

א. מילוט מפתח

גלים אל"ם, פיזור, זווית ברוסטר, קיטוב, עקיפה, התאבכות, סריג עקיפה, אינטראפרומטר, מקדם שבירה.

ב. מכשור

לייזר יירוק בעל עוצמה של $W = 1mW$, אורך גל של $\lambda = 532nm$ ויחס קיטוב של $3:1$, שולחן אופטי, מקטבים, תא פיזור, מכשיר למדידת זווית החזרה, עדשה מרכזת, עדשה מפוזרת, סדק יחיד מכני, ש קופיות אופטיות, ה כלולות סדקים וסריגים, אינטראפרומטר, 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. אינטראפרומטר למדידת מקדם השבירה של גזים

ד. מבוא

ד.1. פיזור אור

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

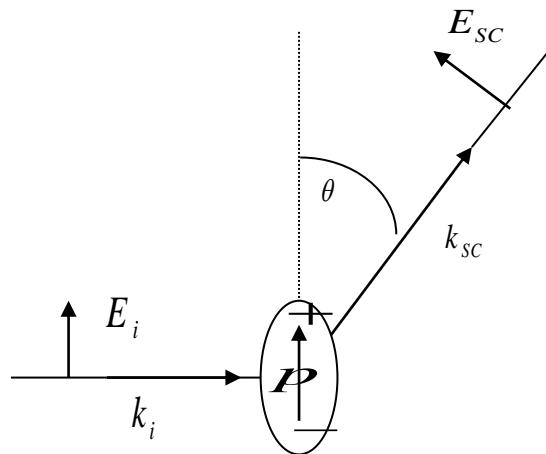
$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_i \quad (1)$$

מקדם הפרופורציה α תלוי בתכונות החומר ונקרא קווטביות.

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

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

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



איור 1: תיאור של קריינט דיפול

נניח לשם פשוטות שהאור מקוטב (כלומר השדה החשמלי מקביל בכיוון מסויים במרחב), אזי כל הדיפולים יהיו מקבילים ביניהם. ניתן להוכיח כי דיפול חשמלי מתנדנד כוון שדה אלקטרו-מגנטי חדש \vec{E}_{sc} בתדירות של השדה המקורי. עוצמת קרינה זו (הקרינה המפוזרת) תלויות בכיוון ויחסית ל- $\theta^2 \sin^2 \theta$ כאשר θ הזווית שבין כיוון הקרינה המפוזרת \vec{k}_{sc} וכיוון הדיפול \vec{k} . 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 הכלול את \vec{k}_{sc} ואת כיוון הדיפול.

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

2. קיטוב ע"י החזרה

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

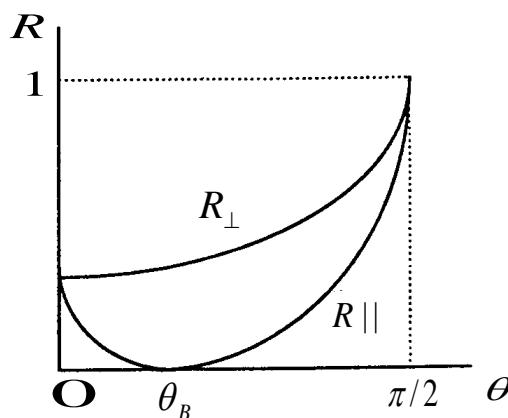
הגודל R עברו משטח נתון תליי בשני גורמים:

א. זווית הפגיעה של הקרן בחומר.

ב. כיוון הקיטוב (השدة החשמלית) של הקרן הפוגעת.

גודל זה יסומן R_{\parallel} כאשר כיוון השدة החשמלית (הקיטוב) של האור הפוגע מקביל למשור בו נמצאות הקרן הפוגעת והקרן המוחזרת, ויסומן R_{\perp} כאשר כיוון הקיטוב ניצב למשור הניל.

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

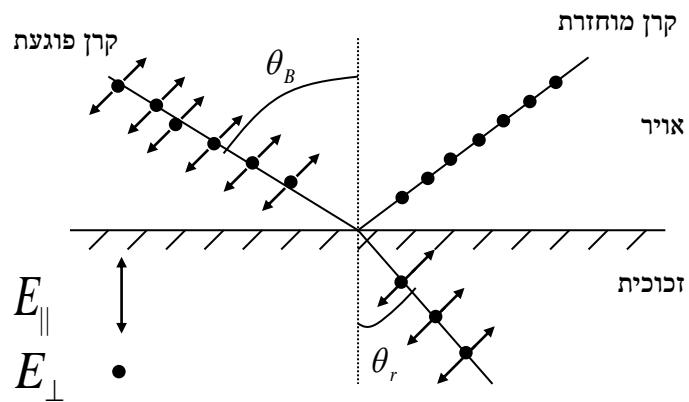


איור 2: גרף איקוני של מקדם החזרה של הרכיב המקביל R_{\parallel} והניצב R_{\perp} של קיטוב האור הפוגע בחומר שקוֹף.

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}_{\parallel} של האור המקבוב מקביל למשור הפגעה מסומן על ידי החצים והוקטור \vec{E}_{\perp} של האור המקבוב בניצב למשור הפגעה מסומן על ידי נקודות. הקרן המוחזרת מכילה את \vec{E}_{\perp} בלבד.



איור 3: תיאור זווית ברוסטר ומישור פגיעה הקרן.

חוק Snell נותן את הקשר בין זווית החזרה וזווית העברת (לאחר הצבה $1 = \text{אומ}`(n)$):

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

וביחד עם (2) נקבל:

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

3. התאבכות ועקיפה

קרון הליזר היה מונוכרומטי וכוהרנטית ולכן ניתן לראות בклות תופעות של עקיפה והתאבכות. להלן יובא סיכום של המשוואות השימושות להتابכות ועקיפה. הסברים מפורטים ניתנים למטה במקורות הנזכרים בסוף התדריך. וקטור הגל k מוגדר כ- $\lambda / 2\pi$.

