אוניברסיטת בן גוריון

הפקולטה למדעי הטבע

המחלקה לפיזיקה

<u>שם הניסוי</u>

דו"ח מעבדה ב'

<u>מאת:</u>

סול אמארה

<u>מדריך המעבדה:</u>

נמרוד שרף

26/11/2020

תוכן עניינים

1. מטרות הניסוי:

* להכיר מושגים באופטיקה גיאומטרית
* למדוד את מקדם השבירה של תווך באמצעות: חוק סנל, חוק ברוסטר, זווית הסחה מינימאלית של מנסה
* למדוד את מרחק מוקד של עדשות מרכזות ומפזרות

2. רקע תיאורטי:

קרן האור:

קרן האור מורכבת מגלים בעלי מאפיינים ייחודים כמו עוצמה, אורך גל, ותדירות, המשפיעים על היכולת שלנו לראות אותה. העין של בני האדם יכולה לראות גלים רק בטווח תדירות מסוימת הנקראת האור הנראה. היא חיונית לראייתנו ופעולת העין האנושית מתבססת על החזרה של קרני אור מחפצים ומהסביבה והמידע הזה מתורגם במוח למה שאנו רואים. לצורך הדגשת חשיבותה, ניתן לראות כי אנו משתמשים גם באור מלאכותי כאשר אור השמש אינו מספיק חזק מפני שבחשכה אנו לא יכולים לראות.

מהירות האור משתנה בהתאם לחומר דרכו הקרן עוברת, בחומרים שקופים ניתן לחשב אותה על פי נוסחה (1) (n מייצגת את מקדם השבירה של החומר עליו נרחיב בהמשך).

מהירות האור המקסימלית נמדדת בריק, ומסומנת באות c, $c = 3 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}$.

מקטב:

כפי שהזכרנו, קרן אור מורכבת מגלים אלקטרומגנטיים. כל גל נע בצורה שונה זה מזה ולכל גל יש שדה חשמלי המאונך לכיוון התקדמות הגל. קרן אור נקראת מקוטבת כאשר השדה החשמלי של כל הגלים היוצרים את הקרן הוא באותו כיוון.

מקטב הוא מכשיר שעיקר פעולתו היא להבדיל בין אור מקוטב ללא מקוטב כיוון שהעין שלנו לא יכולה לעשות את ההפרדה. ההפרדה נעשית באמצעות חסימה של כל הגלים בהם השדה החשמלי לא באותו הכיוון והחזרתו רק של האור המקוטב.

בשל כך, הטווח הניתן לראות הינו בין אור חזק לבין חשכה, בהתאם לכמות הגלים העוברים דרכו.

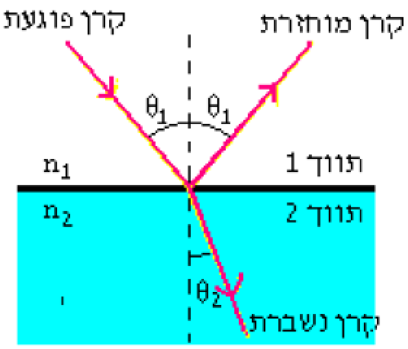
מקדם שבירה:

מקדם שבירה הוא תכונה שיש לחומרים שקופים, הוא קבוע עבור כל חומר ומשתנה בין חומרים שונים. כפי שניתן לראות בנוסחה (1), ככל שמקדם השבירה גדל, מהירות קרני האור העוברים בחומר זה קטנה.

מקדמי השבירה בהם נשתמש במעבדה זו :

בריק n=1 , באוויר n=1.33 , בזכוכית n=1.5 , ובפרספקס n=1.4914 .

חוק סנל:



חוק סנל מתאר את השינויים שעוברת קרן אור כאשר היא פוגעת בחומר בעל תווך שונה מהתווך בו היא נמצאת.

ניתן לראות כי קרן האור מוחזרת בחלקה, בזווית זהה לזווית בה היא פגעה בחומר. כמו כן, החלק של הקרן הנשברת נמצאת בזווית שונה אותה ניתן לחשב על פי הנוסחה הבאה :

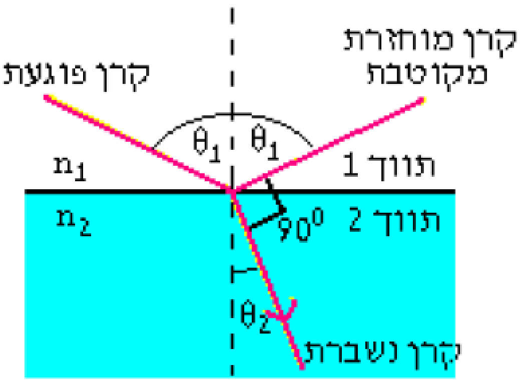
$$n1 \cdot sin\theta1 = n2 \cdot sin\theta2$$

נוסחה זו הינה חשובה ושימושית ומאפשרת לנו לדעת לחשב את זווית הקרן הנשברת או את מקדם השבירה של חומר לא ידוע בהינתן זווית השבירה.

ניתן לראות מהנוסחה, כי כאשר היחס : $sin\theta2 = \frac{n1 \cdot sin\theta1}{n2} > 1$, נקבל כי הקרן תוחזר במלואה ולא תעבור לתווך 2, כיוון ש $-1 < arcsin\theta < 1$ משיקולי גיאומטריה.

כאשר נסתכל על מעבר קרן אור בחומרים בעלי מקדמי שבירה שונים, נוכל לראות את השינויים המתרחשים בשל שבירת הקרניים. נמחיש את התופעה באמצעות התמונה הבאה:
אם נסתכל על עיפרון הנמצא בתוך כוס מים שקופה, נוכל לראות שהוא איננו ממשיך בצורה ישירה כפי שהיינו מצפים, והחלק שנמצא במים נראה קרוב יותר. תופעה זו נגרמת בשל השינויים שקרני האור עוברים במעבר בין החומרים אותם תיארנו על ידי חוק סנל.

<u>חוק ברוסטר:</u>
חוק ברוסטר קובע כי כאשר הזווית בין הקרן הנשברת למקוטבת היא זווית ישרה, הקרן המוחזרת היא קרן מקוטבת והשדה החשמלי מאונך למישור הפגיעה.
בהתאם לקביעה זו ולפי חוק סנל נקבל את נוסחה (4) הקובעת כי $n = tan\theta 1$.

