



דוח מעבדה: הולוגרפיה

מגיישים:

לב ארמן ת.ז. 314371675

ולדי פנקרושין ת.ז. 320688914

מדריך:

פתחה הלוי

מנחה אקדמי:

יוג'ין פרומקה

תאריך 5/6/22

תוכן עניינים

1. מבוא ותיאוריה.....	3
1.1. הולוגרמיה.....	3
1.2. גלי אור	3
1.3. התאבכות.....	5
1.4. Kohärenz-Visibility	6
1.5. עקיפה (Diffraction)	7
1.6. Speckles	9
1.7. הולוגרמיה – הקלטה ושחזר	10
2. ניסוי מס' 1 – קבלת תמונה על ידי הולוגרפיה	15
2.1. מטרות הניסוי	15
2.2. תיאור המערכת	15
2.3. מהלך הניסוי – הרכבה וחישובי עוז	16
2.4. תוצאות הניסוי ועיבודן	18
2.4. דיוון בתוצאות ומסקנות	21
3. ניסוי מס' 2 – שינוי עצמת קרן רפנס	22
3.1. מטרות הניסוי	22
3.2. תיאור המערכת ומהלך הניסוי	22
3.3. תוצאות הניסוי ועיבודן	23
3.4. דיוון בתוצאות ומסקנות	25
4. ניסוי מס' 3 – שינוי זווית בין הקרניזים	26
4.1. מטרות הניסוי	26
4.2. תיאור המערכת ומהלך הניסוי	26
4.3. תוצאות הניסוי ועיבודן	26
4.4. דיוון בתוצאות ומסקנות	29
5. ניסוי מס' 4 – שינוי זמן חשיפה	30
5.1. מטרות הניסוי	30
5.2. תיאור המערכת ומהלך הניסוי	30
5.3. תוצאות הניסוי ועיבודן	30
5.4. דיוון בתוצאות ומסקנות	36

6. ניסוי הרחבה – צילום אש והשפעת טמפרטורה	37
6.1 מטרות הניסוי	37
6.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי	37
6.3 תיאוריה נוספת וחישוב צפי התוצאות.....	38
6.4 תוצאות הניסוי ועיבודן.....	40
6.5 דיוון בתוצאות ומסקנות.....	47
7. סיכום ומסקנות	50
8. הצעות לשיפור הניסוי	50
9. רשימת מקורות	51
10. נספחים.....	53
נספח 1 – קוד ביצוע שחזור התמונה.	53

1. מבוא ותיאוריה

1.1. הולוגרפיה

בחיי היום-יום שלנו אנחנו מוקפים בתמונות בכל מקום. תמונה אלה הן בעצם היטל דו-מימדי של עולם תלת-מימדי המבוצע באמצעות הקלטה של עצמת האור המוחזר מהסביבה. תמונה במובן הרגיל שאנו מכירים זו מדידה של אמפליטודת השدة האלקטרומגנטי. במאה ה-20 היו מספר פריצות דרך שאפשרו להקליט את האופי התלת-מימדי של העולם, בין היתר בזכות הholוגרפיה הדיגיטלית. לעומת זאת, בholography ניתן לשחרר גם את עצמת השدة האלקטרומגנטי וגם הפאזה מהאובייקט. בפרט בזכות holography דיגיטלית ניתן גם להקליט את הפאזה מהאובייקט ולא רק את העוצמה.

הקלטה הholography מתבצעת בזכות מידת תבנית התאבכות בין שתי קרניים, קרן אחת המוחזרת מהאובייקט (object wave – קרן אובייקט) וקרן נוספת לא מופרעת (reference wave – קרן ייחוס). שתי השיטות בהולוגרפיה הן אנלוגית ודיגיטלית, כאשר בהולוגרפיה אנלוגית המדידה מתבצעת על לוחית צילום ושהזורה התמונה מתבצעת בזכות הקרינה של קרן הייחוס על אותה לוחית. בהולוגרפיה דיגיטלית ההקלטה מתבצעת במכשיר (CCD – Charged Coupled Device) והשוחר הוא נומרי במחשב. בניסוי שלנו אנחנו משתמשים בהולוגרפיה דיגיטלית.

1.2. גלי אור

עוד מתחילת המאה ה-20 בני אדם ידעו שלאור יש תכונה של דואליות חלקיק-גל, המאפשרת להסביר תופעות שונות. בغالל שבניסוי שלנו אנחנו מודדים את תבנית התאבכות של קרני האור, נתיחס לאור כאור כל אחד אלקטרומגנטי המתקדם בכיוון קרן האור. תנודות השדה החשמלי והמגנטי יהיו בניצוב לכיוון ההתקדמות ובניצוב אחד לשני. תיאור הגל מתקובל ממשוואות מקסול בריק, והפתרון של משוואת הגלים. משוואות מקסול:

$$(1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 ; \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} ; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 ; \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

משוואות הגלים בריק:

$$(2) \quad \nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 ; \quad \nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

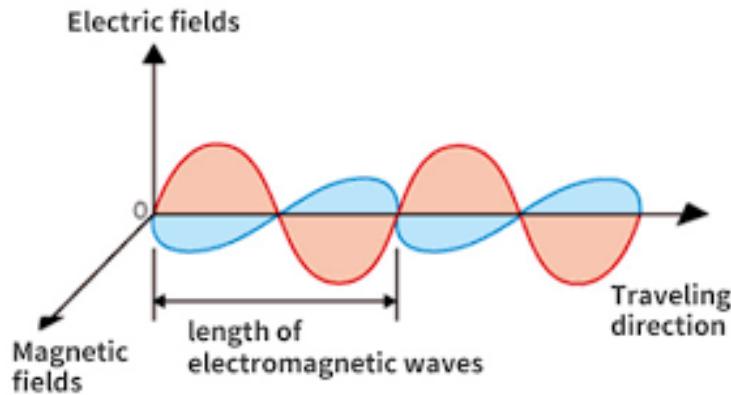
כאשר: ∇ זו הנבללה, $\Delta \equiv \nabla^2$ זה הלפלסיאן, E זה השדה החשמלי, B השדה המגנטי ו- c זו מהירות האור.

הפתרון למשוואת הholography פונקציה מהזורה, שניתן לרשום בצורה ממשית (קוטינוס/סינוס) או מרוכבת (אקספוננט של איילר):

$$(3) \quad \vec{E}(t, \vec{r}) = \vec{A} \cos(\omega t - \phi) = \vec{A} R e\{e^{i\omega t - \phi}\} = \vec{C} R e\{e^{i\omega t}\}$$

$$\phi \equiv \vec{k} \cdot \vec{r} - \phi_0, \vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}, \vec{C} = \vec{A} e^{-i\phi}$$

$\vec{k} = |\vec{k}| \hat{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{k}$ קואורדינטות קרטזיות, ω תדירות, ϕ_0 פאזה ההתחלתית של הgal, \hat{k} וקטור gal המצביע בכיוון התקדמותו וקיים: $\vec{C} \perp \hat{k} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$ אמפליטודה מרוכבת.



איור 1: איור של גל אלקטרומגנטי, [10]

טווח אורך הgal עבר אוור נראה הוא $790THz - 400nm$, ובמנחי תדר $780nm - 400nm$. מפני שהמדידה מתבצעת על פרקי זמן גדולים ביחס למחזור הgalim, בפועל מודדים עוצמה ממוצעת בעזרת הנוסחה:

$$(4) \quad I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle_t = \epsilon_0 c \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T E^2 dt$$

ϵ_0 המקבם הדיאלקטרי של הריק. אם נציב את הפתרון ממשוואה (3) לתוך (4) נקבל:

$$(5) \quad I = \epsilon_0 c A^2 \langle \cos^2(\omega t - \phi) \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c A^2$$

אנחנו יכולים לראות שהעוצמה פרופורציונית לאמפליטודה בריבוע, לכן נוכל לרשום:

$$(6) \quad I \propto |A|^2$$

כאשר A האמפליטודה.

1.3. התאבכות

על מנת למדוד עוצמה של מספר גלים, בעזרת עיקרון הסופרפוזיציה, מספיק לנו לסכום את הגלים המגיעים לאוֹתָה נקודה. התופעה של סכימת הגלים נקראת התאבכות וניתן לתאר אותה כך:

$$(7) \quad \vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_i \vec{E}_i(\vec{r}, t)$$

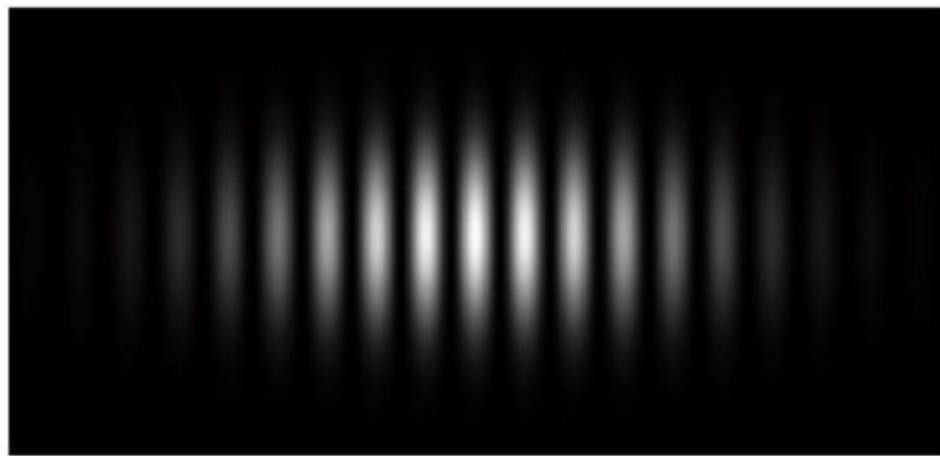
כאשר מסתכלים על מספר גלים המתאימים על משטח נקבע תבנית עם אזורים ברמת בהירות שונה, זהה תקרא התבנית התאבכות. ההבדלים בבהירות נובעים מהעובדה שהיחסות של גלים שונים מגיעות עם פאות שונות המשפיעות על עוצמת השدة בנקודה. את התפלגות העוצמה כתלות בפזה נוכל לתאר בעזרת האמפליטודה המרוכבת ונוסחה מס' (6). לשם פשוטות נניח כי יש לנו 2 גלים מונוכרומטיים עם אותו קויטוב:

$$(8) \quad A_{tot} = A_1 e^{-i\phi_1} + A_2 e^{-i\phi_2} \Rightarrow I \propto |A_{tot}|^2 = |A_1 e^{-i\phi_1} + A_2 e^{-i\phi_2}|^2 \\ = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$$

כאשר $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ הפרש הפאות.

נניח לראות שקיבלונו שהעוצמה של סופרפוזיציה של שני גלים היא סכום העוצמות ועוד איבר חורoba. החלוי בהפרש הפאות. נתמקד באיבר החורoba ונבחן מקרים ספציפיים:

- .i. $\Delta\phi = 2\pi n, n = \mathbb{N}$: קיבל מקסIMUM בהירה וזו תיירא התאבכות בונה.
- .ii. $\Delta\phi = 2\pi(n+1), n = \mathbb{N}$: קיבל מינIMUM הירה וזו תיירא התאבכות הורסת.



איור 2: דוגמה לבניית התאבכות, [10]

כעת נרצה לתאר את המרחק בין מקסIMUM אחד לשני כתלות בזווית הגל ביחס למשטח. בעזרת גיאומטריה פשוטה נוכל לחשב את הזוויות, מאIOR 3 קיבל:

$$(9) \quad \frac{d}{\Delta l_2} = \sin \theta_2, \frac{d}{\Delta l_1} = \sin \theta_1$$

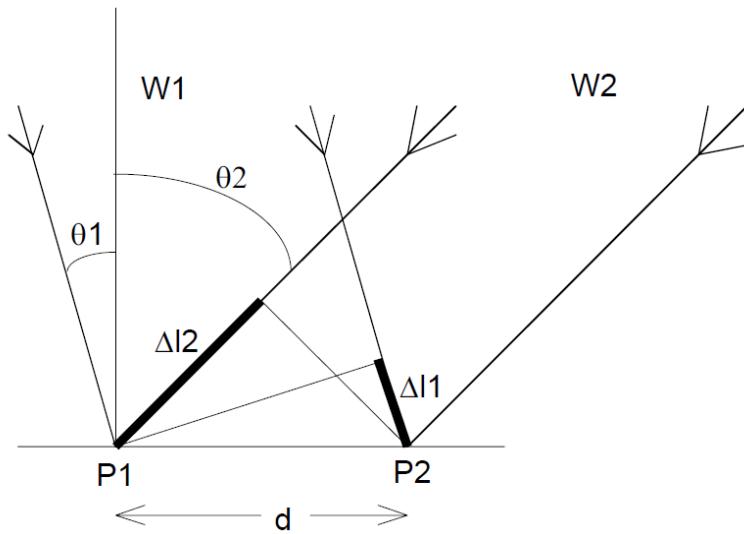
כאשר θ_1, θ_2 הן הזוויות בין כיוון התקדמות של הגל לנורמל למשטה Δ_1, Δ_2 , זה הפרשי המרחק שכל גל עבר.

על מנת לקבל התארכות בונה נדרוש כי סך הפרשי המרחקים יקיים: $\lambda = \Delta_1 + \Delta_2$, כאשר λ אורך גל.

$$(10) \quad d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2} = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}} \approx \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

$$\theta \equiv \theta_1 + \theta_2$$

במשוואה הנ"ל הנחנו כי הזוויות קטנות כך ש: $\theta_1 - \theta_2 \ll 1 \Rightarrow \cos(\theta_1 - \theta_2) \rightarrow 1$



איור 3: תיאור המרחק וההתארכות בין שתי נקודות מקסימום, [10]

1.4. Kohärenz ו-Visibility

באופן כללי בהינתן שני מקורות אור שונים, עצמתם באור שלהם יחד היא פשוט סכום העוצמות של כל מקור בנפרד. התוצאה תהיה פשוט אзор מואר באופן אחד ולא תבנית של אזורים מוארים יותר ופחות. על מנת לקבל תבנית התארכות נדרוש שלפאות של הגלים השונים תהיה קורלציה מיוחדת. קורלציה זו נקראת Kohärenz ו-visibility או אינדייקציה ליכולת האור להתאבך. קיימים שני סוגים של Kohärenz ו-visibility, מרחבית וזמןית.

Kohärenz ו-visibility מתרמת את הקורלציה של פאות הגל בנקודות שונות בכיוון התקדמות הגל. בambilם אחרת זוהי הקורלציה של הגל עם עצמו בזמןים שונים והוא מהו אינדייקציה לכמה המקור מונוכרומטי.

קוהרנטיות מרחבית מתארת את הקורלציה של פאות הgal באזוריים שונים למרחב. במקרים אחדות זהי הקורלציה של פאות הgal בנקודות שונות בחזית הgal והוא מהויה אינדיקציה לכמה איחוד חזית הgal.

כאשר אנחנו מדברים על קוהרנטיות, נרצה להגדיר גודל מייצג שהוא נוכל למדוד והוא יציג את ההגבלה על יכולת הgal להתאבך. גודל זה נקרא אורק קוהרנטיות והוא מייצג את הפרש הדרכיים האופטיות בין שני הgalים, כך שגם הפרש הדרכיים האופטיים יהיה גדול יותר מאשר הקוהרנטיות תבנית התאבסכות תיעלם ונקבל פשטוט בהירות איחודה. אורק קוהרנטיות נובע מהדרישה להתאבסכות, שהיא יחס פאות קבוע בין חזיות הgal המתאבסכות.

עבור אורק קוהרנטיות L ניתן להגדיר זמן קוהרנטיות τ :

$$(11) \quad \tau = \frac{L}{c}$$

כאשר c היא מהירות האור.

בעזרת אנליזות פורייה חבילת גלים עם אורק סופי מתאימה את עצמה לאור עם רוחב פס סופי Δf ונitinן לרשום את משואה (11) כך:

$$(12) \quad L = \frac{c}{\Delta f}$$

אור עם אורק קוהרנטיות גדול יקרא מונוכרומטי. למיניות הארה רגילות יש אורק קוהרנטיות קטן (מספר מיקרומטרים) ואילו הטווח הקוהרנטי של הליזר נع בין כמה מ"מ (לייזר דיזה) ואף יכול להגיע למספר ק"מ (לייזר של *LIGO*).

הנראות (*visibility*) של gal אור מונוכרומטי (כלומר יכול ליצור תבנית התאבסכות) תחשב בעזרת נוסחה (8) כך:

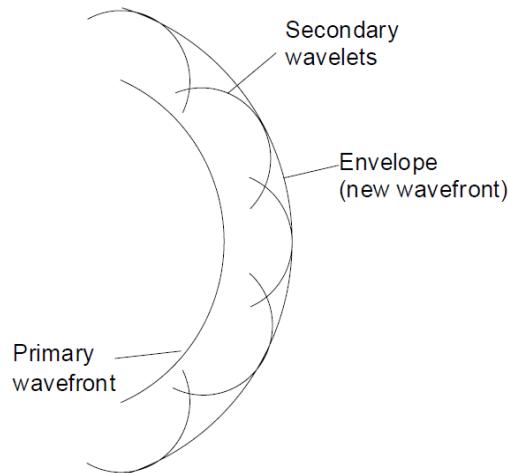
$$(13) \quad V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

הנראות היא ממד לניגוד (*contrast*) בתבנית התאבסכות. כאשר I_{max} וה I_{min} הן העוצמות של מקסימום ומינימום שכנים בתבנית התאבסכות. אולם נקבל בעזרת הצבה של $\pi = 0, \Delta\phi_{min} = \Delta\phi_{max}$ בנוסחה (8). הנראות כמדד לניגודיות של התבנית התאבסכות מהויה פרמטר חשוב על איכות התמונה המשוחזרת. ככל שהניגודיות של התבנית התאבסכות גבוהה יותר, היא ברורה יותר מה שMOVIL לתמונה משוחזרת יותר ברורה. לכן בניסוי נדרש שעוצמת קרן היחס וקרן האובייקט יהיו כמה שיוצר דומות.

1.5. עקיפה (Diffraction)

במקרה של gal אור אשר עובר בתוך אטום הלקית(תוך שקוּף עם מכשולים אטומים בתוכו) או מכשול בדרך של הgal, אנחנו נראה צל אзор מואר באופן אחד. במקרה והמכשולים הם בסדר גודל של האור גל תיווצר התבנית התאבסכות בקצוות הצל, תופעה זו נקראת עקיפה. את תופעת העקיפה ניתן להסביר בעזרת עיקנון הוגינס

שאומר שניתן להתייחס לכל נקודה בחזית הגל כמקור או רקע גל או כדור, וחזית הגל הראשי היא בעצם סופרפוזיציה של אותם גלים.



