

תדריך למעבדות בפיסיקה 3 להנדסה

פרופ' ג'ורג' ברגר, ד"ר זאב רובין
מר גבי גרינפלד, מר רולנדו גיטמן, מר יהודה הלוי

כרמיאל

2011-2012

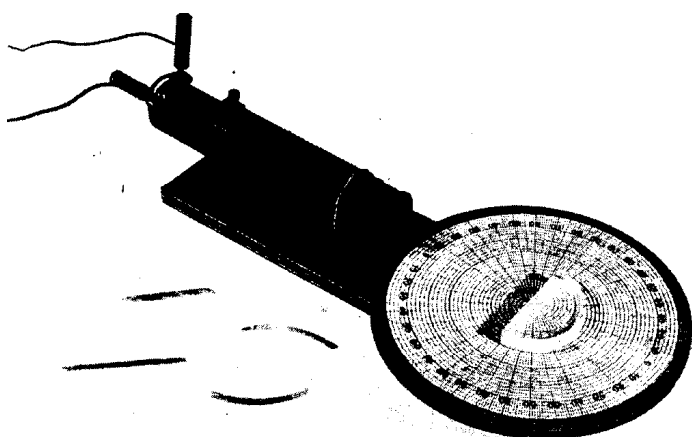
תוכן העניינים

4.....	אופטיקה גאומטרית.
8.....	גלים עומדים במיתר.
10.....	גלי מיקרו.
13.....	התאבכות ועקיפה באור.
18.....	קרינת גוף שחור.
22.....	האפקט הפוטואלקטרי.
25.....	נסוי פרנק הרץ.
29.....	ספקטרוסקופיה.

הוראות בטיחות

1. נוכחות סטודנטים במעבדה מותרת רק כאשר נמצא מדריך או לבורנט במרחב.
בהפסקות יינעלו המעבדות.
2. אסור לאכול או לשתות במעבדה.
3. כל הפעלת הציוד במעבדות תתבצע רק לאחר הסבר מתאים על ידי המדריך או הלבורנט, באישורם ובהשגחתם.
4. בכל מעבדה קיים מפסק חירום, הנמצא באחד הקירות ומסומן על ידי שלט, המנתק את כל מערכת החשמל במרחב. מותר ללחוץ על המפסק האדום במקרה חירום בלבד.
5. מטפי כיבוי, הנמצאים בתוך ארונות זרנוקי המים, מיועדים לשימוש אך ורק במקרה של שריפה.
6. במקרה חירום (שריפה, רעידת אדמה וכו') יש להשתמש רק במדרגות חירום ולא במעלית.
7. במעבדה יש לנעול נעליים סגורות.
8. הכניסה לחדר הלבורנטים ולחדר מרצים מותרת באישורם

אופטיקה גאומטרית



1. חוק סנל

מרכיבים על ספסל אופטי פנס (הגליל השחור בחלק השמאלי-עליון של הציור), סדק ושולחן מסתובב. מטרת הסדק היא ליצור "קרן". מחברים את הפנס למקור מתח של 6V ומכוונים כך שהקרן מתקדמת לאורך הספסל ולא נפתחת. על השולחן עיגול נייר פולרי (מצויירים בו קווים רדיאליים שמאפשרים למדוד זוויות שקודקודיהן בציר). מכוונים כך שהקרן מגיעה לציר.

1.1 מעבר מתווך "דליל" לתווך "צפוף"

ברשותך מספר גופים שטוחים מפרספקס (חומר פלסטי שקוף). הנח על השולחן המסתובב את הגוף בעל צורת חצי דיסקה. הקפד שמרכז הדיסקה יתלכד עם מרכז הנייר הפולרי (שבו ציר השולחן) ושהשפה הישרה תתלכד עם הקו $90^\circ-90^\circ$. הקרן תכנס לחצי דיסקה דרך השפה הישרה (דרך מרכז הדיסקה) ותצא דרך השפה המעגלית. אם הכיוון נכון, הקרן צריכה "להשאיר עקבות" לאורך קווים רדיאליים על הנייר.

א. שנה את זווית הפגיעה מ- 0° עד 80° , בצעדים של 20° . רשום את זווית הפגיעה α_i ואת זווית השבירה α_r . בדוק אם מתקיים חוק ההחזרה. האם הקרן נשברת כאשר היא יוצאת מהחצי דיסקה? האם תוצאה זאת מתאימה לחוק סנל?

ב. סרטט את $\sin \alpha_r$ כנגד $\sin \alpha_i$. בדוק אם חוק סנל מתקיים ואם כן קבע את מקדם השבירה של הפרספקס.

1.2 מעבר מתווך "צפוף" לתווך "דליל"

א. חזור על הניסוי 1.1 (א'+ב'), אך הפעם סובב את השולחן כך שהקרן תכנס דרך השפה המעגלית ותצא דרך מרכז הדיסקה. (סובב רק את השולחן, אל תזיז את החצי דיסקה ממקומה).

ב. השווה איכותית בין עוצמת הקרן הנשברת שיוצאת מהפרספקס והקרן המוחזרת אל תוך הפרספקס. בדוק איך היחס בין שתי עוצמות אלה תלוי בזווית הפגיעה. האם התנהגות זו מתאימה לידוע לך לגבי החזרה גמורה?

2. בליעת אור

הרכב על הספסל פנס, מסנן (זכוכית אדומה), עדשה מכנסת וגלאי. הפנס פולט קרינה אלקטרומגנטית בתחום רחב (אינפרא-אדום ונראה) ומטרת המסנן היא לצמצם תחום זה. מטרת העדשה היא להגדיל את כמות הקרינה שמגיעה לפתח הגלאי. עוצמת הקרינה שמגיעה לגלאי נמדדת באמצעות מד-מתח. חכה כ-2 דקות להתייצבות הטמפרטורה של הפנס והמסנן.

א. הסתר את הפנס מהגלאי באמצעות פיסת מתכת. מקם את הפיסה קרוב לפנס; לא קרוב לגלאי. קריאת הגלאי לא תהיה בהכרח 0, כי יתכן שמגיעה אליו קרינה ממקורות נוספים. קרינה זאת נקראת קרינת רקע ונסמן את עוצמתה ב- I_{bg} . רשום את I_{bg} .

ב. הסר את פיסת המתכת ורשום את העוצמה I_0 המגיעה לגלאי במצב זה.
ג. שים פיסת שקף בין המסנן לעדשה. העוצמה המגיעה לגלאי תרד משתי סיבות: חלק מהקרינה נבלע בשקף וחלק מוחזר. רשום את העוצמה I_1 המגיעה לגלאי במצב זה. הקפד בכל המדידות לא לעמוד או להניח ידיים קרוב לגלאי; ידיך מחזירות אור ופולטות קרינה אינפרה-אדומה.

ד. באותה הדרך, שים n פיסות שקף בין הפנס לגלאי ורשום את העוצמה I_n שמגיעה לגלאי. הקפד להחזיק את הפיסות צמודות, כדי שלא יהיו החזרות נוספות ביניהן. העלה את מספר הפיסות עד ש- I_n יהיה שווה בקרוב למחצית העוצמה ההתחלתית.

ה. ע"מ לחקור את יציבות המערכת, מדוד עכשיו את I_n בסדר הפוך, כאשר כל פעם תסיר פיסה. לבסוף, מדוד שוב את I_{bg} .

ו. מדוד את העובי של פיסת שקף. מומלץ לקחת 5 פיסות ביחד ולמדוד את עוביין בקליבר.

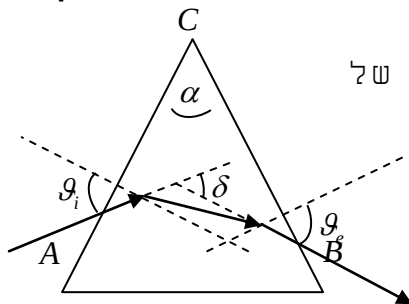
ז. סרטט את $\ln(I_n - I_{bg})$ כפונקציה של המרחק שהקרינה עברה בתוך השקפים. האם הגרף מתאים לתאוריה? אם כן, חשב את מקדם הבליעה.

3. כניסה ויציאה דרך פאות מקבילות

חזור למצב של פנס עם סדק יחיד, הנח על השולחן המסתובב נייר לבן ועליו גוף בעל צורת טרפז. מקם את הטרפז כך שהקרן נכנסת דרך בסיס אחד, בזווית של כ- 45° , ויוצאת דרך הבסיס השני. סמן על הנייר את מסלולי הקרן המקורית והקרן היוצאת. הסר את הנייר וצייר את ההמשך לקרן המקורית. השווה בין המשך זה לבין מסלול הקרן היוצאת. האם התוצאה מתאימה לתאוריה?

4. מנסרה משולשת

בניסוי הבא נשתמש במנסרה משולשת שחתכה הינו משולש שווה שוקיים וזווית הראש α . באיור g היא זווית הכניסה ו- g_e היא זווית היציאה מן המנסרה.



δ היא זווית ההסחה. מקדם השבירה של החומר (פרספקס)

ממנו עשויה המנסרה הוא n . את זווית הסטייה ניתן לבטא באמצעות זווית הכניסה, זווית היציאה וזווית המנסרה:

$$\delta = g_i + g_e - \alpha$$

עבור סטייה מינימאלית מהלך קרני האור הינו סימטרי, כלומר $g_i = g_e$ כך שהקרן

הנשברת (הנמצאת בתוך המנסרה) תהיה מקבילה לבסיס AB. שימוש בחוק סנל עבור נקודת הכניסה וקשרים טריגונומטריים בין הזוויות יובילו לנוסחא אשר על פיה ניתן יהיה לחשב את מקדם השבירה:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_m + \alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (*)$$

δ_m היא זווית הסטייה המינימאלית

מטרת הניסוי היא למדוד את מקדם השבירה של החומר ממנו עשויה המנסרה.

מהלך הניסוי:

א. מדידת זווית המנסרה α .

יש למדוד את אורך הפאות AB ו-AC באמצעות קליבר דיגיטאלי, אחר כך להציב את הערכים בנוסחא:

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{AB}{2AC}\right)$$

ב. מדידת δ_m יש למדוד את זווית הכניסה ϑ_i ולחשב את δ_m לפי:

$$\delta_m = 2\vartheta_i - \alpha$$

במדידות נשתמש בדיסק עם שנתות המיעדות למדידת זווית כמו-כן בקרן לייזר כמקור אור

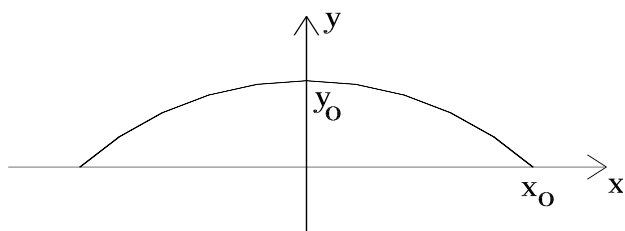
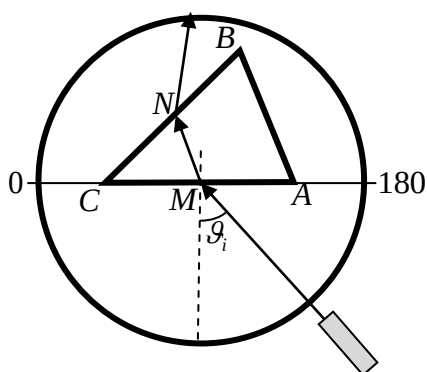
יש להקפיד על כך שנקודת הכניסה M תתלכד עם מרכז העיגול (דיסק) והפאה AC שתייה מונחת על קו 0-180 (ראה תרשים)

יש לסובב את הדיסק עד אשר הקרן הנשברת MN

תהיה מקבילה לבסיס המנסרה AB. במצב זה ניתן

למדוד את זווית הכניסה ובאמצעותה לחשב

את מקדם השבירה על פי הנוסחא (*).



5. עדשות

א. מדידת רדיוס העקמומיות:

קשת מעגלית בעלת רדיוס R ומרכז ב-
(x=0, y=-A) מתוארת ע"י

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} - A$$

הצבת x=0 נותנת y_0=R-A והצבת y=0

נותנת 0 = \sqrt{R^2 - x_0^2} - A. פותרים עכשיו את מערכת שתי המשוואות ומקבלים

$$R = \frac{x_0^2 + y_0^2}{2y_0}$$

הנח את העדשות על נייר מילימטרי בצורה נוחה, מדוד את x_0 ואת y_0 וחשב את רדיוס העקמומיות.

ב. מתוך ידיעת רדיוס העקמומיות ואת מקדם השבירה של הפרספקס, חשב את רוחקי המוקד של העדשה המכנסת ושל העדשה המבדרת.

ג. החלף את הסדק היחיד בתריס עם מספר סדקים. כך תקבל מספר "קרניים". דאג לכוון כך שקרניים אלה יהיו מקבילות.

ד. שים נייר על השולחן ועליו עדשה מכנסת, כך שהקרניים עוברות דרכה. האם קיים מוקד ממש? (כלומר, נקודה שבה כל הקרניים שיוצאות

מהעדשה (מתלכדות). אם כן, מדוד את רוחק המוקד (מרחק בין המוקד ומרכז העדשה) והשווה לתוצאה התאורטית של הסעיף ב'.
ה. הנח את העדשה המבדרת על הנייר הפולרי וכוון את מיקומה כך שהקרניים היוצאות הינן רדיאליות (כלומר, ההמשך שלהן עובר דרך ציר השולחן). מדוד את רוחק המוקד והשווה לתוצאה התאורטית של הסעיף ב'.

1. הצמד שתי עדשות מכנסות, כך שהקרניים עוברות דרך שתייהן. האם עוצמת הצמד שווה לסכום העוצמות של כל עדשה בנפרד?
2. חזור על הסעיף הקודם עבור צמד שבו עדשה מכנסת ועדשה מבדרת.