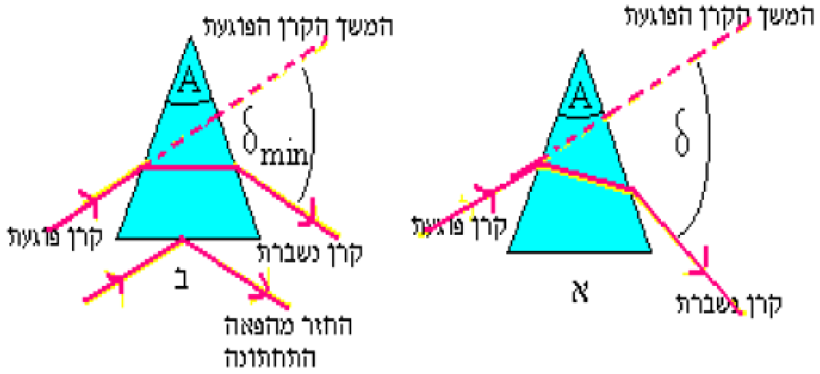


אחרי שהסברנו את החוקים הבסיסים בהם נשתמש במעבדה זו על התנהגות ומאפייני קרני האור, נרחיב על מעברן דרך 2 גורמים עיקריים : מנסרה משולשת ועדשות.

<u>מעבר קרן אור דרך מנסרה משולשת:</u>

כאשר קרן אור עוברת דרך מנסרה משולשת היא נשברת פעמיים, פעם אחת בכניסה למנסרה ופעם שניה ביציאה.

נתמקד בשני מקרים עיקריים אותם ניתן לראות בתמונות הבאות :



באיור א׳ מתוארת שבירה של קרן דרך מנסרה, נסמן בδ את הזווית בין הקרן הנשברת (היוצאת מהמנסרה) לבין המשך הקרן הפוגעת.

זווית זו היא מינימאלית במקרה המומחש באיור ב׳, כאשר מיקומי שתי הפגיעות ביציאה ובכניסה למנסרה מקבילות לבסיסה. באמצעות מדידת זוויות אלו ובשימוש בנוסחה (5), נוכל לחשב את מקדם השבירה של החומר ממנו עשויה המנסרה ובכך להסיק מהו.

<u>מעבר קרני אור דרך עדשות:</u>

נגדיר מספר משתנים בהם נעסוק כאשר נדבר על עדשות :

u – המרחק בין העצם לבין העדשה.

v – המרחק בין דמות העצם לבין העדשה.

f – מרחק המוקד של העדשה.

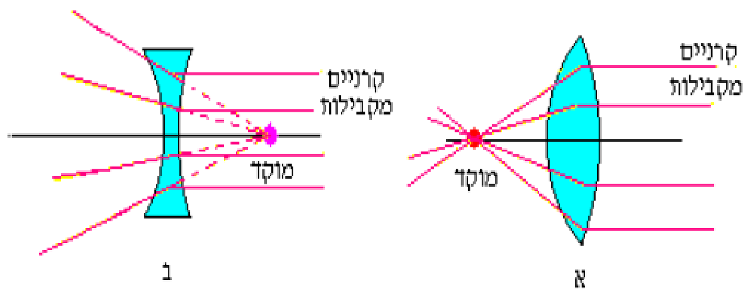
כאשר נציב מקור אור ודמות לפני עדשה, תוחזר דמות מדומה הנובעת מהחזרת הקרניים הפוגעות בעדשה. קיימות 2 סוגי עדשות- עדשה מרכזת ועדשה מפזרת.

עדשה מרכזת היא בעלת מבנה קמור והיא מרכזת את הקרניים הפוגעות בה לנקודה אחת.

לעומתה, עדשה מפזרת בעלת מבנה קעור והיא מפזרת את הקרניים הפוגעות בה לכיוונים שונים.

ניתן לראות את ההבדל בין העדשות בתמונה הבאה :

עדשה א׳ הינה מרכזת ועדשה ב׳ הינה מפזרת.



כמו כן, כפי שניתן לראות בתמונה הקודמת, המוקד של העדשה הינו המקום בהן הקרניים מתרכזות בעדשה מרכזת והמקום הדמיוני בו המשך הקרניים מתלכד בעדשה מפזרת. המרחק בין נקודה זו לבין העדשה נקרא מרחק המוקד. בשל כך, מרחק המוקד של עדשה מפזרת הינו שלילי. בנוסף, קיים קשר חשוב בין מרחקי הדמויות הממשית והמדומה לבין מרחק המוקד של העדשה אותו נתאר על ידי נוסחה (6).

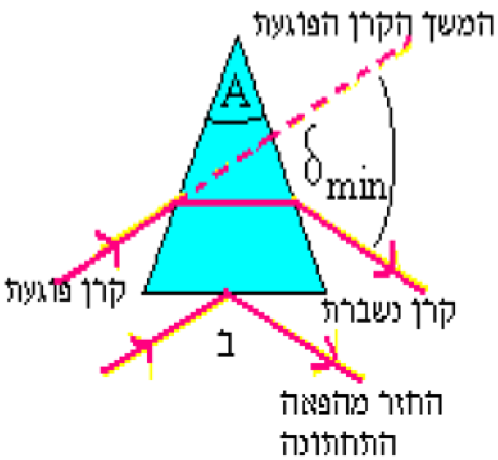
<u>ריכוז הנוסחאות בהן נשתמש במעבדה זו:</u>

$(1)\ V=\frac{c}{n} \qquad c=3\cdot 10^8\ \frac{m}{s}$	מהירות האור
$(2)\ n1\cdot sin\theta1=n2\cdot sin\theta2$	חוק סנל
$(3)\ n=\frac{sin\theta1}{sin\theta2}=\frac{tan\theta1}{tan\theta2}=\frac{h}{h'}$	חוק סנל בזוויות קטנות
$(4)\ n=\frac{sin\theta1}{sin\theta2}=tan\theta1$	חוק ברוסטר
$(5)\ \sin\left(\frac{\delta_{min}+A}{2}\right)=n\cdot\sin\left(\frac{A}{2}\right)$	מנסרה
$(6)\ \frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}$	בעדשות דקות
$(7)\ \frac{1}{f}=\frac{1}{f1}+\frac{1}{f2}$	הצמדת שתי עדשות
$(8)\ \Delta f=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial z}\Delta z\right)^2}$	הערכת השגיאה בגדלים בלתי תלויים
$(9)\ \frac{\lvert\bar{x}-x\rvert}{\bar{x}}$	סטייה יחסית הערך שהתקבל-x הערך הספרותי- $\bar{x}$
$(10)\ \frac{\alpha_{rad}}{2\pi}=\frac{\alpha°}{360°}$	מעבר ממעלות לרדיאנים

