

א. מילות מפתח

גלים אל"מ, פיזור, זווית ברוסטר, קיטוב, עקיפה, התאבכות, סריג עקיפה, אינטרפרומטר, מקדם שבירה.

ב. מכשור

לייזר ירוק בעל עוצמה של 1mW, אורך גל של 532nm ויחס קיטוב של 3:1, שולחן אופטי, מקטבים, תא פיזור, מכשיר למדידת זווית החזרה, עדשה מרכזת, עדשה מפזרת, סדק יחיד מכני, שקופיות אופטיות, הכוללות סדקים וסריגים, אינטרפרומטר, משאבת ואקום, מד לחץ, מצלמה דיגיטלית, מצלמת CCD, מחשב.

ג. חלקי הניסוי

1. פיזור האור
2. קיטוב האור ע"י החזרה
3. התאבכות ועקיפה
4. אינטרפרומטר למדידת מקדם השבירה של גזים

ד. מבוא**ד1. פיזור אור**

כאשר שדה חשמלי \vec{E} מופעל על מולקולות בחומר, הוא משרה בכל מולקולה מומנט דיפול חשמלי \vec{p} , אשר ניתן ע"י

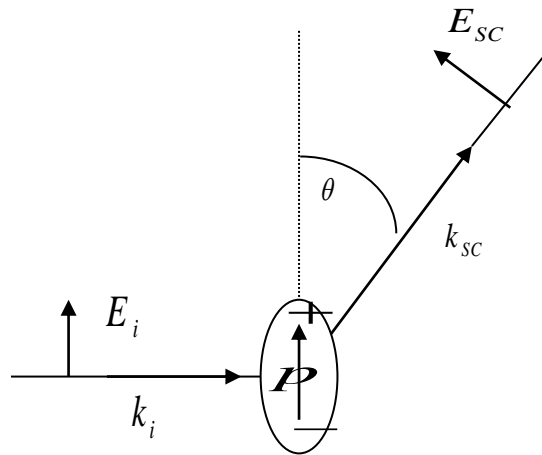
$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_i \quad (1)$$

מקדם הפרופורציה α תלוי בתכונות החומר ונקרא קוטביות.

בגל אור הפוגע בחומר, השדה החשמלי המרכיב את הגל האלקטרו-מגנטי \vec{E}_i תלוי מחזורית בזמן:

$$\vec{E}_i \propto \sin \omega t \quad (2)$$

לכן גם עצמת הדיפול המושרה תהיה מחזורית בזמן. כיוון הדיפול הינו בכיוון השדה החשמלי (ראו איור 1).



איור 1: תיאור של קרינת דיפול

נניח לשם פשטות שהאור מקוטב (כלומר השדה החשמלי מקביל לכיוון מסוים במרחב), אזי כל הדיפולים יהיו מקבילים ביניהם. ניתן להוכיח כי דיפול חשמלי מתנדנד קורן שדה אלקטרו-מגנטי חדש \vec{E}_{sc} בתדירות של השדה המקורי. עוצמת קרינה זו (הקרינה המפוזרת) תלויה בכיוון ויחסית ל- $\sin^2 \theta$ כאשר θ הזווית שבין כיוון הקרינה המפוזרת \vec{k}_{sc} וכיוון הדיפול \vec{p} . לכן בכיוון \vec{E}_i (כיוון הקיטוב של האור הפוגע) אין קרינה בכלל, ובכיוון ניצב ל- \vec{E}_i יש קרינה מקסימלית. הגל המפוזר מקוטב אף הוא. השדה החשמלי שלו נמצא במישור הכולל את \vec{k}_{sc} ואת כיוון הדיפול.

הדרך הטובה ביותר להבין תופעת הקיטוב היא להעביר אור מקוטב דרך מקטב ולסובב אותו. ניתן לקבל מקור אור מקוטב מהעברת אור לא מקוטב (ממנורה או מהשמש למשל) דרך מקטב. עוצמת האור המועבר תשתנה עם סיבוב המקטב.

24. קיטוב ע"י החזרה

כאשר קרן אור הנעה באוויר פוגעת בחומר שקוף (למשל זכוכית), רק חלק ממנה חודר לחומר השקוף והחלק השני מוחזר. היחס בין עוצמת האור המוחזר לבין עוצמת האור הפוגע יסומן באות R (Reflectivity). כאשר $R = 0$ משמעות הדבר שאין כלל החזרה מהחומר.

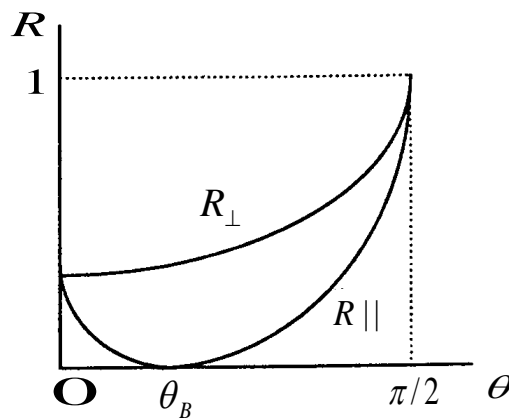
הגודל R עבור משטח נתון תלוי בשני גורמים:

א. זווית הפגיעה של הקרן בחומר.

ב. כיוון הקיטוב (השדה החשמלי) של הקרן הפוגעת.

גודל זה יסומן $R_{||}$ כאשר כיוון השדה החשמלי (הקיטוב) של האור הפוגע מקביל למישור בו נמצאות הקרן הפוגעת והקרן המוחזרת, ויסומן R_{\perp} כאשר כיוון הקיטוב ניצב למישור הנ"ל.

באיור 2 מתוארת השתנות $R_{||}$ ו- R_{\perp} כתלות בזווית הפגיעה θ .



איור 2: גרף איכותי של מקדם ההחזרה של הרכיב המקביל $R_{||}$ והניצב R_{\perp}

של קיטוב האור הפוגע בחומר שקוף.

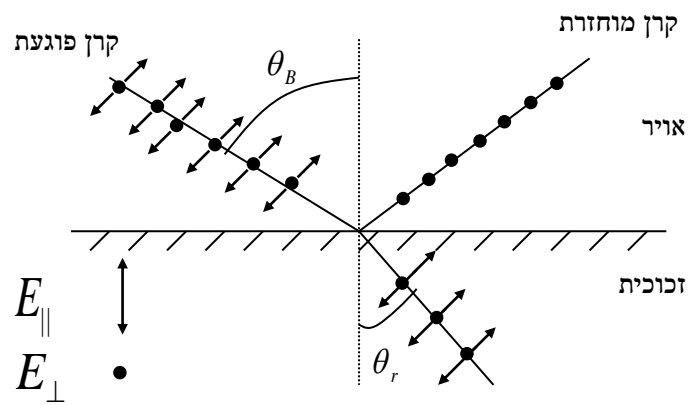
אנו רואים כי בזווית מסוימת שתיקרא θ_B אין כלל החזרה של הקיטוב המקביל והקרן המוחזרת מקוטבת בניצב בלבד. ניתן להראות שבזווית זו (הנקראת על שם Brewster) מתקיים:

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ \quad (3)$$

באיור 3 מתוארת הגיאומטריה של התופעה כאשר קרן לא מקוטבת פוגעת ומוחזרת מלוח זכוכית בזווית

ברוסטר θ_B . הוקטור $\vec{E}_{||}$ של האור המקוטב מקביל למישור הפגיעה מסומן על ידי החצים והוקטור \vec{E}_{\perp}

של האור המקוטב בניצב למישור הפגיעה מסומן על ידי נקודות. הקרן המוחזרת מכילה את \vec{E}_{\perp} בלבד.



איור 3: תיאור זווית ברוסטר ומישור פגיעת הקרן.

חוק Snell נותן את הקשר בין זווית ההחזרה וזווית ההעברה (לאחר הצבה $n_{\text{אוויר}} = 1$):

$$n = \frac{\sin \theta_B}{\sin \theta_r} \quad (4)$$

וביחד עם (2) נקבל:

$$n = \frac{\sin \theta_B}{\sin(90^\circ - \theta_B)} = \tan \theta_B \quad (5)$$

3ד. התאבכות ועקיפה

קרן הלייזר היא מונוכרומטית וקוהרנטית ולכן באמצעותה ניתן לראות בקלות תופעות של עקיפה והתאבכות. להלן יובא סיכום של המשוואות השימושיות להתאבכות ועקיפה. הסברים מפורטים ניתן למצוא במקורות הנזכרים בסוף התהליך. וקטור הגל k מוגדר כ- $k = 2\pi/\lambda$.

