



העשרה

# מדידת רדיוס של גרעין כוכב שביט

בועז רון-זוהר, אולפנת צביה מעלות ומרכז פרויקטים אחר"ת<sup>1</sup>

## מבוא

אחד מהנושאים שנבחרו השנה למחקר במסגרת קבוצת האסטרונומיה במרכז הפרויקטים אחר"ת<sup>2</sup> היה מדידת הרדיוס של גרעין כוכב שביט. תלמיד אחד מ"ביה"ס מקיף השלום דנון" בחר במחקר זה כעבודת-גמר בהיקף של חמש יחידות בפיזיקה וזוג תלמידים מ"תיכון מנור-כברי" בחרו בו כפרויקט בהיקף של שתי יחידות בפיזיקה. התלמידים צילמו גרעינים של כוכבי שביט בעזרת הטלסקופים של פולקס (The Faulkes Telescopes Project), וממדידת שטף אור השמש המוחזר מהם העריכו את רדיוסיהם. התוצאות היו מפתיעות וגדולות בפקטור עשר מהמקובל, כנראה בגלל הילה שהתפתחה סביב גרעיני השביטים למרות שהיו במרחק גדול מאוד מהשמש. במאמר זה אתאר מהם כוכבי שביט, כיצד התלמידים בחרו שביטים למחקרם, כיצד תכננו וערכו את התצפיות עליהם וכיצד קיבלו את התוצאות. כמו כן אתאר את האתגרים שעמדו בפניהם ובפני כמנחה.

## רקע תאורטי

### א | מבנה כוכב שביט

שם השביט באנגלית Comet נגזר מהמילה היוונית kometes שפירושה שיער ארוך, בשל הדמיון של השביט ושל זנבו לראש בעל רעמת שיער ארוכה (תמונה 1). לכוכבי שביט יוחסו בעבר תכונות מיסטיות שונות, בעיקר כמבשרי אסונות בשל הופעתם המרשימה והלא צפויה על רקע שמים קבועים ומוכרים.

כוכב השביט מורכב מגרעין קטן העשוי חבו מקרח מים ומגרגרי חומר מוצק. כאשר הוא מתקרב לשמש, קרח זה ממריא ליצירת ראש גזי שיכול להגיע לקוטר של אלפי קילומטרים. כמו כן נוצר זנב מרשים היכול להגיע לאורך של עשרות מיליוני קילומטרים. בשל פגיעת רוח השמש<sup>3</sup>, שמקורה בחלקיקי פלזמה טעונים הנפלטים מהשמש, בראש השביט. למעשה, לשביט מתפתחים שני זנבות: זנב יוני-גזי וזנב אבק (תמונה 1). הזנב הגזי מיונן בשל אינטראקציה בראש השביט עם רוח השמש.

קיימות עדויות להתרסקויות של כוכבי שביט על פני כדור הארץ, ביניהן התרסקות מפורסמת



תמונה 1: זנב יוני-גזי וזנב האבק של השביט האל-בופ (Hale-Bopp).

מתוך אתר נאס"א: <http://apod.nasa.gov/apod/ap050522.html>

1 | מרכז קבוצת האסטרונומיה במרכז אחר"ת.

2 | ראו "תהודה" כרך 28, גיליון 1-2, <http://stwww.weizmann.ac.il/ptc/Tehuda/28-1-2/53-62.pdf>.

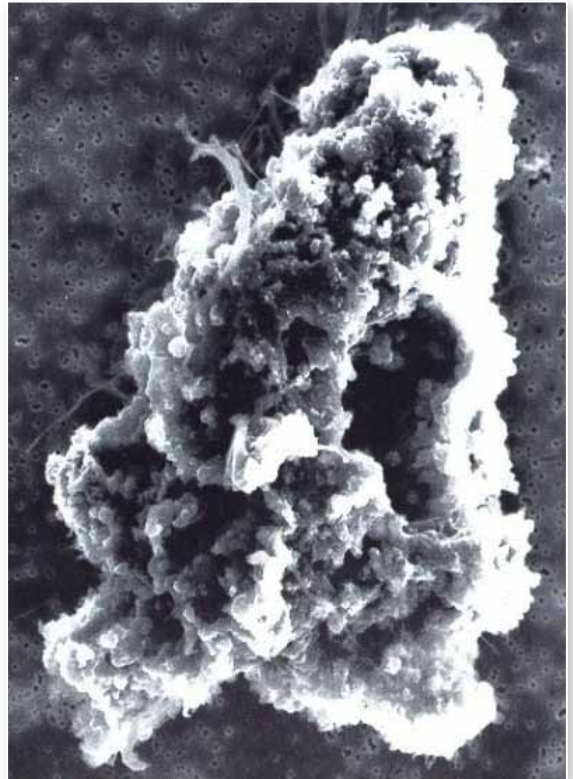
3 | רוח השמש היא זרם של חלקיקים טעונים מהירים הנפלט מהעטרה של השמש לכל הכיוונים.

בשנת 1908 בטונגסקה אשר בסיביר בשנת 1994 נצפתה התפרקות והתרכקות של כוכב השביט 9 Schumacher-Levy על פני כוכב הלכת צדק שהשאירה עליו רישום ניכר לזמן מה (מידב, ברוש ונצר, 2000; Abell, Morrison and Wolff, 1991).