עקיפה מסדק יחיד

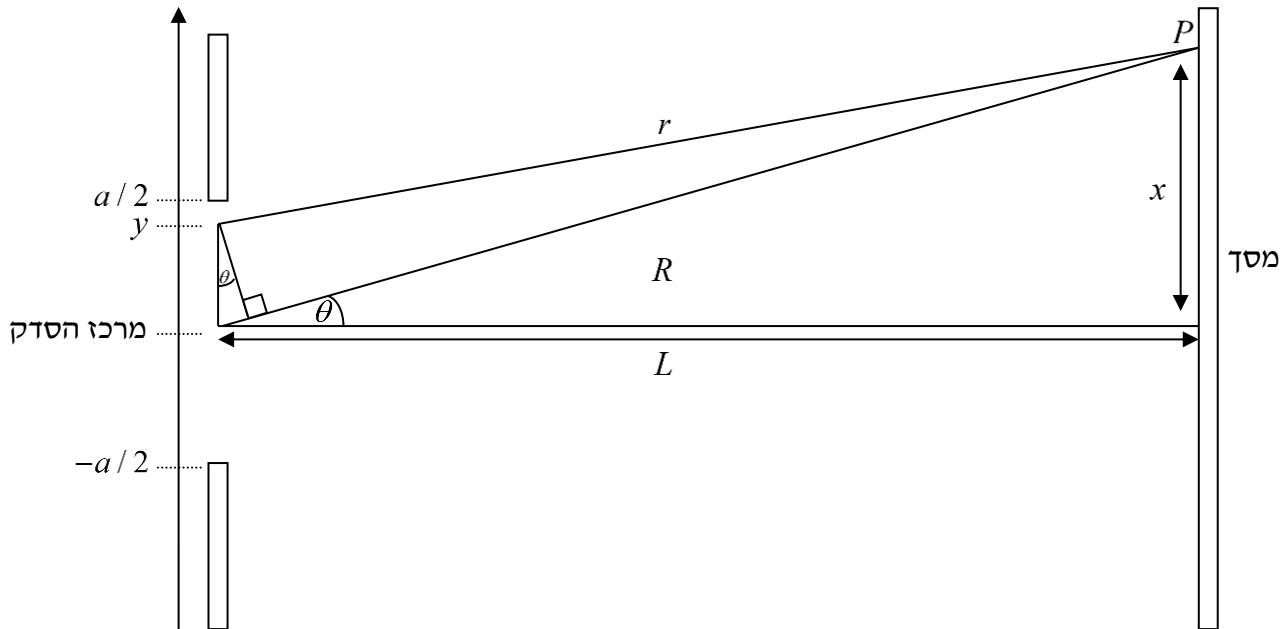
כאשר גל פוגע במחסום, הוא אינו ממשיך ישיר, אלא הוא "עוקף" את המחסום, וסוטה לצדדים. תופעה זו נקראת עקיפה. בניסוי שלפנינו אנו נמודד עקיפה מסדק אחד. באיור 4 תואר מוגדל מאוד של סדק בעל רוחב a .

לפי העיקרון של הויינגנס (Huygens) כל נקודה בתוך הסדק מהווה מקור לגל כדורי. נתבונן בקטע קטן Δy הנמצא במרכז הסדק y . נניח שהוא בעל תדירות f ואורך גל λ פוגע בסדק. תרומת הקטע להפרעה בנקודה P תהיה כמפורט לעיל:

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

כאשר r הוא המרחק מהקטע ל- P , $P = 2\pi f$, $k = 2\pi/\lambda$ ו- $\omega = 2\pi f$. אם המרחק מהסדק אל P הוא גדול מאוד לעומת a , אז אפשר להזניח את השינוי ב- r במכנה, ולהציב במקוםו את המרחק ממרכז הסדק R . אבל שינויים ב- r בתוך פונקציית הסינוס במונה משפיעים מאוד על ההפרעה בנקודה. Maior 4, ניתן לראות שקיים מתחם בו-

$$r \approx R - y \sin \theta$$



איור 4 : הגיאומטריה של סדק יחיד

הערה : שימו לב שכיוון התקדמות הקרון ואורינטיצית הסדק ניצבים למסך ולתמונה המתתקבלת.

כדי למצוא את ההפרעה ב- P יש לסכם את כל הקטיעים. בגבול ש- Δy שווה לאפס, הסכום על הקטיעים הופך לאינטגרל, והוא 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 שביצעו את האינטגרל, מוצאים שההפרעה ב- P היא :

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

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

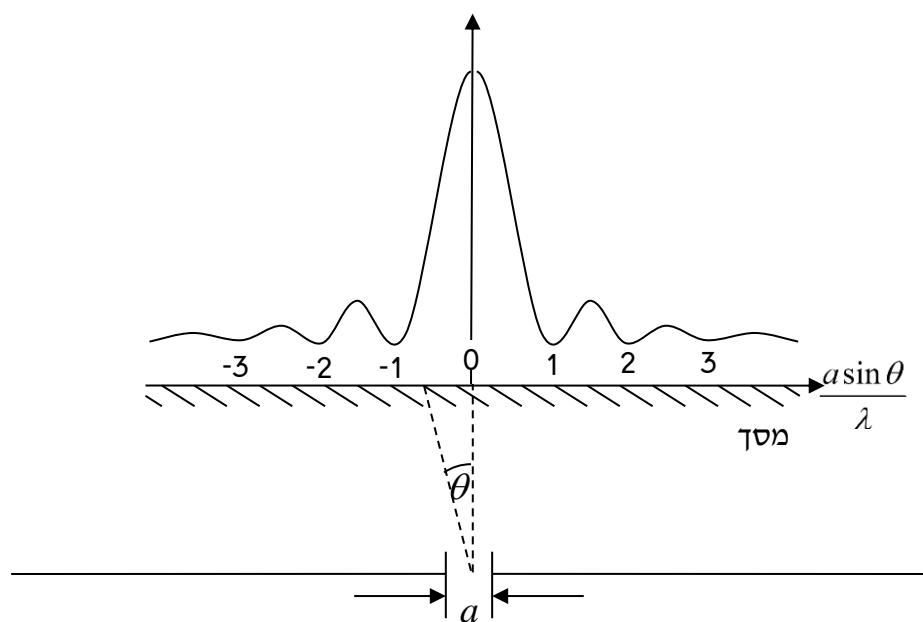
$$I = I_0 \frac{\sin^2 \pi X}{(\pi X)^2} \quad (9)$$

במושווה 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 באירור 5. הציר האופקי בגרף זה הוא X . כפי שננו רואים יש מקסימום רחוב בזווית 0° ואפסים בנקודות $n = \pm X$ כלומר :

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



איור 5 : תמונות עקיפה מסdisk רחוב.

