



"תכנית רוטשילד-ויצמן למצוינות בהוראת המדעים"
במימנה של קרן קיסריה אדמונד בנימין דה רוטשילד

עבודת גמר

נושא הקיטוב ושילובו בהוראת פיזיקה

מוגש על ידי

רותי חנון, טל טפר

המנחה:

פרופ' ירון זילברברג

מאי 2011

תודות

תודה על ההנחיה בהיבט הפיזיקלי

לפרופ' ירון זילברברג, המחלקה לפיזיקה של מערכות מורכבות

תודה לאנשי המחלקה להוראת המדעים, על העזרה בהיבטים הדידקטיים:

פרופ' בת-שבע איילון

ד"ר אסתר בגנו

ד"ר חנה ברגר

ד"ר אמנון חזן

תודה מיוחדת על רעיונות להוראת הנושא ועל ההערות בתחום הפיזיקלי

לערן שמאל, המחלקה לפיזיקה של מערכות מורכבות

תוכן

5.....	הקדמה
6.....	א. רקע תיאורטי מתחום הוראת המדעים
7.....	ב. תופעת הקיטוב: רקע פיזיקלי (ברמת התלמיד)
7.....	אור מקוטב – סוגי קיטוב (לינארי, מעגלי, אליפטי)
9.....	חוקי פרנל
10.....	דרכים לקבלת אור מקוטב:
10.....	1. מקטבים; חוק מאלוס
12.....	2. קרינת דיפול; קיטוב על ידי פיזור
13.....	3. קיטוב ל"י החזרה; זווית ברוסטר
15.....	4. שבירה כפולה
16.....	אור מקוטב בטבע
17.....	דוגמאות ליישומים של תופעת הקיטוב
18.....	משקפי פולרואיד
19.....	טכנולוגיית LCD
21.....	ג. ערכת פעילויות בנושא הקיטוב - המרכיב היישומי
21.....	שיעור חשיפה לנושא הקיטוב
22.....	פעילויות לביצוע על ידי תלמידים
22.....	עבודה מול סימולציות
24.....	תדריכים לניסויים
24.....	תדריכים לעיבוד תוצאות ניסויים מצולמים בוידאו
25.....	ד. תיאור ההתנסות
26.....	ה. משוב והערכה
26.....	הערכת ההתנסות שהתבצעה עם תלמידים
27.....	סיכום והמלצות
28.....	נספח א: תיאור מתמטי של תופעת הקיטוב
33.....	נספח ב: משוואות פרנל
35.....	נספח ג: סדרת ההדגמות
36.....	נספח ד: דפי פעילות עם סימולציות
36.....	פעילות מבוססת סימולציה בנושא סוגי קיטוב
37.....	פעילות מבוססת סימולציה בנושא עבודה עם מקטבים
39.....	פעילות מבוססת סימולציה בנושא החזרה ושבירה של גלים אלקטרומגנטיים מישוריים – זווית Brewster
41.....	נספח ה: תדריכים לניסויים
41.....	תדריך לניסוי חוק מאלוס
42.....	נספח ו: תדריכים לניסויים מצולמים בוידאו
42.....	ניסוי א: חוק מאלוס בגלי מיקרו
43.....	ניסוי ב: מציאת זווית ברוסטר בגלי מיקרו
44.....	נספח ז: שאלוני המשוב לתלמידים
45.....	נספח ח': תוכן הראיונות עם התלמידים
48.....	ביבליוגרפיה

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הקדמה

קיטוב של האור קשור למגוון תופעות שניתן למצוא בטבע הדומם ובעולם החי; בנוסף, קיימים יישומים טכנולוגיים רבים שמבוססים על קיטוב, כאשר המחקר והפיתוח בתחום מתנהל גם כיום.

להבנת תופעת הקיטוב נדרש ידע מתחום האלקטרומגנטיות, מתחום תורת הגלים ומתחום האופטיקה הגיאומטרית. לאחר שהרחבנו את היכרותנו עם נושא הקיטוב במסגרת הקורס באופטיקה זיהינו אותו כנושא פורה (ראה התייחסות בפרק הקרע התיאורטי מתחום הוראת המדעים), בחרנו לעסוק בו בעבודת הגמר, ולבדוק אפשרות לשלבו בהוראה.

התכנים המדעיים המורכבים עובדו לחומרי למידה שרמתם מתאימה לרמת תלמידי תיכון. פותחה ערכת לימוד ראשונית הכוללת מצגת חשיפה לנושא, וכן דפי הדרכה למורה לביצוע הדגמות. בנוסף, נכתבו דפי הסבר שמיועדים לתלמיד, דפי פעילויות לתלמיד שמבוססות על סימולציות, תדריכים לניסויים, וצילומי וידיאו של ניסויים במערכת גלי מיקרו.