איור 4: ויזואלייזציה של עיקנון הויוגנס, [10]

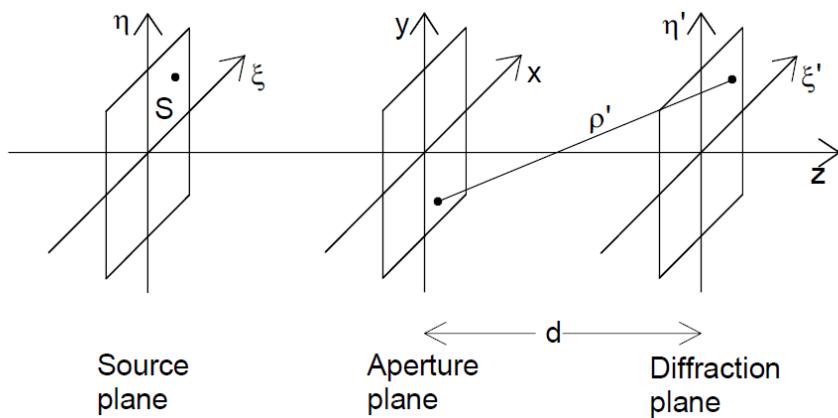
אינטגרל פרנל-קיירכהוף מתאר את תופעת העקיפה בצורה כמותית במישור התמונה:

$$(14) \quad \Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(x, y) e^{-\frac{i2\pi}{\lambda}\rho'}}{\rho'} Q dx dy$$

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$$

$$Q = \frac{1}{2} (\cos \theta + \cos \theta')$$

על מנת להסביר את האינטגרל, נשתמש באירור הבא:



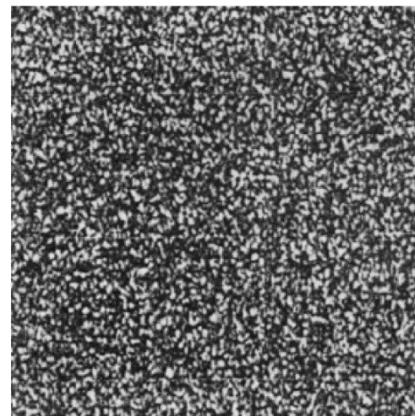
איור 5: תיאור מערכת העקיפה והאלמנטים במישורים השונים, [10]

מתאר לנו את הגיאומטריה של הסדק או הנקב, ρ' זה המרחק בין מישור הסדק למישור העקיפה $A(x, y)$, והמישור (ξ', η') הוא מישור המקור של האור, θ היא הזווית בין קרן האור המגיעה לנורמל המשטח

ו- θ . היא הזווית בין קרן האור היוצאת לנורמל המשטח. על ידי עיקרון הוייגנס האור היוצא ממיישור המקור הינו כדורי והוא ממשיך עד לפגיעה במישור הסדק, שנחשב לעוד מקור של אור כדורי וכאמור כל מקור אור כדורי כזה הוא בפני עצמו הרבה מאוד כדורים וכך הלאה. לכן פועלות האינטגרל חשובהפה כי היא מסכמת את כל אותן מקורות אור כדוריים.

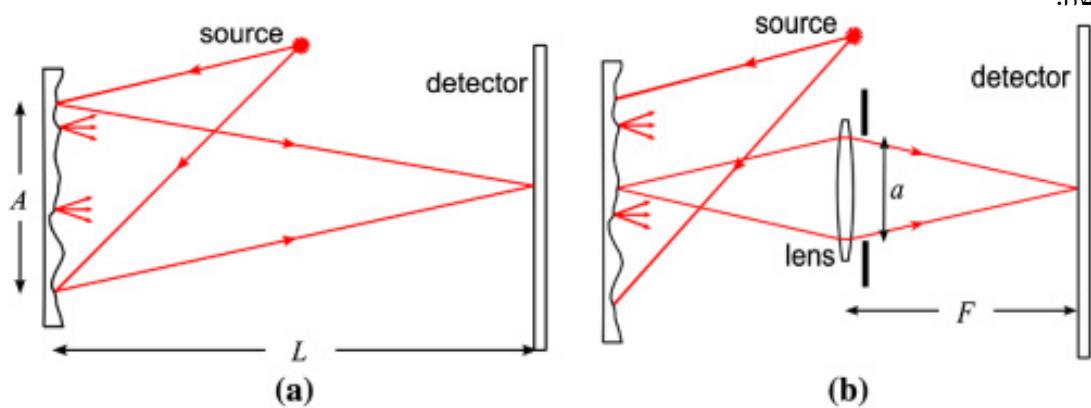
Speckles .1.6

כאשר אור מונוכרומטי פוגע באובייקט מהוספס, האור מוחזר לכל הכוונים בגלל שפנוי המשטח לא חלק. תבנית התבניות שתיווצר מההחזר תיראה כתבנית של רעש סטטי (אוסף של נקודות כהות ובהירות) והיא נקראת speckles. התבנית נוצרת בגלל הפרשי גבהים על פני השטח של האובייקט, כאשר התנאי להיווצרות התבנית היא שהפרשי הגבהים על פני המשטח יהיו גדולים מארך הגל של האור.



איור 1 : דוגמא למבנה speckles [10]

קיימים שני סוגי של מבני speckles: מבנית אובייקטיבית וסובייקטיבית. מבנית אובייקטיבית נוצרת על מסך במרקם מסוים מהאובייקט המואר. מבנית סובייקטיבית נוצרת כאשר האור המוחזר מהאובייקט מרוכז דרך עדשה.



איור 9 : (a) – objective speckles (b) subjective speckles [10]

בניסוי שלנו אין עדשה בין האובייקט למסק (בניסוי שלנו זו מצלמת CCD), לכן מבנית ה-speckles היא אובייקטיבית. גודל speckle נתון לחישוב בעורלת נוסחה (12):

$$(15) \quad f_{max} = \frac{2}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right) \approx \frac{L}{\lambda z}$$

$$d_{sp} = \frac{\lambda z}{L}$$

עבור גודל speckle, d_{sp} , אורך גל, λ גודל האובייקט ו- z מרחק האובייקט מהמצלמה.

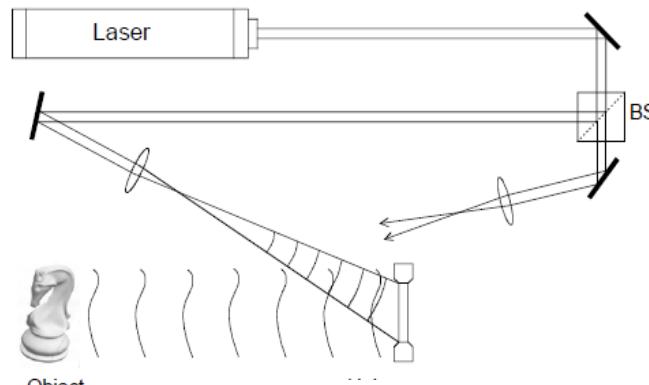
1.7. הולוגרפיה – הקלטה ושהזור

הholוגרמות בדרך כלל מוקלחות בעזרת מערכת אופטית המכילה מקור אור (לייזר), מערכות של מראות, עדשות ורכיבים אופטיים נוספים (מפצל קרנינים, מקטבים וכדומה) ומיכשיר הקלטה, בניסוי שלנו המכשיר הוא מצלמת CCD. בניסוי שלנו אנחנו מרכיבים את המערכת כך שהקלטה מתבצעת בצורה א-צירית, כלומר קרן האובייקט וקרן היחסות בזווית שוניות למצלמה. אנחנו מבצעים זאת על מנת לקבל בשזרור הפרדה מרחבית בין איבר DC, התמונה הווירטואלית והמשית (פירות המשך). בתהליך המתואר בפרק 1.1, מתבלטת בצלמה תבנית התבוכות בין קרן היחסות לקרן האובייקט והיא נקראת הולוגרפיה. בצורה אנלוגית שהזרור ההולוגרמא מtabצע בעזרת הארה של קרן היחסות על הלוחית צילום, בצורה דיגיטלית מתבצע בצורה נומרית ונitin לתיאור מתמטי בעזרת נוסחאות (3), (6), (7) ו-(8). נתאר את الكرן היחסות וקרן האובייקט בעזרת האmplיטודה במרקבה מנוסחה (3) כך:

$$(16) \quad E_j(x, y) = a_j(x, y) \exp(i\varphi_j(x, y))$$

$$j \in \{O, R\}$$

כאשר O מתייחס לקרן אובייקט כך a_O זו האmplיטודה של קרן האובייקט ו- φ_O היא הפאזה של קרן האובייקט, R מתייחס לקרן היחסות כך a_R זו האmplיטודה של קרן היחסות, φ_R היא הפאזה של קרן היחסות.



איור 10: מערכת הניסוי עבור הולוגרפיה, [10]

בעזרת נוסחאות (6), (7) ו-(8) נוכל לתאר את התבוכות הגלים:

$$\begin{aligned}
(17) \quad I(x, y) &= |E_o + E_R|^2 = (E_o + E_R)(E_o + E_R)^* \\
&= E_R E_R^* + E_R E_o^* + E_o E_o^* + E_o E_R^* \\
&= a_R^2 + a_o^2 + E_R E_o^* + E_o E_R^*
\end{aligned}$$

המידע הנagar במצלמה תלוי בפרמטרים נוספים מלבד העצמה והפואה בין הקרןאים המגיעות כמו זמן חשיפה, כך שהתייאור של המידע הזה מופיע בצורת משוואת הולוגרמה:

$$(18) \quad h(x, y) = h_0 + \beta \tau I(x, y)$$

הפרמטר β הוא השיפוע של אמפליטודה היוצאת כנגד אופייני חשיפה של הלוחית צילום, τ הוא זמן החשיפה ו- h_0 הינה אמפליטודת המעבר של אותה לוחית, בהולוגרפיה דיגיטלית ניתן להזינהה. עברו שהזרה הולוגרמה נכפיל את משוואת הולוגרמה (18) בקרן היחס (16), ובעזרת הצבה של משוואת (17) ופתיחה סוגרים נקבל:

$$\begin{aligned}
(19) \quad E_R(x, y)h(x, y) &= (h_0 + \beta \tau (E_R E_R^* + E_R E_o^* + E_o E_o^* + E_o E_R^*))E_R \\
&= (h_0 + \beta \tau (a_R^2 + a_o^2))E_R + \beta \tau a_R^2 E_o + \beta \tau E_R^2 E_o^*
\end{aligned}$$

הרכיב הראשון בפיתוח הוא קרן היחס מוכפלת בקבוע והוא מייצג את הגל הלא מופרע בהולוגרמה ועתים נקרא רכיב עקיפה בסדר 0 איבר DC. הרכיב השני מייצג את השזרה של קרן האובייקט ונוטן לנו תמונה וירטואלית, כאשר הפקטור המכפיל את הגל משפייע על הבירות התמונה. והרכיב האחרון זו התמונה הממשית המתויששת, כאשר הטשטוש נובע מההפרדה המרחבית של התמונות. על מנת לקבל תמונה ממשית לא מטויששת נכפיל את משוואת (18) בצד ימין היחס E_R^* ונקבל:

$$\begin{aligned}
(20) \quad E_R^*(x, y)h(x, y) &= (h_0 + \beta \tau (E_R E_R^* + E_R E_o^* + E_o E_o^* + E_o E_R^*))E_R \\
&= (h_0 + \beta \tau (a_R^2 + a_o^2))E_R^* + \beta \tau a_R^2 E_o^* + \beta \tau E_R^2 E_o
\end{aligned}$$

עבור שהזרה נMRI של התמונה המוקלטת בהולוגרמה, נשתמש באינטגרל פרנל-קיירכהוף בנוסחה (14) כאשר נציג את משוואת (19) או (20) (תליי איזו תמונה נרצה לשזר-משית או וירטואלית), כאשר המקדם Q מקובל ל-1 תחת ההנחה שהזוויות θ ו- θ' קטנות. בחישוב במשוואה (14) לא התייחסנו לעדשות היכלות להיות בשזרה, لكن בחישוב שלנו נוסיף 2 פקטוריים. כאשר פקטור אחד מתחשב בעדשה שיש לנו בעין והשני מתקן עיוותים (אברציות) שעלולות לנבוע מהקיים שלה העדשה.

$$\begin{aligned}
(21) \quad \Gamma(\xi', \eta') &= \frac{i}{\lambda} P(\xi', \eta') \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) L(x, y) \frac{\exp(-\frac{i2\pi}{\lambda} \rho')}{\rho'} dx dy \\
P(\xi', \eta') &= \exp\left(\frac{in}{\lambda f} (\xi'^2 + \eta'^2)\right)
\end{aligned}$$

$$L(x, y) = \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2)\right)$$

כאשר $L(x, y)$ הוא האפקט של העדשה, (ξ, η) מפץ על העיוותים הנוצרים מהעדשה ו- f הוא מרחק המוקד של העדשה. מפני שמרחיק האובייקט מהעדשה d גדול בהרבה מגודל CCD נוכל להשתמש בקירוב טילור על מנת לקבל:

$$(22) \quad \rho = d \sqrt{1 + \frac{(x - \xi)^2}{d^2} + \frac{(y - \eta)^2}{d^2}} \approx d + \frac{(x - \xi)^2}{2d} + \frac{(y - \eta)^2}{2d}$$

את הקירוב זהה נציג משווהה (21), כאשר באקספוננט נבעצע קירוב עד סדר ראשון מפני שאנו שוכנים על תבנית התאבכות, והפרשי הפאות הם חלק עיקרי בתהילך. לעומת זאת במכנה מספיק לנו לבצע את הקירוב עד לסדר אפס מפני שהדבר ישפייע רק על העוצמה, קירוב זה נקרא קירוב פרנול. בהצבה וקצת סידור נקבל:

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \times \\ &\times \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda d} ((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)\right] dx dy = \\ (22) \quad &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left(-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right) \times \\ &\times \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \\ &\quad \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned}$$

עבור דיגיטציה של קירוב פרנול נציג: $\nu = \frac{\xi}{\lambda d}$, $\mu = \frac{\eta}{\lambda d}$. ונקבל את האינטגרל הבא:

$$\begin{aligned} \Gamma(\nu, \mu) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp[-i\pi\lambda d(\nu^2 + \mu^2)] \times \\ (23) \quad &\times \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp[i2\pi(x\nu + y\mu)] dx dy \end{aligned}$$

נשים לב שקיבלנו אינטגרל דומה להתרמת פורייה דו ממדית, אך עם רכיב אקספוננט שונה עם מכפלה של 2π . זהו התרמת פורייה ונסמן אותו בצורה הבאה:

$$(24) \quad \begin{aligned} \Gamma(\nu, \mu) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp[-i\pi\lambda d(\nu^2 + \mu^2)] \times \\ & \times \Im^{-1}\left\{h(x, y)E_R(x, y) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right]\right\} \end{aligned}$$

בגלל שאנו משתמשים במכשיר, הבדיקה מתבצעת על מערך פיקסלים מה שדורש מאיתנו להפוך את התמירה לבדיקה, והמציאות דורשת מאיתנו למצוות את הגבולות האינסופיים לסופים. לכן משווהה (24) תהפוך ל:

$$(25) \quad \begin{aligned} \Gamma(m, n) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp[-i\pi\lambda d(m^2 \Delta\nu^2 + n^2 \Delta\mu^2)] \times \\ & \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l) E_R(k, l) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} ((k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2))\right] \times \\ & \times \exp[i2\pi(k \Delta x m \Delta\nu + l \Delta y n \Delta\mu)] \end{aligned}$$

כאשר $n, k, l, m, \Delta x, \Delta y, \Delta\nu, \Delta\mu$ הם גודל הפיקסלים בהולוגרמה $\mu, \Delta\nu, \Delta\mu$ בתמונה המשוחזרת. בדומה לתמירת פורייה קיימים יחס בין גדלי הפיקסלים בתמונות. נוכל להציב את היחס ולקבל את הביטוי הסופי לחישוב:

$$(26) \quad \begin{aligned} \Delta\nu = & \frac{1}{N \Delta x}, \quad \Delta\mu = \frac{1}{N \Delta y} \\ \Gamma(m, n) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d\left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \times \\ & \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l) E_R(k, l) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda d} ((k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2))\right] \times \\ & \times \exp\left[i2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \end{aligned}$$

באותה דרך נוכל לפתח משווהה עבור תמונה עם עדשה נומרית ונקבל נוסחה זהה פרט להזקה חיובית באקספוננטים השני והשלישי. על מנת לשפר את איכות התמונה המשוחזרת נרצה להוריד את השפעתו של איבר ה-DC על ידי החסירה של הבחרות המוצעת מהתמונה בעזרת הנוסחה:

$$(27) \quad I_{avg} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k \Delta x, l \Delta y) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_f(k\Delta x, l\Delta y) = I(k\Delta x, l\Delta y) - I_{avg}(k\Delta x, l\Delta y)$$

כמו שראינו יש לנו מספר הגבלות על המערכת על מנת לקבל תמונה מיטבית. בעזרת נוסחה (15) ודרישה לרזולוציה מקסימלית בתבנית ההתאבות, במקרה של ה-CCD זו דרישת לתדר מרחבי מקסימלי בו פיקסל אחד מואר ושכנו חזוק (תדר בסדר גודל של 2 פיקסלים) נקבל תנאי על הזווית המקסימלית:

$$(28) \quad f_{max} = \frac{1}{2\Delta x} \Rightarrow \theta_{max} = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta x}\right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x}$$

2. ניסוי מס' 1 – קבלת תמונה על ידי הולוגרפיה

2.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה ללמוד את מערכת ההולוגרפיה ולהרכיבה בצורה שתצליח להפיק תמונה ברורה. נצלם קוビית משקב באיכות המטיבת אליה נצליח להציג.

2.2 תיאור המערכת

המערכת בנויה משולחן אופטי העומד על כוריו גומי מתנפחים – למנית ריעיות (אותם ניתן לנפח).

על השולחן ליזיר הליום-נאנו היורה קרנו באורך גל $\lambda = 632.8\text{nm}$ ובהספק $P = 15\text{mW}$

11. האובייקט המצוול הינה קובייה משחק בגודל $(1.0 + 0.1) cm$ לכל צלע.

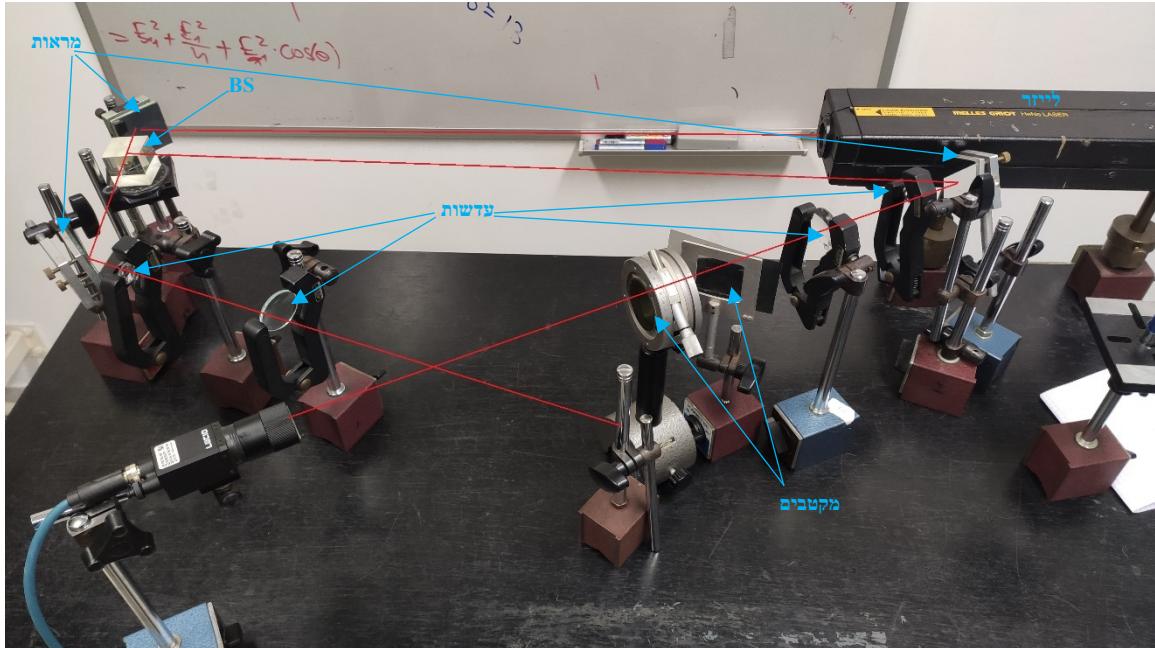
הקרן המכוונת אל האובייקט עוברת בשתי עדשות מרכזיות – הראשוונה עם מיקוד של $cm(4.0 \pm 0.5)$ והשנייה עם $cm(11.0 \pm 0.5)$. כאשר המרחק בין העדשות הינו סכום המיקודים שלהם.

הקרן המכונת אל מצלמת ה-CCD עוברת גם כו' דרך שני עדשות מרכזות – הראשונה עם מיקוד של $1.3 \pm 0.2\text{ cm}$ והשנייה עם $8.3 \pm 0.5\text{ cm}$. המרחק ביניהם הינו סכום המיקודים. לאחר מכן ישם שתי מוקטבים, כאשר השני מאפשר שליטה בזווית הקיטוב – מה שבסדר הכל מאפשר שליטה בעוצמת הקרן.

