

פרויקט מס' 600:

מערכת שתי מצלמות לצילום

פנורמי וסטראוסקופי

של מטאורים, כוכבים ועצמים נוספים

**המנחה:** ד"ר נח ברוש, מרצה וחוקר בפקולטה למדעים מדויקים

ומנהל מצפה הכוכבים ע"ש וייז

טל- 03-6407414, email: noah@wise.tau.ac.il

**הסטודנטית:** חוה זלכה ת"ז 039300041

פלאפון- 050-7555025, email: havazilk@post.tau.ac.il



תודה מיוחדת למנחה שלי בפרויקט ד"ר נח ברוש,  
כמו כן ברצוני להודות למנהל הטכני של מצפה הכוכבים מר עזרא משאל  
ולבית המלאכה של בית הספר לפיסיקה.

## תוכן עניינים-

|            |                                          |
|------------|------------------------------------------|
| 1.....     | הקדמה                                    |
|            | -רקע תיאורטי כללי-                       |
| 2-4.....   | מטרת הפרויקט                             |
| 5.....     | פרויקט CONCAM                            |
| 6.....     | CONCAM ישראל                             |
| 7-9.....   | פרויקט דומה קודם-CONCAM הוואי            |
|            | -הרכיבים העיקריים במערכת (הסבר תיאורטי)- |
| 10-15..... | גלאי ה- CCD                              |
| 16-18..... | עדשת עין הדג                             |
|            | -אפיון ה-CCD-                            |
| 19-22..... | הקדמה על אפיון ה-CCD                     |
| 23-25..... | הגדרות                                   |
| 26.....    | המערכת שנבנתה לצורך אפיון ה-CCD          |
| 27-29..... | שלבי פעולה                               |
| 29-40..... | עיבוד נתונים ותוצאות                     |
| 31-32..... | • רעש קריאה                              |
| 32-35..... | • עקום הענות                             |
| 36-37..... | • ליניאריות כתלות בזמן                   |
| 38-39..... | • זרם חושך                               |
| 39-40..... | • ליניאריות כתלות בעוצמת הארה            |
|            | -הנדסת מערכת-                            |
| 41-43..... | מאפיינים חשובים של הרכיבים בהם נשתמש     |
| 41.....    | • גלאי CCD                               |
| 42.....    | • עדשת עין הדג                           |
| 43-44..... | תכנון המארוז                             |
| 45.....    | סיכום ומסקנות                            |
| 46-47..... | ביבליוגרפיה                              |
|            | <b>נספחים</b>                            |
| 49-50..... | מה הוא מטואריד, מטאור ומטאוריט           |
|            | דפי נתונים.....                          |

### תקציר-

בפרויקט זה לקחתי חלק בבניית מערכת CONCAM 4 - מערכת שתי מצלמות Whole-Sky מבוססות CCD, לצילום פנורמי וסטראוסקופי של מטאורים בנוסף לתמונת שמיים רגילה. המערכת עתידה לשמש את מצפה וויז, מצפה הכוכבים של אוניברסיטת ת"א במצפה רמון.

### הקדמה-

מתוך תמונה רגילה של מטאור, ניתן להסיק מידע מועט יחסית. המטאור, בשל מהירותו הגבוהה יחסית לזמן החשיפה, מופיע בתמונה כקו מרוח, וכמעט שלא ניתן לדעת מהי מהירות תנועתו, מסלולו, מיקומו במרחב, השפעת האטמוספירה אליו וכו'. על מנת לאפשר קבלת מידע נוסף, יש לשכלל את מערכת הצילום הרגילה.

בתמונה מימין, צילום "רגיל" של מטאור. בשל מהירותו הגבוהה הוא התקבל כקו מרוח.

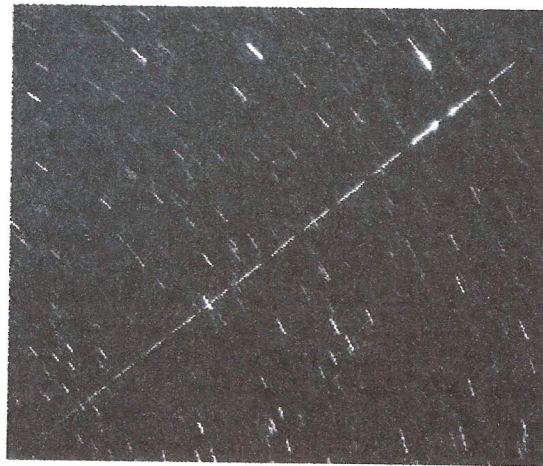


### פרלקסיה-

בעזרת השימוש בשתי מצלמות הממוקמות רחוק מספיק זו מזו ומצלמות במקביל את אותם האובייקטים, מתאפשרת אנליזה בתלת מימד של האובייקטים המצולמים. בעזרת שיטת הפרלקסיה - הצלבת המידע משתי תמונות של אותו מטאור (או אובייקט נע אחר) שצולמו מכיוונים שונים מתאפשר גילוי מיקומו במרחב, גילוי מיקום תחילת בעירתו באטמוספירה, וסוף הבעירה, גילוי האורך האבסולוטי של מסלול המטאור בשמים, ולעיתים אף אינדיקציה לגבי המיקום בו שארית המטאור (מטאוריט) נחתו על פני כדה"א הארץ. ניתוח אנליזה זו בהמשך.



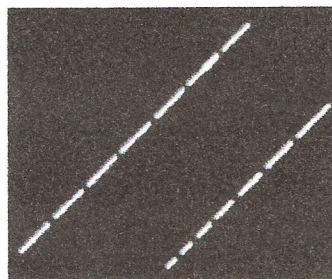
מערכת קיצוץ אופטית היא מערכת המאפשרת ומונעת לסירוגין מעבר אור אל המצלמה. אם משתמשים במערכת קיצוץ אור הפועלת במהירות גבוהה מספיק, המטאור במקום להתקבל כקו מרוח, יתקבל כקו מקווקו, כל מקטע מכיל את המידע מהמטאור באותו אינטרוואל זמן בו הצמצם לא מכוסה. לקוצץ אור אין השפעה על האובייקטים הקבועים בתמונה (מלבד זמן חשיפה מצטבר קטן יותר), ולכן ניתן לקבל תמונת שמים רגילה (של כוכבים ועצמים נוספים) + תמונה מקווקות של מטאורים. כך למשל בתמונה הבאה (יש לשים לב שהמצלמה בה התמונה צולמה היא סטטית ביחס לכדה"א, ועם חשיפה ארוכה ובשל תנועת הכוכבים ביחס למצלמה הם התקבלו מרוחים)-



- ע"י ניתוח התמונה שנלקחה ממערכת עם קוצץ אור, ניתן יהיה לדעת מה גודל מהירות הזוויתית המטאור ומה הכיוון של המהירות בכל אחד מהמקטעים, ולהסיק מה היא תאוצת המטאור בשל הלחץ מהאטמוספירה (למעשה תאוצה), ומהי השפעת הגרביטציה של כדה"א על המטאור. כך למשל אחת מהמסקנות המדעיות שהתקבלו בעקבות ניתוח צילומים שצולמו ע"י מצלמות עם קוצצי אור, היא שכ- 90% מהמטאורידים הם בעלי מסלול תנועה "שביטי", קרי מאורך ומכיוונים אקראיים, ו- 10% בלבד בעלי מסלול תנועה, אשר בדומה לאסטרואיד, במסלול תנועה קבוע (או כמעט קבוע) במערכת השמש (ראה מקור [5] ביבליוגרפיה) מסקנה חשובה זו (הרומזת לגבי מקור המטאורידים וטבעם), כמו מסקנות חשובות נוספות יתאפשרו רק בעקבות מערכות עם קוצצי אור.

ממידע זה ניתן להסיק הערכה לאנרגיה הקינטית/ אנרגית התנועה של המטאוריד עבור מטאורידים קטנים (אזי ניתן להניח כי בקרוב כל האנרגיה הופכת לחום ולאור ומכך לחשב את האנרגיה ההתחלתית), האנרגיה הזו קשורה במסה ובמהירות של המטאוריד לפני הכניסה לאטמוספירה של כדה"א, ומכך ניתן לחשב את המסה של מטאוריד קטן לפני פגיעתו בכדה"א. אחת המסקנות מניתוח התוצאות שהתקבלו מכך, היא כי מרבית המטאורים החיוורים (אלו שניתן לצפות בהם רק בשעות הלילה) הם בגודל של כגריר חול עד גודל של כחצי ס"מ.

- ע"י בחינה מדוקדקת של האטה של המטאוריד כתוצאה מלחץ האטמוספירה בה הוא חוצה- בחינה של השינויים באורכי המקטעים, לעיתים ניתן להעריך את גודל המטאוריד. כך למשל באיור הבא-



עבור המטאור בחלק השמאלי של התמונה אורכי המקטעים בקירוב קבועים, מכך ניתן להקיש כי האובייקט "ריחף" לו בתוך האטמוספירה עם השפעה מועטה על המהירות שלו, ולכן הוא קטן יחסית ודחוס, ולכן השפעת התנגדות האוויר אליו קטנה ביחס לתנע ולמסה שלו. לעומת זאת, עבור המטאור מימין, אורך המקטעים הולך וקטן, ולכן ניתן להסיק כי הצפיפות שלו קטנה יותר, והתנגדות האוויר יותר משמעותית עבורו. ראוי לציין כי אפשרות זו איננה הסבר האפשרי היחיד למתקבל, ויתכנו גם הסברים נוספים (שלא ניתן לאשר/לשלול מבלי מידע נוסף).



## פרויקט -CONCAM

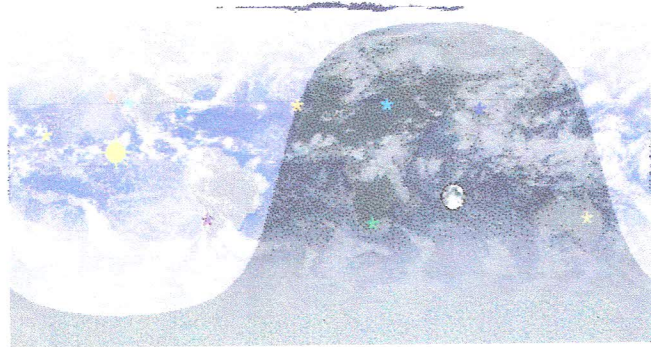
מטרתן העיקרית של המצלמות היא לקחת חלק בפרויקט הבין-לאומי CONCAM.

פרויקט CONTinuous CAMera, מאפשר גישה חופשית, דרך האינטרנט (אתר

<http://nightskylive.net>), לתמונות שמיים עדכניות ממקומות שונים בעולם (נכון לעכשיו סה"כ 11

מקומות, אם כי בחלק מהאתרים תקלות מונעות הפעלה סדירה).

התמונה מימין, היא מפת העולם, המוצגת בדף הבית של אתר פרויקט CONCAM, התמונה מתעדכנת באופן רציף ע"פ מצב השמים באותו זמן. הכוכביות בתמונה, מסמנות מקומות בעולם בהם ממוקמות מצלמות CONCAM (ישראל- כוכבית תכלת), בלחיצה על כוכבית בתמונה, מקבלים תמונת שמים עדכנית, מאותו אזור.



הפרויקט הנ"ל הוא יוזמה של אוניברסיטת MTU (Michigan Technological University), משיגן,

ארה"ב. במסגרת הפרויקט מוצגים באופן תמידי (וכמעט מידי), תמונות מאזורים שונים בעולם בהם באותה העת לילה. בנוסף לכך, יש באתר הפרויקט ארכיון המסודר לפי אזורים וזמנים (הזמן הרשום הוא "זמן אוניברסאלי" Greenwich Mean Time), המכיל את התמונות שצולמו בחודשיים האחרונים ועד הלילה הנוכחי (עם נתונים נוספים כגון מיקום הירח והפאזה שלו, ע"מ שיהיה קל יותר למצוא את התמונות שפחות מושפעות מהירח).

התמונות הנלקחות מהמקומות השונים, הן תמונות שמים מלאות- זווית צילום של  $180^\circ$  (מאופק לאופק ע"י שימוש בעדשת עין דג, ראה הסבר בהמשך), התמונות מכל אזור, הן בחשיפה של 180 שניות, ונלקחות כל 3 דקות ו-56 שניות במשך כל הלילה, כל לילה (למעט לילות חריגים), והן באיכות המאפשרת שימוש לצרכים מדעיים (מציאת בהירות של כוכבים, ניתוח השפעות אטמוספריות וכו'), פרטים נוספים על שימוש לצורכי מחקר מדעי-

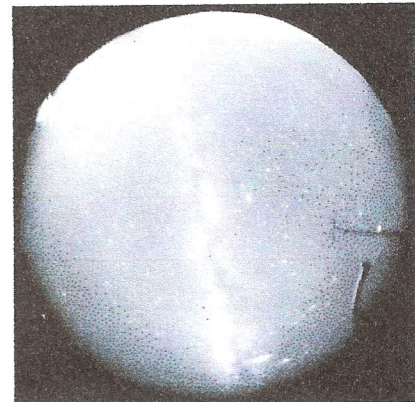
[http://nightskylive.net/NightSkyLive\\_for\\_scientists.html](http://nightskylive.net/NightSkyLive_for_scientists.html).

## CONCAM ישראל-

על גג מצפה הכוכבים וויז (Wise Observatory) של אוניברסיטת ת"א, הממוקם במצפה רמון, ישנה מערכת המכילה גלאי CCD ועדשת עין דג (על רכיבים אלו בהמשך), אשר באופן אוטומטי מצלמים תמונות שמייים בחשיפות של 180 שניות. התמונות הנ"ל מועברות באופן ישיר לשרת של אוניברסיטת MTU, ומוצגות באתר פרויקט ה CONCAM. כמו כן התמונות מאוכסנות גם בשרת של האוניברסיטה, באתר <http://wise-concam.tau.ac.il/concam/archive/images.html>. שני המאגרים הנ"ל פתוחים לקהל הרחב, וזמינים חינם לכל דורש.

הפרויקט החל לפועל במצפה רמון ב-27 ליוני, 2001, ופועל מאז ועד היום, בכל לילה.

בתמונה מימין, התמונה הראשונה שצולמה ע"י מצלמת ה CONCAM הראשונה בישראל (27 ליוני, 2001).  
בתמונה רואים את שביל החלב, את וגה (כוכב במערכת הנבל), את מאדים וכן עצמים נוספים.



המצלמה בפרויקט CONCAM במצפה רמון, הוחלפה ושוכללה מספר פעמים, וכאמור לעיל בפרויקט גמר זה אקח חלק בבניית הגרסה הרבעית, CONCAM 4.



### פרויקט דומה קודם

אחד מהחידושים במערכת 4 CONCAM היא שהצילום הוא משני אזורים שונים ולכן מאפשר קבלת גובה ואורך מסלול המטאור ע"י שימוש בעיקרון הפרלקסיה. השיטה הנ"ל כבר נוסתה במקומות שונים בעולם, בין היתר במסגרת פרויקט CONCAM.

### פרויקט CONCAM בהוואי:

2 מצלמות, במרחק 128.1 ק"מ זו מזו, האחת ממוקמת בהר הגעש הכבוי מאונה-קאה (Mauna Kea) שבהוואי, והשנייה ממוקמת בהר האלאקאלה (Haleakala), באי אחר גם כן בהוואי. המרחק בין שני אתרים אלו הוא מספיק קטן על מנת לקלוט את אותם מטאורים, אולם מספיק גדול על מנת לאפשר שימוש בשיטת הפרלקסיה.

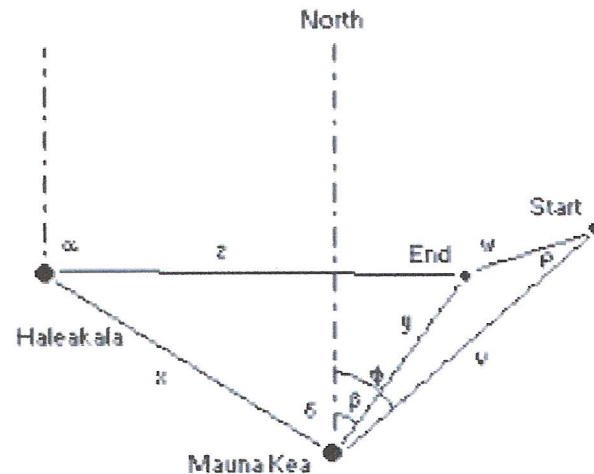


(בתמונות מצפה מאונה-קאה ומצפה האלאקאלה בהתאמה).

בחלק זה אסביר את הניתוח של תמונות מטאורים מזוג מקומות אלו, ניתוח זה יעשה לאחר מיקום המצלמות במצפה רמון. מרבית הנאמר כאן, מתבסס על המאמר Analysis of Meteor Trails Using the Night Sky Live Network of Panoramic CCD cameras, של ליאור שמיר (מקור [3]).

על מנת לנתח את המסלול של מטאור נדרשות קאור' התחלת מסלול המטאור וסופו, קאור' אלו מתקבלות ע"י מציאת הקאור'  $(x,y)$  של תחילת המסלול וסופו, בשתי תמונות שנלקחו במיקומים שונים, והמרת הקאור' הנ"ל לקאור' השמימיות  $(Alt, Az)$  עבור כל תמונה ועבור ראשית המסלול וקצהו. ראוי לציין כי בניתוח הנ"ל אנו מניחים כי התחלת המטאור הנראה היא אותה התחלה עבור שני המקומות. זאת למרות שאתר אחד קרוב יותר למטאור מאשר האתר השני ולכן המטאור נראה משם בהיר יותר מבראשון.

בתרשים מימין (גם הוא ממקור [3]), מפה (ממבט על) של שני המוקדים בהם יש מצלמות CONCAM, ומיקום אפשרי של מסלול מטאור.  $\alpha$  היא זווית האזימות של קצה מסלול המטאור מאלאקאלה,  $\beta$  היא האזימות מקצה מסלול המטאור למאונה קאה,  $x$  הוא המרחק בין 2 העמדות הצילום,  $\delta$  היא זווית האזימות ביניהן.