6. דמות ממשית עבור עדשה תלת-ממדית

א. כוון את הפנס כך שיוצאות ממנו "קרניים מקבילות". במצב זה הדמות של חוט הלהט אמורה להוצר באי-סוף. אנחנו נסתפק בכך שתוצר דמות ממוקדת של חוט הלהט על קיר רחוק.

ב. בהמשך לפנס הרכב על הספסל עדשה בעלת שפות כדוריות ומסך. הזז את המסך עד שתוצר בו דמות ממוקדת של חוט הלהט. (אילו חוט הלהט היה נקודתי, הקרניים היוצאות מהפנס היו מקבילות והיו מתלכדות לנקודה אחת.) מדוד את רוחק המוקד f .

ג. שים עצם בין הפנס לעדשה. עצם מואר זה יישמש מקור. הרכב את המקור ואת המסך בקצוות הספסל ואת העדשה במרחק f מהמקור. רצוי אורך ספסל בין $8f$ ל- $15f$.

ד. הרחק בעדינות את העדשה מהמקור, עד שתתקבל על המסך דמות ממוקדת. רשום את המרחק u בין העדשה למקור ואת המרחק v בין העדשה לדמות.

ה. הרחק כל פעם את העדשה מהמקור במרחק של בערך f , הזז את המסך עד לקבלת דמות ממוקדת ורשום את u ואת v . המשך בתהליך זה עד שלא תוכל לקבל דמות ממוקדת.

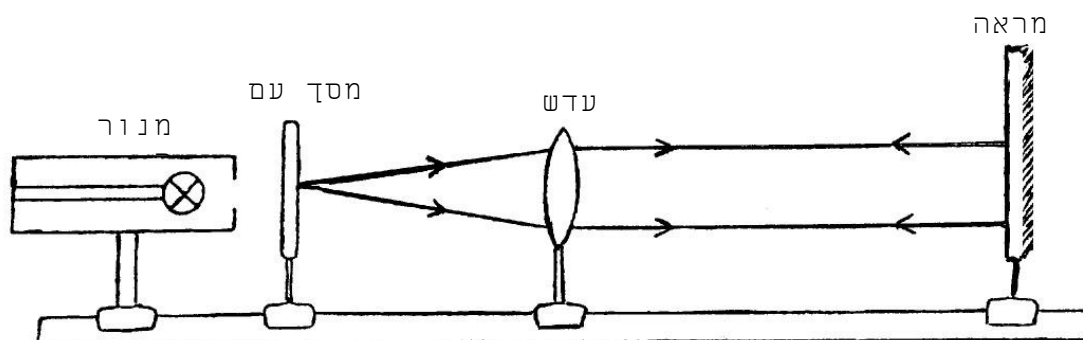
1. סרטט את $\frac{1}{v}$ כנגד $\frac{1}{u}$. האם הגרף מתאים לתאוריה?

7. צירוף מראות ועדשות דקות

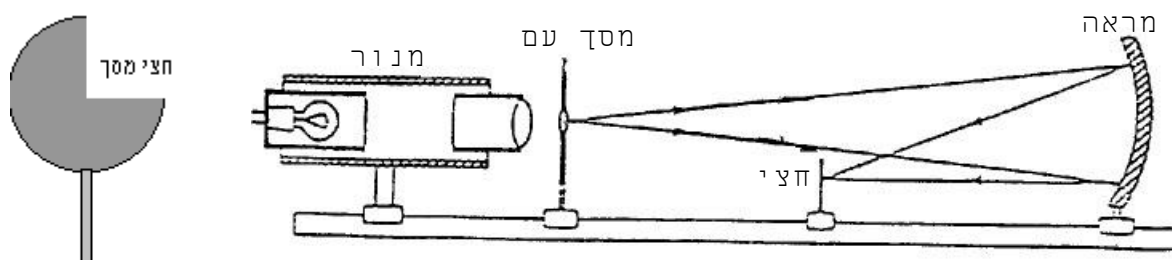
מטרת הניסויים: מדידת רוחק מוקד של העדשות דקות ומראות כדוריות; מדידת רדיוסי העקמומיות של מראות כדוריות לפי שיטות שונות.

הציוד הנדרש: ספסל אופטי עם פנס, מראות ועדשות כדוריות, מראה מישורית, מסך אטום שעליו גזור פתח, חצי מסך.

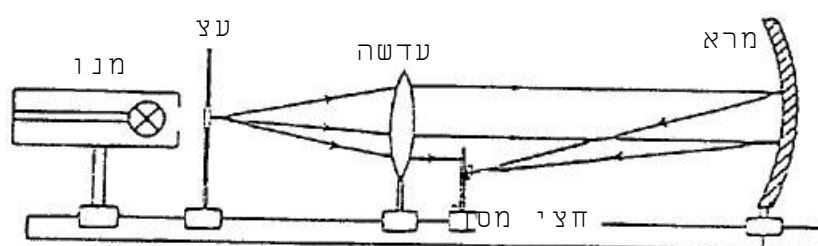
7.1 הרכב את המערכת עם עדשה ומראה מישורית. הפתח הגזור במסך ישמש כעצם והחלק האטום ישמש כמסך. אם העצם נמצא במישור המוקד של העדשה, צריכה להתקבל אלומת קרניים מקבילות. הזז את העדשה או המסך עד שתתקבל דמות ממוקדת. הזז עכשיו את המראה. האם הדמות נשארת ממוקדת? הסבר את התוצאות.



7.2 הרכב את המערכת עם מראה כדורית וחצי מסך. קבל דמות חדה על חצי המסך. מדוד את המרחק u בין העצם לבין מראה ואת המרחק v בין הדמות למראה. קבע את רוחק המוקד f של מראה ורדיוס העקמומיות R מתוך הקשרים $2/R = 1/f = 1/u + 1/v$. האם לתוצאה שהתקבלה עבור R יש סדר גודל סביר? הזז את המראה ואת החצי מסך, כך שהדמות תהיה שוב ממוקדת ומדוד את המרחקים u ו- v החדשים. האם R השתנה?



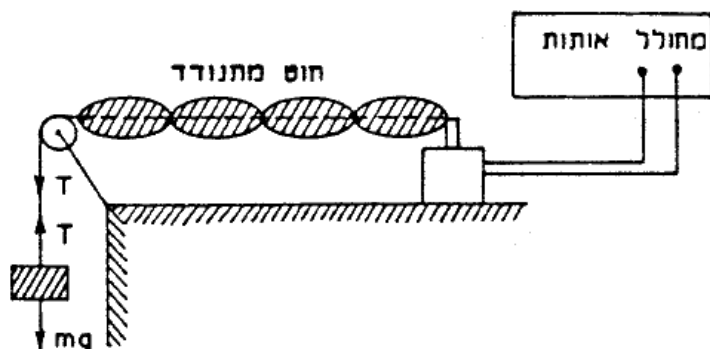
7.3 הרכב את המערכת כמו ב- 7.2, אך הפעם הוסף עדשה, כך שהעצם יימצא במישור המוקד שלה (כמו ב- 7.1). קבל דמות חדה על פני חצי המסך. איזה מרחק צריך להיות בין חצי המסך והמראה? מדוד אותו והשווה עם המדידות האחרות. האם יש חשיבות למרחק בין המראה והעדשה? האם היחס בין גודל העצם וגודל הדמות מתאים לתאוריה?



גלים עומדים במיתר

תאוריה

- עבור גל מחזורי בעל תדירות f ואורך גל λ , מהירות הגל היא $V = \lambda f$.
- בגל עומד, המרחק בין צמתים סמוכים הוא $\lambda/2$.
- במיתר בעל מסה μ ליחידת אורך, המתוח במתיחות F_0 ,



מהירות הגל היא $V = \sqrt{F_0 / \mu}$.

ביצוע

פרוס חוט באורך של כ- 1.5 מ'. בקצה אחד חבר את החוט לנדנד; בקצה השני העבר את החוט דרך גלגלה ומתח אותו באמצעות משקולות. מדוד את המרחק בין הנדנד לגלגלה. הפעל את הנדנד באמצעות ספק, המחולל מתח שמשתנה בצורה סינוסואידלית עם הזמן.

1. העלה בהדרגה את תדירות הספק עד שתוכל להבחין בגל עומד כך שהפרעה מתאפסת רק בשתי נקודות: בנקודת המגע עם הגלגלה ובנקודת צומת קרובה לנדנד. מדוד את המרחק בין שתי נקודות אלה. מהו אורך הגל במצב זה? רשום את התדירות.

2. המשך להעלות את התדירות. מה קורה לצומת? הסבר.

3. המשך להעלות את התדירות עד שתבחין בצומת חדש קרוב לנדנד. מדוד את המרחק בין הגלגלה לצומת זה ורשום את התדירות.

4. חזור על הסעיף הקודם עד שיהיו 5 צמתים (בנוסף לקצוות). מדוד את המרחקים בין צמתים סמוכים. האם מרחקים אלה שווים ביניהם בתחום השגיאה?

5. בקש מהמדריך להאיר את החוט באמצעות סטרובוסקופ מסונכרן עם הספק. מה רואים?

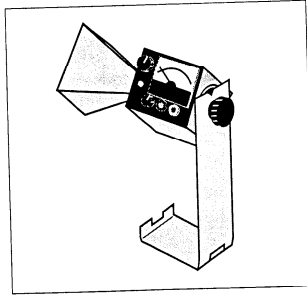
6. סרטט גרף של המרחק בין צמתים סמוכים כפונקציה של זמן המחזור והסק מגרף זה את מהירות הגל.

7. מדוד את המסה ליחידת אורך של החוט. בחר תדירות והשאר אותה קבועה. שנה את מספר המשקולות ומדוד את אורך הגל כפונקציה של המתיחות.

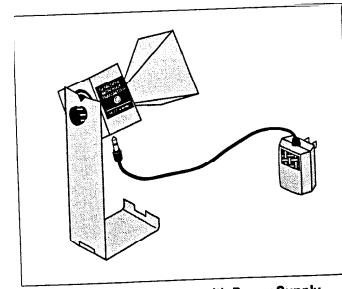
ערוך גרף של λ^2 כנגד F_0 . האם שיפוע הגרף מתאים לתאוריה?

גלי מיקרו

ברשותך משדר מיקרוגלים (transmitter). המשדר מכיל דיודה שפועלת כמגבר ותיבת תהודה עם קיבול חשמלי ומשרנות מתאימים. מקור האנרגיה בא משנאי מחובר לרשת החשמל. מיקרוגלים הינם גלים אלקטרומגנטיים.



Microwave Receiver



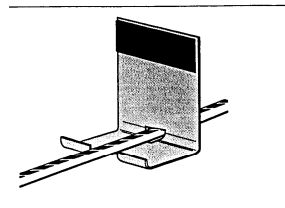
Microwave Transmitter with Power Supply

ההבדל היחיד בינם לבין אור נראה הוא באורך הגל. בעוד שאורך הגל של אור נראה הוא פחות מ- μm , מהמשדר שלנו יוצא גל בעל אורך גל $\lambda = 2.85\text{cm}$.

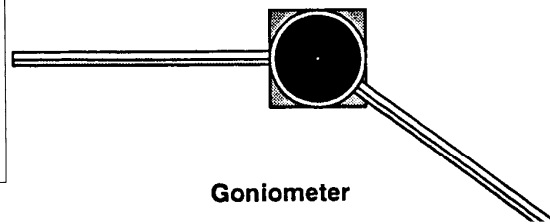
ניתן לקלוט את המיקרוגלים באמצעות גלאי (receiver). הגלאי מורכב מתיבת תהודה זהה לזו של המשדר, דיודה שתפקידה ליישר את הזרם

הנוצר ומד-זרם. למד-הזרם יש בורר שמאפשר לכוון את הרגישות. קריאת הגלאי היא פונקציה עולה של עוצמת הגל הנקלט, אך איננה ביחס ישר אליו. ע"מ לקבל תוצאות כמותיות, צריכים לכייל את הקראיות. אנחנו נסתפק בכך שנדע היכן העוצמות המרביות והמינימליות.

ניתן להרכיב את הרכיבים של ניסוי זה על זרועות שמאפשרות למדוד את הזווית ביניהן על (goniometer).



Mounting the Component Holder

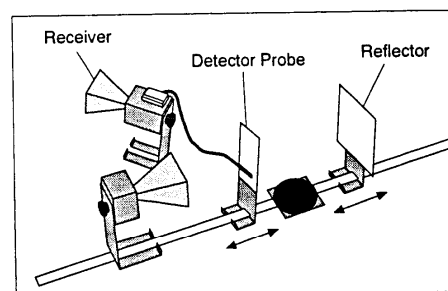


Goniometer

הזרועות אפשר להשחיל מחזיק (component holder) שעליו פס ממוגנט.

1. גל עומד

שולחים מיקרוגלים אל לוח אלומינים שמשמש מראה. כך נוצר גל עומד. רוצים למדוד את עוצמת הגל לאורך מסלולו. לא ניתן להשתמש בגלאי הרגיל, כי הוא היה חוסם את הגל. במקומו, משתמשים באנטנה ודיודה. מחברים את היציאה החשמלית שלהם למד-הזרם של הגלאי (או מד-זרם אחר).



הזז את האנטנה בעדינות ורשום את המרחקים מהמראה שבהם העוצמה מרבית או מינימלית. ודא שהקריאות לא מושפעות ע"י החזרות בגופך. רשום 5 מינימה ו- 5 מקסימה. האם מרחקים אלה מתאימים לתאוריה?