## ב | הרכב כוכב שביט

כוכב שביט מהווה שריד קדום לחומר שמקווח בתווך הבין-כוכבי שממנו נוצרה מערכת השמש. כתשעים ותשעה אחוז מן החומר בתווך הבין-כוכבי הוא גז. כתשעים אחוז מגד זה הוא מימן בצורה של אטומים ניטרליים (H), יוני מימן (H<sup>+</sup>) ומולקולות מימן (H<sub>2</sub>). כתשעה אחוזים מגד זה הם הליום, והשאר יסודות אחרים. עקב כוחות כבידה הדדיים נאסף חומר זה ליצירת השמש וכוכבי הלכת הגזיים.

עם זאת חומרים מורכבים יותר קיימים ונוצרים בכל מערכת השמש, ובאחוזים גדולים גם בכוכבי הלכת הארציים. בכוכבי הלכת, וודאי בשמש, עברו חומרים אלו שינויים רבים כתוצאה מריאקציות כימיות מורכבות עקב התנאים השוררים בהם. בכוכבי שביט ובאסטרואידים, שהם גופים קטנים הרבה יותר (מסדר גודל של קילומטרים בודדים), התנאים יציבים יותר, ולכן החומר המורכב בהם עבר הרבה פחות שינויים. בנוסף לכך המסלולים של רוב כוכבי שביט הם אליפטיים מאוד, בעלי אקסצנטריות<sup>4</sup> גדולה יחסית. האקסצנטריות של מסלולי שביטים יכולה להיות קרובה מאוד לאחד. שביטים כאלו יבלו את רוב זמנם במרחקים גדולים מאוד מהשמש. מרחקים אלו יכולים להגיע אף לאלפי יחידות אסטרונומיות.<sup>5</sup> הצירוף של מסלולים המרחקים מהשמש ושל גודלם הקטן של השביטים מאפשר לחומר המורכב שממנו עשויים שביטים להישאר ללא שינויים גדולים מדי. בעיקר חומר זה הוא תערובת של קרח מים עם חומר גרגרי העשוי מסיליקטים (חומר סלעי הבנוי בעיקר מתרכובות צורן) שונים וחומרים נוספים. עם זאת השביטים מכילים גם קרח של חומרים נדיפים יותר ממים כגון פחמן חד-חמצני או דו-חמצני, מתאן, אמוניה ועוד סוגי פחמימנים. החומרים המורכבים יותר הקיימים בשביט נוצר בעקב הבינוכבי שממנו נוצרה מערכת השמש כתוצאה מריאקציות פני שטח על גרגרי חומר העטופים בקרח המים (תמונה 2). את כוכב השביט ניתן לתאר, אם כן, כגוש קרח מלוכלך בקוטר של כמה קילומטרים, המקיף את השמש במסלול אליפטי בעל אקסצנטריות גבוהה יחסית. האלבדו<sup>6</sup> של שביטים קטן מאוד ומסדר גודל של אחוזים בודדים בשל אבק הסיליקטים אשר על פניהם (לאופר, 2007; Prialnik, 2004; Abell, Morrison and Wolff, 1991).



**תמונה 2:** חומר גרגרי מאבק שביט. הקוטר קטן מעשירית המילימטר. מתוך אתר נאס"א <http://history.nasa.gov/EP-177/ch2-4.html>

## ג | מיון שביטים

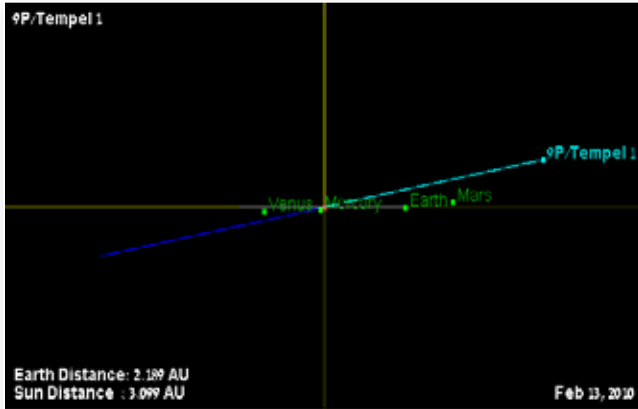
נהוג למיין את השביטים לפי זמן המחזור של מסלוליהם: שביטים קצרי מחזור, בעלי מחזור בינוני וארוכי מחזור. לשביטים קצרי

4 | האקסצנטריות של אליפסה מוגדרת כך:  $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$  כאשר  $b$  ו- $a$  הם בהתאמה, הציר הראשי והציר המשני של האליפסה

5 | מחצית אורך הציר הראשי של אליפסת המסלול של כדור הארץ סביב השמש (כ- 150 מיליון קילומטר)

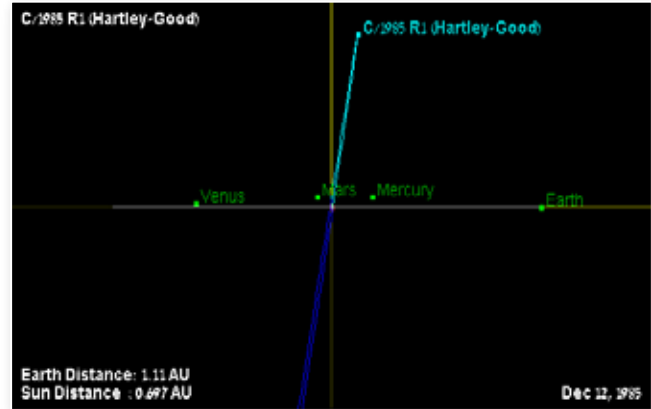
6 | היחס בין עוצמת האור הפוגעת בעצם לבין עוצמת האור המוחזרת ממנו

המחזור זמן מחזור של שנים בודדות, אקסצנטריות בין אפס לחצי, וזווית נטייה  $i$  של מסלולם יחסית למישור מערכת השמש (מישור המילקה) הקטנה מ-30 מעלות. עם השבטים קצרי המחזור נמנה, למשל, השביט Encke שזמן המחזור שלו הוא כ-3 שנים - זמן המחזור הקצר ביותר מבין השבטים. עם השבטים שזמן המחזור שלהם בינוני, זמן מחזור של כמה עשרות שנים, נמנה השביט האלי המפורסם: השביט הראשון שהתגלה כמחזורי 1705 על ידי אדמונד האלי! לשבטים ארוכי מחזור זמן מחזור של אלפי עד מיליוני שנים, אקסצנטריות קרובה לאחד וזווית נטייה אקראית (Prialnik, 2004).



