיעה הנמדדת מהאופק. אנחנו יכולים להציב את הפרמטרים שאנחנו יודעים לירח ולקבל:

$$D_{tr} = 4.941\cdot\sqrt[3]{\rho_i\cdot L^{2.34}sin(\theta)}[m]$$

התוצאה הזו אינה הקוטר הסופי של המכתש, בשל השלב הרביעי, ועבור מכתש מעל גודל מסוים אין דרך פשוטה ומקובלת להעריך את הגודל הסופי של המכתש, אך הוא יהיה גדול יותר מגודל המכתש הראשוני (עבור מכתש קטן, גודלו הסופי של המכתש הוא בערך פי 1.5 מהגודל המקורי).

נציג כעת מספר ערכים אפשריים לגודל הגוף הפוגע אשר מסוגל לייצר מכתש בקוטר 100 ק"מ כמו תיאופילוס, לצורך כך נניח כי המכתש הוא פשוט כך שהמכתש הסופי הוא 1.5 פעמים קוטר המכתש הראשוני, זווית הפגיעה בקרקע תהייה אנכית $\theta = 90$ מעלות.

[8] כפי שציינו לעיל, במקרים מסוימים, כמו במכתש תיאופילוס, יתכן כי ייווצר הר או רכס במרכז המכתש.

צפיפות האסטרואיד [ק"ג למטר מעוקב]			
ברזל 8000	סלע געשי 2500	קרח 1000	קוטר האסטרואיד [מטרים]
99	67	49	1
595	404	298	10
3588	2435	1794	100
21619	14671	10810	1,000
130270	88402	65135	10,000

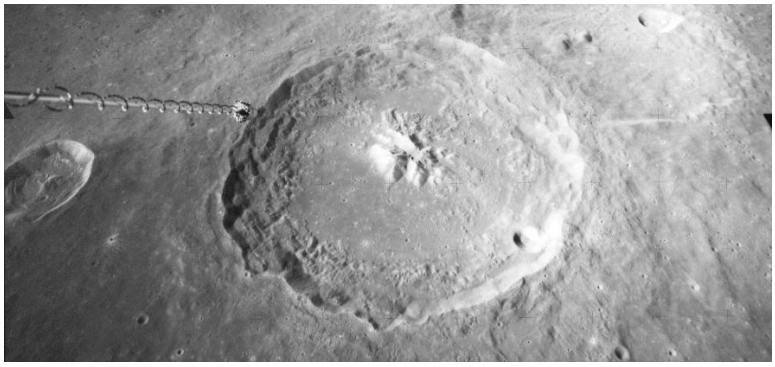
טבלה 2 : תוצאות של קוטר המכתש הראשוני כתלות בקוטר וצפיפות האסטרואיד

מתוך חישוב זה ושימוש בהנחה (השגויה) של מכתש פשוט נקבל את הערכים הבאים לקוטר האסטרואיד הפוגע.

צפיפות האסטרואיד [ק"ג למטר מעוקב]			
ברזל 8000	סלע געשי 2500	קרח 1000	
4.24	6.96	10.3	קוטר האסטרואיד [ק"מ]

טבלה 3 : קוטר האסטרואיד אשר היה יוצר מכתש פשוט בקוטר 100 ק״מ בקירוב

פרק 2 – צילום מכתש תיאופילוס, 3.9.19 וחישוב ממדיו



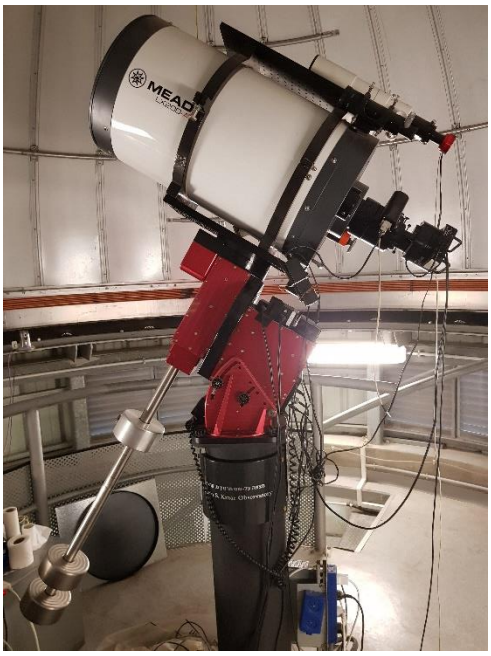
איור 12: צילום מכתש תיאופילוס על ידי אפולו 16 (AS16-M-0692) ניתן להבחין בצילום ברכס הגבעי שנוצר במרכז המכתש במהלך היווצרותו.

2.1. מצפה הכוכבים במכון ויצמן

מצפה הכוכבים ע"ש קראאר נמצא בלב מכון ויצמן למדע שברחובות, המצפה ממוקם בראש בניין ייחודי שנבנה כמאיץ חלקיקים (Observatory, 2020). מאיץ החלקיקים היוני הקווי ע"ש קופלר (Manulis, 2020) היה פעיל לשימוש של מחקר מדעי החל מאמצע שנות השבעים ועד לסוף העשור הראשון של המאה נוכחית. המבנה, בעל הארכיטקטורה הייחודית, תוכנן על ידי האדריכל משה הראל והוא מורכב משני בניינים צמודים- האחד, בעל מבנה דמוי בורג בגובה 57 מטרים והשני, גובהו 53 מטרים ובראשו מבנה דמוי ביצה. ה'ביצה' משמשת כיום כמרכז כנסים בעל נוף מרהיב. לאחר שהפסיק המאיץ להיות פעיל הוקם בראשו של מגדל 'הבורג' מצפה הכוכבים. המצפה נחנך במרץ 2011. כיפת מצפה הכוכבים נראית מכל רחבי הקמפוס והיא (יחד עם כל מבנה המאיץ) אחד מהסמלים הויזואליים המזוהים עם מכון ויצמן. מצפה הכוכבים ממוקם ממש בסמוך למחלקה לפיסיקה של חלקיקים ואסטרופיסיקה שבתוך הפקולטה לפיסיקה במכון ויצמן. חוקרים מהמחלקה נעזרים בו במהלך עבודתם וכיום הוא פועל תחת החסות של מחלקה זו.

איור 13: מבנה מאיץ החלקיקים במכון ויצמן- בראש המבנה דמוי הבורג ניתן לראות את הכיפה הנפתחת של מצפה הכוכבים ע"ש קראאר.

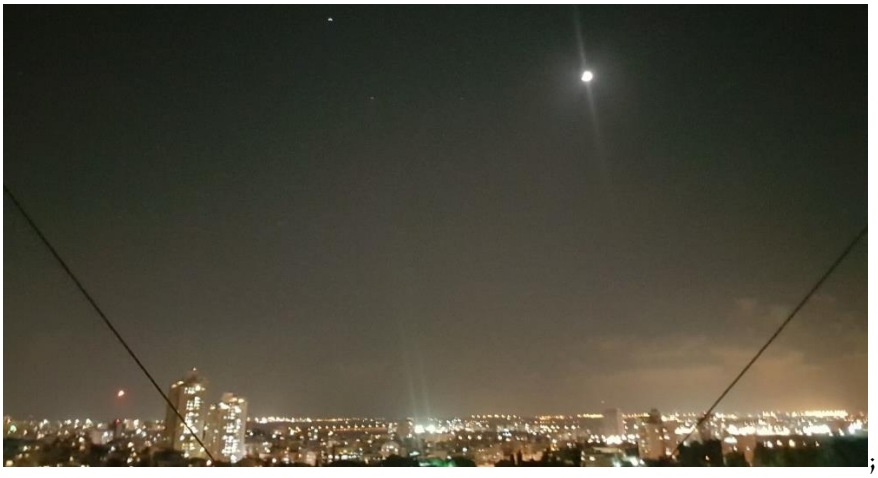
הטלסקופ הראשי במצפה הכוכבים הוא Meade 16" LX200 ACF מסוג שמידט קאסגריין[9]. הוא מצויד במצלמת SBIG ST-8XME CCD ברזולוציית 1530x1020 פיקסלים ופועל בעזרת תוכנה ייחודית. הטלסקופ יושב בתוך כיפה שקוטרה 4.2 מטרים. הטלסקופ 'מקופל' פי 3. כלומר אורך הפוקוס שלו הוא פי שלושה מהפוקוס של המראה הקעורה שבתוכו. שדה הראייה של הטלסקופ הוא של 11X16 דקות קשת. זהו שדה ראייה קטן באופן יחסי, קטן אף יותר מהגודל הזויתי של הירח.



איור 14: הטלסקופ במצפה הכוכבים - בתמונה ניתן לראות את הזרוע הרובוטית עליה יושב הטלסקופ ואת החיבורים החשמליים שמאפשרים את ההפעלה מרחוק של הטלסקופ. תפקידן של המשקולות שבפינה השמאלית התחתונה של התמונה לעזור לייצוב הטלסקופ ולדאוג לכך שהוא יהיה בשיווי משקל, כך שלא כל כובד משקלו ייפול על הברגים והחיבורים המכניים.

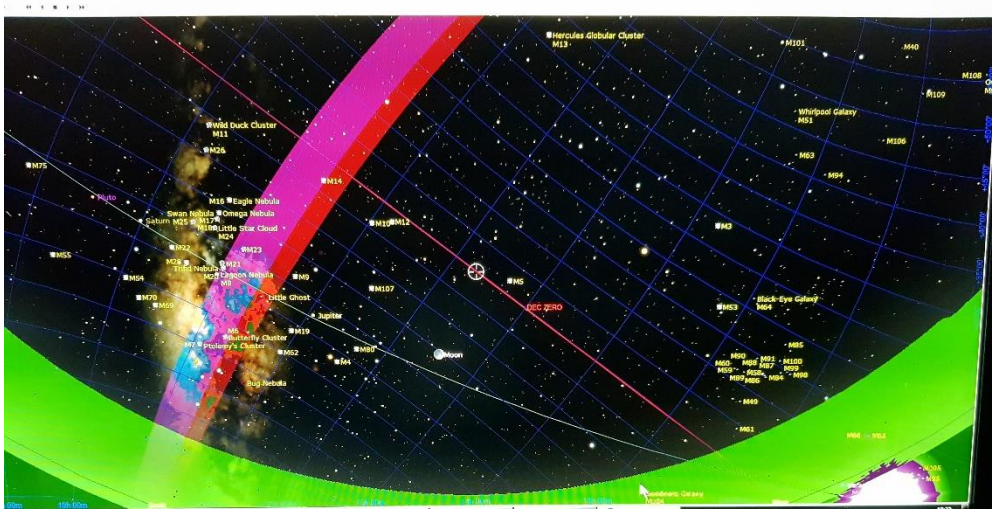
מיקומו של המצפה, בלב סביבה עירונית צפופה ומוארת איננו אידיאלי לתצפית כוכבים. בשל כך, אמנם משמש המצפה גם לצורך תצפית בעלת ערך מחקרי, ואף הגיע לכמה הישגים מרשימים בשנותיו המעטות- ביניהם היותו בין המצפים הראשונים בגלובוס שחזו וצילמו את הסופר-נובה שנראתה ב2011 בסביבת הגלקסייה M-51- אך אחד מהמניעים העיקריים להקמתו היה מניע חינוכי.

[9] סוג של טלסקופ קטדיופטרי, ראו בפרק 1.1.

 ;

איור 15 : מראה מתוך הטלסקופ על סביבתו, כולל הירח ונוגה

מצפה הכוכבים הוקם במטרה לאפשר לתלמידים לעסוק בתצפית אסטרונומית כחלק מלימודיהם. כידוע, צפייה בגרמי השמיים היא פעולה המתרחשת בעיקר בשעות הלילה. במהלך שעות האור ניתן לבצע תצפיות בשמש- עם ציוד מתאים כמובן- וכן בירח, אם כי איננו נראה היטב לפרטיו. שאר גרמי השמיים אינם ניתנים לתצפית פוטומטרית ביום. לכן, ישנה בעיה אינהרנטית בעיסוק באסטרונומיה במסגרת בית ספרית- שמתנהלת בשעות היום. על אף שתחום האסטרונומיה הוא מרתק ועשוי להוות מוקד משיכה ועניין עבור תלמידים רבים ניתן רק לדבר עליו ולא לבצע במהלך היום. כדי לתת מענה לבעיה זו הוחלט שהטלסקופ שיורכב במצפה הכוכבים יהיה טלסקופ רובוטי, שניתן להפעיל מרחוק, באמצעות פקודות ממחשב. הכוונה הייתה שתלמידים וסטודנטים בארה״ב יוכלו, בשעות היום אצלם, לצפות בשמיים באמצעות הטלסקופ הממוקם במכון ויצמן, ששורר בו לילה באותו הזמן, תוך שליטה מרחוק ואיסוף הנתונים.



איור 16 : צילום מסך של תוכנת השליטה בטלסקופ- לחיצה עם העכבר על עצם שמיימי כלשהו שמופיע על המסך מכוונת באופן אוטומטי את הטלסקופ לכיוונו של עצם זה.