3. ניסוי: מדידת זווית ההסחה המינימלית

3.1. מהלך הניסוי

השלב הראשון והחשוב על מנת להגיע לתוצאות מדויקות בניסוי הוא כיול המכשירים. לשם כך נמקם את המשקפת מול הקילומטור ונוודא שהאור היוצא מהמנורה עובר דרכו עד שנראה דמות ברורה של הסדק. לאחר מכן נכייל את המכשיר על ידי כך שה0 במד הזווית יתלכד עם ה0 במד הנוניוס.
לאחר שכיילנו את המכשירים נמקם את המנסה בצורה הבאה:



נשים לב כי חלק מהקרניים נשברים פעמיים במנסרה וחלק מהקרניים מוחזרים מהפאה התחתונה.
לאחר מכן, מופיעים על הקיר שני כתמי אור, האחד צבעוני הנובע מהקרן שעוברת שבירה כפולה והשני לבן מהקרן המוחזרת. נסובב את המכשיר עד התלכדות הכתמים ואת הטלסקופ עד שהקרניים עוברות דרכו ונקרא את הערך שמוצג במד הזווית, ערך זה הוא זווית ההסחה המינימלי.
בתמונה הבאה ניתן לראות כיצד יש למקם בצורה הנכונה את הטלסקופ והמנסרה.

3.2. תוצאות הניסוי:

זווית ההסחה המינימלית הינה $\delta_{min} = 36.6° \pm 0.1° = 0.64 \pm 0.0017rad$,
וזווית הראש של המנסרה $A = 60° \pm 0.1°$.

3.3. עיבוד התוצאות:

$$\delta_{min} = 36.6° \pm 0.1° = 0.639 \pm 0.002rad$$

על ידי נוסחה (10) נחשב את גודל הזווית הראש ברדיאנים:

$$\frac{\alpha_{rad}}{2\pi} = \frac{\alpha°}{360°}$$

$$A = 60° \pm 0.1° = 1.0472 \pm 0.0017\ rad$$

$$A = 1.047 \pm 0.002\ rad$$

נשתמש בנוסחה (5) על מנת לחשב את מקדם השבירה של המנסרה ואת השגיאה בו:

$$\sin\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right) = n \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)$$

$$\mathrm{n} = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} = \frac{sin\left(\frac{0.64 + 1.047}{2}\right)}{\sin\left(\frac{1.047}{2}\right)} = 1.4942$$

נחשב את השגיאה באמצעות נוסחה (8):

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \delta_{min}}\Delta\delta_{min}\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial A}\Delta A\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)} \cdot \Delta\delta_{min}\right)^2 + \left(\frac{-\sin\left(\frac{\delta_{min}}{2}\right)}{2 \cdot sin^2\left(\frac{A}{2}\right)} \cdot \Delta A\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{0.639 + 1.047}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{1.047}{2}\right)} \cdot 0.002\right)^2 + \left(\frac{-\sin\left(\frac{0.639}{2}\right)}{2 \cdot sin^2\left(\frac{1.047}{2}\right)} \cdot 0.002\right)^2} =$$

$$= \sqrt{1.77 \cdot 10^{-6} + 1.57954 \cdot 10^{-6}} = 1.83 \cdot 10^{-3}$$

לכן, מקדם השבירה הוא $\boldsymbol{n = 1.494 \pm 0.002}$.

3.4. דיון בתוצאות ומסקנות:

נציג את התוצאות הסופיות: $n = 1.494 \pm 0.002$

נשים לב כי מקדם השבירה של זכוכית הינו $n \approx 1.5$ [1] על פי הנתון בתדריך המעבדה. כיוון שערך זה איננו נמצא בטווח השגיאה שקיבלנו, נחשב את אחוז הסטייה היחסית בין הערך שקיבלנו בניסוי זה לבין הערך הספרותי על פי נוסחה (9):

$$\frac{|\,\bar{x} - x|}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{|\,1.5 - 1.494|}{1.5} \cdot 100\% = 0.4\%$$

ניתן לראות כי קיבלנו אחוז סטייה נמוך השווה ל **0.4%**, מכאן ניתן להניח כי החישובים והמדידות שביצענו בניסוי זה הינם מהימנים וניתן באמצעות ניסוי זה לחשב את מקדם השבירה בצורה מדויקת. השוני הנמוך שקיבלנו עלול לנבוע משגיאת מכשיר או משגיאות סטטיסטיות במהלך המדידה כמו למשל מדידת הזווית במצב שמעט מוסת מהזווית המינימלית.

4. ניסוי: זווית ברוסטר ויצירת קרן אור מקוטבת ע"י החזרה

4.1. מהלך הניסוי:

ראשית נכייל את המכשירים באופן דומה לניסוי הקודם. לאחר מכן נניח את המנסרה כך שקרן האור פוגעת בדופן המנסרה ומוחזרת ממנה, נדע זאת כאשר נראה נקודת אור על הקיר. נסובב את המשקפת לזווית $67.4°$, ונכוון את הקרן המוחזרת על ידי סיבוב הבמה עד שנראה את דמות הסדק על הקיר. נרכיב את המקטב על עינית המשקפת ונסובב אותו סיבוב שלם אחד.

4.2. תוצאות הניסוי:

לאחר סיבוב המקטב , ניתן לראות את הדמות המוגדלת של הסדק על הקיר.

4.3. עיבוד התוצאות:

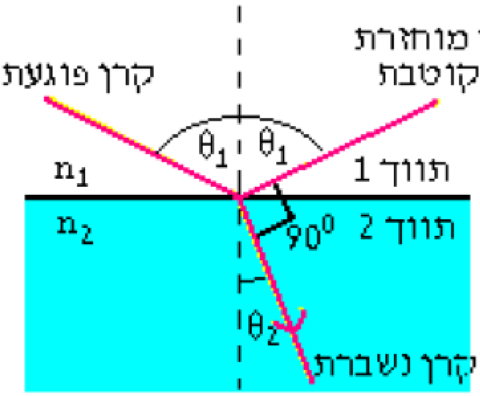
נחשב את הזווית בה נזיז את המשקפת באופן הבא:
נשתמש בחוק ברוסטר, נוסחה (4): ונציב $n=1.5$