**תרשים 2:** זווית הנטייה של מסלול שביט קצר מחזור

מתוך אתר נאס"א: <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=hartley-good;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb>

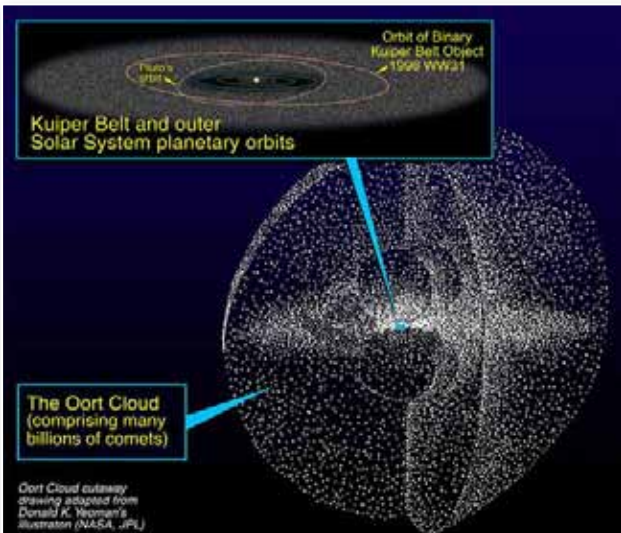


**תרשים 1:** זווית הנטייה של מסלול שביט ארוך מחזור

מתוך אתר נאס"א: <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?ID=C00009;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb>

## ד | חגורת קויפר ועננת אורט

כבר בתחילת שנות החמישים של המאה העשרים פורסמו כמה עבודות חשובות מאוד הנוגעות לשבטים: על סמך ניתוח מתמטי של מסלולי 18 כוכבי שביט, הגיע יאן אורט למסקנה שיש שבטים המגיעים ממרחקים גדולים מאוד של אלפי עד עשרות אלפי יחידות אסטרונומיות. מכאן הסיק אורט על קיומו של ענן כדורי העוטף את מערכת השמש, הרבה מעבר למסלולו של פלוטו. הענן קרוי מאז על שמו: ענן אורט. ענן זה הוא אזור המשתרע עד מרחק של כעשרת אלפים יחידות אסטרונומיות וכולל מספר רב של שבטים (תרשים 3). השבטים מקיפים את השמש במסלולים בעלי אקסצנטריות קרובה לאחד, האפהליון<sup>7</sup> שלהם, כאמור לעיל, נמצא במרחקים מסדר גודל של עשרת אלפים יחידות אסטרונומיות, והם מבלים את רוב זמנם הרחק מהשמש במהירויות אטיות מאוד של כמטרים בודדים לשנייה. במקביל הסיק ג'רלד קויפר שחייבים להיות שבטים שמקורם ממש מעבר למסלולו של פלוטו, הנעים במישורים הקרובים למישור מערכת השמש. ואמנם, בשנות



**תרשים 3:** חגורת קויפר ועננת אורט

מתוך אתר נאס"א: <http://herschel.jpl.nasa.gov/solarSystem.shtml>

7 | הנקודה הרחוקה ביותר מהשמש במסלול אליפטי של גרם שמיים כלשהו המקיף את השמש

התשעים של המאה העשרים התגלו בתצפית הודות לטלסקופ החלל האבל גופים ראשונים באזור הנקרא מאז חגורת קויפר (תרשים 3). פרד יופל הסיק מהאלבדו הקטן במיוחד של השביטים שהם עשויים קרח מלולכך (Dirty snow ball), ולודווינג בירמן הסביר איך רוח השמש יוצרת את זנב השביט וגורמת לו לפנות תמיד מהשמש החוצה (Prialnik, 2004).