עבור מורים שיהיו מעוניינים בכך, כללנו בנספחים חומרים שיוכלו לשמש את המורה להעמקת ההיכרות שלו עם הצד התיאורטי של הנושא.

בשלב זה נוסו חלק מהחומרים על קבוצת תלמידים מכיתה י"ב בביה"ס התיכון בית-ירח, עמק הירדן. תיאור ההתנסות והערכה ראשונית שלה מובאים בהמשך.

בניית יחידת ההוראה בקנה מידה קטן שמוצגת בעבודה זו, נעשתה תוך יישום גישות מתחום הוראת המדעים אליהם נחשפו הכותבים במהלך לימודיהם בתכנית קיסריה, ובפרט התפיסה הביצועית של ההבנה, לפיה הבנייה של הידע צריכה להיעשות על ידי התנסות של הלומד (ביצועי הבנה).

תכנית הלימודים צריכה להכיל ידע מסוג כזה שיהיה קשור בדרך כלשהי לעתידו של הלומד. John Dewey השתמש במושג ידע גנרטיבי. Perkins¹ טוען כי מורים צריכים לפתח אינטואיציה לבחירה של נושאים גנרטיביים, או להפיכתו של נושא שכבר מלמדים לנושא גנרטיבי, כזה שקשור למה שמעניין את התלמידים; ידע גנרטיבי אמיתי יוצר תובנות ומשמעויות בהקשרים רבים, הלומד יבין יותר וישתמש יותר במה שלמד.

פרקינס הוא ממובילי התפיסה הביצועית של ההבנה; לפי תפיסה זו ההבנה מצויה ביכולת הביצוע עצמה; וזאת בהבדל מהתפיסה הייצוגית של ההבנה, שרואה ביכולת הביצוע סימפטום של הבנה.

על פי תפיסה זו כדי להעריך את ההבנה של אדם בנקודה מסוימת, יש לבקש ממנו לעשות משהו שדורש הפעלה של הבנה – לתת הסבר, לנבא משהו, לנסח טיעון, למצוא דוגמה, להביא הוכחה, להכליל, ליישם, להשוות, לייצג בדרך אחרת, או מגוון ביצועים שכרוכים בחשיבה. ההבנה, אם כן, איננה הבעלות על המידע אלא היכולת לעשות דברים מסוימים עם אותו המידע.

הוראה לשם הבנה נשענת על כמה יסודות:

- התמקדות בנושאים פוריים; נושא פורה הינו נושא נגיש לתלמידים, שניתן לקישור לנושאים רבים ומגוונים בתוך הדיסיפלינה ומחוצה לה, כולל בחיי היום יום, ויכול לסייע לארגון הידע.
- ראיית ההוראה במונחים של ביצועי הבנה, אשר מלבד זה שהם מאפשרים להעריך את ההבנה של הלומד, הם גם מקדמים את ההבנה ומעמיקים אותה.
- קיום הערכה מתמשכת, שיכולה להינתן כמשוב על ידי המורה, על ידי תלמידים אחרים, או הערכה עצמית של התלמיד.
- שימוש בייצוגים חזקים.

הכותבים זיהו את נושא הקיטוב בתור נושא שחשיפת התלמידים אליו, מהווה הזדמנות להיחשף גם לנושאים שהם מעבר לנושאים הנלמדים כחלק מתוכנית הלימודים (במסגרת ההכנה לבגרות) מחד, ואפשרות ליצור רשת קשרים עשירה יותר בין מושגים ורעיונות פיזיקאליים שנלמדים במסגרת תכנית הלימודים מאידך.

Perkins, 1993¹

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

ב. תופעת הקיטוב: רקע פיזיקלי (ברמת התלמיד)

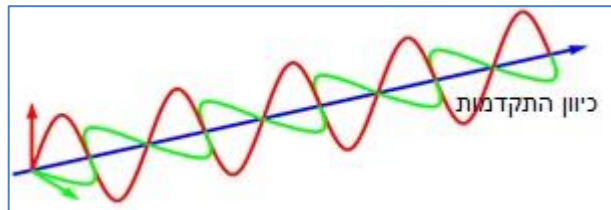
אור מקוטב – סוגי קיטוב (לינארי, מעגלי, אליפטי)

גל אלקטרומגנטי (ואור כמקרה פרטי) הינו גל רוחב, כלומר גל אשר בו כיוון השדה החשמלי ניצב לכיוון ההתקדמות של הגל (ראה איור 1).

קיטוב הוא תכונה של גלי רוחב, שמתייחסת לכיוונו של וקטור השדה החשמלי, לא רק של גלים רוחביים.

או ליתר דיוק – לתלות של כיווני הרכיבים של וקטור השדה החשמלי בזמן.