$$tan\theta = n = 1.5$$

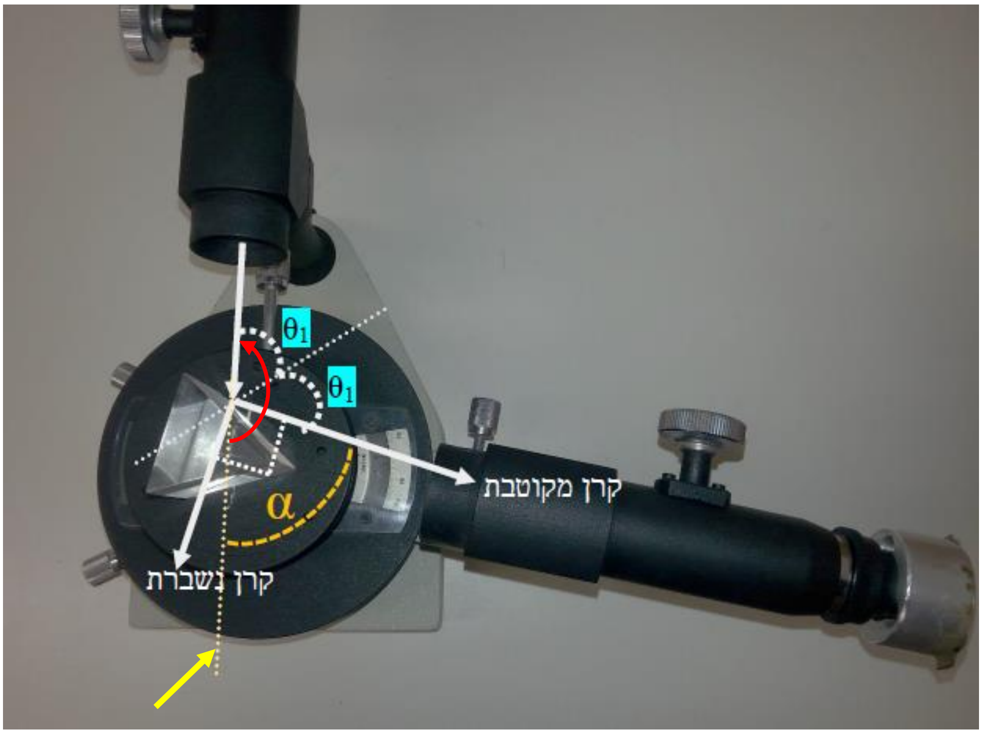
$$\theta = 56.3°$$

$$\alpha = 180 - 2\theta = 67.4°$$

כפי שמוסבר בתדריך המעבדה וברקע התאורטי, זוית ברוסטר הינה הזווית θ_2 כך שהקרן המוחזרת מאונכת לקרן הנשברת. ניתן לראות זאת באיור הבא:



באיור הבא של המערכת, ניתן לראות בחץ הצהוב את מיקום הקרן המקוטבת במצב ההתחלתי, בו לא הזזנו את המשקפת. נרצה להזיז את המשקפת כך שתיווצר זווית של $90°$ בין הקרן המקוטבת לבין הקרן הנשברת על מנת שהן יהיו מאונכות. נסמן את הזווית בה יש להזיז את המשקפת בα. בשל כך, משיקולי גאומטריה ניתן לראות כי יש להזיז את המשקפת בזווית $\alpha = 180 - 2\theta$(מפני שהזווית המסומנת בחץ אדום בתמונה הנמצאת למטה הינה זווית שטוחה כלומר שווה ל- $180°$), כך שθ זוהי זווית ברוסטר המחושבת על פי נוסחה (4).

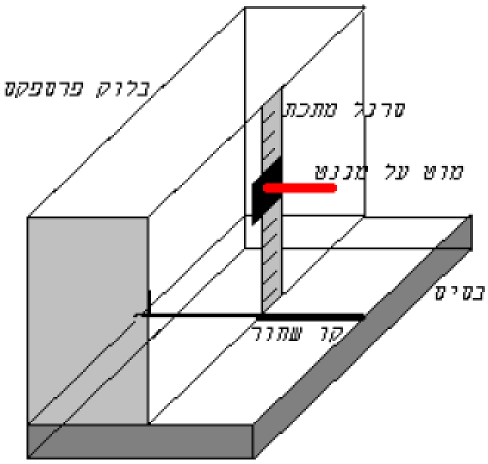


כיצד ניתן להשתמש בחוק ברוסטר למדידת מקדם השבירה של חומר שקוף לא ידוע?
ניתן להשתמש בחוק ברוסטר למדידת מקדם השבירה של חומר שקוף לא ידוע על ידי ניסוי המתרחש באופן הבא: נכייל את המערכת ונמקם את החומר השקוף על הבמה כך שקרן האור פוגעת בדופן שלו. נסובב את המשקפת עד להגעה לנקודה בה קרן האור מקוטבת, נבדוק זאת על ידי שימוש במקטב ונוודא כי לאחר סיבובו ניתן לראות את הדמות המוחזרת באופן מלא וברור. הזווית שמוצגת בצג, הינה הזוית בה סובבנו את הקרן המקוטבת, כלומר α. את זווית ברוסטר נחשב על פי הנוסחה: $\theta = \frac{180-\alpha}{2}$, ונשתמש בה ובנוסחא (4) לחישוב מקדם השבירה: $n = tan\theta 1$.

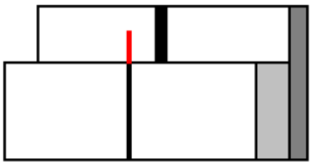
4.4. דיון בתוצאות ומסקנות:
בניסוי זה למדנו כיצד ניתן להשתמש בחוק ברוסטר ליצירת קרן אור מקוטבת. למדנו לחשב את הזווית ולמצוא באמצעותה את הזווית בה יש לסובב את המשקפת ליצירת הקרן המקוטבת. כמו כן, הסקנו מכך כיצד ניתן להשתמש בחוק ברוסטר למדידת מקדם השבירה של חומר לא ידוע וגם התנסינו בשימוש במקטב.

5. ניסוי: מדידת מקדם שבירה של פרספקס

5.1. מהלך הניסוי:



פרספקס הינו חומר שקוף בעל מקדם שבירה שונה מאשר באוויר. באיור המוצג מעלה ניתן לראות סימון של קו שחור על התחתית. כאשר נסתכל על הבלוק מלמעלה, נראה את מיקום הקו השחור משתנה ונראה גבוהה יותר בגלל מקדמי השבירה השונים. על גבי המגנט, נצמיד מוט אנכי המסומן באדום בתרשים. נרים אותו ונמקם אותו כך שימשיך את הקו השחור המדומה אותו אנו רואים מלמעלה באופן הבא:



לאחר שהמגנט האדום מתלכד וממשיך את הקו המדומה, נמדוד באמצעות סרגל המודבק לדופן הפרספקט את הגובה של הקו האמיתי ואת גובה המחט שהדבקנו המייצג את הגובה המדומה.