## ה | אבק השביט

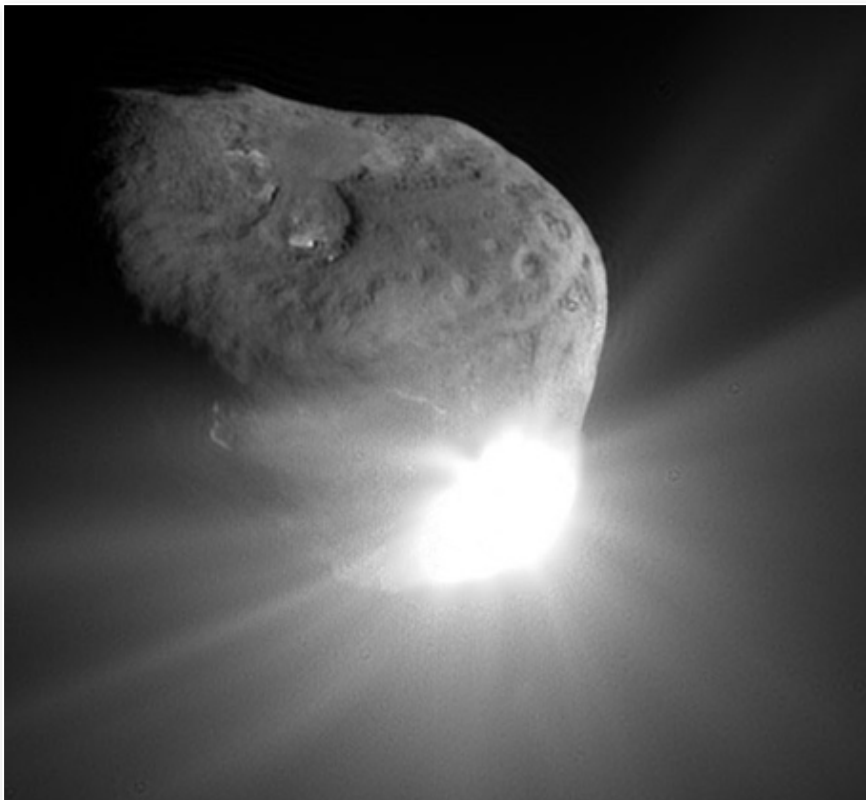
בכל מעבר בקרבת השמש שביט מאבד ממסת הקרח והאבק שלו, כך שזמן חייו קצוב מראש. לאחר מספר מסוים של מעברים יש שהשביטים נעלמים לחלוטין, ונשאר מהם רק האבק הנע במסלולים אליפטיים סביב לשמש. אבק זה יוצר מטר מטאורים מרהיב כאשר הוא מתרסק ובוער באטמוספירת כדור הארץ, אם וכאשר הוא חוצה את מסלולו. קיימת השערה שמספר ניכר של אסטרואידים היו בעברם שביטים עד אשר כל קרח המים שהיה בהם המריא (הפך ממוצק לגז) ונעלם (Prialnik, 2004).

## המחקר של התלמידים

### א | קשיים בצילום ובמדידת רדיוס של גרעין שביט

כאשר מצלמים מכדור הארץ כוכב שביט ללא ההילה שלו, אמורים לקבל בתצלום דמות נקודתית בשל גודלו הזוויתי הקטן. אולם בשל שבירת אור אקראית באטמוספירת כדור-הארץ מתקבל בתצלום כתם אור מעגלי שעוצמתו הכי גדולה במרכז, והיא הולכת ופוחתת כלפי חוץ לפי פונקציה הנקראת Point Spread Function

(Berry & Burnell, 2006). משום כך לא ניתן למדוד ישירות את רדיוסו של השביט מקוטר כתם אור זה. על מנת למדוד קוטר של שביט ישירות מצילום, צריך להתקרב אליו פיזית עד כה צלמו מקרב חמישה גרעיני שביטים בלבד באמצעות חלליות מחקר: Wild 2, Hartley 2, Tempel 1, Borrelly ו-Halley. נמצא שקוטריהם נעו בין 1.5-15 ק"מ לערך (תמונה 3).



תמונה 3: גרעין השביט Tempel 1 צולם על ידי החללית Deep-Impact, 2005 מתוך אתר נאס"א: <http://discovery.nasa.gov/ImageImpact/impact.cfm>

על מנת לחשב את רדיוס השביט מתצלום המתבצע מכדור הארץ, צריך למדוד בתצלום את שטף האור המגיע מהשביט לכדור הארץ, ומשטף זה לחשב את שטף אור השמש המוחזר מהשביט. שטף האור המוחזר מהשביט תלוי בשטף אור השמש המגיע אל השביט, באלבדו של שביט (אחוז החזרת האור מפני השטח שלו) וברדיוס השביט. כשיודעים את שטף האור המוחזר מהשביט ואת שטף אור השמש הפוגע בשביט, ניתן

להגיע בחישוב לרדיוס השביט (Prialnik, 2004). בתחילה חשבתי להנחות את התלמידים למדוד, בנוסף לרדיוס השביט, גם את האלבדו שלו לפי היחס בין שטף הקרינה הנראית המוחזרת ממנו לשטף הקרינה התרמית המוחזרת ממנו; אולם במהלך ההנחיה הבנתי שעל מנת למדוד את שטף הקרינה התרמית המצויה בתחום האינפרא-אדום הרחוק, זקוקים לטלסקופ המותאם במיוחד לצילום בתחום זה, וטלסקופ כזה לא עמד לרשותנו.

לשביט יש תנועה יחסית לכדור הארץ, כך שהוא נראה בתצלומים השונים כזז על רקע מכבים מרחקים הנראים קבועים במקומם (proper motion). לא ניתן להתעלם מתנועה יחסית זו, והיא מסדר גודל של חלקי שניות עד שניות קשת לדקה. משום כך, על מנת לצלם שביט יש לייצר טבלת קואורדינטות שמימיות שלו המתאימה לכל דקה של זמן התצפית, ובנוסף יש להתחשב בתנועה היחסית שלו בחישוב זמני החשיפה, על מנת שלא תתקבל תמונה "מרוחח".

## א | מהלך המחקר

התלמידים הונחו לצלם שביט הנמצא במרחק מתאים מהשמש, כך שבעת הצילום הוא יהיה ללא הילה כלל וניתן יהיה למדוד את השטף המגיע מהגרעין. לפי מודל תרמודינמי עבור קרח-מים, מרחק כזה צריך להיות גדול משלוש יחידות אסטרונומיות (Prialnik, 2004). משום כך הונחו התלמידים לחפש שביטים הנמצאים במרחק גדול ככל האפשר מהשמש ובתנאי שהגודל הנראה שלהם (מגניטוד)<sup>8</sup> אינו גדול מ-19. כך תתקבל בצילום עוצמת אור מספקת ויחס טוב בין אות לרעש. התלמידים חיפשו ומצאו מספר שביטים העונים לקריטריונים אלו ומתוכם בחרו את השביטים הניתנים לצילום בחודשי המחקר. לשם כך הם השתמשו באתרים של נאס"א, בעיקר באתר חיפוש של JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>).