המצלמה הינה מצלמת CCD מדגם MC TRIO64S. מצלמה מונוכרומטית, עם כמות פיקסלים 4024×3036 , שטח צילום של $7.44mm \times 5.62mm$, גודל פיקסל הינו $1.85\mu m \times 1.85\mu m$. רזולוציה של $9.7fps$ וקצב צילום של $12.20MegaPixels$.

המצלמה מחוברת למחשב נייח וכל השליטה בצילום ובהגדרות המצטלבת נעשית על ידי תכנת Arena SDK של חברת LUCID.

פרמטרים נוספים במאillard הניסוי או דרשו היישוב/הסביר, יפורטו בפרק מהלך הניסוי.



איור 11: מנגנון הניסוי

כasher ba'ayor 11 ha'kuvim ha-adomim ha-matziorim matatarim at m'sullo ha-karnim.

2.3 מהלך הניסוי – הרכבה והישובי עזר

נתאר את החלקים הלא טריוויאליים של הרכבת המערכת כחלק מהניסוי עצמו.

מדדנו על ידי סרגל את גודל האובייקט וגודל המצלמה והתאמנו את העדשות כך שהקרנים יהיו ברווח דומה לקובייה ולמצלמה, בהתאם. שמננו את העדשות במרחק השווה לסכום המיקודים שלהם על מנת שהקרנים יצאו מקבילות בקרוב טוב. בנוסף אנו רוחב כל קרן בצמוד לעדשה והרחק ממנה, על ידי הצמדת דף נייר, על מנת לוודא שאין התרחבות משמעותית. זה חשוב כי פיזור קרניים לא מקבילות טוביל לחזית גל כדור שיצור הבניית התאבכות נוספת (טבעות), אשר לא רצוי.

שמננו דף נייר מול המצלמה כך שייראו עליו את שתי הקרניים. שינויו את זווית המקטב השני ביחס לראשון עד שקיבלנו עבר קרן הרפרנס עוצמתה קרובת לזו מהאובייקט (לפי מראית עין). זה חשוב על מנת לקבל תמונה התאבכות טובה מהבחינה שההתאבכות הורסת תקריב לעוצמתה אפסית, לפי המשוואה:

$$(29) \quad I = |E_1 e^{ikx} + E_2 e^{ikx'}|^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\Delta\theta)$$

עבור E_2 אמפליטודות הגלים המתאימים, I העוצמה הנמדדת, θ הפרש הפазה ביניהם, k מספר הגל ו- x , המרחקים שהגלים עברו. לפי המשוואה רואים כי אם נרצה עוצמה שווה לאפס בהתארכות הורסת, נרצה את E_1 ו- E_2 להיות כמה שייתר קרובים זה לזה.

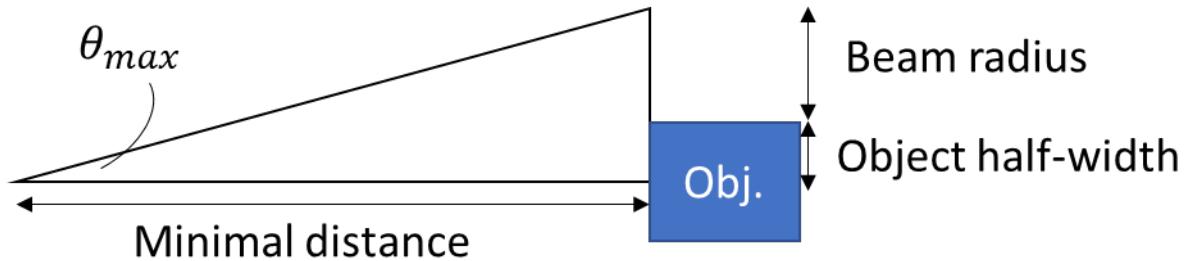
נכנו במחשב להגדלת המצלמה והגדלנו את זמן החשיפה עד הרגע בו התחלו להיווצר פיקסלים ברווחה (לפי מראית עין). זה חשוב בשכיל לקבל תמונה בהירה, ועם ניגוד (contrast) גבוה, אך לא להגיע ל对照检查 בו יש גושי פיקסלים ברווחה, בהם לא יראו תמונה התארכות.

זווית האובייקט ביחס לקרן רפנס הוגבלה על ידי הערכה כי עובי קווי ההתארכות צריכים להיות גדולים מרוחב שתני פיקסלים על מנת שייקלטו בצלמה. על ידי נוסחת ההתארכות של יאנג, בקירוב לזרויות קטנות:

$$(30) \quad \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\lambda}{2d} \approx \frac{\theta}{2}$$

עבור λ אורך גל, θ זווית הפתיחה של האובייקט ו- d גודל הפס שנדרوش כחסם. בהצבת אורך גל וגודל שתני פיקסלים שמצוינים בפרק תיאור המערכת נקבל $9^\circ \approx \theta_{max}$.

מרחוק האובייקט הינו מוגבל לפי אותה זווית שהישבנו, כפי שהתקרובות יתרה תוביל לזרות גדולה מהחסם שלנו. הנה כי האובייקט צמוד לקרן רפנס ונקבל עבור זווית מקסימלית:



איור 12: הגבלת זווית ומרחק אובייקט

כאשר מדכנו את רדיוס קרן הרפנס $c\text{-}cm$ (1.1 ± 0.3) מטריאוגונומטריה פשוטה נקבל מרחק מינימלי $d_{min} \approx 10cm$.

עוד גורם משפיע הינו הקירוב באינטגרל קירכהוף (22) לפיו ביצענו קירוב טילור למרחקים גדולים מרחוק המצלמה. משמע, ניתן להעריך במשוואת (22) כי אם המצלמה בערך במימי $7mm$, המרחק בין האובייקט למצלמה בערך $20cm$, אז הקירוב לסדר ראשון ושבר $c\text{-}cm$ $\sim 10cm$.

יחד עם זאת, נרצה את האובייקט קרוב על מנת לקבל עוצמה מספקת (אשר דועכת עם כמוי r^{-1} כמובן) וקבלת דמות בגודל לא קטן מדי.

תחת שיקולים אלו ועל ידי ניסוי וטעיה של צילומים במרחקים וזוויות שונות, בסוף הצבנו את האובייקט כך שהינו $cm(23.0 \pm 0.5)$ מהצלמה וזויתו לקרן רפרנס נמוכה כ- 6.2 ± 0.3 .

2.4 תוצאות הניסוי ועיבודן

התמונה שהתקבלה עבור קרן הרפנס בלבד:



איור 13: רפנס בלבד, ניסוי 1

התמונה שהתקבלת עבור קרן האובייקט בלבד:



איור 14: קרן אובייקט בלבד, ניסוי 1

בדקנו שגודל הספקלים (speckles) תואם לצפי התיאורתי - לפי משווהה (15) קיבל קווטר ספקלים של $\sim 0.014mm$ וגודל המスク כפי שרשום בתיאור המרכיבת. היחס בין האורכים שנצפה לו הוא בסדר גודל של $\frac{1}{500}$. יחס אשר אכן נשמר לנקודות אקריאיות שבדקנו (לפי כמות פיקסלים כמורל הכמות הכלולות) עד להבדל שלא מתעללה על סדר גודל בודד.

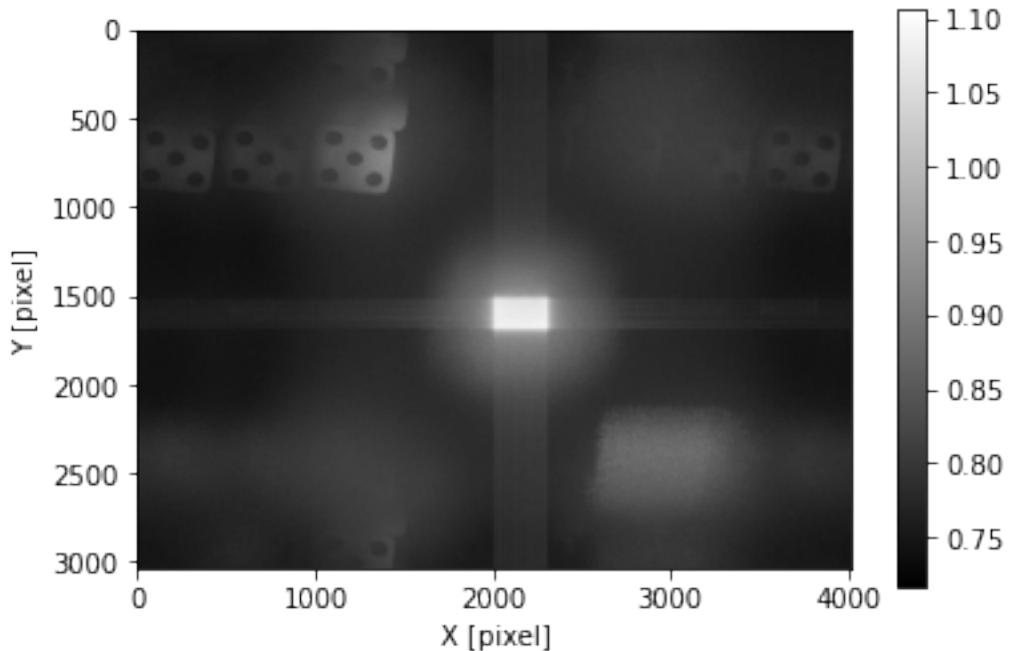
התמונה שהתקבלת בצילומים (עבור קרני האובייקט והרפרנס יחד) הינה:



איור 15 : תיונת ההתארכות, ניסוי 1

על מנת לשחזר מהתמונה התארכות את צילום האובייקט, השתמש באינטגרל פרנל-קירכהוף המבוצע באופן נורמי. חשוב להזכיר כי האינטגרל כולל התמרת פורייה הפוכה (המבצעת על ידי אלגוריתם FFT). בקורס ניתן לעיין בנספח 1.

שחזור התמונה הניב את הצלום הבא:



איור 16: שחרור התמונה, ניסוי 1

2.4 דיון בתוצאות ומסקנות

- למרות שהתמונה שהתקבלה אינה אידיאלית - עם בהירות שיכלה להיות טוביה יותר והשתקפותה שהייתה ניתנת למזער, קיבלנו תמונה די ברורה. ברווח מספיק לשබיל להבחן בהולוגרמה הראשית (לא השתקפות), לראות את פיניות הקובייה והנקודות שעל הדפנות שלה. זאת אומרת שבסך הכל הצלחנו להרכיב מערכת עובדת, בה השיקולים והגבילות הפיזיקליות מתקינות, מבחינה עצומות, זמן חשיפה, מרחקים וזווית.
- הבהירות הכללית אינה מהויה בעיה ממשמעותית כפי שניתן לשפר אותה על ידי עיבוד התמונה, ללא צילום חוזר, על ידי שלל טכניקות שונות כגון פילטרים או אלגוריתמים מוכרים. דוגמא פשוטה היא העלת ערכי המטריצה בחזקה, מה שיגדיל את הפעורים בין הערכים האבוקים לנמוכים. בעיה פחות פשוטה בהירות היא חוסר האחדות על פני הקובייה – נשים לב באיור 16 כי מצד ימין של הקובייה ישנה אחדות פגיעה קרן האובייקט בקובייה ויש למרכז קרן זו בצורה טוביה יותר למרכז הקובייה או מחותר אחדות פגיעה קרן האובייקט בקובייה ואבל כפי שצוין קודם, בעיה זו פתרה פשוטה להרחיב את הקרן יותר. הרחבת הקרן תקטין את הקונטרסט על פני הקובייה (פייזור עצמת האור תהיה יותר איחוד) על חשבונו הקטנת הבHIRות הכללית עליה, אבל כפי שצוין קודם, בעיה זו פתרה בקלות רבה יותר על ידי עיבוד תמונה פשוט, لكن אנו רואים בהרחבת הקרן פתרון עדיף. ראוי לציין כי גם את האחדות על פני הקובייה אפשרי לפתור בשלב עיבוד התמונה, למשל על ידי הפעלת הפעולות

להגדלת קונטרסט באופן משמעותי יותר עבור הפיקסלים באיזור החשוך יותר בקוביה, אך פעולה זו מסובכת יותר וברצוננו להתמקד יותר בבעיות והפתרונות הophysikalim במערכת מאשר האלטרנטיבות התכניות בעיבוד התמונה.

- ההשתקפות אינם בעיה אם חותכים את התמונה סביבה ה"קוביה המרכזית". ההשתקפות ברבעים השונים של התמונה מתאפשרת כהיבר הצמוד של הhologram בתמונה התאבכות. זאת אומרת עבור כל שניים מנוגדים נקבל את $(R(x,y)O^*(x,y))^* = R(x,y)O(x,y)$ (17). ההשתקפות הצמודות (אלו שבאותו רבייע) נובעת לדעתינו (לא נמצא מקור רשמי לוודא שהזהר) ממחוזיות טרנספורם פורייה, אשר תחזיר התאמה לתחדויות שהם כפולה שלמה של התדרות שמתאימה ל"קוביה המרכזית". נחזק טענה זו על ידי כך שההשתקפות מופיעות רק במאונך או אופקית לאובייקט (לאורך ציר y , x שלאורכם נעשה הטרנספורם) וכי ההשתקפות מופיעות בunnerהkim שווים (~500 פיקסלים באIOR 16). איננו יודעים כיצד ניתן להפטר מההשתקפות אלו, פרט לביצוע on-axis holography שם כל התמונה מתרcosa למרכז ולא אמורים לקבל השתקפות. כפי שנאמר קודם, זו לא בעיה משמעותית כי שההשתקפות הללו לא גולשות לתוך ה"קוביה המרכזית" ולכן ניתן לחזור את התמונה הרלוונטי.
- בנוסף נציין כי האבליה פיזיקלית נוספת שהיא למערכת אך לא ציינה בפרק ביצוע הניסוי היא אורך הקוهرנטיות. הקרנימים חייבות להיות קוהרנטיות על מנת לקבל תמונה התאבכות ברורה, אך ללייזר שלנו אורך הקוهرנטיות הוא ~30cm לפי מקור [2], שכן אורכי המסלול לקרנימים שלנו אשר נמדדו להיות ~2m אין השפעה משמעותית מכך זה. מה שמצודק גם על ידי התמונה הברורה שקיבלנו.

3. ניסוי מספר 2 – שינוי עצמת קרן רפרנס

3.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה לבדוק כיצד איכות התמונה המתתקבלת משתנה כתלות בעוצמת קרן הרפרנס, הנשלטה על ידי זווית קיטוב ביחס למקטב קודם.

3.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

המערכת זהה לזה המתוארת בניסוי 1.

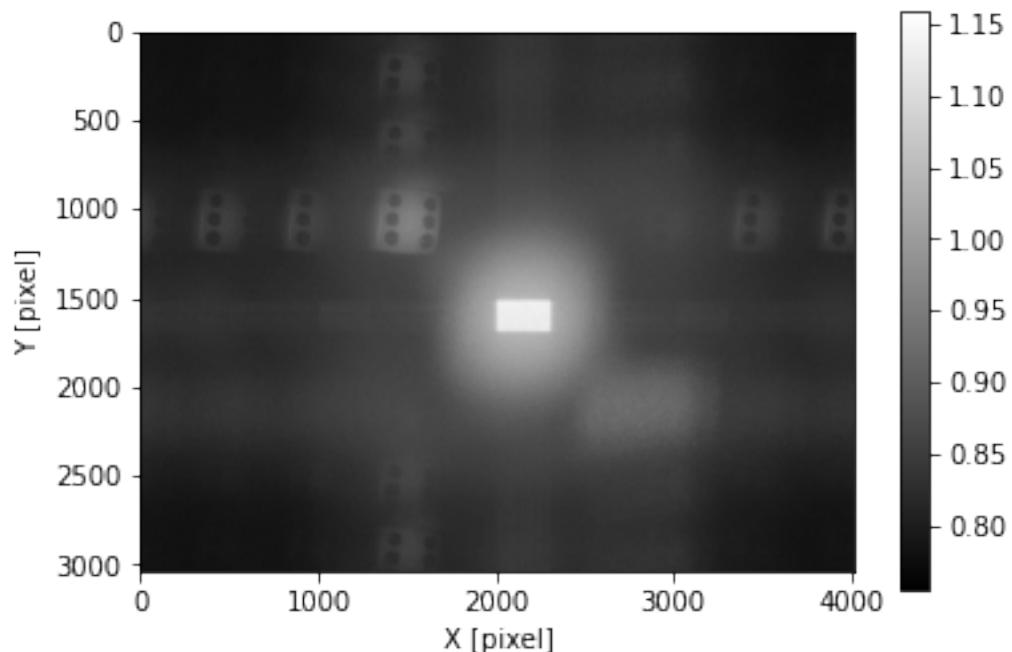
מדדנו את הזווית של המקטב עבורה קיבלנו את התמונה בניסוי 1 ומדדנו את הזווית עבורה קיבל עצמת אור מקסימלית ומינימלית.

צלמנו את תמונה התארכות לארבעה זוויות שונות סביב הזרית המקורית, בקפיצות של 10° ושהזרנו את התמונות שהתקבלו.

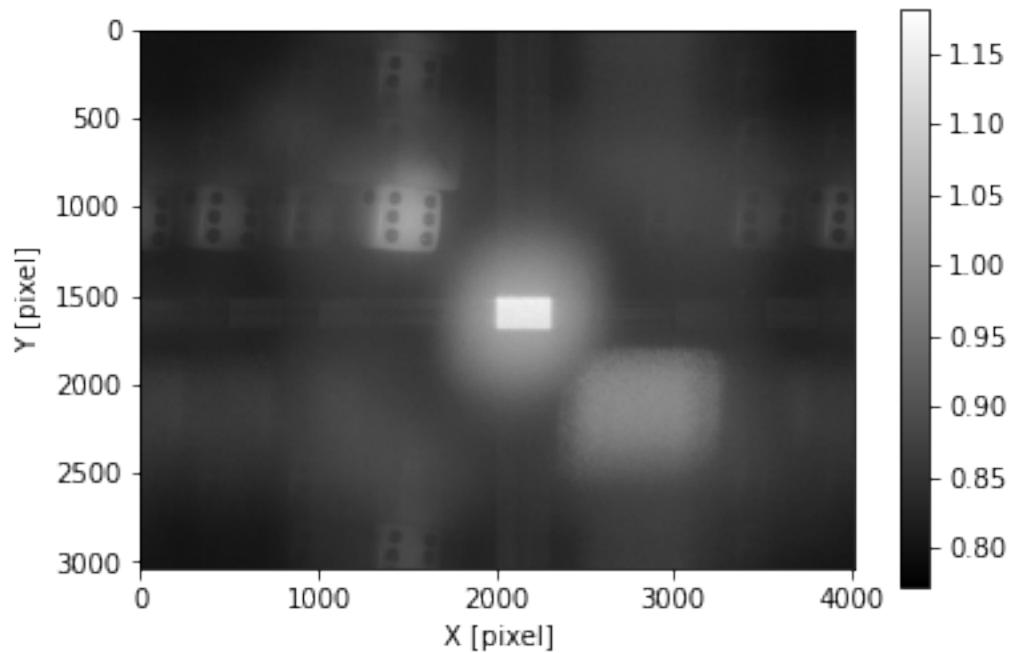
3.3 תוצאות הניסוי ועיבודן

זרית הקיטוב המקורי (ניסוי 1) שהערכנו כטביה לפי נראות עין, נמדדה בזווית של 89° בזמן שההתארכות ההורסת נמדדה ב- 70° והתארכות בונה המקסימלית ב- 160° .