התאבכות משני סדקים

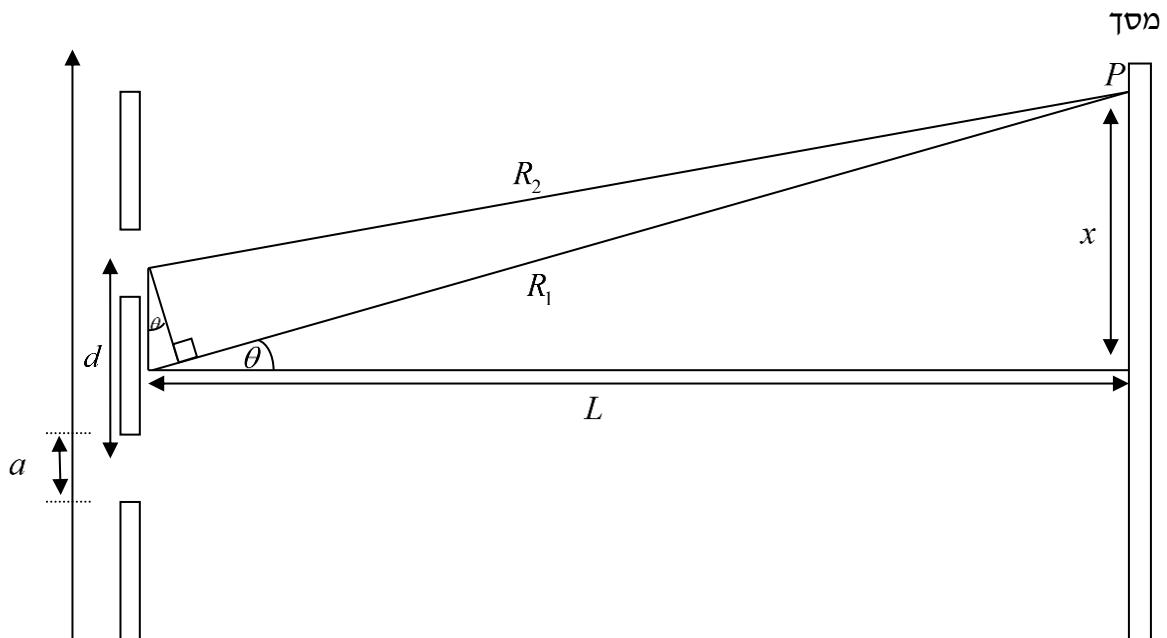
תופעת ההתאבכות היא תוצאה של חיבור מספר גלים הבאים ממקורות קוורנטיים. שני מקורות הם קוורנטיים אם יש קשר קבוע בין המופיע שלהם. בניסויים על גלי אור יוצרים מקורות קוורנטיים על ידי כך שנונתנים לאור מקור אחד לעבר דרך שניים או יותר סדקים. האור שעובר דרך כל סדק מקור אור. הגיאומטריה מתוארת באיוור 6. במסך ישנו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

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

אם הפרש המופיע בין שני הגלים הוא π (או כפולה אי-זוגית של π), הגלים יבטלו זה את זה, וככל לא יהיה אור. במקומות שזה קורה, ההתאבכות היא הורסתה. לעומת זאת, אם הפרש המופיע הוא 2π (או כפולה של 2π) הגלים יחזקו זה את זה, ותהיה ההתאבכות בונה. מכאן, **התנאי להתאבכות הורסתה** 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 הורסתה הוא $R_1 - R_2 = (2n+1)\lambda/2$. זאת אומרת, בהתאבכות הורסתה, הפרש הדרכים האופטיות שווה למספר אי-זוגי של חצאי אורך גל.



איור 6: הגיאומטריה של ההתאבכות משני סדקים

אם הפרש המופיע 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 אורך גל:
 $R_1 - R_2 = n\lambda$. אם נתבונן באיוור 6, נראה ש- $R_2 - R_1 \approx d \sin \theta$. קירוב זה הוא מציין, כאשר מרחק הסדקים אל P גדול מאד לעומת a . מכאן נקבל את התנאים הבאים להتابכות הורסת וboneה:

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

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

נשתמש במשוואה (12) בזוחות טריגונומטרית פשוטה לסקום של סינוסים, ונקבל:

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

התוצאה היא גל המשטנה בזמן בתדרות ω שהמשרעת שלו אינה קבועה אלא משתנה ממוקם לפיה שני הגורמים בצד ימין של המשוואה (15). אם נעלה את המשרעת בריבוע, ונציב $R_1 - R_2 = d \sin \theta$, נקבל:

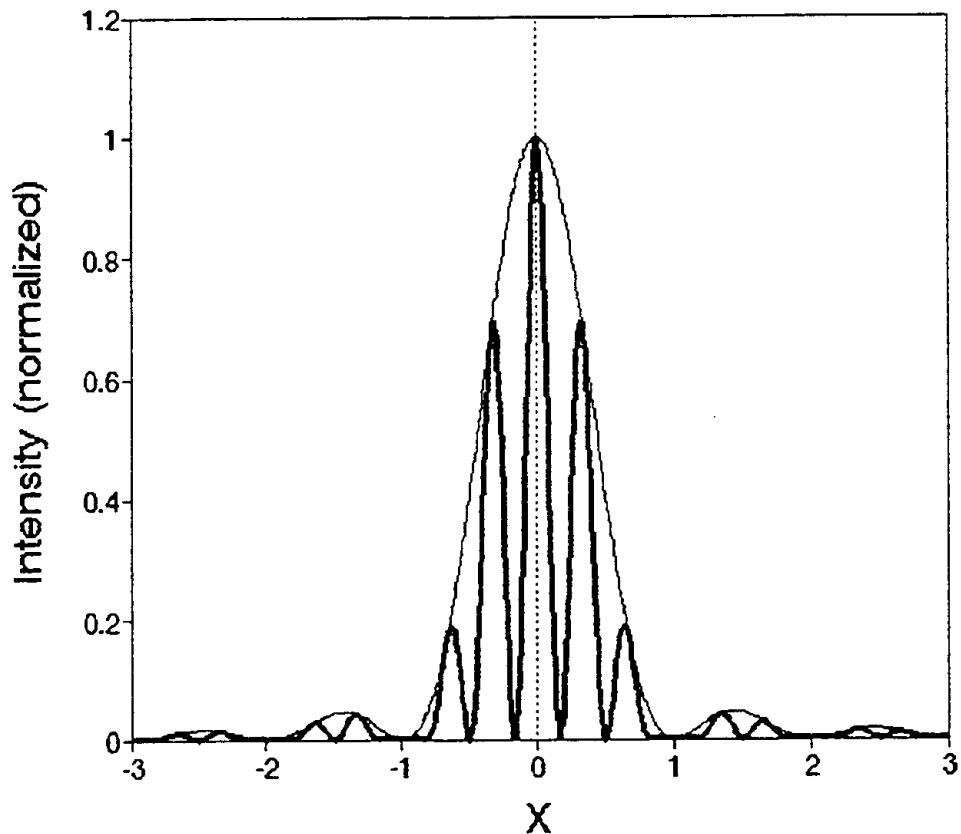
ביטוי לעוצמה:

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

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

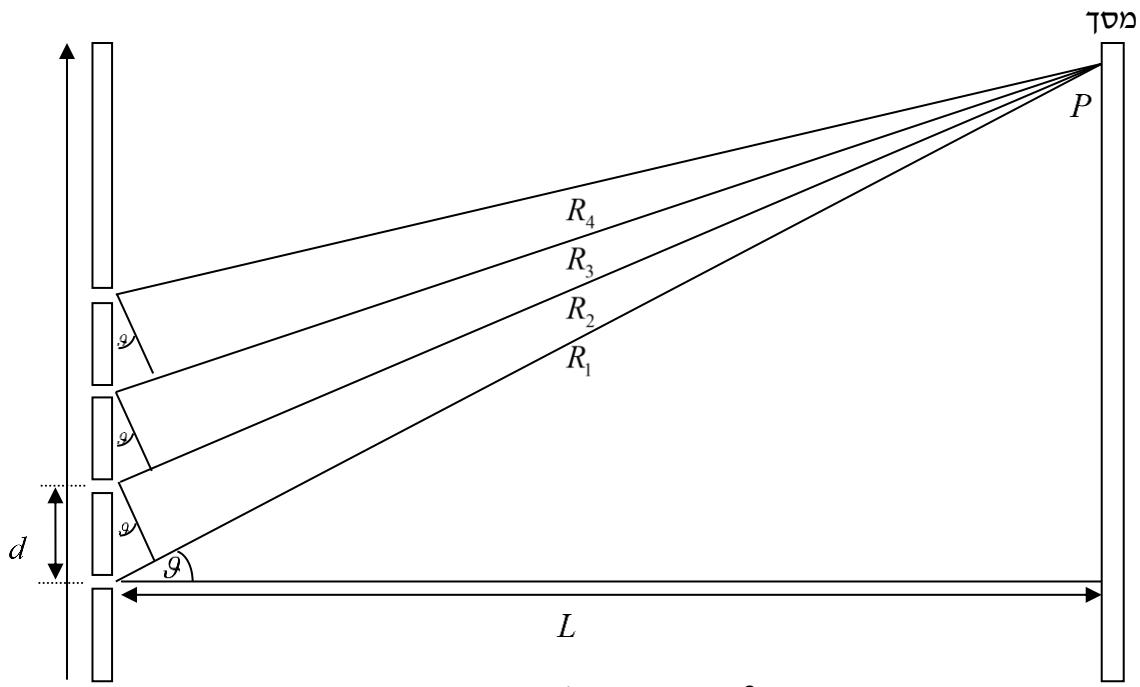
המעטפת של העקומה היא העוצמה של עקיפה, כלומר $\sin^2 \pi X / (\pi X)^2$.

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



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

התאבכות מסדקים רבים



איור 8 : התאבכות מ-4 סדקים

אם מקורות או ריבים מתאימים – למשל על ידי כך שאור עובר דרך סדקים רבים אזי כל מקור תורם להפרעה בנקודה P איבר כמו זה במשווהה (8). איור 8 מראה דוגמה של הת庵בות מ-4 סדקים. אם המהלך של כל מקור מהנקודה P הוא ... R_1, R_2, R_3 , 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 להת庵בות בונה הוא שהת瑁ונה מכל מקור תהיה מאותו מופע. זאת אומרת, עבור כל i קיימים:

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

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

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

אולם התנאי להת庵בות הורסת הוא שונה. נניח שנמצאים בין שני מקסימה ראשוניתים: $\pi < k(R_i - R_{i+1}) < 2\pi$. אם יש שני סיינוסים בלבד במשווהה (17), אזי הסכום מתאפס רק אם הפרש המופיע הוא π . אבל אם יש שלושה סיינוסים ב- (17), אזי הסכום מתאפס בשני מקרים: כאשר הפרש המופיע בין שני סיינוסים עוקבים הוא או $2\pi/3$ או $4\pi/3$. כמובן, בנויגוד למצב של שני סדקים, בשלושה סדקים ישנים שני מינימום בין כל שני מקסימה ראשוניתים.

מתוך סכום הטור במשווהה (17) ל N סדקים ניתן להכליל את התוצאות ולהסיק כי עבור N סדקים ישנים ($-N$) מינימה בין כל שני מקסימה ראשוניתים. כאשר מסכמים את הטור במשווהה (17) ומחשבים את העוצמה, מקבלים:

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

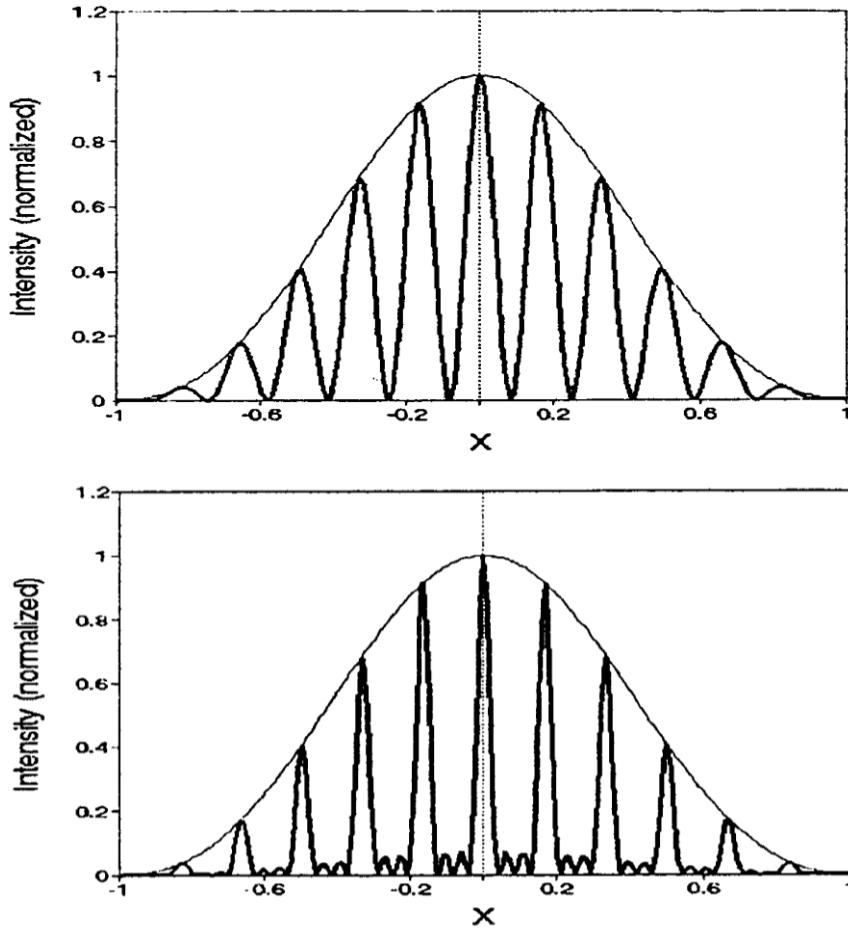
התנאי להת庵בות הורסת בין המקסימום הראשוני $n=1$ לבין המקסימום הראשי $n=0$ הוא:

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

יש תנאים דומים בין כל שני מקסימה ראשיים. באյור 9 אנו רואים גרפים של העוצמה עבור התאבכות משנה סדקים והتابכות מאربעה סדקים. הцентр האופקי הוא $X = a \sin \theta / \lambda$, ו- $d = 6a$ בשני המקרים.

$$\text{המעטפת של העוקמות היא העוקמה של עקיפה, } \sin^2 \pi X / (\pi X)^2.$$

אנו רואים שהמקסימה הראשיים נמצאים באותו הזווית בשני המקרים, אבל במקרה של שני סדקים יש רק מינימום אחד בין כל שני מקסימה ראשיים, ואלו במקרה של 4 סדקים ישנו 3 מינימה בין כל שני מקסימה ראשיים. لكن המקסימה הראשיים הם הרבה יותר צרים במקרה של 4 סדקים.