2. התאבכות דרך שני סדקים

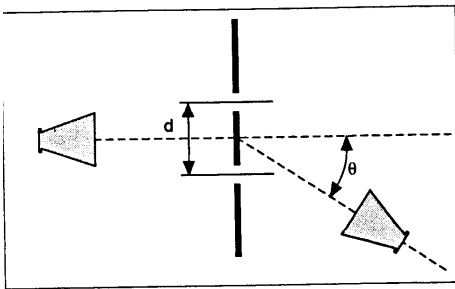


Figure 6.1 Double-Slit Interference

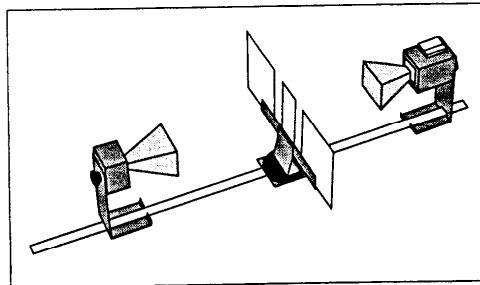


Figure 6.2 Equipment Setup

הרכב שני סדקים באמצעות לוחות אלומיניום, כמתואר באיור 6.2. הזז בעדינות את הגלאי ימינה ושמאלה וסרוק את הזוויות כמתואר באיור 6.1.

בטיפול התאורטי

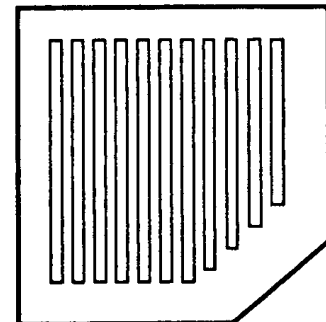
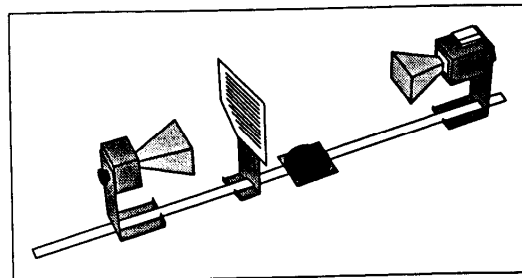
הנחנו שרוחב הסדקים קטן בהרבה מאורך הגל ושהמרחק לגלאי גדול בהרבה מהמרחק בין הסדקים. הציווד שברשותנו יאלץ אותנו להתפשר בדרישות אלה. על כל פנים, הקפד שלשני הסדקים יהיה אותו הרוחב. רשום את הזוויות θ שאליהן מגיעה עוצמה מרבית או עוצמה מינימלית. חזור על הניסוי עבור מרחק d אחר בין הסדקים. האם זוויות אלה מתאימות לתאוריה?

3. קיטוב

הגל שיוצא מהמסדר מקוטב. כמו-כן, הגלאי קולט רק רכיב קיטוב אחד. א. סובב את כיוון הקיטוב של הגלאי. רשום את הקריאות עבור $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$. מה קורא אם מסובבים גם את המסדר וגם את הגלאי באותה הזווית? בדוק.

ב. ברשותנו

מקטב (polarizer). המקטב מורכב מפסים מתכתיים דקים, כולם באותו הכיוון. כאשר השדה החשמלי של הגל

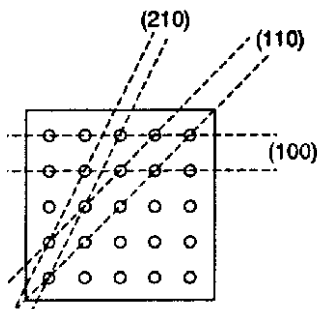


Polarizer

האלקטרומגנטי מקביל לפסים אלה, זורם לאורכם זרם חשמלי שגורם לאיפוס השדה החשמלי ולהחזרת הגל. לעומת זאת, כאשר השדה החשמלי מאונך לפסים, אין זרם והגל עובר דרך המקטב.

הרכב את המקטב בין המסדר והגלאי, כפי שמראה האיור. סובב את המקטב בין 0° ל- 180° , כמו בסעיף א'. באיזה מקרה היחס בין העוצמות ב- 0° ו- 45° גדול יותר, בסעיף זה או בקודם? האם זה מתאים לתאוריה?

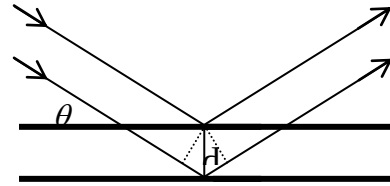
4. ניסוי בראג



בניסוי זה נחקור את ההתאבכות בקרינה האלקטרומגנטית המוחזרת ע"י מודל גביש. מודל זה מורכב מקוביית לטקס שבה כדורי מתכת המסודרים במבנה מחזורי קובי. במבנה המחזורי ניתן להבחין במישורי כדורים מקבילים (ראה איור). מישורים אלה מאופיינים ע"י שלושה מספרים שלמים

הנקראים מקדמי מילר. המישורים $(1,0,0)$ מאונכים לווקטור $\hat{x}+0\hat{y}+0\hat{z}$,

המישורים $(2,1,0)$ מאונכים ל- $2\hat{x}+\hat{y}+0\hat{z}$, וכו'. בניסוי זה נחקור רק מישורים אנכיים, ולכן המקדם השלישי תמיד יתאפס.



נסמן ב- d את המרחק בין מישורים סמוכים. כאשר הקרינה מוחזרת ע"י המישורים בזווית θ , הפרש הדרכים בין המסלולים הוא $2d\sin\theta$. מכאן נובע שתהיה

התאבכות בונה כאשר $2d\sin\theta = n\lambda$, עם n מספר שלם. קשר זה נקרא על שם בראג. שים לב ש- θ היא הזווית בין הקרניים למישורים.

מהלך הניסוי:

הנח את מודל הגביש על שולחן הגוניומטר, ממורכז על ציר הסיבוב. פרוס את שתי הזרועות בקו ישר, ומקם את המישורים $(1,0,0)$ מקבילים אליהן. במצב זה $\theta = 0$.

סובב בעדינות את השולחן עם הגביש, כל פעם במעלה אחת. כל פעם שאנחנו מסובבים את הגביש ב- 1° , עלינו לסובב את הזרוע עם הגלאי ב- 2° , על מנת שיתקיים חוק ההחזרה. עבור כל זווית θ מדוד את העוצמה המגיעה לגלאי ומצא את הזוויות שעבורן העוצמה מקסימלית. בעזרת נוסחת בראג מצא את המרחק בין המישורים והשווה עם הערך המתקבל ממדידה ישירה.

חזור על המדידות עבור המישורים $(1,1,0)$. במקרה זה המרחק קטן מהקודם בגורם $\sqrt{2}$.

התאבכות ועקיפה באור

רקע תיאורטי

בניסוי הזה נעסוק בעקיפה פראונהופר שבה אל הסדק (סדקים) יגיעו גלים מישוריים (קרני אור מקבילות, כפי שמוראה בתרשים). בתנאי העבודה (מסך רחוק מאוד לעומת מימדים של הסדקים) לאחר פגיעה בסדק, הגלים אף יהיו מישוריים.

את תנאי פראונהופר נשיג באופן מעשי על ידי שימוש בקרן לייזר. במקרים הפשוטים יחסית האלה, הטיפול בבעיה קל יותר

ובעזרת עיקרון הויגנס וסופרפוזיציה של גלים ניתן יהיה לחשב בנקודות שונות שעל המסך את הגל השקול ועל ידי כך את עוצמת ההארה עבור כל תבנית עקיפה. גלי אור הינם גלים אלקטרומגנטיים כך שעוצמת ההארה I תהייה פרופורציונית לריבועה השדה החשמלי E בכל נקודה. על פי עיקרון הויגנס ניתן לחלק את חזית הגל אשר מגיעה אל הסדק לרצועות צרות (בגבול, אינפיניטסימאליות) שיהיו מקורות אלמנטאריים (הויגנס) לגלים משניים. גלים אלה הינם קוהרנטיים (כיון שנובעים מאותה חזית גל) כך שבכל נקודות שעל המסך הם מתאבכים ויוצרים את תבנית העקיפה המתאימה.

1. התאבכות משני מקורות קוויים (ניסוי יאנג)

מעשית ניתן לבצע את הניסוי הזה באמצעות שני סדקים מאוד צרים ועם תנאי נוסף: מרחק מהסדקים אל המסך L הרבה יותר גדיל מאשר המרווח בין הסדקים d . התנאי למקסימום של סדר n הינו:

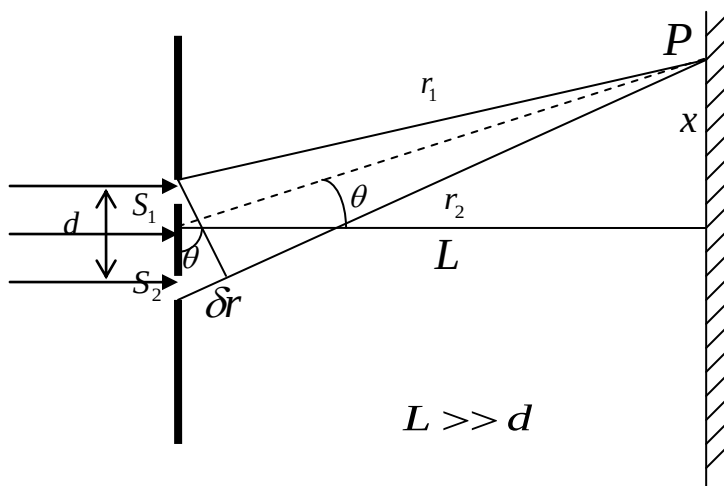
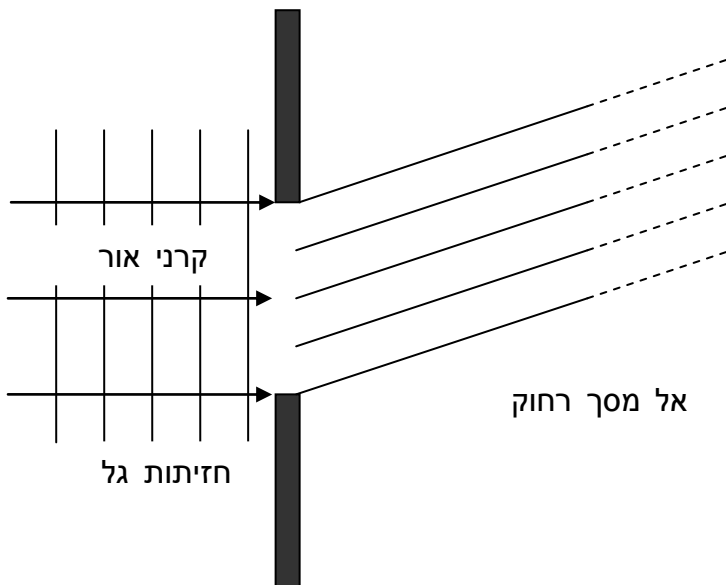
$$\delta r = n\lambda$$

כאן δr הוא הפרש הדרכים בין שני הקרניים. עבור זוויות קטנות $\delta r = d \sin \theta$ והתנאי למקסימום יהיה:

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

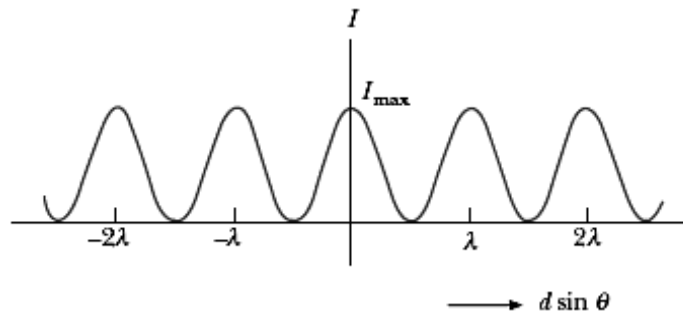
עם $n = 0, \pm 1, \pm 2$. באותם התנאים, המרווח בין שני מקסימה סמוכים בתבנית ההתאבכות (במקרה זה

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d} \quad (2) \quad (tg \theta \approx \sin \theta \approx \theta (rad))$$



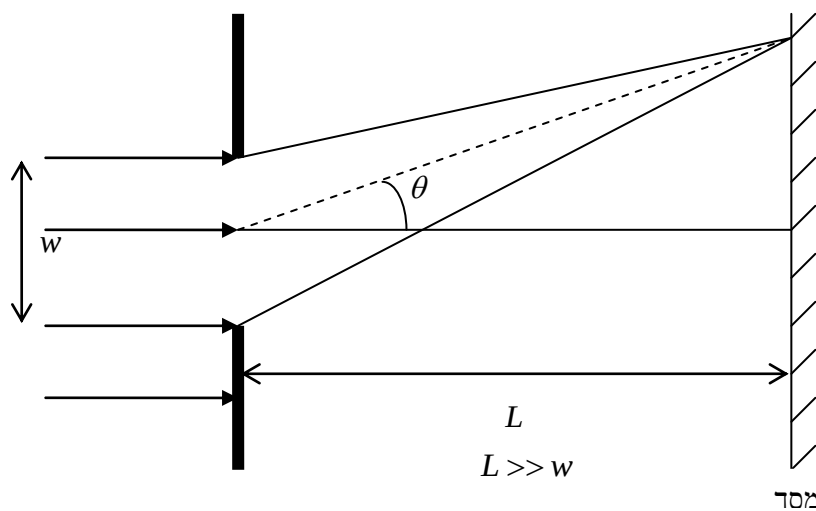
$$I_{\theta} = I_{\max} \cos^2 \beta \quad (3)$$

עוצמת ההארה על המסך תהיה



$$\beta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$$

2. עקיפה בסדק יחיד
התנאי למינימום עקיפה
הינו:



$$w \sin \theta = m\lambda, \\ m = \pm 1, \pm 2,$$

עבור $\theta = 0$ מתקבל
מקסימום מרכזי.