אכן המצפה נבנה כך שניתן להפעיל אותו מרחוק. לא מספיק שהטלסקופ עצמו יהיה ניתן לשליטה. גם הצהר וכל כיפת התצפית מתניידים תוך שליטה מרחוק. גם על מיזוג האוויר והתאורה ניתן לשלוט באמצעות המחשב. אחת נקודות התורפה העיקריות בתצפית אסטרונומית, שאף עלולה לגרום נזק לטלסקופ, הוא תצפית במהלך מזג אוויר לא מתאים- עננות או גרוע מכך, גשם. כדי

להבטיח את הצלחת התצפית מרחוק ולעזור במניעת תקלות הוקמה על המצפה תחנת איסוף נתוני מזג- אוויר, הכוללת חיישן המסוגל למדוד עננות ולהתריע על אפשרות של בעיה בראות. נתוני תחנת מזג- האוויר שנאספים בעקביות כבר יותר מעשור הם עוד אחד מתוצרי הלואי החיוביים של המצפה.

במהלך הזמן התברר שמסיבות טכניות הרעיון היפה של שיתוף פעולה בין יבשתי הוא בעייתי לביצוע. קשה מאוד לשלוט בטלסקופ מרחוק ולהתגבר על התקלות השונות שצצות מידי פעם אם אינך מכיר אותו לעומק, מקרוב. כיום, תלמידים מרוחקים אינם משתמשים בטלסקופ, אך צוות המצפה בהחלט משתמש ביכולות השליטה מרחוק, ומסוגל לבצע תצפיות שונות מבלי להיות צמוד לטלסקופ לכל אורך משך התצפית.

תלמידים וסטודנטים מהאזור משתמשים גם הם בטלסקופ לביצוע עבודות חקר במהלך לימודיהם, או לצורך תצפית כוכבים במסגרות ייחודיות שונות. מנהל המצפה הוא מר אילן מנוליס, אסטרונום ישראלי ותיק שהיה יושב ראש האגודה הישראלית לאסטרונומיה, הקים מספר מצפי כוכבים בישראל ולאור תרומתו לתחום של חיפוש וגילוי גופים קרובי ארץ זכה אף להיות הישראלי הראשון שאסטרואיד נקרא על שמו.

2.2. תהליך הפקת הצילומים

נכנסנו למצפה, בהדרכת מר מנוליס במטרה לצלם תמונות איכותיות של מכתש תיאופילוס על פני הירח בדיוק בשעה שהשמש זורחת על המכתש. השמיים היו מעוננים מעט וחששנו שכשתגיע השעה המתאימה לצילום הירח יהיה מכוסה. במקרה כזה אין הרבה לעשות מעבר ללקוות לטוב.

התחלנו בתהליך של הפעלת הטלסקופ וכיולו לכיפה, ובהתאם לGPS.

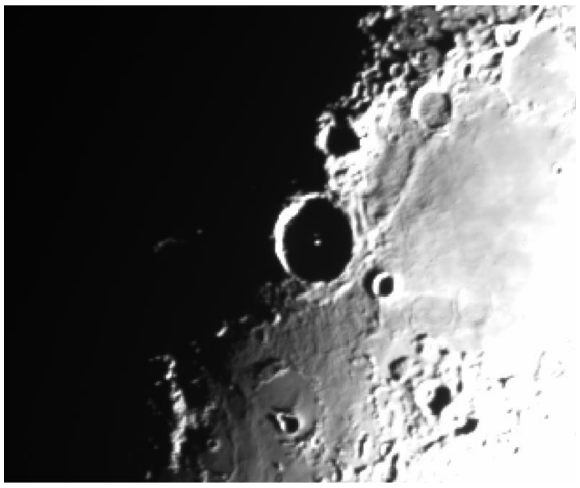
יש צורך לחבר את התוכנה למצלמה, לחבר את התוכנה לטלסקופ, לאחר זמן מה נשמעים שלושה צפצופים שמהווים חיווי לכך שהטלסקופ צוכן לעבודה. בשלב זה הטלסקופ נוסע מנקודת החנייה לנקודת הבית.

איור 17 : חלק מתהליך הכנת הטלסקופ. ניתן לראות בתמונה את הכיפה, שנעה אוטומטית לכיוון אליו מכוונים את הטלסקופ, ואת הצהר הנפתח דרכו מתבצעת התצפית.

כאשר הטלסקופ מכויל לחיצה על המפה שמופיעה על צג המחשב מניידת אותו באופן אוטומטי לאותה הנקודה בשמיים. לחצנו על הירח והטלסקופ התמקד בו. חיכינו לקירור הטלסקופ לפני שהתחלנו לדגום נתונים. המצב הסטנדרטי בו התחלנו לצלם הוא כאשר היו פילטרים מסויימים (BVRI) שכל אחד מהם חותך אורכי גל מסויימים של הקרינה[10].

המצלמה מסוגלת לצלם תמונה צבעונית, אך המשמעות של צילום תמונה צבעונית היא הורדת הרזולוציה האפקטיבית מכיוון שכך כל שלושה פיקסלים קולטים אות אחד. לכן, כדי למקסם את הרזולוציה הורדנו את חיישני הצבע מהמצלמה, כך כל פיקסל קולט אות בנפרד ומקבלים רזולוציה מיטבית. אם בכל זאת מעוניינים לצלם צבעוני מצלמים כל תמונה שלוש פעמים, פעם אחת עם פילטר R (אדום), פעם שנייה עם פילטר I (אינפרא-אדום) ופעם שלישית עם פילטר B (כחול).

הגיע חלון הזמנים הקצר המתאים לצילום המכתש שלנו. מכיוון שחששנו שהירח יבלע בעננים דילגנו על שלב הפוקוס והתחלנו לצלם. צילמנו מספר תמונות בכל אחד מהפילטרים תוך שינוי פרמטרים: זמן החשיפה, הפילטר דרכו מצלמים, פוקוס ותהליך של bin לעומת unbin בעיבוד התמונה בתוכנת המחשב השולטת על מצלמת הטלסקופ. לאחר ניסוי וטעיה מצאנו צילום בעל משך של 1 מילי-שניות בפילטר R מצב פוקוס ו bin וקיבלנו את התמונה הבאה:



איור 18: תמונה שצילמנו באמצעות הטלסקופ של מכתש תיאופילוס[11]- המכתש קרוב בשעת הצילום לקו הדמדומים. מכיוון שהשמש נמוכה בשמיים במצב זה דופן המכתש מטילה צל על רוב שטחו של המכתש. מכיוון שקרקעיתו של המכתש נמוכה מפני השטח, חלק ממנה מואר, על אף שחלק זה נמצא באיזור החשוך של הירח. זוהי אחת ההוכחות התצפיתיות הבסיסיות לכך שפני הירח אינם חלקים כפי סברו הקדמונים. בולטת במרכז המכתש נקודת אור- זהו האור הפוגע ומוחזר מהרכס שבמרכזו של מכתש תיאופילוס.

בתמונה לעיל ניתן לראות שני מאפיינים בולטים של המכתש: הראשון הוא צורתו העגולה יחסית, והשני הוא ההר המרכזי הבולט אשר פסגתו מוארת על ידי אור השמש. זמן צילום התמונה נבחר ע"י מר מנוליס בקפידה כך שניתן לראות את המכתש כאשר הוא על הקו שבין האור והצל שעל פני הירח. קו זה, המכונה באנגלית terminator line, הוא האיזור שאילו היה נמצא בו צופה על פני כדור הארץ הוא היה רואה בדיוק באותו הזמן את דמדומי השקיעה, או את השחר בזריחת השמש. להלן נכנה את אזור זה, גם כשמדובר על פני הירח, קו הדמדומים.

[10] ראו פרק 1.2, בנוסף ראו בנספח 2 תמונות הממחישות את ההבדל בין הפילטרים השונים.
[11] בנספח 2 ניתן לראות תמונת אשר צולמו בשני פילטרים אחרים להשוואה.

מתוך הצילום אשר התקבל בפורמט fit ניתן להוציא מידע חשוב מה-Header שיהיה שימושי עבורנו בחישוב ממדי המכתש, כפי שיוסבר בהמשך העבודה:

1. הזמן המדויק של תחילת הצילום ביום יוליאני[12] הוא 2458731.2177574076 שהינו ה-4 בספטמבר 2019 בשעה 13:19 ו-34 שניות.
2. שדה הראייה של הטלסקופ: 16X11 דקות קשת.
3. ממדי התמונה (בפיקסלים): 765X510

2.3. שיטות חישוב של ממדי מכתש

עוד בטרם הביקור של האסטרונאוטים של תוכנית אפולו בשנות ה-60 וה-70 של המאה ה-20, אסטרונומים הצליחו למפות את רוב פני הצד הקרוב ולהעריך את גודלם, עומקם ומבנם של מכתשים שונים בהתבסס על המדידות והצילומים שלהם. כיום בעזרת כלים מודרניים, שאת חלקם הזכרנו לעיל, חל שיפור משמעותי ביכולת למפות את פני הירח.

כעת נסקור מספר שיטות אפשריות למדידה של קוטר ועומק מכתשים בהתבסס על תמונות. כל הדרכים מתבססות על שימוש בכלים של טריגונומטריה, ובידע על המערכת של כדור הארץ-ירח-שמש.

שיטת יחסים למציאת קוטר מכתש

שיטה זו מסתמכת על שימוש ביחסים גיאומטריים בין גודלו הזוויתי של הירח כולו לגודל הזוויתי של המכתש. היחס בין הקוטר הזוויתי של המכתש לקוטר הזוויתי של הירח מוכרח להיות שווה ליחס בין קוטרו הממשי של המכתש לבין קוטרו הממשי של הירח בק"מ. יישום של השיטה הזו בגישה מודרנית מתבצע באמצעות ספירת מספר הפיקסלים בתמונה אשר מכסים את קוטר הירח, D'_{moon} וספירת מספר הפיקסלים המכסים את קוטר המכתש, D'_{crater} בהינתן כי אנו יודעים את קוטרו האמיתי של הירח בק"מ- D_{moon} ניתן לכן לחשב את קוטרו האמיתי של מכתש כלשהו- D_{crater}, בקילומטרים, על ידי הקשר:

$$(1)\quad D_{crater} = D_{moon}\frac{D'_{crater}}{D'_{moon}}$$

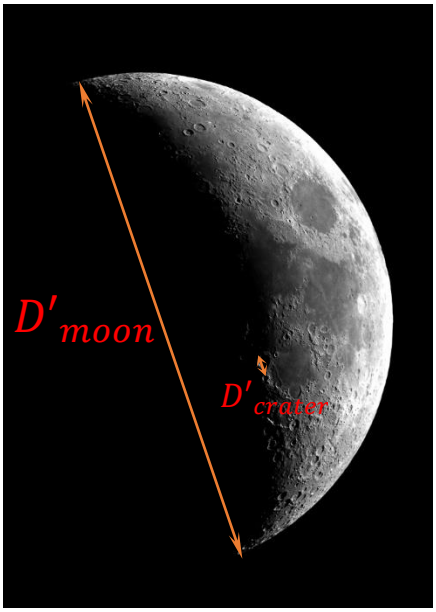
כמובן שהמצלמה איתה מצלמים מוכרחה להיות מסוגלת לקלוט את מלוא קוטר הירח לכל הפחות.

כעת נשתמש בשיטה זו עבור המכתש אנו אנו חוקרים, מכתש תיאופילוס, בעזרת תמונה שצילמנו באותו ערב תצפית בו צילמנו את התמונה המפיעה באיור 13, ואותה ננתח בהמשך.

השתמשנו בתוכנה ImageJ כדי למדוד את קוטר המכתש בפיקסלים. מסיבות של פרספקטיבה גם מכתש עגול עשוי להיראות אליפטי (צירים מסויימים עשויים להתכווץ). כדי לחשב בצורה הטובה ביותר יש לקחת את הקו שלאורכו קוטר המכתש הוא הארוך ביותר.

בתמונה, המופיעה באיור 14, קוטר הירח בפיקסלים הינו $D'_{moon} = 3246.5\ pixels$ ואילו קוטר המכתש הוא $D'_{crater} = 94.7\ pixels$.

[12] היום היוליאני הוא מספר הימים (חלקי ימים נכתבים בתור שבר עשרוני) שחלפו מאז יום שני, 1.1.4713 לפני הספירה, בשעה 12 בצהריים בגריניץ'. אסטרונומים נוהגים להשתמש ביום היוליאני לתיארוך אירועים אסטרונומיים. אחד מיתרונותיו הוא הקלות שבה ניתן לחשב באמצעותו את הפרש הזמנים בין שני מאורעות.



איור 19: חישוב קוטר מכתש- בתמונה, שצולמה על ידינו בצילום יחיד, ניתן לראות את כל גודלו של הירח ואת מכתש תיאופילוס. היחס בין מספר הפיקסלים שמכסים את קוטרו של המכתש לבין מספר הפיקסלים המכסים את קוטר הירח שווה ליחס בין הקוטרים הEממשיים של שני העצמים. מכיוון שקוטר הירח ידוע, ספירת הפיקסלים בתמונה מאפשרת לחשב בקלות את הנעלם היחיד, קוטרו הממשי של המכתש.