כאשר מדובר על אור שאינו מקוטב, כמו אור השמש או אור הנפלט מנורת להט, הכוונה היא לאוסף אקראי של גלים בעלי כיווני קיטובים שונים, כך שכיוון השדה השקול משתנה ולא מוגדר באופן דטרמיניסטי.



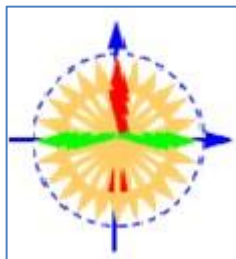
איור 1: רכיבי השדה החשמלי של גל אלקטרומגנטי

במושג אור מקוטב, לעומת זאת, הכוונה היא לגל אלקטרומגנטי בעל קיטוב מוגדר.

לעין האנושית רגישות נמוכה ביותר לתכונה זו, והיא התגלתה רק במאה ה-17.

ישנן אינסוף דרכים אפשריות (או בסיסים אפשריים) לתיאור מצבי קיטוב; שלש הדרכים הנפוצות לתיאור מצבי קיטוב הן: קיטוב קווי (לינארי), קיטוב מעגלי, וקיטוב אליפטי.

שני סוגי הקיטוב הנפוצים הם קיטוב קווי וקיטוב מעגלי, והם מהווים מקרים פרטיים של הסוג הכללי - קיטוב אליפטי.



קיטוב מעגלי: כאשר כיוון השדה החשמלי משתנה בצורה מעגלית אך עוצמתו קבועה, הקיטוב נקרא קיטוב מעגלי. במקרה זה רכיבו של השדה

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כביטותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מאיור 2: קיטוב מעגלי (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת חלק ממנו.

החשמלי מסתובבים בקצב זהה וקבוע, עם הפרש מופע של רבע מחזור ($\pi/2$). באיור 2 מיוצג וקטור השדה החשמלי (החץ הצהוב) במספר זמנים שונים; ניתן לראות כי ההיטל של קצה הווקטור על חזית הגל הינו מעגל, או במילים אחרות - קצהו של הווקטור "נע" לאורך מעגל.

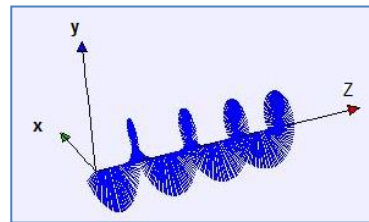
התנועה סביב ציר ההתקדמות (Z) מיוצגת באיור 3; המישור בו נמצא וקטור השדה בכל רגע ורגע (x,y), ניצב לכיוון ההתקדמות.

איור 3:

הדמיה של קיטוב מעגלי: על פי

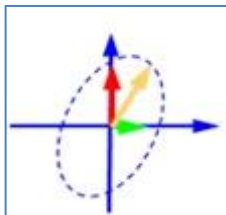
The Open Source Physics Project

<http://www.compadre.org/OSP/document/Serve>



גל מקוטב מעגלית ניתן לתיאור כסכום של שני גלים בעלי אותה משרעת, אשר הפרש המופע ביניהם הוא של 90 מעלות, כך שגודל השדה החשמלי קבוע.

קיטוב אליפטי:

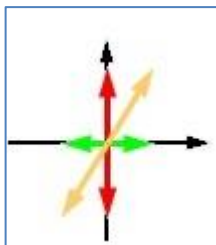


איור 4: קיטוב אליפטי

כאשר השדה החשמלי (החץ צהוב באיור 4) משנה את גודלו בנוסף לכיוונו (ולכן הגודל של הרכיבים שונה), הקיטוב נקרא אליפטי. זה קורה בכל המקרים שבהם רכיביו של השדה החשמלי מסתובבים בקצב זהה וקבוע, עם הפרש מופע שאינו 90 מעלות.

קיטוב קווי:

כאשר כיוון השדה החשמלי (החץ צהוב באיור 5) אינו משתנה בזמן, הקיטוב נקרא קיטוב קווי (לינארי). במקרה זה גם רכיביו של השדה החשמלי קבועים בזמן; קיטוב הגל המתואר באיור 1 הינו קיטוב לנארי. באיור 2 מיוצגים וקטור השדה החשמלי (החץ הצהוב) ורכיביו (חץ אדום וחץ ירוק) מנקודת מבטו של צופה אשר לעברו הגל מתקדם.



איור 5: קיטוב קווי

תיאור מתמטי של תופעת הקיטוב נמצא בנספח א.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

חוקי פרנל

כאשר קרינה אלקטרומגנטית עוברת בין שני חומרים בעלי מקדמי שבירה שונים, חלק מהקרינה מוחזר וחלק עובר. היחס בין עוצמת הקרינה המוחזרת לבין עוצמת הקרינה הפוגעת נקרא **מקדם ההחזרה**, ואותו נהוג לסמן באות R .