בתבנית העקיפה
המתקבלת על המסך,
רוחב פס האור
המרכזי (עבור זוויות
עקיפה קטנות):

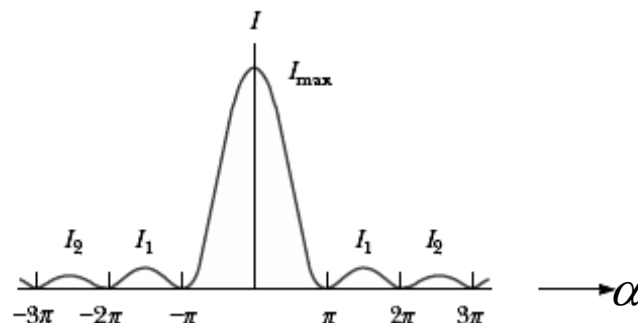
$$\Delta x_0 = \frac{2\lambda L}{w} \quad (4)$$

כמו-כן המרווח בין שני מינימא (או מקסימא)

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{w}$$

עוקבים יהיה

עוצמת ההארה



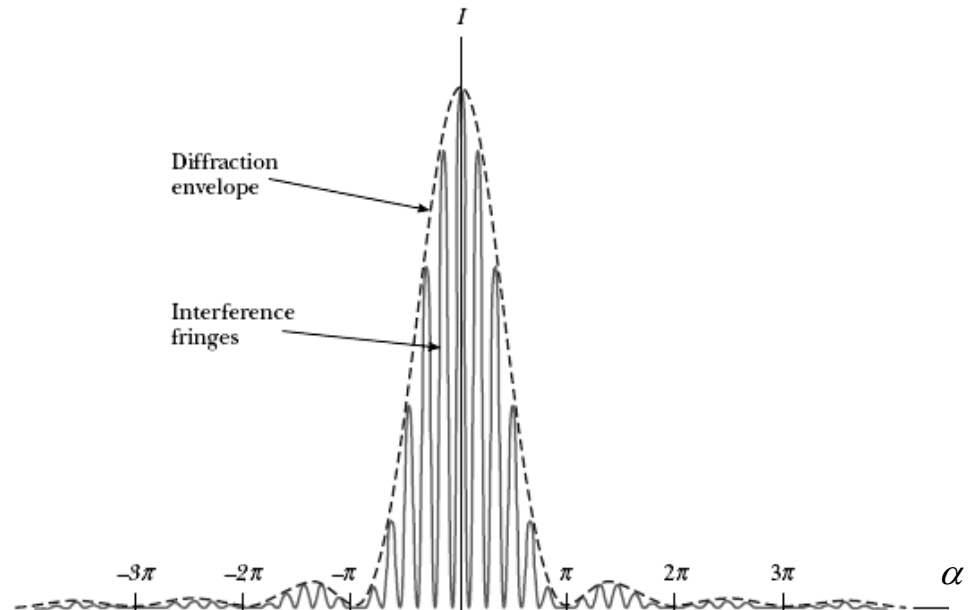
$$I_{\theta} = I_{\max} \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta$$

w, הינו רוחב הסדק

3. עקיפה בשני סדקים.

התופעה הזאת היא שילוב של התאבכות בשני סדקים עם עקיפה בסדק יחיד. תבנית ההתאבכות של שני הסדקים מאופנת על ידי תבנית העקיפה של כל סדק יחיד.



$$\Delta x_0 = \frac{2\lambda L}{w}$$

רוחב פס העקיפה המרכזי יהיה

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d}$$

והמרווח בין שני מקסימה סמוכים

$$I_\theta = I_{\max} (\cos \beta)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (6)$$

עוצמת הגל על המסך תהיה

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

-1

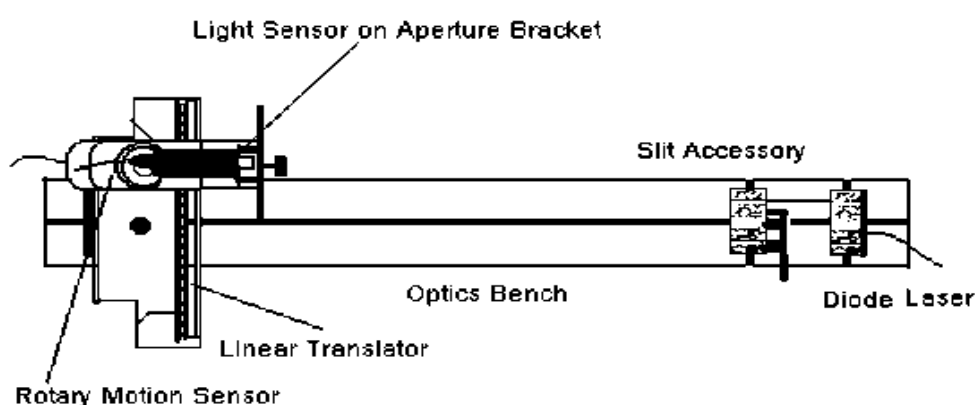
$$\alpha = \frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta$$

עם

משרות הניסוי:

קבלת תבניות התאבכות ועקיפה על מסך בעזרת קרן לייזר וחקר איכותי של התופעות ואחר כן חקר כמותי: מדידת אורך הגל של קרן הלייזר ואימות הנוסחאות (4), (5), ו- (6).

מהלך ניסוי



הרכב על ספסל האופטי את מקור האור (לייזר) בקצה של המסילה ובקצה הנגדי את חיישן האור. רצוי לכוון את קרן הלייזר אל הסדק הצר ביותר הנמצא על הדיסק שחוסם את החיישן. רגישות החיישן ניתן לכוון על דרגה 100 ובעת הצורך להוריד לדרגה 10. ממקמים את מעמד הסדקים ביחד עם דיסק הסדקים כמה שיותר קרוב למקור הלייזר. מסובבים את הדיסק על מנת למקם את הסדק (סדקים) הנדרש מול קרן הלייזר. לאחר פתיחת המחשב יש לבצע את הפעולות הבאות: PAS PORTAL, LAUNCH DATA STUDIO, ובתפריט התכנה ב-SETUP: בחירת החיישן LIGHT SENSOR, קצב דגימה (SAMPLE RATE) 200Hz, אחר כך LINEAR POSITION, ב- LINEAR SCALE לבחור באופציה RACK AND PINION, ב- SENSOR SAMPLING OPTION לבחור "10x". בחלון הגרף לבחור על ציר x LINEAR POSITION ו-על ציר y LIGHT INTENSITY.

4

חלק 1: חקר איכותי של תבניות עקיפה והתאבכות

בחלק זה של הניסוי דיסק החיישן יכול לשמש כמסך.

א) סדק יחיד

עבור על כל הסדקים הנמצאים על הדיסק (בעלי רוחב שונה) והתבונן במתקבל על המסך. יש אפשרות נוחה להשתמש בסדק קשתי בעל רוחב משתנה.

- האם התבניות המתקבלות מאשרות את התיאוריה?

- כיצד משפיע רוחב הסדק על תבנית העקיפה?

ב) שני סדקים

חזור על הפעולות המתוארות ב-א) והסק מסקנות מתאימות

ג) שלוש ויותר סדקים

שוב לעבור את השלבים של א) ו-ב). עבור מספר שונה של סדקים כאשר בכל מקרה מדובר באותו רוחב של הסדקים כמו-כן באותו מרווח בין הסדקים, השוו ביניהן את התבניות השונות. מתברר כי התבניות הנוצרות דומות במידה מסוימת לאלו הנוצרות כאשר מעבירים אור דרך שני סדקים.

- מה ניתן לומר על בהירות פסי המכסימום הראשיים כאשר מספר הסדקים הולך וגדל?

- האם המרחק בין פסי המכסימום הראשיים משתנה במקרה הנ"ל?

- האם חל שינוי בחדות הפסים האלה (כלומר כיצד משתנה הגבול בינם לבין האזורים הכהים הסמוכים)?

- האם מספר פסי המכסימום המשניים הינו בהתאם לצפוי? מה ניתן לומר לגבי עוצמת הפסים האלה לעומת עוצמת המקסימה הראשיים?

עוצמת האור בפסי מכסימום המשניים קטנה ככל שמספר הסדקים n גדל ובמקרה של המון סדקים כפי שזה קורה בסריג העקיפה, כמעט ולא ניתן כבר להבחין בפסים המשניים האלה ובתבנית העקיפה רואים רק פסי מכסימום ראשיים עם הפרדה גדולה ביניהם.

חלק 2 : חקר כמותי של תבניות העקיפה(א) סדק יחיד

לאחר קבלת הגרף $I=f(x)$ ניתן לקבל את הקואורדינטות של נקודות הדגימה על ידי סמן מיוחד שבתפריט חלון הגרף. היעזר בסמן הזה ומדוד את רוחב פס האור המרכזי בתבנית העקיפו Δx_0 . מדוד את המרחק L מהמקור עד לחיישן, כמו-כן רשום את רוחב הסדק w . כעת ניתן לחשב את אורך הגל של קרן הלייזר בעזרת הנוסחה (4).

על מנת לאמת את נוסחת העוצמה (5), נצטרך לחשב את זוויות העקיפה θ . יש למצוא קודם

את מיקום הנקודה שבה העוצמה היא מכסימלית (כלומר את אמצע פס האור המרכזי) X_0 .

מגדירים משתנה חדש y לפי: $y = X - X_0$. בתנאים שבהם מבצעים את הניסוי,

$L \gg w, d$ - עבור זוויות עקיפה קטנות, $\tan \theta = \frac{y}{L} \approx \sin \theta \approx \theta(\text{rad})$. בתפריט הגרף

5

פותחים את ה-FIT ובוחרים USER DEFINED FIT (התאמה מוגדרת על ידי המשתמש).

במקום המתאים שבחלון ה-FIT כותבים נוסחא (בנוסחא לוקחים את $I_{\max}$ לפי הגרף)

דומה לנוסחא (5) ובה $\sin \theta = \frac{x - x_0}{L}$ (עם הערכים הנמדדים של x_0 ו- L). לאחר פעולת

ENTER מתקבלת עקומת ההתאמה.

- האם העקומה הנ"ל מתלבשת על הגרף שהתקבל בניסוי (כלומר יש תאום בין התיאוריה לניסוי)?

(ב) שני סדקים

קבע את רוחב הפס המרכזי של תבנית העקיפה, וחשב את אותו רוחב לפי הנוסחא. לאחר מכן קבע את המרווח בין שני מקסימה עוקבים והשווה אותו לערך התיאורטי. פעל כמו במקרה של סדק יחיד והתאם עקומה תיאורטית לגרף שהתקבל בניסוי.

- האם שני הגרפים מתלכדים? מהן המסקנות?

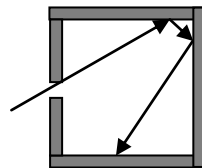
קרינת גוף שחור

הסבר קרינת גוף השחור הוביל למהפכה הקואנטית שחוותה הפיזיקה בתחילת המאה ה-20. התיאוריה הקואנטית נובעת משיקולים סטטיסטיים (פלנק) בניסיון לקבל את חוק הקרינה התרמית: הקרינה הנפלטת על ידי גוף בזכות הטמפרטורה שלו. כושר הפליטה של גוף נמצא בקשר הדוק עם כושר בליעת הקרינה. דבר זה צפוי כיון שגוף שרוי בטמפרטורה קבועה נמצא בשיווי-משקל תרמי עם סביבתו והוא צריך לקלוט אנרגיה באותו קצב שבו הוא פולט אנרגיה. הפיזיקאים של מאה ה-19 גילו שני תכונות חשובות של הקרינה התרמית:

1. כאשר טמפרטורת הגוף עולה עוצמת הקרינה הנפלטת גדלה באופן משמעותי.
2. ככל שטמפרטורת הגוף גבוהה יותר אורך הגל שעבורו עוצמת הקרינה מקסימלית, קטן יותר.

ניסיונות רבים, להסביר את העובדות הנ"ל במונחים כמותיים (חוקים), נתקלו בקשיים מהותיים. למשל, הקרינה התרמית עבור גוף מסוים בטמפרטורה מסוימת, תלויה בחומר ממנו עשוי הגוף, בצבע שלו כמו-כן בגורמים כמו חיספוס פני השטח שלו (הרבה פרמטרים). את הפתרון נתן הפיזיקאי **קרנהוף**: הוא הציע גוף בעל חלל פנימי (cavity) אשר דפנותיו מוחזקים בטמפרטורה מסוימת אחידה, עם חור קטן (ראה איור). כל קרינה שנכנסת דרך החור בסופו של דבר נבלעת (ולא יוצאת) כך שהחור מתנהג כמו גוף שחור:

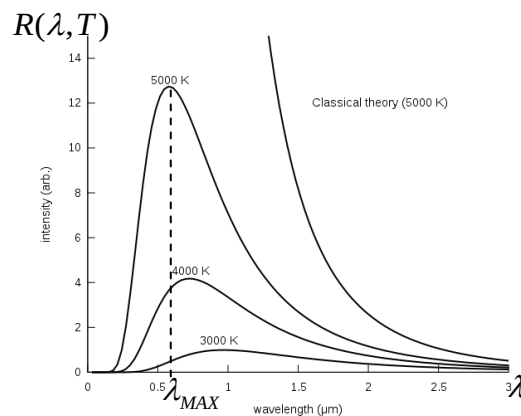
גוף אשר בולע את כל הקרינה שפוגעת בו. הוכח כי קרינת גוף



השחור תלויה רק בטמפרטורה שלו. ניסיונית ניתן לחקור את

קרינת גוף השחור על ידי מדידת הקרינה היוצאת מהחור.