בהינתן האזימות (זווית האופק) בין שני מיקומי המצלמות (במקרה הספציפי של CONCAM הוואי- $320.35^\circ$ ), וכן המרחק בין שני המיקומים, המרחק האורזינטלי של קצה מסלול המטאור, ממאונה קאה

$$y = \frac{x \cdot \sin(180 - \delta - \alpha)}{\sin(\alpha - \beta)} \quad \text{ניתן לחישוב ע"י הנוסחה הבאה -}$$

$$z = y \cdot \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin(180 - \delta - \alpha)} \quad \text{לפי המרחק האורזינטלי מהאלאקאלה לקצה מסלול המטאור נתון לפי}$$

הגובה של קצה מסלול המטאור ממאונה קאה (נסמן ב- $H_{end}$ ) הוא  $y$  כפול טנגנס הגובה הזוויתי של סוף מסלול המטאור שנמדד בהאלאקאלה.

$$D_{alt} = \sqrt{H_{end}^2 + y^2} \quad \text{המרחק האבסולוטי של קצה מסלול המטאור ממאונה קאה הוא}$$

באותו אופן ניתן לחשב את המרחק האורזינטלי של תחילת מסלול המטאור ממאונה קאה לפי

$$v = \frac{x \cdot \sin(180 - \delta - \gamma)}{\sin(\gamma - \phi)} \quad \text{כאשר } \gamma \text{ היא האזימות בין תחילת המסלול של המטאור להאלאקאלה, ואילו } \phi$$

היא האזימות מתחילת המסלול למאונה קאה.

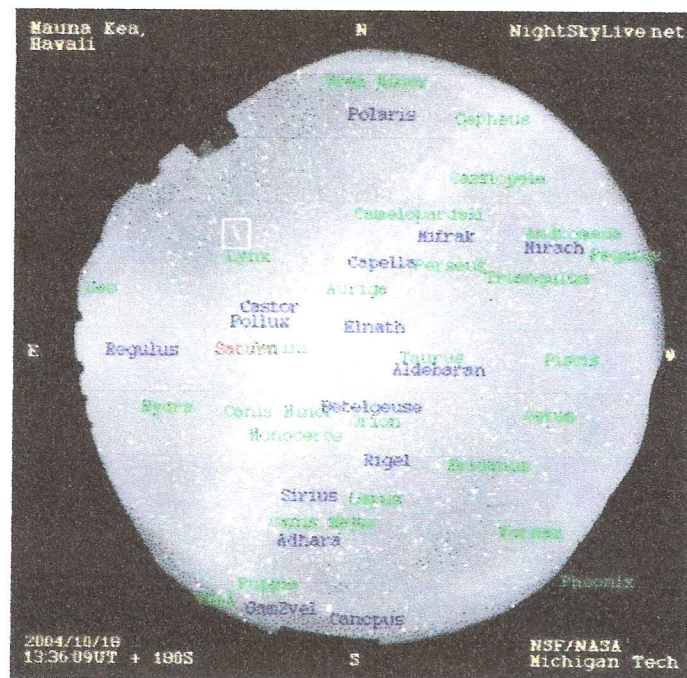
$$e = \frac{\sin(\delta + \phi)}{\sin(180 - \delta - \gamma)} \quad \text{המרחק האורזינטלי מהאלאקאלה לתחילת מסלול המטאור מחושב ע"י}$$

$$w = \sqrt{(\sin(\phi - \beta)y)^2 + (v - \cos(\phi - \beta)y)^2} \quad \text{האורך האורזינטלי של מסלול המטאור הוא}$$



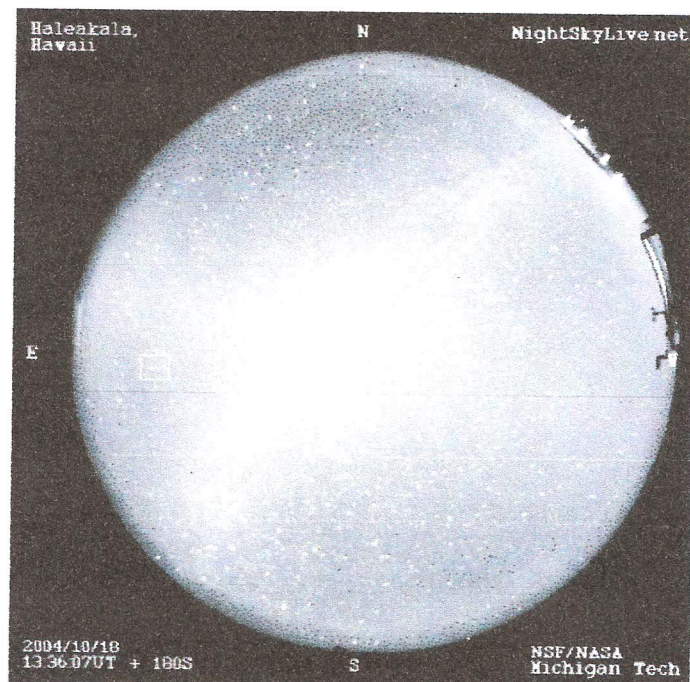
2 תמונות של אותו מטאור משני אתרי צילום אלו:

צילום ממצלמת CONCAM מהמצפה אשר במאונה-קאה



(בריבוע הלבן, צילום של מטאור, הכתוביות על אובייקטים אחרים הן שמות אובייקטים קבועים אלו).

צילום נוסף של אותו לילה ואותה שעה, ממצלמת CONCAM מהמצפה אשר בהאלאקאלה



(בריבוע הלבן, צילום של אותו המטאור שסומן לעיל).

גלאי CCD

כל אחת משתי המערכות תכלול גלאי CCD, אלמנט להבין טוב יותר את הפרק על כיוול הגלאים, נדרש להכיר את המבנה ואת אופן פעילותו של גלאי ה-CCD;

גלאי ה-CCD, Charge Coupled Device, הוא מטריצה של רכיבים פוטואלקטריים הממירים את האור (פוטונים) שנופל אליהם למטען חשמלי, ומאפשרים צבירה של המטען, ולאחר מכן קריאתו באמצעות מעגל חיצוני.

בתמונה מימין:

המחשה של מבנה ה-CCD.

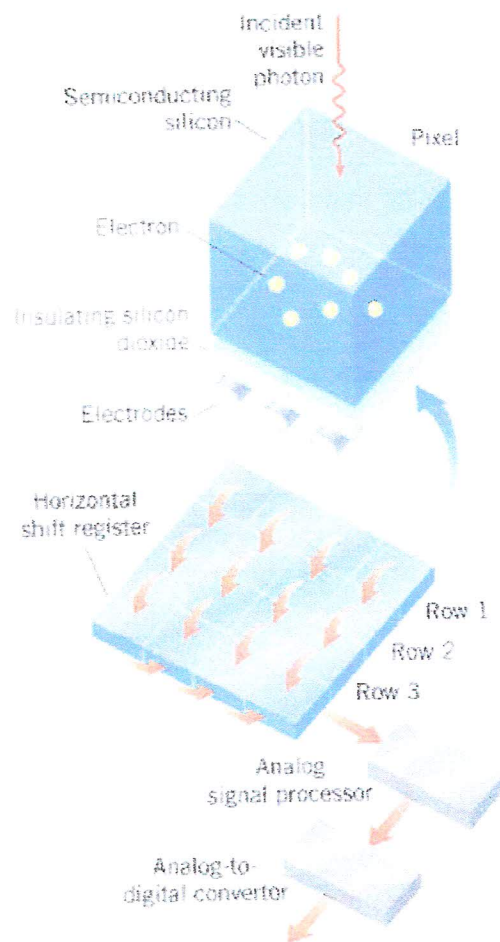
אור פוגע במשטח מ"מ, וגורם ליצירת אלק'.

אותו משטח מ"מ הוא חלק ממערך (מטריצה) של

תאים כדוגמת התא הנ"ל.

המטען החשמלי (האלק') נצברים עד שמתבצעת

קריאה.



רכיב זה הומצא בשנות ה-70 של המאה הקודמת, והוא בתחילה שימש כרכיב זיכרון, לא לקוח זמן רב עד שניצלו את אופי התגובה שלו לאור, והחלו להשתמש בו גם לצורכי הדמיה. טכנולוגיה זו עשתה מהפכה בין היתר גם באסטרונומיה שכן אפשרה יעילות גבוהה יותר בקליטת אור ותמונות בעלות עוצמת מגניטודה

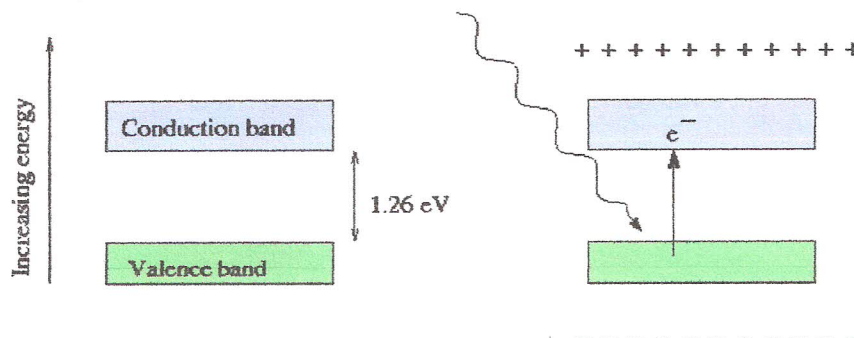


גבוה כמעט בשני סדרי גודל מהטכנולוגיה הקודמת (דבר שאפשר זיהוי של עצמים חיוורים מאוד בחשיפות קצרות יותר ועם פחות הפרעות).

התאים הפוטואלקטריים הם למעשה משטחים קטנים של חומר מוליך למחצה (מ"מ), אשר משנה את המוליכות שלו בעקבות חשיפה לאור, ובכך מאפשר מעבר זרם. המוליכות פרופורציונית (בקירוב, ובתחום פעולת הרכיב בלבד) לעוצמת האור הפוגע. סוג המ"מ ממנו עשויים התאים קובע את תחום תדרי האור אליו רגיש הגלאי, את רגישותו לאור, את העוצמה בה תהיה רוויה וכו'.

התא הפוטואלקטרי, מסתמך על האפקט הפוטואלקטרי; גביש סילקון (או מ"מ אחר) הוא בעל פסי אנרגיה דיסקרטיים, פס האנרגיה הגבוה ביותר המכיל אלק' בטמפ' האפס המוחלט נקרא פס ערכיות, ואילו פס האנרגיה (המותר) מאליו נקרא פס ההולכה. בטמפ' סופית, מרבית האלק' נמצאים בפס הערכיות, והשאר מעוררים לפס ההולכה ע"י אנרגיה תרמית (חימום) או ע"י בליעת פוטונים, האנרגיה הנדרשת על מנת לעשות ערעור זה היא בדיוק רוחב "הפס האסור", עבור סילקון למשל  $1.26\text{ eV}$ .

המחשה באיור הבא-



בהגיעו לפס ההולכה האלק' חופשי לנוע בגביש, בהעדר שדה חשמלי חיצוני האלק' יעבור לאחר זמן קצר רקומבינציה עם חור, חור הוא למעשה מיחסור באלק', כצפוי הוא עם מטען כמו של אלק' אך חיובי, והוא ממלא את רמת ההולכה והרמות מאליה, וכן הוא קיים גם ברמת ערכיות באופן מופחת. כל אלק' אשר עזב את רמת הערכיות השאיר במקומו חור.

במידה ויש שדה חיצוני, כמו במקרה שלנו (גלאי CCD), השדה גורם להרחקה של האלק' מהחורים, ובכך מונע מהם לחבור יחד ולהעלם.

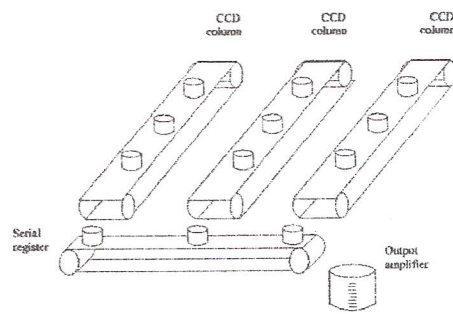
האלק' המעוררים תרמית, מתווספים לסיגנל הרצוי לנו (סיגנל רצוי הוא זה הנובע מבליעת קרינת אור בלבד), ולכן מעווים רעש גלווה הנקרא "זרם חושך", הזרם הנ"ל גדל ככול שהאנרגיה התרמית גדלה, ולכן, כפי שנראה בהמשך (בפרק אפיון CCD), מעדיפים לקרר את גלאי ה-CCD.

איכות הגלאי מושפעת מכמה גורמים-

- רגישות התאים- מה הוא אחוז הפוטונים שכל תא מזהה מכלל הפוטונים שפגעו בו.
- כמות הרעש שנוצר בתאים (התייחסות לכך בהמשך בפרק של כיול CCD) רמת הזליגה מתא אחד לשכניו וכו'.
- רמת האחידות של התאים השונים (באופן אידיאלי הם זהים לחלוטין, אולם בשל אי אחידות בייצור/ התיישנות הרכיב או פגמים בו החיישנים השונים עלולים להפגין מאפיינים שונים לאותו ערעור. תופעה זו איננה קריטית במערכים גדולים במידה וההתפלגות של החיישנים במערך היא אחידה יחסית, וכן כפי שנראה בהמשך יש דרך לגרום לה להיות משמעותית אף פחות בתמונה הסופית.
- מאפייני הרכיבים האלקטרוניים המבצעים את הקריאה (בהם נדון מייד).
- איכות התמונה המתקבלת מהגלאי, תלויה כמובן גם במספר הפיקסלים הכולל (מספר התאים במערך).

אנלוגיה שכיחה לפעולת ה-CCD, היא כדלקמן: מספר דלים (פיקסלים, מספר תאים) מסודרים במטריצה (הממוקמת במישור הפוקלי של העדשה). הדלים מחוברים למספר רצועות הובלה אורכיות המסודרות בטור, שבקצה שלהם רצועה נוספת, מאונכת להן, אליה יש דלים נוספים האוגרים את הפוטונים מהדלים. זאת כפי שניתן לראות באיור הבא:



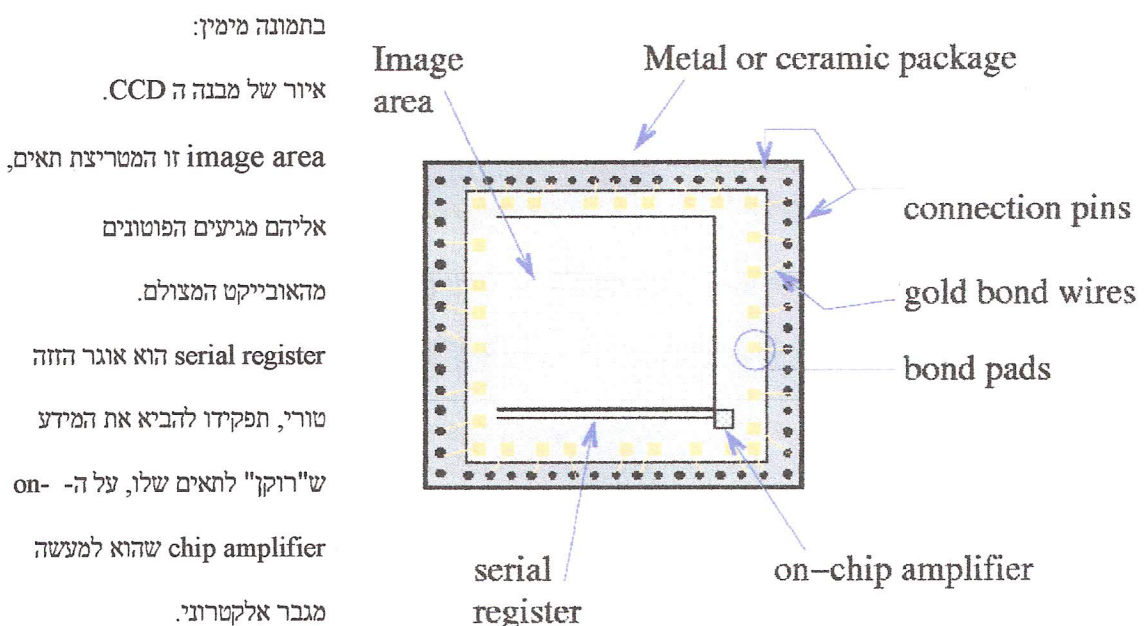


בזמן החשיפה, הדלים במקומם והרצעות לא זזות, הפוטונים יורדים ונאגרים בדלים, ברגע שמפסיקים את תהליך החשיפה (הצמצם נסגר), רצועות ההובלה מובילות את הדלים ומרוקנות אותם לדלים אחרים, כל דלי לדלי אחר (גם הרצועה אנכית נעה), הדליים ברצועה האנכית מתרוקנים זה אחר זה לתוך מיכל מדידה בקצה ה-CCD (למעשה זה מגבר אלקטרוני).

"תהליך הקריאה" - הוא למעשה התהליך בו "הדלים" מועברים לדליים אחרים, ומשם למכשיר המדידה, עד שכל הדלים מתרוקנים.

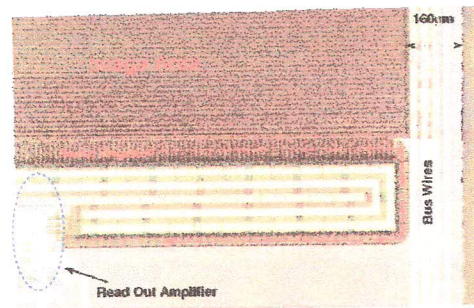
מבנה גלאי ה-CCD - המטריצה ממוקמת במישור הפוקלי של העדשה. במהלך החשיפה הפוטונים מומרים למטען ונאגרים בתאים, עם סיום החשיפה והתחלת תהליך הקריאה, המידה מועבר פיקסל פיקסל (בדומה לאנלוגיה שלעיל) ע"י אוגר הזזה טורי על הרכיב שמבצע הגברה.