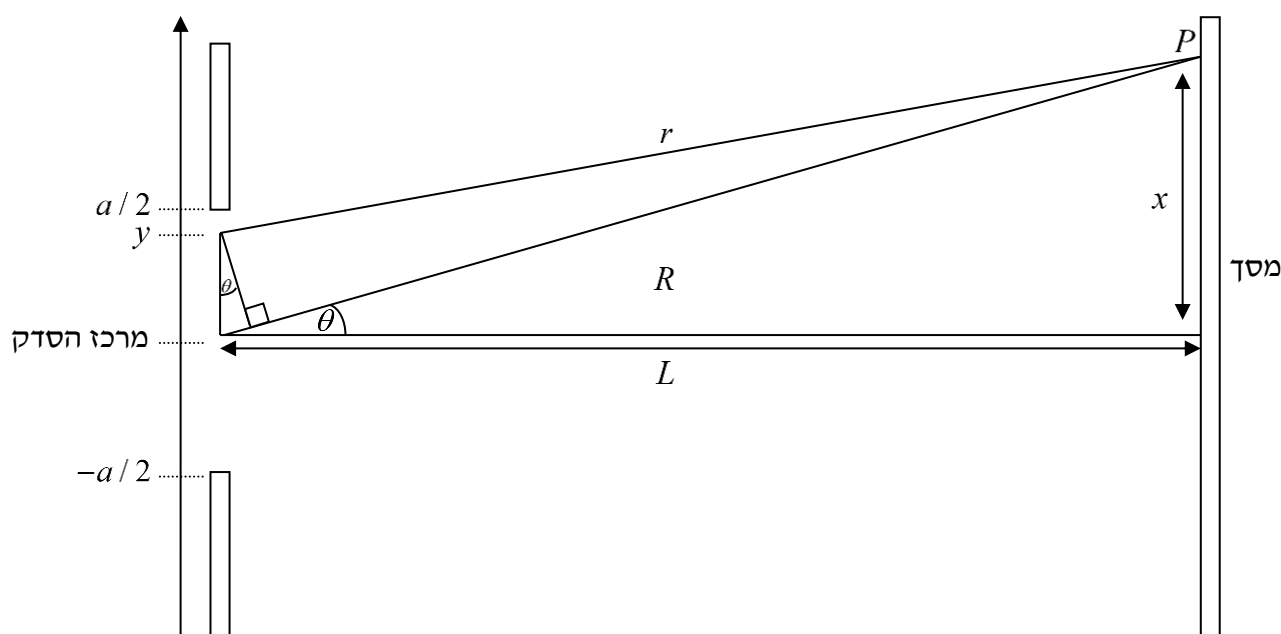
עקיפה מסדק יחיד

כאשר גל פוגע במחסום, הוא אינו ממשיך ישר, אלא הוא "עוקף" את המחסום, וסוטה לצדדים. תופעה זו נקראת עקיפה. בניסוי שלפנינו אנו נמדוד עקיפה מסדק אחד. באיור 4 תאור מוגדל מאוד של סדק בעל רוחב a .

לפי העיקרון של הויגנס (Huygens) כל נקודה בתוך הסדק מהווה מקור לגל כדורי. נתבונן בקטע קטן Δy הנמצא במרחק y ממרכז הסדק. נניח שאור בעל תדירות f ואורך גל λ פוגע בסדק. תרומת הקטע להפרעה בנקודה P תהיה כמובן יחסית לגודל הקטע Δy , וצורתה תהיה:

$$\Delta E = \frac{E_0 \sin(\omega t - kr)}{r} \Delta y \quad (6)$$

כאשר r הוא המרחק מהקטע ל- P , $k = 2\pi/\lambda$ ו- $\omega = 2\pi f$. אם המרחק מהסדק אל P הוא גדול מאוד לעומת a , אזי אפשר להזניח את השינוי ב- r במכנה, ולהציב במקומו את המרחק ממרכז הסדק R . אבל שינויים ב- r בתוך פונקציית הסינוס במונה משפיעים מאוד על ההפרעה בנקודה. מאיור 4, ניתן לראות שקירוב מתאים ל- r הוא $r \approx R - y \sin \theta$.



איור 4 : הגיאומטריה של סדק יחיד

הערה: שימו לב שכיוון התקדמות הקרן ואוריינטצית הסדק ניצבים למסך ולתמונה המתקבלת.

כדי למצוא את ההפרעה ב- P יש לסכם את כל הקטעים. בגבול ש- Δy שואף לאפס, הסכום על

הקטעים הופך לאינטגרל, ואנו מוצאים שההפרעה ב- P ניתנת על ידי:

$$E = \frac{1}{R} \int_{-a/2}^{a/2} E_0 \sin(\omega t - kR + ky \sin \theta) dy \quad (7)$$

לאחר שמבצעים את האינטגרל, מוצאים שההפרעה ב- P היא:

$$E = \frac{E_0 a}{R} \frac{\sin(\frac{1}{2} ka \sin \theta)}{\frac{1}{2} ka \sin \theta} \sin(\omega t - kR) \quad (8)$$

התוצאה היא גל המשתנה בזמן עם תדירות ω , שהמשרעת שלו משתנה מזווית לזווית לפי הגורם הראשון בצד ימין של המשוואה (8). עוצמת האור, השווה לריבוע של המשרעת, ניתנת על ידי:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \pi X}{(\pi X)^2} \quad (9)$$

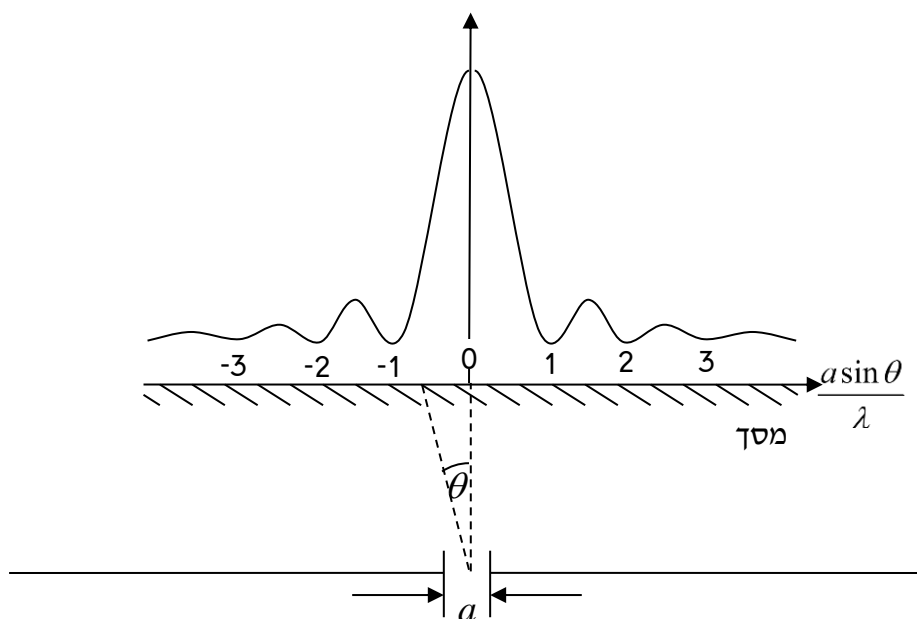
במשוואה זאת, $I_0 = (E_0 a / R)^2$, ו-

$$X = \frac{1}{2\pi} ka \sin \theta = \frac{a \sin \theta}{\lambda} \quad (10)$$

תאור גרפי של העוצמה I / I_0 , נתון באיור 5. הציר האופקי בגרף זה הוא X . כפי שאנו רואים יש מקסימום

רחב בזווית $\theta = 0$, ואפסים בנקודות $X = \pm n$ כלומר:

$$a \sin \theta = \pm n \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$



איור 5: תמונת עקיפה מסדק רחב.

התאבכות משני סדקים

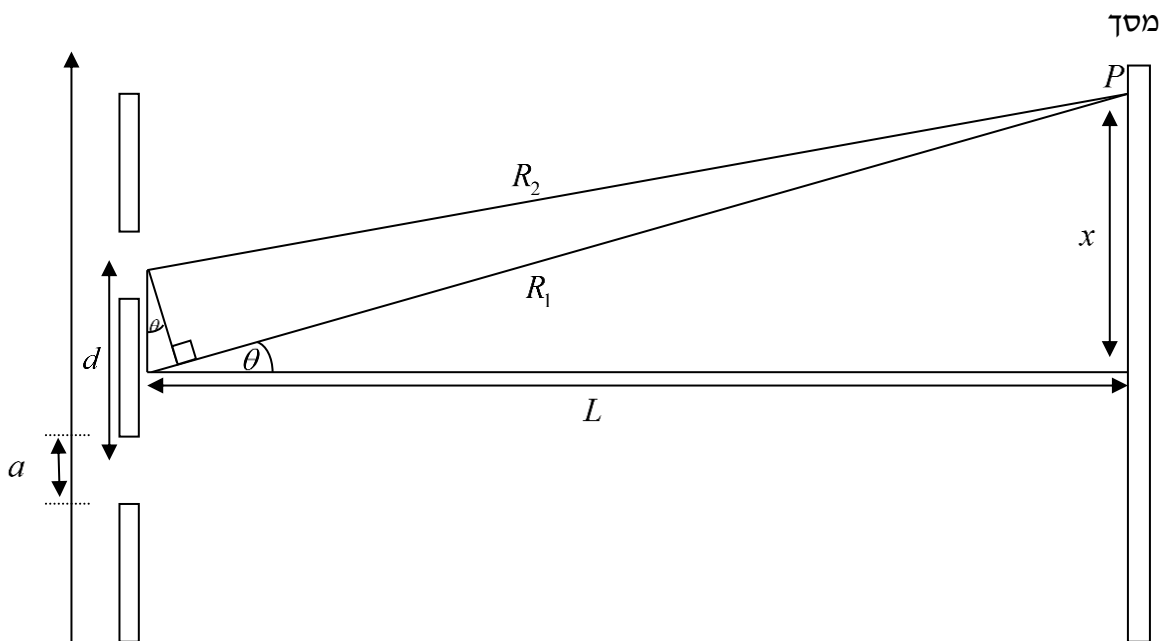
תופעת ההתאבכות היא תוצאה של חיבור מספר גלים הבאים ממקורות קוהרנטיים. שני מקורות הם קוהרנטיים אם יש קשר קבוע בין המופע שלהם. בניסויים על גלי אור יוצרים מקורות קוהרנטיים על ידי כך שנותנים לאור ממקור אחד לעבור דרך שניים או יותר סדקים. האור שעובר דרך כל סדק מהווה מקור אור. הגיאומטריה מתוארת באיור 6. במסך ישנו זוג סדקים, והמרחק בין הסדקים הוא d . מודדים את עוצמת הגל בנקודה P שמרחקה מכל סדק הם R_1 ו- R_2 בהתאמה. נניח שלכל סדק יש רוחב a . התרומה של כל סדק להפרעה ב- P יהיה ביטוי דומה לזה שבמשוואה (8), ובסך הכל, ההפרעה תהיה:

$$E = \frac{E_0 a}{R} \frac{\sin\left(\frac{1}{2} k a \sin \theta\right)}{\frac{1}{2} k a \sin \theta} [\sin(\omega t - kR_1) + \sin(\omega t - kR_2)] \quad (12)$$

אם הפרש המופע בין שני הגלים הוא π (או כפולה אי-זוגית של π), הגלים יבטלו זה את זה, וכלל לא יהיה אור. במקומות שזה קורה, ההתאבכות היא הורסת. לעומת זאת, אם הפרש המופע הוא 2π (או כפולה של 2π) הגלים יחזקו זה את זה, ותהיה התאבכות בונה. מכאן, התנאי ל**התאבכות הורסת** הוא:

$$k(R_1 - R_2) = (2n + 1)\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13)$$

אם נציב $k = 2\pi / \lambda$, נראה שהתנאי להתאבכות הורסת הוא $R_1 - R_2 = (2n + 1)\lambda / 2$. זאת אומרת, בהתאבכות הורסת, הפרש הדרכים האופטיות שווה למספר אי-זוגי של חצאי אורך גל.



איור 6: הגיאומטריה של התאבכות משני סדקים

אם הפרש המופע בין שני הגלים במשוואה (12) שווה לכפולה 2π יש אז התאבכות בונה, כלומר:

$$k(R_1 - R_2) = 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (14)$$

מכאן שישנה התאבכות בונה כאשר הדרכים האופטיות שווה לכפולה שלמה של אורכי גל: $R_1 - R_2 = n\lambda$. אם נתבונן באיור 6, נראה ש- $R_2 - R_1 \approx d \sin \theta$. קירוב זה הוא מצוין, כאשר מרחק הסדקים אל P גדול מאד לעומת a . מכאן נקבל את התנאים הבאים להתאבכות הורסת ובונה:

$$d \sin \theta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (13^*) \quad \text{התאבכות הורסת}$$

$$d \sin \theta = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (14^*) \quad \text{התאבכות בונה}$$

נשתמש במשוואה (12) בזהות טריגונומטרית פשוטה לסכום של סינוסים, ונקבל:

$$E = \frac{E_0 a}{R} \frac{\sin(\frac{1}{2} k a \sin \theta)}{\frac{1}{2} k a \sin \theta} 2 \cos(\frac{1}{2} k [R_1 - R_2]) \sin(\omega t - \frac{1}{2} k [R_1 + R_2]) \quad (15)$$

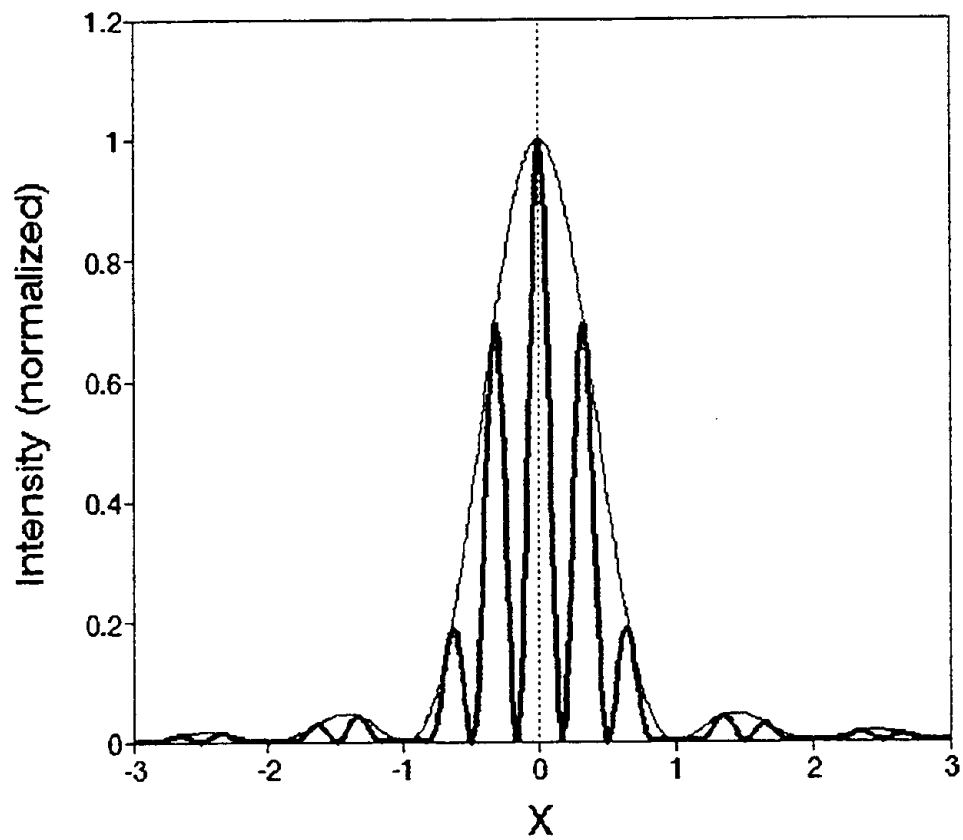
התוצאה היא גל המשתנה בזמן בתדירות ω שהמשרעת שלו אינה קבועה אלא משתנה ממקום למקום לפי שני הגורמים בצד ימין של משוואה (15). אם נעלה את המשרעת בריבוע, ונציב $R_1 - R_2 = d \sin \theta$, נקבל ביטוי לעוצמה:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \pi X}{(\pi X)^2} \cos^2(\frac{1}{2} k d \sin \theta) \quad (16)$$

פונקציה זאת מתוארת באיור 7 עבור המקרה $d = 3a$.

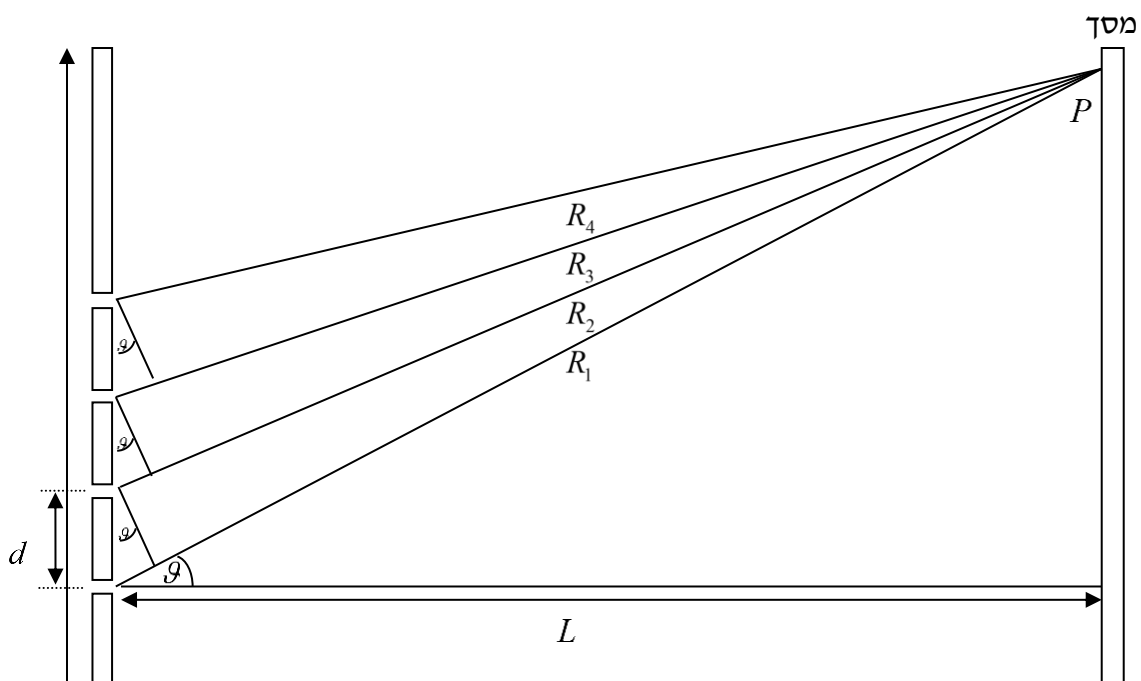
המעטפת של העקומה היא העוצמה של עקיפה, כלומר $\sin^2 \pi X / (\pi X)^2$.