התפלגות הספקטראלית של הקרינה מוראה בתרשים.



$R(\lambda, T)d\lambda$: ההספק הנפלט ליחידת שטח

של גוף הפולט בתחום אורכי הגל שבין

λ ו- $\lambda + d\lambda$. עוצמת הקרינה $I(T)$ היא האנרגיה

הכוללת הנפלטת ביחידת הזמן ליחידת שטח,

כלומר עבור כל התחום של אורכי הגל.

$$I(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda, T) d\lambda$$

משמעות הפיזיקאלית של השטח שמתחת

לגרף: עוצמת הקרינה $I(T)$, עבור טמפרטורה מסוימת. כאן T היא טמפרטורת KELVIN (אבסולוטית).

הקש בין טמפרטורת קלוין וטמפרטורת צלסיוס הוא: $T(K) = t(C) + 273$

הפיזיקה הקלאסית הצליחה להסביר חלק של העקומה הניסיונית (ראה תרשים) אך נכשלה מלהסביר את העקומה כולה (כולל האיזור המעניין יותר: האמצעי אשר בו קיים מקסימום). כדי להתגבר על הקשיים, הפיזיקאי הדגול **פִּלְנֶק** (PLANCK) בחר במודל הכי פשוט של גוף קורן: אוסצילטור הרמוני בעל תדירות עצמית ν . כפי שידוע, הספקטרום האנרגטי של אוסצילטור קלאסי, הינו רציף כלומר הוא יכול להימצא בכל מצב של אנרגיה (ועקב כך הוא יכול לקלוט ולפלוט כל אנרגיה). ההשערה המהפכנית (גורלית) של פלנק: קיום של חבילת אנרגיה (קוואנטה) ϵ כך שהאנרגיה של אוסצילטור יכולה לקבל את הערכים ה**בדודים** $\epsilon, 2\epsilon, \dots, n\epsilon$ כלומר מדובר בספקטרום בדיד. האנרגיה של קוואנטה היא: $\epsilon = h\nu$. כאן h הוא קבוע פלנק. התוצאה שקיבל פלנק עבור הצפיפות הספקטראלית $R(\lambda, T)$:

$$R(\lambda, T) = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

k , הוא קבוע של בולצמן

הנוסחא שהתקבלה הסבירה היטב את העקומה האקספרימנטאלית והייתה הצלחה אדירה עבור הפיזיקה בתחילת המאה ה-20. בעזרת הנוסחא הנ"ל ניתן להגיע לחוק STEFAN-BOLTZMAN:

$$I(T) = \sigma T^4, \quad \sigma \text{ הוא קבוע סטפן-בולצמן}$$

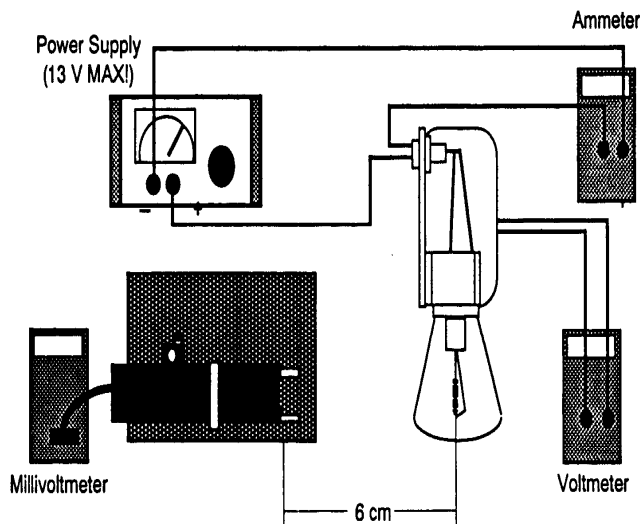
החוק הזה מסביר את העובדה הניסיונית מס' 1. σ ניתן לבטא בצורה הבאה:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^2} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

חקירת הפונקציה $R(\lambda, T)$ מובילה לחוק ההזזה של WIEN

$$\lambda_{MAX} \cdot T = const.$$

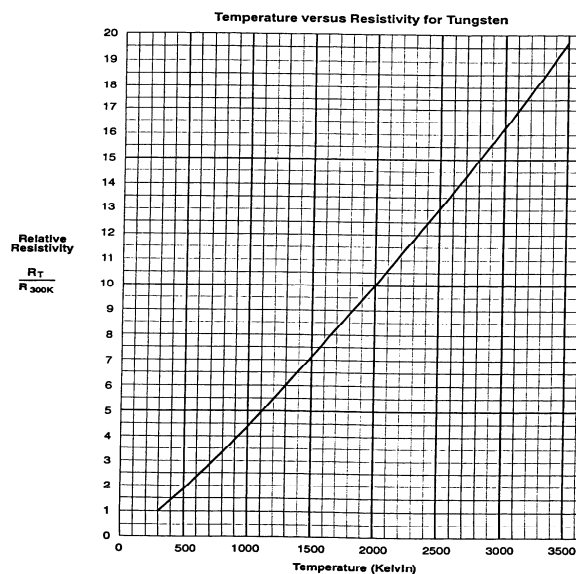
חוק וויאן מסביר את העובדה הניסיונית מס' 2.



1. תלות כמות הקרינה בטמפרטורה הגוף המקרין בניסוי זה הוא חוט הלהט של נורה (טונגסטן). ניתן לחממו עד לטמפרטורה של 3000°K . חימום זה מתבצע באמצעות ספק זרם. אין להפעיל על הנורה מתח מעל 13V .

מדידת הטמפרטורה: על מנת לדעת מה הטמפרטורה של חוט הלהט, אנחנו מודדים את ההתנגדות החשמלית שלו. לפני ביצוע הניסוי מודדים את התנגדות $R_{300\text{K}}$ בטמפרטורת החדר, שהינה בקרוב 300°K . במהלך הניסוי מודדים את הפרש הפוטנציאל בין קצוות חוט הלהט ואת הזרם שעובר דרכו. היחס ביניהם הינה ההתנגדות R_T . התנגדות זו עולה עם הטמפרטורה, אותה אפשר להסיק מגרף הכיול המצורף.

מהלך הניסוי:
הרכב את מערך הניסוי כפי שמראה האיור. בקש מהמדריך לבדוק לפני הפעלת מתח. הגלאי רגיש לקרינה אינפורה-אדומה ולאור נראה. מקם אותו במרחק של כ- 6 ס"מ מהנורה והקפד שמיקומו לא ישתנה במשך המדידות. כיציאה מהגלאי מקבלים מתח, הנמצא ביחס ישר לכמות הקרינה שמגיעה לגלאי. על מנת למנוע חימום של הגלאי, מומלץ להסתיר ממנו את הקרינה באמצעות שכבת מתכת בזמן שלא קוראים את



עוצמת הקרינה. הפעל מתח על חוט הלהט. העלה את המתח עד 12V , בצעדים של 1V . עבור כל צעד מדוד את עוצמת הקרינה ואת הזרם דרך חוט הלהט.

ניתוח תוצאות הניסוי:

סרטט גרף של המתח המייצג את עוצמת הקרינה כנגד החזקה הרביעית של הטמפרטורה. האם מתקבל קו ישר שעובר דרך הראשית? על אילו סטיות מהתאוריה אפשר לחשוב?

2. אומדן הקבוע של סטפן-בולצמן.

המתח שמראה הגלאי בניתוח לעיל נמצא ביחס ישר להספק המוקרן, אך איננו מכירים את קבוע היחס משתי סיבות: הגלאי לא כויל ורק חלק מההספק המוקרן מגיע לגלאי.

על מנת לאמוד את הקבוע של סטפן-בולצמן, נניח שלאחר שטמפרטורת חוט הלהט מתייצבת, כל ההספק החשמלי שמגיע לחוט הלהט מוקרן. אם כן, אם נסרטט את מכפלת הזרם במתח על חוט הלהט כנגד החזקה הרביעית של הטמפרטורה, נוכל משיפועו לקבל את היחס בין ההספק הכולל המוקרן ו- T^4 . התבונן בחוט הלהט ונסה לאמוד את קוטרו ואת אורכו, וחשב את שטח פניו. מידע זה מאפשר לאמוד את הקבוע של סטפן-בולצמן.

3. תלות כמות הקרינה בטיב המשטח הקורן
ברשותך קובייה עם 4 פאות אנכיות בגוון שונה: שחור, לבן, כסף ומתכתי מלוטש. בתוך הקובייה יש נורה, שמאפשרת את חימומה עד לטמפרטורה של כ- 120°C . על מנת לא לבזבז זמן, תן לקובייה להתחמם על מצב "5" תוך כדי ביצוע הניסוי הקודם. בזמן זה מקם את הקובייה רחוק מהגלאי. זהירות: על תגע בקובייה בהיותה חמה.

מהלך הניסוי:

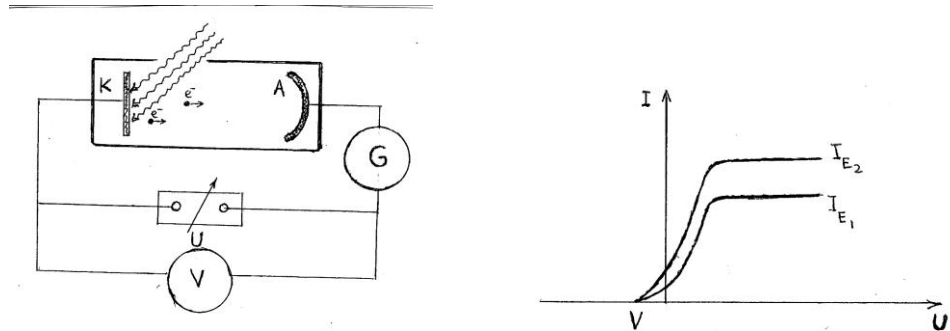
במצב חימום "5", בדוק את עוצמת הקרינה שיוצאת מכל פאה. על מנת שתנאי המדידה יהיו אחידים, מקם כל פעם את הגלאי קרוב למרכז הפאה, וקרוב אותו עד שהמוטות בחזית הגלאי יגעו בקובייה. עבור למצב חימום "7" וחכה עד שהטמפרטורה תתייצב. כדי לעקוב אחרי הטמפרטורה, מודדים את ההתנגדות של תרמיסטור במגע תרמי עם הקובייה. כאשר הטמפרטורה עולה, התנגדות התרמיסטור יורדת. בדוק את עוצמת הקרינה שיוצאת עכשיו מכל פאה.

מסקנות:

האם כמות הקרינה הנפלטת תלויה בגוון השטח? האם היחסים בין כמויות הקרינה הנפלטות עבור גוונים שונים תלויים בטמפרטורה? האם יש משהו מפתיע בתוצאות שהתקבלו?

האפקט הפוטואלקטרי

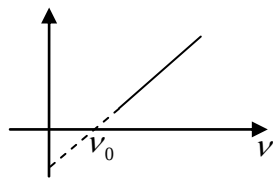
התופעה נתגלתה על ידי הרץ ב-1887. יציאת האלקטרונים ממתכות בהשפעת הקרינה נקראת בשם פליטה פוטואלקטרית. את התופעה ניתן לחקור באמצעות שפופרת פוטואלקטרית. היא עשויה מזכוכית ומרוקנת מאויר והיא כוללת שתי אלקטרודות: קטודה ואנודה (ראה תרשים). על השפופרת נמצא "פתח מיוחד" שמאפשר חדירה אף של קרינה אולטראסגולה.



בעזרת מעגל דומה לזה שבתרשים חקרו הפיזיקאים בסוף המאה ה-19 את התופעה ולפי מספר עובדות ניסיוניות הגיעו לכמה מסקנות אשר היו בניגוד למה שהיה מצופה לפי הפיזיקה הקלאסית (תורת האלקטרומגנטיות של מקסוול). הגרף המצורף מראה את עוצמת הזרם הפוטואלקטרי כפונקציה של המתח המופעל בין הקטודה לאנודה. שתי העקומות מתאימות לשתי עוצמות הארה של הקרינה אשר פוגעת בפוטוקטודה. לפי שיקולי אנרגיה ניתן לקשר את האנרגיה קינטית של הפוטואלקטרונים הכי מהירים למתח העצירה (או בלימה) V , המתח ההפוך שעבורו הזרם הפוטואלקטרי מתאפס: $E_k = eV$, כאשר e הוא המטען של האלקטרון (או פרוטון). העובדות הניסיוניות:

- א. מתח העצירה V אינו תלוי בעוצמת ההארה (סותר את התיאוריה הקלאסית)
 - ב. אם תדירות הקרינה קטנה מתדירות מסוימת (תדירות סף) מינימאלית האפקט לא מתרחש.
 - ג. הפליטה נעשית כמעט באופן פתאומי שוב בניגוד לציפיות.
- מסקנה כמותית חשובה נוספת: מתח העצירה V תלוי באופן ליניארי בתדירות הקרינה.

ההסבר הנכון ניתן על ידי הפיזיקאי הדגול איינשטיין. תורת איינשטיין של האפקט הפוטואלקטרי. האור, הוא אוסף של חלקיקים קוואנטיים הנקראים פוטונים. הפוטון נושא את האנרגיה $\epsilon = h\nu$, כאן, h הוא קבוע פלנק ו- ν תדירות הקרינה. כל פוטון בא באינטראקציה עם אלקטרון מסוים ומוסר לו את כל האנרגיה. חלק מהאנרגיה הזאת מושקעת בניתוק הקשרים של האלקטרון עם המתכת (אנרגיית הקשר או פונקציית העבודה W) והעודף מתבטא בצורת אנרגיה קינטית, כך שמאזן האנרגיה יהיה:



מכאן ניתן לבטא את מתח העצירה כפונקציה של התדירות :

$$V = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e} \quad \text{תדירות הסף: } \nu_0$$

רואים כי הקשר הזה מאשר את העובדות הניסיוניות שהוזכרו לעיל כך שתורת איינשטיין מהווה הצלחה גדולה בהסבר האפקט הפוטואלקטרי.