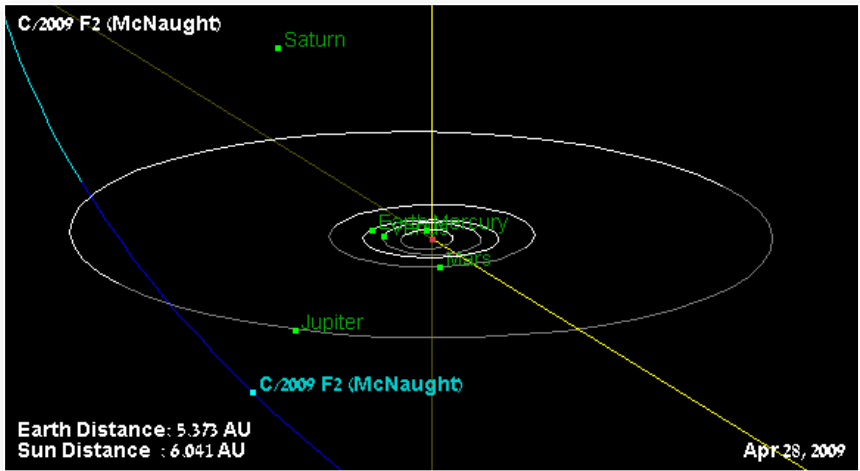
לאחר קבלת הרשימה הם בדקו את דיאגרמת המסלול של כל שביט (תרשים 4). יצרו טבלת קואורדינטות (Ephemeris) עבור כל שביט ובדקו בתוכנה "סטלריום" (Stellarium) - תוכנה המדמה את השמים בכל שעה ומכל מקום בעולם - אם ניתן לצלם אותו מהוואי או מאוסטרליה בעזרת אחד מהטלסקופים של פרויקט הטלסקופים של פולקס (The Faulkes Telescopes Project) בסופו של תהליך זה הם בחרו שביט מתאים לתצפית ולמחקר. בשלב הבא הם בחרו זמן תצפית מתאים שבו יהיה השביט גבה ככל שניתן בשמים, לא בקרבת הירח או כוכב לכת (אם אפשר, רצוי שהירח יהיה במולדו בזמן התצפית). בכלל רצוי שתנאי התצפית יהיו אופטימליים ככל שניתן: לחות נמוכה, שמיים בהירים וללא עננים. הנחיתי אותם לבחור זמן חשיפה ארוך יחסית של 90 שניות כדי לקבל יחס טוב של אות לרעש ולצלם שלוש תמונות מוזזות. על ידי חיבור תמונות חציוני<sup>9</sup> של שלוש תמונות מוזזות, ניתן לנקות הפרעות בתמונה כתוצאה מפגמים ב-CCD (ראו נספח מאמרו של אמיר בן שלום, תהודה 1-30). קרניים קוסמיות, הילות רפאים וכדומה. התלמידים עמדו יפה במשימה וצילמו תמונות מוצלחות בארבעה מסנני-אור שונים: B, V, R, I. יתרה מזו: במועד התצפית של זוג התלמידים חליתי ולא יכולתי להגיע לתצפית.

### חיבור תמונות

חיבור - פיקסל אל פיקסל - בין תמונות של אותו אובייקט שצולמו בנפרד, מגדיל את היחס בין האות לרעש משום שעוצמת האות קבועה, ואילו הרעש הוא אקראי! כך למשל, חיבור של שתי תמונות יכפיל את עוצמת האות, אבל עוצמת הרעש תגדל רק פי שורש 2. המדד לרעש הוא סטיית התקן של האות המגיע מהרקע של העצם המצולם. לפיכך, אפשר גם להוריד את עוצמת הרעש על ידי מיצוע או חישוב החציון של רעש הרקע.

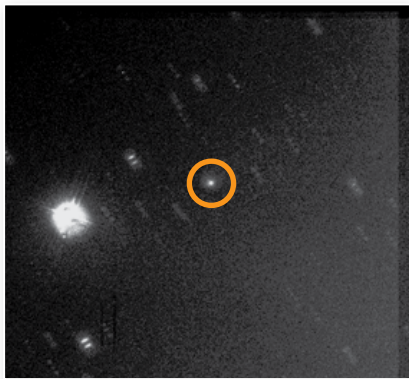
8 | באסטרונומיה נהוג למדוד בהירות של עצמים שמימיים באמצעות יחידה הקרויה דרגת בהירות או מגניטוד. המגניטוד נמדד בסקלה לוגריתמית הפוכה, כך שככל שהעצם בהיר יותר, כך המגניטוד שלו קטן יותר. בהירותם של הכוכבים החיוורים ביותר בשמים שניתן להבחין בהם בעין בלתי מצוידת היא כ- +6 ושל השמש - 26.7. סולם הבהירות תלוי באורך הגל שבו צופים.

9 | חיבור תמונות חציוני: חיבור בין שלוש תמונות או יותר שערך החציון חושב וניתן לכל פיקסל במקום מסוים בכולן (לדוגמה: חציון של ערכי הפיקסל הראשון בשורה העליונה בכל התמונות). בחיבור מסוג זה כאשר יש פגם מקומי או הפרעה זמנית בפיקסל מסוים - הוא יימחק רק בתמונה אחת. כך ניתן לנקות מהתמונה מעבר אקראי של מטאוריט בשמים בעת הצילום, פגם בפיקסל מסוים של ה-CCD וכדומה.