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

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

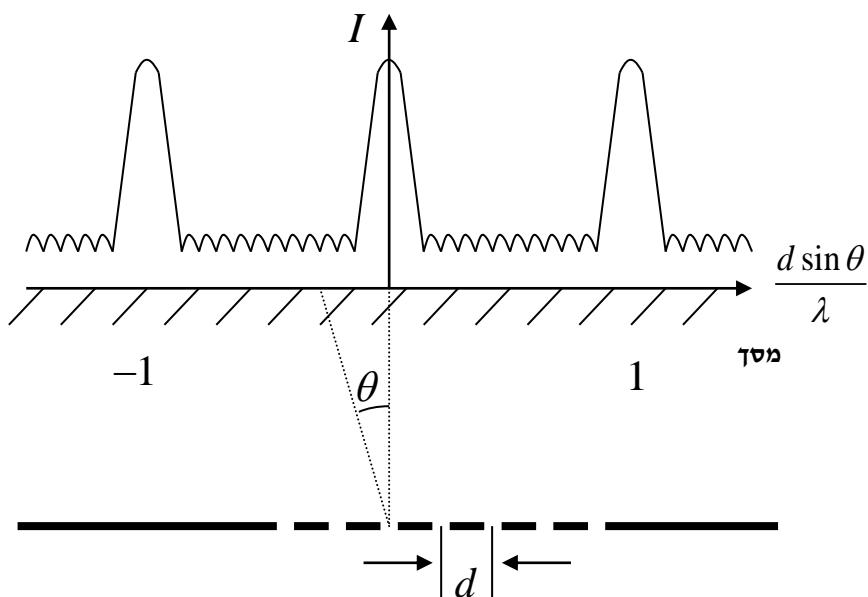
סרייג עקיפה

סרייג עקיפה הוא לוח שחרוטים עליו סדקים בצפיפות גבוהה (מאות קווים למ"מ). כאשר אור עובר דרך סרייג יש התאבכות הורשת ברוב הכוונים ורק בזווית מסוימת מתאפשרת התאבכות בונה. בזווית אלו מופיעות נקודות חזקות של אור. התנאי לזרויות 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 הסרייג.

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

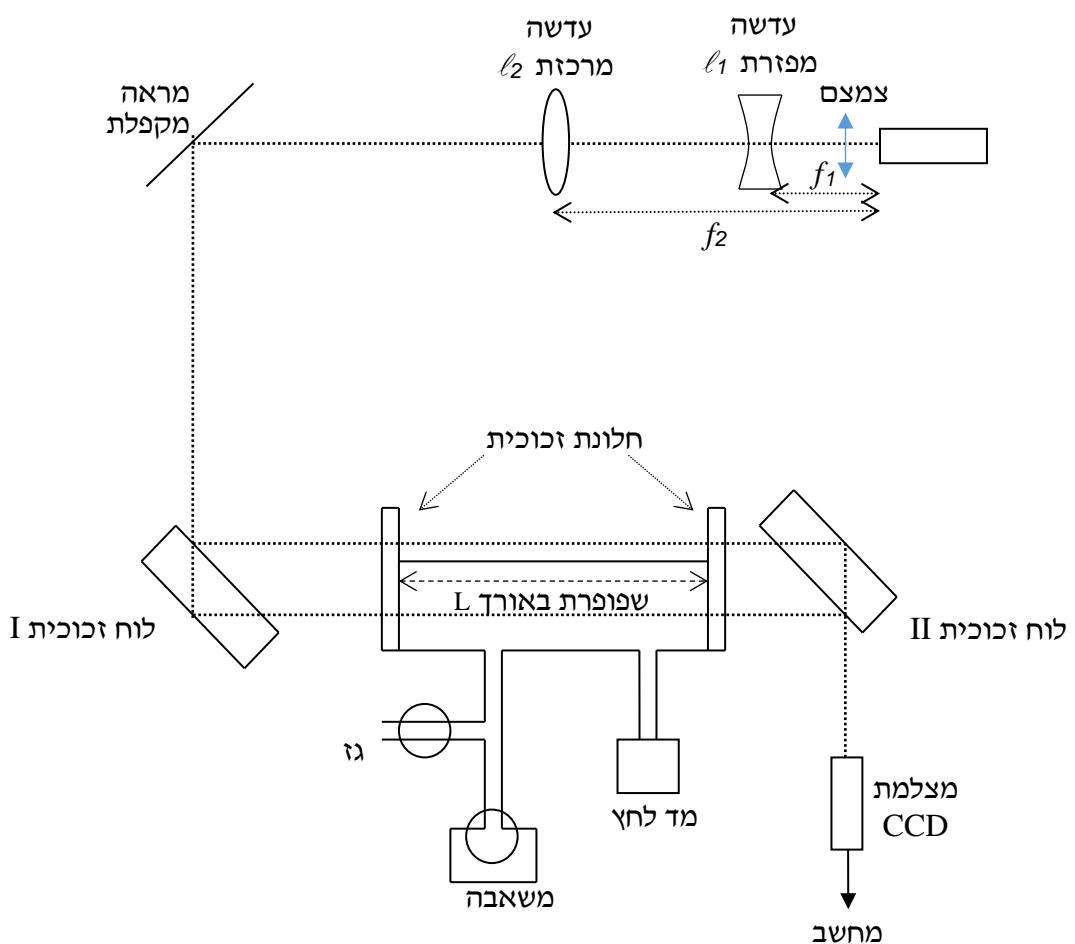


איור 10: תמונה עקיפה מסרייג.

ד. אינטראפרומטר למדידת מקדם שבירה

בניסוי זה נמדד את מקדם השבירה n של גז בלחצים שונים החל מלחץ נמוך מאוד ($0 \approx p$) ועד ללחץ אטמוספירי. ידיעת n מאפשרת גם חישוב "הקווטביות" שהינה מקדם הפרופורצייה שמשוער במשוואה (1). היות וערכו של n עבר גזים קרוב מאוד לאחד, הדרך המדעית למדידתו היא בשיטות אינטראפרומטריות בלבד ולא ע"י מדידה ישירה.

בשיטה זו התבונן בשתי קרניים, האחת מתקדמת באוויר שבחדר והשנייה מתקדמת מרחק L בתווך שונה המצויה בתוך שפופרת. השפופרת, בעלת חלונות זכוכית, ניתנת למילוי בגזים שונים וכן ניתן למדוד את הלחץ בה. מקדם השבירה n ניתן לחישוב מהתוצאות החתאבכות בין שתי הקרניים. האינטראפרומטר במעבדה הינו אינטראפרומטר Jamin Mach-Zehnder שהוא סוג של אינטראפרומטור המ构思ור מפורט באירור 11.



איור 11: תיאור מערכת האינטראפרומטר למדידת מקדם שבירה בגזים.

בכדי להקל על המדידה נגדיל את מפתח קרן הליזר באמצעות עדשות, הראשונה ℓ_1 מפזרת והשנייה ℓ_2 מרכזת בעלות מרחקי מוקד $f_2 - f_1 \cong 400mm$, בהתאם. בשלב זה של המעבדה לא נדוע בפרטיו העדשות ובמאפייניו האופטיקית הבנישוי.