תמונה להמחשה:

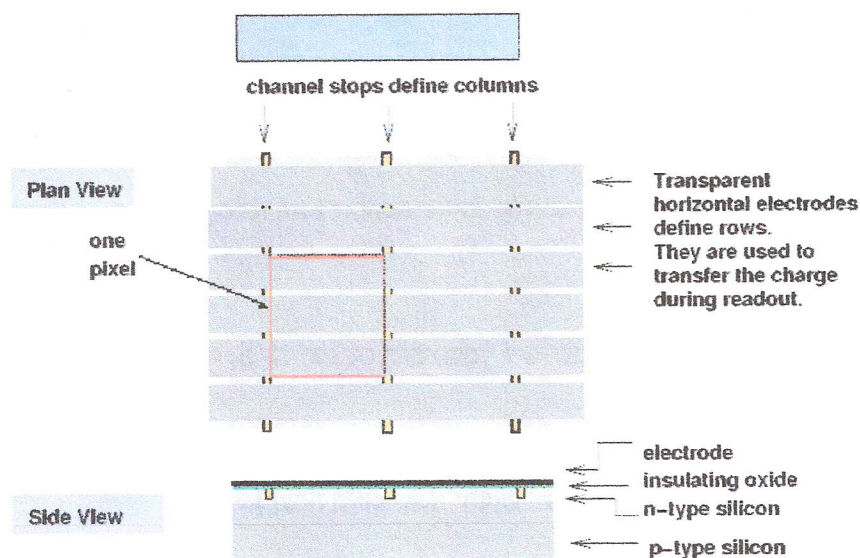


גלאי CCD, מיוצרים על מצעי (wafers) של סילקון (או מל"מ אחר), בשיטת פוטו-ליטוגרפיה, בדומה לציפ מחשב. גלאים המשמשים לצורך מדעי, כמו במקרה שלנו, גדולים יחסית, ולכן מסובך לייצר מצע בגודל מספיק גדול (וזה הסיבה העיקרית למחירים הגבוה).

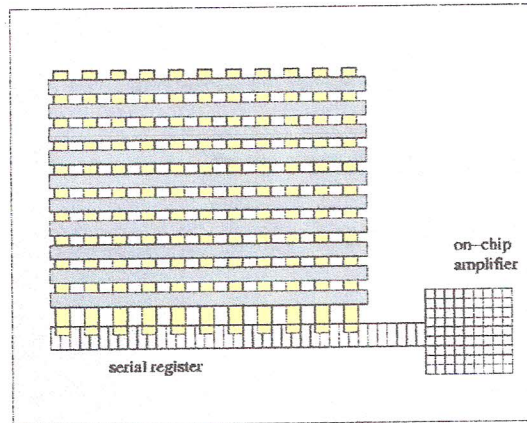
צורה אופינית של אותו משטח בצילום פוטומיקרוגרף (צילום אמיתי שנעשה ע"י מיקרוסקופ)



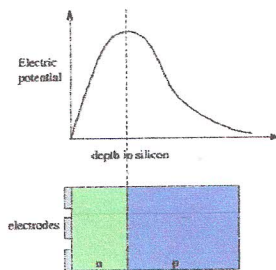
הדיאגרמה הבאה מראה חלק קטן (כמה פיקסלים) ממטריצה של CCD -



כל אלקטרודה שלישית מחוברת יחד כך שהן מקבלות את אותו הפוטנציאל (ראה הסבר בהמשך). מתחת למטריצת התאים (השטח שמכיל את האלקטרודות האורכיות) יש את אוגר ההזזה הטורי אשר גם הוא מורכב מאלקטרודות, ישנן 3 אלקטרודות עבור כל עמודה במטריצה.



כפי שציינתי בתחילה, ללא שדה חשמלי חיצוני, האלק' שיוצר יעבור רקומבינציה לאחר זמן קצר מאוד, ולכן נדרש לספק שדה חיצוני. המשטחי מל"מ אותם ציינתי קודם, מורכבים למעשה משני סוגי מל"מ



מחוברים זה לזה, האחד n-type (מל"מ נייטרלי המזוהם בדוורים), ושני p-type (מל"מ נייטרלי המזוהם באקספטורים), למעשה זו צומת PN- בצד ה n יש אלק עודפים שיעברו בתחילה לצד ה p ובצד ה p חורים עודפים שיעברו לצד ה n, הדיפוזיה תגרום ליצירת אזור טעון חיובית ואזור טעון

שלילית (בשל היונים שנותרו ללא חורים/אלק' באזור המחסור) וזה יגרם ליצירת שדה חשמלי שיגרם להפסקת הדיפוזיה.

המערכת בנויה כך שהפוטנציאל החשמלי יגיע למקסימום רק בצד ה- n, ושם האלק' שיוצרו יצטברו, מטרת המבנה הנ"ל הוא להרחיק את הפוטואלקטרונים ממשטח ה CCD שם יכולה להיווצר לכידה, וכמו כן זה מוריד את כמות האלק' הנוצרים בשל ערעור תרמי (זרם חושך).

הפוטנציאל של האלקטרודות נקבע לפי המצב הרצוי ל CCD, יש פוטנציאל מסוים (חיובי) בזמן החשיפה (צבירת המטענים), ופוטנציאל אחר (משתנה, ותלוי בקצב קריאת הנתונים) בזמן הקריאה, ע"י שינוי פוטנציאל זה קובעים מתי מתחילים לצבור מטענים, ומתי מפסיקים לצבור ומתחילים לספור את המטענים שנצברו.



## עדשת עין הדג (Fish eye lens)

עדשה זו בעלת שדה ראייה רחב מאוד (זווית צילום של כמעט  $180^\circ$ , ולעיתים אף יותר) והיא מסוגלת

לצלם את חצי מרחב (hemisphere) בתמונה אחת, עדשה

מסוג זה משמשת בין היתר לצורך צילום תמונות

אסטרונומיה מאחר והיא מאפשרת לצלם בתמונה אחת

כמעט את כל השמים הנראים מאותה נקודה (ולכן עדשות

מסוג זה, מוכרות בקרב קהילת האסטרונומים גם בשמן

"whole-sky lenses").

כל עדשה בעלת זווית ראייה גדולה גורמת בין היתר לעיוות

התמונה, היא מקנה לתמונה מבנה מעגלי (האינפורמציה לא

"מפוזרת" הומוגנית בתמונה, אלא דחוסה יותר בקצוות, או

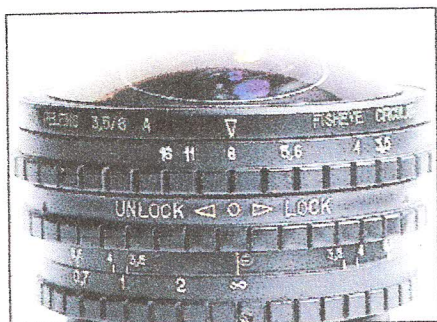
במילים אחרות, האופק נראה קטן ומרוחק יותר).

השם של העדשה נובע מהיות התמונות הנראות דרכה דומות

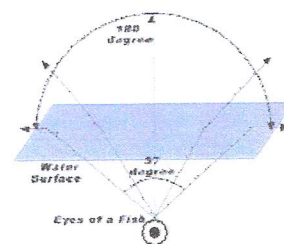
למבנה המיוחס לתמונה הנראית ע"י דג; כאשר דג מתבונן

כלפי מעלה, דרך המים, על כיוון פני המים, הוא רואה בזווית ראייה גדולה (כמעט  $180^\circ$  מעלות) את

הנמצא מחוץ למים, זאת בשל אופי שבירת קרני האור במעבר אוויר-מים.



בשתי התמונות (מעל טקסט הנ"ל ומתחתיו),  
דוגמאות לעדשות עין הדג.



באיור מימין, ניתן לראות המחשה של התופעה הנ"ל

דוגמה לתמונה "רגילה" -

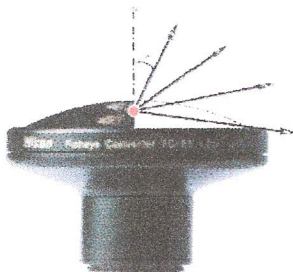
פרויקט  
מספר 600  
תשס"ו

אותה התמונה, לו הייתה מצולמת בעזרת מצלמת עין הדג-

פרויקט  
מספר 600  
תשס"ו

(ציור באמצעות תוכנת הגרפיקה Jasc Paint Shop Pro)

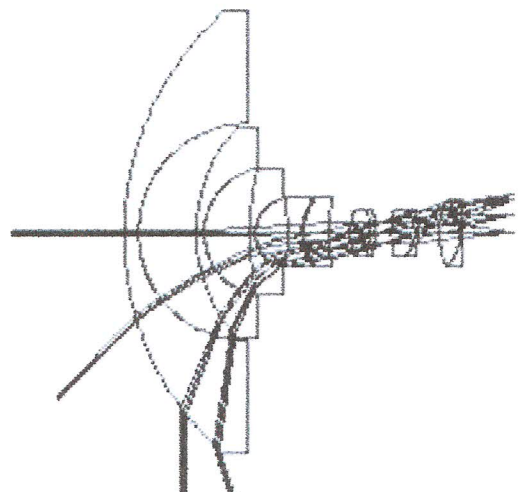
מבנה העדשה ומעברי קרניים בעדשת עין דג אופיינית-



כאמור לעיל, עדשת עין הדג מסוגלת "לראות" במפתח זווית של עד  $180^\circ$  (ולעיתים אף יותר, תלוי בסוג העדשה), זאת מתאפשר בשל המבנה הייחודי של העדשה. עדשות אלו מכילות למעשה מספר עדשות, חלקן מפזרות

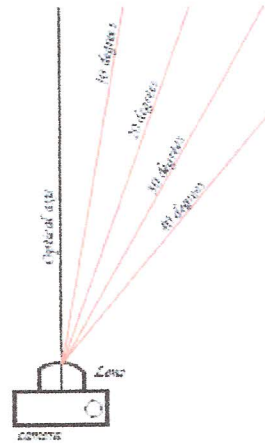
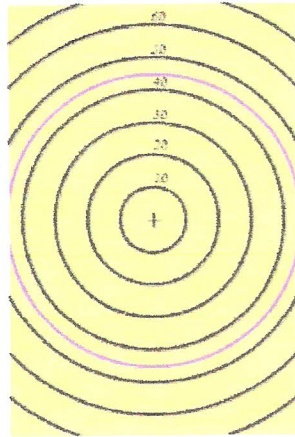
וחלקן ממקדות, כך למשל בסכמת עדשה הבאה:

בתמונה מימין: דוגמה למבנה פנימי של עדשת עין הדג, המבנה הנ"ל יכול להשתנות מדגם לדגם, אולם באופן כללי עדשה מסוג זה בנוייה ממספר רב של עדשות, חלקן מפזרות וחלקן מרכזות, והן נמצאות במבנה מסויים ובמרחקים ספציפיים זו מזו, כך שבסופו של דבר מקבלים מצלמה המאפשרת צילום איכותי של בזווית של  $180^\circ$  מעלות.

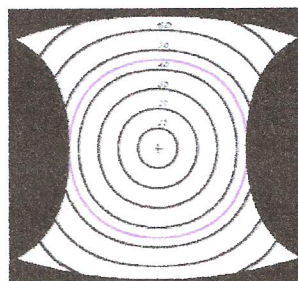


בעדשה מסוג זה, המרחק האנכי של אובייקט מהציר הפוקאלי, שונה מזה שנראה בתמונה המצולמת, לכל דגם מצלמה ניתן להתאים פונקציות מיפוי, אשר תאפשר הסקת המיקום "האמיתי" של האובייקט ביחס למרכז (כלומר מה המרחק של אובייקט בתמונה, ממרכז התמונה, אם התמונה הייתה תמונה שטוחה "רגילה"). פונקציות המיפוי לרוב מכילות פונקציות טריגונומטריות/היפרבוליות/פולינומיליות או קומבינציה שלהן, הפונקציות הנ"ל נקבעות לרוב באופן אמפירי וייחודיות לאותו דגם עדשה.

עדשת עין דג מסוג equidistant ("שווה מרחק"), שזה גם סוג העדשה בה אנו נשתמש (Nikkor 10.5mm), היא עדשה בה המרחק מהמרכז של פיקסל בתמונה המתקבלת פרופורציוני ישר לזווית המוקרנת, זאת כפי שמודגם בתמונה הבאה-



כך למשל קרן אור המגיע לעדשה בזווית  $10^\circ$ , תמופה למקום כלשהו על הטבעת שמסומנת בצירוב-  
 "10" וכך אלאה. אם מתרגמים את האינפורמציה מהתמונה המתקבלת לצורת תמונה רגילה (מלבנית)  
 מקבלים:





### אפיון CCD, הקדמה-

כפי שצויין לעיל, במערכת הנ"ל נשתמש בגלאי CCD. על אף שגלאים מסוג זה יעילים בהרבה מאשר

סרטי צילום כימיים בהם השתמשו בעבר, עדין ישנם רעשים ושיבושים בתמונות.

ניתן למודל ערך כל פיקסל בתמונה באופן הבא:

$$s(x, y) = B(x, y) + tD(x, y) + tG(x, y)I(x, y) + \text{noise}$$

כאשר:  $x, y$  הן הקואור' של אותו פיקסל במטריצה,  $B$  זה ערך הביאס (פירוט בהמשך) עבור אותו פיקסל,

$t$  הוא זמן החשיפה - כלומר מהו האינטרוואל זמן בו אפשרנו לגלאי לאגור פוטונים,  $D$  הוא זרם החושך,

$G$  היא הרגישות של כל פיקסל לאור, ו- $I$  זו עוצמת האור המגיעה לפיקסל מהמקור אותו ברצוננו לצלם

(ולמעשה זה הערך שמעניין אותנו ואותו ברצוננו לבודד עד כמה שאפשר משאר הגורמים).

### Dark frame

"תמונת חושך" היא תמונה הנלקחת כאשר הצמצם של המצלמה סגור - אין מקור חיצוני המאיר על

המערכת. זמן החשיפה של התמונה וזהו לזמן החשיפה של התמונה הרצויה (קרי עם מקור חיצוני), והוא

למעשה מכיל רק רעש המתלווה לתמונה, מאחר והרעש הוא סטטיסטי מצלמים מספר תמונות חושך

ויוצרים תמונת חציון של תמונות אלו (הערה - משתמשים בחציון ולא בממוצע מאחר ופיקסלים עם ערך

גבוה באופן קיצוני, אפילו אם יש מספר מועט מהם, יכולים להשפיע על הממוצע כך שהמשקל שלהם בו

יהיה גבוה בהרבה ממשקל שאר הפיקסלים, לעומת זאת אם לוקחים חציון מקבלים את ערך הפיקסל

ש"מיקומו הסידורי" מבחינת העוצמות הוא באמצע, ולכן מתחשבים כך בכול הפיקסלים באותו אופן).

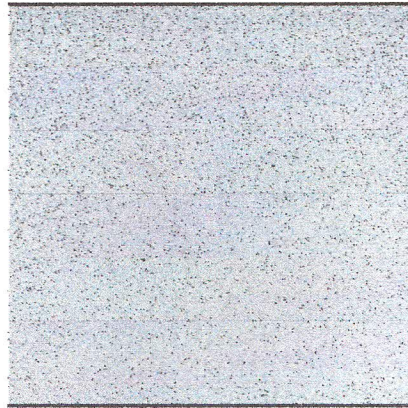
אם נמשיך עם המודל שלעיל, עבור כל פיקסל נקבל את הערך הנ"ל -

$$d(x, y) = B(x, y) + tD(x, y) + \text{noise}$$

מכאן שע"י החסרת התמונה הנ"ל מהתמונה עם הצמצם פתוח

(התמונה הרצויה), מקבלים תמונה נקייה יותר, עם רעש מופחת (הסבר נוסף בהמשך).

תמונת dark לדוגמה (תמונה בודדת, 50 דקות חשיפה) -

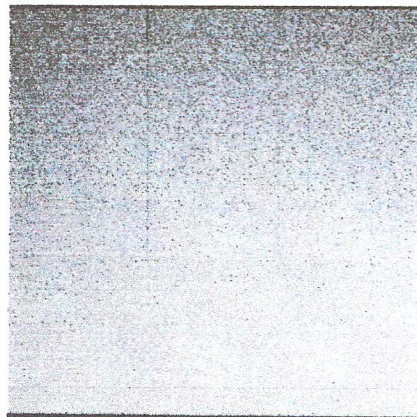


### -Bias frame

תמונת הביאס גם היא תמונה המצולמת כאשר הצמצם של המצלמה סגור, אולם הפעם זמן החשיפה הוא אפסי (וליתר דיוק- זמן החשיפה המינימאלי שהמערכת מאפשרת). כלומר תמונה זו היא ללא חשיפה אלא קריאת נתונים בלבד (readout), ולכן למעשה הנתונים המתקבלים הם בשל רעש קריאה בלבד (ראה הגדרה בהמשך), במודל שלעיל- עבור כל פיקסל בתמונת הביאס מקבלים-

גם תמונה זו מצולמת מספר פעמים, ויוצרים תמונת חציון.  $b(x, y) = B(x, y) + \text{noise}$

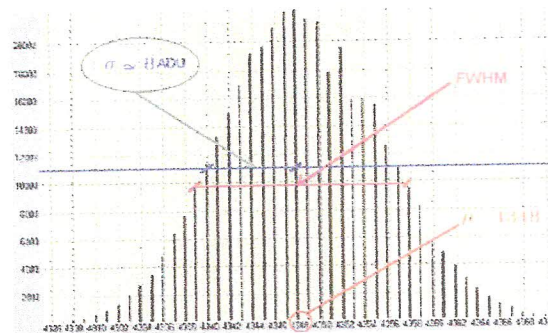
תמונת ביאס (בודדת) לדוגמה:



אם יוצרים היסטוגרמה של תמונת הביאס, מצפים לקבל צורת גאוסיאן. זאת משום שרעש הקריאה מתפלג נורמאלי (ראה הסבר נוסף על רעש קריאה בהמשך). המשוואה המתארת זאת היא:

$$G = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

כאשר  $\mu$  זה הערך הממוצע של רעש הקריאה,  $\sigma$  סטיית התקן ו  $x$  פקטור המרה בו נדון בהמשך.  
 כך לדוגמה בהסטוגרמת ביאס הבאה (המתאימה לתמונה לעיל):

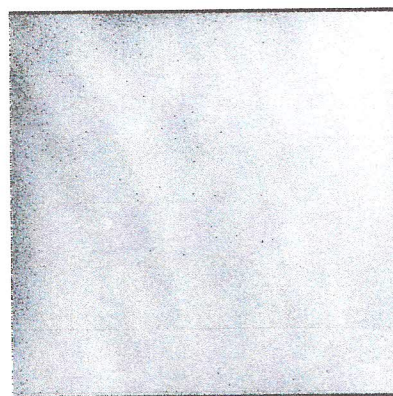


### Flat Field Frame

כפי שצוין קודם, הרגישות של תאים שונים במטריצה של רכיב ה CCD איננה אחידה, ולכן פיקסלים שונים בתמונה 'יוגברו' בעוצמה שונה.