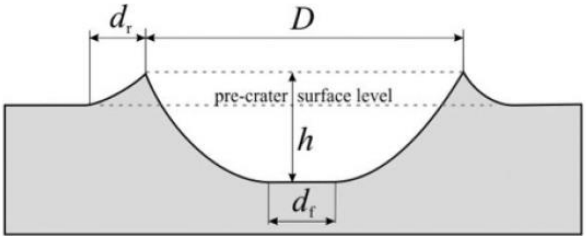
שגיאת המדידה בספירת הפיקסלים היא $\Delta = \mp 0.5\ pixel$. כעת ניתן לחשב את קוטר המכתש:

$$(2)\quad D_{theophilus} = D_{moon(Km)} \frac{number\ of\ pixels_{crater}}{number\ of\ pixels_{moon}} = 3{,}474.2 \frac{94.7}{3246.5} = 101.34Km$$

קוטרו האמיתי של מכתש תיאופילוס הוא בקירוב $D = 100\ Km$, כך שאחוז השגיאה הוא 1.34% בלבד, בתוך טווח השגיאה של המדידה.

שיטות חישוב קוטר ועומק המכתש על ידי צל

כאשר מצלמים מכתש בזמן שהוא קרוב לקו הדמדומים ניתן לראות את הצל ששפת המכתש מטילה לתוכו. ברצוננו לחשב בעזרת ממדי הצל, תוך שימוש בנתונים שיש בידינו על מיקום הירח, השמש והארץ בזמן צילום התמונה, את קוטרו של המכתש ואת עומקו. אורך הצל תלוי בעיקר בגורמים הבאים: זווית ההארה של השמש מעל האופק, α ועומק המכתש כפונקציה של המרחק משפת המכתש, $h(x)$. מכיוון שעומק המכתש איננו קבוע בכל הנקודות יש צורך לדעת את צורתו של המכתש כדי לחשב בצורה מדוייקת את ממדיו. ישנם סוגים שונים של מכתשים וגם מכתשים המסווגים באותה קבוצה עשויים להיות בעלי צורות שונות, שאינן בהכרח צורות מתמטיות מוגדרות. בנוסף, אין בהכרח סימטריה בין הצדדים או הצירים השונים של מכתש מסוים. מהמורכבויות שפרטנו עולה שעל מנת לחשב את ממדי המכתש יהיה עלינו להשתמש במידות שונות של קירובים לצורת המכתש. כמובן שככל שהמודל בו נשתמש יהיה פשוט יותר ופחות מפורט, יהיה זה על חשבון דיוק החישוב שלנו. מודל כללי של מכתש על הירח ניתן לראות באיור שלהלן. נגדיר את קוטר המכתש בתור המרחק האופקי בין שני קצוות שפות המכתש. גובה המכתש יוגדר בתור המרחק האנכי בין גובה שפת המכתש לגובה קרקעית המכתש בנקודה העמוקה ביותר.



איור 20: חיתוך מתאר הצורה הכללית של מכתש- במודל בסיסי זה המכתש הוא בצורת קערה, אך לא מושלמת- חלק מקרקעיתו שטוחה, וצורתו לאו דוקא סימטרית. משני צידיו של המכתש ניתן לראות את הקירות של שפת המכתש (rim) שגובהם לרוב הוא מעל גובה הקרקע שסביב המכתש.

1. <u>חישוב קוטר המכתש</u>: כדי למצוא את קוטר המכתש נשתמש במידע שיש בידינו על גודלה הזוויתי של התמונה ועל גודלה בפיקסלים. אם נחלק את רוחב כל התמונה בדקות קשת במספר הפיסקלים שמכיל אורכה של התמונה נמצא את גודלו הזוויתי של כל פיקסל. לאחר מכן נמדוד את קוטר המכתש בפיקסלים ונשתמש בקירוב זוויות קטנות ובמרחק ארץ-ירח הידוע לנו כדי להמיר את גודלו הזוויתי של המכתש לקוטרו במטרים. הגודל הזוויתי של כל פיקסל:

$$(3)\quad dp = \frac{image\ Width_{arc\ min}}{image\ Width_{pixels}} = \frac{16}{765} = 0.021\ arc\ min$$

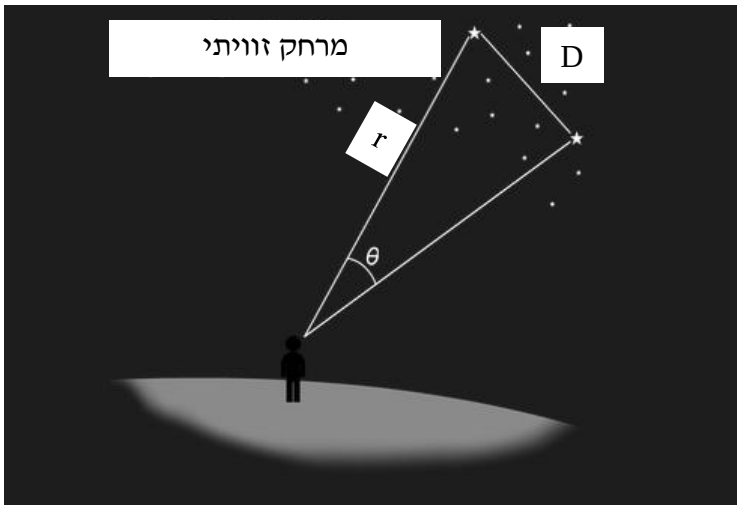
מצאנו שקוטר המכתש הוא 46 פיקסלים, לכן קוטר המכתש בזוויות:

$$(4)\quad D_{arc\ min} = number\ of\ pixels * dp = 46 * 0.021 = 0.962\ arc\ min$$

על פי קירוב זוויות קטנות, היוצא מההנחה שמרחקו של המכתש מאיתנו הרבה יותר גדול מקוטרו, ניתן לכתוב:

$$(5)\quad \frac{D}{r} = \tan\theta \cong \theta_{Rad} = \frac{\theta_{Deg}}{180/\pi} = \frac{\theta_{Deg}}{57.3°} = \frac{\theta_{arc\ min}}{57.3° \cdot 60} = \frac{\theta_{arc\ min}}{3438`}$$

נתונים על מיקום הירח בשעת צילום התמונה ניתן למצוא במקורות רבים באינטרנט כמו (Burnett, 2020).



איור 21: מרחק זוויתי- בתמונה ניתן לראות את המשולש ישר הזווית שקודקודיו הם הצופה ושתי הנקודות שאת המרחק ביניהן מעוניינים למדוד. מטריגומטריה בסיסית קל לראות שהמרחק D בין שתי הנקודות שווה למרחק r כפול טנגנס הזווית. כאן נכנס לפעולה קירוב זוויות קטנות- אנו מניחים שהמרחק r בין הצופה לבין שתי הנקודות

גדול משמעותית מהמרחק R בין שתי הנקודות ועל כן זווית הראש היא קטנה ביותר. עבור זוויות קטנות מתקיים:

$\tan(\theta) \approx \theta$ וכך מתקבל הביטוי שבנוסחא (7).

המרחק בין מרכזי הירח וכדור הארץ בשעת צילום התמונה היה $58.94_{R_{earth}}$. רדיוס הירח שווה בערך ל $0.27_{R_{earth}}$ לכן, בקירוב המרחק בין פני הירח לפני כדור הארץ בשעת צילום התמונה:

$$(6)\ r = (58.94 - 1 - 0.27)R_{Earth} = 57.67 \cdot 6371 = 367{,}415\ Km$$

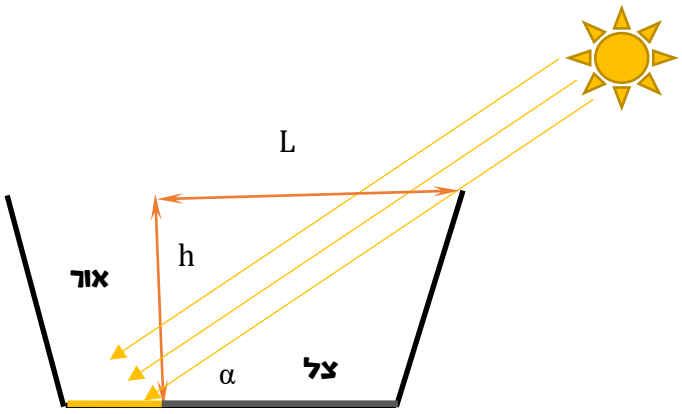
וכך, קוטרו של המכתש:

$$(7)\ D = \theta \cdot r = \frac{\theta_{arc\ min}}{3438`}\ r = \frac{D_{arc\ min}}{3438`} r = \frac{0.962}{3438} 367415 = 102.81\ Km$$

קוטרו האמיתי של מכתש תיאופילוס הוא $D = 100\ Km$, אחוז השגיאה: 2.81%, שזה בהחלט קרוב למדי.

2. <u>חישוב עומק המכתש עבור מכתש שטוח</u>:

מודל למכתש שמאוד יפשט את החישוב יניח שעומק המכתש הוא קבוע בכל קוטרו, עד לשפתו.



איור 22: מודל של מכתש בעל קרקע שטוחה לחלוטין. גובהו של המכתש, אורכה של צללית האור וקרן השמש הראשונה שפוגעת בקרקע המכתש יוצרים משולש ישר זווית. על ידי מדידת אורך הצללית וידיעת זווית ההגבהה ניתן לחשב בקלות, בעזרת טריגונומטריה בסיסית, את עומקו של המכתש.

אם נסמן את אורך הצללית ב L ואת עומק המכתש ב h, כאשר הזווית α היא זווית ההגבהה מעל האופק שבה פוגשות קרני השמש את קרקע המכתש נוכל לחשב בקלות את גובה המכתש:

$$(8)\ \tan(\alpha) = \frac{h}{L} \implies h = L \cdot tan(\alpha)$$

3. <u>מציאת זווית ההגבהה</u>:

באופן פשוט, זווית ההגבהה של השמש מעל האופק תלויה בקו האורך בו נמצאים על פני הגרם השמיימי המקיף את השמש. כשנמצאים ממש על קו הדמדומים השמש בדיוק שוקעת מעבר לאופק, כלומר זווית ההגבהה שווה לאפס. מי שיימצא באותו הזמן על קו אורך מזרחי ב $90°$ ביחס לקו הדמדומים יראה את השמש בזניט, מעל הראש- כלומר זווית ההגבהה עבורו תהיה שווה ל $90°$[13]. כך כדי למצוא את זווית ההגבהה, α, עבור המכתש שלנו יש לדעת את ההפרש בין קו האורך בו הוא

[13] ראו בנספח פיתוח למציאת זווית ההגבהה, בהתחשב גם בקו הרוחב בו נמצאים. מה שכתבנו יהיה נכון עבור מכתשים שנמצאים על קו המשווה או לכל הפחות לא רחוק ממנו יותר מידי צפונה או דרומה.

נמצא לבין קו האורך בו נמצא באותה השעה קו הדמדומים. מכיוון שצילמנו את המכתש כשהוא היה סמוך לקו הדמדומים נצפה שזווית ההגבהה תהיה קטנה ביותר. מתוך האתר (Burnett, 2020) מצאנו שבשעת צילום התמונה קו האורך של קו הדמדומים, במערכת הסלנוגרפית[14] היה 22.9°E. קו האורך של מרכז המכתש שלנו במערכת קואורדינטות זו הוא 26.4°E. לכן זווית ההגבהה היא:

$$(9)\ \alpha = 26.4 - 22.9 = 3.5°$$

את L, אורך הצללית הזוויתי, נמצא על ידי ספירת מספר הפיקסלים, והכפלתו באורכו הזוויתי של כל פיקסל, שכבר מצאנו למעלה.

$$(10)\ L_{arc\ min} = number\ of\ pixels * dp = 37.4 * 0.021 = 0.7854\ arc\ min$$

כעת, בעזרת קירוב זוויות קטנות, ושימוש בערך של מרחק המכתש- טלסקופ שמצאנו קודם:

$$(11)\ L = \frac{L_{arc\ min}}{3438`} r = \frac{0.7854}{3438} \cdot 367415 = 83.93\ Km$$

ולבסוף, עומק המכתש הוא:

$$(12)\ h = L \cdot tan(\alpha) = 83.93 \cdot \tan(3.5) = 5.13\ Km$$

עומקו האמיתי של מכתש תיאופילוס (ביחס לגובה העליון ביותר של שפתו) הוא $D = 5.5\ Km$ אחוז השגיאה: 6.72 %. התוצאה אשר קיבלנו קרובה, אך אחוז השגיאה אינו מאוד קטן. ייתכן שאחד ממקורות השגיאה הוא שהקירוב בו השתמשנו מתייחס לקרקע המכתש כאל שטוחה ואילו במציאות קרקעיתו של מכתש תיאופילוס הינה יותר קרובה לצורת קערה כדורית מאשר לפלטה. מודל של מכתש כדורי הוא מסובך יותר אך ייתכן שהוא ייתן תוצאה טובה יותר.