5.2. תוצאות הניסוי:

העומק\גובה האמיתי $h = 10 \pm 0.1cm$

העומק\גובה המדומה $h' = 6.4 \pm 0.1cm$

5.3. עיבוד התוצאות:

באמצעות נוחסה (3) נחשב את מקדם השבירה והשגיאה:

$$n = \frac{h}{h'} = \frac{10}{6.4} = 1.5625$$

את השגיאה נחשב על פי נוסחה (8):

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial h}\Delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial h'}\Delta h'\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{h'}\Delta h\right)^2 + \left(\frac{-h}{h'^2}\Delta h'\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{6.4}\cdot 0.1\right)^2 + \left(\frac{-10}{6.4^2}\cdot 0.1\right)^2} = 0.029$$

לכן מקדם השבירה שקיבלנו של פרספקס הינו $\boldsymbol{n = 1.56 \pm 0.03}$.

5.4. דיון בתוצאות ומסקנות:

נציג את התוצאות הסופיות: $n = 1.56 \pm 0.03$

נשים לב כי מקדם השבירה של פרספקס הינו $n \approx 1.4914$ [2]. כיוון שערך זה איננו נמצא בטווח השגיאה שקיבלנו, נחשב את אחוז הסטייה היחסית בין הערך שקיבלנו בניסוי זה לבין הערך הספרותי על פי נוסחה (9):

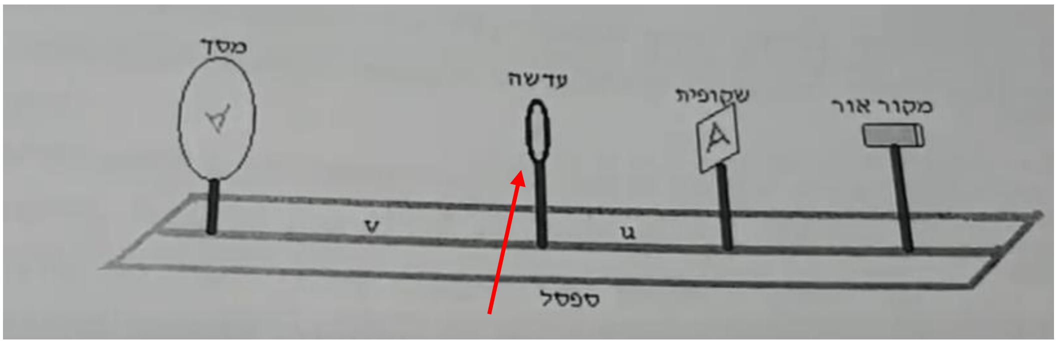
$$\frac{|\bar{x} - x|}{\bar{x}}\cdot 100\% = \frac{|1.4914 - 1.56|}{1.4914}\cdot 100\% = 4.599\%$$

ניתן לראות כי קיבלנו אחוז סטייה השווה ל **5%**, ומכך ניתן להסיק שתוצאות הניסוי אינן מדויקות לחלוטין. ניתן להסיק שאי דיוק זה נובע משגיאה סטטיסטית שכן דיוק הנחת המחט חשוב ומשמעותי להשגת ערך סטייה נמוך, ודיוק זה יכול להיפגע מהסתכלות על מערכת ניסוי ממיקום או זווית שגויה. על מנת להשיג תוצאות מדויקות יותר ניתן לחזור על ניסוי זה מספר פעמים ולוודא כי הזווית והמיקום בהם מסתכלים ומניחים את המחט הינה נכונה והמחט ממשיך את הקו הדמיוני הנוצר משבירת הקרניים, וכך לדייק את המדידות שמבוצעות בניסוי.

6. ניסוי: מדידת מרחק מוקד של עדשות

6.1. מהלך הניסוי:

נתבונן במערכת הניסוי:



בניסוי זה נרצה לחשב מרחק מוקדים של 2 עדשות מרכזות ועדשה מפזרת.
נניח כל פעם בנפרד, עדשה מרכזת במיקום המתאים (חץ אדום), ונזיז את המסך והעדשה עד שנראה במסך בצורה ברורה ומפוקסת את הדמות המוצגת בשקופית. נרשום את המרחקים שנמדדו. לאחר מכן, נחזור על הפעולה עם שתי עדשות מרכזות מוצמדות.
כמו כן, כיוון שאם נניח עדשה מפזרת לא נוכל לראות דמות במסך, נניח איתה עדשה מרכזת ונמדוד את המרחקים, באמצעותם נוכל לחשב את מרחק המוקד של העדשה המפזרת.

6.2. תוצאות הניסוי:

עדשה מרכזת מס׳1	עדשה מרכזת מס׳2	שתי עדשות מרכזות צמודות	עדשה מרכזת מס׳ 2 ועדשה מפזרת צמודות
$v1 = 52.6 \pm 0.1\ cm$	$v2 = 29.8 \pm 0.1\ cm$	$v3 = 11.1 \pm 0.1\ cm$	$v4 = 63.6 \pm 0.1\ cm$
$u1 = 33.1 \pm 0.1\ cm$	$u2 = 14.4 \pm 0.1\ cm$	$u3 = 16.5 \pm 0.1\ cm$	$u4 = 23.4 \pm 0.1\ cm$

6.3. עיבוד התוצאות:

על מנת לחשב את מרחקי המוקד של העדשות נשתמש בנוסחה (6):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad , f = \frac{u \cdot v}{u + v}$$

ואת שגיאות המדידה נחשב לפי נוסחה (8):

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial u}\Delta u\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v}\Delta v\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{v^2}{(u+v)^2}\cdot \Delta u\right)^2 + \left(\frac{u^2}{(u+v)^2}\cdot \Delta v\right)^2}$$

עדשה מרכזת מס׳1
$f1 = \frac{52.6 \cdot 33.1}{52.6 + 33.1} = 20.316$
$\Delta f1 = \sqrt{\left(\frac{52.6^2}{(33.1+52.6)^2}\cdot 0.1\right)^2 + \left(\frac{33.1^2}{(33.1+52.6)^2}\cdot 0.1\right)^2} = 0.0405$
מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס׳ 1 הוא $\boldsymbol{f1 = 20.32 \pm 0.04}$

עדשה מרכזת מס' 2
$f2=\frac{29.8\cdot 14.4}{29.8+14.4}=9.7086$
$\Delta f2=\sqrt{\left(\frac{29.8^2}{(14.4+29.8)^2}\cdot 0.1\right)^2+\left(\frac{14.4^2}{(14.4+29.8)^2}\cdot 0.1\right)^2}=0.0467$
מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס' *2* הוא $\boldsymbol{f2=9.71\pm 0.05}$