תמונת Flat Field היא תמונה עם מקור הארה אחיד ככול האפשר, הנלקחת תחת אותם תנאים של התמונה הרצויה (אותה מערכת תחת אותם תנאים ואותו זמן חשיפה). אם נחלק את התמונה הרצויה בתמונת ה Flat Field, למעשה נגרום לאחידות בהגברי ערכי הפיקסלים השונים.  
 (הערה- כפי שיוסבר בהמשך, החלוקה נעשת לאחר הפחתת ביאס משתי התמונות).

תמונת Flat Field לדוגמה:



עבור כל פיקסל מקבלים (L היא עוצמת הארה)-

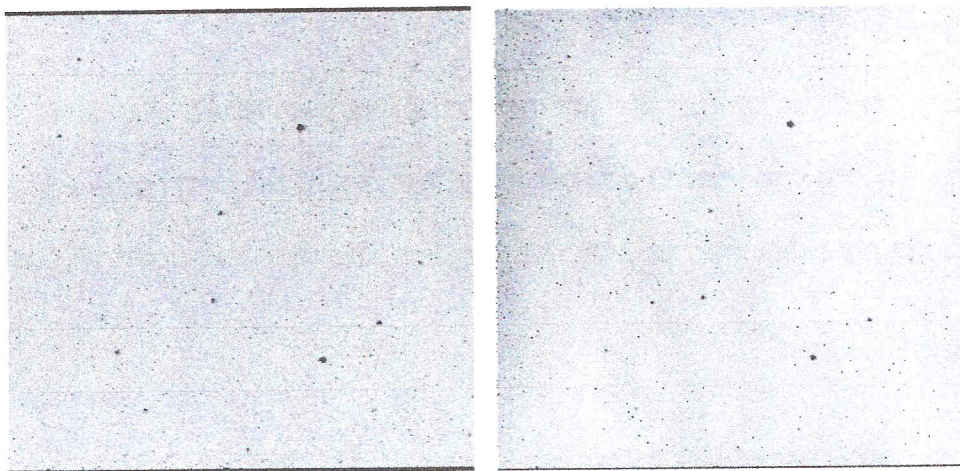
$$f(x, y) = B(x, y) + t_{flat} D(x, y) + t_{flat} G(x, y) L + noise$$



תהליך הרדוקציה (Reduction), הוא תהליך בו מנסים לבודד את עוצמת האור I המגיע מהמקור המצולם, מתוך מדידת עוצמת הפיקסלים. שלבי פעולה:

1. החסרת תמונת החושך (למעשה חציון של מספר תמונות חושך) מהתמונה הרצויה (בעלת אותו זמן חשיפה, ותחת תנאים פיסיקאליים דומים ככול האפשר).
2. החסרת תמונת החושך מתמונת ה- Flat field (חציון של מספר תמונות) ונרמולה.
3. חלקת תמונה המתקבלת בסעיף (1) בוז מסעיף (2)

לדוגמה:



בתמונה מימין: תמונת שמים לא מעובדת, משמאל אותה תמונה לאחר רדוקציה (תמונת החושך וה- Flat filed הן אותן תמונות מהדוגמאות שלעיל).

הערה- קיימות מצלמות באסטרונומיה עבורן כמעט ולא קיים זרם חושך, ולכן מספיק להשתמש בביאס במקום.

ע"י לקיחת תמונות חושך, ביאס ו Flat filed ניתן גם לאפיין את הגלאי ולבחון את טיבו. זאת נעשה בחלק הבא.

מטרה- מציאת הפרמטרים הבאים (פירוט עליהם מייד)-

- יחס ההמרה- Conversion factor
- רעש קריאה- Readout noise
- ליניאריות הגלאי- CCD's linearity
- אחידות- CCD's uniformity
- זרם חושך- Dark current

#### יחס ההמרה-

יחס ההמרה הוא למעשה הקשר בין ערך שרירותי של הפקסלים ביחידות (ADU) analog-to-digital ליחידות פיסיקאליות ברות משמעות- קרי מספר האלקטרונים הנוצרים בכל חיישן (photosite) בגלאי. מדידת יחס ההמרה מאפשר אפיון של מאפיינים נוספים בגלאי, כגון רעש קריאה וזרם חושך, בהם נדון בהמשך.

#### רעש קריאה-

רעש זה הוא הרעש המינימאלי שמייצר הרכיב (רעש קוונטי). והוא מורכב משינויים אקראיים המופעים במוצא הרכיב כאשר אין סיגנל כניסה (קרי כאשר אין פוטונים הפוגעים בחיישנים, אך למרות זאת ישנם אלק' מעורערים בשל האנרגיה תרמית).

רעש זה מוגדר כ- RMS (root mean square) של השונות במספר האלקטרונים במוצא הגלאי. אפיון זה ייתן לנו מדד לטיב הגלאים ותקינותם, הוא יאפשר לנו לבחור איזה מבין הגלאים טוב יותר (על מנת להציב אותו במצלמה הראשית שתהיה במצפה), וכן יאפשר לנו לבחור מה הטמפ' האופטימאלית לקירור הגלאים (קיים טריד-אוף: מאחר והרעש הנ"ל תלוי באנרגיה התרמית של האלקטרונים, ולכן גם בטמפ', ככול שנקרר את הגלאים לטמפ' נמוכה יותר כן הרעש הנ"ל יקטן, אולם אזי נשלם בצריכת הספק גבוהה יותר, מכאן שאם נוכח לראות כי מתחת לטמפ' מסוימת הקטנה נוספת לא תוריד משמעותית את הטמפ', נעדיף לא לקרר את הגלאים לטמפ' נמוכה מזו).

### ליניאריות-

בגלאי אידיאלי ערך כל פיקסל פרופורציוני ישר לעוצמת ההארה אליה נחשף הגלאי. עבור גלאים מעשיים לעומת זאת יש סף עוצמת הארה, מעבר אליו החיישן ברוויה, קרי- הגדלת מספר הפוטונים הפוגעים לא תגדיל את עוצמת זרם האלק' (כל האלק' מעוררים לפס הולכה של המל"מ), יתרה מזו, גם בתחום העוצמות הנמוכות מאותו סף, יש אי ליניאריות שמתגברת ככול שמגיעים לסף זה (ראה הסבר נוסף בהמשך, בחלק של ניתוח התוצאות).

מטרת בדיקת הליניאריות היא לבדוק מהו התחום הדינאמי בו הגלאי מגיב באופן ליניארי לעוצמת הכניסה. לעניין זה יש חשיבות רבה משום שהתמונות שיצולמו ישמשו למדידת השטף של אובייקטים בתמונה, במידה ונחשוף את הגלאי לעצמים בעלי עוצמת הארה גבוהה למשך זמן רב, השטף שיימדד יהיה קטן מהשטף האמיתי של האובייקט, ולכן לא תהיה למדידה חשיבות מדעית פרקטית.

### אחידות-

גלאי אידיאלי הוא אחיד לחלוטין. מבחינה פרקטית לא ניתן לייצר מערך של חיישנים (photosites) זהים לחלוטין. החיישנים השונים בגלאי בעלי רגישות שונה לאור הפוגע, ולכן נקבל גורם אי דיוק נוסף במדידת שטף עצמים. מטרת הבדיקה הנ"ל היא לוודא כי אכן הגלאים איכותיים כפי שנטען ע"י היצרן. נדרש לוודא כי השינויים ברגישות בין חיישנים שכנים קטן מאחוז, וכי האי אחידות הכללית של כל הגלאי לא עולה על 10%.

### רעש חושך-

המטען הנצבר מאלק' שעורערו תרמית גדל ליניארית עם הזמן (הסבר נוסף לגבי רעש זה בפרק על מבנה ה CCD).

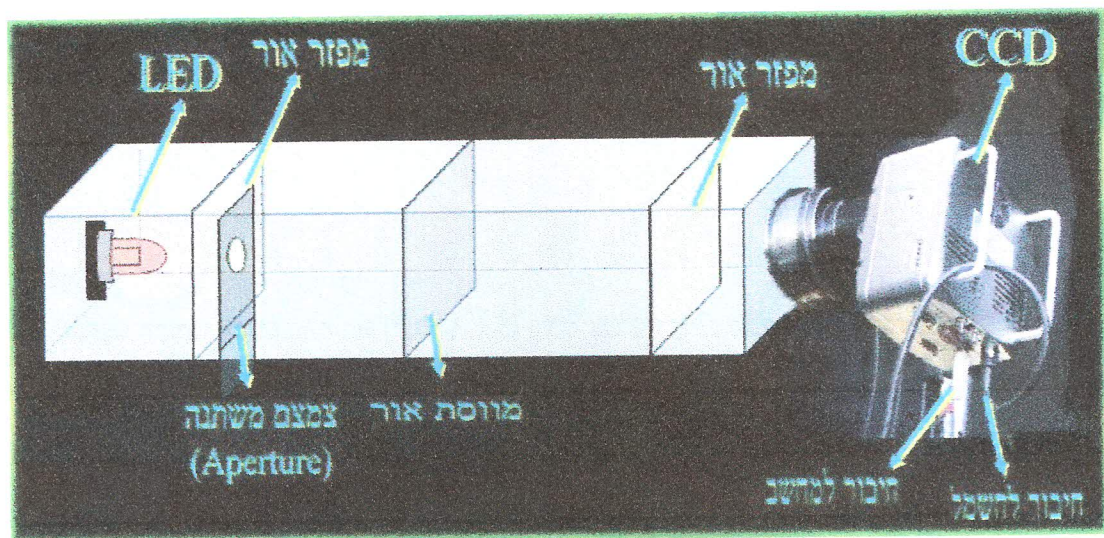
קירור הגלאי מקטין את הקצב בו האלק' מעוררים תרמית. מטרת הבדיקה הנ"ל היא למדוד את זרם החושך (ביחידות פיסיקאליות- אלק' לשנייה ליחידת פיקסל), ולקבוע איזה מהגלאים טוב יותר, ולוודא שהם אכן בעלי האיכות הנדרשת מהם.



### מלכודות מטענים (charge skimming) -

לעיתים חיישנים המכילים שיבושים או זיהומים לא רצויים עלולים ללכוד אלק' אשר יתווספו בעת הקריאה לאלק' הרצויים. מאחר ולרוב עבור גלאים איכותיים כמו הגלאים בהם אנו משתמשים נלכדים במקרה הרע, לכל היותר 100 אלק', תופעה זו עלולה להיות בעייתית רק עבור סיגנלים בעלי עוצמה נמוכה מאוד, או חשיפות קצרות מאוד. נדרש לוודא כי תופעה זו לא משמעותית מידי.

המערכת שנבנתה ע"מ לאפיין את ה CCD היא כדלקמן:



תפקיד ה-LED - לספק מקור הארה קבוע בעוצמה נמוכה.

תפקיד מפזרי האור לגרום לאחידות הארה עד כמה שניתן.

דפנות המערכת היו מחומרים כהים וכן כיסנו את המערכת על מנת למנוע הגעת אור מחוץ למערכת.

המערכת נבנתה כך שניתן לחבר אליה מפתחי צמצם (Aperture) שונים.

היחס בין מפתחי ה-Aperture הם כדלקמן:

| סימון הצמצם | יחס הארה (פרופ' לשטח המפתח) |
|-------------|-----------------------------|
| A1          | 1008.1                      |
| A2          | 504                         |
| A3          | 252                         |
| A4          | 128                         |
| A5          | 64                          |
| A6          | 32                          |
| A7          | 16                          |
| A8          | 8                           |
| A9          | 4                           |
| A10         | 2                           |
| A11         | 1                           |

ה-CCD חובר למחשב, ובאמצעות תוכנה מתאימה ניתן היה לקבוע את הטמפ' אליה קורר ה-CCD, ניתן

היה לתת הוראה לפתוח/לסגור את הצמצם של ה-CCD, לקבוע את אורך אינטרוול החשיפה וכן שמירת

הנתונים שהתקבלו מהגלאי בזמן הקריאה (ReadOut).

אפיון ה-CCD, שלבי פעולה-

ראשית בכל פעם שנפעיל את ה-CCD מחדש, יש להמתין כרבע שעה לפחות על מנת לאפשר למערכת להגיע למצב יציב- לתת למערכת הקירור להתייצב על הטמפ' המתאימה וכן לשאר הרכיבים האלק' להגיע לטמפ' קבועה.

נשאיר את ה-LED כבוי, ניקח את התבנית שסומנו קודם כ- A5, נכוון את התוכנה כך שתהיה חשיפה בת 100 שניות של הגלאי (למעשה חשיפה לחושך) ולאחריה קריאת השטף. התמונה נשמרה כ- test dark frame. כעת נדליק את ה-LED, ונחזור על הפעולה, הפעם נשמור את התמונה כ- test bright frame. כעת נחסיר את התמונה הראשונה (החשוכה) מהתמונה השנייה (המוארת), המטרה היא לבטל את זרם החושך ואת הביאס בתמונה המוארת. כעת נמדוד (בעזרת תוכנת המחשב) את ערך הממוצע של הפיקסל.

#### Bias ("תמונת ההיסט")-

הן תמונות אשר נלקחות ללא מקור אור וכאשר זמן החשיפה הוא הקצר ביותר האפשרי ע"י התוכנה. התרומה היחידה ל Bias היא מההיסט היוצר רעש מגבר של הגלאי ומרעש אלק' נלווה (רעש רקע). תמונות ה- bias, נלקחו כדלקמן-

1. ה- LED כבוי, כך ששום האור לא נופל על הגלאי
2. נכוון לזמן חשיפה הקצר ביותר האפשרי (ניתן לתת הוראה למחשב לעשות כן אוטומטית)
3. נצלם תשע תמונות bias, זו אחר זו.
4. את התמונות נשמור בשם BIAS אם אינדקס מתאים מ 001 ועד 009.

#### תמונות Skim-

על מנת לוודא שאין מלכודות מטענים (ראה הסבר לעיל), נעשה חשיפה עבור מקור אור חיזור מאוד כך שכמות המטענים הכללית בחשיפה תהיה קטנה מ- 300 אלק', ועם זמן החשיפה קצר יחסית. נשתמש בתבנית A9 (החריר הקטן ביותר), ובזמן חשיפה (הזמן בו הצמצם פתוח) של 5 שניות.

1. נדליק את ה-LED.



2. נצלם 9 חשיפות כפי שתואר לעיל, בזו אחר זו.
3. נשמור את התמונות כ- SKIML עם אינדקס מתאים.
4. נכבה את ה-LED.
5. נצלם תשע תמונות נוספות אך הפעם עם LED כבוי.
6. נשמור את התמונות הנ"ל כ- SKIMD עם אינדקס מתאים.

#### תמונות Flat-

על מנת לקבוע את יחס ההמרה (אלק' ל ADU) ועל מנת לבחון את ליניאריות הגלאי כפונקציה של הזמן, נעשה מספר חשיפות עובר אינטרוולי זמן שונים. נרצה לבחון כי עוצמת הארת ה-LED לא משתנה באופן משמעותי במהלך המדידות שלנו, אחרת לא נוכל להיות בטוחים כי כל החוסר האידיאליות שמתבטא בתמונות נובע רק מהגלאי שלנו ולא מהמערכת הזמנית שנבנתה על מנת לבחון את מאפייניו. לצורך כך, עשיתי את המדידות בשני סטים, פעם אחת הגדלתי את זמן החשיפה ובפעם השנייה הקטנתי אותו מתמונה לתמונה. לצורך התמונות הנ"ל נדרשת עוצמת הארה קבועה, השתמשתי אפוא בתבנית קבועה (לקחתי תבנית בינונית-A5).

עבור כל זמן חשיפה נעשה 2 חשיפות FLAT וחשיפת DARK, השלבים הם כדלקמן:

1. הדלקת ה-LED.
  2. נקבע את זמן האינטגרציה ל-# (כאשר # הוא זמן חשיפה מזמני החשיפה שלעיל)
  3. נעשה חשיפה של FLAT, ולאחריה חשיפה נוספת, באופן זהה לחלוטין.
  4. נשמור את התמונות כ- FLAT#A, FLAT#B (כאשר # הוא זמן החשיפה המתאים).
  5. נכבה את ה-LED.
  6. נקח תמונת DARK, ונשמור כ- FLAT#D.
- על השלבים הנ"ל יש לחזור עבור כל זמני החשיפה.

## תמונות DARK-

כעת המטרה היא לעשות חשיפות DARK ארוכות מספיק על מנת שיהיה זרם חושך בכל הפיקסלים, אולם זמן חשיפה לא ארוך מידי על מנת שלא יהיו פיקסלים (אלו ה"חמים" ביותר) שיכנסו כבר לרוויה. ולכן בחרתי זמן אינטגרציה של 500 שניות, ועקבתי אחר השלבים הבאים-

1. צילום של 3 תמונות DARK (ה-LED סגור).
2. נשמור את התמונות כ- DARK001, DARK002, DARK003.
3. צילום תמונת Bias ושמירתה כ- DARKBIAS.