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

הפרש הפазה Δ בין הקרניים תלוי בסוג ובלחץ הנז בשפופרת אשר ניתן לשינוי ע"י משאבה (ראה איור 11) ומקיים:

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

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

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

במהלך הניסוי מרוקנים את השפופרת בעזרת משאבת ואקום וממלאים אותה בהדרגותיות בנז מסויים. כאשר לחץ הנז וצפיפותו בעליים n גDEL ולכן יורדת מהירות האור בשפופרת וכן קיטן אורך הגל בשפופרת. כתוצאה לכך הפרש הפазה משתנה, ומערכות פסי התארכות (fringes) נעה. נניח שבלחץ $0 = p$ (ואקום) המקיים של התארכות הורסתן (פס שחור) היה בנקודה χ על המסך. אם מכניסים גז לשפופרת פס זה ינוע הצדיה וכאשר הפרש הפазה ישתנה ב- 2π (מחזור שלם) יתפוז פס אחר את מקומו.

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

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

ומספר הפסים F שייעברו בנקודה χ יהיה:

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

כאן λ_0 הוא אורך הגל בvakuum.

(p) λ תלוי במקדם השבירה של הגז בצורה הבאה : (אורק הגל תלוי בלחץ Ci או תלוי בלחץ C)

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

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, והקטבויות α באופן ליניארי :

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

ועבור גזים מתקיים $1 < \alpha < N$. 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

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

קשר 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 הנთונים בסוף התזריך הם עבור 0°C , 760mm Hg).

ה. שאלות הבנה

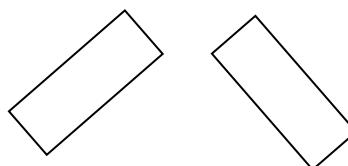
1. הסבירו את המושגים שדה אלקטרו-מגנטי; קויטוב של גל אור.
2. מהם התנאים שחכיבים להתקיים בנווגע למקור האור כדי לבצע את ניסוי העקיפה בסדק יחיד?
3. חשבו את רוחב פס העקיפה המרכזי של סדק שרוחבו $100 \mu m$ על מסך מרחקו מהסדק 50 cm מעבור מקור בעל אורך גל 5000 \AA .
4. בהתאכחות שני סדקים מצאו קשר תיאורטי בין רוחב כל סדק, a , לבין המרחק בין הסדקים, d .
מתוך עקומת העקיפה של שני סדקים (או דוגמה באירור 7).
העזרו בנוסחאות למיניהם ומקסימום בעקיפה מסדק יחיד והתאכחות מזוג סדקים!
5. במערכת אינטפרומטר למדידת מקדמי שבירה מדדתם את dF / dp של גז מסוים בטמפרטורה

$$\frac{dF}{dp} = K \frac{\text{fringes}}{\text{cmHg}}$$

מה יהיה מקדם השבירה עבור אותו גז ב- $p = 76 \text{ cm Hg}$ ו- $T = 0^\circ C$?

העזרו בכך בעת חישוב מקדמי השבירה בניסוי והשוואתם לתיאוריה!

6. הסבירו מדוע עלית לחץ הגז בשפופרת משנה את מהירות האור בתוכה.
7. האם לוחות הזוכיות בניסוי האינטפרומטר צריכים להיות מקבילים? האם ניתן לבצע את הניסוי כשהאחד הלוחות מסובב ב- 90° ביחס למצור באירור 11 כלומר מוצב כמו באירור 12? הסבר.



אייר 12

ו. מהלך הניסוי

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

11. פיזור של אור מקטב

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

1. כוונו את אלומת הליזר אל תוך תא הפיזור והציבו מתקן המקטב בין הליזר לתא הפיזור, כמו צבאיו.
13. היעזרו בצמצם להקטין את גודל אלומת הליזר.
2. המתקן מורכב משני מקטבים : מקטב אחד קבוע ומקטב שני המחבר למחזיק ומסתווב 360 מעלות. סיבוב מחזיק המקטב מסובב את המקטב השני ומשנה את הזווית היחסית בין שני המקטבים.
3. המקטב מעביר את רכיב קרן הליזר המקביל לציר המקטב : ניצב לשולחן או המקביל לשולחן או סופרפרזיציה שלהם, בהתאם לכיוונו ביחס לקיטוב הליזר. באפשרותכם לשנות את כיוון הקיטוב ע"י סיבוב מחזיק המקטב. וודאו תמיד כי פני המקטבים בניצב לכיוון התקדמות קרן הליזר.



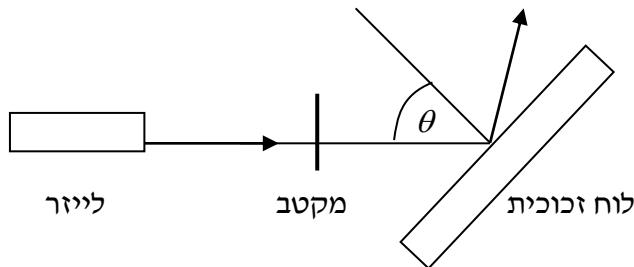
איור 13: תיאור ניסוי פיזור אור.

4. ע"י קביעה שרירותית של כיוון (זווית) המקטב אי אפשר להסיק מיידית את כיוון הקיטוב! לשם כך מקמו תא פיזור לאחר המתקן המקטב וסובבו את המקטב. בחרנו את האור המפוזר מן התא.
5. השוו איזוטופית את העוצמה של האור המפוזר בכיוונים הניצבים לכיוון התקדמות הקרן, למעלה (ניצב לשולחן האופטי) והצדית (מקביל לשולחן האופטי). **סבמו את ממצאיםיכם בכתב!**
6. **הסיקו** איזה כיוון קיטוב (מקביל לשולחן האופטי או ניצב לשולחן האופטי) מועבר ע"י המקטב. העזרו באיור 1. תננו הסבר מלא וምפורט!
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. תננו הסבר מלא וምפורט!

- **שימוש לב:** סכמו כראוי את התוצאות שהתקבלו בסעיף א.5 – א.7 ותנו הסבר כולל ומלא לתופעות. עבור קונפיגורציה מסוימת של המתקן המקטב תארו באופן AiCOTI באיזה כיוון היה פיזור מקסימלי והסבירו מכך מה היה כיוון הדיפולים וכן את כיוון המקטבים במתקן. יש לשמר על קו לוגי ברור ורציף במהלך החסר. הניחו כי כל מולוקולה היא דיפול חשמלי המעוור ע"י קרינית הליזר.