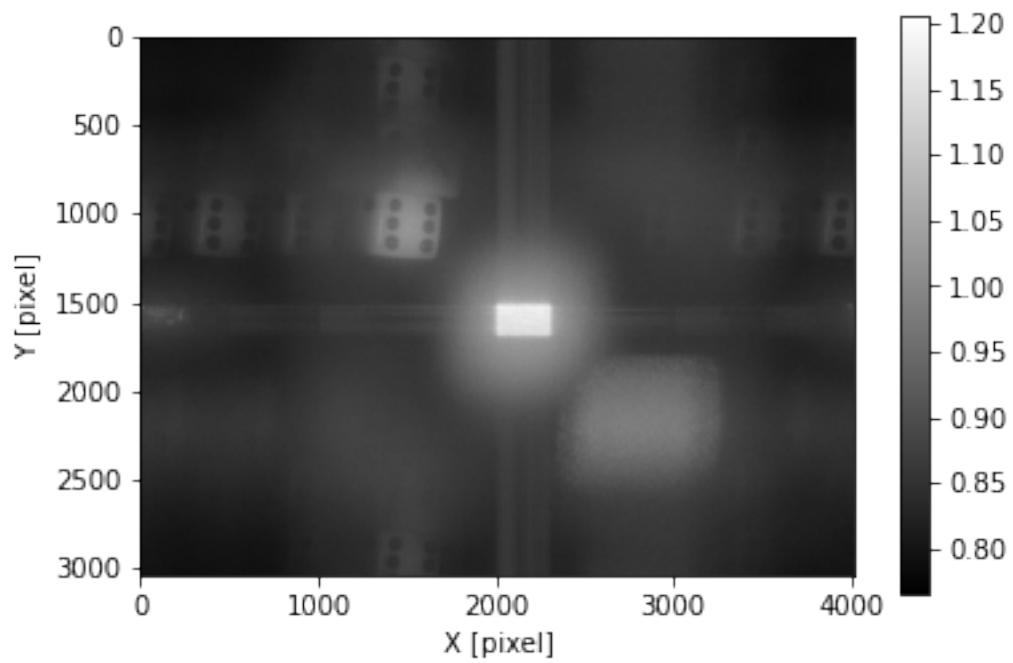
התמונות שהתקבלו עבור הזריות השונות, כאשר הזרית מצוינת בכורתת כל איור, להלן:



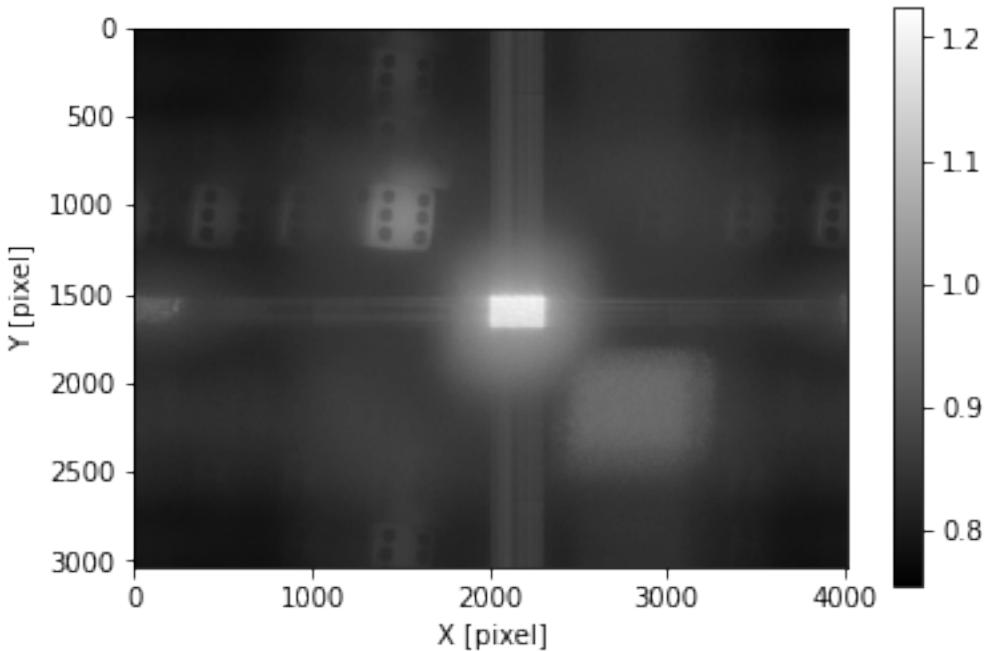
איור 17: עבר 79 מעלות, ניסוי 2



איור 18: עבר 89 מעלות, ניסוי 2



איור 19: עבר 99 מעלות, ניסוי 2



איור 20: עבר 109 מעלות, ניסוי 2

לא גמדדו זווית מעל 109° כי בהן כבר איזוריים במצולמה הגיעו לרויה.

נכיל את הזווית ביחס להתאכחות ההורסת, ועל ידי הטלה נחשב את אמפליטודת הגל שיצרנו:

זווית ביחס להתאכחות ההורסת [°]	גודל אמפליטודה רפנס יחסי, ביחס לעוצמתה המקסימלית	תמונה מקורית עבר [°]
0.00 ± 0.03	0 ± 2	70 (כיול, אין תמונה)
0.15 ± 0.03	9 ± 2	79
0.32 ± 0.03	19 ± 2	89
0.48 ± 0.03	29 ± 2	99
0.63 ± 0.02	39 ± 2	109

טבלה 1: מעבר בין זווית לאמפליטודה, ניסוי 2

3.4 דיון בתוצאות ומסקנות

- ההשפעות של עוצמת קרן הרפנס הינה הגעה לרויה בPixelsים של המצלמה, הענקת עצמה מספקת לקבלת הולוגרמה מספיק בהירה והיחס באמפליטודה לקרן האובייקט על מנת לקבל התאכחות ההורסת בעוצמה המינימלית, לקבלת קונטרסט מיטבי (שואף ל-1).

- בטוחה הזוויות שבדקנו לא נמצא הבדל משמעותי בין איקות התמונה. היינו מעלים לשיפור לנוטה לצלם גם בזווית בהן יש רוויה בתמונה התאככות בשביל לחקור את השפעת הרוויה אשר הייתה מביאה להבדלים יותר דרמטיים – היינו מצפים לטשטוש משמעותי כפי שהלך מפסי התאככות היו נחרסים.
- דבר שכן ניתן לבדוק בו זה ה"הילה" מסביב לאובייקט, אשר לפי האירורים מינימלית עברו הזוויות 79° בה עצמת הרפנס והאובייקט בערך שווות. במקום ההילה אפשר באותו אופן לבדוק כי ההשתקפות הצמודות נהיית ברורות יותר עברו הזוויות הגבוהות מ- 79° . אנו מיחסים את ההילה זו כטשטוש שנובע מכך שההתאככות ההורסת בתמונה התאככה אינה מתאפשרת וכן גורמת למראיה בטרנספורם פוריה.
- יחד עם זאת, ניתן לראות כי הגוף עליו עומדת הקובייה והדפנה הצדית של הקובייה נראות דווקא בזוויות הגבוהות אך לא ב- 79° שם הן השוכות. נראה כי הזוויות הגבוהות הקטינו את הקונטרסט סביב מרכז קרן האובייקט.

4. ניסוי מספר 3 – שינוי זווית בין הקרניים

4.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה לבדוק את השפעת הזוויות של האובייקט ביחס לקרן רפנס על איקות התמונה המתקבלת.

4.2 תיאור המערכת ומילך הניסוי

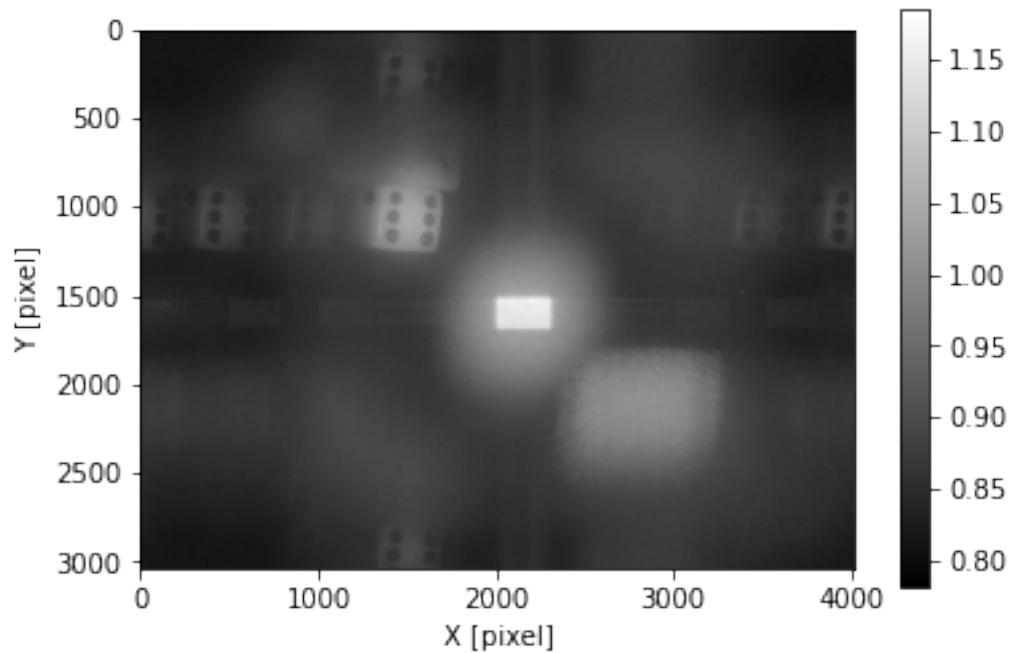
המערכת זהה לו המתווארת בניסוי 1.

מדדנו את המרחק של האובייקט מהקרן רפנס (דרך האנך) בתמונה המקורית.

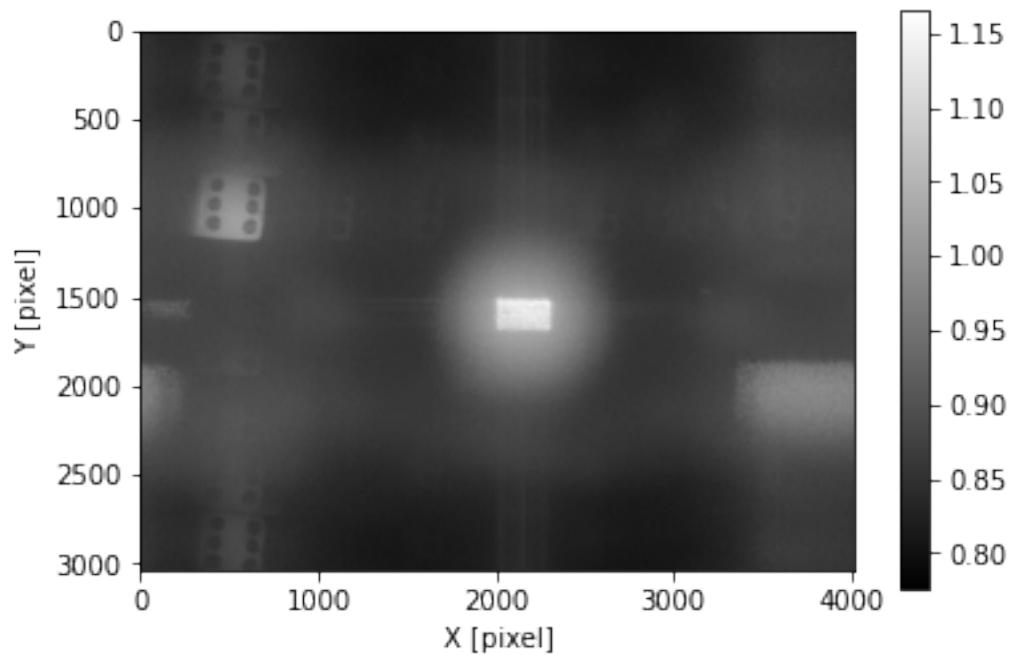
הגדלנו את המרחק זהה, תוך כדי הקפדה שהמרחק מהצלמה לא ישנה, לארבעה מרחקים שונים: $2.5, 2.9, 3.3, 4.1 \pm 0.5\text{ cm}$.

4.3 תוצאות הניסוי ועיבודן

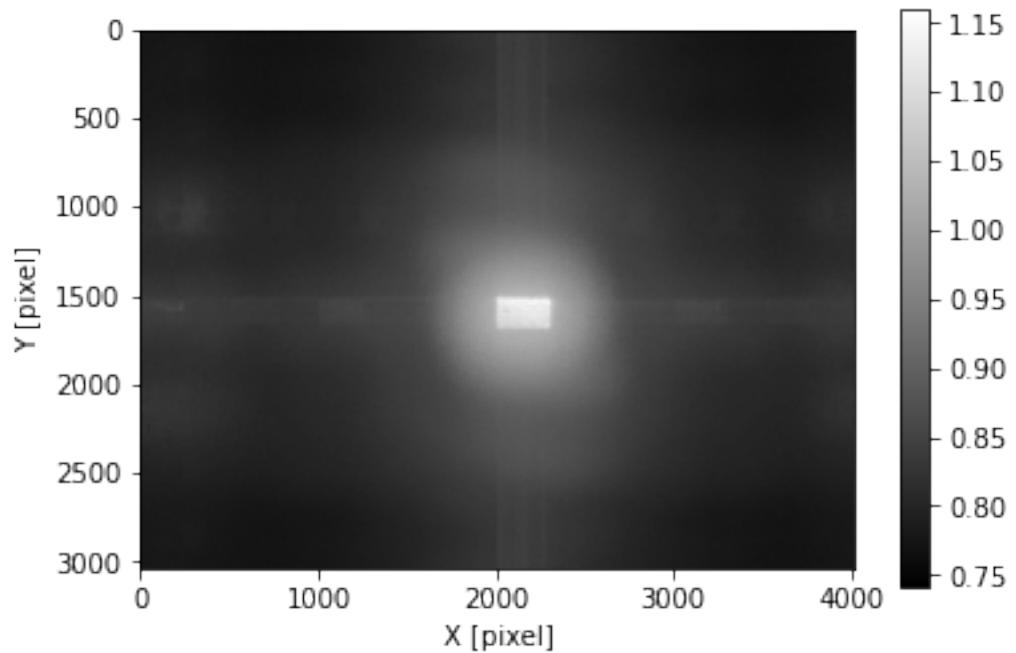
להלן התמונות המשוחזרות, כאשר המרחקים בכותרת האירורים:



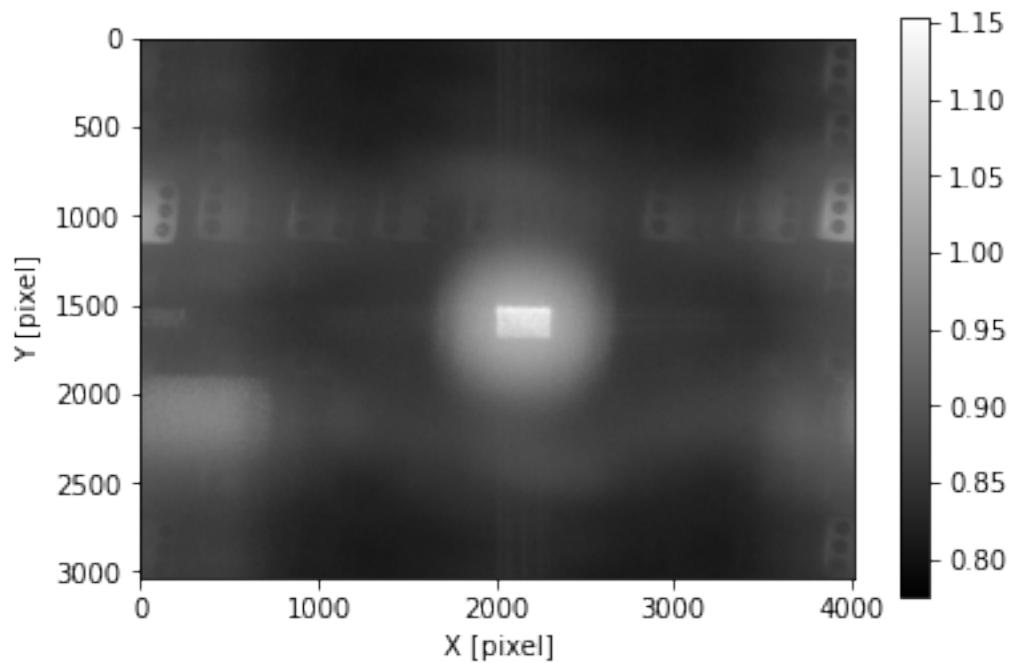
אייר 21: מרחק 2.5cm, ניטוי 3



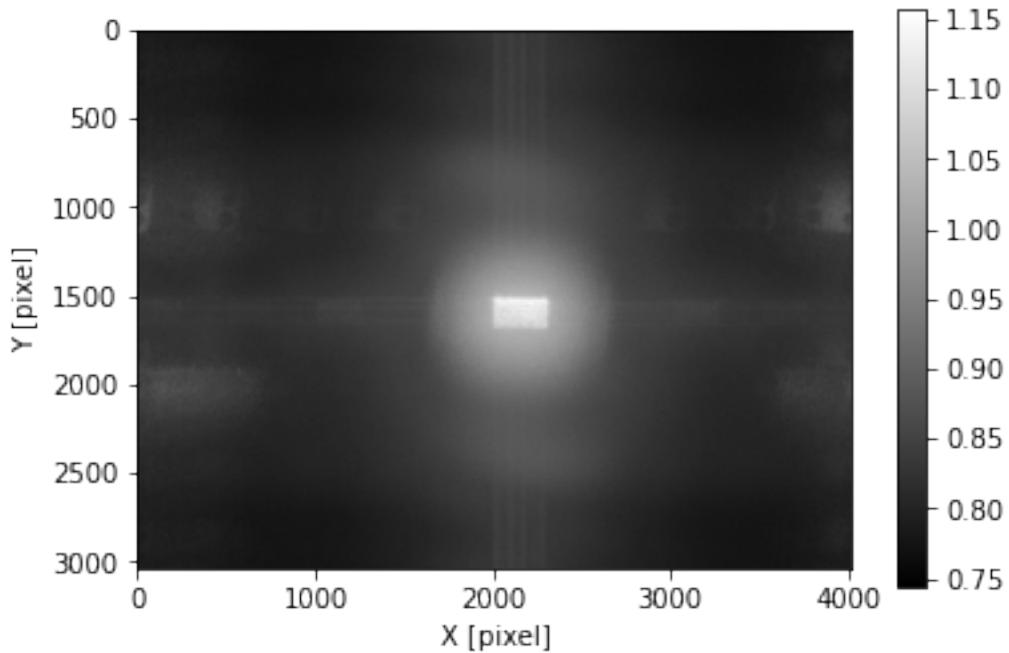
אייר 22: מרחק 2.9cm, ניטוי 3



אייר 23: מרחק 3.3cm, ניטוי 3



אייר 24: מרחק 3.7cm, ניטוי 3



איור 25: מרחק 2.5 cm , 4.1 cm , ניסוי 3

訳すと、この距離をトライゴノメトリで計算する（つまり、簡単な三角関係式を用いて）：(12)式：

表 2: 距離の測定値と撮影角度の関係 [cm] [°]

6.2 ± 0.5	2.5 ± 0.5
7.2 ± 0.5	2.9 ± 0.5
8.2 ± 0.5	3.3 ± 0.5
9.2 ± 0.5	3.7 ± 0.5
10.2 ± 0.5	4.1 ± 0.5

表 2: 距離の測定値と撮影角度の関係 [cm] [°]

計算結果は、AI が撮影した画像の高さと幅から、AI の位置と被写体の位置を計算する。AI の位置は、AI の高さと幅から、AI の中心位置を計算する。AI の高さと幅は、AI の高さと幅から、AI の中心位置を計算する。

4.4 分析と結論

- AI の位置を正確に計算するには、AI の高さと幅を正確に測定する必要があります。AI の高さと幅は、AI の高さと幅から、AI の中心位置を計算する。

- הקשר $x_h = \pm dtan\theta$ עבור הholограмה והחצדה שלה, עם d מרחק האובייקט מהצלמה ו- x_h מיקום הhologramma בציר x ביחס לראשית במרכו.
- ניתן להבחין כי בשתי הזרויות הקטנות ביותר, התמונה התקבלה כברורה ואין הבדל משמעותי באיכות עצמה. מה שכנן ניתן להבחין זה הפרש במקומות במרחב הhologramma, תזוזה שנמדדה כ- $3.0 \pm 0.5 cm$ לפि חישוב הגודל היחסי של הקוביה מהתמונה הכללית.
 - עבור הזזה של $9.2 \pm 0.5^\circ$ האובייקט כבר יוצא מחוץ לתמונה, אך החצוי שנשאר בתמונה עדין ברור.
 - עבור הזזה של $10.2 \pm 0.5^\circ$ אשר הזווית היחידה בניסוי שמעל החסם שהושב, קשה לבדוק את איכות התמונה האובייקט כפי שהוא כבר מחוץ לתמונה למגרי. בכל זאת, נוכל להתבונן בהשתקפותו הגדולה, ונבחין כי אין מוד מושתשות בגין השתקפות הדוי בורורות שהתקבלו לזרויות הקטנות יותר. לכן ניתן לומר שראויים את הרישת תמונה התאבכות לפני הטעטוש המשמעותי ביחס לתמונה הקודמות. היינו מציעים לשיפור לקחת עוד תמונה, עם זווית גדולה אף יותר ולודא כי קיבל תמונה שבה לא ניתן לזהות את ההשתקפות כמעט כלל.
 - עבור הזזה של $8.2 \pm 0.5^\circ$ קיבלנו תמונה דומה לו של הזווית המקסימלית וכך שלא מתאימה להתנוגות של שאר המדידות. אנו מעריכים כי נפללה בה טעות אנווש בזמן המדידה והזווית הייתה גדולה מזו שנרשמה, בערך $(11 - 10)^\circ$ מהשוואה לתמונה עם הזווית המקסימלית.