## עיבוד התוצרים-

### בדיקת תמונות ה-Bias

עבור כל אחת מתשע תמונות ה-BIAS, נמדוד את ערך הפיקסל הממוצע (נסמן כ-  $\bar{S}_{PV}$ ), ואת סטיית התקן של ערכי הפיקסלים (נסמן כ-  $\sigma_{PV}$ ). זאת ניתן לעשות באמצעות התוכנה בה השתמשתי, באופן הבא-

נשתמש בסרגל Pixel Tool, נבחר כי השטח שימדד הוא עם רדיוס של 25 פיקסלים, ונלחץ על כפתור Get Statistics על מנת לקבל אפיון סטטיסטי של האזור אותו בחרנו. הערכים הרלוונטיים לנו הם הממוצע והחציון.

כעת ניקח את כל תמונות ה-BIAS ונשלב אותן יחד לתמונה אחת שהיא החציון של כל תשע התמונות (בפועל זה נעשה בתוכנית ע"י בחירת התמונות הנ"ל ואיחודן באמצעות אופציית Median).

מבחינה תיאורטית, רעש קריאה אמור להשתנות באופן רנדומאלי סביב הערך הממוצע בהתפלגות נורמאלית (Gaussian Distribution). סטיית התקן של השונות הוא רעש הקריאה.

עבור כל תמונות Bias ניתן לתוכנית הוראה להציג היסטוגרמה ונוודה כי אכן לכל היסטוגרמות פילוג נורמאלי (למעשה התוכנית מציגה את היסטוגרמה בגרף לוגריתמי, ולכן נצפה לקבל פרבולה הפוכה).

על מנת לוודא כי אכן אין בעיה עם הגלאים נערוך מספר בדיקות נוספת, לשם כך נשתמש בתמונת החציון שייצרנו קודם, חציון הוא למעשה "הערך האמצעי" = מספר הערכים הגדולים ממנו שווה למספר הערכים הקטנים ממנו, ובכך למעשה נעלים כל תופעה אשר מופיעה רנדומאלית רק באחת התמונות וכן תופעות

המופיעות בכל התמונות אך משפיעות שונה, מכאן שאם נבחן את התמונה הנ"ל נוכל לקבוע האם מקור הרעש מסוים הוא חסר קוהרנטיות לחלוטין, או לא;

יש לוודא כי אין קווים (אורכיים/רוחביים) או תבניות אחרות שמופיעות בעקביות בכל התמונות, כמו שאכן עשיתי במהלך הבדיקה ולא ניכר היה שאכן קיימת תבנית כזו (אולם בכללי- אופציה אחת לסוג של תבניות כאלה- היא אותה התבנית, המופיעה במקום משתנה מתמונה לתמונה, במידה והייתה תבנית שכזו, היו יכולים להיות לה שני גורמים- פגם בגלאי או השראה- הפרעה הנובעת ממסך/מחשב/פלאפון או מכשיר אחר בחדר, ואז התבנית מוזזת כיוון שאיננה מסנכרנת עם הגלאי, אופציה שנייה היא אותה תבנית באותו מקום עבור כול התמונות ואז סביר שהנ"ל נגרמה מהאלקטרוניקה של הגלאי עצמו, בכל מקרה, כפי שצינתי קודם, לא נצפתה תבנית משום סוג).

הרעש מורכב גם מרעש  $1/f$  (שם נוסף Popcorn noise), תופעה זו נראית כשינוי כמעט רנדומאלי ברעש בין שורה לשורה, מאחר ושינוי זה איננו קבוע, ולא משפיע על כל התמונות באותו אופן, אין אפשרות להתחשב בו (אין אפשרות להחסיר את הרעש הנ"ל מהתמונה הרצויה...), בכל מקרה, שינויים אלו, גם אם קיימים לא היו משמעותיים כלל בתמונות שבחנתי.

### ReadOut Noise

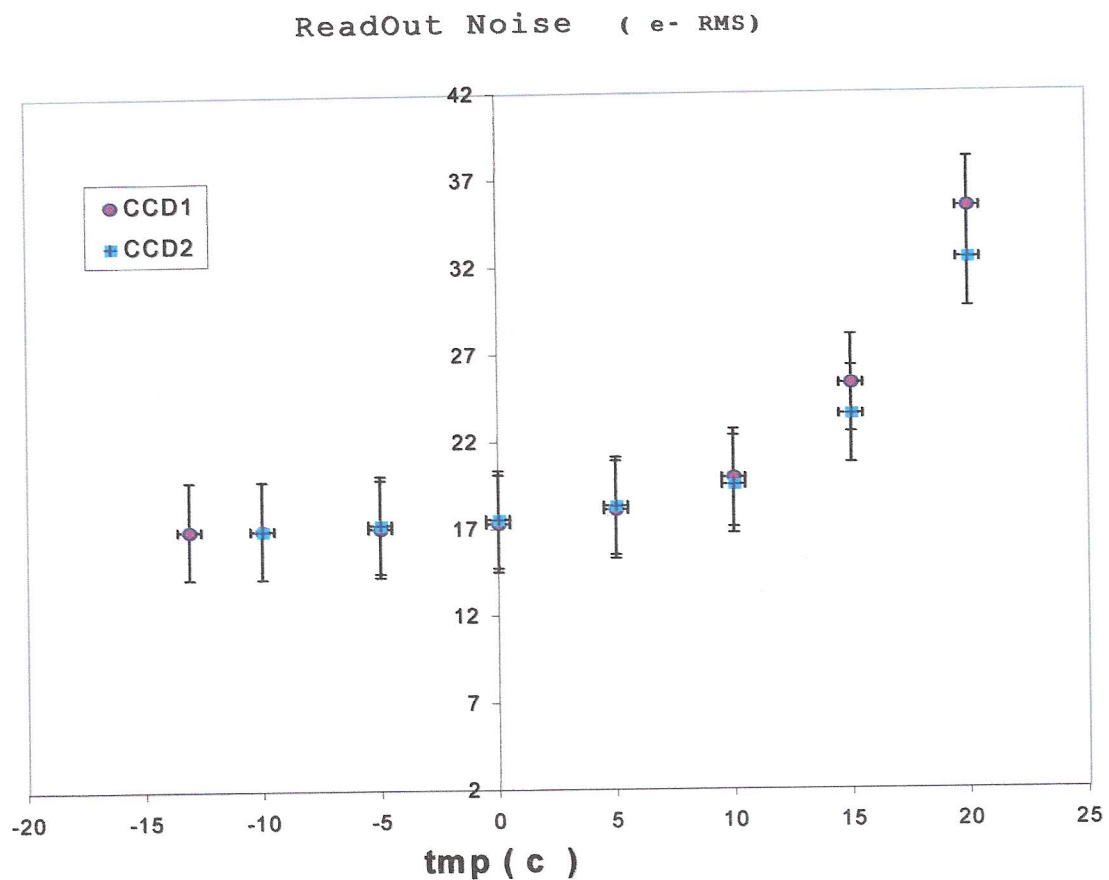
נשתמש בסט המדידות של ה-Bias- ידוע באופן תיאורטי כי המניות בפריים Bias, משתנות באופן אקראי עם התפלגות גאוסיאנית. וכן כי ה- ReadOut Noise – מוגדר כסטיית התקן של גאוסיאן זה (כלומר של הגאוסיאן המתקבל מהיסטוגרמה של הפיקסלים השונים באותה תמונה), נמצא את סטיית התקן עבור 9 תמונות ביאס (לכל CCD), ונכפול בפקטור ההמרה האמפירי (ראה חישוב בהמשך).

| Frame | Mean PV<br>[ADUs] | Min PV<br>[ADUs] | Max PV<br>[ADUs] | StD PV<br>[ADUs] | ReadOut Nois<br>e- (RMS) |
|-------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| CCD1  | 971.00            | 950.00           | 1512.00          | 6.06             | 16.9983                  |
| CCD2  | 914.00            | 893.00           | 1564.00          | 6.08             | 16.9972                  |



קיבלנו ערכים הגבוהים מהערך הנתון בדפי היצרן (15e-RMS) בכ- 12.5%, ששוה ערך ל- 0.714 סטיות תקן (התחשבתי בכך שערך השגיאה בערך האמפירית היא  $2.8 \text{ e- (RMS)}$ ), כלומר יש התאמה טובה בין הנתונים עצמם (בשני הגלאים קיבלנו באופן קצת מפתיע ערך כמעט זהה) והתאמה סבירה בין הנתונים האמפיריים לערך הנתון ע"י היצרן.

### תלות ה-Read Out Noise בטמפ'



בטמפ' נמוכות בקירוב טוב רעש הקריאה קבוע, ושווה עבור שני הגלאים השתמשתי במקדמי ההמרה האמפיריים, ראה חישוב בהמשך), ככול שהטמפ' עולה גם הרעש עולה, עבור CCD1 בקצב קצת יותר מהיר, ולכן מהבחינה הזו הגלאי השני טוב יותר (בפרט אם הטמפ' בה יעבדו הגלאים גבוהה מאפס מעלות).

### עקום הענות - Transfer Curve

עקום הענות הוא גרף השוונות ( $\sigma_{PV}^2$ ) כפונקציה של ערך ממוצע של פיקסל ( $\bar{S}_{PV}$ ), עבור סט תמונות

Flat-field. השוונות בערכי פיקסל שונים מתקבלת ע"י החסרת זוג תמונות Flat-field אשר זהות

מבחינת המאפיינים שלהן (הסבר מפורט בהמשך). מעקום הענות ניתן לקבוע את פקטור ההמרה של ה-

CCD, זאת משום שהסקת פקטור הטרנספורמציה מתבסס על תכונות של התפלגות פואסונית (הרי

מדובר בקצב יצירה של פוטואלקטרונים) ולכן השונות במספר הפוטואלקטרונים בכל אינטרוול דגימה

שווה לשורש ממוצע מספר הפוטואלקטרונים (סימנתי ב-  $\bar{S}_e$ ).

הסיגנל בגלאי מורכב מקומבינציה של מספר האלקטרונים + רעש רנדומאלי הנוהג לפי התפלגות פואסון +

רעש הקריאה של הגלאי. נצפה כי סטיית התקן של הסיגנל הנ"ל (תסומן ב-  $\sigma_e$ ) תינתן ע"י-

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{pe}^2 + \sigma_{ron}^2}, \text{ כאשר סימנתי את סטיית התקן במספר הפוטואלקטרונים ב- } \sigma_{pe}, \text{ ואת רעש הקריאה}$$

ב-  $\sigma_{ron}$ . כל סטיות התקן הנ"ל נתונות ביחידות של מספר אלקטרונים.

עבור כל אחת מתמונות ה Flat-field, אנו יכולים למדוד באופן ישיר את הערך הממוצע של פיקסל

( $\bar{S}_{PV}$ ), ביחידות ADUs. המספר הכללי של הפוטואלקטרונים הנמדדים ( $\bar{S}_e$ ), פרופורציוני ל  $\bar{S}_{PV}$ .

נגדיר את קבוע הפרופורציה באות  $g$ , קבוע זה הוא בדיוק יחס ההמרה:  $\bar{S}_e = g \cdot \bar{S}_{PV}$ .

כאמור לעיל, מספר הפוטואלקטרונים מתפלג לפי התפלגות פואסון ולכן סטיית התקן בערך זה ( $\sigma_{pe}$ )

שווה ל-  $\sqrt{\bar{S}_e}$ , ולכן  $\sigma_{pe}^2 = g \cdot \bar{S}_{PV}$ .

פרמטר בר מדידה נוסף הוא סטיית התקן של ערך פיקסל ממוצע בתמונת Flat-field (נסמן כ-  $\sigma_{PV}$ ).

למרות שתמונת ה- Flat-field לא אחידות ע"י החסרת שתי תמונות Flat-field שגולקחו תחת תנאים

זהים לחלוטין ניתן לבטל את מרבית החוסר אחדות, ובכך לקבל את ריבוע סכום הרעשים השונים (כפי

שפרטתי לעיל). הרעש הנמדד ביחידות של אלקטרונים מוכפל בפקטור סקלה שהוא למעשה יחס ההמרה

אותו אנו מחפשים  $\sigma_e = g \cdot \sigma_{PV}$ .

יש לשים לב כי השונות הנמדדת ע"י החסרת שתי תמונות ה- Flat-field, היא פעמים השונות של Flat-

field יחיד, ומכאן שיש לחלק את השונות הנמדדת בפקטור 2.

כפי שציינתי לעיל-  $\sigma_e = \sqrt{\sigma_{pe}^2 + \sigma_{ron}^2}$ , ולכן  $\sigma_e^2 = \sigma_{pe}^2 + \sigma_{ron}^2$ , נציב במשווה זו את השוויונות הרלוונטיים

לעיל ונקבל  $g^2 \cdot \sigma_{PV}^2 = g \cdot \bar{S}_{PV} + \sigma_{ron}^2$ , ולכן בסה"כ-

$$\sigma_{PV}^2 = \frac{1}{g} \bar{S}_{PV} + \frac{1}{g^2} \sigma_{ron}^2$$

ניתן לראות כי  $\sigma_{pv}^2$  תלוי ב-  $\bar{s}_{pv}$  באופן ליניארי, וכן ששני הערכים הנ"ל ברי מדידה באופן ישיר (כפי

שציינתי לעיל), ומכאן שע"י בניית גרף  $\sigma_{pv}^2$  כפונקציה של  $\bar{s}_{pv}$  נוכל להסיק מהו פקטור ההמרה (פקטור

ההמרה יהיה פשוט הערך ההופכי של שיפוע גרף זה), כמו כן נוכל לקבל את רעש הקריאה ביחידות של

$$\text{ADUs (פשוט חילוך } \sigma_{ron} \text{ מהקבוע של המשוואה } \sigma_{ron} = g \cdot \sqrt{b} < -b = \frac{1}{g^2} \sigma_{ron}^2 \text{ )}$$

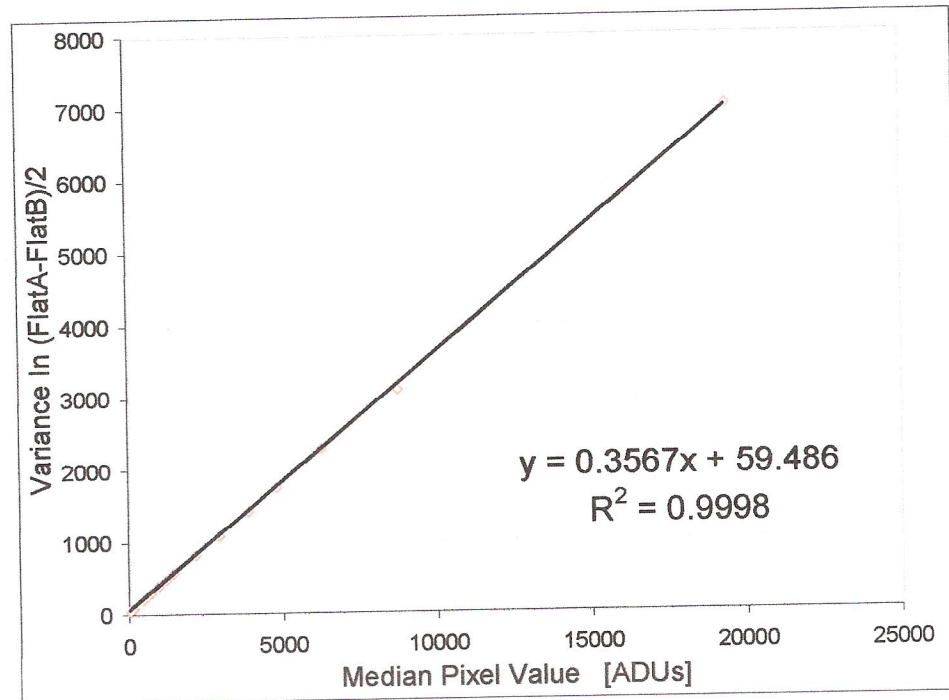
תוצאות-

עבור CCD1-

| Flat Set | Integration (sec) | Median PV [ADUs] | Mean PV [ADUs] | Std(-) [ADUs] | Variance [ADUs^2] | Count Rate [ADUs/sec] |
|----------|-------------------|------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| Flat03   | 3.0               | 121              | 121            | 19.76         | 97.6144           | 40.33                 |
| Flat09   | 9.0               | 404              | 403            | 29.04         | 210.8304          | 44.78                 |
| Flat15   | 15.0              | 690              | 686            | 35.52         | 315.4176          | 45.73                 |
| Flat25   | 25.0              | 1183             | 1177           | 44.36         | 491.9524          | 47.08                 |
| Flat45   | 45.0              | 2142             | 2129           | 57.63         | 830.3042          | 47.31                 |
| Flat80   | 80.0              | 3856             | 3831           | 75.67         | 1431.4872         | 47.89                 |
| Flat60   | 60.0              | 2910             | 2899           | 66.31         | 1099.2540         | 48.32                 |
| Flat30   | 30.0              | 1413             | 1414           | 48.04         | 576.9604          | 47.13                 |
| Flat20   | 20.0              | 948              | 944            | 40.40         | 408.0400          | 47.20                 |
| Flat12   | 12.0              | 548              | 545            | 32.55         | 264.8756          | 45.42                 |
| Flat02   | 2.0               | 78               | 78             | 17.60         | 77.4400           | 39.00                 |
| FlatP5   | 0.5               | 17               | 18             | 14.39         | 51.7680           | 36.00                 |
| Flat100  | 100.0             | 4772             | 4740           | 83.93         | 1761.0612         | 47.40                 |
| Flat130  | 130.0             | 6224             | 6182           | 95.73         | 2291.0582         | 47.55                 |
| Flat180  | 180.0             | 8725             | 8666           | 111.30        | 3096.9225         | 48.14                 |
| Flat400  | 400.0             | 19405            | 19272          | 167.44        | 7009.0384         | 48.18                 |

ועקום הענות המתקבל (CCD1)-





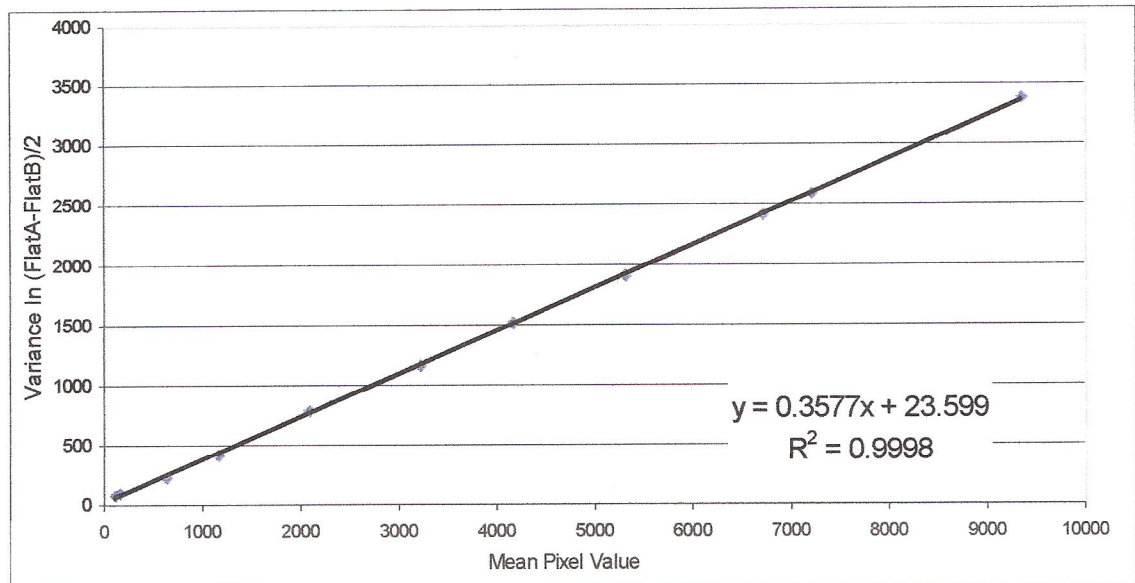
אכן קיבלנו התאמה מעולה לקו ישר (מקדם קורלציה 0.9998, קרי התאמה כמעט אידיאלית לישר!).  
הופכי של השיפוע שווה למקדם ההמרה והוא  $2.803 \text{ (e-/ADU)}$ , התאמת שגיאות סטטיסטיות (עם  
MATLAB) מגיבה כי ה confidence bounds (עבור השיפוע) שיתנו סטיית תקן אחת הם  $0.3556$ ,

$$\frac{\Delta \text{confidence bounds}/2}{(1/2.803)^2} = 0.01 \text{ (e-/ADU)} \text{ ל } 0.3578$$

כלומר מקבלים שמקדם ההמרה הוא  $2.803 \pm 0.010 \text{ (e-/ADU)}$  (שגיאה יחסית של 0.36% בלבד).