נקודה למחשבה: ישנה משמעות כפולה לנקודות המינימום של המעטפת. מהי?



איור 7: תמונת התאבכות מזוג סדקים. העוצמה כפוקנציה של $X = a \sin \theta / \lambda$

התאבכות מסדקים רבים



איור 8: התאבכות מ-4 סדקים

אם מקורות אור קוהרנטיים רבים מתאבכים – למשל על ידי כך שאור עובר דרך סדקים רבים אזי כל מקור תורם להפרעה בנקודה P איבר כמו זה במשוואה (8). איור 8 מראה דוגמה של התאבכות מ-4 סדקים. אם המרחק של כל מקור מהנקודה P הוא R_1, R_2, R_3, \dots , ההפרעה ב- P תהיה:

$$E = \frac{E_0 a}{R} \frac{\sin \pi X}{\pi X} [\sin(\omega t - kR_1) + \sin(\omega t - kR_2) + \sin(\omega t - kR_3) + \dots] \quad (17)$$

התנאי להתאבכות בונה הוא שהתרומה מכל מקור תהיה מאותו מופע. זאת אומרת, עבור כל i קיים:

$$k(R_i - R_{i+1}) = 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (18)$$

כאשר תנאי זה מתקיים, אזי יש לאור **מקסימום ראשי**. אם הנקודה P רחוקה מאוד מהסדקים, אזי $R_i - R_{i+1}$ שווה ל- $d \sin \theta$, ולכן התנאי למקסימום ראשי הוא כמו במשוואה (14*):

$$d \sin \theta = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

אולם התנאי להתאבכות הורסת הוא שונה. נניח שנמצאים בין שני מקסימה ראשיים: $0 < k(R_i - R_{i+1}) < 2\pi$. אם יש שני סינוסים בלבד במשוואה (17), אז הסכום מתאפס רק אם הפרש המופע הוא π . אבל אם יש שלושה סינוסים ב- (17), אזי הסכום מתאפס בשני מקרים: כאשר הפרש המופע בין שני סינוסים עוקבים הוא $2\pi/3$ או $4\pi/3$. כלומר, בניגוד למצב של שני סדקים, בשלושה סדקים ישנם שני מינימה בין כל שני מקסימה ראשיים.

מתוך סיכום הטור במשוואה (17) ל N סדקים ניתן להכליל את התוצאה ולהסיק כי עבור N סדקים ישנם $(N-1)$ מינימה בין כל שני מקסימה ראשיים. כאשר מסכמים את הטור במשוואה (17) ומחשבים את העוצמה, מקבלים:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \pi X}{(\pi X)^2} \frac{\sin^2(\frac{1}{2} Nkd \sin \theta)}{N^2 \sin^2(\frac{1}{2} kd \sin \theta)} \quad (19)$$

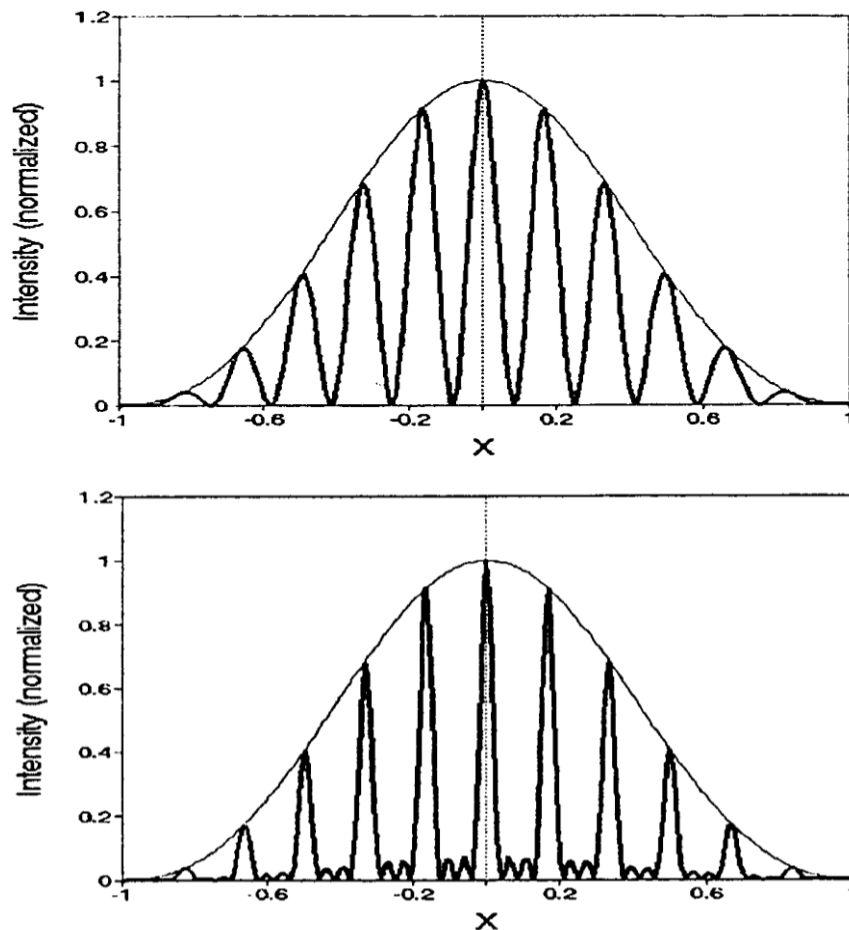
התנאי להתאבכות הורסת בין המקסימום הראשי $n=0$ לבין המקסימום הראשי $n=1$ הוא:

$$d \sin \theta = m\lambda / N \quad m = 1, 2, \dots, (N-1) \quad (20)$$

יש תנאים דומים בין כל שני מקסימה ראשיים. באיור 9 אנו רואים גרפים של העוצמה עבור התאבכות משני סדקים והתאבכות מארבעה סדקים. הציר האופקי הוא $X = a \sin \theta / \lambda$, ו- $d = 6a$ בשני המקרים.

המעטפת של העקומות היא העקומה של עקיפה, $\sin^2 \pi X / (\pi X)^2$.

אנו רואים שהמקסימה הראשיים נמצאים באותן הזוויות בשני המקרים, אבל במקרה של שני סדקים יש רק מינימום אחד בין כל שני מקסימה ראשיים, ואלו במקרה של 4 סדקים ישנם 3 מינימום בין כל שני מקסימה ראשיים. לכן המקסימה הראשיים הם הרבה יותר צרים במקרה של 4 סדקים.



איור 9: איור עליון – התאבכות משני סדקים עבור $d = 6a$,

איור תחתון – התאבכות מארבעה סדקים עבור $d = 6a$.

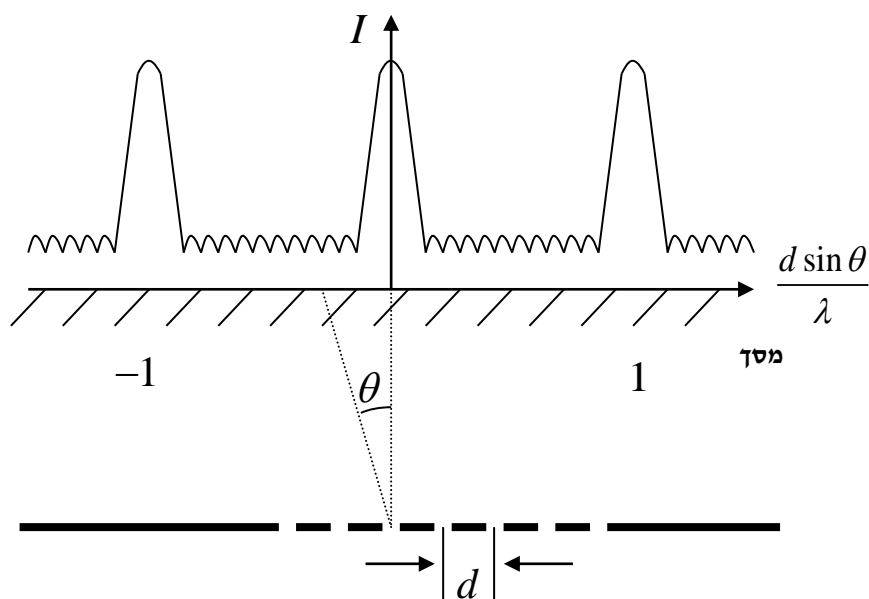
סריג עקיפה

סריג עקיפה הוא לוח שחרוטים עליו סדקים בצפיפות רבה (מאות קווים למ"מ). כאשר אור עובר דרך סריג, יש התאבכות הורסת ברוב הכיוונים ורק בזוויות מסוימות מתקבלת התאבכות בונה. בזוויות אלו מופיעות נקודות חזקות של אור. התנאי לזוויות אלו הוא:

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{d} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (21)$$

כאשר d הוא המרחק בין הסדקים, ו- n מגדיר את סדר העקיפה. תנאי זה מתקבל כאשר האור נופל בניצב על הסריג.