חוק ההחזרה וחוק השבירה (חוק סנל Snell) של האור קובעים את הכיוונים אליהם גל אלקטרומגנטי, ובפרט אור, מוחזר ונשבר, במפגש בין שני חומרים בעלי תכונות אופטיות שונות. חוקי פרנל (רבע הראשון של המאה ה-19) מתארים לא רק את הכיוון אליו האור יוחזר וישבר, אלא גם את חלוקת העוצמה של הגל הפוגע בין הגל הנשבר והגל המוחזר.

לכל אחד ממרכיבי הקיטוב מגדירים מקדם ההחזרה (וכן מקדם העברה): מקדם החזרה עבור מרכיב הקיטוב המקביל של הקרינה (קיטוב p), כלומר המרכיב שבו השדה החשמלי של הקרינה נמצא במישור הפגיעה (המישור המכיל את הקרן הפוגעת ואת האנך למשטח בנקודת הפגיעה), ומקדם החזרה אחר - עבור מרכיב הקיטוב הניצב של הקרינה (קיטוב s), כלומר המרכיב שבו השדה החשמלי של הקרינה ניצב למישור הפגיעה; (ראה תרשים 1 בנספח ב').

בעזרת משוואות פרנל ניתן לחשב ניתן לחשב את המשרעת, המופע והקיטוב של הגל המוחזר והנשבר ביחס לגל הפוגע, ומכאן גם את מקדמי ההחזרה וההעברה כתלות בקיטוב, במקדם השבירה n_1 של החומר ממנו מגיעה הקרינה, θ_i - זווית הפגיעה, θ_t - זווית השבירה או ההעברה, ו- n_2 - מקדם השבירה של החומר אליו הקרינה עוברת.

הביטויים שמתקבלים עבור R_s מקדם ההחזרה של הקרינה המקוטבת בניצב למישור הפגיעה ועבור R_p מקדם ההחזרה של הקרינה המקוטבת במקביל למישור הפגיעה הם:

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \left[\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right]^2$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right)^2 = \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right]^2$$

פרנל פיתח את החוקים הללו מתיאוריה מכנית של ויברציות בחומר; כיום מקובל להוכיח את חוקי פרנל ממשוואות מקסוול, שנכתבו כחמישים שנה לאחר שפרנל פיתח את חוקי פרנל.

למשוואות פרנל קיימים יישומים רבים, ביניהם: יצירת קיטוב ע"י החזרה, החוק של ברוסטר, החזרה מלאה.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הרחבה מתמטית של משוואות פרנל נמצאת בנספח ב.

דרכים לקבלת אור מקוטב:

ניתן לשנות את הקיטוב של האור בדרכים שונות, ביניהן: העברה דרך לוחית מקטב, פיזור, החזרה, שבירה כפולה, והעברה דרך לוחיות רבע גל או חצי גל.

בפרק זה נתייחס לארבע הדרכים הראשונות בלבד.

1. מקטבים; חוק מאלוס

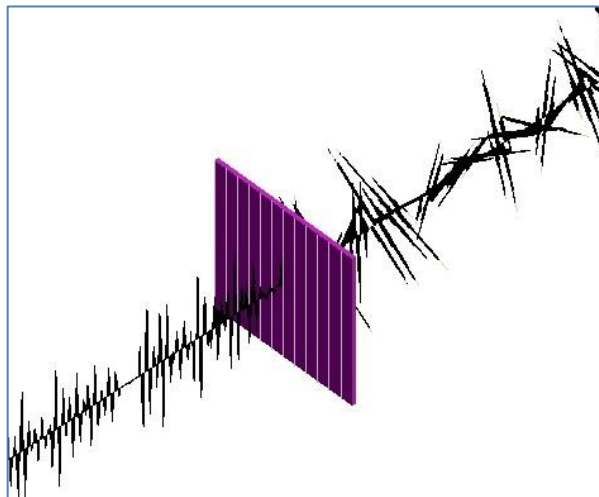
אור שנוצר ממקור תרמי (שמש, נורת להט, וכו') הוא אור סטטיסטי: קיימים בן אורכי גל רבים, ובמוצע הוא לגמרי לא מקוטב.

מקטב:

לוח מקטב (Polaroid) הינו רכיב אשר מגביל או משנה את מצב הקיטוב של האור העובר דרכו.

במקטבים למיניהם מתרחש קיטוב על ידי בליעה סלקטיבית.