עבור CCD2 - (מספר סידורי 040500363)

| Flat Set | Integration (sec) | Median PV [ADUs] | Mean PV [ADUs] | StD [ADUs] | Variance [ADUs <sup>2</sup> ] | Count Rate |
|----------|-------------------|------------------|----------------|------------|-------------------------------|------------|
| Flat03   | 3.0               | 158              | 157            | 20         | 100.0000                      | 52.3333    |
| Flat10   | 10.0              | 631              | 628            | 30.26      | 228.9169                      | 62.8000    |
| Flat40   | 40.0              | 2085             | 2066           | 56.06      | 785.6809                      | 51.6500    |
| Flat80   | 80.0              | 4161             | 4161           | 77.85      | 1515.1556                     | 52.0125    |
| Flat60   | 60.0              | 3220             | 3192           | 68.21      | 1163.1510                     | 53.2000    |
| Flat20   | 20.0              | 1157             | 1150           | 40.9       | 418.2025                      | 57.5000    |
| Flat02   | 2.0               | 106              | 105            | 17.96      | 80.6404                       | 52.5000    |
| Flat100  | 100.0             | 5304             | 5254           | 87.34      | 1907.0689                     | 52.5400    |
| Flat130  | 130.0             | 6709             | 6639           | 98.37      | 2419.1642                     | 51.0692    |
| Flat140  | 140.0             | 7207             | 7131           | 101.83     | 2592.3372                     | 50.9357    |
| Flat180  | 180.0             | 9350             | 9249           | 116.41     | 3387.8220                     | 51.3833    |



גם כאן התאמה מעולה לישר (מקדם קורלציה 0.9998)

מקדם ההמרה שווה ל  $2.7956 (e-/ADU)$ , ה confidence bounds הם  $(0.3633, 0.3598)$ , השיגאה

$$\frac{\Delta \text{confidence bounds}/2}{(1/2.7956)^2} = 0.014(e-/ADU) \text{ ל בערך מקדם ההמרה שווה ל}$$

כלומר מקבלים שמקדם ההמרה הוא  $2.796 \pm 0.014 (e-/ADU)$  (שגיאה יחסית של 0.5% בלבד)

בשני המקרים מקדם ההמרה שונה במקצת מזה הנתון ע"י היצרן (עבור הדגם בו אנו משתמשים, היצרן

טוען כי מקדם ההמרה הינו  $2.3 (e-/ADU)$ , יש הבדל של כ-20% ביחס לתוצאות האמפיריות, מאחר

ונתוני היצרן לא כוללים שגיאת מדידה או תחום ערכים אפשרי, וכן בהתחשב בעובדה כי ההתאמות

הליניאריות הניבו יחס בתאמה גבוה במיוחד עם שגיאות יחסיות קטנות ביותר, אני מניחה כי ניתן

להסתמך על התוצאות שהתקבלו).

### ליניאריות הגלאים-

את ליניאריות ה CCD ניתן לבחון ע"י השוואה של הקצב בו ערך פיקסל גדל בזמני חשיפה שונים. עבור

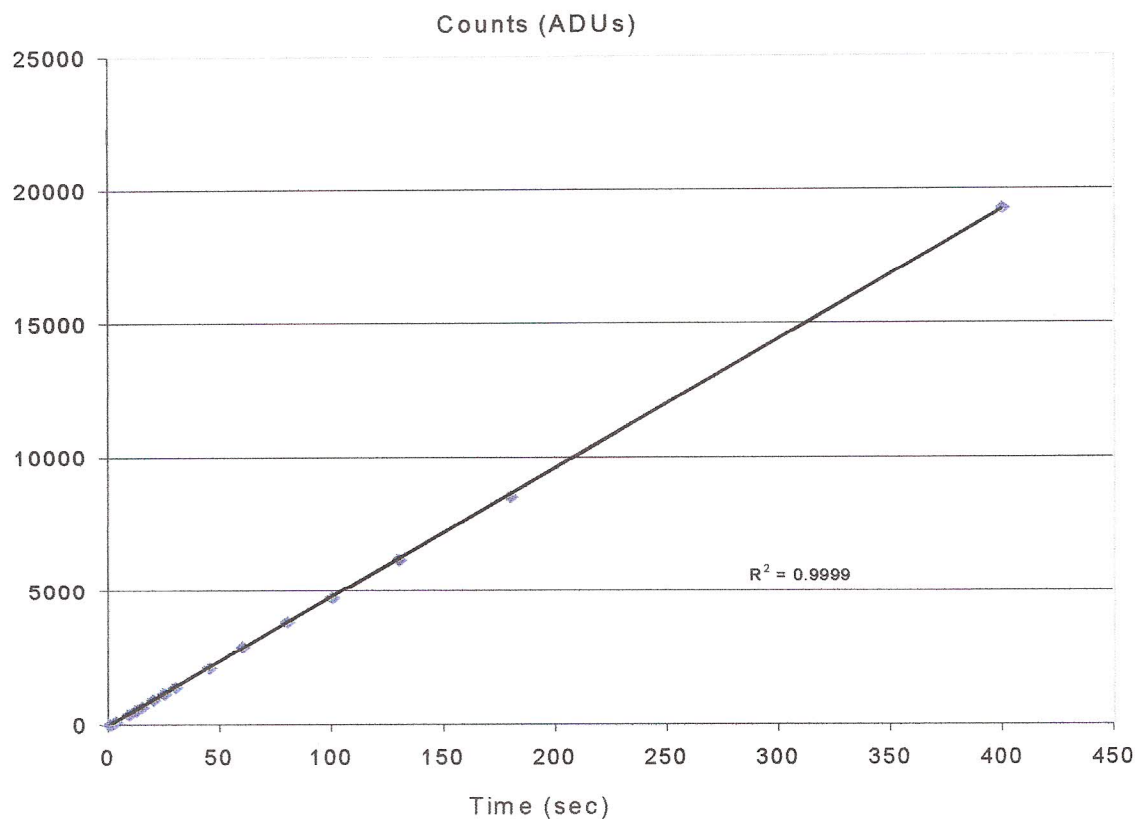
גלאי בעל ליניאריות גבוהה הקצב הנ"ל קבוע עבור כל זמני החשיפה.

נציג את ערך הפיקסל הממוצע כפונקציה של זמן החשיפה ונקווה לקבל גרף ליניארי. נשים לב שמאחר ועבור זמני חשיפה ארוכים ערכי הפיקסלים יהיו ברוויה יש להתעלם מאזור זה, כמו כן עבור זמני חשיפה קצרים מאוד יש גם כן בעיות ולכן גם מהערכים אלו (למשל חצי שנייה) נדרש להתעלם.

באופן כללי במידה ולא מקבלים גרף ליניארי זה עלול לנבוע מאי אחידות בעוצמת ההארה של LED של במערכת שנשנתה לצורך אפיון הגלאים, ולא מהגלאים שלנו עצמם. במידה וזה המצב, לא קשה להבחין בכך שכן כזכור חילקתי את הסט ל-2 קבוצות שנלקחו בזו אחר זו, ולכן אם יהיו הבדלים שיטתיים בין תמונות של זמני אינטגרציה קרובים שנלקחו מקבוצות שונות, נדע כי החוסר ליניאריות לא נובע רק מחוסר ליניאריות הגלאים אלא נובע בעיקר מה-LED שאיננו מתאים לצורכנו, ויש להחליפו.

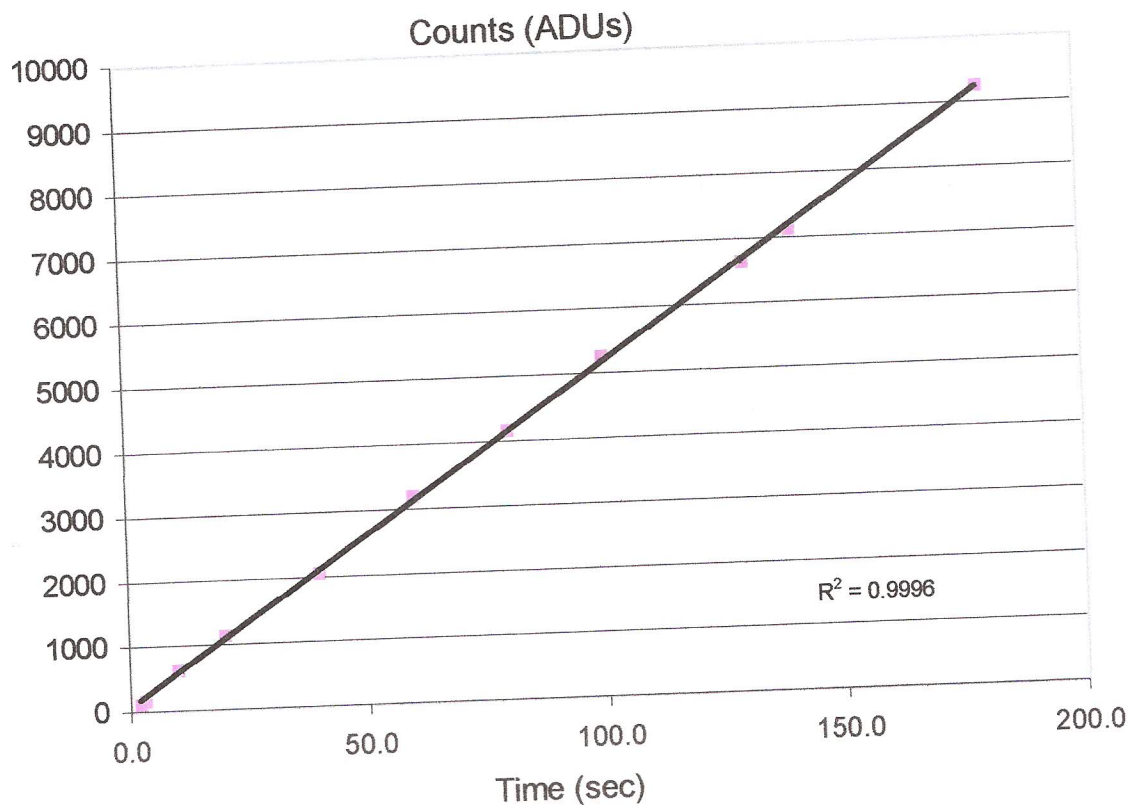
**תוצאות** (הגרפים הם עם שגיאות המדידה, אולם השגיאות קטנות יחסית ולכן קשה להבחין בהן).

### CCD1 Linearity Curve





### CCD2 (040500363) Linearity Curve



ניתן לראות כי בקירוב טוב שני הגלאים אכן ליניאריים, יחס ההתאמה בשני המקרים שואף ל-1. זמני החשיפה שבחרתי היו נמוכים מכדי להגיע לרוויה עבור הצמצם בו השתמשתי, ולכן לא היה צורך להזניח נקודות. ראוי לציין שעבור זמני חשיפה קטנים ההתאמה לישר פחות טובה (בפרט ב- CCD2), אולם מאחר והערכים המתקבלים אז קטנים יחסית, שגיאת המדידה היחסית גבוהה יותר.

### קביעת זרם החושך

קירור הגלאי משפיע באופן דרסטי על זרם החושך. על מנת לקבוע את זרם החושך נתבונן בתמונות ה-Dark שלקחנו קודם (DARK001, DARK002, DARK003) נחסר את תמונת ה-Bias מהם ונמצא את החציון של שלושת התמונות. על מנת לקבל את זרם החושך עבור כל פיקסל, יש להכפיל ערך כל פיקסל בתמונה (שביחודות ADUs) בפקטור ההמרה שמצאנו קודם, ואז לחלק בזמן האינטגרציה (ביחודות של שניות).

תוצאות-

(3 חשיפות של 100 שניות כל אחת, בטמפ' של 10- מעלות צלזיוס, הנתונים לאחר החסרת Bias)

# CCD1

| Mean<br>[ADUs] | Median<br>[ADUs] | Current<br>[ADUs/100sec] | Std<br>[ADUs] |
|----------------|------------------|--------------------------|---------------|
| 46             | 5                | 0.05                     | 307.35        |
| 46             | 5                | 0.05                     | 308.74        |
| 46             | 6                | 0.06                     | 309.74        |

# CCD2

| Mean<br>[ADUs] | Median<br>[ADUs] | Current<br>[ADUs/100sec] | Std<br>[ADUs] |
|----------------|------------------|--------------------------|---------------|
| 22             | 8                | 0.08                     | 245.50        |
| 21             | 8                | 0.08                     | 251.11        |
| 21             | 7                | 0.07                     | 245.97        |

יש שוני משמעותי בין הערך הממוצע של פיקסל בשני הגלאים, ככול הנראה יש יותר פיקסלים חמים בגלאי הראשון, ככול מקרה התוצאה הרלוונטית לנו עבור זרם החושך היא החציון, גם כאן יש הבדל בין שני הגלאים אך ההבדל קטן אם מתחשבים בכך שיחס ההמרה הוא במגמה הפוכה (עבור הגלאי הראשון גדול יותר).

## בטמפ' של אפס מעלות צלזיוס

עבור הגלאי הראשון-

| Mean<br>[ADUs] | Median<br>[ADUs] | Current<br>[ADUs/100sec] | Current<br>[e-/pixel/sec] |
|----------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| 71             | 33               | 0.33                     | 0.925                     |

עבור הגלאי השני-

| Mean<br>[ADUs] | Median<br>[ADUs] | Current<br>[ADUs/100sec] | Current<br>[e-/pixel/sec] |
|----------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| 63             | 35               | 0.35                     | 0.978                     |

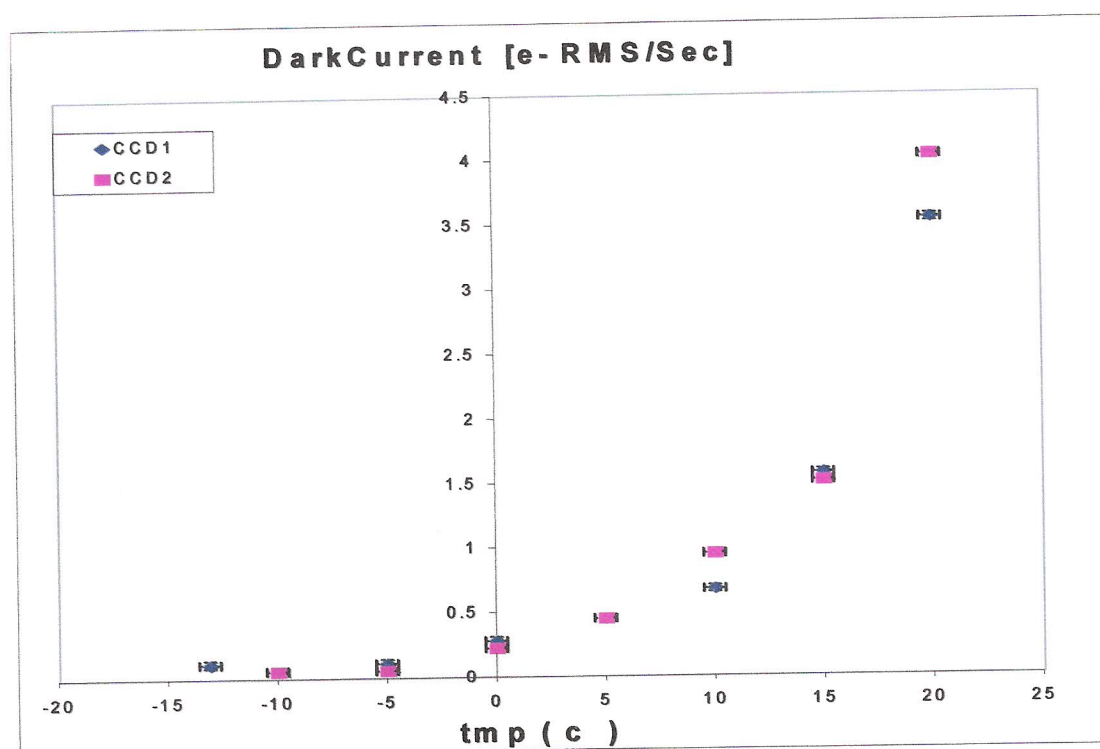
בטמפ' אפס מעלות, ולאחר המרה (עם מקדמי ההמרה שנמצאו אמפירית!) יש הבדל של כ-6% בין שני הגלאים אולם שניהם קרובים לערך הנתון ע"י היצרן (ע"פ היצרן בטמפ' אפס זרם החושך הוא כאלק' אחד לפיקסל לשנייה, עבור שני הגלאים קיבלנו ערך שקטן במעט מערך זה). בחישוב זה מסתמכים על מקדמי ההמרה שחושבו קודם, כאמור הם שונים במעט מהערך הנתון ע"י היצרן, במידה ומחשבים את זרם החושך באמצעות פקטור ההמרה הנתון ע"י היצרן, הערכים הם  $0.759 \text{ e-/pixel/sec}$

ו  $0.805 \text{ e-/pixel/sec}$  עבור הגלאי הראשון והשני בהתאמה. ההבדל כשמשמשים בפקטור ההמרה הלא אמפירי הוא משמעותי יותר ביחס לנתון מדפי יצרן, אולם שוב הערכים קטנים מהערכים שניתנו ע"י היצרן, ולכן בשני המקרים ועבור שני הגלאים ניתן בהחלט לומר כי הערכה של היצרן לגבי זרם החושך היא חסם עליון.