5. ניסוי מס' 4 – שינוי זמן חשיפה

5.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה לבדוק את השפעת זמן החשיפה של המצלמה לאור על איכות התמונה המתקבלת.

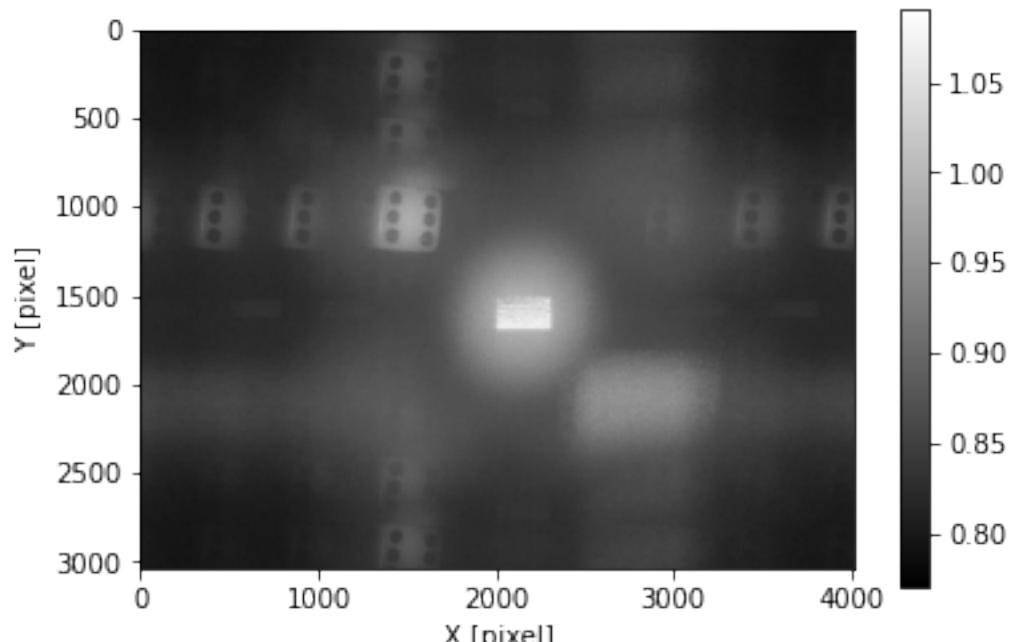
5.2 תיאור המערכת ומhalt'ן הניסוי

המערכת זהה למערכת בניסוי 1.

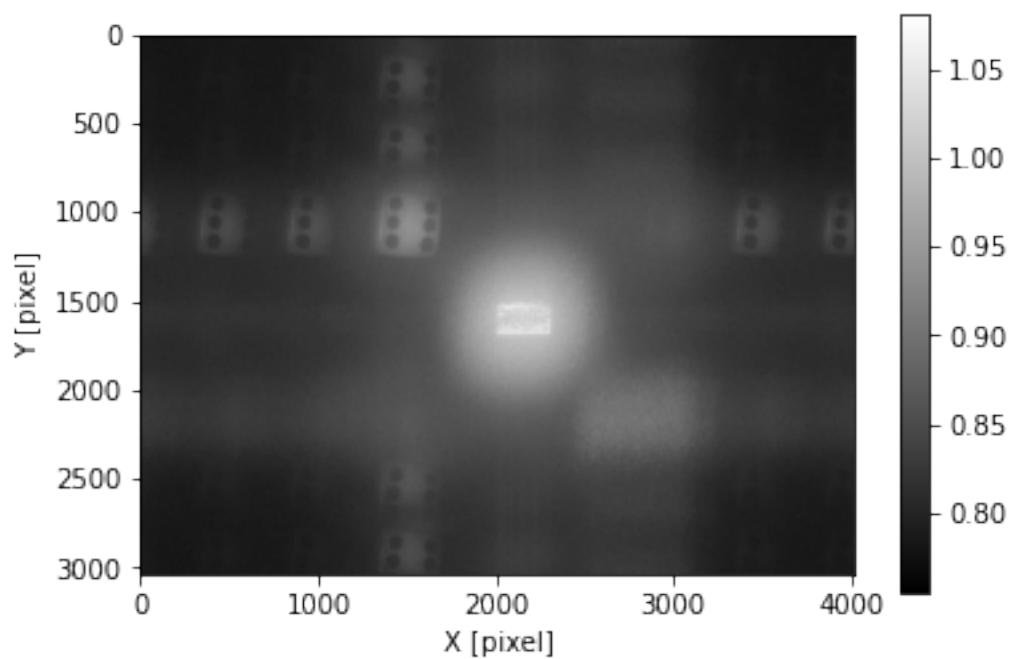
שינו את זמן החשיפה של המצלמה בטוויה $sm(10500 - 117500)$ בקפיצות בסדר גודל של $sm0000.1$. צילמנו עבור כל ערך וshoreנו את התמונות.

5.3 תוצאות הניסוי ועיבודן

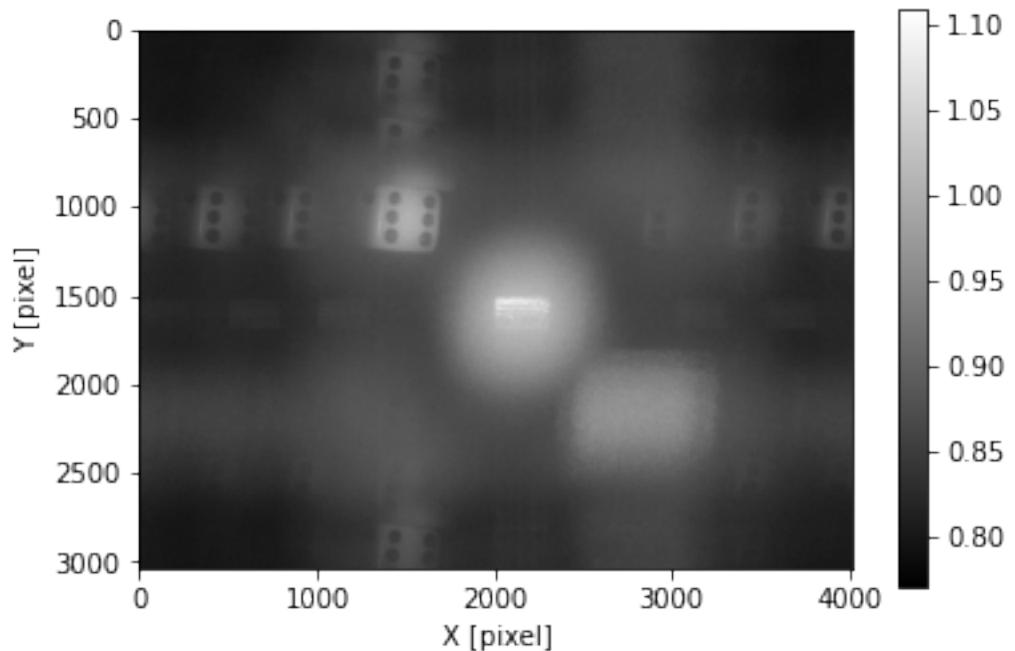
להלן שחורי התמונות לזמן חשיפה שונים, המפורטים בɕותרות התמונות:



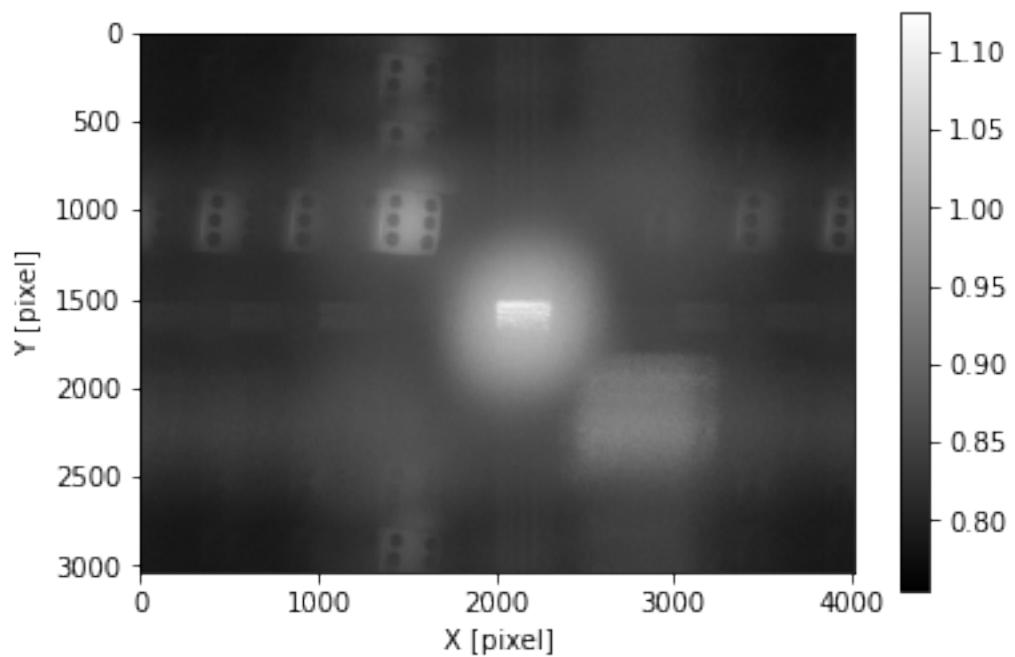
אייר 4, ניטוי 26, $16800\mu\text{s}$



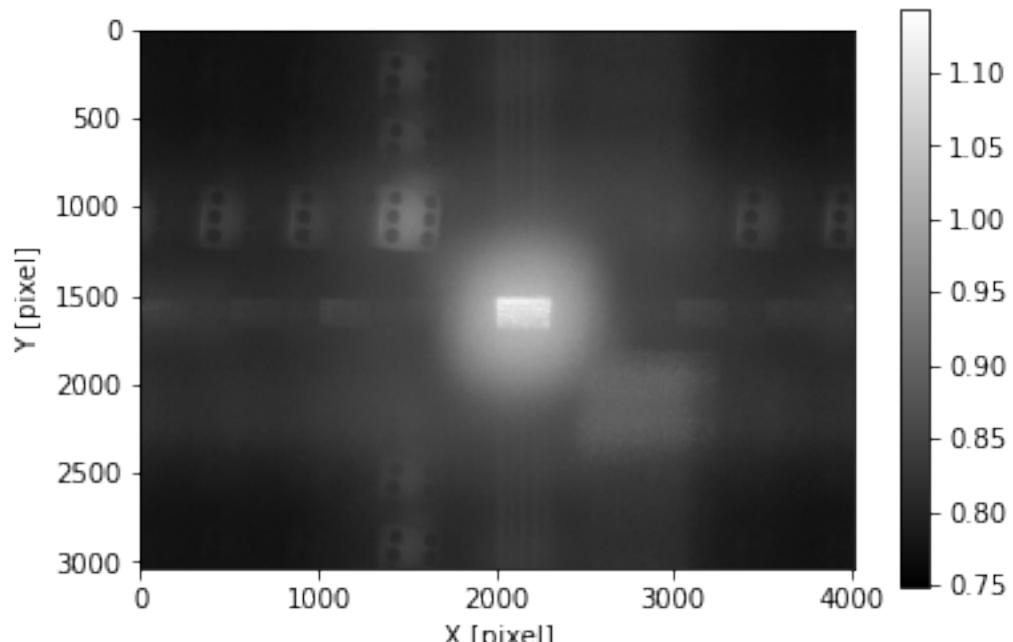
אייר 4, ניטוי 27, $25200\mu\text{s}$



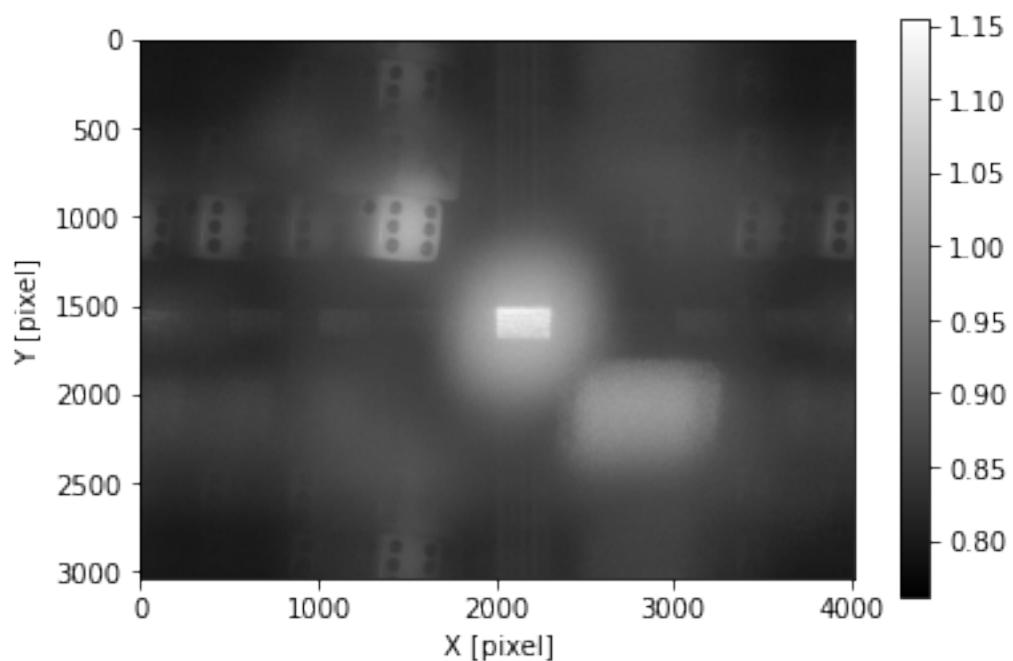
אייר 4, ניטוי 34800 μ s :28



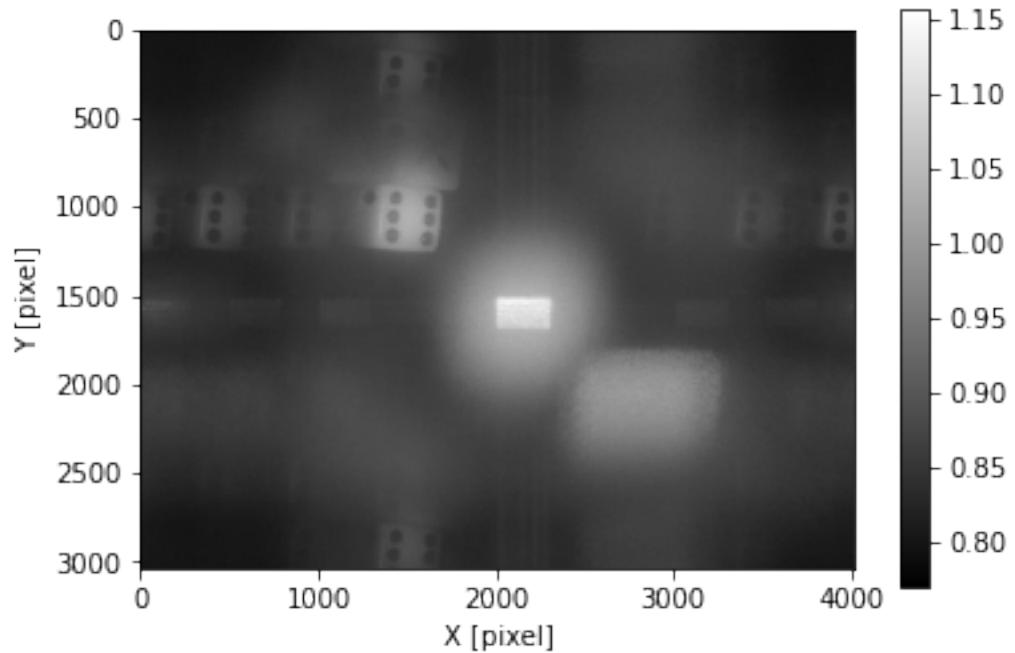
אייר 4, ניטוי 43200 μ s :29



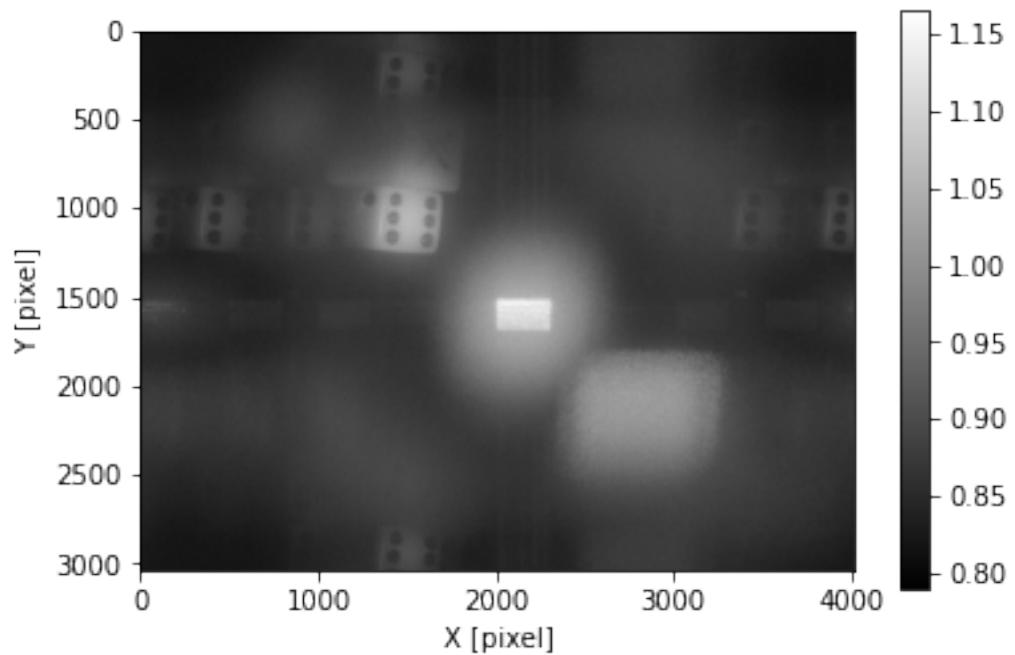
אייר 4, ניטוי 30, $54000\mu s$



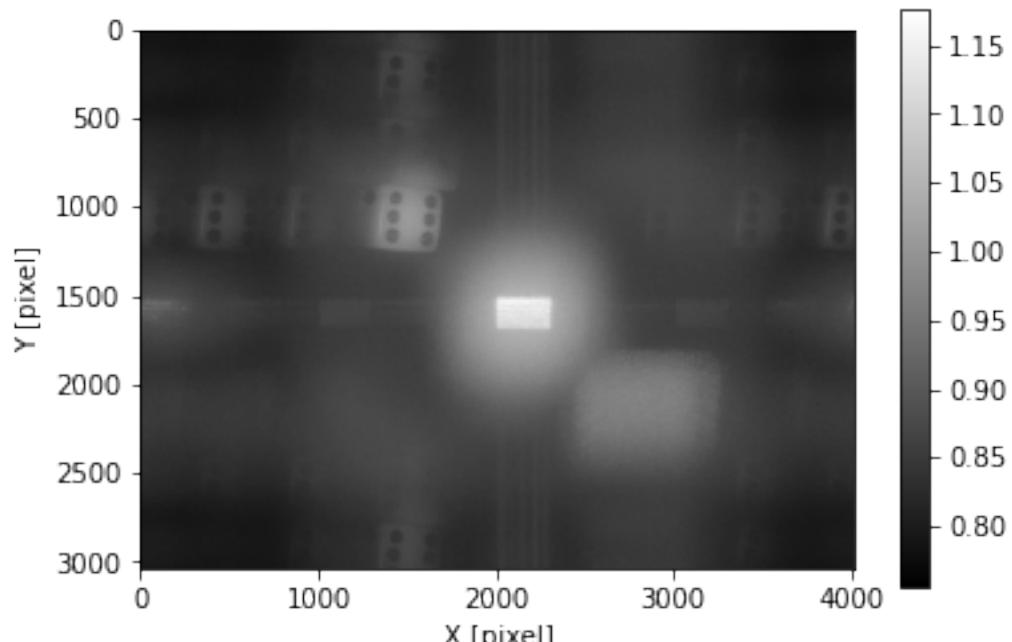
אייר 4, ניטוי 31, $64800\mu s$



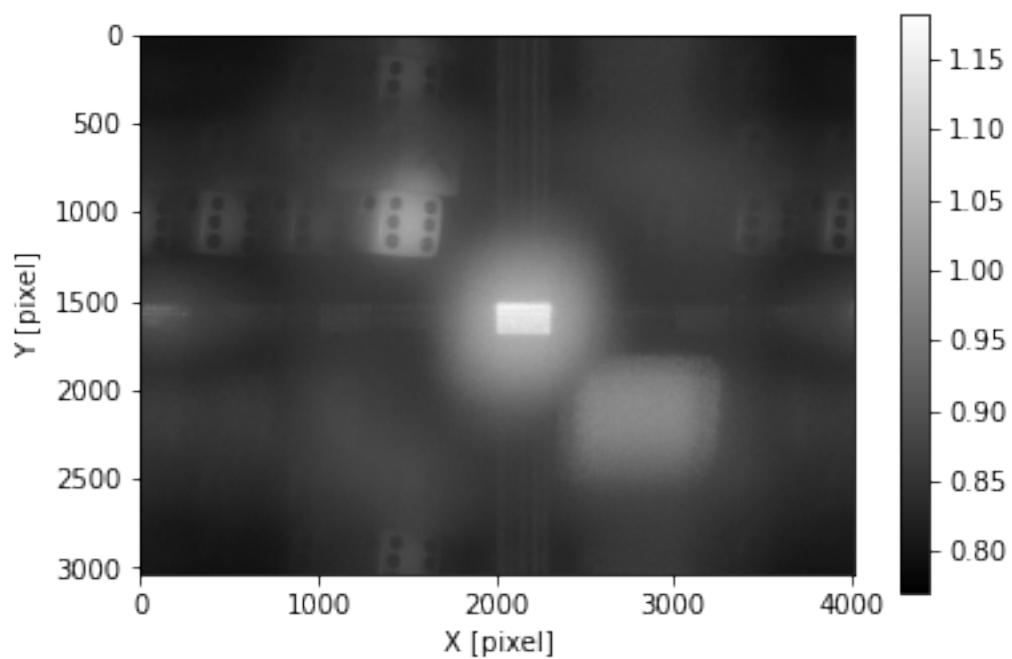
איור 4, ניטוי 32, 74400 μ s



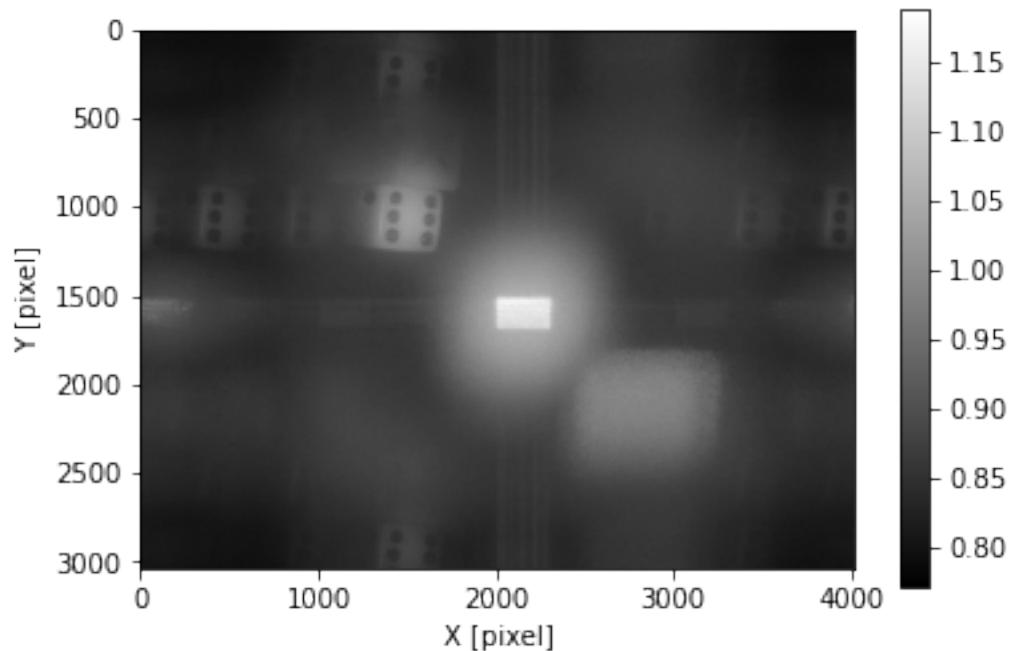
איור 4, ניטוי 33, 85300 μ s



אייר 4, ניטוי 34, $94900\mu s$



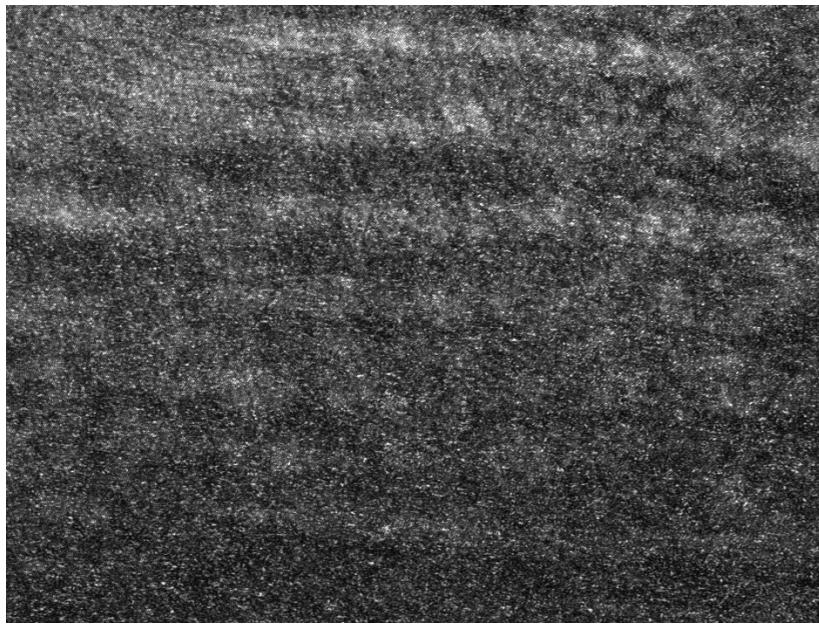
אייר 4, ניטוי 35, $105000\mu s$



איור 4: 36, ניסוי 117700 μ s

5.4 דיוון בתוצאות ומסקנות

- זמן החשיפה זה הזמן עליו המכצלמת סוכמת את האות הנכנס, זאת אומרת שנקלט תמונה בהירה וברורה יותר (פחות משקל לפלקטואציות), אך מסתכנים ברוigkeit פיקסלים אם הזמן חשיפה גבוהה מדי.
- ניתן לראות באירורים 26-36 כי אין שינוי מאוד משמעותי באיכות התמונה פרט**לבהירות גבוהה יותר לזמן חשיפה גבוהים יותר.** ניתן להסתכל לפי הפאה הצדית של הקובייה כמו שהකונטרסט על פניה טוב יותר לזמן החשיפה הגבוהים יותר.
- בניסוי הענו לזמן החשיפה המקסימלי ללא קבלת רוויה משמעותית, כאשר תמונה ההתארכות בזמן חשיפה המקסימלי נראה כך:



איור 37: תמונה התארכות לזמן חשיפה מקסימלי, ניסוי 4

לכן לא הצלחנו לצפות בדיעיכת איכות התמונה שהיינו מ齐聚ים לראות לאחר שיטור ויתר פיקסלים מגיעים לרוויה. אנו מציעים לשיפור לתכנן את המערכת כך שעבור זמני החשיפה הגבוהים.cn יגיעו לרוויה, על מנת לראות את השפעת אפקט זה על התמונה.

- כפי שלא הגענו לגבול בו מתחילה רוויה משמעותית, הגענו למסקנה שזמן חשיפה גבוהים יותר עדיפים ומשפרים את בהירות האובייקט המצולם כל עוד נשאים באותו גבול. כפי שמצופה.

6. ניסוי הרחבה – צילום אש והשפעת טמפרטורה

6.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה לבדוק את השפעת שינויי טמפרטורה בתוך בו עבר אור, על תמונה התארכות שלו עם גל אחר (איתו הוא קוהרנטי) על ידי שימוש בהולוגרפיה דיגיטלית.

ננסה למצוא על ידי ההולוגרפיה את השפעת הטמפרטורה על השינוי במקדם השבירה בתוך וננסה לבדוק האם ניתן לצלם אש בשיטה זו.

6.2 תיאור המערכת ומחלק הניסוי

נעבוד במערכת זהה לו של הניסוי המקורי, כאשר במקום אובייקט נציב מראה שמכונת גם כן אל-CCD. נבצע מדידות במערכת זו כאשר הינה ללא שינוי, כאשר מדליקים להבה על מסלול אחת הקרןיהם, כאשר מדליקים להבה מתחת לאות הקרןיהם וכאשר מהמים פליטת חום מתחת לקרן בצורה מבוקרת לערכי טמפרטורה של $(50, 100, 150, 200)^\circ\text{C}$.

הלהבה מודלקת על ידי מצית שగרתית וחימום האויר יבוצע על ידי פלטת חימום מרובעת בגודל $12cm \times 12cm$ אשר הוצמדה מתחת לקרן (ambil'i לחסום את החלק העיקרי שלה) בMOVE שנדוד על ידי סרגל c-mm $(6 \pm 1)mm$.

נציין כי הונח קרטון בין המציג CCD למניעת הגעת אור ישיר מהאש אל המצלמה.

6.3 תיאוריה נספפת וחישוב צפי התוצאות

התמונה שנמדוד תהיה במרקם הפאזה, כאשר בגל שהgal נע בתוכים שונים ב מהירותות שונות, כתלות בקדם שבירה שלו, הזרק האופטי שלו תשנה ולכן הפאזה בהתאם. מהירותות התקדמות הגל תלויות בקדם שבירה כך:

$$(31) \quad n = \frac{c}{v}$$

עבור a מקדם שבירה, c מהירות הגל בvakum (מהירות האור עבר אור) ו- v מהירות בתווך .

לכן הפרש הפאזה מכך תתקבל לפי:

$$(32) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{l_1}^{l_2} (n(x, y) - n_0) dl$$

כאשר $\Delta\phi$ הפרש הפאזה הנוצר, λ אורך הגל, n_0 מקדם השבירה הלא מופרע, (x, y) n המקדם שבירה המופרע אשר יכול להיות בתלות מרחבית, l_1, l_2 גבולות התחום המרחב של שינוי המקדם ו- dl מרחק אינפיטיסימלי לאורך התקדמות הקラン.

את ההפרש המצופה למקדם השבירה כתלות בטמפרטורה נקבל לפי משוואת לורנץ-לורנץ:

$$(33) \quad T = \frac{T_0}{\left(\frac{n - n_0}{n_0}\right)\left(\frac{3PA + 2RT_0}{3PA}\right)}$$

כאשר n_0 הגדים הלא מופרעים, A ה-*molar refractivity* של התווך, ושאר הגדים כפי שהוגדרו קודם.

ערך A תלוי בקבטיביות המומוצעת של האויר, אשר לפי מקור [7] תיתן:

$$A_{air} = \frac{4\pi}{3} N_A \alpha = \frac{4\pi}{3} 6.022 \cdot 10^{23} \cdot 2.118 \cdot 10^{-29} \cong 5 \cdot 10^{-5} m^3$$

טמפרטורת האויר דועcta מהר ככל שמתרחקים מהפלטה, ויעזר במשוואת ממוקד [9]:

$$(34) \quad T_{air}(z) = (T_{plate} - T_{room}) \exp\left(-\frac{z}{l_c}\right) + T_{room}$$

עבור T_{air} טמפרטורת האוויר, T_{plate} טמפרטורת הפלטה, z הגובה מעל הפלטה, T_{room} טמפרטורת החדר ו- l_c אורך אופייני. לפי אותו מקור, $l_c = (2 - 4)mm$ בדרך כלל בחדר סגור. אנחנו מדדנו את הקמן כ- $0.6cm$ מעל הפלטה, ולכן נערך את אקספוננט הדעיכה להיות בערך e^{-2} .

עבור $66 n(T = 25C^\circ) = 1.000266$ (משווה (33)) נחשב את ההפרשיות שמצופים ב- n .

בנוסף למשווה (33) בדכנו במקור [8] המחשב ערכיהם אלו, בתוספת תיקונים נוספים שלא נלקחו בחשבון כמו לחות ואורך גל. התוצאות יוצאות קרובות, ובמקרה של הפרשיות, נלקח הערך ממקור [8]. סך הכל ההפרשיות המצוופים:

$\Delta\phi$	$n - n_0$	טמפרטורת אוויר מערכת [C°]	טמפרטורת פלטה [C°]
0	0	25.0	25
3.9	$3 \cdot 10^{-6}$	28.4	50
11.7	$9 \cdot 10^{-6}$	35.1	100
19.5	$1.5 \cdot 10^{-5}$	42.1	150
27.3	$2.1 \cdot 10^{-5}$	48.7	200

טבלה 3: מקדמי שבירה והפרש פאזה כתלות בטמפרטורה, ניסוי 5

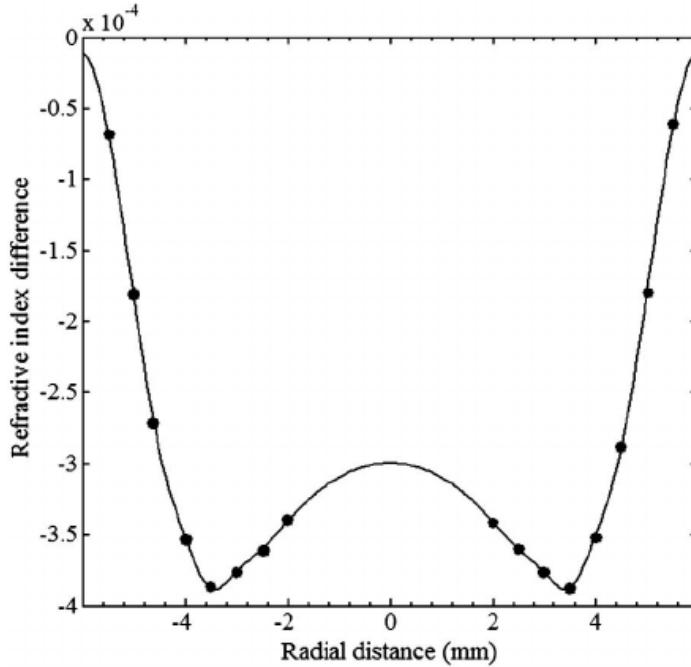
כאשר הפרש הפאזה המצוופה חושב לפי משווה (32):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{l_1}^{l_2} (n - n_0) dl \approx 1.3 \cdot 10^6 \cdot (n - n_0)$$

בהצבת האורך גל של הליזר ו- l_1, l_2 גבולות האיזור עם מקדם השבירה השונה כאורך הפלטה.

נצין כי לפי הערכים בטבלה 3 נצפה לפסי התאבכות ולא רק איזוריים חשוכים/בhairים יותר, כי ההפרשיות גדולים מ- $\pi/2$. זאת פרט ל- $50C^\circ$ שם נצפה שלא נראה פסים אלא איזוריים בbehירות שונה.

עבור האש הטמפרטורה תהיה פחותה אחדיה למרחב, לא נמצא מקור רשמי של היצרן או מקור מדעי לטוויה – הטמפרטורות, لكن ניעזר במקור [4] בו הפרש מקדם השבירה בללה מהסבيبة חושב בניסוי דומה לשולנו – נמצא כי הוא נע כתלות ברדיוס בין $(0.5 - 4.0) \cdot 10^{-4}$ (r). ניתן לראות זאת בתמונה הבאה:



איור 38: מקדם שבירה בללהב, ניסוי 5, נלקח מ-[4]

קוורט להבה של מציג הוורך $C\text{-}cm}(1 \pm 0.5)$. נעריך באופן גס לפי משווהה (32) את טווחי הפרשי הפaza שנצפה להן בין שכבות שונות בללהב ובין טמפרטורת החדר:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{l_1}^{l_2} (n - n_0) dl \approx 10^5 \cdot (n - n_0)$$

ומפה נעריך הפרש של $\Delta\phi \approx 35$ בין השכבות החמות והקרות ביותר באש, הפרש של $40 \approx \Delta\phi$ עבור השכבה החמה ביותר לשאר החדר והפרש של $\Delta\phi \approx 5$ עבור השכבה החיצונית לשאר החדר. הבדלים משמעותיים אלו מניבים תמונה שונה באופן שימושית (שוני בין תמונה עם $C\text{-}6.3$ פטי התארכות לבין תמונה ללא פס התארכות מלא (כלל) כפונקציה של האיזור המצלום (אייפה בללהב עובר הלוייזר). המערכת שהובילה אותנו לצלם את הללהב פעמי אחת כאשר הלוייזר עבר בערך במרכז ופעמי אחת כאשר קצה הללהב מוצמד מתחת ללייזר.