מהלך

הניסוי

בניסוי זה, אור שנובע מנורת כספית פוגע בקתודה של שפופרת ריק. כתוצאה, אלקטרונים נפלטים מהקתודה ומגיעים לאנודה. עקב כך, הקתודה צוברת מטען חיובי והאנודה מטען שלילי, עד שהפרש הפוטנציאל ביניהם נהיה כל כך גדול שלאלקטרונים הנוספים אין מספיק אנרגיה להגיע אל האנודה. על מנת למדוד הפרש פוטנציאל זה, הנקרא "מתח עצירה", אנחנו זקוקים למד-מתח בעל התנגדות גדולה מאוד ($> 10^{13} \Omega$), אחרת עודף האלקטרונים שנוצר באנודה בורח דרך מד-המתח. כדי להשיג תנאי זה יש בקופסת השפופרת מעגל אלקטרוני (high impedance unity gain amplifier). אנחנו יכולים למדוד את הפרש הפוטנציאל בין האנודה והקתודה על ידי כך שנמדוד את הפרש הפוטנציאל ביציאה של המעגל באמצעות מד-מתח רגיל.

1. הרכב את המערכת. למעשה, המערכת מורכבת מראש. קופסה אחת מכילה את נורת הכספית, פתח ליציאת האור ומכלול שבו סריג עקיפה ועדשה מרכזת. קופסה שניה מכילה את השפופרת ופתח לכניסת האור. לכל קופסה מוצמדת זרוע, אחת עם בליטה והשניה עם חור, מה שמאפשר ליצור ציר סיבוב ע"י הלבשה.

2. הדלק את המגבר ובדוק שהסוללות תקינות. ליד המפסק של המגבר יש 4 שקעים. המתח בין כל שקע תחתון לזה שמעליו צריך להיות 6V לפחות. לאחר הבדיקה, חבר מד-מתח ליציאה מהמגבר (שני השקעים התחתונים). המתח ביציאה שווה להפרש הפוטנציאל בין האנודה לקתודה. המתחים צפויים להגיע עד ל-2V.

3. הדלק את נורת הכספית. אל תסתכל ישירות אל האור הנובע מנורה זאת, כי הוא מכיל אולטרה-סגול. עד להתחלת המדידות צריכים לחכות לפחות 5 דקות להתייבשות. לשם ניצול מרבי של עוצמת האור, הסריג תוכנן כך שההתאבכות אינה סימטרית: יותר אור מוסח לצד אחד מאשר לצד השני. בדוק לאיזה צד רוב האור נשלח וודא שמצב זה נוח לצורך ביצוע הניסוי.

4. כבה את המגבר ושים את פתח כניסת האור לשפופרת ממול לפתח היציאה מ...המכלול סריג-עדשה. וודא שהאור מתמקד על פתח הכניסה. הסר את שרוול המיסוך וודא שהאור אכן מגיע לפתחים השקופים של שפופרת הריק (מאחוריהם ממוקמת הקתודה). אם האור לא מגיע למקום הנכון, סובב את קופסת השפופרת סביב צירה וחזק את הבורג שנועל סיבוב זה. אם הוראה זאת לא ברורה לך, בקש עזרה.

5. סובב את קופסת השפופרת סביב ציר החיבור, עד שהצבע הראשון מגיע לפתח הכניסה. צבע זה הוא אולטרה-סגול. המסך מסביב לפתח הכניסה צבוע בחומר פלואורצנטי, שפולט אור כחול כאשר הוא מואר באור אולטרה-סגול או סגול. אם תרצה להבחין בצבע האמיתי, כסה את המסך בפיסת נייר לבן. כעת אפשר להתחיל במדידות. הדלק את המגבר. אפס את הפרש הפוטנציאל בעזרת הלחצן ליד המפסק. תן למטען להצטבר עד שקריאת מד-המתח תתייצב. רשום את הצבע ואת הפרש הפוטנציאל.

6. המשך לסובב את קופסת השפופרת ולמדוד את הפרשי הפוטנציאל שכל צבע יוצר. הצבעים הבאים בתור הם סגול, כחול, ירוק וצהוב. לצורך המדידות עבור הירוק ועבור הצהוב, מקם מסנן מתאים שמונע כניסת אור ממקורות אחרים. המסננים נדבקים באמצעות פס מגנטי. מדוע משתמשים במסנן עבור אורכי גל ארוכים ולא עבור אורכי גל קצרים? אם מגדילים את זווית ההסחה, הצבעים מופיעים בסדר שני. מדוד את הפרשי הפוטנציאל גם עבור סדר זה.

7. סרטט את מתח העצירה של האלקטרונים כפונקציה של תדירות הגל האלקטרומגנטי שהגיע לקתודה. התדירויות עבור ספקטרום הכספית ידועות:

צבע	תדירות $[10^{14} \text{ Hz}]$	צבע	תדירות $[10^{14} \text{ Hz}]$
צהוב	5.187	סגול	7.409
ירוק	5.490	אולטרה-סגול	8.203
כחול	6.879		

מטען האלקטרון הינו $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$. קבע מהגרף את קבוע פלנק ואת התדירות המינימלית שעבורה אלקטרונים יכולים להגיע מהקתודה לאנודה.

8. השפעת העוצמה: כוון את קופסת השפופרת כך שהאור האולטרה-סגול מגיע לקתודה. באמצעות מסנן מתאים, צמצם את עוצמת ההארה ל-40%. מדוד את מתח העצירה במצב זה. אפס את המתח ומדוד כמה זמן דרוש עד שהמתח עולה שוב ל-90% ממתח העצירה. חזור על מדידות אלה כאשר עוצמת ההארה מצומצמת ל-20%. האם מתח העצירה משתנה במידה ניכרת? האם הזמן הדרוש להשגת המתח משתנה במידה ניכרת? הסבר תוצאות אלה על סמך התאורי

נסוי פרנק הרץ

מטרת הניסוי :

אישור קיומן של רמות אנרגיה בדידות .

מבוא : על פי מודל האטום של בוהר האלקטרונים יכולים להימצא ברמות אנרגיה בדידות . העברת האלקטרונים מרמה נמוכה לרמה גבוה יותר יכולה להתבצע ע"י מסירת אנרגיה המתאימה למעבר מסוים זה. תהליך ניתן לביצוע ע"י פגיעה בחומר עם אלקטרון בעל אנרגיה קינטית הגבוהה מהפרש האנרגיות הדרוש .

אם אלקטרון זה אכן יגרום לעליית רמה אנרגטית , האנרגיה הקינטית שלו תקטן בהתאם .

בניסוי פרנק הרץ אלקטרונים נפלטים מהקטודה (המחוממת) ומואצים ע"י מתח האצה בין הקטודה לאנודה . האנודה הינה רשת דרכה עוברים האלקטרונים וממשיכים אל האלקטרודה המצויה הצד השני . אלקטרודה זו מצויה במתח נגדי העוצר את האלקטרונים , כך שרק אם יש להם אנרגיה מספקת על מנת להגיע אל האלקטרודה יווצר זרם מאלקטרודה זו .

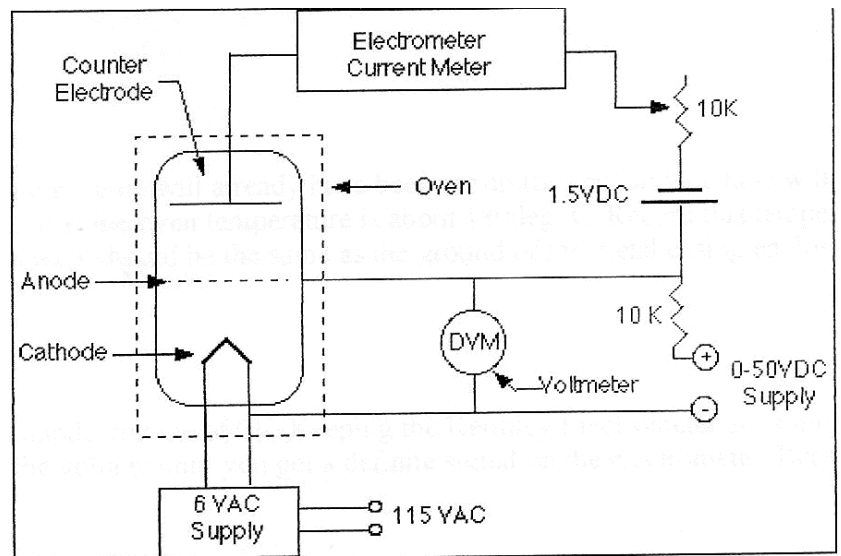
בניסוי מפעילים מתח האצה ומשנים אותו. ככל שהמתח גדל אנרגיית האלקטרונים גדלה ויותר אלקטרונים מגיעים אל האלקטרודה בצד השני . בתוך השפופרת יש גז של כספית בלחץ נמוך . האלקטרונים מבצעים התנגשויות אלסטיות עם גז זה .

ככל שמעלים את מתח ההאצה, מקבלים האלקטרונים יותר אנרגיה קינטית. כאשר לאלקטרונים יש מספיק אנרגיה כדי להעלות את אטומי הגז לרמה אנרגטית גבוה יותר, מבצעים חלק מהאלקטרונים התנגשויות לא אלסטיות עם הגז וכך מאבדים מהאנרגיה שלהם . כך שאין להם מספיק אנרגיה על מנת להגיע אל האלקטרודה בצד השני . התוצאה: נפילה בזרם מאלקטרודה זו .

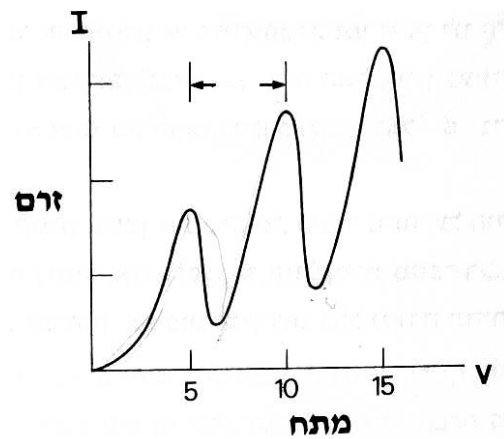
כאשר מעלים עוד את המתח, האלקטרונים שאיבדו אנרגיה בתנגשות עם הגז, צוברים שוב אנרגיה. ויכולים להגיע אל הצד השני. לכן הזרם חוזר ומתגבר .

עד הרגע בו אלקטרונים אלה צברו מספיק אנרגיה כך שהם יכולים להספיק להתנגש עוד פעם התנגשות לא אלסטית. וכך שוב יש איבוד אנרגיה ונפילת זרם.

תהליך זה חוזר על עצמו בהפרשי מתח קבועים ככל שמגבירים את מתח ההאצה.



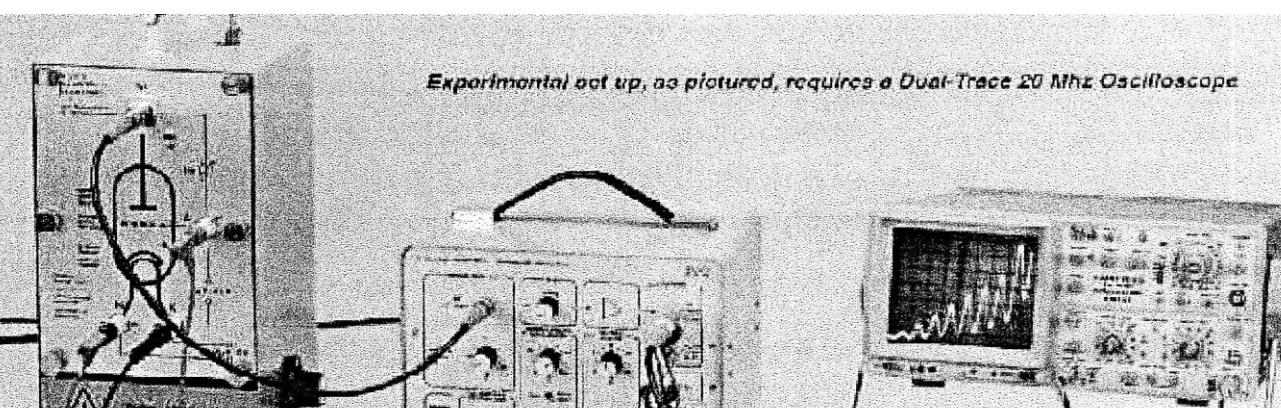
אם מודדים את הזרם מהאלקטרודה, מקבלים התנהגות המתוארת בגרף הבא:



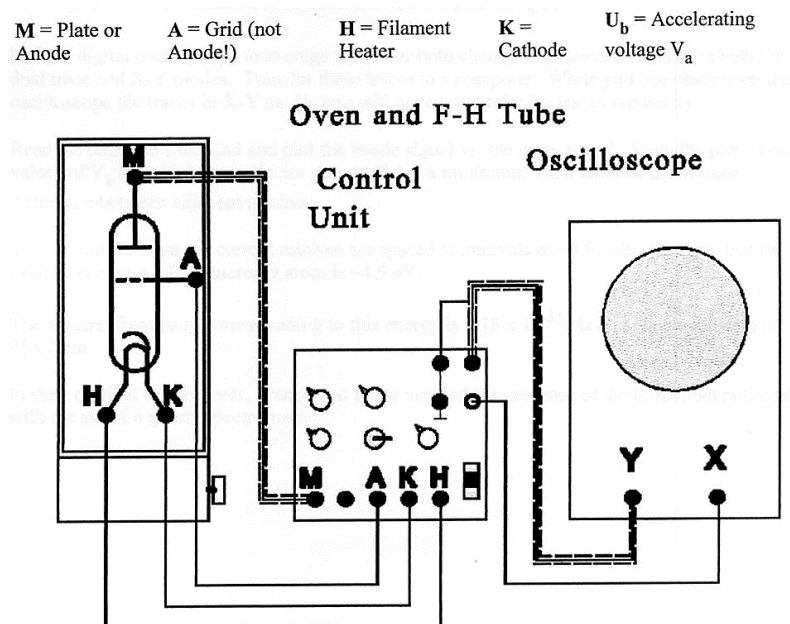
הפרש המתח בין פיק לפיק הוא קבוע ואופייני לאנרגיה הדרושה כדי להעלות את אלקטרוני החומר לרמה אנרגטית גבוהה יותר. בניסוי נראה כי מתח המקסימום הראשון אינו שווה להפרש המתחים בין המקסימות הבאות וזה נובע מאנרגית הקשר של האלקטרון אל החומר. (דומה לנאמר בתופעת אפקט פוטו אלקטרי)

מהלך הנסוי :

א. חיבור מערכת :



1. חברו את הנקודות המסומנות H ל-H, K ל-K, A ל-A, ו-M ל-M בין מערכת הנסוי לספק המתח שלה.
2. חברו את ה-OUTPUT של ספק המתח אל ה-INPUT של הסקופ. Y אל Y, ו-X אל X. אל שקע האדום.
3. חברו את ההארקות של נקו Y ו-X בסקופ (שחור אל שחור) ואותן אל ההארקה ב-OUTPUT של ספק המתח. ואל ההארקה של מערכת הנסוי.
4. כדאי גם לחבר בסוף לחשמל.