#### תלות הרעש חושך בטמפ'

מאפיין זה בהחלט רלוונטי לנו, מאחר ונדרש לקבוע את הטמפ' בה יעבוד הגלאי, ככול שנקרר לטמפ' נמוכה יותר כך יתבזבז הספק גבוה יותר, אולם נקבל רעש חושך נמוך יותר, ולכן נרצה למצוא את הטמפ' האופטימאלית.

תוצאות-

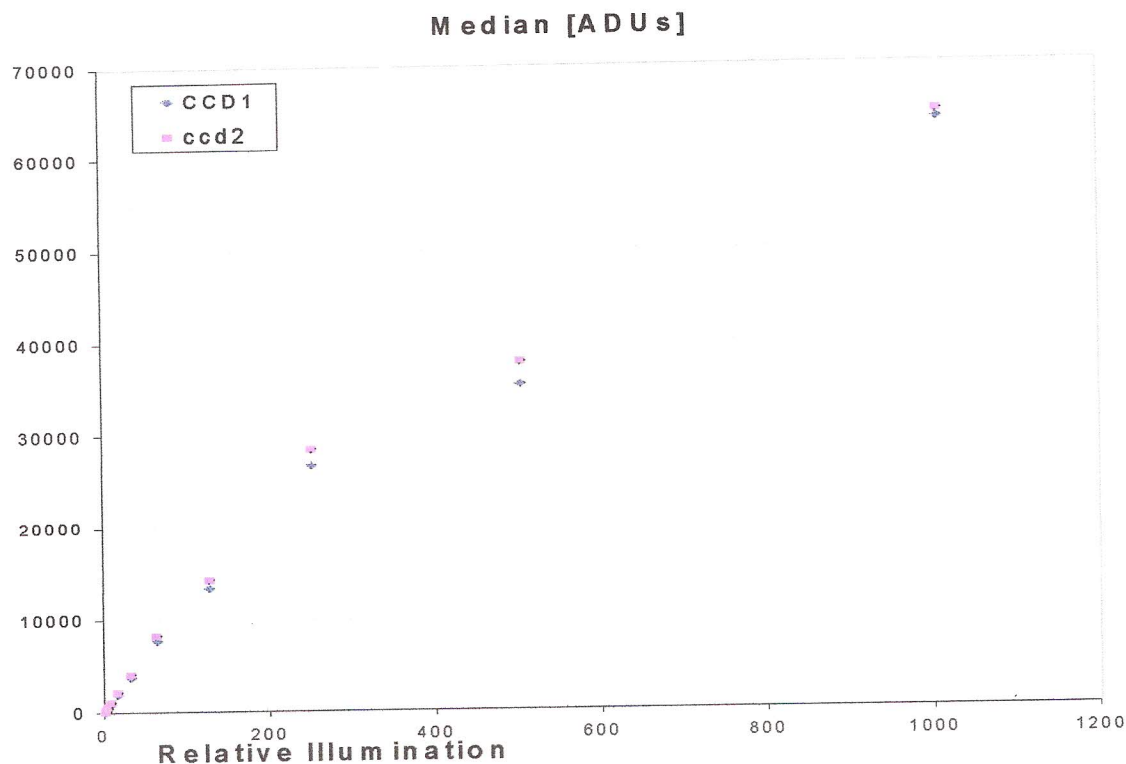


אכן קיבלנו עקומות אופייניות, ניתן לראות כי יש שוני קל בין שני הגלאים, כמו כן ניתן לראות כי השיפוע של העקומות קטן עם הקטנת הטמפ', ולכן מתחת לטמפ' של  $0^{\circ}\text{C}$  (או  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  תלוי ברף הנקבע) אין טעם בקירור נוסף.



בדיקת הלינאריות בעוצמת האור (וויסות האור ע"י שימוש ב Aperture שונים) - זמן חשיפה 150 Sec

| Aperture | Relative Illumination | Median CCD1 [ADUs] | Median CCD2 [ADUs] |
|----------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 1        | 1008.063              | 63848              | 64719              |
| 2        | 504.0313              | 35384              | 37823              |
| 3        | 252.0156              | 26734              | 28512              |
| 4        | 128                   | 13441              | 14362              |
| 5        | 64                    | 7709               | 8265               |
| 6        | 32                    | 3747               | 4091               |
| 7        | 16                    | 1946               | 2170               |
| 8        | 8                     | 911                | 1075               |
| 9        | 4                     | 456                | 593                |
| 10       | 2                     | 192                | 301                |
| 11       | 1                     | 60                 | 142                |



מבחינה תיאורטית מצפים לגרף ליניארי בתחום ערכי הפעולה של הגלאי ומעבר לערך מסוים מצפים שהגלאי יכנס לרוויה. קיבלנו אכן תחום ליניארי אולם צורת הגרף בערכים גבוהים שונה במעט מהמצופה, בפרט עבור הנקודה הלפני אחרונה בגרף, עבודה ניתן היה לצפות שנקבל ערך גבוה יותר. מאחר ושני הגלאים הראו אותה מגמה, ומאחר ולפי בדיקה שלי ה-Aperture הם אכן עם אותו שטח שבית המלאכה טען שהם (ובפרט ה-Aperture הראשון והשני אשר לפי הגרף נדמה שעבור אחד מהם יש טעות), אני מניחה שהבעיה היא עם המבנה בו עשיתי את האפיון אשר כנראה לא מתאים לעוצמות אור גבוהות או שהבעיה היא שצורת המפתח של הצמצמים השונים לא זהה (2 עיגולים/עיגול אחד גדול).

## הנדסת המערכת - רכיבים עיקריים

### • הגלאי בו נשתמש למערכת שלנו (ומאפייניו הרלוונטיים לנו) -

הגלאי הוא גלאי מדגם STL-6303E מחברת SBIG.

מימדיו החיצוניים הם 16.5 X 15.5 X 8.9 cm

מספר הפיקסלים (גודל המטריצה) - 3060 X 2040 pixels

גודל פיקסל בודד - 9 X 9microns

מכאן שגודל המטריצה במ"מ הוא - 27.5 X 18.4 mm

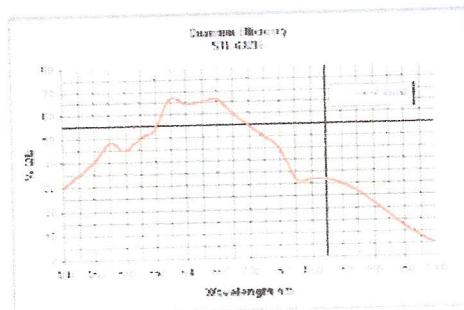
מאפיוני ה CCD לפי נתוני היצרן -

זרם חושך בטמפ'  $-0^{\circ}\text{C}$   $1 \frac{e^-}{\text{pixel} \cdot \text{sec}}$

רעש קריאה -  $15 e^- \text{ RMS}$

יחס ההמרה -  $2.3 e^- / \text{ADU}$

לגלאי הנ"ל יעילות קוונטית גבוהה מאוד, היעילות כפונקציה של אורך הגל נתונה בגרף הבא -



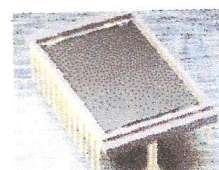
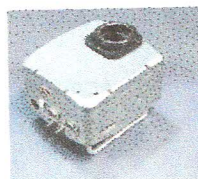
(הגרף הוא מנתוני היצרן עבור הדגם הספציפי בו אנו משתמשים).

הסבר: עבור פוטונים עם אורך גל של 600nm (למשל), היעילות הקוונטית היא של 65%, כלומר רק

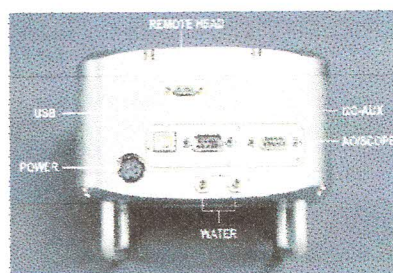
35% מהפוטונים המגיעים לגלאי "נאבדים" ולא מומרים לזרם אלק' כנדרש. היעילות הנ"ל נחשבת לגבוהה

מאוד.

בתמונות הצ'יפ עצמו, תמונה של אריזת ה CCD, ותמונה של תכולת האריזה, בהתאמה



החיבורים :



• דגם העדשה בה נשתמש-

העדשה בה נשתמש היא מדגם Nikkor fisheye של חברת Nikon, מאפיינים:

זווית תמונה של  $180^\circ$ , מרחק פוקלי גדול במיוחד של 10.5mm

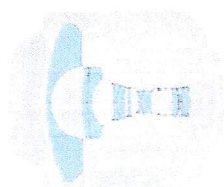
מפתח צמצם (Aperture) מקסימאלי f/2.8

הפוקוס האחורי הוא במרחק 46.67mm

מרחק צילום מינמאלי- כ 140mm

העדשה בנויה מעשר עדשות (מפזרות ומרכזות) שמחולקות לשבע קבוצות, כפי שניתן לראות בתמונה

הבאה:



הזכוכית היא מסוג ED (Extra-Low Dispersion) - כלומר עם דיספרסיה נמוכה מאוד ולכן אברציות

כרומטיות מינימאליות.



(בתמונה לעיל- העדשה בה נשתמש)

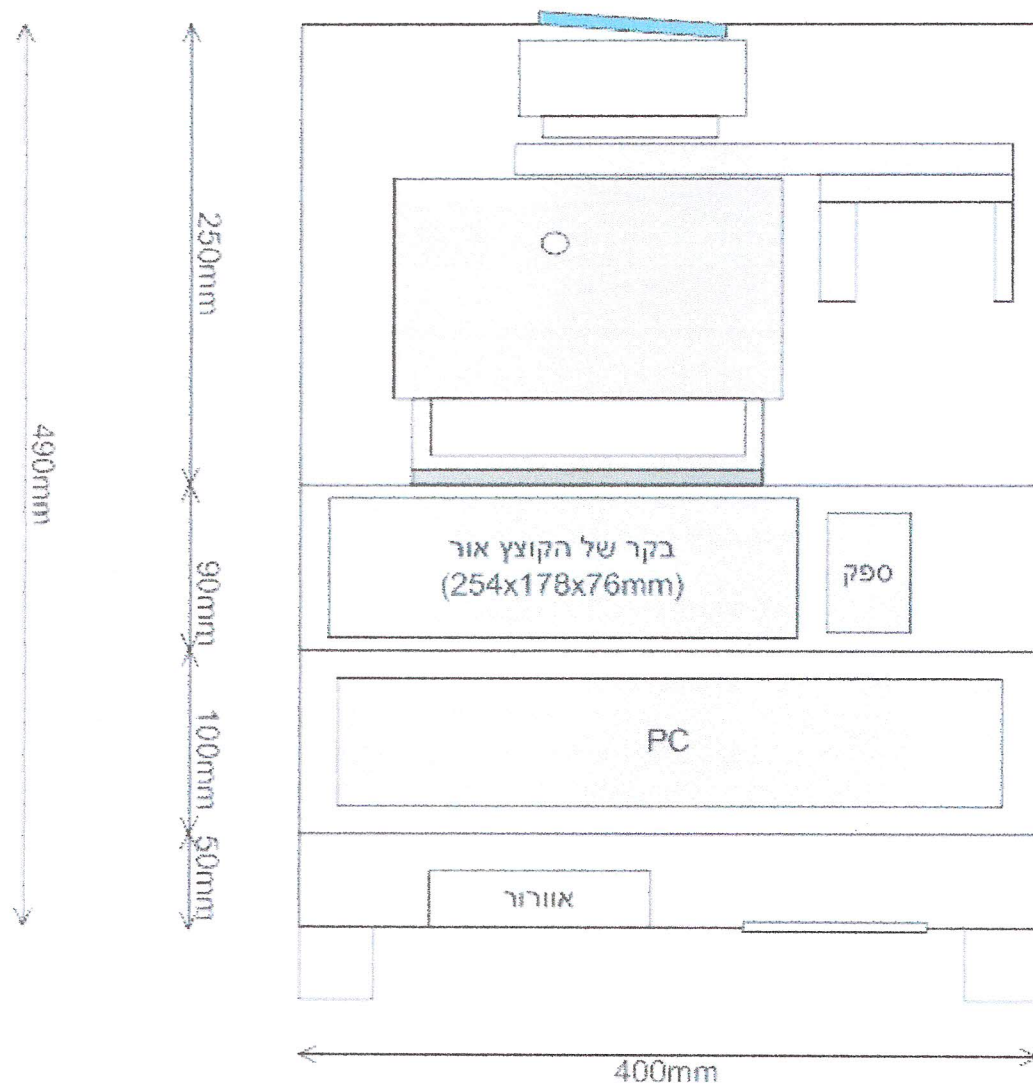
קוצץ אור - ראה מידע בנספחים.



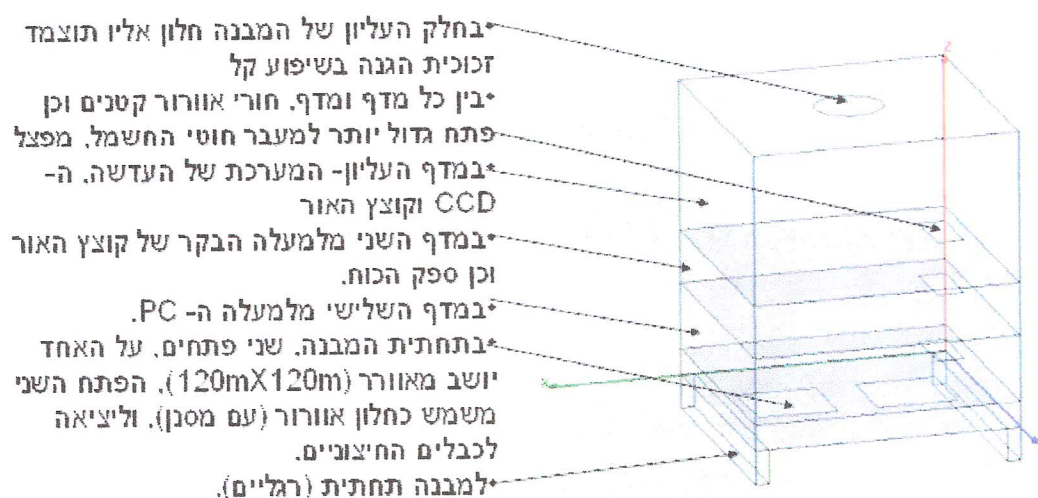
# הגדסת מערכת- תכנון המארז-

התכנון שעשיתי כפי שהוא הוגש לבית המלאכה הוא כדלקמן:

תרשים א':



מידת בסיס 400mmX400mm



תרשים א' נעשה באמצעות התוכנה Visio 2003 (Microsoft), תרשים ב' הוא אותו מבנה רק בתלת מימד, נעשה עם התוכנה HFSS V9 (Ansoft), שני התרשימים הם תוך דגש על מימדים מדויקים.

בקומה העליונה של המארוז העדשה, קוצץ האור וה- CCD (בהתאמה).  
בקומה השנייה (מלמעלה) הבקר של קוצץ האור וכן ספק הכוח.  
בקומה השלישית המחשב, ובקומה התחתונה מהאוורור ופתח נוסף עם מסנן.

המטרה הייתה לשמור על קומפקטיות, שכן המערכת, על אף שמקומה הקבוע הוא מצפה רמון נדרשת להיות עם יכולות שינוע (מטרה זו נלקחה בחשבון גם בעת בחירת הרכיבים, נדרש שיהיו קלים ובמימדים קטנים ככול האפשר).

כדי שגייע אור אל העדשה, על גג המארוז ישנו מפתח שעליו חלון זכוכית דק. מפתח זה אמור לאפשר הגעת אור למערכת, ותפקיד הזכוכית למנוע כניסה של גרגרי חול/ טיפות מים או כל הפרעה אחרת לתוך המערכת. החלון זכוכית יורכב בשיפוע קל על מנת למנוע הצטברות של אבק.  
שטח החלון גדול בהרבה ממפתח העדשה, על מנת לא לפגום בשדה הראייה שלה.  
מעל אותו חלון, תורכב כיפה שקופה, על מנת לתת הגנה נוספת מפני התנאים המדבריים בהם תמצא המערכת.

בין קומה לקומה, מלבד פתחים עבור הקבלים החשמליים, יהיו גם חרירים קטנים למען אוורור המערכת.