משתמשים בסריג בספקטרוסקופיה כדי להפריד קווים ספקטרליים. כיוון שיש סדקים רבים מאוד בסריג (סדר גודל של מאות), המקסימה הראשיתם הם צרים מאוד, והעוצמה בין המקסימה קטנה מאוד.

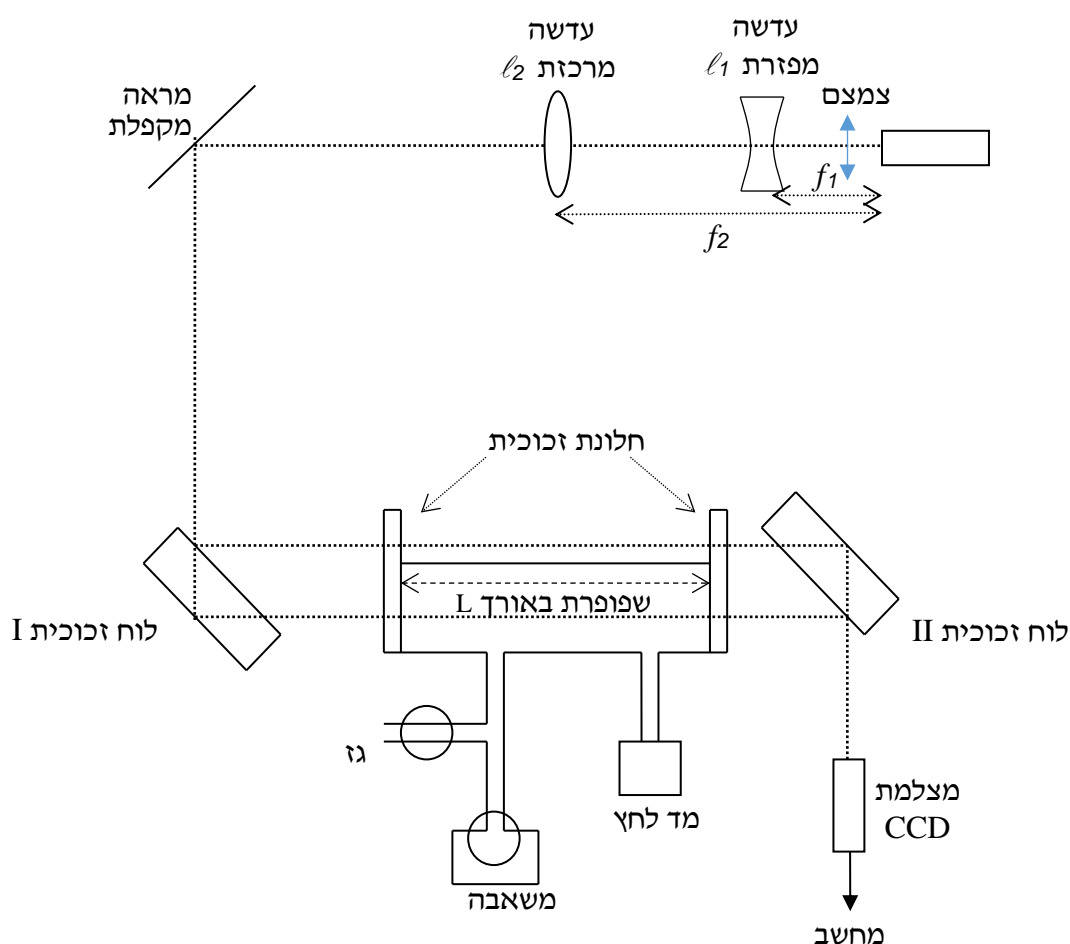


איור 10: תמונת עקיפה מסריג.

47. אינטרפרומטר למדידת מקדם שבירה

בניסוי זה נמדוד את מקדם השבירה n של גז בלחצים שונים החל מלחץ נמוך מאוד ($p \approx 0$) ועד ללחץ אטמוספירי. ידיעת n מאפשרת גם חישוב "הקוטביות" שהינה מקדם הפרופורציה שמופיע במשוואה (1). היות וערכו של n עבור גזים קרוב מאוד לאחד, הדרך המדויקת למדידתו היא בשיטות אינטרפרומטריות בלבד ולא ע"י מדידה ישירה.

בשיטה זו נתבונן בשתי קרניים, האחת מתקדמת באויר שבחלל החדר והשנייה מתקדמת מרחק L בתווך שונה המצוי בתוך שפופרת. השפופרת, בעלת חלונות זכוכית, ניתנת למילוי בגזים שונים וכן ניתן למדוד את הלחץ בה. מקדם השבירה n ניתן לחישוב מתוך ההתאבכות בין שתי הקרניים. האינטרפרומטר במעבדה הינו אינטרפרומטר Jamin שהינו סוג של אינטרפרומטר Mach-Zehnder. המכשור מתואר באיור 11.



איור 11: תיאור מערכת האינטרפרומטר למדידת מקדם שבירה בגזים.

בכדי להקל על המדידה נגדיל את מפתח קרן הלייזר באמצעות מערכת עדשות, הראשונה ℓ_1 מפזרת והשנייה ℓ_2 מרכזת בעלות מרחקי מוקד $f_1 \cong -50mm$ ו $f_2 \cong 400mm$, בהתאמה. בשלב זה של המעבדה לא נדון בפרטי העדשות ובמאפייני האופטיקה הגאומטרית בניסוי.

קרן הלייזר המוגדלת מפוצלת על ידי החזרה משתי פאותיו של לוח זכוכית I. קרן אחת עוברת דרך האוויר בחדר ואילו השנייה דרך הגז בשופרת. קרניים אלה פוגעות בלוח זכוכית II המקביל ל-I ומוחזרות משתי פאותיו. שתי הקרניים מתאבכות ביניהן, מתחברות לקרן אחת, ופוגעות במסך. בדרך כלל ימצא על המסך פס שחור (fringe) הנגרם על ידי התאבכות הורסת של שתי הקרניים. (מדוע? האם תמיד תתקבל התופעה הזאת?)

הפרש הפאזה $\Delta\phi$ בין הקרניים תלוי בסוג ובלחץ הגז בשופרת אשר ניתן לשינוי ע"י משאבה (ראה איור 11) ומקיים:

$$\Delta\phi = 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_a} - \frac{L}{\lambda(p)} \right) \quad (22)$$

כאשר $\lambda(p)$ הינו אורך הגל בגז שנמצא בלחץ p , λ_a אורך הגל באוויר ו- L המרחק שעוברת הקרן בגז (כלומר אורך השופרת). במקומות של פס שחור מתקיים:

$$\Delta\phi = (2m+1)\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (23)$$

במהלך הניסוי מרוקנים את השופרת בעזרת משאבת ואקום וממלאים אותה בהדרגתיות בגז מסוים. כאשר לחץ הגז וצפיפותו עולים n גדל ולכן יורדת מהירות האור בשופרת וכן קטן אורך הגל בשופרת. כתוצאה מכך הפרש הפאזה משתנה, ומערכת פסי ההתאבכות (fringes) נעה. נניח שבלחץ $p = 0$ (ואקום) המקום של ההתאבכות הורסת (פס שחור) היה בנקודה χ על המסך. אם מכניסים גז לשופרת פס זה ינוע הצידה וכאשר הפרש הפאזה ישתנה ב- 2π (מחזור שלם) יתפוס פס אחר את מקומו.

אם הלחץ עולה מ- $p = 0$ ל- p סופי ישתנה הפרש הפאזה ב-

$$\begin{aligned} (\Delta\phi)_1 - (\Delta\phi)_2 &= \Delta(\Delta\phi) \\ &= 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_a} - \frac{L}{\lambda(p)} \right) - 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_a} - \frac{L}{\lambda_0} \right) = 2\pi \left(\frac{L}{\lambda_0} - \frac{L}{\lambda(p)} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

ומספר הפסים F שיעברו בנקודה χ יהיה:

$$F = \frac{\Delta(\Delta\phi)}{2\pi} = \frac{L}{\lambda_0} - \frac{L}{\lambda(p)} \quad (25)$$

כאן λ_0 הוא אורך הגל בואקום.

$\lambda(p)$ תלוי במקדם השבירה של הגז בצורה הבאה: (אורך הגל תלוי בלחץ כי n תלוי בלחץ p)

$$\lambda(p) = \frac{\lambda_0}{n(p)} \quad (26)$$

אם מציבים זאת במשוואה (25) מקבלים קשר בין F למקדם השבירה:

$$F = \frac{(n(p)-1)L}{\lambda_0} \quad (27)$$

מקדם השבירה של גז תלוי במכפלת N , צפיפות המולקולות בגז, והקטביות α באופן ליניארי:

$$n = 1 + \frac{1}{2} N \alpha \quad (28)$$

ועבור גזים מתקיים $N\alpha \ll 1$. במשוואה (28) N הוא ביחידות של cm^{-3} ; וביחידות MKS, α ביחידות m^3 . מחוק הגזים האידיאליים:

$$N = \frac{P}{k_B T} \quad (29)$$

ו- k_B נקרא קבוע בולצמן.