4. <u>חישוב עומק המכתש בהנחה שהמכתש הוא בצורה כדורית</u>: חישוב המתאים יותר למכתשים מסויימים ניתן למצוא במאמר (Scott, Shen, Mulley, & Pan, 2013)[15] בו פיתחו נוסחה עבור h, גובהה של הנקודה הגבוהה ביותר במכתש:

$$(13)\ h = R - [R^2 - \frac{D^2}{4}]^{0.5}$$

כאשר רדיוסו של המכתש הכדורי, R נתון על ידי:

$$(14)\ \mathrm{R} = \frac{L - \frac{D}{2}}{\cos(90 + \ \alpha - \tan^{-1}\left[\frac{L\ tan\ (\alpha)}{D - L}\right]}$$

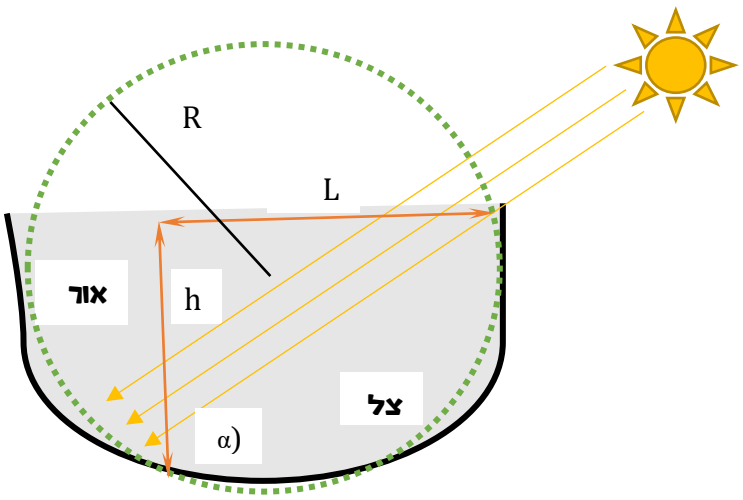
נציב את הערכים עבור המכתש שלנו:

$$(15)\ \mathrm{R} = \frac{83.93 - \frac{102.81}{2}}{\cos(90 + \ 3.5 - \tan^{-1}\left[\frac{83.93\ \cdot tan\ (3.5)}{102.81 - 83.93}\right]} = 160.245\ Km$$

[14] מערכת הקואורדינטות בה נהוג להשתמש כדי לתאר מיקום על פני קרקע הירח. קו האורך שמוגדר כקו האורך אפס עובר בין שני הקטבים של הירח, דרך הנקודה על פני הירח שנמצאת בקירבה הרבה ביותר לפני כדור הארץ.

[15] פיתוח קשרים 13 ו 14 הוא טריגונומטרי/ גיאומטרי בעיקרו. ניתן למצוא אותו במאמר ב appendix, עמ' 526-527.

$$(16)\ h = 160.245 - \sqrt{\left[160.245^2 - \frac{102.81^2}{4}\right]} = 8.47\ Km$$



איור 23: איור המציג את שיטת הקירוב עבור מודל של מכתש בעל קרקע בצורה מעגלית. מודל זה מתאים למכתשים שקרקעיתם איננה שטוחה, אלא יותר קעורה. במקרה זה, גובהו של המכתש איננו גודל קבוע בכל נקודה בו, אלא הוא פונקציה של המרחק מדופן המכתש. על כן החישוב כבר איננו מיידי ודורש עבודה אלגברית יותר מורכבת.

תוצאת החישוב אשר קיבלנו היא גדולה יותר, ניתן להסביר זאת על ידי כך שתחתיתו של המכתש הספציפי שלנו, תאופילוס, היא רדודה יותר בפועל, כתוצאה מתהליכים גיאולוגים או כתוצאה מזווית פגיעה גדולה, ולכן מודל זה פחות מתאים לו.[16]

5. <u>נוסחה אמפירית להערכת עומק מכתש על פי קוטרו</u>: לעתים תצפיתנים מפתחים נוסחה אמפירית שעולה מתוך כמות של נתונים תצפיתיים שנאגרה, גם אם אין הסבר או חוק טבע שעומד מאחורי הקשר המתמטי המתקבל. (Scott, Shen, Mulley, & Pan, 2013) פיתחו קשר מתוך נתונים שנאספו על עשרות מכתשים בירח על ידי חלליות אפולו ועל ידי מקפות שונות שצילמו את הירח מקרוב בעשרות השנים האחרונות. נוסחאתו האמפירית עבור עומק המכתש כתלות בקוטרו היא:

$$(17)\ h = 0.2295\ D^{0.9224}$$

נציב את הנתונים שלנו:

$$(18)\ h = 0.2295\ 102.81^{0.9224} = 9.635\ Km$$

התוצאה הזו ככל הנראה מכילה את אותה שגיאה כמו השיטה הקודמת, אך יש חשיבות למציאת קשרים אמפירים. למסקנה, מצאנו ששיטת הקירוב שהמניחה כי קרקעית המכתש שטוחה נתנה את התוצאה המדויקת ביותר. ניתן להסיק מכך שאכן המכתש שלנו יותר שטוח בצורתו מהאחרים ושהמודל המתואר באיור 17 מתאר אותו נאמנה, אף על פי שחשבנו בתחילה שהוא מודל פחות מדויק.

[16] ישנם מאמרים שונים בהם ניסו לפתח נוסחאות שהולמות יותר סוגים ספציפיים של מכתשים. ראו למשל (Chappelow & Sharpton, 2002) שפיתחו נוסחה לעומק מכתש עבור מכתשים אליפטיים או קוניים.

פרק 3 – מערך שיעורים להוראה בכיתה

3.1. מבנית הוראה

נושא המשימה:

שימוש בידע הנלמד בפרק של אור וצל בלימודי אופטיקה גיאומטרית לפתרון בעיה אסטרונומית של חישוב ממדים של פרטי נוף על פני גרמי שמיים. בפרט, נעסוק כאן בחישוב מכתש על פני הירח.

מטרות המשימה:

מטרות ראשיות של יחידת הלימוד:

1. התלמידים יבינו לעומק את מקור התופעה של מופעי הירח.
2. התלמידים יישמו ידע תיאורטי שלמדו על בעיה מעולם חקר החלל.
3. התלמידים יכירו מושגים מתחומי האסטרונומיה התצפית.

מטרות משנה של יחידת הלימוד:

1. התלמידים יעבדו בשיתוף פעולה עם עמיתים לכיתה.
2. התלמידים ירכשו ידע מעבר לחומר הלימוד הרגיל בנושאי אופטיקה גיאומטרית הנוגע לתופעות אסטרונומיות.
3. התלמידים ירחיבו את ידיעותיהם אודות הירח.
4. עידוד סקרנות ועניין בקרב התלמידים אודות אסטרונומיה דרך למידה על הירח.
5. התלמידים יחוו חלק מעבודת האסטרונום התצפיתי, ויקבלו מידע אמפירי מתוך מדידה.
6. התלמידים יכירו דמויות מפתח במחקר האסטרונומי של חקר הירח ומערכת השמש.

מקום ברצף ההוראה:

לאחר השלמת המבוא לאופטיקה גיאומטרית: מהלך קרני אור, מקורות אור, אור וצל ושדה ראייה. לאחר נושאים אלו התלמידים הם בעלי הידע הנדרש לצורך התמודדות עם התוכן של יחידת הוראה זו. אך בשל העיסוק בחומר מתקדם יותר כמו טלסקופים ועקרון הפעולה של מצלמה, הנוגעים בנושאים של מראות מישוריות, עדשות דקות ומערכות אופטיות, יחידת הלימוד יכולה לשמש כמבוא או סיכום לנושאים אלו.

אוכלוסיית היעד:

כיתות הלומדות אופטיקה גיאומטרית, בעיקר מגמות פיסיקה בכיתות י' עד יב'. ניתן להמיר את היחידה לכיתות ט' של עתודה מדעית טכנולוגית (עמ"ט) או תוכניות לימוד דומות.

חלוקה לקבוצות:

מומלץ לחלק את התלמידים לצוותים של 2 עד 3 תלמידים, אך ניתן לחלק לקבוצות של עד 4 תלמידים כשאין ברירה אחרת.

3.2. מערך ההוראה של יחידת הלימוד

להלן נפרט בקצרה את תוכן השיעורים במהלך יחידת ההוראה. בנספחים 3-6 תמצאו חומרי למידה מוכנים לשימוש והנחיות מפורטות לגבי כל אחד מחלקי יחידת הלימוד. כל שיעור נלקח בחשבון כשיעור כפול של כ-90 דקות, זהו משך הזמן המינימאלי אשר נכון לטעמנו להקדיש לכל חלק מיחידת ההוראה. משכה הכולל של המשימה הוא כ-4 שיעורים כפולים.

שיעור ראשון – מבוא+ סדנת אזור הדמדומים

בתחילת השיעור יועבר לתלמידים שאלון מקדים, אותו ניתן למצוא בנספח 3. מומלץ להעביר אותו כשאלון מתוקשב- טופס גוגל מצורף בקישור הזה, נא ליצור עותק אישי בטרם השימוש. השאלון מכיל שאלות שונות- חלקן בסיסיות ומבלבלות וחלקן עוסקות בנושאים מתקדמים. מטרת השאלון לעורר את העניין בקרב התלמידים ולתת להם מוטיבציה להתעמק בנושאים בהם יחידת הלימוד עוסקת. הנושאים המופיעים בשאלון:

- תופעת האור וצל, שדות ראייה ומושגי יסוד של אופטיקה גיאומטרית.
- השמש ומופעי הירח, ליקויי חמה ולבנה.
- היסטוריה ומידע על הירח.

לאחר העברת השאלון נעבור להצגת מטלה קבוצתית לתלמידים. המשימה היא משימה של למידה עצמאית, התלמידים יעבדו עליה בזמנם החופשי, תוך ליווי של המורה, אך לא כחלק ממהלך ההוראה. את התוצרים יציגו הקבוצות השונות בשיעור האחרון ביחידה, כפי שמוסבר בנספח 3. במהלך שיעור הפתיחה יציגו המורים לתלמידים את המשימה:

- לוח הזמנים של המשימה.
- הסבר על שלבי המשימה השונים.
- מחוון מקוצר לצורך חישוב הציון.
- חלוקה לצוותים לצורך העבודה. מומלץ שהקבוצה תחולק על פי אותם הצוותים בפעילות המעבדה שתועבר בשיעור הבא.
- רשימת הנושאים (המופיעה, כנ"ל בנספח 3) וחלוקת הנושאים/ תקופות לכל קבוצה.

לאחר הצגת המטלה הקבוצתית נעבור ל"סדנת אזור הדמדומים"- פעילות שתגרום לתלמידים להבין לעומק את תופעות הזריחה והשקיעה ולדעת מה מתרחש על קו הדמדומים שבין האור לחושך. ההבנה שהם ירכשו בסדנא תעזור להם להתמודד עם משימת חישוב ממדי המכתש שתוצג בהמשך.

סדנת איזור הדמדומים:

תיאור מפורט של מהלך הסדנה מופיע בנספח 5, ובקישור זה:

- התלמידים יחולקו לזוגות עבודה למהלך כל הסדנה, הזוגות יחלקו ביניהם חוויה של זריחה או שקיעה מחייהם – פעילות של דמיון מודרך.
- בפורום כיתתי נדון על כיצד מוגדרת זריחה / שקיעה, נצפה בצילום של זריחה ומתוך כך נחדד תוך שימוש בכלי של דיון כיתתי נעמוד על מגוון הפרטים הקשורים לתופעה של דמדומים בכדור הארץ.
- בזוגות, זיהוי מאפיינים הקשורים בדמדומים במגוון גרמי שמיים בעלי מאפיינים שונים מכדור הארץ, במטרה למצוא מאפיינים דומים ושונים לעומת כדור הארץ. על ידי חידוד ההבדלים נעמיק את הבנת התופעה של דמדומים בקרב הלומדים.
- איסוף המידע לטבלה מרכזת ושיתופית.
- עבודה יצירתית זוגית כתובה / מצולמת המשלבת את כל השלבים הקודמים ועושה איתם אנליזה.

שיעור שני – מכתשים:

השיעור יתקיים במעבדה, לצורך ניסוי יצירת מכתשים.
בחלקו הראשון של השיעור יעביר המורה לתלמידים את התכנים מתוך הפרק התאורטי הנוגעים להיווצרות המכתשים על פני הירח. כדי להבין את תהליך יצירת המכתשים יש להתחיל מהגופים שיוצרים את המכתשים. לאחר מכן לעסוק בתהליך ההיווצרות של המכתש. לכן סדר ההוראה יהיה:

- מהם אסטרואידים, מטאוריטים ומטאורים.
- תהליך הפגיעה של אסטרואיד בגרם שמיים ושחרור האנרגיה בפגיעה.
- תהליך גיאולוגי של ייצוב המכתש.
- תהליכי בלייה של מכתש.

מומלץ להשתמש בסרטון המובא בפרק הרלונטי ובאמצעי המחשה נוספים- כולל מערכת הניסוי בה נשתמש מיד. כדאי לנסות להראות כיצד התנגשויות שונות יוצרות מכתשים בצורות שונות.