הסירקולציה של האוויר היא ע"י שני פתחים, האחד עם מאוורר והשני עם מסנן (על מנת שלא יכנס חול וכו'), הפתחים הנ"ל הם בתחתית המערכת, על מנת למנוע כניסת מים לתוך המבנה.  
מאותה סיבה בדיוק גם כל החיבורים לעולם החיצוני (חשמל, חיבור לרשת) יעשו גם הם דרך פתח בתחתית המערכת.

גם לאחר סגירת המארוז, תהיה אפשרות לפתוח אותו על מנת לעשות כוונונים נוספים גם בעתיד (מרחק עדשה מהגלאי, מיקומה, מהירות קוצץ אור וכו').

בפרויקט לקחתי חלק בליווי פרויקט 4 CONCAM, באפיון הגלאים שישמשו את זוג המצלמות, ובהנדסת המערכת.

המארוזים היום עדין בבנייה בבית המלאכה של בית הספר לפיסיקה, והם עתידים להיות מוכנים בשבועות הקרובים. כאשר המערכות תהיינה מוכנות, אחת המצלמות תמוקם במצפה וויז שבמצפה רמון והשנייה באתר נוסף בצפון הארץ, והן יעברו כיול ולאחר מכן יחליפו את המערכת הקיימת היום (3 CONCAM - מצלמה בודדת).

מסקנות מאפיון הגלאים:

יחסי ההמרה שהתקבלו הם  $2.803 \pm 0.010$  (e-/ADU),  $2.796 \pm 0.014$  (e-/ADU) עבור הגלאי הראשון והשני בהתאמה. שגיאות המדידה היו פחות מחצי אחוז ומקדמי הקורלציה היו גבוהים במיוחד דבר המרמז על דיוק רב בתוצאות, אל אף השוני (כ-20%) ביחס לערך מדפי יצרן. לגבי רעש קריאה - עבור הגלאי הראשון קיבלנו רעש קריאה גבוה במקצת מאשר בגלאי השני, השוני הופך למשמעותי פחות עם קירור הגלאי, ועבור טמפ' הקטנה מאפס מעלות סצלזיוס אין כמעט הבדל. עבור שני הגלאים קיבלנו ערכים גבוהים במקצת מהערך הנתון ע"י היצרן, אולם בשני המקרים ההבדל היה פחות מ 0.8 סטיות תקן. זרם חושך - קיבלנו כי עבור הגלאי הראשון זרם החושך קטן כמעט מאשר בשני, ושניהם קטנים מהערך המסופק ע"י היצרן. קיבלנו כי עבור עוצמות הארה נמוכות הגלאים בקירוב טוב ליניאריים, כמו כן ישנה ליניאריות בעוצמה כפונקציה של זמן החשיפה.



רשימת מקורות-

[1] אתר הפרויקטים של מצפה הכוכבים של האוניברסיטה-  
[/http://wise-obs.tau.ac.il/projects](http://wise-obs.tau.ac.il/projects)

[2] אתר פרויקט CONCAM  
[/http://nightskylive.net](http://nightskylive.net)

[3] Analysis of Meteor Trails Using the Night Sky Live Network of Panoramic CCD Cameras, ליאור שמיר, 2005 אוניברסיטת MTU, מישגן ארה"ב

[4] מאמר על מטאורים  
<http://www.liverpoolmuseums.org.uk/wml/spaceandtime/planetarium/solar-system/meteors.asp>

[5] על מטאורים והשימוש בקוצץ אור (האתר של פרופ' סליגמן, אוניברסיטת קליפורניה ארה"ב)  
<http://cseligman.com/text/meteors/meteors.htm>

[6] מידע על מטאורים מאתרי NASA  
על מטאורים מתוך NASA  
<http://liftoff.msfc.nasa.gov/Academy/SPACE/SolarSystem/Meteors/meteors.html>

<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Meteors&Display=Gallery&Page=2>

[6] כיול CCD  
<http://www.astrophys-assist.com/educate/noise/noise.htm>

[7] הגדרה של באיס, תמונת חושך וכו'  
<http://users.libero.it/mnico/glossary/>

[8] תהליך הרידוקציה  
<http://astro.corlan.net/gcx/html/node7.html>

[9] עדשת עין הדג-אתר עם מידע כללי-  
<http://www.mir.com.my/rb/photography/hardwares/classics/olympusom1n2/shared/zuiko/htmls/fish8mm.htm>

[10] העדשה בה אנו משתמשים-  
<http://pano.maandag.com/index.php?id=57>

[11] מאמר על חישוב מהירות מטאורים  
<http://www.copernicus.org/EGU/acp/acpd/4/109/acpd-4-109.pdf>

[12] אתר Astronomy Picture of the Day של נאסה  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050812.html>

[13] לגבי גלאי CCD- ויקפדיה-ארה"ב

<http://he.wikipedia.org/wiki/CCD>

[14] מידע נוסף על גלאי CCD

<http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/ccd1/ccd1.html>

[15] חברת sbig, מידע לגבי הגלאים שלנו

<http://www.sbig.com/pdffiles/ST-L%20Operating%20Manual.pdf>

[http://www.sbig.com/pdffiles/cat\\_stl.pdf](http://www.sbig.com/pdffiles/cat_stl.pdf)

[16] מידע לגבי קוצץ אור

[http://www.scitec.uk.com/optical\\_chopper/340cd](http://www.scitec.uk.com/optical_chopper/340cd)

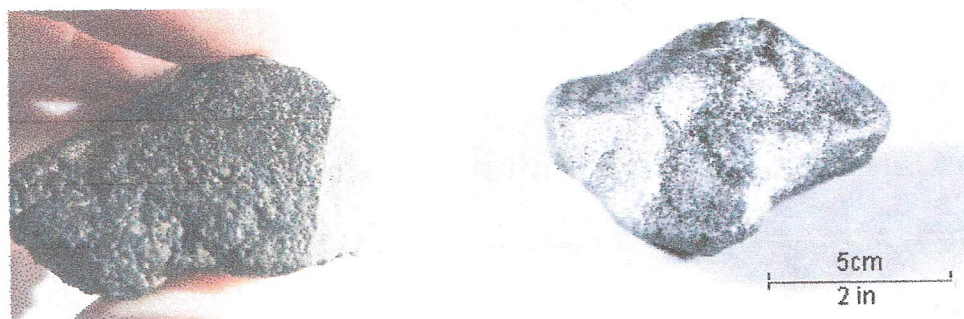
## נספחים



## מטאורים

כאמור לעיל, אחת המטרות העיקריות למענה הוחלט להחליף את מערכת ה-CONCAM במערכת אותה מלווה פרויקט זה היא צילום של מטאורים.

השם מטאור (Meteor) בא מהמילה היוונית meteoron אשר בתרגום חופשי לעברית אומרת "דבר בשמים", מטאורים ידועים גם בשפה הלא מקצועית כ-"כוכבים נופלים". מטאורואידים (meteoroids) הם גופים מוצקים, הנעים בחלל. הם שאריות של עצמים השייכים למערכת השמש שלנו (למשל מטאורים מכוכב הלכת מאדים) או כוכבי שביט שהתפרקו וגודלם הוא כגרגיר חול או גדול בהרבה (בתמונות 2 דוגמאות למטאוריט-שאריות מטאוריד שנמצאו על כדור הארץ).



בעת הכניסה לאטמוספירה כדור-הארץ, מהירות המתאוריד גבוהה מאוד (רבים מהם אף במהירויות של 70 ק"מ לשנייה!), במהלך מסע זה דרך האטמוספירה, המתאוריד מתנגש עם מולקולות האוויר, דבר היוצר שובל של אטומים מיוננים בנתיב מעבר המתאוריד, כאשר אטומים מיוננים הנותרים תופסים חזרה אלקטרון, אור נפלט. ולכן המתאוריד משאיר אחריו שובל של אור, זנב זה נקרא מטאור. ציורים של מטאורים הממחישים את התופעה הנ"ל-



תמונות אמיתיות של מטאורים-

צולם מעל- Northwest Des Moines



מטר מטאורים (מטר זה נקרא מטר לאונידים, והוא מתרחש פעם בשנה)



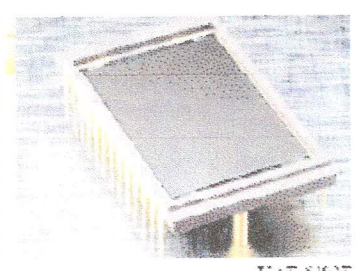
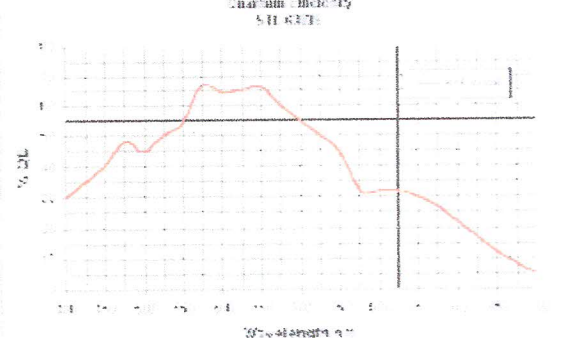
ישנם מטאורידיים שמתפרקים בשכבה העליונה של האטמוספירה (בעיקר תלוי בחומר ממנו עשוי המטאוריד), ויש שעוברים את השכבות הראשונות של האטמוספירה, אך בוערים כליל לפני ההגעה לפני כדור הארץ. חלקיקים מהמטאוריד אשר לא מתאדים באטמוספירה ונוחתים על כדור"א נקראים מטאוריטים (ראה תמונות לעיל).

הארכה היא שבין אלף לעשרת אלפים טון של חומר מטאוריטי נופל על כדור"א בכל יום, אולם מרבית החומר הוא בגודל מקרוני, חלקיקים אלו כה קטנים שהתנגדות האוויר להם כה נמוכה שלא נוצרת בעירה והם נוחתים להם בשקט על כדור הארץ.

בשעות הלילה ניתן לצפות במספר "כוכבים נופלים" (מטאורים), לעיתים מספר המטאורים הנצפים במקביל רב בהרבה, תופעה זו נקראת "מטר מטאורים".

תופעה מרהיבה במיוחד היא תופעת ה fireballs, שהם מטאורים בהירים במיוחד, אשר עלולים להיות אף יותר בהירים מכוכבי הלכת של מערכת השמש, ולעיתים בהירותם כזו שאף ניתן להבחין בהם באור יום.



| Model STL-6303E Typical Specifications                                                                                                            |                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CCD SPECIFICATIONS                                                                                                                                |                                                                                                                                           |
| Imaging CCD                                                                                                                                       | Model Enhanced KAF-6303E                                                                                                                  |
| Pixel Array                                                                                                                                       | 5050 x 1040 pixels, 27.5 x 13.4 mm                                                                                                        |
| Total Pixels                                                                                                                                      | 5 million                                                                                                                                 |
| Pixel Size                                                                                                                                        | 9 x 9 microns                                                                                                                             |
| Full Well Capacity (NAB-G)                                                                                                                        | 100,000 e <sup>-</sup>                                                                                                                    |
| Dark Current                                                                                                                                      | 0.3e <sup>-</sup> /pixel/second @ 0 degrees C                                                                                             |
| Antiblooming                                                                                                                                      | NAB-G standard, AB-G optional                                                                                                             |
| READOUT SPECIFICATIONS                                                                                                                            |                                                                                                                                           |
| Shutter                                                                                                                                           | Electromechanical                                                                                                                         |
| Exposure                                                                                                                                          | 0.12 to 5600 seconds, 10nm resolution                                                                                                     |
| Correlated Double Sampling                                                                                                                        | Yes                                                                                                                                       |
| A/D Converter                                                                                                                                     | 16 bit                                                                                                                                    |
| A/D Gain                                                                                                                                          | 1.4e <sup>-</sup> ADU/uniform, 1.3e <sup>-</sup> binned                                                                                   |
| Read Noise                                                                                                                                        | 13.5e <sup>-</sup> RMS                                                                                                                    |
| Binning Modes                                                                                                                                     | 1 x 1, 2 x 2, 4 x 4                                                                                                                       |
| Full Frame Download                                                                                                                               | 1e <sup>-</sup> /second                                                                                                                   |
| SYSTEM SPECIFICATIONS                                                                                                                             |                                                                                                                                           |
| Cooling - standard                                                                                                                                | Two-Stage Thermoelectric, Water Cooler, -30 C from Ambient Typical                                                                        |
| Temperature Regulation                                                                                                                            | ±0.1°C                                                                                                                                    |
| Power                                                                                                                                             | 10-18WDC, 11VDC nominal, Universal AC to 11VDC, Redtop supply                                                                             |
| Computer Interface                                                                                                                                | USB 1.1                                                                                                                                   |
| Computer Compatibility                                                                                                                            | Windows 95/NT, 2000, Mac OS 9/10, Linux                                                                                                   |
| Guiding                                                                                                                                           | Dual CCD 16/5 Guiding Standard, Remote Guiding Head Optional                                                                              |
| PHYSICAL SPECIFICATIONS                                                                                                                           |                                                                                                                                           |
| Dimensions                                                                                                                                        | 6.1 in x 3.9 in (15.5 cm x 9.9 cm)                                                                                                        |
| Weight                                                                                                                                            | ~ pounds, 1.3 kg, without filters                                                                                                         |
| Internal Filter: Caretrel                                                                                                                         | 5 positions for 40nm threaded red, or 2" transmittance filter (optional)                                                                  |
| Mounting                                                                                                                                          | 2" nosepiece included                                                                                                                     |
| Backdoor                                                                                                                                          | Approximately 1" inches, 6-4.5 mm, with 2" nosepiece attached                                                                             |
|  <p>KAF-6303E<br/>Quantum Efficiency<br/>Spectral Response</p> |  <p>Quantum Efficiency<br/>% QE<br/>Wavelength nm</p> |





- The first fisheye lens developed exclusively for use with Nikon DX Format
- Ultra wide picture angle of 180 degrees on DX sensor achieved by producing a smaller image circle (the size of the image that is projected by the lens on to the sensor) enabling smaller lens diameter, lighter weight and optimal image quality from center-to-edge-to-corner on the image.
- Equivalent to 16mm focal length on 35mm
- Minimum focus distance of 0.14m (5.5 in.), or 0.03m (1.2 in.) from the lens front, makes extreme close-ups possible
- Close-Range Correction (CRC) provides high performance for sharper images when taking pictures up close
- Extra-Low Dispersion (ED) glass element minimizes chromatic aberration
- Design enables a combination of wider angle-of-view with optical characteristics that are optimized for Nikon digital SLR camera sensors
- Nikon D-type design provides precise distance information for flash and ambient light exposure processes
- Rounded diaphragm to make out-of-focus elements appear more natural
- G Type DX Nikkor is designed exclusively for use with Nikon Digital SLR models
- Built-in Flower Type lens Hood
- Fully Compatible with D1, D1X, D1H, D2H, D100, and D70

## Specifications

|                                |                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| Focal Length                   | 10.5mm                                   |
| Maximum Aperture               | f/2.8                                    |
| Picture Angle (D SLR)          | 180 degrees                              |
| Lens Construction              | 10 elements in 7 groups                  |
| Extra Low Dispersion (ED) Lens | 1 ED Element                             |
| Minimum Shooting Distance      | Approx. 5.5 inches                       |
| Max. Reproduction Ratio        | 1:5                                      |
| Minimum F stop                 | 22                                       |
| Aperture Blade                 | 7 elements (Rounded)                     |
| Lens Hood                      | Built-In Flower Type                     |
| Filter Size                    | Rear of lens, Gel filter holder built-in |
| Case                           | CL-08715 Soft Case                       |
| Diameter x Length              | Approx. 2.5x 2.5 inches                  |
| Weight                         | Approx. 10.8 oz.                         |
| Includes                       | CL-0715 Soft Case, lens cover, rear cap  |

בפרויקט לקחתי חלק בבניית מערכת 4 CONCAM - מערכת שתי מצלמות Whole-Sky מבוססות CCD, לצילום פנורמי וסטראוסקופי של מטאורים בנוסף לתמונת שמיים רגילה. המצלמות כוללות קוצץ אופטי על מנת שניתן יהיה להסיק את המהירות הזוויתית של מטאורים ועצמים מהירים שנקלטו בתמונה וכן הסקת מידע פיסיקאלי רלוונטי נוסף, כמו כן, מאחר ומדובר בשתי מצלמות שימוקמו בשני אזורים שונים בצפון הארץ ויעבדו במקביל, ניתן יהיה להשתמש בשיטת הפרלקסיה ולזהות את מיקום המטאור במרחב, לגלות מיקום תחילת/סוף בעירתו באטמוספירה, גילוי האורך האבסולוטי של מסלול המטאור בשמים, ולעיתים אף אינדיקציה לגבי המיקום בו שאריות המטאור (מטאוריט) נחתו על פני כדה"א הארץ. המערכת עתידה לשמש את מצפה וויז, מצפה הכוכבים של אוניברסיטת ת"א במצפה רמון, בין היתר כחלק מהפרויקט הבין-לאומי CONTinuous CAMera המאפשר גישה חופשית דרך האינטרנט (<http://nightskylive.net>) לתמונות שמים עדכניות ממקומות שונים בעולם.

תפקידי בפרויקט-

- ביצוע אפיון של שני גלאי ה-CCD:  
רעש קריאה כתלות בטמפ', עקום הענות, מציאת מקדם ההמרה, ליניאריות כתלות בזמן, זרם חושך, ליניאריות כתלות בעוצמת הארה ועוד.
- הנדסת מערכת:  
תכנון שני המארזים תוך התחשבות בשיקולים שונים.
- ליווי כללי של הפרויקט.

**המנחה** - ד"ר נוח ברוש, מרצה וחוקר בפקולטה למדעים מדויקים, ומנהל מצפה הכוכבים של אוניברסיטת ת"א (במצפה רמון). טל - 03-6407414, פלאפון - 054-4752912, email - [noah@wise.tau.ac.il](mailto:noah@wise.tau.ac.il)  
**הסטודנטית** - חוה זלכה, ת"ז 039300041, פלאפון - 050-7555025, email - [havazilk@post.tau.ac.il](mailto:havazilk@post.tau.ac.il)