שתי עדשות מרכזות צמודות
$f=\frac{11.1\cdot 16.5}{11.1+16.5}=6.63587$
$\Delta f=\sqrt{\left(\frac{11.1^2}{(16.5+11.1)^2}\cdot 0.1\right)^2+\left(\frac{16.5^2}{(16.5+11.1)^2}\cdot 0.1\right)^2}=0.03923$
מרחק המוקד של שתי העדשות הצמודות הוא $\boldsymbol{f=6.64\pm 0.04}$

נבדוק האם ערך זה תואם את נוסחה (7):

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f1}+\frac{1}{f2}=\frac{1}{20.32}+\frac{1}{9.71}=0.1522$$

$$f=6.57$$

נחשב את הסטייה היחסית לפי נוסחה (9):

$$\frac{|\bar{x}-x|}{\bar{x}}\cdot 100\%=\frac{|6.57-6.64|}{6.57}\cdot 100\%=1.07\%$$

עדשה מרכזת מס' 2 ועדשה מפזרת צמודות
$f=\frac{63.6\cdot 23.4}{63.6+23.4}=17.1062$
$\Delta f=\sqrt{\left(\frac{63.6^2}{(63.6+23.4)^2}\cdot 0.1\right)^2+\left(\frac{23.4^2}{(63.6+23.4)^2}\cdot 0.1\right)^2}=0.05393$
מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס' 1 הוא $\boldsymbol{f=17.11\pm 0.05}$

על פי נוסחה (7) נחשב את מרחק המוקד של העדשה המפזרת:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f2}+\frac{1}{f3}\quad,\qquad \frac{1}{17.11}=\frac{1}{9.71}+\frac{1}{f3}\quad,\quad f3=-22.45$$

נחשב שגיאה עבור מרחק המוקד של העדשה המפזרת,נשתמש בנוסחאות (7(ו(8):

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f2}+\frac{1}{f3}\quad,\quad f3=\frac{f2\cdot f}{f2-f}$$

$$\Delta f3 = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial f2}\Delta f2\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial f}\Delta f\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-f^2}{(f2-f)^2}\cdot \Delta f2\right)^2 + \left(\frac{f2^2}{(f2-f)^2}\cdot \Delta f\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-17.11^2}{(9.71-17.11)^2}\cdot 0.05\right)^2 + \left(\frac{9.71^2}{(9.71-17.11)^2}\cdot 0.05\right)^2}$$

$$= \sqrt{0.071452 + 7.4123\cdot 10^{-3}} = 0.2808$$

לכן מרחק המוקד של העדשה המפזרת הוא $\boldsymbol{f3 = -22.5 \pm 0.3}$

6.4. דיון בתוצאות ומסקנות:

נציג את התוצאות הסופיות:

מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס׳1: $f1 = 20.32 \pm 0.04$

מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס׳2: $f2 = 9.71 \pm 0.05$

מרחק המוקד של העדשה המפזרת: $f3 = -22.5 \pm 0.3$

מרחק המוקד של שתי עדשות מרכזות צמודות: $f = 6.64 \pm 0.04$

מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס׳ 2 ועדשה מפזרת צמודות: $f = 17.11 \pm 0.05$

על פי החישובים שביצענו, תוצאות הניסוי בהן מדדנו מרחק מוקד של שתי עדשות מרכזות צמודות הן בסטייה של 1.07% מהערך המתקבל מחישוב ערך זה על פי נוסחה (7). ניתן לראות כי אחוז זה המייצג את אחוז הסטייה היחסית נמוך וקטן מ5%, ולכן ניתן להסיק כי הערך שחושב על ידי המדידה של שתי העדשות הצמודות מדויק. בשל כך, ניתן להסיק כי הצמדת העדשות לא פוגעת במהימנות התוצאות ולכן ניתן באמצעות שיטה זו לחשב את מרחק המוקד של העדשה המפזרת בצורה מדויקת. בנוסף לכן, ניתן לראות כי מרחק המוקד של העדשה המפזרת כפי שהתקבל בניסוי הוא שלילי, וערך זה תואם את הרקע התאורטי.
יתרה מזו, בניסוי זה ראינו בצורה מובהקת את ההבדל בראייה דרך עדשה מרכזת ומפזרת, ואת הדרכים למדידת מרחקי המוקד של עדשות שונות והשימושים בכך.

7. סיכום ומסקנות כלליות:

נציג את תוצאות הניסויים בטבלה הבאה:

ניסוי	תוצאות	השוואה עם הערך התאורטי
3- מדידת זווית ההסחה המינימלית	$n = 1.494 \pm 0.002$	זכוכית, סטייה של 0.4%
4- זווית ברוסטר ויצירת קרן אור מקוטבת ע"י החזרה	זווית ברוסטר עבור זכוכית: $\theta = 56.3$	
5- מדידת מקדם שבירה של פרספקס	$n = 1.56 \pm 0.03$	פרספקס, סטייה של 5%
6- מדידת מרחק מוקד של עדשות	מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס' 1: $f1 = 20.32 \pm 0.04$ מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס' 2: $f2 = 9.71 \pm 0.05$ מרחק המוקד של העדשה המפזרת: $f3 = -22.5 \pm 0.3$ מרחק המוקד של שתי עדשות מרכזות צמודות: $f = 6.64 \pm 0.04$ מרחק המוקד של עדשה מרכזת מס' 2 ועדשה מפזרת צמודות: $f = 17.11 \pm 0.05$	סטייה בין חישוב ערך של שתי עדשות מרכזות צמודות לבין מדידה: 1.07%

בניסוי זה למדתי על נושא חשוב שהוא חלק מחייי היום יום שלנו, הקשור לנושא הראייה ושבירת קרני האור. למדתי להכיר כלים חדשים נוספים הנמצאים במעבדה, כמו מנסרה, עדשות שונות, מקטב וגוף פרספקס. כמו כן, העמקתי בנושאים של מקדם שבירה ומשוואות פיזיקאיות חשובות, והתנסיתי בחישובים שונים באמצעותם ושימוש בהן למציאות גורמים שונים כמו זווית ברוסטר או מקדם שבירה של חומר. יתרה מזאת, היה מאוד מעניין ללמוד על עדשות שונות ואופן התנהגותן השונה ולראות את ההבלים בהסתכלות בהן באמצעות הסרטונים כיוון שכלי זה הוא בעל חשיבות משמעותית בחיי היום יום שלנו וקיימים אנשים רבים המשתמשים בעדשות ומשקפיים ולכן חשוב להבין להתנסות ולהעמיק בנושא.