לאחר המבוא הזה נבצע ניסוי בו נדמה היווצרות מכתש וננסה למצוא נוסחא אמפירית לקשר בין גודלו של האסטרואיד הפוגע לממדי המכתש וכן בין גודל הצל לקוטר המכתש. נוסחא אמפירית היא שיטה אחת לחשב גדלים שלא ניתן למדוד באמצעי מדידה ישירים. בשיעור הבא נכיר דרכים נוספות לחשב את ממדי המכתש, מבלי לנחות על אדמת הירח.
תדריך הניסוי מצורף בנספח 4 ו[בקישור זה].
קיצור מהלך הניסוי:

- חלוקה לקבוצות העבודה, עם תדריך הניסוי וערכת הניסוי.
- מהלך הניסוי:
  - הפלה של מסות כדוריות על פני ארגז חול.
  - מדידה של קוטר המכתש הנוצר והעומק שלו.
  - הארת המכתש שנוצר, צילום ומדידת קוטר הצל וקוטר המכתש בפיקסלי סבעזרת תוכנה.
  - מציאת הקשר הנוסחתי בין הפרמטרים השונים.

שיעור שלישי – מבוא תאורטי+ חישוב ממדי מכתש

בשיעור הראשון, בסדנת הדמדומים, התלמידים הכירו לעומק את תופעת הזריחה בגרמים שמימיים שונים. הם דמיינו מה המחזה שרואים על פני הירח כשנמצאים על קו הדמדומים, והבינו שיש קשר בין זווית ההגבהה של השמש בשמיים לבין המרחק של הצופה מקו הדמדומים עצמו. בשיעור השני הם הכירו לעומק את המכתשים ואת תהליך ההיווצרות שלהם. כעת יש להם את הכלים להתמודד עם המשימה המרכזית והמאתגרת העומדת בפניהם: חישוב ממדי מכתש על הירח, בעזרת תמונה שצולמה מפני כדור הארץ, בלבד.
לאחר דיון קצר בשאלה כיצד לדעת התלמידים ניתן לעשות זאת, על המורה להציב את הפיגומים שיאפשרו לתלמידיו להבין את השיטות השונות.

לכן, בהתאם להיכרות של המורה עם הכיתה ועם ההספקים עד כה, יבחר המורה מתוך החומר התאורטי המופיע בפרק הקודם את הנושאים שלדעתו חשוב להעביר לתלמידים. כיתה שעדיין לא למדה כלל על אור וצל ועל מודל הקרניים של האור, תצטרך ללמוד את התכנים הללו בשלב הזה. על גבי זה יש צורך להכיר את תנועת הירח סביב כדור הארץ ואת הסיבה למופעי הירח.
כיתה שכבר שולטת בתכנים הללו, תתחיל לעבוד על השיטות השונות לחישוב גודל המכתש.
העבודה תהיה בקבוצות הקבועות- מהמטלה הקבוצתית ומהניסוי. כל קבוצה תקבל את תמונות המכתש שצולמו על ידינו- תמונה של הירח המלא, עם מכתש תיאופילוס , תמונה של איזור המכתש, תמונה זו היא בפורמט fit.* כדי לפתוח אותה יש לשמור את התמונה על גבי שולחן העבודה של המחשב, להוריד את התוכנה החינמית והקלה ImageJ (בתוך הקישור ללחוץ על download) ובתוך התוכנה, בעזרת ההוראה open לפתוח את הקובץ. החשיבות של שמירת התמונה דוקא בפורמט זה היא שכך שמורים יחד עם התמונה (ב header) כל הנתונים על צילום התמונה, לפרטי פרטים. בתוכנה זו נשתמש גם למדידת הגודל של הירח והמכתש בפיקסלים.
על הקבוצות לחשב את ממדי המכתש כפי שמופיע בפירוט רב בחלק התאורטי. ניתן לבצע את תוך הוראה פרונטלית של המורה על השיטות השונות ומתן הנחיות מסודרות. דרך אחרת, המומלצת לכיתות חזקות יותר היא דרך של הנחייה של המורה באמצעות דיאלוג סוקרטי. עם הצבת השאלות הנכונות בפני התלמידים ועזרה בנקודות רגישות עשויים תלמידים חזקים להתקדם חלק ניכר מהדרך לפתרון בכוחות עצמם. לדוגמא, כדאי בכל מקרה להציג בפני התלמידים את הכלי של קירוב זויות קטנות, או להפנות אותם לחפש אותו, אך משהוא הוצג הם יכולים להמשיך בכוחות עצמם ולחבר את שאר הנקודות. ייתכן מאוד שיהיה צורך בשיעור נוסף כדי לסיים את החישובים, זה נתון לשיקול דעתו של המורה ולמספר השעות שברצונו להקדיש ליחידה בכלל ולפעילות זו בפרט. ניתן להכין לתמידים קובץ הנחיות המבוסס על הפרק התאורטי בעבודה.

שיעור רביעי – סיכום המשימה:

בשיעור זה אנחנו מסכמים את כל יחידת הלימוד על הנושאים השונים בה. השלב הראשון הוא הצגות סיכום של קבוצות העבודה השונות של התלמידים, בהצגה התלמידים צריכים להציג:

- תוצאות הניסוי שלהם.
- ממדי מכתש תיאופילוס שהם חישבו בעזרת השיטות של ניתוח התמונה.
- העברת המצגת של המטלה הקבוצתית.
- רשימה של שלוש תובנות או ידע חדש אשר הם הגיעו אליו דרך העבודה הזו.

משך ההצגה צריך להיות כ10 דקות לכל קבוצה, ההצגה יכולה להיות בכל צורה יצירתית אשר מתאימה להצגה במסגרת כיתתית כל עוד היא נוגעת בארבע נקודות אלו.
לאחר השלב הזה ייעשה סיכום במליאה, לסקירת המערך שעברו התלמידים.
לסיום, יישלח לתלמידים השאלון איתו פתחנו את סדרת השיעורים. אין ספק שהתלמידים עברו כברת דרך ארוכה בהיכרותם עם הירח, השקיעות הזריחות וכל השאר. לפחות כך אנחנו מקווים.
אפשרות נוספת, כהעשרה לאחר שלב הסיכום, אם יש זמן לכך, היא דיון בעתידו של הירח. "מה העתיד הצפוי לירח?"- דיון השערתי, האם משתלם להשקיע כל כך הרבה משאבים בהבאת אסטרונאוטים שוב לפני הירח? מהו הערך המוסף של הקמת תחנת חלל על פני הירח? שאלות אלו יכולות להוות סיום מתאים ליחידה.

3.3. מחוון:

מימד הבדיקה	קריטריונים להערכה	%	תחילת הדרך	מתקרב ליעד	הגעת ליעד
			0-50	50-80	80-100
תלמידאות לאורך יחידת ההוראה 20%	שיפור במענה לשאלון הפתיחה	5	התלמיד לא שיפר את השיגיו בשאלון	התלמיד שיפר את הישיגיו אך לא באופן משמעותי	התלמיד שיפר את הישיגיו באופן משמעותי ביותר
	שיעורים פרונטלים	5	התלמיד לא הראה השתתפות או רצון למידה	התלמיד השתתף באופן מספק	התלמיד התבלט בצורה יוצאת דופן בהשתתפותו או תרומתו במהלך השיעורים
	עמידה בלוחות זמנים	10	התלמיד לא עמד בלוחות זמנים של המטלות האישיות שלו	התלמיד לא עמד באופן מלא בלוחות הזמנים	התלמיד עמד באופן מלא בלוחות הזמנים
ניסוי יצירת מכתשים 25%	התנהלות הקבוצה במהלך הניסוי	5	הקבוצה לא עקבה אחרי ההנחיות, לא עבדו בצורה מסודרת, לא השאירו סביבת עבודה מסודרת	הקבוצה עקבה חלקית אחר הנחיות, עבודה מסודרת חלקית, סביבת העבודה לא מסודרת בסיום המעבדה	הקבוצה התנהלה בצורה תקינה, בהתאם להנחיות, סביבת המעבדה לאחר הניסוי מסודרת ונקייה
	שיתוף פעולה בתוך הקבוצה	5	בין תלמידי הקבוצה לא היה שיתוף פעולה בזמן הניסוי	תלמידי הקבוצה שיתפו פעולה באופן חלקי או שהיה תלמיד שלא היה פעיל במהלך הניסוי	הקבוצה עבדה בשיתוף פעולה טוב וכל התלמידים היו פעילים במהלך הניסוי
	תוצאות הניסוי תואמות לתיאוריה	5	התוצאות אשר התקבלו היו שגויות ולא תואמות למצופה, ולא זכו להתייחסות	התוצאות אשר התקבלו הכילו טעות או לא תואמות למצופה, אך זכו להתייחסות	התוצאות תאמו למצופה
	טיב דו"ח הניסוי	10	הדו"ח כתוב באופן לא תואם להנחיות, ומכיל שגיאות משמעותיות	הדו"ח כתוב באופן שאינו תואם באופן מלא להנחיות, ישנן שגיאות מסוימות	הדו"ח כתוב באופן תואם להנחיות וללא שגיאות

עבודה קבוצתית 25%	שיתוף פעולה מחוץ לשיעורים	7	דווח כי בקבוצה היה שיתוף פעולה לא תקין	דווח בקבוצה שיתוף פעולה חלקי	דווח כי בקבוצה היה שיתוף פעולה מלא ואיכותי
	שיתוף פעולה בזמן השיעורים	8	בקבוצה לא היה שיתוף פעולה תקין	בקבוצה נצפה שיתוף פעולה חלקי	בקבוצה נצפה שיתוף פעולה פורה וחיובי
	דיוק התוכן וניסוחו	10	הקבוצה לא הקפידה על שימוש במושגים והגדרות פיזיקאליות	הקבוצה הקפידה באופן חלקי על הגדרות ומושגים פיזיקליים	הקבוצה הקפידה באופן מלא על הגדרות ומושגים פיזיקליים
הצגה אישית 15%	שפת ואופן ניסוח ההצגה	5	הצגה מבולבלת ולא ברורה	ההצגה בחלקה ברורה ומעניינת	ההצגה מאוד ברורה ומעניינת
	רצף הגיוני	5	דילוג בין מרכיבים שונים של התחנה	הצגה מסודרת חלקית	מסודר באופן ברור עם רצף הגיוני
	בקיאות ודיוק	5	לא שלטו במושגים, לא מבינים מה מציגים, עושים טעויות רבות	הבינו את החומר אך לא התעמקו בו, לא יודעים מעבר להצגה	שלטו בחומר, העמיקו וחקרו את המושגים והתהליכים, יודעים מעבר להצגה
סדנת קו דמדומים 15%	רצינות ושיתוף פעולה בעבודה הזוגית	5	התלמידים לא הפגינו רצינות ולא שיתפו פעולה	התלמידים עבדו אך אבדו ריכוז לעיתים	התלמידים הפגינו רצינות ושיתפו פעולה
	איסוף הנתונים לטבלה	5	המידע הנאסף היה שגוי ברובו	המידע היה נכון ברובו אך הכיל שגיאות משמעותיות	המידע הנאסף היה מדויק ברובו או בכולו
	התוצר היצירתי בסוף הסדנה	5	התוצר לא היה כתוב היטב ולא לפי ההוראות	התוצר הכיל פירוט או דיוק מדעי דל, היה בעל יצירתיות לא רבה	התוצר נכתב היטב, עם דיוק ופירוט מדעי, והפגין יצירתיות רבה

סיכום

השמיים שמעל ראשנו היוו מאז ומעולם מקור בלתי נדלה לסקרנות והתפעמות מצד המין האנושי. הגרמים השמימיים היו חלק בלתי נפרד מתודעת הקיום שלנו. במשך מרבית ההיסטוריה האנושית בכל ערב, עם שקיעת החמה, נותרו בני האדם שרויים בחשיכה כאן בכדור הארץ, למטה, אך עמדו מול עולם שלם של אור, מלא באינספור כוכבים ותופעות מסתוריות מלמעלה. נותר רק להביט, לתאר בצורה מדוייקת ואז לדמיין ולספר סיפורים אודות הכוכבים, סיפורים שבהמשך השפיעו על חייהם של אנשים ואף של ממלכות שלימות.

בעידן המודרני חלו שתי מגמות בהקשר זה- מצד אחד אנו מעמיקים בהבנת התופעות הקשורות לשמיים ויודעים לתאר רבות מהן בצורה כמעט שלימה. הטלסקופים שפיתחה האנושות ושאר מכשירי התצפית חוקרים בדורנו גרמים שמימיים שעד לפני שנים מעטות היה קשה אפילו לדמיין שנוכל לחקור אותם אי פעם. אנו חוקרים לא רק את סביבתנו הקרובה אלא גם את היקום כולו, לא רק בזמננו אלא מרחיקים גם לרגעי ההיווצרות של יקומנו. ניתן לומר שהשמיים קרובים אלינו יותר מאי פעם.