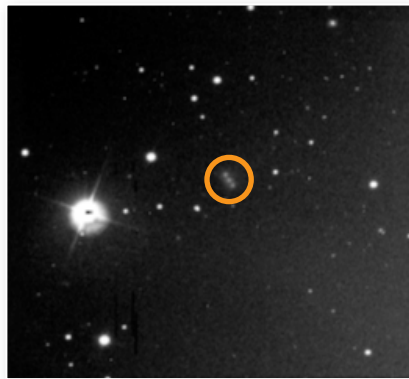


**תרשים 4:** מיקום השביט C/2009 F2 McNaught בעת הצילום מתוך אתר נאס"א  
[http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?ID=c00009\\_0:orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?ID=c00009_0:orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb)

לאחר התייעצות צוות המרכז גייס לעזרה את התלמיד שכבר ערך תצפית על שביט ואת התלמידה שערכה תצפית על צביר כוכבים (שניהם מבית ספר אחר). הם הגיעו על תקן מנחים ועזרו לזוג התלמידים לערוך את התצפית. התגייסות חברית ואחראית זו ריגשה ושמחה את כל צוות המנחים. התנסות זו תרמה הן לתלמידים "המנחים" והן לתלמידים שביצעו את התצפית. הם היו צריכים לנהל את התצפית, לקבל החלטות בזמן אמת ולהסתמך על ניסיונם ללא עזרת מנחה. לאחר הצילום הם איתרו את השביט בתצלומים, ביצעו הפחתת



**תצלום 1:** C/2009 F2 McNaught



**תצלום 2:** חיבור ממוצע של שלוש תמונות עוקבות



**תצלום 3:** חיבור ממוצע של שלוש תמונות עוקבות כאשר הפעם השביט ממורכז (כלומר, מיקומו קבוע בכל התמונות)

רקע שמים<sup>10</sup> מהתמונות, חיברו אותן בחיבור תמונות חציוני וקיבלו תמונה נקייה ומוכנה למדידות (תצלום 1). הם גם חיברו את התמונות בחיבור תמונות ממוצע<sup>11</sup> לקבלת תמונה מוכפלת של השביט כך שהתנועה היחסית שלו בשמים הומחשה יפה על רקע כוכבים שמיקומם קבוע בשמים (תצלום 2). לסיום הם יצרו תמונה נוספת בחיבור תמונות ממוצע שבה השביט ממורכז, וכל שאר הכוכבים בתמונה נראים מוכפלים להמחשה נוספת של מיקום השביט בתמונה (תצלום 3).

לאחר קבלת התמונה הנקייה ביצעו התלמידים מדידות שטף בשיטת החריה. בשיטה זו התוכנה מקיפה את הכוכב בעיגול ומסביב טבעת. העוצמה הממוצעת בטבעת מופחתת מהעוצמה הנמדדת בעיגול, כך שאור המפוזר מסביבת השמים הקרובה לכוכב מופחת מאור המגיע מהכוכב (Berry&Burnell, 2006). לאחר קבלת העוצמה כילו אותה התלמידים בעזרת עוצמת אור המגיעה מכוכב סטנדרטי<sup>12</sup> שגם אותו צילמו לאחר צילום השביט. בסיום תהליך זה היה בידיהם המגניטוד של כוכב השביט. בשל מעבר

10 | הפחתת רקע שמיים: הורדת עוצמת האור בתמונה שמקורו בפיזור אור מהאטמוספירה, אור משמים לא מכוכבים.  
 11 | חיבור תמונות ממוצע: חיבור בין תמונות שערך הממוצע חושב וניתן לכל פיקסל במקום מסוים בכל (לדוגמה: ממוצע של ערכי הפיקסל הראשון בשורה העליונה בכל התמונות). בחיבור מסוג זה ניתן לראות תזוזה של גרם שמים מתמונה לתמונה.  
 12 | כוכב סטנדרטי: כוכב שעוצמת האור המגיעה ממנו לכדור הארץ נמצאה קבועה, ושהמגניטוד שלו חושב על בסיס מדידות מרובות.

אור דרך שכבת אוויר באטמוספירה, תוצאה זו אינה מדויקת. לכן בעזרת חישוב מתאים הם ביצעו תיקון בשל הכחדת אור באטמוספירה בעזרת נתון של מסת אוויר<sup>13</sup>. מסת האוויר בעת הצילום נתונה בקובץ הצילום. בידיעת המגניטוד המדויק הם חישוב את השטף המגיע לכדור הארץ מהשביט בעזרת שטף של כוכב אפס (כוכב שהמגניטוד שלו הוא אפס). חישוב זה התבצע בעזרת אתר שנתוני השטף בו הם של כוכב אפס. לאחר שביצעו את כל החישובים המבוססים על המדידות, הם הציבו את התוצאות עבור כל פילטר בנוסחה וחישוב את הרדיוס. הנוסחה תלויה, כאמור, בשטף השמש בכל פילטר, במרחק השביט מהשמש ומכדור הארץ ובאלבדו של השביט.