בהשוואת התוצאות שהתקבלו, ניתן להסיק כי מרבית התוצאות הינן מדויקות ותואמות את הערכים הספרותיים, כיוון שהשגיאות היחסיות בטווח נמוך של $5\% - 0\%$.
בניסוי 6, ראיתי כי ניתן למדוד מרחק מוקד של עדשות מרכזות צמודות באופן מדויק על ידי מדידה נפרדת ושימוש בנוסחאות המתאימות, וקיבלתי סטייה נמוכה מאוד של כ 1.07%. בשל כך, בשימוש בשיטה זו ביצעתי ניסוי דומה עם עדשה מפזרת ומרכזת וכך חישבתי את מרחק המוקד של העדשה המפזרת. כיוון שבחלקו הקודם של הניסוי קיבלנו סטייה נמוכה ניתן להסיק כי ערך זה מדויק. שיטה זו יעילה וחשובה מאוד כיוון שלא ניתן לבצע את הניסוי באופן דומה לחישוב מרחק המוקד של עדשה מרכזת כיוון שלא נראה דמות על גבי המסך בשימוש בעדשה מפזרת.

יתרה מכך, חישבתי את מקדם השבירה של זכוכית ושל פרספקס, בניסויים 3 ו5, בהם השתמשתי בשיטות שונות למדידה וחישוב מקדם השבירה.
עם זאת, בחישוב מקדם השבירה של פרספקס קיבלתי סטייה יחסית גבוהה ושונה מהערך הספרותי, של 5%. מכך ניתן להסיק כי מומלץ לחזור על ניסוי זה מספר פעמים על מנת להגיע לתוצאות מדידה מדויקות יותר ובכך להקטין את אחוז זה.

8. ביבליוגרפיה

[1] אוניברסיטת בן גוריון, "תדריך המעבדה" .

[2] ויקיפדיה, "מקדם השבירה," [מקוון]. Available: https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%9E%D7%A7%D7%93%D7%9D_%D7%A9%D7%91%D7%99%D7%A8%D7%94.

9. נספחים

שאלות הכנה- מעבדה 2, אופטיקה גיאומטרית

1. **במדידת זווית ברוסטר התקבלה התוצאה $\theta = 60° \pm 1°$ חשב את מקדם השבירה והשגיאה**

על ידי נוסחה (10) נחשב את גודל הזווית הראש ברדיאנים :

$$\frac{\alpha_{rad}}{2\pi} = \frac{\alpha°}{360°}$$

$$\theta = 60° \pm 1° = 1.0472 \pm 0.01745\, rad$$

$$\theta = 1.05 \pm 0.02\, rad$$

על פי נוסחה (4) נחשב את מקדם השבירה :

$$n = tan\theta1 = \tan 1.05 = 1.7433$$

נחשב את השגיאה במקדם השבירה לפי נוסחה (8) :

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\Delta\theta\right)^2} = (1 + tan^2\theta)\Delta\theta = (1 + tan^2 1.05)\cdot 0.02 = 0.0808$$

לכן מקדם השבירה הוא $\boldsymbol{n = 1.74 \pm 0.08}$

2. **הצע דרך למדידת מרחק מוקד של עדשה מפזרת**

נקח עדשה מרכזת בעלת מרחק מוקד ידוע, נניח את העדשה המרכזת והמפזרת יחד צמודות. מצד ימין נניח מקור אור וחפץ ממשי, ונציב מסך מצדן השמאלי של העדשות. לאחר מכן, נזיז את המערכת עד שנוכל לראות בבירור את הדמות המדומה על גבי המסך, נמדוד את המרחקים.
על ידי המרחקים שמדדנו ונוסחה (6) נחשב את מרחק המוקד של שתי העדשות יחד.
לאחר מכן באמצעות נוסחה (7) נחשב את מרחק המוקד של העדשה המפזרת.

3. **הסבר כיצד תשתמש בעדשה מרכזת כזכוכית מגדלת**

על מנת להשתמש בעדשה מרכזת כזכוכית מגדלה, נניח את הגוף במרחק u הקטן ממרחק המוקד.
במצב זה, הדמות המדומה שנראה כתוצאה ממפגש קרני האור, תהיה גדולה יותר מהדמות הממשית ורחוקה יותר. זאת ניתן להסיק על פי נוסחה (6).

4. **סטודנט ביצע מספר מדידות למציאת מרחק עצם ומרחק דמות בעדשה מרכזת. בכל פעם שינה את מרחק העצם ומצא את מרחק הדמות. לבסוף חישב את מרחק העצם הממוצע ואת מרחק הדמות הממוצע ובאמצעותם חישב את מרחק המוקד. הסבר מהי טעותו.**

הקשר בין מרחק הדמות ומרחק העצם למרחק המוקד מתואר באמצעות נוסחה (6) :
$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ כיוון שf הוא קבוע, ניתן לראות כי יש קשר בין u ו v.
בשל כך, עבור u מסוים שנמדוד קיים v מסוים המתאים לו ולכן אם נבצע מספר מדידות שונות ממוצע המדידות של u וv אינו תואם לאותו ערך f שהיינו מוצאים אילו היינו מבצעים את החישובים לכל מדידה בנפרד.

5. א. חשב בעזרת נוסחה 5 את מקדם השבירה n עבור $\delta min = 60° \pm 1°$ וזווית ראש $A = 60°$ מהי השגיאה Δn?

על ידי נוסחה (10) נחשב את גודל הזווית הראש ברדיאנים:

$$\frac{\alpha_{rad}}{2\pi} = \frac{\alpha°}{360°}$$

$$\delta_{min} = 60° \pm 1° = 1.05 \pm 0.02 rad$$

$$A = 60° = 1.05\ rad$$

נשתמש בנוסחה (5) על מנת לחשב את מקדם השבירה של המנסרה ואת השגיאה בו:

$$\sin\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right) = n \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)$$

$$\mathrm{n} = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} = \frac{sin\left(\frac{1.05 + 1.05}{2}\right)}{\sin\left(\frac{1.05}{2}\right)} = 1.7306$$

נחשב את השגיאה באמצעות נוסחה (8):

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \delta_{min}} \Delta\delta_{min}\right)^2} = \frac{\cos\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)} \cdot \Delta\delta_{min} = \frac{\cos\left(\frac{1.05 + 1.05}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{1.05}{2}\right)} \cdot 0.02$$

$$= 0.00993$$

לכן, מקדם השבירה הוא $\boldsymbol{n = 1.73 \pm 0.01}$.