מצד שני, דורנו הוא גם הדור בו אנו, בני האדם, רחוקים מהשמיים כפי שמעולם לא היינו. על פי IDA[17], ארגון השמיים החשוכים הבינלאומי, נכון לשנת 2019 רק שניים מכל עשרה בני אדם על פני הגלובוס מסוגלים לראות את שביל החלב בלילה. 99 אחוזים מהאוכלוסייה בארה״ב ובאירופה חיה תחת שמיים עם זיהום אור משמעותי, כך שהאנשים הגרים שם מסוגלים לראות כוכבים בודדים בלבד בשמיים, אם בכלל. מעבר לזיהום האור שנמצא סביבנו, קיימות סיבות נוספות לכך שמרבית בני האדם לא מכירים כיום כלל את השמיים. ״דור המסכים״ של ימינו, כפי שהוא מכונה לעיתים, שקוע מרבית היממה בתוך המסך של הטלפון החכם, אפילו תוך כדי הליכה ברחוב. רבים מהנערים והנערות שאנו מחנכים בבתי הספר נוהגים הרבה פחות מבעבר להתבונן בסביבה המקיפה אותם, ולהרים את הראש לשמיים עוד פחות מכך. אפילו תופעות בולטות ובסיסיות כמו קשת בענן, זריחת ושקיעת השמש והירח, מופעי הירח ותנועת כוכבי הלכת רחוקות מלהיות מוכרות עבור חלק מבני הנוער (ולא רק עבורם).

מטרת העל שלנו בבחירת הנושא לעבודה הייתה לתרום להגברת המוטיבציה בקרב תלמידינו להביט סביב ולהתעניין במה שמתרחש מעל ראשם. להשיב משהו מהסקרנות הבסיסית הטבועה בכולנו שתובעת מאיתנו להסביר את התופעות המגוונות אליהן אנו נחשפים. כשמדובר בתלמידי פיסיקה לא מדובר במותרות, אלא במאפיין בסיסי שהסכמנו שחשוב לנו להעצים בקירבם, כחלק מהחינוך של מדענים לעתיד, או לכל הפחות של מבוגרים משכילים בעלי אוריינות מדעית.

בתחילת התהליך של פרויקט הסיום, ישבנו עם מר אילן מנוליס שבסבלנות רבה הציג לנו רשימה של כעשר אפשרויות מחקר שביכולתנו לבצע בתחומים אסטרונומיים שונים. כל האפשרויות היו מרתקות ומאתגרות וכללו פיסיקה עדכנית וחדשנית- ממיקרו טלסקופים ועד חיפוש אחר כוכבי לכת חוץ-שמשיים. לאחר מחשבה הסכמנו שנינו שלמרות כל הרעיונות ה׳נוצצים׳ אנחנו מעוניינים לעסוק במחקר שכל תלמיד- ללא תלות היכן הוא נמצא או איזה ציוד עומד לרשותו- יוכל לבצע. רצינו לעסוק בנושא שיפתח עבור התלמידים צהר לתופעות שהם יכולים לזהות ממש סביבם.

[17] https://www.darksky.org/our-work/grassroots-advocacy/resources/ida-publications

עבודה זו עסקה במדידת ממדי מכתש תיאופילוס על הירח באמצעות תצפית מכדור הארץ. אין צורך בשום מסך או מכשיר כדי לצפות במכתשים שעל הירח, עליך רק להרים את הראש. משקפת שדה או טלסקופ קטן לא מזיקים כמובן.

סביב הנושא המעט טכני הזה שזרנו- הן בחלק התאורטי, הן בחלק של מהלך ההוראה- נושאים מגוונים שלדעתנו מעמיקים את ההבנה על התופעות הקיומיות והבסיסיות ביותר שאנו חווים בתור בני אדם: הזריחה והשקיעה ומהי התחושה של אדם העומד בדיוק על הקו שבין האור לצל; הירח- על ההיסטוריה, העתיד והטופוגרפיה הייחודית שלו; מערכת השמש, על הגרמים השונים שנעים בה- מכוכבי הלכת, דרך השביטים וכלה במטאורידים, שבקיומם אנחנו חשים בעיקר כאשר הם חודרים לאטמוספירה והופכים למטאורים; חקר החלל, תוכניות אפולו והחיפוש אחר כוכבי לכת דמויי ארץ; ביקשנו גם לגרות את התלמידים לחשוב, לדמיין ולהבין למשל שזריחה ממש לא מוכרחת להיות כפי שאנחנו חווים אותה כאן, בעולמנו, ואולי דרך כך להפנים את העובדה ששום תופעה ממכלול התופעות שמאפשרות כאן את חיינו איננה ברורה מאליה.

עבודה זו מכילה מידע תאורטי רב, לשימושם של מורות ומורי הפיסיקה בכיתותיהם. הסבר על עקרון הפעולה של טלסקופים- על סוגיהם השונים, חומר רקע על צילום CCD ושימוש בפילטרים כחלק ממחקר אסטרונומי, חישוב מרחקים אסטרונומיים בעזרת שימוש בקירוב זויות קטנות הם רק כמה דוגמאות למה שנדון בעבודה זו. כוונתנו היא שלאחר שהמורה יקרא את העבודה מראשיתה ועד סופה הוא ישלוט בכל המידע הרלונטי לנושא, כך שהוא יוכל להעביר את יחידת ההוראה בכיתתו בביטחון. בביבליוגרפיה ניתן למצוא מאגר מידע מפורט הזמין לשימוש והעמקה נוספת למורים אשר יהיו מעוניינים בכך. כולנו תקוה שהעבודה תגיע לקהל היעד שלה ושמורי הפיסיקה אכן יראו אותה כרלונטית עבור תלמידיהם וישתמשו בה בכיתותיהם.

אנו רוצים להודות למר אילן מנוליס שנתן לנו את המשימה, על ההשקעה הרבה בנו, ועל כך שהוא הדריך אותנו באדיבות כה רבה במהלך התצפית במצפה הכוכבים אותו הוא מנהל. לד״ר רוני מועלם על ההנחייה המדעית ועל כך שקרא את עבודתנו והעיר לנו הערות חשובות. לסיום, תודה רבה לד״ר אמנון חזן על ההנחייה והליווי הצמודים לאורך המסע הארוך שעברנו, ובעיקר על הסבלנות הרבה שגילית, למרות שלא היינו ראויים לה פעמים רבות, אנו מעריכים זאת.

ביבליוגרפיה

al, R. S. (2013). Measuring the depth of an impact crater using an internal shadow. *Physics Education*, 520-528.

.35-53 ,*CEPS journal* .Determination of the Size and Depth of Craters .(2018) .׳al, V' G

Astronomy picture of the day. (2020, 5 מאי). Retrieved from Astronomy picture of the day: https://apod.nasa.gov/apod/astropix.html

Bessel, M. S. (2005). Standard Photometric System. *Annu. Rev. Astronomy. Astrophysics. 43:1*, 293-336.

Burnett, K. (2020, 07 10). *Moon Ephemeris*. Retrieved from Moon Ephemeris: http://www.lunar-occultations.com/rlo/ephemeris.htm

An improved shadow measurement .(2002) .׳Sharpton, V' L & ,׳Chappelow, J' E .technique for constraining the morphometry of simple impact craters .479-486 , *Planetary Science & Meteoritics*

Collins, G. S., Melosh, J., & Marcus, R. A. (2005). Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Meteoritics & Planetary Science*, 817-840.

French, B. M. (1998). *Traces of catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures.* Houston: Lunar and planetary institute.

Grieve, R. A., & Cintala, M. J. (1999). Planetary impacts. In *Encyclopedia of the Solar System* (pp. 845-876). San Diego: ACADEMIC PRESS.

Impact calculator. (2020, 08 02). Retrieved from Impact calculator: http://down2earth.eu/impact_calculator/planet.html?lang=en-US#acknowledgements

Johnson, H. L., & Morgan, W. W. (1953, May). Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas. *W. W. Morgan , The Astrophysical journal volume 117 number 3*, pp. 313-352.

King, H. C. (1955). *The History of the Telescope.* New York, New York: Dover Publications, Inc.

The Martin S. Kraar Observatory: אוחזר מתוך .(2020 06 01) .׳Manulis, I ׳http://www.weizmann.ac.il/particle/kraar

The Helen Kimmel center for planetary science: אוחזר מתוך .(2020 06 01) .*Observatory* https://www.weizmann.ac.il/CPS/observatory

O'Dale, C. (2020, 05 30). *Crater formation*. Retrieved from Crater explorer: https://craterexplorer.ca/crater-formation/

Ray Optics Simulation. (2020, 5 אפריל). Retrieved from Ray Optics Simulation: https://ricktu288.github.io/ray-optics/

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

Sci News. (2020, 09 02). Retrieved from Sci News: http://www.sci-news.com/astronomy/science-cold-terrestrial-exoplanet-binary-star-system-02039.html#:~:text=Using%20gravitational%20microlensing%2C%20a%20team,%2D2013%2DBLG%2D0341.&text=The%20second%20star%20in%20the,Saturn%20is%20from%20our%20Sun.

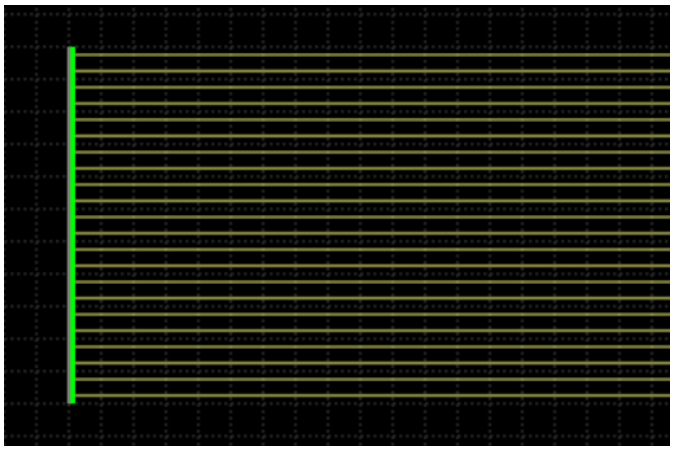
Scott, R., Shen, X., Mulley, I., & Pan, Z. (2013). Measuring the depth of an impact crater using an internal shadow. *Physics Education*.

Spectral instruments. (2020, 03 10). Retrieved from Spectral instruments: http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html

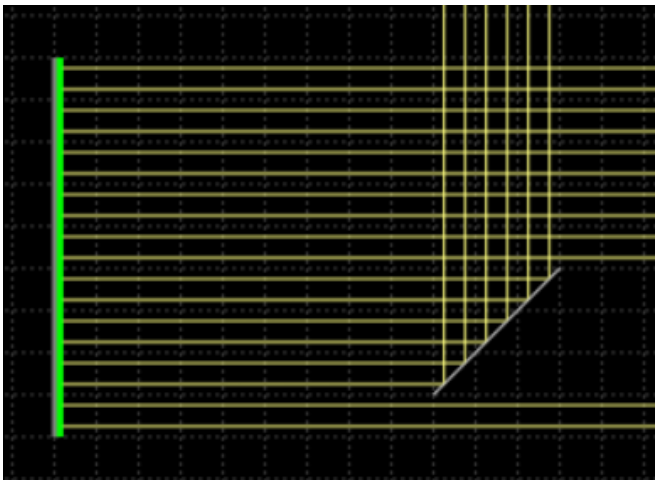
נספחים

נספח 1 – תמונות המדגימות את פעולות הסימולטור האופטי המוזכר בפרק 1.1 :

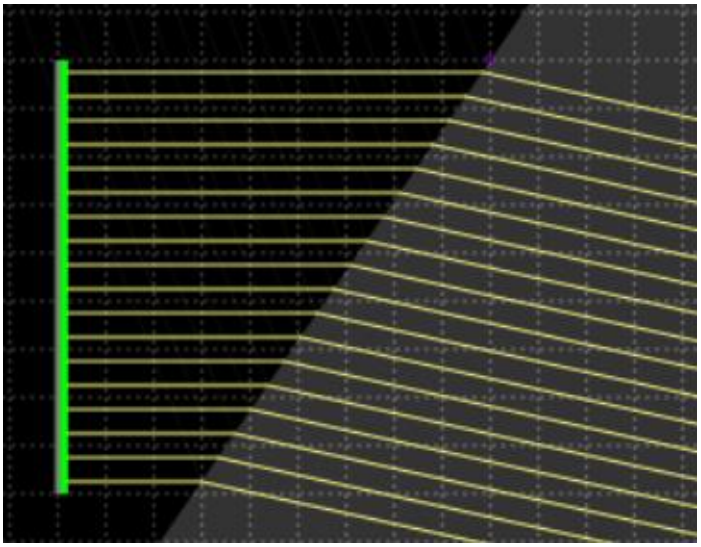
נתחיל מתיאור של מקור אור קווי, במטרה לדמות אור מכוכב רחוק המתקרב לכיוון צופה, לכן קרני האור מגיעות בצורה מקבילה.