## תוצאות

למרבה ההפתעה, תוצאת הרדיוס שהתקבלה עבור שני שביטים שונים הייתה גדולה בפקטור 10 מהצפוי ומהמקובל: כ-75 ק"מ עבור C\2009 F2 McNaught ו-135 ק"מ עבור C\2006 S3 Loneos. התלמידים חזרו על כל החישובים מספר פעמים, ביצעו הערכת שגיאה נדיבה מאוד, אך עדיין התוצאות היו פי 10 לערך מהמקובל לפי כל מסנני-האור. התלמידים הציעו מספר הסברים לסטייה זו: ייתכן שהאלבדו המשוער שהציבו בביטוי לחישוב הרדיוס גדול בהרבה מהמקובל; ייתכן שהשביט עבר התפרצות כתוצאה מחום פנימי שנוצר כאשר קרח אמורפי הופך לקרח קובי, ייתכן שיש גרעיני שביטים גדולים בהרבה מהמקובל. תוצאה זו תסכלה מאוד את התלמידים שהשקיעו עבודה מרובה מאוד בתכנון התצפית, בעיבוד התמונות והנתונים ובחישובים רבים ומסובכים בעזרת גיליון אלקטרוני. לשם כך פיתחו נוסחאות והשתמשו בנתונים רבים ובאתרי אינטרנט שונים. עם זאת הם למדו להשלים עם תוצאות "מהעולם האמיתי" ולסמוך על עצמם, על חישוביהם ועל הערכות השגיאה שלהם. במיוחד הרשימה אותם ואת המנחים העובדה שהם קיבלו ערכי רדיוס דומים במסנני-האור השונים.

## דין ומסקנות

בדיעבד - לאחר שהתלמידים סיימו והגישו את עבודותיהם ולאחר התייעצות עם אסטרונומים מקצועיים העובדים בפרויקט הטלסקופים של פולקס - המסקנה הסבירה ביותר היא שלמרות שהשביטים היו מרוחקים מהשמש במרחק העולה בהרבה על שלוש יחידות אסטרונומיות, היו להם הילות כתוצאה מנידוף חומרים הנדיפים יותר ממים. קשה מאוד להימנע ממצב זה מראש, ואין שום טבלה או בסיס נתונים קיים המראים מתי ובאיזה מרחק מהשמש ניתן למצוא שביט מסוים ללא הילה. מהתכתבות עם אסטרונומים מנוסים ומומחים בצילום שביטים התברר שאף אחד מהם לא היה מוכן להתחייב ולתת שם של שביט שבמועד מסוים יהיה ללא הילה. העצה היחידה שקיבלתי הייתה לצלם אותם כאשר הם באפיהליון של מסלולם ולקוות שיהיו ללא הילה. במהלך ההנחיה הייתי צריך ללמוד הן ידע מקצועי-מעשי חדש והן ידע פדגוגי חדש. בין הנושאים שהייתי צריך להתמודד עמם לראשונה היו: כיצד להפיק לוחות קואורדינטות אמינים עבור שביטים, כיצד לחשב שטף בעזרת שטף של כוכב אפס, כיצד לבצע תיקונים בשל הכחדת אור אטמוספירית, כיצד לכייל תוצאות מדידה בעזרת כוכב סטנדרטי מתאים ובהתחשבות בזמני חשיפה שונים ובמסת אוויר שונה. כך למשל, לנוכח החישובים, נאלצתי לראשונה לחשוב ולהתחשב בכך שלשמש יש הארה שונה במסנני-האור השונים.

התלמידים היו צריכים להתמודד עם ידע חדש, עם פיתוח נוסחאות מתאימות, עם כוילים מורכבים מרובים, עם תיקונים ועם הערכות שגיאה לא פשוטות, זאת לצד השימוש בגיליון אלקטרוני ובתוכנות לא מוכרות. הם חשבו שביצעו מדידות מסוג אחד יתן להם תוצאה מיד לאחר הצבה בנוסחה. העובדה שנדרשו לבצע כמה וכמה כוילים, תיקונים, חישובים ועיבוד נתונים ממקורות

---

13 | מסת אוויר: עובי שכבת האטמוספירה בין הצופה לעצם הנצפה. עובי זה משתנה בהתאם למיקום העצם בשמים בזמן התצפית. כאשר העצם הנצפה נמצא בדיוק מעל ראש הצופה (בזניט) - מסת האוויר מקבלת את הערך 1. ככל שמסת האוויר גדולה יותר, הדרך האופטית של האור באטמוספירה גדולה יותר, וכמות גדולה יותר של אור נבלעת או מתפזרת (נכחדת) באטמוספירה.

שונים עד שהגיעו לבסוף לתוצאה סופית - הייתה מתסכלת מאוד עבורם. משום כך ליוותה אותם התחושה "שהעבודה אינה נגמרת". לא פעם במהלך ההנחיה ראו אותי התלמידים מתלבט, טועה ומתקן את עצמי, בשאיפה מתמדת להגיע לתוצאות מדויקות ככל שניתן בגבולות שגיאות המדידה. הודות לכל זאת הם למדו רבות מביצוע המחקר ורכשו בגרות מדעית לא מבוטלת. ההנחיה הייתה לא פשוטה אך מספקת ומתגמלת מאוד ותרמה רבות הן לידע המקצועי שלי והן לידע הפדגוגי שלי.

## תודות

ברצוני להודות לפרופסור דינה פריאלניק ולד"ר דיאנה לאופר מאוניברסיטת תל-אביב על כל הידע הרב והמרתק שרכשתי מהן בנושא השביטים, לד"ר נח ברוש ולפרופסור מאיר מידב על הידע התאורטי, המעשי והפדגוגי הרב והמרתק בנושא האסטרונומיה. עם זאת כל הטעויות במאמר זה -אם יש - הן שלי בלבד. לד"ר עמוס כהן מ"אורנים" שהציל אותי מטעויות מביכות במהלך המחקר. לד"ר עובד דהרי על המשוב ועל התמיכה המקצועית. למר אבי חן שסיפק תמיכה מורלית לי ולתלמידים בכל מהלך המחקר. לכל המנחים של מרכז הפרויקטים אחר"ת ובראשם - למנהל המרכז, מר משה רייך, על המשובים והעידוד.