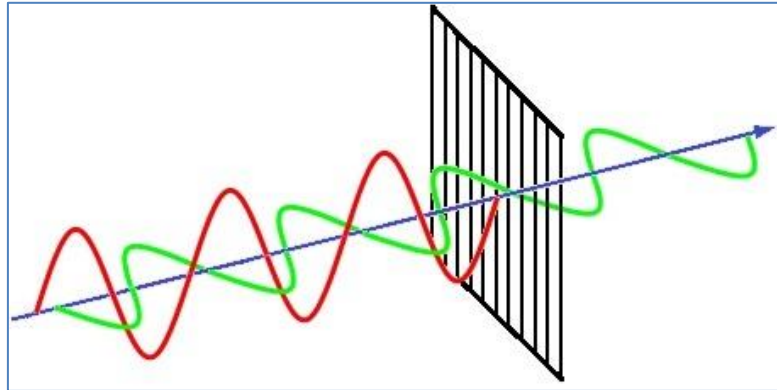
בתהליך הייצור של מקטב לאור בתחום הנראה, מוליקולות ארוכות (פולימרים) מסודרות בצורה מקבילה, כך שמקדם הבליעה בכיוון אחד גדול הרבה יותר ממקדם הבליעה בכיוון הניצב (ראה איור 6).



איור 6: גל אלקטרומגנטי כאוטי עובר דרך מקטב; הגל היוצא מהמקטב הוא גל מקוטב לינארית

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

סריג של תילי מתכת מקבילים משמש כמקטב לגלי רדיו או גלי מיקרו; מידת ההעברה דרכו תלויה בקיטוב: הקיטוב הניצב לתילים מועבר, בעוד שהקיטוב המקביל לתילים נבלע (ראה איור 7).



איור 7: מקטב לגלי מיקרו או גלי רדיו

חוק מאלוס (Malus):

עוצמת הגל האלקטרו-מגנטי אחרי שני מקטבים פרופורציוני לריבוע הקוסינוס הזווית היחסית בין המקטבים.

ההסבר: עוצמה של גל אלקטרומגנטי היא למעשה הספק האנרגיה שמגיע לכל יחידת שטח. על פי התורה האלקטרומגנטית, העוצמה של גל אלקטרומגנטי נמצאת ביחס ישר לריבוע המשרעת של וקטור השדה החשמלי.

נתייחס לאור מקוטב קווית לאחר המעבר דרך המקטב הראשון, שמשרעת השדה שלו היא E_0 ; במעבר דרך מקטב שני שנמצא בזווית θ ביחס לזווית הקיטוב של האור, יעבור רק רכיב השדה המקביל למקטב השני – כלומר $E_0 \cos \theta$. מכאן שהעוצמה שתעבור תהיה $I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$, כאשר $I(0) \propto E_0^2$.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

2. קרינת דיפול; קיטוב על ידי פיזור

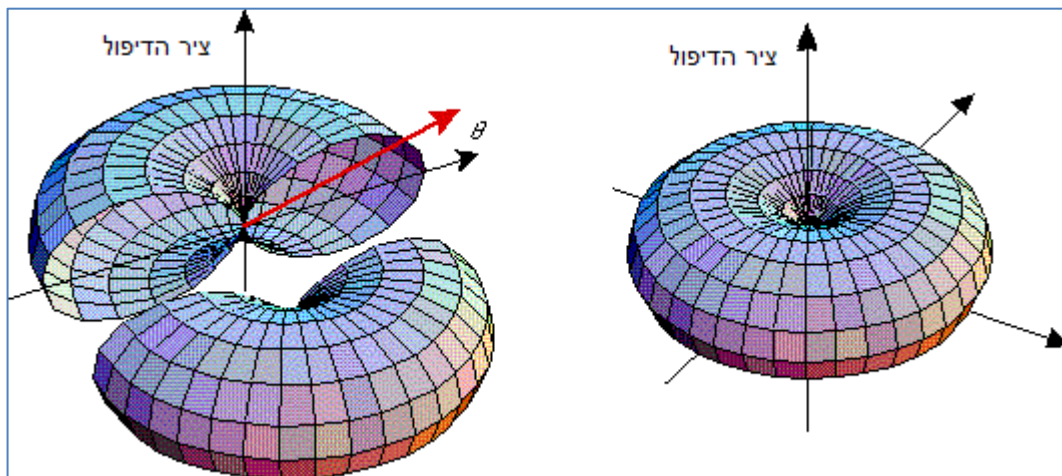
כאשר אור עובר דרך אוסף של חלקיקים קטנים המרחפים בחלל, עבור צופה המסתכל על החלקיקים בכיוון הניצב לתפשטות האור, האור נראה מקוטב קווית.

על מנת להבין זאת, נבחן את תבנית הקרינה האלקטרומגנטית שנפלטת מדיפול חשמלי.