נציב את N במשוואה (28) ונקבל

$$n = 1 + \frac{\alpha p}{2k_B T} \quad (30)$$

אם נציב את משוואה (30) במשוואה (27) נקבל כי

$$F = p \frac{\alpha L}{2k_B T \lambda_0} \quad (31)$$

בקשר זה בין מספר הפסים לבין הלחץ נשתמש בניסוי.

ניתן להראות שעבור תערובת של N_1 מולקולות של גז אחד ו- N_2 של גז אחר מתקיים הקשר

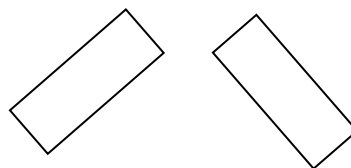
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{n_1 - n}{n - n_2} \quad (32)$$

כאשר n הוא מקדם השבירה של התערובת.

כל מקדמי השבירה מתייחסים לאותם התנאים (לדוגמה מקדמי השבירה הנתונים בסוף התדריך הם עבור $0^\circ C$, 760mm Hg).

ה. שאלות הכנה

1. הסבירו את המושגים שדה אלקטרו-מגנטי; קיטוב של גל אור.
2. מהם התנאים שחייבים להתקיים בנוגע למקור האור כדי לבצע את ניסוי העקיפה בסדק יחיד?
3. חשבו את רוחב פס העקיפה המרכזי של סדק שרוחבו $100\mu m$ על מסך שמרחקו מהסדק 50 cm עבור מקור בעל אורך גל 5000 \AA .
4. בהתאבכות משני סדקים מצאו קשר תיאורטי בין רוחב כל סדק, a , לבין המרחק בין הסדקים, d , מתוך עקומת העקיפה של שני סדקים (ראו דוגמה באיור 7). העזרו בנוסחאות למינימום ומקסימום בעקיפה מסדק יחיד והתאבכות מזוג סדקים!
5. במערכת אינטרפרומטר למדידת מקדמי שבירה מבצעים את dF/dp של גז מסוים בטמפרטורה 27°C וקיבלתם ערך $\frac{dF}{dp} = K \frac{\text{fringes}}{\text{cmHg}}$.
מה יהיה מקדם השבירה עבור אותו גז ב- $T = 0^\circ\text{C}$ ו- $p = 76\text{ cm Hg}$?
העזרו בכך בעת חישוב מקדמי השבירה בניסוי והשוואתם לתיאוריה!
6. הסבירו מדוע עליית לחץ הגז בשפופרת משנה את מהירות האור בתוכה.
7. האם לוחות הזכוכית בניסוי האינטרפרומטר צריכים להיות מקבילים? האם ניתן לבצע את הניסוי כשאחד הלוחות מסובב ב- 90° ביחס למצויר באיור 11 כלומר מוצב כמו באיור 12? הסבר.



איור 12

ו. מהלך הניסוי

אין לגעת ברכיבים האופטיים (עדשות, זכוכיות, עינית המצלמה וכו'..) בידיים!
אין להסתכל ישירות אל תוך קרן הלייזר!

11. פיזור של אור מקוטב

בניסוי זה נבדוק את תכונות האור המפוזר ע"י תרחיף של חלב במים.

1. כווננו את אלומת הלייזר אל תוך תא הפיזור והציבו מתקן המקטב בין הלייזר לתא הפיזור, כמוצג באיור 13. היעזרו בצמצם להקטין את גודל אלומת הלייזר.

2. המתקן מורכב משני מקטבים: מקטב אחד קבוע ומקטב שני המחובר למחזיק ומסתובב 360 מעלות. סיבוב מחזיק המקטב מסובב את המקטב השני ומשנה את הזווית היחסית בין שני המקטבים.

3. המקטב מעביר את רכיב קרן הלייזר המקביל לציר המקטב: ניצב לשולחן או המקביל לשולחן או סופרפוזיציה שלהם, בהתאם לכיוונו ביחס לקיטוב הלייזר. באפשרותכם לשנות את כיוון הקיטוב ע"י סיבוב מחזיק המקטב. וודאו תמיד כי פני המקטבים בניצב לכיוון התקדמות קרן הלייזר.



איור 13: תיאור ניסוי פיזור אור.

4. ע"י קביעה שרירותית של כיוון (זווית) המקטב אי אפשר להסיק מיידיית את כיוון הקיטוב! לשם כך מקמו תא פיזור לאחר המתקן המקטב וסובבו את המקטב. **בחנו** את האור המפוזר מן התא.

5. השוו איכותית את העוצמה של האור המפוזר בכיוונים הניצבים לכיוון התקדמות הקרן, למעלה (ניצב לשולחן האופטי) והצידה (מקביל לשולחן האופטי). **סכמו** את ממצאיכם בכתב!

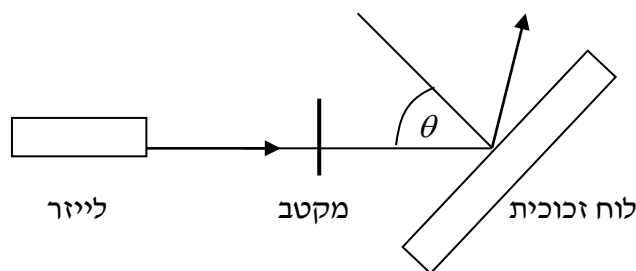
6. **הסיקו** איזה כיוון קיטוב (מקביל לשולחן האופטי או ניצב לשולחן האופטי) מועבר ע"י המקטב. העזרו באיור 1. תנו הסבר מלא ומפורט!

7. כעת סובבו את המקטב לכיוון הנגדי (סיבוב ב 90° ביחס למצב הקודם) וחזרו על סעיפים 5,6. קבעו איזה כיוון קיטוב מועבר כעת ע"י המקטבים. תנו הסבר מלא ומפורט!

- שימו לב: סכמו כראוי את התוצאות שהתקבלו בסעיף 5.א – 7.א ותנו הסבר כולל ומלא לתופעות. עבור קונפיגורציה מסוימת של המתקן המקטב תארו באופן איכותי באיזה כיוון היה פיזור מקסימלי והסיקו מכך מה היה כיוון הדיפולים וכן את כיוון המקטבים במתקן. יש לשמור על קו לוגי ברור ורציף במהלך ההסבר. הניחו כי כל מולקולה היא דיפול חשמלי המעורר ע"י קרינת הלייזר.

2. החזרה של אור מקוטב

1. הרכיבו את המערכת המוצגת באיור 14 למדידת זווית ברוסטר. לאחר המקטב מקמו זכוכית המחוברת למד זווית. הקפידו שבזווית $\theta = 90^\circ$ הקרן תקביל לפני הזכוכית, במקרה הצורך מיצאו את התיקון הדרוש.
2. העזרו בחלק הקודם, ו.1, וכוונו את המתקן המקטב כך שמועבר הקיטוב המקביל $\vec{E}_{||}$ לפי איור 3 (שימו לב לכיוונים – מקביל למה?). **הסבירו כיצד מיקמתם את המקטב ומדוע!**



איור 14: תיאור מערכת הניסוי למדידת זווית ברוסטר.

3. במידה והמתקן המקטב מאפשר מעבר של רכיב $\vec{E}_{||}$ בלבד, **מצאו את זווית ברוסטר**: התבוננו בעזרת פיסת נייר (או על התקרה) בקרן המוחזרת מלוח הזכוכית וסובבו את לוח הזכוכית עד למצב של עצמת אור מינימלית. אפשר להגיע למינימום טוב יותר ע"י תיקון קל בזווית המקטב.
4. כאשר המערכת מכוונת לזווית ברוסטר, סלקו את המתקן המקטב שבין הלייזר והלוח המחזיר ובדקו את הקיטוב של הקרן המוחזרת. **הסבירו.**
5. חשבו את מקדם השבירה של הזכוכית. לקבלת דיוק גבוה יותר: חזרו על המדידה והחישוב.
6. מצאו מקור חיצוני לערכו של מקדם השבירה ובצעו **השוואה** סטטיסטית. אל תשכחו להפנות כראוי אל המקור בו נעזרתם!