ב. מהי תהיה השגיאה Δn אם נתון שגם במדידת זווית הראש ישנה שגיאה $A = 60° \pm 1°$?

נחשב את השגיאה במידה ונתון שגם במדידת זווית הראש ישנה שגיאה באמצעות נוסחאות (5) (8) ו(10):

$$\delta_{min} = 60° \pm 1° = 1.05 \pm 0.02 rad$$

$$A = 60° \pm 1° = 1.05 \pm 0.02\ rad$$

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \delta_{min}} \Delta\delta_{min}\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial A} \Delta A\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{\delta_{min} + A}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)} \cdot \Delta\delta_{min}\right)^2 + \left(\frac{-\sin\left(\frac{\delta_{min}}{2}\right)}{2 \cdot sin^2\left(\frac{A}{2}\right)} \cdot \Delta A\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{1.05+1.05}{2}\right)}{2\cdot\sin\left(\frac{1.05}{2}\right)}\cdot 0.02\right)^2 + \left(\frac{-\sin\left(\frac{1.05}{2}\right)}{2\cdot sin^2\left(\frac{1.05}{2}\right)}\cdot 0.02\right)^2} =$$

$$= \sqrt{9.8552\cdot 10^{-5} + 3.98066\cdot 10^{-4}} = 0.0223$$

ניתן לראות כי השגיאה בסעיף א' הינה $\Delta\boldsymbol{n} = \mathbf{0.01}$ ואילו השגיאה בסעיף זה הינה $\Delta\boldsymbol{n} = \mathbf{0.02}$. בשתי השגיאות הדיוק הוא של $\frac{1}{100}$ ולכן לא ניתן לדעת באופן וודאי איזה חישוב הינו מדוייק יותר. עם זאת, כיוון שהחישוב בסעיף ב' כולל ערך מדויק יותר של זויות הראש כיוון שכללנו בו גם את השגיאה, ניתן להסיק כי חישוב זה הינו מדויק יותר. כמו כן, אם היינו מחשבים ערכים בעלי פערים משמעותיים יותר (במקרה זה זווית הראש וזווית ההסחה המינימאלית זהות), ניתן לשער כי הפער היה מובהק יותר.

6. א. נתון: *f1=150mm*   *u=6cm=60mm* כאשר *f1* עדשה דקה.
מהו המרחק *v* של הדמות מהמרכז האופטי?
נשתמש בנוסחה (6):

$$\frac{1}{f1} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$
$$\frac{1}{150} = \frac{1}{60} + \frac{1}{v}$$
$$\frac{1}{v} = \frac{-1}{100} \qquad v = -100\ mm = -10\ cm$$

המרחק v של הדמות מהמרכז האופטי הוא $\boldsymbol{-10\ cm}$.

כעת מצמידים עוד עדשה דקה *f2=50mm* לעדשה *f1*. מהו המרחק *v* של הדמות מהמרכז האופטי?
נחשב באמצעות נוסחה (7) את מוקד העדשות הצמודות:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f1} + \frac{1}{f2} = \frac{1}{150} + \frac{1}{50} \qquad f = 37.5\ mm$$

נשתמש בנוסחה (6):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$
$$\frac{1}{37.5} = \frac{1}{60} + \frac{1}{v}$$
$$\frac{1}{v} = \frac{1}{100} \qquad v = 100\ mm = 10\ cm$$

המרחק v של הדמות מהמרכז האופטי הוא $\boldsymbol{10\ cm}$.

ב. מה היה קורה אילו *f2=-50mm* ?
נחשב באמצעות נוסחה (7) את מוקד העדשות הצמודות :

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f1}+\frac{1}{f2}=\frac{1}{150}+\frac{1}{-50} \qquad f=-75\ mm$$

נשתמש בנוסחה (6) :

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}$$
$$\frac{1}{-75}=\frac{1}{60}+\frac{1}{v}$$
$$\frac{1}{v}=\frac{-3}{100} \qquad v=-33.3\ mm$$

אם *f2=-50 mm* נקבל שהמרחק *v* של הדמות מהמרכז האופטי הוא $\mathbf{-33.3\ mm}$.
כלומר כעת כיוון ש*v* שלילי, על פי הרקע התאורטי נקבל כי הדמות הינה דמות מדומה לעומת התוצאה הקודמת בה הדמות ממשית (*v* חיובי).

7. א. קרן אור הנעה באוויר פוגעת בשמן, *n=1.6* , אם נתונה זווית הפגיעה $\boldsymbol{\theta=30°}$ מה תהיה זווית השבירה?
על מנת לחשב את זוית השבירה נשתמש בחוק סנל, נוסחה (2) :
כמו כן, מקדם השבירה באוויר הינו 1.0003 . [2]

$$n1\cdot sin\theta1=n2\cdot sin\theta2$$
$$1.0003\cdot \sin{(30)}=1.6\cdot sin\theta2$$
$$\theta2=18.2°$$

זווית השבירה שהתקבלה היא $\boldsymbol{\theta2=18°}$.

ב. אם מודדים זווית פגיעה של $\mathbf{45°}$ עבור קרן שנעה בשמן ועוברת לאוויר, מה צריכה להיות זווית השבירה? מה יקרה להן?
נשתמש בנוסחה (2) :

$$n1\cdot sin\theta1=n2\cdot sin\theta2$$
$$1.6\cdot \sin{(45)}=1.003\cdot sin\theta2$$
$$sin\theta2=1.13$$

במצב זה נקבל כי שסינוס הזווית גדול מ1, מצב שאינו מתאפשר. כלומר, הקרן תוחזר במלואה, בזווית $45°$, ולא תעבור דרך השמן.

8. הסבר מהו המקטב ומהו אופן פעולתו.
מקטב הוא מכשיר שעיקר פעולתו היא להבדיל בין אור מקוטב ללא מקוטב כיוון שהעין שלנו לא יכולה לעשות את ההפרדה. קרן אור מורכבת מגלים אלקטרומגנטים הנעים בצורה שונה זה מזה, ולכל אחת מהם שדה חשמלי שמאונך לגל. קרן מקוטבת היא קרן שבה השדה החשמלי של כל הגלים היוצרים את הקרן הוא באותו כיוון.
אופן פעולת המקטב : ההפרדה נעשית באמצעות חסימה של כל הגלים בהם השדה החשמלי לא באותו כיוון וכך הוא מחזיר רק את האור המקוטב.