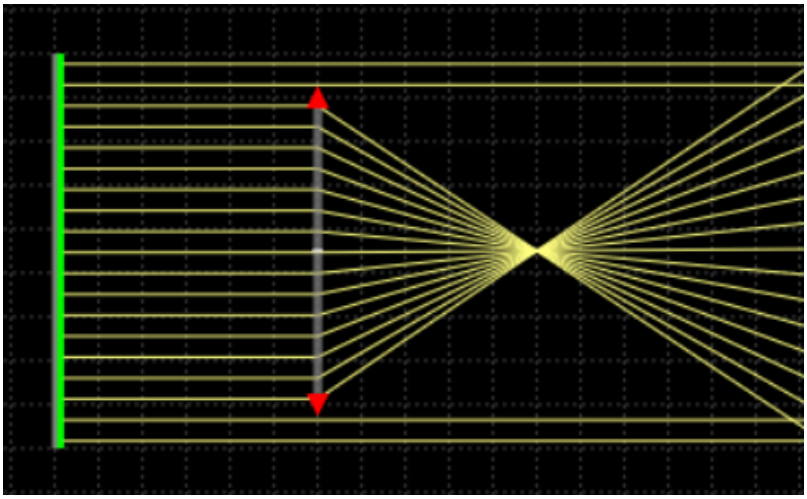
הצבה של מראה ב-45 מעלות לכיוון הקרניים מאפשר לנו להדגים את חוק ההחזרה



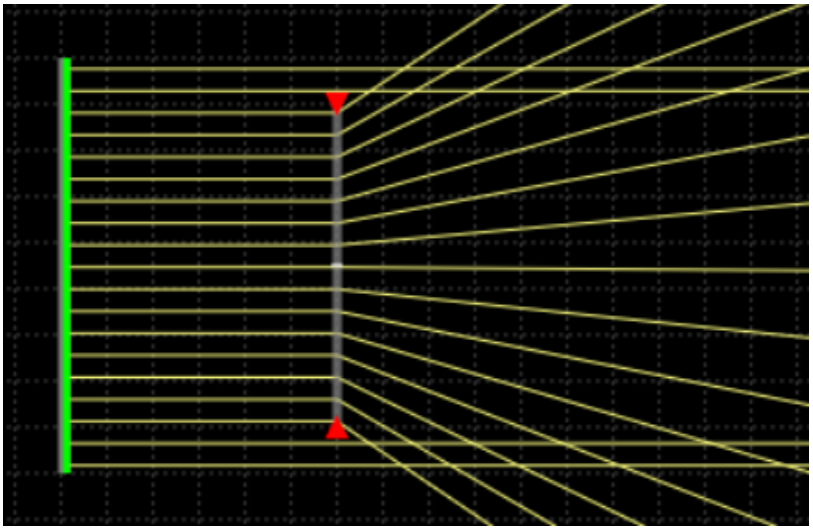
הצבה של מישור זכוכית מאפשר להדגים את חוק סנל



הצבה של עדשה מרכזת דקה אשר תהייה חשובה לצורך בניית הטלסקופ



ולצורך השלמות נציב עדשה מפזרת שוות מרחק מוקד



נספח 2 – תמונות לדוגמה של הפילטרים השונים

שלושת התמונות הבאות צולמו בהפרש זמנים קצר מאוד, שלושת התמונות הן בשחור לבן, במטרה לקבל את הרזולוציה הגבוהה ביותר. ניתן לראות כי בסנן B התקבלה התמונה בעלת האיכות הנמוכה ביותר, בשל פיזור ריילי המשמעותי יותר באורכי גל אלו. בסנן R לעומת זאת התקבלה התמונה החדה ביותר.

תמונה אשר התקבלה על ידי סנן V

תמונה אשר התקבלה על ידי סנן B

תמונה אשר התקבלה על ידי סנן R

נספח 3 – שאלון מקדים ליחידת ההוראה

שאלון מידע לגבי הירח

1) גודלה של צללית ביחס לעצם המייצר אותה :
א) תמיד קטן מגודל העצם.
ב) תמיד גדול מגודל העצם.
ג) תמיד זהה לגודל העצם.
ד) לא ניתן לדעת מראש.

2) כיצד נוצר אזור של צל חלקי מעברו של עצם?
א) זה תלוי במיקום של הצופה ביחס למקור האור והעצם.
ב) נדרש מקור אור לא נקודתי.
ג) זה תלוי בגודל של העצם כתלות במרחק ממקור האור.
ד) נדרש מקור אור חזק.

3) מתי ניתן לראות את הירח בשמיים?
א) רק במהלך היום.
ב) רק במהלך הלילה.
ג) בעיקר בלילה אך לעתים רחוקות גם ביום.
ד) גם ביום וגם בלילה.

4) מהם האזורים הכהים על פני הירח?
א) אזורים נרחבים מלאי בזלת.
ב) אין על הירח אזורים כהים.
ג) זו אשליה אופטית.
ד) השתקפות של האוקיינוסים.

5) לירח יש צד אחד אפל- שתמיד שרוי בחושך, וצד אחד שתמיד מואר.
א) נכון
ב) לא נכון

6) מי האדם הראשון אשר צפה אל הירח עם טלסקופ?
א) ניקולס קופרניקוס.
ב) טיכו ברהה.
ג) גלילאו גלילאי.
ד) ניל אמסטרונג.

7) מה הייתה התגלית המשמעותית הראשונה בעקבות תצפית זו של הירח?
א) אין אנשים על הירח.
ב) אין מים על הירח.
ג) יש לירח אטמוספירה.
ד) יש על הירח מכתשים.

8) מדוע הירח נראה לפעמים בצורת סהר ולפעמים בצורת כדור?
א) צורתו של הירח משתנה מכדור לסהר במהלך החודש.
ב) אנחנו מתבוננים על הירח מזוויות שונות.
ג) כדור הארץ מטיל צל על הירח.
ד) אף תשובה אינה נכונה.

9) מהו המודל המוביל אשר מסביר כיצד נוצר הירח?
א) התנגשות עם גרם שמיים בזווית כהה, והתאגדות השברים.
ב) גרם שמיים אשר נלכד בכוח הכובד של כדור הארץ.
ג) הירח נוצר במקביל לכדור הארץ במהלך היווצרותו.
ד) סלעים שנזרקו לחלל כתוצאה מפעילות געשית על פני כדור הארץ התגבשו והפכו לכדור אחד.

10) ליקוי חמה מתרחש בכל 'סוף חודש' (היום בחודש בו לא נראה חרמש הירח כלל).
א) נכון, אבל לרוב הוא קטן מאוד וקשה להבחין בו.
ב) נכון, אבל כל פעם במקום אחר על פני כדור הארץ.
ג) לא נכון, אין ליקוי בכל סוף חודש
ד) אין שום קשר בין ליקוי חמה לסוף חודש

11) כשמתרחש ליקוי לבנה:
א) הירח מטיל צל על כדור הארץ
ב) כדור הארץ מטיל צל על הירח
ג) א' ו ב' נכונים
ד) אף תשובה אינה נכונה

12) מאיזה חומר הניחו הקדומים כי הירח עשוי?
א) אדמה.
ב) אתר.
ג) אש.
ד) גבינה.

13) מהו משך ההקפה של הירח סביב כדור הארץ?
א) כ-28 ימים.
ב) כ-30 ימים.
ג) כ-29.5 ימים.
ד) כ-29 ימים.

14) האם בכוכבי לכת שונים יש תופעה של ליקויי ירח?
א) יש.
ב) אין.

15) יש יותר ליקויי חמה מליקויי לבנה.
א) נכון
ב) לא נכון, יש יותר ליקויי לבנה.
ג) לא נכון, תדירותם זהה.
ד) תלוי מתי. יש שנים כאלה ושנים כאלה.

16) מהו כוכב הלכת במערכת השמש עם הכי הרבה ירחים ידועים (נכון ל2020)?
א) שבתאי.
ב) מאדים.
ג) צדק.
ד) נפטון.

17) מהם כוכבי הלכת במערכת השמש שאין להם ירחים?
א) חמה
ב) חמה ונגה.
ג) חמה נגה ומאדים.
ד) חמה, נגה, מאדים, ונפטון.
ה) לכל כוכבי הלכת יש ירחים.

18) האם אנחנו יודעים על קיומם של ירחים מחוץ למערכת השמש?
א) כן.
ב) לא.

19) סהר החליט לגור על פני הירח במקום מסוים. אם הוא רואה כעת את השמש שוקעת, מתי הוא יראה אותה שוקעת בפעם הבאה? (כל הזמנים הם של תושבי כדור הארץ)
א) בעוד 24 שעות.
ב) בעוד 35.5 שעות.
ג) בעוד שבועיים.
ד) בעוד חודש.

20) כמה בני אדם דרכו על אדמת הירח ומתי זה קרה בפעם האחרונה?
א) 2, 1969.
ב) 12, 1972
ג) 30, 1984.
ד) 76, 2004.

21) אלו מהמדינות הבאות שלחו משימת מחקר (לא מאויישת) אשר הגיעה לפני הירח?
א) ארצות הברית.
ב) ברית המועצות / רוסיה.
ג) בריטניה.
ד) צרפת.
ה) סין.
ו) ישראל.
ז) יפן.
ח) גרמניה.
ט) קוריאה הדרומית.
י) **הודו.**

נספח 4- הסבר על המטלה הקבוצתית המלווה את יחידת הלימוד

מטלה קבוצתית- הערכה חלופית בנושא "הירח בהיסטוריה האנושית"

אופן הכנת המטלה: רצוי זוגות, ניתן עד קבוצות של ארבעה תלמידים. העבודה תהיה בעיקרה בזמנם החופשי של התלמידים, במקביל לשאר השיעורים ביחידת ההוראה, תוך ליווי של המורה- לא רק בסיומו של התהליך, אלא במספר נקודות ביניים שהוא יקבע.

מטרת המטלה: התלמידים יכירו את הגלגולים השונים של התאוריות בהן החזיקו בני האדם בנוגע לירח במהלך ההיסטוריה, או את השלבים השונים בחקר הירח, וידעו לענות על שאלות בסיסיות בנוגע לשלבים אלו.

מטרות משנה: התלמידים יתנסו בלמידה פעילה תוך איתור וקריאת טקסטים רבי מלל

התלמידים ילמדו את חבריהם את החומר שלמדו בעצמם במהלך הרצאות שיעבירו,

תוך תרגול .

עמידה מול קהל.

המטלה:

- כל קבוצה תבחר/ תקבל מהמורה נושא מתוך רשימת הנושאים/ תקופות הבאה:
  - הירח במיתולוגיות העתיקות.
  - הירח על פי האסטרונומיה של אריסטו וממשיכי דרכו.
  - תגליותיו של גלילאו גליליי לגבי הירח וההשלכות שלהן לגבי תורת אריסטו והמהפיכה הקופרניקאית.
  - תוכנית אפולו- אל הירח וחזרה.
  - חקר הירח באמצעות גשושיות ומקפות בעידן שלאחר תוכנית אפולו.
  - הירח בתרבות המודרנית- (אופציונאלי.)
  - העתיד של הירח- מה התוכניות העתידיות שנרקמות בסוכנויות החלל האמריקאית, האירופאית והאחרות בנוגע לירח. האם האדם עומד לחזור לירח?
- על כל קבוצה לחקור את הנושא שקיבלה- לאסוף מקורות מידע מלפחות שלושה סוגים שונים, לסכם אותם ולכתוב עבודה קצרה בהיקף של שלושה עמודים, מסמך המכיל את החלקים הבאים:
  - רקע היסטורי על התקופה בה הקבוצה עוסקת.
  - רקע מדעי- מה הייתה התפיסה לפני השינוי שחולל מושא המחקר.
  - הסבר ברמה מדעית המתאימה למומחה בתחום על התרומה שחוללה אותה האישיות או התפיסה ששונתה באותה התקופה.
  - השפעתה של אותה התקופה על התרבות האנושית. אילו הדים יש בימינו לתפיסה ששרתה באותה התקופה בנוגע לירח.
  - סיכום אישי- מה למדנו מהעבודה, מה הפתיע אותנו ומה לדעתנו חשוב ללמוד מכך.
- בשלב האחרון כל קבוצה תכין מצגת המבוססת על העבודה שכתבה. היא תעביר את המצגת לשאר חברי הכיתה, במטרה ללמד אותם על אותה התקופה שהם חקרו. (בסגנון ג'יקסו) כל קבוצה תשלח למורה 3 שאלות על המצגת שהכינו. בסיום היחידה יעביר המורה בוחן המכיל את שאלות הקבוצות השונות, והציון באותו הבוחן יצטרף למכלול ההערכה על היחידה.

מקורות מידע מומלצים העומדים לרשות התלמידים:

- ☒ ויקיפדיה בעברית ובאנגלית (יש להסביר לתלמידים שבהחלט ניתן להיעזר בויקיפדיה, אך חשוב לעמוד על היתרונות והחסרונות של אתר זה ובייחוד להסביר ששימוש ב"העתק הדבק" הוא פסול ולא מקצועי).
- ☒ האתר פרחי מדע, בו ניתן למצוא היקף גדול ומגוון של מידע בנושאים אסטרונומיים. האתר אמין מבחינה מדעית. https://www.aastro.net.
- ☒ סדרת ההרצאות המומלצת של פרופ' צבי מזא"ה, באוניברסיטת תל-אביב, בקישור הבא:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLNiWLB_wsOg6iwszTKSiYUOugoFdXUd3B

- ☒ אתר נאס״א https://www.nasa.gov
- ☒ אתר המוזיאון הלאומי האמריקאי לתעופה וחלל https://airandspace.si.edu/explore-and-learn/topics/apollo/apollo-program

סדנת איזור הדמדומים:

מטרה:

התלמידים ידעו לתאר הבדלים בין תופעת הזריחה והשקיעה בגופים שמיימיים שונים, תוך הפנמה חוויתית של התופעות.