6.4 תוצאות הניסוי ועיבודן

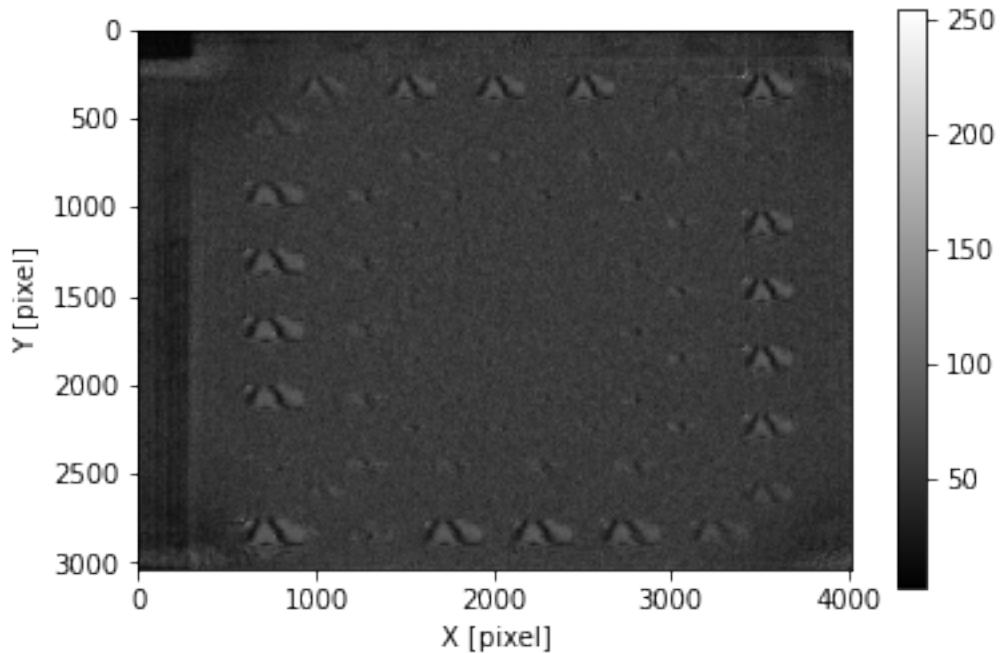
שחזרנו את התמונות ואנו העברנו אותם למיפוי הפaza על ידי ביצוע $\arctan\left(\frac{Im(I(x,y))}{Re(I(x,y))}\right)$

לכל תמונה עם פלטה מחומרת או אש דלוקה, החסרנו את מפת הפaza לפני החימום (תמונה נפרדת לאש ולפלטה). בשביל הפרש פאות חיובי וממחזוריות $\pi/2$ ההפרש חושב לפי:

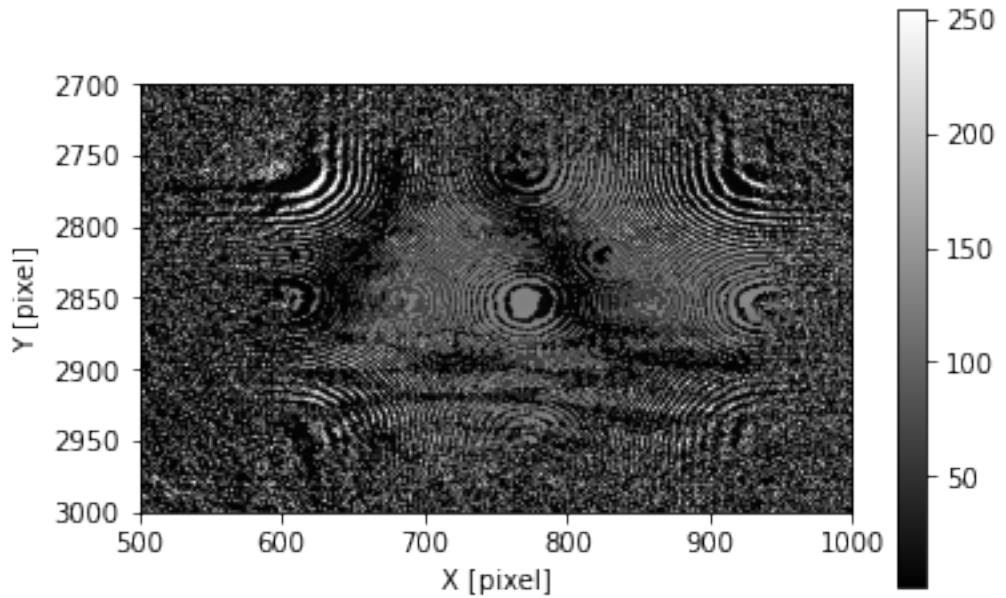
$$\phi_{heated} \geq \phi_{room\ temp} \text{ אם } \Delta\phi = \phi_{heated} - \phi_{room\ temp}$$

$$\phi_{heated} < \phi_{room\ temp} \text{ ואם } \Delta\phi = \phi_{heated} - \phi_{room\ temp} + 2\pi$$

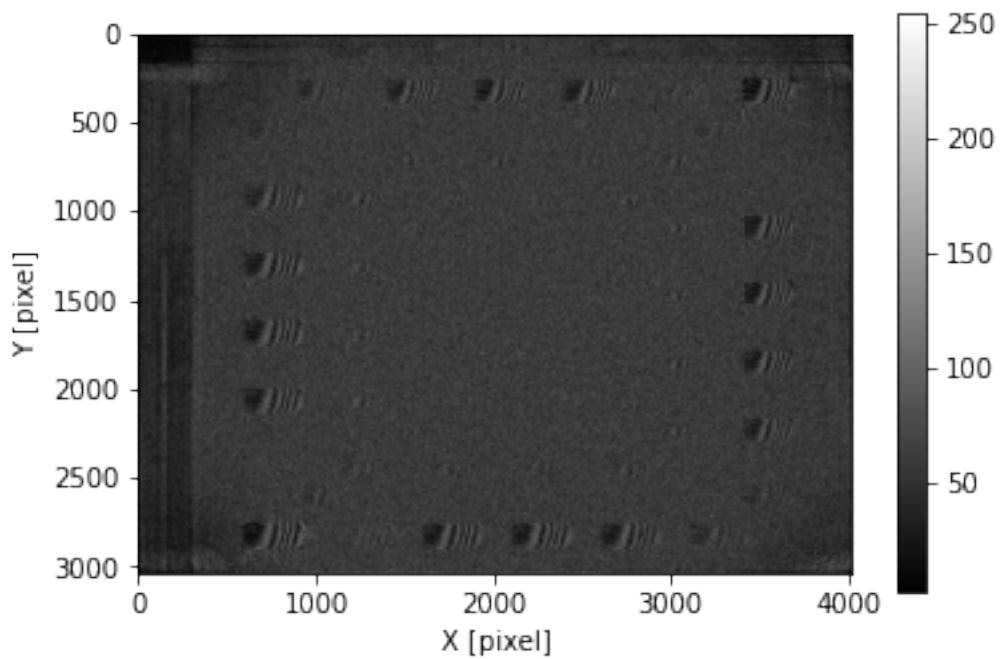
התמונות שהתקבלו מרכיבות מהרבה השתקפות של אותה תמונה קטנה (בדומה לניסויים הקודמים), לכן נציגו לאחר כל שזרור גם את ההתמונות היחידות בתמונה (הטמפרטורה והאם זו אש או פליטה מצוין בתמונות עצמן):



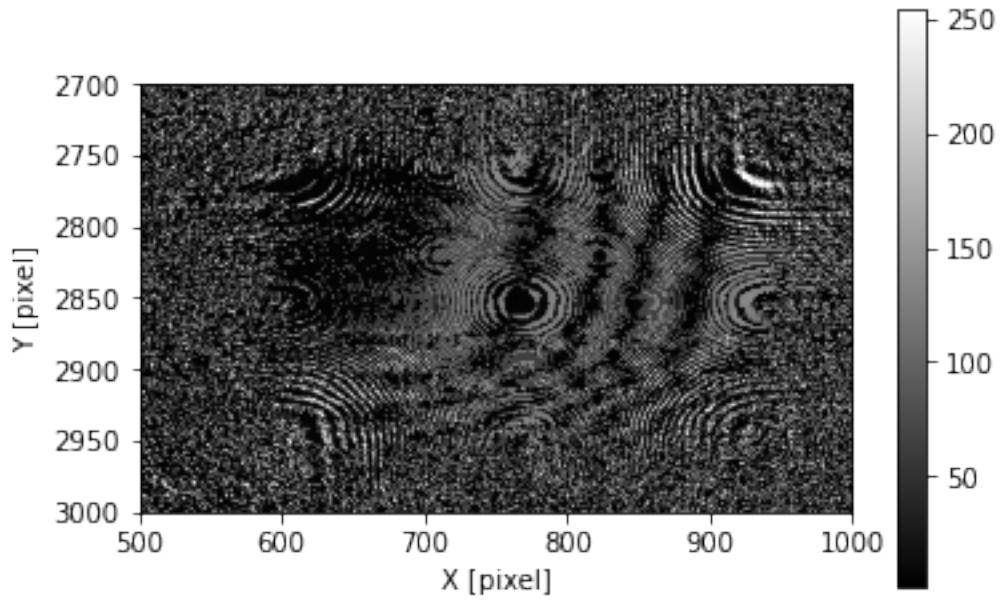
איור 39: מצית, קרן עוברת בקצת העליון של הללהבה, ניסוי 5



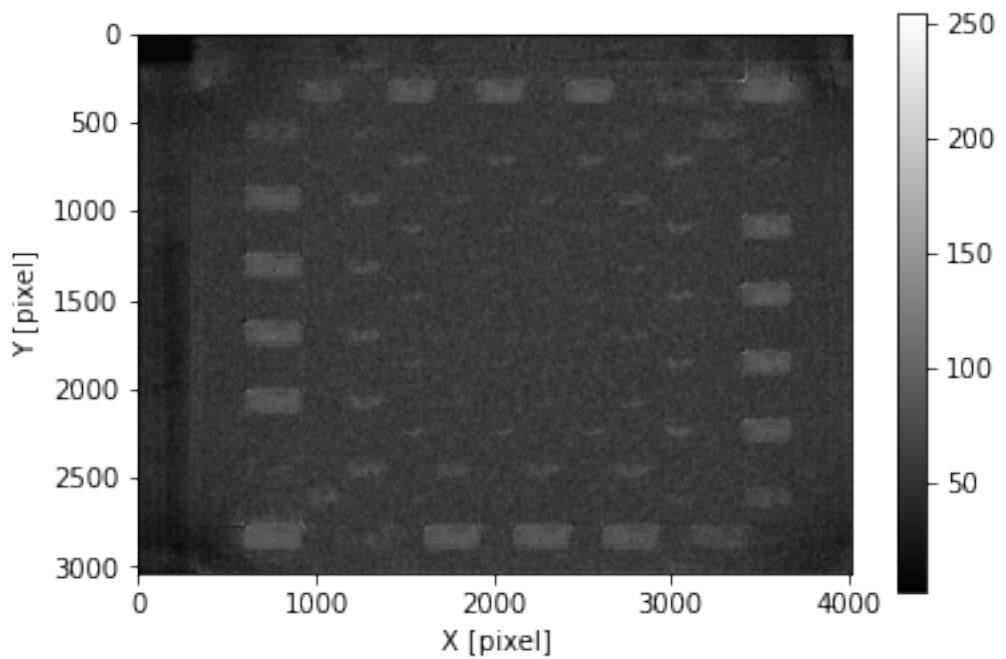
איור 40: מציג, קרן עוברת בקצת העליון של הל哈哈, התמונות, ניסוי 5



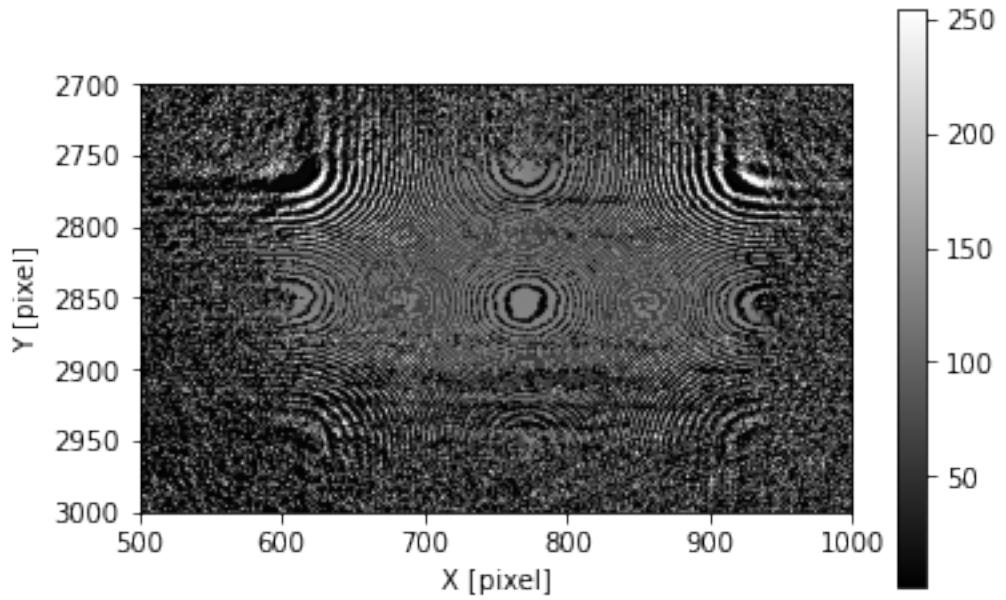
איור 41: מציג, קרן עוברת במרכזו של הלחה, ניסוי 5



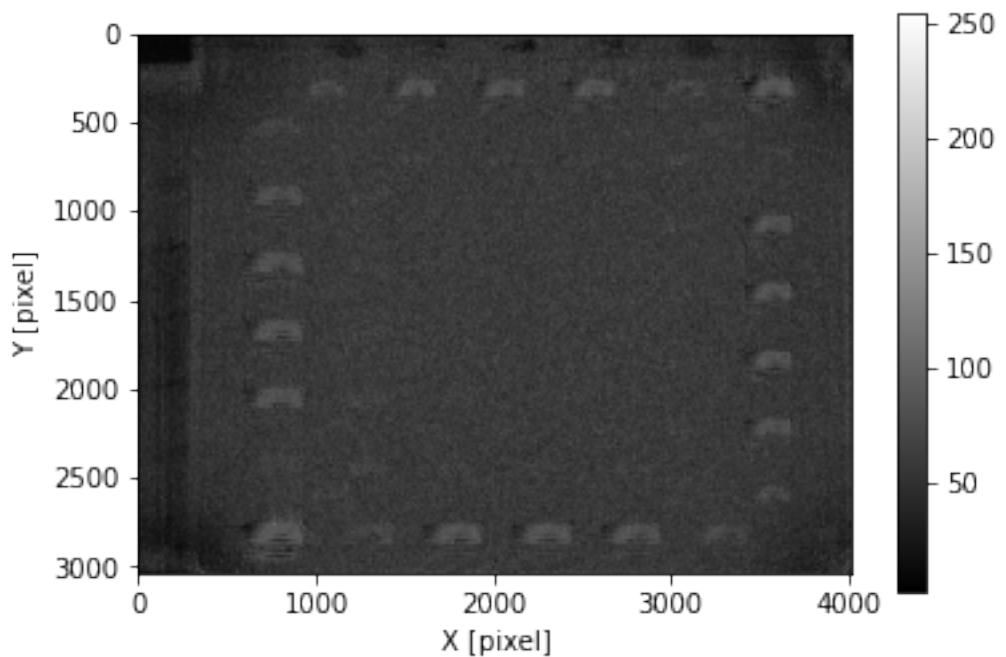
איור 42: מצית, קרן עוברת במרכז הללהב, התמונות, ניסוי 5



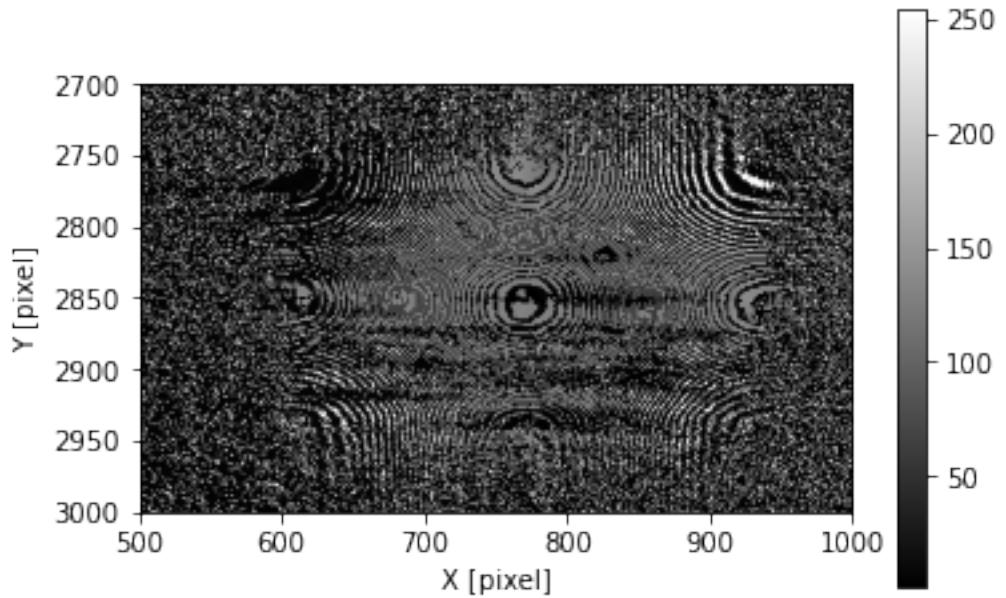
איור 43: פלטה, $50C^\circ$, ניסוי 5



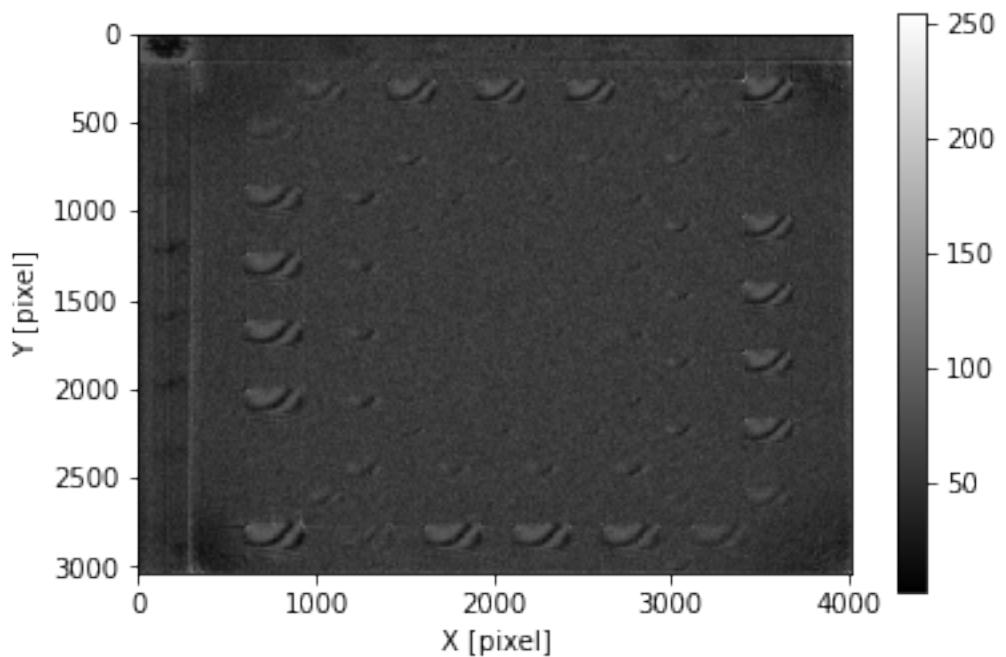
איור 44: פלטה, $50C^\circ$, התמונות, ניסוי 5