2. החזרה של אור מקוטב

1. הרכיבו את המערכת המוצגת באיור 14 למדידת זווית ברוסטר. לאחר המקטב מקומו זוכות המוחוברת למד זווית. הקפידו שבזווית $\theta = 90^\circ$ הקרן תקביל לפניה הזוכות, במקרה הצורך מיצאו את התקיקו הדרושים.
2. העזרו בחלק הקודם, ו.1, וכונו את המתקן המקטב כך שמעבר הקיטוב המקביל \vec{E}_{\parallel} לפי איור 3 (שימוש לב לכיוונים – מקביל למה?). **הסבירו כיצד מיקמתם את המקטב ומדו!**

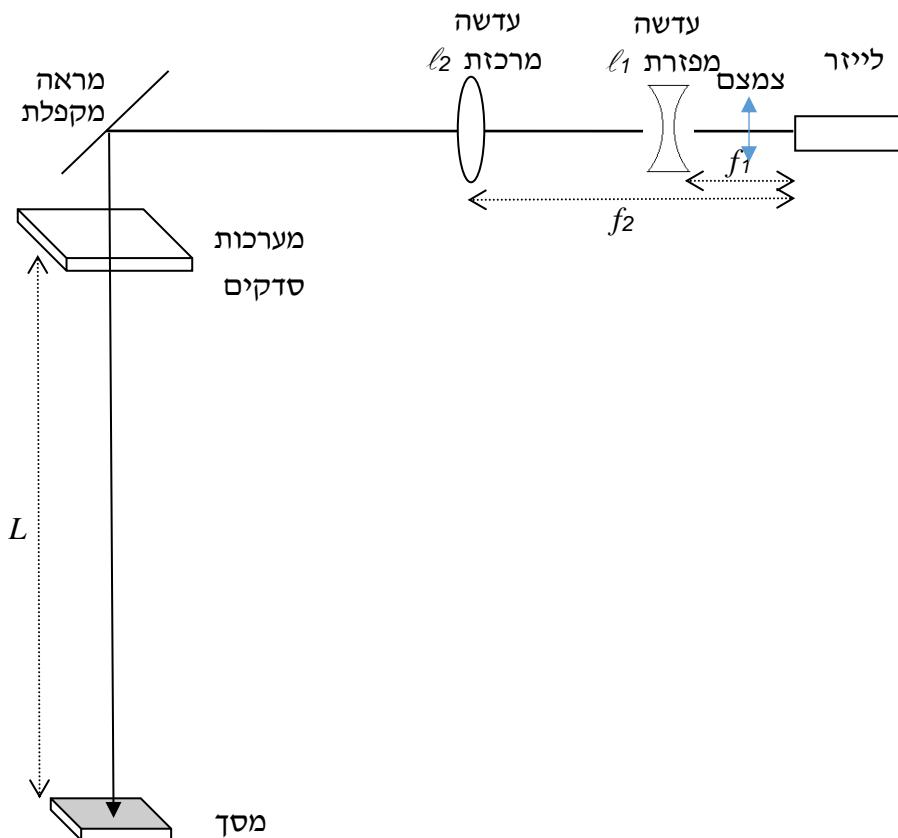


איור 14: תיאור מערכת הניסוי למדידת זווית ברוסטר.

3. במידה והמתקן המקטב מאפשר מעבר של רכיב \vec{E}_{\parallel} בלבד, **מצאו את זווית ברוסטר**: התבוננו בעזרת פיסת נייר (או על התקראה) בקרן המוחזרת מלוח הזוכות וסובבו את לוח הזוכות עד למצב של עצמת אור מינימלית. אפשר להגיע למינימום טוב יותר ע"י תיקון קל בזווית המקטב.
4. כאשר המערכת מכונה לזרות ברוסטר, סלקו את המתקן המקטב שבין הליזר והלוח המחזיר ובדקו את הקיטוב של הקרן המוחזרת. **הסבירו**.
5. חשבו את מקדם השבירה של הזוכות. לקבלת דיוק גובה 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. התארכות ועקיפה

1. בחלק זה של הניסוי עומד לרשותכם שולחן אופטי ורכיבים כמפורט באירור 15. בכדי לכיל את המערכת הוציאו את כל הרכיבים מהתוшибות.
2. מקמו את הליזר בפינה הימנית הרחוקה של השולחן כך שתאפשר מרחק מקסימלי בין הבדיקות למסך. בכדי לאפשר מעבר של קרן הליזר דרך הבדיקות בניסוי נגדיל את מפתח קרן הליזר באמצעות צמצם מערכת עדשות, הראשונה ℓ_1 מפזרת והשנייה ℓ_2 מרכזת בעלות מרחקי מוקד $f_1 = 50\text{mm}$ ו- $f_2 = 400\text{mm}$, בהתאם. כוונו את הצמצם במרכז הליזר ומקמו את העדשות לפי איור 15 כך שלאחר כל עדשה קרן הליזר אינה מוסטת ממוללה. בשלב זה של המעבדה לא נדון בפרטיו העדשות ובמאפייניהם האופטיים הגאומטריים בניסוי.
3. הציבו את המראה המקפלת בזווית של 45° אחרי מערכת העדשות על מנת לסובב ב- 90° את כיוון התקדמות קרן. וודאו שלאחר הצבת העדשות גודל המפתח אינו משתנה עם התקדמות הליזר במרחב. אם גודל המפתח משתנה, היזזו בעדינות את העדשה המרכזת ℓ_2 קדימה-אחורית ובדקו שוב שגודלו המפתח אינו משתנה וקרן הליזר אינה מוסטת ממוללה.



איור 15: תיאור מערכת מדידת עומק אורך.

4. מקמו סדק יחיד לאחר עדשה 2/ בינו לבין התקדמות קרן הליזר. המראה המקפלת מתכוונת וניתן בעזרתה להסיט בצורה עדינה את קרן הליזר כך שהسدק יהיה במרכז מפתח הקרן.

5. הינו מסך רוחק ככל האפשר מהسدק ומידדו 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 לבחון על גבי מסך המחשב בתמונות עקיפה ברורה.

8. סובבו את הבורג וסרקו את כל תמונות העקיפה המתקבלת בצורה איקוונית בכך לוודא שהינה סימטרית וראוייה למדידה. במידת הצורך כוונו את המערכת ושנו את רוחב הסדק. **ליישמו את דוחה הסדק להשוואה עתידית!**

שים לב: בהגעים לenza הזררו שלא להבריג את הגירה החוצה! עקבו אחר התמונה על המסך ובמידה ואין שינוי - הגעתם לenza!

9. חקרו חצובה לצלמה הדיגיטלית וצלמו (בדרך כלל בMacro [סימן פוקוס במכשיר HDR]) את תמונות ההתאבכות. וודאו שבתמונה נראה סדרים רבים ככל האפשר באופן ברור (מומלץ לצלם עם אור מינימלי בחדר). צלמו באותו setting של המצלמה (אותו zoom ואוותה זווית צילום) סרגל או חפץ בעל אורך ידוע לקבלת קנה מידה לצילום ההתאבכות (עבור המרת פיקסלים למרחק צילום תמונות ההתאבכות).