ביצוע הנסוי :

1. הפעילו את החימום של מערכת הנסוי לטמפ של 150-200 מעלות וחכו עד שהכלי יתחמם. (כעשר דקות)
2. הפעלו את החימום של הקטודה עד כ-6V. (על מנת לסייע בשיחרור אלקטרונים).
3. הגדילו את מתח ההאצה. התאימו את הסקופ בציר X ו-Y למתחים המתאימים. (ציר X מודד מתח האצה. ציר Y יחסי לזרם מהאלקטרודה האוספת)
4. שנו את המתחים השונים עד שתקבלו תמונה רצויה בסקופ.
5. מדדו את ההפרש בין שיא אחד למשנהו.

6. מדדו את מתח השיא הראשון . (מדידה זו רצוי לבצע בטמפ' של בערך 100-120 מעלות)

7. בחנו את השתנות צורת תמונת הסקופ עבור חום גבוה בתא הנסוי מאתיים מעלות ומעלה. ועבור חום נמוך כמאה מעלות .

שאלות .

1.מדוע יש לחמם את הכספית ?

2.מהי האנרגיה המתאימה של רמת האלקטרונים המעוררת שראינו ?

3.חשבו את אורך הגל של רמת אנרגיה זו . לאיזה תחום קרינה שייך אורך גל זה ?

4.הציעו דרך אחרת לוודא שאכן זה אורך הגל שהתקבל .

5.בעזרת מתח השיא הראשון העריכו את אנרגית הקשר של האלקטרונים אל הקטודה .

6.איך יראה תמונת הסקופ אם לא היה כספית בתא ?

7.הסבירו את השינוי בתמונת הסקופ כאשר הטמפ' של התא גבוהה .

ספקטרוסקופיה

מטרת הניסוי: קבלת הקווים הספקטראליים עבור מקורות אור שונים והשוואת התוצאות לערכים הידועים מהספרות.

רקע תיאורטי

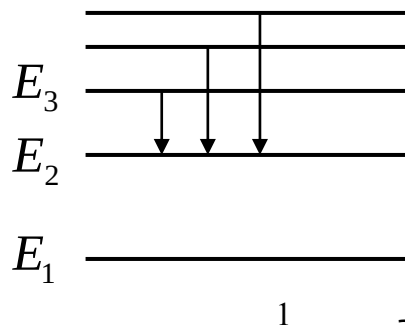
ההצלחה הראשונה בתחום שעוסקים בו הייתה המודל של בוהר עבור אטום המימן אשר הסביר היטב את כל הקווים הספקטראליים ואישר את נוסחת בלמר עבור הספקטרום בתחום הנראה של אטום המימן. באטום המימן לפי בוהר, האנרגיה מקוונטת ומדברים על רמות אנרגיה שניתן לתאר אותן על ידי קווים אופקיים (ראה איור 1). האנרגיה ברמה n היא:

$$E_n = -R \frac{1}{n^2} \quad (1)$$

עבור $n=1$ מתקבלת הרמה היסודית ועבור $n>1$

הרמות המעוררות. כאן R

הינו קבוע של רידברג ו- n נקרא מספר קוונטי "עיקרי". סדרת בלמר מתקבלת על ידי מעבר האלקטרון מרמות $n>2$ אל הרמה $n=2$. תדירות הפוטון הנפלט עקב המעבר



n ממצב n_f ניתנת על ידי

$$h\nu_{n_f n_i} = E_i - E_f \quad (2)$$

שילוב של המשוואות 1 ו-2 מוביל לנוסחא שבעזרתה ניתן לחשב את אורך הגל של כל קו ספקטרי:

$$\lambda = 911.503 \frac{n_i^2 n_f^2}{n_i^2 - n_f^2} \quad (3)$$

כאן נלקח בחשבון השינוי היחסותי במסת האלקטרון כמו-כן התנועה המשותפת פרוטון-אלקטרון סביב מרכז המסה שלהם.

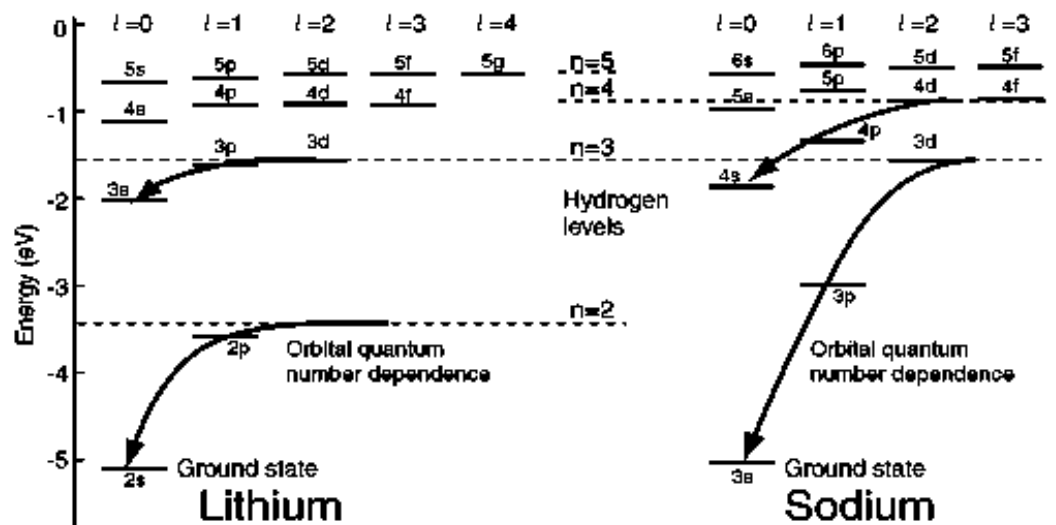
כל ניסיון להכיל את המודל הנ"ל לאטומים מרובות אלקטרונים נתקלו בקשיים והתוצאות של החישובים לא קיבלו אישור מהעובדות הניסיוניות. אפילו עבור האטומים האלקליים כמו K , Na שיש להם מבנה דומה לאטום המימן (אלקטרון אחד בקליפה החיצונית), מודל בוהר לא הצליח להסביר את הקווים הספקטראליים.

התפתחות משמעותית בפיזיקה קוונטית הופיעה כאשר שרדינגר פיתח תיאוריה המבוססת על המשוואה המפורסמת שלו. בעזרת משוואה זו פתרו הפיזיקאים את בעיית אטום המימן בצורה מלאה. למרות שהתקבלה אותה נוסחא המתארת את רמות האנרגיה כמו במודל בוהר, המסקנות והביטויים עבור התנה הזוויתית היו שונים מאלה שבתיאוריית בוהר. בעוד שבמודל בוהר היה מדובר במסלולים של האלקטרונים, בתיאוריית שרדינגר מונחים כמו מסלול, ידיעה בו-זמנית של מיקום ומהירות (תנע) של חלקיק קוונטי, איבדו את משמעותם. כאן יש משמעות פיזיקאלית חדשה לפתרונות של משוואת שרדינגר (פונקציות הגל העצמיות). האיורים המתארים את המצבים השונים של האלקטרונים מהווים מעין עננים בעלי צורה מסוימת במרחב. הם מייצגים את צפיפות ההסתברות למצוא את האלקטרון בכיוונים מסוימים. בניגוד לרדיוסים של מודל בוהר, כאן מדברים על ההסתברות שהאלקטרון ימצא במרחק שבין r ל- $r+dr$

(כלומר בקליפה כדורית בעלת עובי dr). בניסיון לכתוב את משוואת שרדינגר עבור אטומים מרובי אלקטרונים, נתקלים בקשיים מתמטיים. כאן נוסף לכך שפועל על כל אלקטרון מטעם הגרעין, יש כוחות שמפעילים שאר האלקטרונים. במקרים כאלה אין מתקבל פתרון אנליטי מדויק אלא רק פתרון מקורב. תוצאות החישובים שנעשו ניתן לסקם בצורה הבאה: א. את מצבו של אלקטרון באטום אפשר לתאר על ידי אותם מספרים קוואנטיים כמו לגבי אטום המימן: n , המספר הקוואנטי העיקרי l , המספר

הקוואנטי המסלולי (אורביטאלי) m , המספר הקוואנטי המגנטי m_s - המספר הקוואנטי

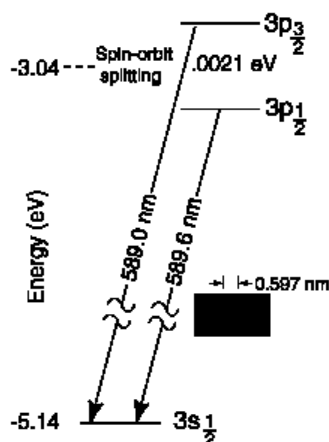
של הספין. ב. רמות האנרגיה של האלקטרון באטום רב-אלקטרונים תלויה גם במספר l ולא רק ב- n (ראב איור 2). הפיצול הזה של רמות האנרגיה לפי l נובע מהאינטראקציה שבין האלקטרונים. כאשר מסתכלים על פונקציות הגל עבור אלקטרונים



איור 2

בעלי מספר קוואנטי אורביטאלי שונה, מסתבר כי קיים הבדל במידת החדירה לאיזור שבו נמצאים האלקטרונים $1s$ ($n=1, l=0$). למשל, במקרה של אטום הנתרן קיימות שתי קליפות מלאות. האלקטרון במצב $3s$ חודר את הקליפות הפנימיות (המסככות) יותר מאשר האלקטרון במצב $3p$. זה גורם לקשרים הדוקים יותר עם הגרעין ועל ידי כך להורדת האנרגיה שלו באופן משמעותי.

לאחר שיכלול האמצעים הספקטרוסקופיים, נתגלו עובדות ניסיוניות חדשות ומעניינות. כאשר מתקבלת ספקטרום של אטומים מרובות אלקטרונים או של מימן, ברזולוציה גבוהה, מסתבר כי קיים פיצול נוסף של



הקווים הספקטראליים. דוגמה טובה היא אטום הנתרן והקו הכפול שלו (הדובלט) אשר מתקבל מפיצול של הרמה $3p$ (ראה איור 3). את התופעה הזאת הסבירו הפיזיקאים בעזרת הספין של האלקטרון אשר מקוונטט כמו התנע הזוויתי המסלולי. הספין של אלקטרון $S=1/2$, כך שקיימים רק שני מצבים ביחס לכיוון מוגדר במרחב (כיוון של שדה מגנטי למשל). לכן המספר הקוואנטי של הספין יכול לקבל את הערכים:

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

איור 3

("מעלה" ו-"מטה").

התנע הזוויתי המסלולי ו-הספין מתחברים כשני ווקטורים והשקול שלהם הנקרא תנע זוויתי כולל :

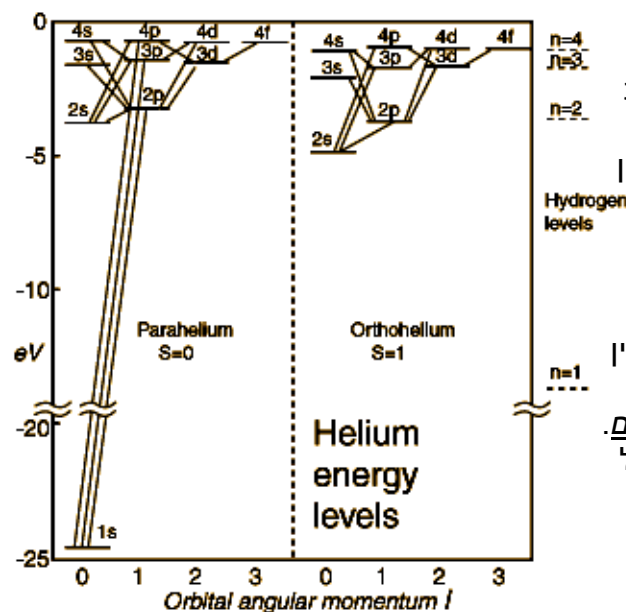
$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$$

j נקרא גם מספר קואנטי "פנימי". הערכים המותרים עבור j יהיו

$$j_1 = l + \frac{1}{2}, j_2 = l - \frac{1}{2}$$

כך שעבור כל מספר קואנטי l יהיו שני ערכים אפשריים עבור j ולכן הקווים המתאימים יהיו כפולים (דובלטים). במקרה של הנתרן, Na, הרמה 3p מתפצלת לתת רמות אשר מתאימות לשני הערכים הנ"ל עבור j. ההפרדה האנרגטית הזאת נגרמת על ידי האפקט "ספין-אורביט". לספין של אלקטרון מתאים גם מומנט מגנטי כך שהוא מהווה דיפול מגנטי. ידוע כי אף לתנועה האורביטאלית של האלקטרון מתאים מומנט מגנטי. האינטראקציה בין המומנט המגנטי של הספין לבין השדה המגנטי הנוצר עקב התנועה המסלולית של האלקטרון נותנת את ההפרדה האנרגטית. מידת ההפרדה ניתנת על ידי האנרגיה הדרושה על מנת לסובב את הספין, בתוך השדה המגנטי של התנועה האורביטאלית, ממצב מסוים ביחס ל-l (למשל מקביל) אל המצב השני (כיוון מנוגד).