בשפה חופשית – המטרה היא להוות פיגום מחשבתי לתלמידים, על מנת לסייע להם בהמשך להבין את השימוש בקו הדמדומים על פני הירח כחלק מהשיטות למדידת ממדי המכתש, על ידי הפעלת הדמיון בצורה חוויתית ועל ידי הצורך להפעיל את המחשבה.

מהלך הסדנה:

1) פתיחה:

א) נחלק את תלמידי הכיתה לזוגות, כל תלמיד יחלוק עם שותפו חוויה מעברו בה הוא ראה זריחה או שקיעה אשר בולטת בזיכרונו.

ב) יש לעודד את התלמידים לציין כמה שיותר פרטים, תחושות, גורמים בולטים במראה של הזריחה או השקיעה המתוארת. בכיתות בהם קיימת בשלות ניתן להמליץ על עצימת עיניים במטרה להגביר את התחושה והריכוז בסיפור, היות וזו משימה של דמיון מודרך.

ג) המורה יעבור בין התלמידים במהלך פעילות זו במטרה לשמוע רשמים מהתלמידים תוך כדי הפעילות.

2) הגדרה – זריחה ושקיעה:

א) במליאה הכיתתית נשאל את התלמידים כיצד הם היו מגדירים את רגע הזריחה או רגע השקיעה, מהו האירוע או מהי התצפית על פיה נגדיר את הרגע הזה. ניתן גם לדון בהבדל בין הזריחה המושפעת מטופוגרפיה לעומת זו שאיננה מושפעת ממנה.

3) מאפייני הזריחה והשקיעה בכדור הארץ:

א) נצפה בסרטון הבא אשר צולם על ידינו באחד המצפים בים המלח. כל זוג יצטרך, תוך הפעלת חשיבה ודמיון וחיפוש מידע מקוון במקרה הצורך לענות על מספר שאלות מנחות ומעוררות דיון:

(1) מה גורם למחזה של זריחת השמש כפי שמופיע בסרטון? האם הגורם לתופעה הוא השמש עצמה או כדור הארץ?

(2) הריצו את הסרטון לרגע שבו מתחילה השמש לזרוח ועיצרו בנקודה זו.
דמיינו ותארו איך היה נראה סרטון שהיה מתחיל לצלם, בדיוק באותו הרגע, צלם שנמצא בנקודה דרומית יותר? צפונית? בנקודה הממוקמת בדיוק מערבה משם? מזרחה? נמוכה יותר? גבוהה יותר? הסבירו.

(3) מה משותף לכל הנקודות שבהן הזריחה מתחילה באותו הזמן על פני כדור הארץ? איך הייתם מכנים את אוסף הנקודות הללו.

(4) בסרטון ניתן לראות שעוד לפני שמתחילה הזריחה, כפי שהגדרנו, השמיים החלו להיות מוארים. בהנחה שקרני השמש נעות בקו ישר, כיצד זה ייתכן?

(5) אילו שמות אתם מכירים (ניתן לחפש ברשת) בעברית ובשפות אחרות לאותו פרק הזמן- בו השמיים מוארים מבלי שרואים את גלגל השמש בשמיים: כשמדובר בזריחה? בשקיעה?

(6) מדוע השמיים צבעוניים כל כך בזמן השקיעה והזריחה? (ובכלל מדוע הם כחולים בשאר הזמן) אם אתם יודעים את התשובה, כתבו אותה בקצרה, אם לא- מוזמנים להיעזר בסרטון הזה או במקור מידע אחר.

4) זריחה ושקיעה בעולמות אחרים:

א) נציג בפני התלמידים את הטבלה המרכזת הבאה, ונמלא יחד איתם את המידע הקשור לכדור הארץ.

משך הזמן של הזריחה במיקום מסויים (סדר גודל- דקות/שעות/ימים)	
משך יממה שמשית- פרק הזמן בין זריחה לזריחה.	
משך הסיבוב העצמי- פרק הזמן בו משלים הגרם השמיימי הקפה אחת סביב עצמו.	
כמה יממות יש בשנה (הזמן שלוקח לגוף להשלים הקפה סביב השמש) או בפרק הזמן שלוקח לגוף להשלים הקפה סביב כדור הארץ.	
דמדומים- כן / לא	
צבע השמיים לפני הזריחה צבע השמיים במהלך הזריחה צבע השמיים אחרי הזריחה צבע השמש	
הגודל הזוויתי של השמש	
מספר הזריחות והשקיעות במהלך יממה	
מאפיינים נוספים:	

ב) נשאל את התלמידים האם הם חושבים כי התופעה של זריחה ושקיעה ססגונית כמו שלנו היא תופעה ייחודית לכדור הארץ? כיצד הם מניחים כי זה יראה במקום אחר שאינו בכדור הארץ?

ג) נחזור לעבודה בזוגות הקודמים, כל זוג יקבל את אחד מגרמי השמיים הבאים, יאסוף מידע דרך האינטרנט וימלאו עמודה מתאימה בטבלה שיתופית (נא ליצור עותק של הטבלה), מצורף גם קישור לטבלה מלאה, למורה, עם התשובות הנכונות- טבלה למורה.

(1) הירח.
(2) תחנת החלל הבין לאומית.
(3) מאדים.
(4) חמה.
(5) נוגה.
(6) צדק.
(7) אוראנוס.
(8) כוכב הלכת קפלר 34 בי (Kepler 34b)
(9) כוכב הלכת[18] OGLE-2013-BLG-0341LBb (Sci News, 2020)

ד) כעת ניתן לתלמידים משימה יצירתית, אותה הם יכולים לבחור לעשות בזוגות עבודה או כיחידים על הגרם השמיימי אותו הם קיבלו:

[18] מומלץ להשתמש בכוכב לכד ייחודי זה (סלעי במערכת בינארית) בתור מקרה בוחן מסכם לבדיקת ההבנה של הכיתה, או בתור אתגר מחשבתי למתקדמים. שימו לב שישנו הבדל בין שני כוכבי הלכת החוץ שמשיים- בעוד כוכב הלכת קפלר מקיף במסלולו את שתי השמשות שלו יחד, כוכב הלכת OGLE מקיף רק את אחת השמשות, מה שמוסיף לסיבוכיות ומצית את הדמיון.

יצאתם לבילוי עם חברים בגרם השמיימי אליו הגעתם בתור נציגי המין האנושי. כתבו מכתב לחברים/ הורים / מהדורת חדשות שעל פני כדור הארץ ובו תארו את החוויה שחוויתם- יש לתבל בכמה שיותר פרטים, כמובן להקפיד על דיוק עובדתי בנקודות הפיסיקליות. במה שאינו נוגע לעובדות פיסיקליות- מוזמנים להוסיף פרטים כיד הדמיון...

אפשרות נוספת לבחירה: צילום סרטון ובו דיווח מפורט של כתב מהשטח למהדורת החדשות בכדור הארץ על הזריחה שהוא חווה בגרם השמיימי.

ה) בסיום הפעילות יעשה איסוף בפורום כיתתי. כל צוות יספר לשאר הצוותים על מאפיין אחד (או שניים) ייחודי ומפתיע של השקיעה והזריחה בגרם השמיימי אותו חקרו.

נספח 6 – תדריך ניסוי יצירת מכתשים.

תדריך מעבדה – ניסוי יצירת מכתשים
דף הנחיות לעבודה במעבדה

ציוד נדרש

1) ארגז פלסטיק עם שכבת חול לח[19] אחידה בעומק של כ-10 ס״מ.
2) מנורה מחוברת למעמד המאפשר קיבוע זווית (כמו מנורת שולחן).
3) קולימטור העשוי מחומר שחור (בריסטול מגולגל לדוגמה) מחובר למנורה.
4) סרגל.
5) מספר מסות בצורת כדור, בקטרים שונים, בכלי בעל דפנות.
6) מרסס ידני עם מים (לא חייב להיות כזה לכל קבוצה)
7) חומר **אבקתי דק ובעלת צבע לבן/בהיר (אבקת סוכר או קונפלור מתאימות).**

מטרת הניסוי

1) מציאת קשר אמפירי בין קוטר המכתש לעומקו.
2) התנסות **בשיטת מדידה ישירה לעומת עקיפה.**

הנחיות זהירות מעבדה

1) יש להקפיד כי המסות אשר לא בשימוש נמצאות בכלי אחסון, על מנת ולא יהיה סיכון של נפילה של המסה על הרגלים.
2) לא להזיז את הכלי המכיל את החול בשל סיכון של נפילה שלו על הרגלים.
3) אסור לשתות או לאכול במעבדה.
4) בהתאם לסוג המנורה בה נעשה שימוש בניסוי יש לשים לב לסיכון של התחממות יתר **של הנורה.**

מהלך הניסוי

ניסוי 1: מדידה ישירה של הקשר עומק כתלות בקוטר

- ודאו כי פני השטח של החול ישרים / משוטחים יחסית, ולחים מעט (ניתן להשתמש במרסס הידני לכך).
- כעת נפיל את המסות על החול באופן הבא:
  - נפיל את המסה שבחרנו, גובה הנפילה אינו משמעותי במיוחד.
  - נסיר את המסה מהחול בזהירות, ונחזירה לקופסה.
  - נמדוד בזהירות את קוטרו של המכתש ועומקו על ידי הסרגל.
  - נמלא את הפרטים בטבלה למטה במחברת.
- נחזור על המדידה לפחות עוד 10 פעמים, כאשר ניתן נשנה את גובה השחרור או המסה אשר בחרנו להשתמש באופן חופשי בין מדידה למדידה.

קוטר המסה	קוטר המכתש	עומק המכתש
יחידות	יחידות	יחידות

[19] אם החול יבש מידי ניתן לקחת מרסס ידני, ולרסס עמו מעט את פני השטח של החול בתחילת הניסוי.

שימו לב – אם קוטר המכתש שווה לקוטר המסה אל תתעדו את המדידה הזו חזרו מחדש על המדידה מגובה קטן יותר.

- רשמו במחברת תשובות מנומקות לשאלות הבאות (התשובות צריכות להיות גם בדו"ח הסופי של הניסוי):
  - מהי הסיבה לדעתם כי חשוב כי החול יהיה לח?
  - האם היו מדידות מסויימות אשר היו קשות יותר למדידה?
  - מה המסקנות שלכם מחלק ראשון זה של הניסוי?

ניסוי 2: שימוש בשיטת הצל

- הציבו בסמוך לכלי עם החול הלח את המנורה וקבעו אותה.
- התקינו את הקולימטור על המנורה ומדדו את הזווית בה האור מאיר את המשטח.
- נרסס מעט את פני השטח של החול בשכבה דקה מאוד של רסס מים.
- נפזר בעדינות מהחומר האבקתי שכבה דקה על פני החול.
- נשתמש במצלמה של הטלפון הנייד לצלם תמונה ישירות מלמעלה של ארגז החול כך שהוא יתפוס חלק גדול ככל האפשר מהתמונה.

עיבוד הנתונים

ניסוי 1:

- נעביר את נתונים אשר מדדנו לגיליון אלקטרוני כמו excel או google sheets.
- ניצור גרף פיזור בו הציר האופקי הוא קוטר המכתש, והציר האנכי הוא עומק המכתש.
- נעביר שני קווי מגמה: האחד ליניארי והשני חוק חזקה.
  - איזה משני קווי המגמה נראה יותר מתאים לדעתכם כעת?
  - האם התשובה שלכם השתנתה לאחר השיעור בנושא היווצרות מכתשים? למה?

ניסוי 2:

- פתחו את התמונה שצילמתם בתוכנה ImageJ שהורדנו בשיעור הקודם (קוד QR מצורף). ניתן לנתח את התמונה גם עם תוכנה או אתר דומים.
- השתמשו בכלים אלו במטרה לספור בפיקסלים את המידע הבא: קוטר המכתש ואורך הצל
- הזינו ישירות לגיליון אלקטרוני כמו בניתוח של ניסוי 1.
- הוסיפו עמודה של קוטר המכתש כפי שמדדתם בניסוי 1.
- ניצור גרף כמו בניסוי הראשון מחדש.

ניתוח תוצאות והסקת מסקנות

- השוו את משוואות הישר אשר קיבלתם בניסוי 1 לעומת ניסוי 2, האם הן זהות? נמקו
- איזו משתי השיטות לדעתכם מספקת תוצאה יותר מדויקת, למה?
- אילו מסקנות נוספות אתם מפתחים בעקבות הניסוי?

סיכום

- כתבו כעת את התרשמותכם הכללית מהניסוי וכיצד הוא קשור לכל הנושא הנלמד.