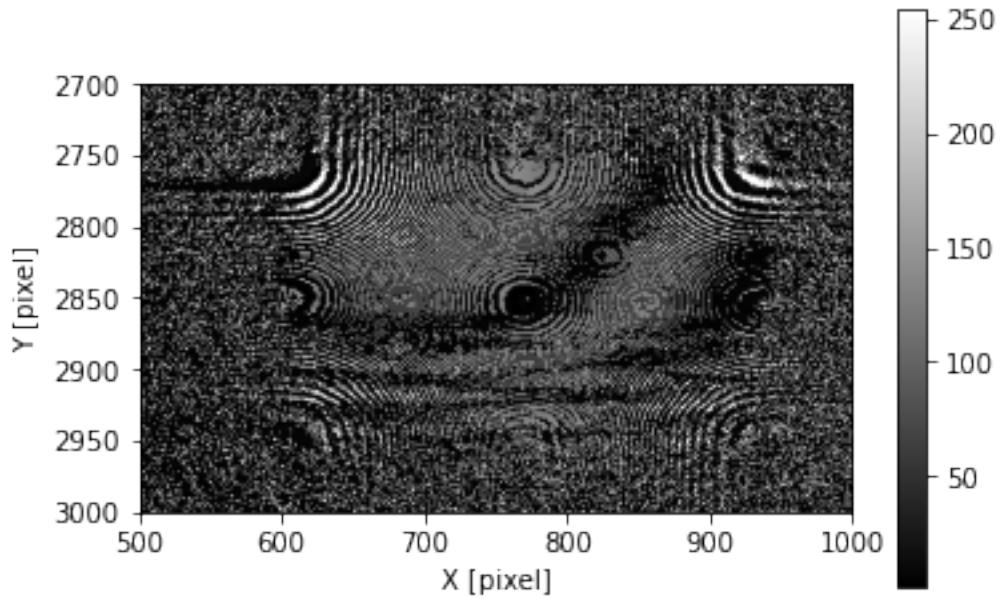
איור 45: פלטה, $100C^\circ$, ניסוי 5



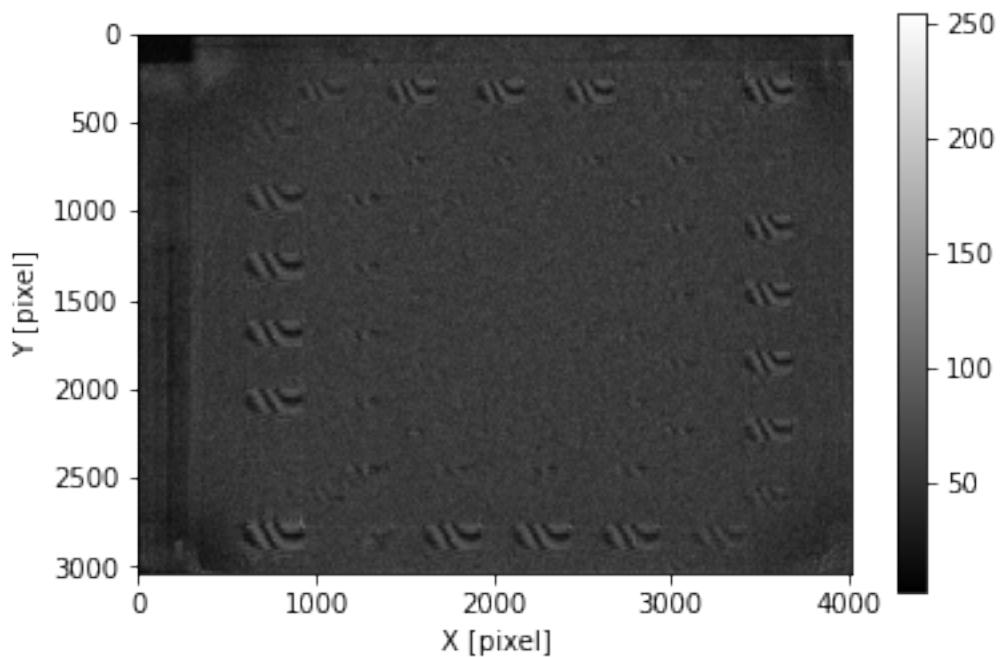
איור 46: פלטה, $100C^\circ$, התמונות, ניסוי 5



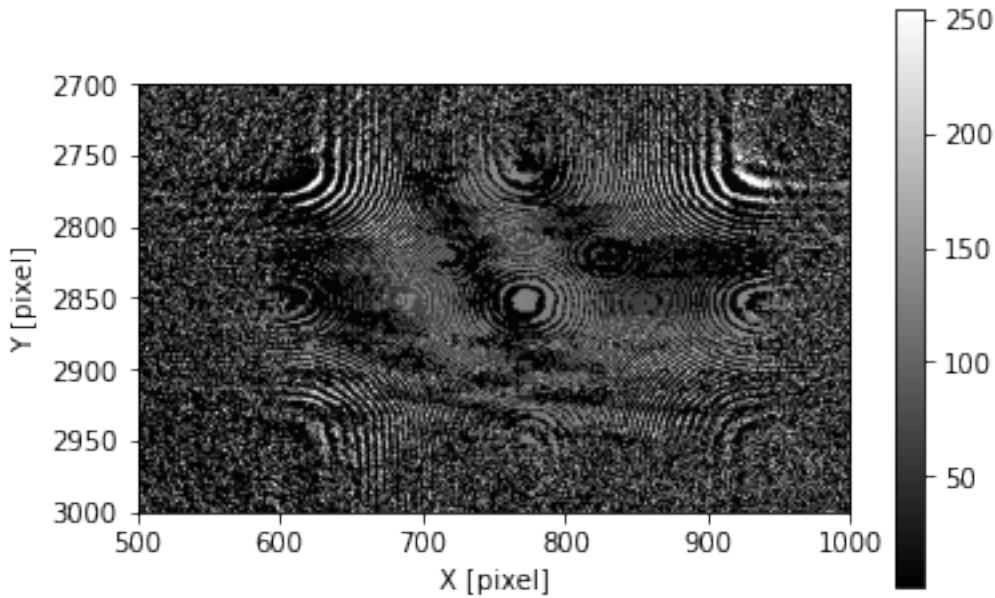
איור 47: פלטה, $150C^\circ$, ניסוי 5



איור 48: פלטה, $150C^\circ$, התמונות, ניסוי 5



איור 49: פלטה, $200C^\circ$, ניסוי 5



אирו 50: פלטה, $200^{\circ}C$, התמימות, ניסוי 5

6.5 דיוון בתוצאות ומסקנות

- הצלחנו לקבל תמונות של הפרשי פאה ובהן ניתן להבחין בבירור בפסי התאבכות. ניתן לראות באופן מיידי גם כי בתמונות עבורין ציפינו לראות יותר פסי התאבכות (לפי טבלה 3) באמת התקבלו עם יותר פסים. נדון בהתאמה לכל תמונה בהמשך הפרק.
- בעיה ששמים לב אליה באופן מיידי היא גודל הקREN העוברת באש/היאזור החם, אשר בבירור הייתה קטנה מדי. ניתן לראות זאת לפי הגודל הקטן של התמונות בכל תמונה שחזרו וגם לפי הגודל והצורה של פסי התאבכות שהתקבלו – זאת אומרת שرؤאים בתמונות של הלבה כי פסי התאבכות אינם בצורת הלבה אלא חלק קטן ממנו, בזמן שבתמונות של הפלטה גם לא רואים צורה כללית יותר של ה"ענן חום" שהיינו מצפים לראות מעל פלטה, אלא חלק ממנו. בנוסף לחסרון האסתטי שלא הצלחנו לצלם התנוגות של הטמפרטורה בסקלאות גדולות יותר או לצלם את מלאו הלבה בתמונה אחת, זה מעלה בעיה כמותית – חלק מפסי התאבכות בין האיזור החם ביותר לאייזור שבערך בטמפרטורת החדר "נמצאים מחוץ לתמונה". מכאן אנו מעריכים כי נספור מספר פסי התאבכות קטן יותר מזה שמהושב בטבלה 3. ננסה להעריך בהמשך מההתיאוריה והתוצאות כמה פסים "פוספסו".
- נציג כי בתמונות התמימות רואים פסי התאבכות קטנים יותר מאשר בספרנו, בדרך כלל במצב טבעי. אך אנו סבורים כי מדובר בתאבכות מפגמים בעדשות או שאר הרכיבים האופטיים ומסיבה זאת ידענו לא לספור אותן כתוצאה מטמפרטורה. נצדיק טענה זו לפי העבודה שהם באותה הצורה והסקאלה שקיבלנו גם בניסוי המקורי מעדשות פגומות, וגם לפי ההערכה כי אין גורם פיזיקלי

במערכת שיגרום לשינויי טמפרטורה כה קיצוניים (מספר רב של טבעות התארכות) ובמידים כה קטנים.

מעבר הפלטה:

- ב- ${}^{\circ}C$ 50 קיבלנו תמונה מאד מונוכרומטית, ללא פסי התארכות ואפלו ללא גרדיאנט צבע ניכר לעין. תוצאה שבקירוב מתאימה לצפי מטבלה 3, שם חישבנו הפרש פואה שמתאים ל-0.6 רוחבי פס (אשר כמובן חושב כהפרש הפואה שחושב חלקי $\pi/2$). لكن עצם העובדה שלא ראיינו פס התארכות توأم את הצפי שלנו, אך אין לנו מצלמים לראות איזור מואר או איזור החושך, מה שהערכתיינו לא רואים בבירור בגל גודל התמונה.
- ב- ${}^{\circ}C$ 100 קיבלנו תמונה בה אנו מעריכים שנכנס בקרוב כמעט פס התארכות אחד – הפינה השמאלית למעלה החשוכה ובהתחתי התמונה מתחילה איזור החושך גם כן. לפי טבלה 3, ציפינו לראות כ-1.8 פסי התארכות בתמונה. אזי כמחצית מהפרשי הפואה מעריכים כמוחז לתמונה, מה שニיחס לגודל התמונה.
- ב- ${}^{\circ}C$ 150 קיבלנו תמונה בה אנו מעריכים 1.5 פסי התארכות – רואים פס אחד ברור (בין אם סופרים שחור או לבן) ואחריו מגיעים בבירור לצבע ההפוך. לפי טבלה 3 ציפינו ל-3.1 פסי התארכות.שוב פעמי כמחצית מהצפי וניחס זאת לגודל התמונה.
- ב- ${}^{\circ}C$ 200 קיבלנו תמונה בה אנו מעריכים 2.5 פסי התארכות – רואים בבירור שתי פסים מלאים באלביסון, ועוד האגעה לצבע ההפוך ממנו החלנו. לפי טבלה 3 ציפינו ל-4.3 פסי התארכות.שוב פעמי כמחצית מהמצופה וניחס זאת לגודל התמונה.

מעבר האש:

- בתמונה של הקצה העליון של האש קיבלנו פס התארכות אחד ברור. נציין כי צורת הפס בבירור توأم את הצורה המרחבית של קצה להבה (מעין "חוד") ולכן נגדי הצלחנו "לצלם" את הלהבה כפי שציפינו, גם אם רק באופן מקומי ומצויץ. בפרק הצפי חישבנו כי מעבר השכבה החיצונית ביותר של הלהבה נצפה להפרש פואה שתואם בערך ל-0.8 רוחבי פס, מה שתואם בקרוב טוב לתמונה שקיבלנו. אנו מעריכים כי דוקא בתמונה זו קיבלנו תוצאה מדוייקת יותר ולא מחצית מהצפיה כמו בשאר התמונות, כי זו התמונה היחידה שצולמה רחוק מהאיזור החם ביותר, لكن דוקא פה לא נצפה לכמות משמעותית של הפרש פואה מהאיזור המצולם עד לאיזור בטמפרטורת החדר. لكن הגודל המצויץ של התמונה, הייתה גם ככה בקצת האיזור החם, לא פגע פה בצפי המוחש. תוצאה זו משמשת כאיושר להסביר שלנו לחוסר ההתאמה בשאר התוצאות.
- בתמונה במרכז האש קיבלנו להערכתינו 4.5 פסי התארכות באופן ברור. לפי החישוב בפרק הצפי, ציפינו להפרש פואה בין האיזור החם ביותר להבה לטמפרטורת החדר שתואם בקרוב עד ל-6.3.

פסי התאבכות. תוצאה די קרובה, כאשר כמו קודם, אנו מעריכים כי הפסים החסרים נמצאים מחוץ לתמונה הקטנה. נציין כי הפסים אנקטיביים מכיוון שהלייזר אינו בדיק במרכז הליהבה ולכן הגיוני כי גרדיאנט הטמפרטורה יהיה במרכז הליהבה בלבד. אפשר לומר כי הצלחנו "לצלם" באופן מקומי את הצד הימני של הליהבה כפי שציפינו.

- נעיר כי פסי התאבכות בפלטה אינם אופקיים כפי שאולי היינו מצפים מפלטה המונחת אופקית. אנו מיהשים זאת לשתי סיבות עיקריות: הראשונה שהקרן לא עוברת במרכז הפלטה בדיק, ולכן הגיוני להניח כי הצד שפונה למרכז הפלטה יהיה בטמפרטורה גבוהה יותר. השניה שהמערכת שלנו דינמית, לא בשינוי משקל ולא במצב יציב, לכן סביר להניח שהאויר החם מעלה הפלטה בעל טורבולנטיות שימושונה מתמונה לתמונה.
- בסך הכל קיבלנו תוצאות בסדר גודל והתניות (צורת הפסים ואייפה נקבע יותר/פחות פסים) תואמת למאה שציפינו, אשר באופן סיסטמטי בערך חצי (קצת פחות, בין 0.4~0.5) מפסי התאבכות שניבנו היו חסרים בתמונה ואנו מיהשים הפרש סיסטמטי זה לגודל התמונה הקטן שנבע מקרן צרה מדי, כפי שצוין קודם. העובדה שהיחס סיסטמטי מחזק את הטענה שגודל התמונה גורם לכך, אם נעיריך כי גודל האיזור החם בין תמונה וציפוי פסי התאבכות בכל תמונה לא משתנים באופן קיצוני. הערכות שניתנו להתרשם שמתיקיות בניסויים [4] ו-[6] לדוגמה.
- ניסינו להעריך כמותית ממשואה (34) כמה פסי התאבכות פוספסו, על ידי הוספת רוחב הקרן לדעיכת האקספוננציאלית כתלות במרקח. אך אין זה מש夸 בצורה טובת את המערכת, כפי שעבור האש זה לא רלוונטי, היותה תהליך כימי, לא מתואר טוב על ידי פיזור חום מפלטה וכי עבר התמונות של הפלטה פסי התאבכות אינם מקבילים לפלה, זאת אומרת שיש מקור חום בכיוון שאינו ניצב לגרדיאנט הטמפרטורה, מה שהופך את המשואה להרבה פחות רלוונטית ככל שמתרחקים מהפלטה.
- בגלל חוסר הצלחה והמורכבות להעריך אנליטית את כמות פסי התאבכות מחוץ לתמונות, אנו נאלצים להסתמך על המדידות והתאמתן לצפי באופן בלעדי להסיק כי להערכתינו כמחצית מפסי התאבכות נשארו מחוץ לתמונות המצלמות.

7. סיכום ומסקנות

- הצלחנו לבנות מערכת הולוגרפיה שהניבה תמונות ברורות. היישנו ומדכנו פרמטרים שונים המערכת – מצאנו חסם למרחק האובייקט מהצלמה $d > 10\text{cm}$, מצאנו חסם לזווית האובייקט מהקרן רפן – $\theta < 9.7^\circ$, מצאנו שעוצמות האור של הרפרנס והאובייקט צריכות להיות כהה שיוור שווה. ראיינו שעדיין זמן חיפוי גובה יותר כל עוד לא מגיעים לרוחה בתמונה התאבכות, ראיינו שעדיין לשים את האובייקט בזווית מינימלית שהקרן והאובייקט אפשו לנו.
- הצלחנו לייצר תמונה במקת הפהזה עבור איזורים בטמפרטורות שונות, על ידי פלטה הימים ועל ידי הדלקת אש. בשתי המקרים הפרשי הפהזה היו גדולים מ- 2π כך שהצלחנו למדוד פסי התאבכות בשתי המערכות ואף לזהות את צורתה של הלבה באופן מקומי. הצלחנו גם כן לחשב את מקדמי השבירה וכמויות פסי התאבכות שציפינו במערכת, מה שתואם עד כדי בערך פקטורי 2, אותו אנו מיחסים בעיקר לגודל תמונה קטן מדי.

8. הצעות לשיפור הניסוי

- איזות המצלמה ובמיוחד גודל הפיקסלים, יאפשר תמונות איזומטריות יותר ועובדת עם פסי התאבכות קטנים יותר.
- הרגליים המגנטיות עליהם הרכיבים האופטיים מורכבים והתקנים עליהם דיבים ובכך מנעו לעיתים קרובות להצמיד רכיבים בצדקה מיטבית.
- פגמים בעדשות יוצרם טבעות התאבכות בתמונה המתקבלת ומעקמים את פסי התאבכות הרצויים.
- במספר ניסויים נמנעו מלשנות פרמטרים לאחר הגעה לרוחה, אך הינו מציעים כן למדוד מעבר לתחום זה על מנת למדוד את השפעת רוחת הפיקסלים על התמונות המתקבלות ובכך גם ללמידה יותר על הפרמטרים המיטביים לקבלת תמונה מיטבית.
- חקר וביצוע תכניות פילטור היו משפרים את התמונות על ידי הורדת ההשתקפות, למראות שניתן לחתו את התמונות לאחר שחזרו.
- הגדלה משמעותית של הקרן בניסוי הרחבת הייתה נדרשת על מנת לתפוס את כל פסי התאבכות, את צורת הלבה באופן מלא וגם אפשרות לראות התנוגות בסקללה גדולה יותר עבר הפלטה. אנו ממליצים להרחיב לקרן בקוטר 4cm לפחות.

9. רשימת מקורות

[1] תדריכי ניסוי 'הולוגרפיה', אוניברסיטת בן-גוריון

<https://moodle.bgu.ac.il/moodle/mod/page/view.php?id=2091754>

THORLABS – HeNe laser [2]

https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=10776

Holographic Visualisation of a Combustion Flame, P.J Bryanston-Cross & J.W. [3]
Gardner

[https://sci-hub.hkvisa.net/10.1016/0143-8166\(88\)90017-6](https://sci-hub.hkvisa.net/10.1016/0143-8166(88)90017-6)

Digital holographic interferometry for measurement of temperature in axisymmetric [4]
flames, Shobhna Sharma, Gyanendra Sheoran, Chandra Shakher

<https://sci-hub.hkvisa.net/10.1364/AO.51.003228>

General temperature field measurement by digital holography, Roman Dolecek, Pavel [5]
Psota, Vit Dedl, Tomas Vit, Jan Vaclavik, Vaclav Kopecky.

<https://sci-hub.hkvisa.net/10.1364/AO.52.00A319>

Refractive index profiling across a candle flame using speckle techniques, N. Barakat, [6]
A.M Hamed, H. El Ghandoor, S. Diab

[https://sci-hub.hkvisa.net/10.1016/0030-3992\(93\)90119-z](https://sci-hub.hkvisa.net/10.1016/0030-3992(93)90119-z)

Molecular polarizability of air, M.J Mades, D.R Brown, S.R Krutz, M.J Milliman [7]

<https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.3533354?journalCode=ajp#:~:text=The%20measured%20average%20molecular%20polarizability,n%3D1.000271375>

Metrology toolbox [8]

<https://emtoolbox.nist.gov/wavelength/Edlen.asp>

Measurement, characterization and influence of the air temperature above the build [9] plate in fused filament fabrication, Jie Zhang, Jonas Neeckx, Brecht Van Hooreweder,
Eleonora Ferraris

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277236902100013X>

איורים [10]

<https://www.toyo-chem.com/en/products/electronics/column/emishield.html> : איור 1

<https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/1-diagram-shows-pattern-interference-fringes-light-wavelength-52-x-10-7-m-passing-two-narr-q17337975> : איור 2

Digital Holography by U.Schnars & W.Jueptner : 10 ,3-6 איורים

Objective speckle velocimetry for autonomous vehicle odometry, D. Francis, : 7
T. O. H. Charrett, L. Waugh, 2 and R. P. Tatam

10. נספחים

נספח 1 – קוד ביצוע שחזור התמונה

```
import numpy as np
import scipy as sp
from scipy import ndimage
import matplotlib.pyplot as plt
import cmath
import cv2

def GammaCorr(src, gamma): ##Gamma correction function
    otpt = 255 * (src/255)**(1.0/gamma)
    return otpt

##Pixel size
dx = 1.85 * 10**(-6) # = dy
## Pixel number
nx = 4024
ny = 3036
d = 0.29 #The distance of the object from the ccd ---
needs to be measured---
l = 632.8 * 10**(-9) # The wave length
const = (np.pi * dx**2)/(d * l)
i = complex(0,1)

holo = np.empty([3036,4024]) ##The final hologram array[final picture]

obj_imp = cv2.imread("/content/[The image name].jpg")
obj = cv2.cvtColor(obj_imp, cv2.COLOR_BGR2GRAY) ##The object array[aka the hologram function]

y,x = np.meshgrid(np.arange(ny),np.arange(nx),indexing='ij')

def expf(m,n):
    f = np.exp(-i * const * (m**2 + n**2))
    return f

obj2 = np.sqrt(obj)
obj_corr = GammaCorr(obj2,1.5)

pic = (obj_corr - Iavg) * expf(x, y) ##The function over which we do the FFT
```

```
holo = 50*np.absolute(np.fft.ifft2(pic))
holo = np.fft.fftshift(holo)
holo = ndimage.gaussian_filter(holo,1)
holo = holo**0.05
plt.imshow(holo,cmap='gray')
plt.colorbar()
plt.xlabel("X [pixel]")
plt.ylabel("Y [pixel]")
plt.show
```