בנוסף ברצוני להודות על עזרתם למר ניק האוז (Nick Howes), למר ארנסטו גוידו ולמר ג'ובני סוסטרו (Ernesto Guido and Giovanni Sostero) מהאגודה האיטלקית לאסטרונומיה (Associazione Friulana di Astronomia e Meteorologia) ולד"ר ריצ'רד מילס (Richard Miles) מהאגודה הבריטית לאסטרונומיה (British Astronomical Association). לד"ר פול רושה (Paul Roche), מנהל פרויקט הטלסקופים של פולקס (Faulkes Telescope Project) ולכל צוות הפרויקט שבזכות תמיכתם ובזכות השימוש בטלסקופים התאפשר פרויקט זה.

## ביבליוגרפיה

מידב, מ., ברוש, נ., נצה, ח. (2000). היקום - יסודות האסטרופיזיקה. האוניברסיטה הפתוחה, תל אביב.  
לאופר, דיאנה (2007). רשימות הקורס: קוסמוכימיה וראשית החיים. החוג לגאופיזיקה ומדעים פלנטריים, הפקולטה למדעים מדויקים, אוניברסיטת תל אביב, תל אביב.

Abell, G. O., Morrison, D., Wolff, S. C. (1991). Exploration of the Universe. Saunders College Publishing, Sixth Edition, Philadelphia.

Berry, R., Burnell, J. (2006). The handbook of astronomical image processing. Willmann-Bell, second edition, Richmond.

Prialnik, D. (2004). Physics of comets lecture notes for graduate course. Department of Geophysics and Planetary Sciences. Raymond and Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences Tel Aviv University, Tel Aviv.



## פרויקט הטלסקופים של פולקס The Faulkes Telescopes Project

ותוכנות ייעודיות לניתוח נתוני תצפיות שניתן להוריד מהאתר. באתר קיימות הצעות מפורטות לפרויקטים באסטרונומיה על בסיס נתוני תצפיות קודמות או על סמך תצפיות שיבוצעו על ידי התלמידים. משתמשים רשומים יוכלו להזמין ולבצע תצפיות דרך כניסה מיוחדת באתר. לאחר ביצוע התצפיות, ניתן להוריד מהאתר את התמונות שהתקבלו כקובצי מידע.

בשנת 2005 מצפה לאס קמברס (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) קיבל לידיו שליטה על פרויקט פולקס וקנה את שני הטלסקופים של פולקס במטרה להקים רשת טלסקופים עולמית משלו (<http://lco.net/en/> network). בכונת הארגון להוסיף לשני הטלסקופים הקיימים עשרים וארבעה טלסקופים אופטיים רובטיים שקוטר המראה הראשית שלהם 0.4 מטר ועשרים טלסקופים אופטיים רובטיים שקוטר המראה הראשית שלהם 1 מטר. ביוני 2009 הוצבו בשכנות לטלסקופ בהוואי שני טלסקופים ראשונים בקוטר 0.4 מטר, והם בשימוש מאוגוסט 2009. מטרת הארגון לאפשר לכל בית ספר בעולם לערוך תצפיות בחינם בעזרת רשת הטלסקופים שתוקם.

בשנת 2009 קיבל הכותב הרשאה להשתמש בטלסקופים של פולקס עם תלמידי תיכון בארץ וערך מחקר בנושא: מחקר אסטרונומי מרחוק באמצעות טלסקופים רובטיים גדולים המתבצע על ידי תלמידי תיכון.

ראו תהודה, כרך 29, חוברת 1: <http://stwww.weizmann.ac.il/ptc/Tehuda/29-1/20-28.pdf>

פרויקט הטלסקופים של פולקס שהושק במרץ 2004, שם לו למטרה להקים רשת עולמית של טלסקופים שיועמדו לרשות אנשי חינוך ותלמידים. כחלק מהפרויקט הוקמו שני טלסקופים אופטיים רובטיים גדולים בעלי מראה ראשית בקוטר שני מטר. הטלסקופים ממוקמים בשני אתרי תצפית מהמדרגה הראשונה בעולם שבהם זיהום האור מההקרע הוא מזער, והאוויר בהם יבש, נקי וצלול. האחד מוקם בהוואי על פסגת הר בגובה 3055 מטר מעל פני הים, והשני מוקם באוסטרליה בגובה 1149 מטר מעל פני הים. טלסקופים אלו הועמדו לרשותה של כל מערכת החינוך הבריטית. כל בית ספר בבריטניה יכול להזמין ולבצע תצפיות באמצעות טלסקופים אלו. זו הייתה הפעם הראשונה שתלמידי בית ספר יכלו לערוך תצפיות בטלסקופים גדולים מסדר גודל כזה. שני הטלסקופים הוקמו בכונה תחילה במיקומים אשר יאפשרו לתלמידים באנגליה לבצע תצפית בזמן אמת, בזמן הלימודים. זאת הודות לכך שכאשר באנגליה יום - בהוואי ובאוסטרליה לילה. יתרונות נוספים במיקום הטלסקופים הם: אפשרות תצפיות שמים - גם בחצי הכדור הצפוני וגם בחצי הכדור הדרומי, שהרי בכל עת באחד מהמיקומים יהיה קיץ ולכן צפויים פחות הפרעות כתוצאה ממוזג אוויר סוער.

במסגרת פרויקט פולקס הוקם אתר אינטרנט עשיר תכנים (<http://faulkes-telescope.com>) בנושא אסטרונומיה תאורטית ומעשית. האתר כולל הדרכות, מידע, כלים ממוחשבים