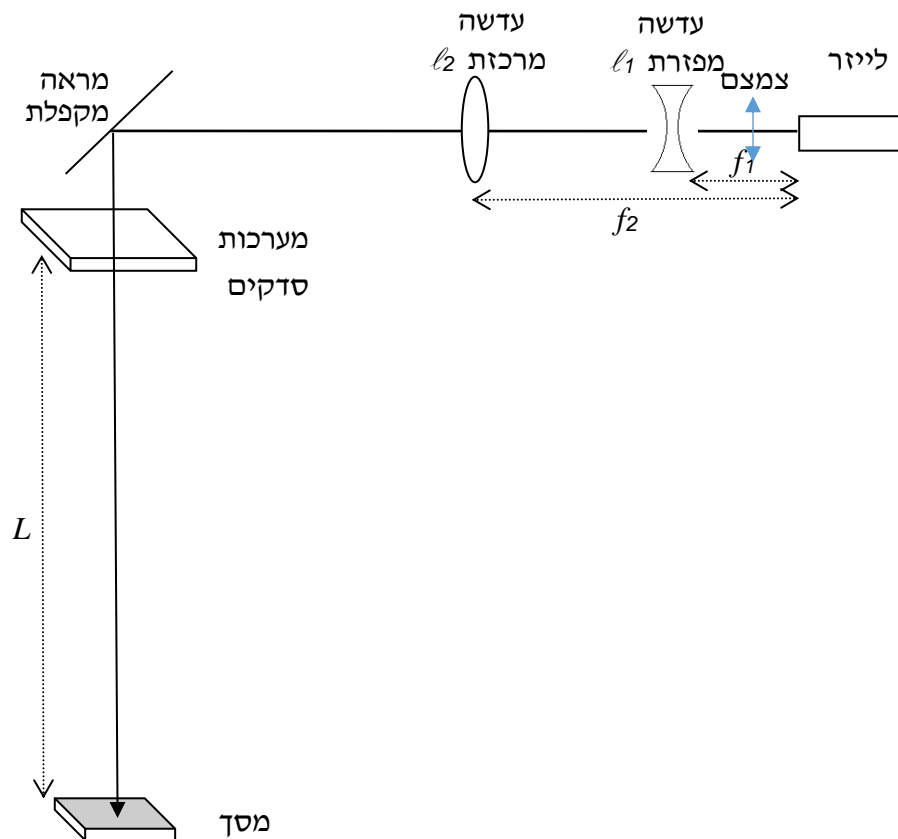
3. התאבכות ועקיפה

1. בחלק זה של הניסוי עומד לרשותכם שולחן אופטי ורכיבים כמתואר באיור 15. בכדי לכייל את המערכת הוציאו את כל הרכיבים מהתושבות.

2. מקמו את הלייזר בפינה הימנית הרחוקה של השולחן כך שיתאפשר מרחק מקסימלי בין הדקים למסך. בכדי לאפשר מעבר של קרן הלייזר דרך הסדקים בניסוי נגדיל את מפתח קרן הלייזר באמצעות צמצם מערכת עדשות, הראשונה ℓ_1 מפזרת והשניה ℓ_2 מרכזת בעלות מרחקי מוקד $f_1 \cong -50mm$ ו- $f_2 \cong 400mm$, בהתאמה. כווננו את הצמצם במרכז כתם הלייזר ומקמו את העדשות לפי איור 15 כך שלאחר כל עדשה קרן הלייזר אינה מוסטת ממסלולה. בשלב זה של המעבדה לא נדון בפרטי העדשות ובמאפייני האופטיקה הגאומטרית בניסוי.

3. הציבו את המראה המקפלת בזווית של 45° אחרי מערכת העדשות על מנת לסובב ב- 90° את כיוון התקדמות הקרן. וודאו שלאחר הצבת מערכת העדשות גודל המפתח אינו משתנה עם התקדמות הלייזר במרחב.

אם גודל המפתח משתנה, הזיזו בעדינות את העדשה המרכזת ℓ_2 קדימה-אחורה ובדקו שוב שגודל המפתח אינו משתנה ושקרן הלייזר אינה מוסטת ממסלולה.



איור 15: תיאור מערכת מדידת עוצמת האור.

4. מקמו סדק יחיד לאחר עדשה $\ell/2$ בניצב לכיוון התקדמות קרן הלייזר. המראה המקפלת מתכווננת וניתן בעזרתה להסיט בצורה עדינה את קרן הלייזר כך שהסדק יהיה במרכז מפתח הקרן.


5. הניחו מסך רחוק ככל האפשר מהסדק ומדדו את המרחק L בין הסדק לבין המסך.

6. רוחבו של הסדק ניתן לשינוי בעזרת בורג הנמצא מעליו. סגרו את הסדק עד הסוף ובדקו שהסימון על הבורג הוא 0. במידה ולא, רשמו את סימון הבורג במצב סגור.

7. בחרו רוחב עד 6 מ"מ כך שניתן להבחין על גבי מסך המחשב בתמונת עקיפה ברורה.

8. סובבו את הבורג וסרקו את כל תמונות העקיפה המתקבלת בצורה איכותית בכדי לוודא שהינה סימטרית וראויה למדידה. במידת הצורך כוונו את המערכת ושנו את רוחב הסדק. **רשמו את רוחב הסדק להשוואה עתידית!**

שימו לב: בהגיעכם לקצה הגררה הזהירו שלא להבריג את הגררה החוצה! עקבו אחר התמונה על המסך ובמידה ואין שינוי - הגעתם לקצה!


9. חברו חצובה למצלמה הדיגיטלית וצלמו (בורר במצב HDR ופוקוס במצב Macro [סימן ]) את תמונת ההתאבכות. וודאו שבתמונה נראים סדרים רבים ככל האפשר באופן ברור (מומלץ לצלם עם אור מינימלי בחדר). צלמו באותם setting של המצלמה (אותו zoom ואותה זווית צילום) סרגל או חפץ בעל אורך ידוע לקבלת קנה מידה לצילום ההתאבכות (עבור המרת פיקסלים למרחק בצילום תמונת ההתאבכות).

10. מצאו את המרחק בין המקסימה הראשית למינימום בסדרים השונים וחשבו את רוחב הסדק a .

11. מאיור 4 אפשר לראות ש- $\theta = \arctan(x/L)$. בעזרת משוואה זאת ומשוואה (9) תוכלו לחשב את העוצמה התיאורטית. השוו אותה לנקודות המדודות.

12. בחרו רוחב סדק שונה שעבורו תתקבל תמונת עקיפה ברורה. רשמו את רוחב הסדק וחזרו על שלבים 9-11 עבור רוחב זה.

13. הסירו את הסדק היחיד ואת הפילטרים ומקמו שקף של שני סדקים. וודאו כי השקף ניצב לכיוון התקדמות הלייזר. המראה המקפלת מתכווננת וניתן בעזרתה להסיט ולכוון בצורה עדינה את קרן הלייזר כך הלייזר יעבור דרך שתי הסדקים.

14. צלמו במצלמה הדיגיטלית (בורר במצב HDR ופוקוס במצב Macro [סימן ]) את תמונת ההתאבכות. וודאו שבתמונה נראים סדרים רבים ככל האפשר באופן ברור (מומלץ לצלם עם אור מינימלי בחדר). צלמו באותו setting של המצלמה (אותו zoom ואותה זווית צילום) סרגל או חפץ בעל אורך ידוע לקבלת קנה מידה לצילום ההתאבכות (עבור המרת פיקסלים למרחק בצילום תמונת ההתאבכות).

15. מצאו את המרחק בין המקסימה הראשית למינימות הראשיות בסדרים השונים. חשבו את המרחק d בין הסדקים.

16. מצאו קשר תיאורטי בין רוחב כל סדק, a , לבין המרחק בין הסדקים, d , והעריכו את רוחב הסדקים. יש להראות פיתוח מלא ולהסבירו!

העזרו בנוסחאות (11)-(16) ובתשובתכם לשאלה הכנה 4!

17. הסירו את שקף שני הסדקים ומקמו במקומו סריג עקיפה.

18. מקמו דף נייר על המסך וסמנו על הדף את מיקומי המקסימה שמתקבלות ומדדו את המרחק בין הסריג לבין הדף.

19. חשבו את צפיפות הסריג וקבוע הסריג. הערך התיאורטי הינו $500 \pm 50 \frac{\text{slits}}{\text{mm}}$.

4. מדידות באינטרפרומטר

1. מדדו את לחץ וטמפרטורת האוויר במעבדה בזמן ביצוע הניסוי.
2. בחלק זה של הניסוי עומד לרשותכם שולחן אופטי ורכיבים כמתואר באיור 11. בכדי לכייל את המערכת הוציאו את כל הרכיבים מהתושבות, מלבד הלייזר והמצלמה.
3. הדליקו את הלייזר ומקמו את מערכת העדשות – עדשה מפזרת ℓ_1 ועדשה מרכזת ℓ_2 – כמתואר באיור 11. מקמו את העדשות במקומן כך שקרן הלייזר תעבור במרכז כל עדשה, בהתאם לאיור 11. העזרו בחוסם קרן כדי לוודא כי אין שינוי בכיוון התקדמות הקרן.
4. וודאו שלאחר הצבת מערכת העדשות גודל המפתח אינו משתנה עם התקדמות הלייזר במרחב. במידת הצורך, הציבו את המראה המקפלת בזווית של 45° אחרי מערכת העדשות על מנת לסובב ב- 90° את כיוון התקדמות הקרן.
- בשלב זה של המעבדה לא נדון בפרטי העדשות ובמאפייני האופטיקה הגאומטרית בניסוי.
5. הציבו לוח זכוכית לאחר הלייזר. הזיזו וסובבו את הלוח מעלה מטה ולצדדים כך שיתקבלו 2 אלומות חזקות המתקדמות בניצב לאלומה היוצאת מהלייזר, המתואר באיור 11.