מוליקולה יחידה של אוויר, לדוגמה, היא ניטרלית; בהשפעת שדה חשמלי מועתקים המטענים השליליים לצד אחד של המולקולה, והחיוביים לצד נגדי. כתוצאה מכך נוצר דו-קוטב (דיפול) חשמלי. את תכונות הדיפול נוח לתאר על ידי מומנט דיפול $p = qd$, כאשר q הוא גודל המטענים ו- d הוא המרחק ביניהם.

כאשר מפעילים שדה חיצוני E , אשר משתנה בצורה סינוסואידלית, גם מומנט הדיפול ישתנה באופן סינוסואידלי, והדיפול יקרין קרינה אלקטרומגנטית.

עוצמת הקרינה המשודרת מדיפול חשמלי הינה קבועה בכל מישור שאינו מכיל את ציר הדיפול (לדוגמה המישור שיוצר זווית θ עם הכיוון הניצב לציר הדיפול באיור 8). העוצמה משתנה עם שינוי זווית הנטיה θ של המישור ביחס לציר הדיפול לפי $\cos^2\theta$, כך שהיא שווה לאפס בכיוון הציר ומקסימלית בכל כיוון שניצב לציר הדיפול.



איור 8: הפילוג המרחבי של עוצמת השידור של דיפול חשמלי

קיטוב האור כתוצאה מפיזור מתרחש, אם כך, כאשר השדה החשמלי של הגל האלקטרומגנטי גורם לדיפולים להתנדוד, ואלו קורנים בכיוונים שונים, פרט לכיוון הציר של הדיפול עצמו.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

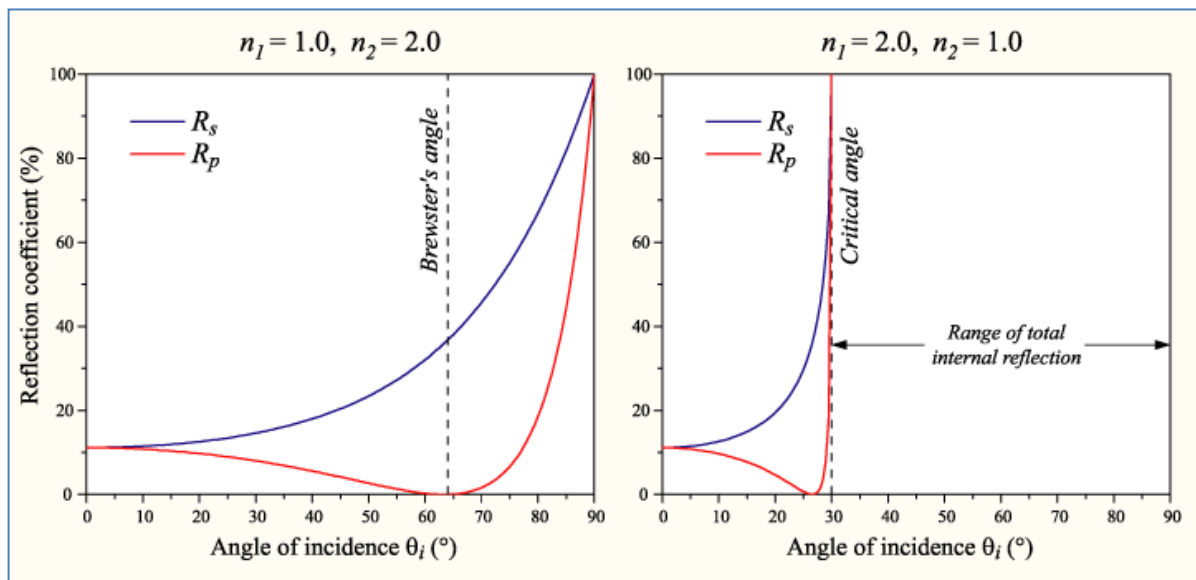
כתוצאה מזה, כאשר אור עובר דרך אוסף של חלקיקים קטנים המרחפים בחלל, האור שיפוזר לכיוונו של צופה שנמצא בכיוון שאינו הכיוון המקורי התפשטות האור, יהיה מקוטב קווית. עוצמתו המקסימלית של האור המקוטב תתקבל בכיוון ניצב לכיוון ההתפשטות המקורי של האור.

3. קיטוב ע"י החזרה; זווית ברוסטר

ההחזרה וההעברה של קרינה אלקטרומגנטית מתרחשת כאשר הקרינה הפוגעת במשטח הגבול נבלעת על ידי דיפולים חשמליים, וכתוצאה מזה הדיפולים מתנוודים ופולטים קרינה מחדש. כיוון התנוודות של הדיפול קובע את כיוון הקיטוב של הקרינה הנפלטת על ידיו, כך שכיוון ההתקדמות של הקרינה מאונך לכיוון התנוודות.