האטום ההליום.



איור 4

באיור 4 רואים את רמות האנרגיה עבור האלקטרונים של אטום ההליום. מניחים כי אלקטרון אחד נמצא ברמת היסוד 1s. האלקטרון הנוסף במצב מסוים גבוה יותר, יכול להיות עם ספין מנוגד או באותו כיוון לספין של האלקטרון במצב היסודי. במקרה הראשון הספין השקול יהיה אפס ומתקבלים רמות האנרגיה של המצב הנקרא פראהליום ובמקרה השני הספין השקול הינו אחד ומתקבלים רמות האנרגיה של המצב הנקרא אורטהליום. עבור הפראהליום התנע הזוויתי הכולל $j = l$ (כך שהקווים יהיו בודדים סינגלטים). עבור האורטהליום $j = l \pm 1$ (סינגלטים).

$$j = l - 1, l, l + 1$$

כלומר הקווים יהיו שלשות (טרפליטים).

עובדה מעניינת ניתן לראות בקשר לאורטהליום: חוסר רמת היסוד 1s. ההסבר מבוסס על עיקרון האיסור של פאולי. האלקטרונים, בהיותם פרמיונים (חלקיקים יסודיים בעלי ספין חצי שלם), מציינים לעיקרון הבא: שני אלקטרונים או יותר לא יכולים להיות במצב שבו כל ארבעת המספרים הקואנטיים שלהם זהים.

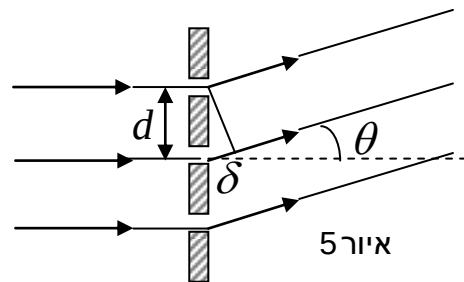
מהלך הניסוי

הרכיבים העיקריים של ספקטרומטר הם: סריג עקיפה, מקור קרינה (שפופרת התפרקות חשמלית בגז) וחיישן אור. שפופרות ספקטרליות מכילות גזים של אטומים שונים בלחץ נמוך. בניסוי שלנו נשתמש בשלוש שפופרות: מימן, הליום וכספית. בכל שפופרת כזאת קיימים שתי אלקטרודות שביניהם מפעילים מתח גבוה (כ-5000 וולט). כאשר מפעילים את המתח הגבוה, הגז מתיינן חלקית והופך למוליך. המטענים (יונים ואלקטרונים) נעים בשפופרת ומתנגשים (התנגשות אי-אלסטית) באטומים וגורמים לעירורם. כאשר האטומים המעוררים חוזרים למצבם הרגיל, פולטים את הפרש האנרגיה בצורת פוטון (קואנטה של קרינה אלקטרומגנטית). כך נוצרת קרינה אופיינית לכל סוג של אטום (יסוד).

סריג עקיפה בנוי מחומר אטום המכיל סדקים רבים צרים. המרחק בין החריצים הינו קבוע ומסומן ב- d . מספר הסדקים למילימטר מסומן ב- N^* . מתקיים הקשר: $N^* = 1/d$.

עבור הסריג שבניסוי $N^* = 600 / \text{mm}$

כך שכושר ההפרדה שלו הינו גבוה. אלומה מקבילה של קרני אור פוגעת בסריג בניצב למישור הסריג, ובכך



עובדים בתנאי פראונהופר: חזיתות הגל הן מישורים וכל נקודה בחזית בעלת אותה פאזה. כתוצאה מזה, האור יוצא

מהסדקים השונים של הסריג במופע שווה. החריצים משמשים מקורות אור (גל)

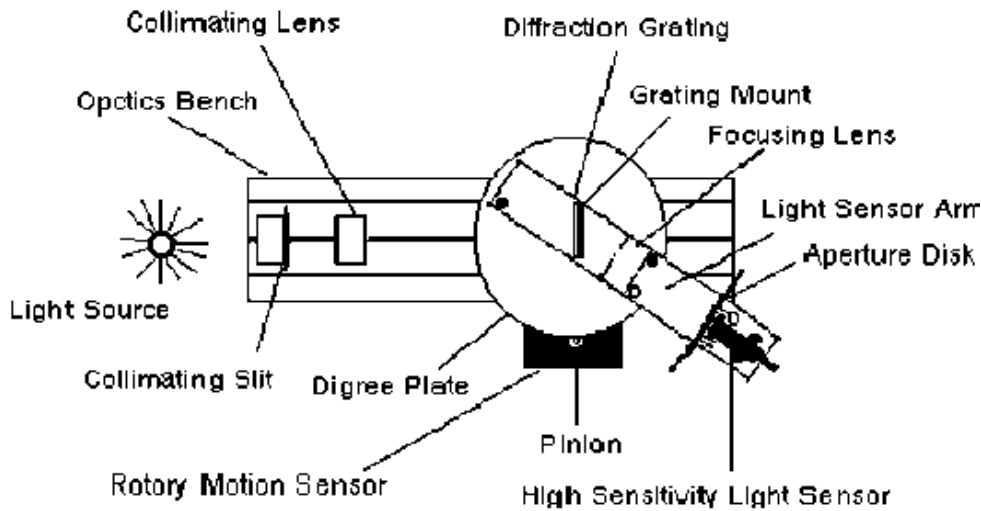
נקודתיים (קוויים) ושולחים קרניים לכל הכיוונים. זווית העקיפה θ נמדדת ביחס לאנך על מישור הסריג. הפרש הדרכים בין שתי קרניים סמוכות, תלוי בזווית העקיפה. התנאי להתאבכות בונה (מקסימום) עבור הקרניים הללו הוא שהפרש הדרכים δ אל מטרה רחוקה יהיה כפולה שלמה של אורכי גל (כמו בניסוי יאנג):

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda \quad (4)$$

כאן $m = 0, 1, 2, \dots$ הינו מספר הסידורי של מקסימום ההתאבכות. עבור זווית עקיפה שווה לאפס, הפרש הדרכים לכל אורכי הגל שווה לאפס ונקבל מקסימום (פס בהיר) מרכזי המכיל את כל אורכי הגל של המקור. קווים ספקטראליים בהירים מתקבלים עבור זוויות עקיפה נוספות אשר מקיימות את המשוואה (4). עבור זוויות עקיפה שאינם מקיימות את הקשר הנ"ל, הגל השקול אשר מתקבל כסופרפוזיציה של כל הגלים שבאים מהסדקים, נותנת אמפליטודה כמעט אפסית (חושך) כלומר מינימום התאבכות. זה קורה בגלל המספר הרב של הסדקים של סריג העקיפה.

מערכת הניסוי

מערכת המדידה מותקנת על ספסל אופטי (ראה תמונה). השפופרת הספקטרלית מוסתרת על ידי מסך. על המסך ניתן להזיז לוחית (collimating slit) ולבחור ברחב שונה. כדאי לבחור בסדק 4 או 5. הסדק נמצא במישור המוקד של עדשה מרכזת. עדשה זו הופכת את קרני האור לאלומה מקבילה צרה אשר פוגעת במאונך בסריג העקיפה. הסריג מוצמד אל התושבת שלו באמצעות מגנט. התושבת של הסריג מותקנת ישירות על השולחן-תושבת. כאשר מסובבים את הזרוע עם לוח המעלות, סריג העקיפה שומר על כיוון קבוע (ניצב לאלומת האור). עדשה נוספת ממקדת את קרני האור על המסך. כך נוצר על המסך קו ספקטרילי חד שמתאים לתנאי ההתאבכות (4). הקווים הספקטראליים מופיעים בצבעים שונים כאשר כל פס בהיר מהווה תמונה של הסדק. אורכי הגל (הפסים הציבעוניים) השונים הם אופייניים ליסוד הכימי הפולט את האור



איור 6

באמצע המסך מותקנת דיסקה עם חריצים ברוחב שונה (aperture disk). סיבוב הדיסקה מאפשר לבחור בחריצים בעלי רוחב שונה (6 חריצים ברוחב שבין 0.1-1.5 מ"מ). כדאי לבחור בחריץ מס' 1. חיישן האור ממיר את עוצמת העור למתח חשמלי. גודל המתח הוא בהתאם לעוצמת האור. למדידה מדויקת של זווית העקיפה משתמשים בחיישן סיבוב. חיישן זה מותקן על תושבת – שולחן כך שציר החיישן צמוד אל לוח המעלות. הקוטר של לוח המעלות גדול פי 60 מקוטר ציר החיישן. לכן, כאשר לוח המעלות מבצע סיבוב אחד, ציר החיישן מבצע 60 סיבובים. נתחשב בעובדה הזאת בחישוב זווית העקיפה. במהלך המדידות מסובבים את זרוע חיישן האור (light sensor arm) בכיוון אחד. כך סורקים את הספקטרום (הסדר הראשון) משני צידי הקרן האמצעית או, לפי בחירה, רק בצד מסוים (היכן שרואים יותר טוב).

ביצוע הניסוי

לאחר פתיחת ה-DATA STUDIO שבמחשב, יש לבצע את הפעולות הבאות: לפתוח את תת החלון SETUP. לבחור בחיישן האור (light sensor) ולכוון את קצב הדגימה (sample rate) ל-100 או 200, ו-MED(10). לאחר מכן לבחור בחיישן הסיבוב (rotary motion sensor). לסמן כאן angular position ו-sample rate : 200.

קליטת הנתונים ועיבוד התוצאות

לפני תחילת המדידות יש לכוון את לוח המעלות כך שהמספר 0 שבתדריג שלו יהיה בדיוק באמצע ציר חיישן הסיבוב. במצב זה צריך להזיז את מקור האור (שפופרת) עד אשר מתקבל פס אור, חד וצר כמו-כן בעל עוצמה רבה, באמצע הסדק שמול חיישן האור. כעת ניתן להתחיל במדידות:

-הצג גרף של עוצמת אור כלפי ההעתק הזוית

-התחל את המדידה על ידי לחיצה על "START" שבתפריט

-סובב את זרוע חיישן האור עד אשר החריץ שמול חיישן האור עובר את כל

סדר הראשון של הספקטרום (בכ-10 מעלות בערך).

ניתן לקבל גרף של עוצמת אור כפונקציה של אורך הגל ואז למדוד ישירות את אורכי הגל עבור הקווים הספקטראליים השונים. הפעולות שיש לבצע במטרה זו הן: לבחור בתפריט

באופציה CALCULATE. מיד, יופיע תת חלון שבו יש מקום לכתובת נוסחא לחישוב

אורך הגל (ב-nm):

$$y = \frac{1}{600} \sin\left(\frac{x}{60}\right) 10^6$$

כאן γ מייצג את אורך הגל אשר חושב לפי(4) עם התחשבות ביחס בין הקטרים של ציר חיישן הסיבוב ושל לוח המעלות. יש ללחוץ על הכפתור VARIABLES ולבחור כמשתנה x : ANGULAR POSITION. לוחצים על ACCEPT וחוזרים לגרף. ממקמים את הסמן בעזרת העכבר, מתחת לציר האופקי, עד אשר יופיע צורה של סולם. קליק על העכבר פותח את האופציות השונות שמתוכם ניתן לבחור בפונקציה שהגדרנו γ כמשתנה חדש על ציר האופקי. מיד יופיע הגרף הרצוי $I = f(\lambda)$. לחיצה על קורא הקואורדינטות(בתפריט) הופכת את הסמן לצורה מיוחדת שבעזרתה ניתן לעשות קריאת נקודות שונות(אורכי גל) שבגרף. לאחר קביעת אורכי הגל עבור הקווים הספקטרליים הברורים, מילאו את הטבלאות הבאות עבור כל שלושת המקורות: H, He, Hg.

א. אטום המימן

$\delta\lambda(\%)$	λ_{EXP}	צבע	$\lambda_{TH}(nm)$
		סגול	
		ירוק-כחול	
		אדום	

את הערכים התיאורטיים של אורכי הגל יש לחשב לפי נוסחת בוהר (3).

ב. אטום ההליום

$\delta\lambda(\%)$	λ_{EXP}	צבע	λ_{TH}
		סגול	447.1
		ירוק-כחול	492.2
		צהוב	587.5
		אדום	667.8
		אדום	706.5

ג. אטום הכספית

$\delta\lambda(\%)$	λ_{EXP}	צבע	$\lambda_{TH}(nm)$
		אולטרה-סגול	365
		סגול	404
		כחול	435.8
		ירוק	546
		צהוב	587