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

11. מאIOR 4 אפשר לראות ש- $\theta = \arctan(x/L)$. בעזרה משווה זאת ומשווה (9) תוכל לחשב את העוצמה התיאורטיבית. השוו אותה לנקודות המדודות.

12. בחרו רוחב סדק שונה שעבורו תתקבל תמונה 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 הליזר. המראה המקפלת מתכוונת וניתן בעזרתה להסיט ולכובן בצורה עדינה את קרן הליזר כך הליזר יעבור דרך שתי הסדקים.

14. צלמו במכשיר הדיגיטלי (בורד במצב Macro [סימן]) את תמונה התאבות. וודאו שבתמונה נראים סדרים רבים ככל האפשר באופן ברור (מומלץ לצלם עם אור מינימלי בחדר). צלמו באותו setting של המצלמה (אותו zoom ואוותה זווית צילום) סרגל או חוף בעל אורך ידוע לקבלת קנה מידה לצילום התאבות (עבור המرة פיקסלים למרחק צילום תמונה התאבות).

15. מצאו את המרחק בין המקסימה הראשית למינימות הראשית 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 ולהסביר!
העזרו בנוסחאות (16)-(11) ובתשוכתכם לשאלת הקנה 4!

17. הסירו את שקף שני הסדקים ומקמו במקום סרג עקיפה.

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

19. חשבו את צפיפות הסרגל וקבעו הסרגל. הערך התיאורטי הינו $500 \pm 50 \frac{slits}{mm}$.

4. מדידות באינטראפרומטר

1. מדדו את לחץ וטמפרטורת האוויר במעבדה בזמן ביצוע הניסוי.
2. בחלק זה של הניסוי עומדים לרשותכם שולחן אופטי ורכיבים כמפורט באירור 11. בכדי לכיל את המערכת הוציאו את כל הרכיבים מהתושות, מלבד הליזר והמצלמה.
3. הדליקו את הליזר ומקמו את מערכת העדשות – עדשה מפוזרת ℓ_1 ועדשה מרכזת ℓ_2 – כמפורט באירור 11. מקמו את העדשות במקומות כך שקרן הליזר תעבור במרכז כל עדשה, בהתאם לאירור 11. הערו בחוסם קרן כדי לוודא כי אין שינוי בכיוון התקדמות הקרן.
4. וודאו שלאחר הצבת מערכת העדשות גודל המפתח אינו משתנה עם התקדמות הליזר למרחב. 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 נدون בפרטיו העדשות ובמאפייניהם האופטיים הגאומטריים בניסוי.
5. הציבו לוח זכוכית לאחר הליזר. הזיזו וסובבו את הלוח מעלה מטה ולצדדים כך שייתקבלו 2 אלומות חזקות המתקרבות בኒצב לאלומה היוצאת מהליזר, המצוואר באירור 11.

6. הציבו לוח זכוכית שני במצב מקביל לראשון. כוונו את המראת המקפלת (ע"י סיבוב הברגים העדינים), הזיזו את לוח הזכוכית וסובבו אותו לקבלת תמונה החזרה. סובבו בעדינות את לוח הזכוכית ימינה ושמאליה ושימו לב איך לאחר הלוח השני הנוקודות האמצעיות מתלכדות לנוקודה אחת. הסבירו מדוע תופעה זו מתרחשת.

7. הקפידו על מצב בו החיפוי בין 2 האלומות היא מקסימלית וצפו בנוקודה עצמה.

8. מכוו שפופרת בין שני הלוחות. כוונו אותה כך שאחת האלומות תעבור בתחום השפופרת (קרוב למרכז) והשנייה דרך הזכוכית ליד השפופרת. המראת המקפלת מתכוונת וניתן בעורתה להסיט בזורה עדינה את הליזר ולשנות את מיקום פגיעת הליזר על גבי הזכוכית הראשונה כך שהקרןיהם המפוצלים עברו כנדרש בתחום השפופרת ומהווצה לה.

9. מכוו את מצלמת ה-CCD. שימו לב כי המצלמה ניתנת להזזה בניצב לכיוון התקדמות קרן הליזר על פני כ- 25 mm . מכוו את המצלמה במרכז ציר תנועתה (כך שהגרה מצביעה על כ- 12.5 mm). וודאו כי הנוקודה פוגעת במרכז המצלמה ושימו לב לפס ההתארכות השחור המופיע בדרך כלל במרכז הנוקודה.

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

11. מצלמת CCD (Charge-Coupled Device) מורכבת מחישון אלקטרוואופטי 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 $5.2_{\mu\text{m}} \times 5.2_{\mu\text{m}}$. מאחר ויישנו חסם על כמות המטען שהמצלמה יכולה לדגום ישנו סף רוויה מעליו CCD "מסונור" ואינו מסוגל להפריד בין הפוטונים. כדי להתגבר על כך שננו את הגדרות המצלמה:

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

12. וודאו כי הנוקודה המרכזית נופלת במרכז המצלמה על המסך וכי אתם מזוהים במרכז הנוקודה את פסי ההתארכות ההוורסת.

13.פתחו את תוכנת Excel. במהלך המדידה שמרו בכל פעם את מספר הפסים שעברו בנקודת ייחוס מסוימת כפונקציה של הלחץ, עבור גז מסוים. בניסוי זה נעבוד עם הגזים אוויר, He , CO_2 ותערובת גזים $\text{He-1}\text{CO}_2$.

14. סגורו את ברז המשאבה ואת ברז המחט הסגור את כניסה הגז והפעילו את המשאבה. פתחו לאט את ברז המשאבה לשאיית השפופרת ושימו לב לקריאת הלחץ המינימלי האפשרי.

15. המדידה הראשונה בה התקבל מינימום לחץ היא נקודת $F=0$. העזרו בכלי השריג הצהוב שבצד השמאלי של המסך בצדี้ לסמן קו של התארכות הורסת שנייתן לזהות בברור במרכז המסך. מעתה התייחסו לקו זה בתור היחס שלבכם למדידות.

16. סגרו את ברז המשאבה ופתחו את ברז המחט להכנסת גז בצורה מבוקרת ואיטית. עם כניסה הגז לשופרת, פסי התארכות נעים. סיפו אותם וסגרו את ברז המחט כעבור כ- 10 פסי התארכות. שימרו את מספר הפסים שעברו ואת הלחץ.

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

18. פתחו את ברז המשאבה ושאבו את הגז מהשפורה. בהגיעם לחץ המינימלי סגרו את ברז המשאבה.

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

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

21. העלו את התוצאות של כל מדידה על גרפ של מספר פסי התארכות F שעברו כנגד הלחץ p לגז מסוים. חשבו מתוך משווהה (31) את הקטניות הממוצעת \bar{a} של האויר.

22. לכל גז חשבו את מקדם השבירה n בטמפרטורה $T = 0^\circ C$ ובלחץ $p = 76\text{cmHg}$ בעורת משווהה (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 משווהה (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	1.001500	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	1.000784-1.000823	
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	
Hydrogen.....	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	1.000665	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

2. 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. אינטראפרומטר למדידת מקדם שבירה

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