אם השדה החשמלי של קרינה הפוגעת מתנווד במישור הפגיעה, כי אז בזווית שעבורה הקרן העוברת ניצבת לכיוון שבו אמורה להיות קרן מוחזרת, הקרן המוחזרת אמורה להיפלט בכיוון התנוודות של הדיפולים. מכיוון שדיפול אינו יכול לפלוט קרינה בכיוון זה, שום קרינה לא תוחזר. זווית הפגיעה שבה הדבר קורה נקראת זווית ברוסטר על שם הפיזיקאי דייוויד ברוסטר שגילה אותה.

באיור 9 ניתן לראות כיצד משתנים מקדמי ההחזרה של הקיטובים השונים כתלות בזווית הפגיעה. החלק הימני של האיור מתייחס למעבר אור ממקדם שבירה גבוה למקדם שבירה נמוך; ניתן לראות כי החל מזווית פגיעה מסוימת שנקראת זווית קריטית מתרחשת החזרה מלאה – מקדם ההחזרה של האור שמקוטב במישור הפגיעה וגם מקדם ההחזרה של האור שמקוטב בניצב למישור הפגיעה שווים 100%.

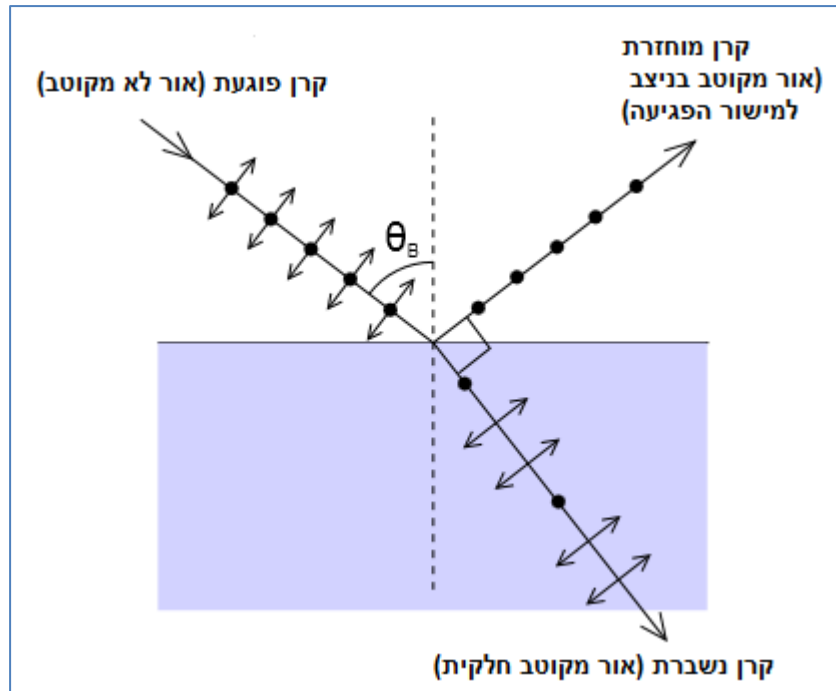


איור 9: מקדמי ההחזרה (עוצמת השדה) עבור הקיטובים השונים במעבר בין תווך בעל מקדם שבירה $n = 1$ לתווך בעל מקדם שבירה $n = 2$.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בחלק השמאלי של האיור ניתן לראות כי בזווית מסוימת, שנקראת **זווית ברוסטר** (Brewster), מקדם ההחזרה של אור מקוטב במישור הפגיעה מתאפס, בעוד שמקדם ההחזרה של אור מקוטב בניצב למישור הפגיעה אינו מתאפס.

זוהי דרך לקבל אור מקוטב על ידי החזרה: מאירים משטח בזווית ברוסטר בקרינה לא מקוטבת, ואז הקרינה שתוחזר תהיה מקוטבת, בקיטוב מאונך למישור הפגיעה (ראה איור 10).



איור 10: קיטוב על ידי החזרה – זווית הפגיעה שווה לזווית ברוסטר.

את זווית ברוסטר אפשר לקבל ממשוואות פרנל - זוהי הזווית שבה מקדם ההחזרה של הקיטוב

המקביל (R_p) חייב להתאפס. הנוסחה המתקבלת היא: $\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

קיימים בטבע גבישים לא איזוטרופיים (אנאיזוטרופיים), שבהם מתקיימת תופעת השבירה הכפולה (double refraction או birefringence). לחומרים אלו יש שני מקדמי שבירה, כך שהאור נע בהם במהירות אחת כאשר הוא מתקדם לאורך ציר מסוים, ובמהירות אחרת בכל כיוון אחר.

דוגמאות לגבישים אנאיזוטרופיים – קלציט (קלציום קרבונט CaCO_3), קוורץ, מיקה וקרח.