6. הציבו לוח זכוכית שני במצב מקביל לראשון. כוונו את המראה המקפלת (ע"י סיבוב הברגים העדינים) הזיזו את לוח הזכוכית וסובבו אותו לקבלת תמונת החזרה. סובבו בעדינות את לוח הזכוכית ימינה ושמאלה ושימו לב איך לאחר הלוח השני הנקודות האמצעיות מתלכדות לנקודה אחת. הסבירו מדוע תופעה זו מתרחשת.

7. הקפידו על מצב בו החפיפה בין 2 האלומות היא מקסימלית וצפו בנקודה עצמה.

8. מקמו שפופרת בין שני הלוחות. כוונו אותה כך שאחת האלומות תעבור בתוך השפופרת (קרוב למרכז) והשניה דרך הזכוכית ליד השפופרת. המראה המקפלת מתכווננת וניתן בעזרתה להסיט בצורה עדינה את הלייזר ולשנות את מיקום פגיעת הלייזר על גבי הזכוכית הראשונה כך שהקרניים המפוצלות יעברו כנדרש בתוך השפופרת ומחוצה לה.

9. מקמו את מצלמת ה-CCD. שימו לב כי המצלמה ניתנת להזזה בניצב לכיוון התקדמות קרן הלייזר על פני כ-25mm. מקמו את המצלמה במרכז ציר תנועתה (כך שהגררה מצביעה על כ-12.5mm). וודאו כי הנקודה פוגעת במרכז המצלמה ושימו לב לפס ההתאבכות השחור המופיע בדרך כלל במרכז הנקודה.

10. הדליקו את המצלמה, פיתחו את תוכנת "ThorCam" במחשב, בחרו את המצלמה המחוברת למחשב ולחצו על כפתור הסרט (סרגל כלים עליון).

11. מצלמת CCD (Charge-Coupled Device) מורכבת מחיישן אלקטרואופטי הממיר את ספק האור הפוגע בו בכל רכיב תמונה למטען חשמלי. ה-CCD בניסוי מורכב ממטריצה של פיקסלים בגודל $1028_p \times 1028_p$, כאשר כל פיקסל בגודל $5.2_{\mu m} \times 5.2_{\mu m}$. מאחר וישנו חסם על כמות המטען שהמצלמה יכולה לדגום ישנו סף רוויה מעליו ה-CCD "מסונוור" ואינו מסוגל להפריד בין הפוטונים. בכדי להתגבר על כך שנו את הגדורת המצלמה:

- הקטינו את רווית המסך: "image" → cancel "auto" → minimize "gain"
- שנו את חשיפת התמונה: "camera" → reduce "exposure time" בהתאם לתנאי המדידה

12. וודאו כי הנקודה המרכזית נופלת במרכז המצלמה על המסך וכי אתם מזהים במרכז הנקודה את פסי ההתאבכות ההורסת.

13. פתחו את תוכנת excel. במהלך המדידה שמרו בכל פעם את מספר הפסים שעברו בנקודת יחוס מסוימת כפונקציה של הלחץ, עבור גז מסויים. בניסוי זה נעבוד עם הגזים אויר, CO_2 , He ותערובת גזים CO_2 -ו- He .

14. סגרו את ברז המשאבה ואת ברז המחט הסוגר את כניסת הגז והפעילו את המשאבה. פתחו לאט את ברז המשאבה לשאיבת השפופרת ושימו לב לקריאת הלחץ המינימלי האפשרי.

15. המדידה הראשונה בה התקבל מינימום לחץ היא נקודת $F=0$. העזרו בכלי הסרגל הצהוב שבצד השמאלי של המסך בכדי לסמן קו של התאבכות הורסת שניתן לזהות בברור במרכז המסך. מעתה התייחסו לקו זה בתור היחוס שלכם למדידות.

16. סגרו את ברז המשאבה ופתחו את ברז המחט להכנסת גז בצורה מבוקרת ואיטית. עם כניסת הגז לשפופרת, פסי ההתאבכות נעים. סיפרו אותם וסגרו את ברז המחט כעבור כ- 10 פסי התאבכות. שימרו את מספר הפסים שעברו ואת הלחץ.

17. הכניסו באיטיות עוד גז לשפופרת ושמרו את מספר הפסים ואת הלחץ לאחר כל 10 פסים עד שתגיעו ללחץ האטמוספירה. סגרו את ברז המחט הסוגר את כניסת הגז.

18. פתחו את ברז המשאבה ושאבו את הגז מהשפופרת. בהגיעכם ללחץ המינימלי סגרו את ברז המשאבה.

19. מלאו בלון בגז הבא וחברו לברז המחט. פתחו את ברז המחט להכנסת הגז בצורה מבוקרת ואיטית עד ללחץ מקסימלי. סגרו את ברז המחט, פתחו לאט את ברז המשאבה לשאיבת השפופרת ושימו לב לקריאת הלחץ המינימלי האפשרי. פעולה זו מנקה את השפופרת. (עד כמה נקיון זה אפקטיבי?)

20. בצעו את סעיפים 13-19 עבור: (א) אויר (ב) CO_2 (ג) He (ד) תערובת He ו- CO_2 . מספר קווי ההתאבכות הנספרים בכל מדידה משתנה בהתאם לגז בו אתם מודדים.

21. העלו את התוצאות של כל מדידה על גרף של מספר פסי ההתאבכות F שעברו כנגד הלחץ p לגז מסוים. חשבו מתוך משוואה (31) את הקטביות הממוצעת \bar{a} של האוויר.

22. לכל גז חשבו את מקדם השבירה n בטמפרטורה $T = 0^\circ C$ ובלחץ $p = 76 \text{ cmHg}$ בעזרת משוואה (30). השוו לערך הנתון בטבלה 2.

23. מצאו בטבלה 2 את מקדמי השבירה של כל אחד מן הגזים בתערובת. על סמך מדידת התערובת חשבו את הריכוז של הגזים על ידי משוואה (32).

INDEX OF REFRACTION, GASES

Values are relative to a vacuum and for a Temp. of 0° C. and 760 mm. pressure.

(From Smithsonian Tables)

Substance	Kind of Light	Indices of refraction	Observer
Acetone.....	D	1.001079-1.001100	
Air.....	D	1.0002926	Perreau
Ammonia.....	white	1.000381-1.000385	
Ammonia.....	D	1.000373-1.000379	
Argon.....	D	1.000281	Rayleigh
Benzene.....	D	1.001700-1.001823	
Bromine.....	D	1.001132	Mascart
Carbon dioxide.....	white	1.000449-1.000450	
dioxide.....	D	1.000448-1.000454	
disulfide.....	white	1.001300	Dulong
disulfide.....	D	1.001478-1.001485	
monoxide.....	white	1.000340	Dulong
monoxide.....	white	1.000335	Mascart
Chlorine.....	white	1.000772	Dulong
Chlorine.....	D	1.000773	Mascart
Chloroform.....	D	1.001436-1.001464	
Cyanogen.....	white	1.000834	Dulong
Cyanogen.....	D	1.000734-1.000823	
Ethyl alcohol.....	D	1.000871-1.000885	
ether.....	D	1.001521-1.001544	
Helium.....	D	1.000036	Ramsay
Hydrochloric acid.....	white	1.000449	Mascart
Hydrochloric acid.....	D	1.000447	Mascart
Hydrogen.....	white	1.000138-1.000143	
sulfide.....	D	1.000132	Burton
sulfide.....	D	1.000644	Dulong
sulfide.....	D	1.000623	Mascart
Methane.....	white	1.000443	Dulong
Methane.....	D	1.000444	Mascart
Methyl alcohol.....	D	1.000549-1.000623	
Methyl ether.....	D	1.000891	Mascart
Nitric oxide.....	white	1.000203	Dulong
Nitric oxide.....	D	1.000297	Mascart
Nitrogen.....	white	1.000295-1.000300	
Nitrogen.....	D	1.000296-1.000298	
Nitrous oxide.....	white	1.000503-1.000507	
Nitrous oxide.....	D	1.000516	Mascart
Oxygen.....	white	1.000272-1.000280	
Oxygen.....	D	1.000271-1.000272	
Pentane.....	D	1.001711	Mascart
Sulfur dioxide.....	white	1.000663	Dulong
Sulfur dioxide.....	D	1.000686	Ketteler
Water.....	white	1.000261	Jamin
Water.....	D	1.000249-1.000259	

טבלה 2. מקדמי השבירה n של גזים שונים בטמפרטורה $T = 0^{\circ}C$ ובלחץ $p = 76\text{cmHg}$ (מתוך

(Handbook of Chemistry and Physics

ז. ספרות עזר

1. פיזור האור :

- D. Halliday & R. Resnick, Physics, Part II, pp. 1084-1085.
- Alonso & Finn, Fundamental Univ. Physics, Vol. II, pp. 726-731

2. קיטוב ע"י החזרה :

- Alonso & Finn, Fundamental Univ. Physics, Vol. II, pp. 789-791

3. התאבכות ועקיפה

- D. Halliday & Resnick, Physics Part II, pp. 1025-1034, pp. 1047-1050.
- Alonso & Finn, Fundamental Univ. Physics, Vol. II, p. 857-866.

4. אינטרפרומטר למדידת מקדם שבירה

- Alonso & Finn, Fundamental Univ. Physics, Vol. II, pp. 566-572, p. 755.