איור 11: א. במעבר דרך תווך שיוצר שבירה כפולה (גביש קלציט) האור נע בשני מסלולים בהתאם לקיטוב; ב. דרך מקטב שמוצב בכיוון המתאים עוברת רק "הקרן הרגילה"; ג. כאשר המקטב מסובב ב- 90° עוברת "הקרן החריגה".

מקדם השבירה שמתאים לציר הגביש הוא קבוע ונקרא **מקדם השבירה הרגיל (ordinary refractive index)** ונהוג לסמן אותו ב- n_o ; בכל כיוון אחר מקדם השבירה משתנה בהתאם לזווית בין כיוון האור וציר הגביש. מקדם השבירה שמתאים להתקדמות האור במהירות הנמוכה ביותר או הגבוהה ביותר – בכיוון ניצב לציר הגביש – נקרא **מקדם השבירה החריג (extraordinary refractive index)** ומסומן n_e .

גבישים כאלו נקראים **חד-ציריים (uniaxial crystals)**, והם חד-ציריים חיוביים כאשר $n_e > n_o$, וחד-ציריים שליליים כאשר $n_e < n_o$.

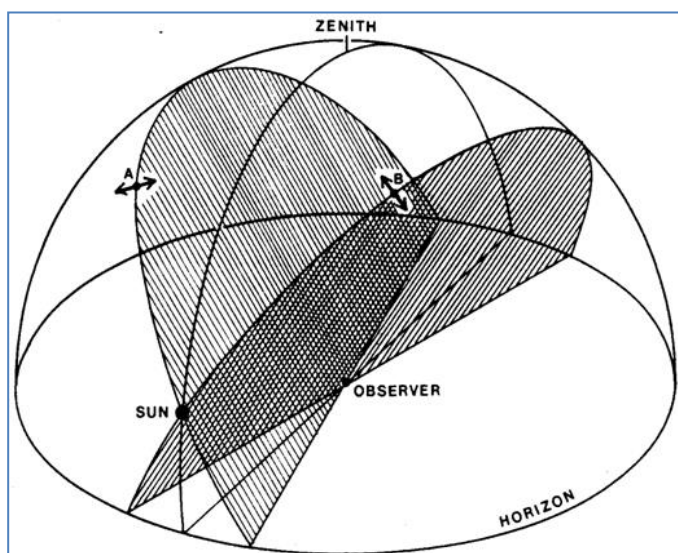
כתוצאה מכך ששני הקיטובים הניצבים נעים בגביש כזה במהירויות שונות, הפאזה היחסית של שני הקיטובים משתנה במהלך המעבר של האור דרך הגביש, או במילים אחרות - מצב הקיטוב של האור משתנה, ומהגביש יוצאות שתי אלומות אור מקוטבות קווית בכיוונים ניצבים (ראה איור 11). אם אחת האלומות תחסם, הגביש יפעל כמקטב.

חישוב השינוי בפאזה היחסית בין שני הקיטובים:

מידת השבירה הכפולה של חומר נקבעת לפי הפרש, Δn , בין מקדמי השבירה: $\Delta n = n_e - n_o$. הפרש זה יוצר הפרש דרכים אופטיות השווה ל- $L(n_e - n_o) = L\Delta n$ כאשר L הוא האורך הכולל של הגביש, כך שהפיגור של הרכיב האיטי ביחס לרכיב המהיר הוא $2\pi L\Delta n/\lambda v$ כאשר λv הוא אורך הגל בואקום.

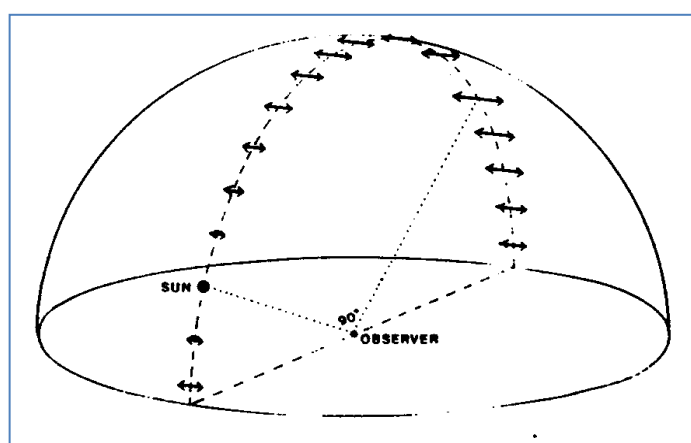
כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בזמן שהשמים בהירים, קיימת רצועה שביחס לכל נקודה בה הצופה רואה את השמש בזווית 90° . אור שמגיע מהרצועה הזו לעיניו של הצופה הוא אור מקוטב.



איור 12: שלשה מבין אינסוף מישורים שמכילים את השמש ואת הצופה

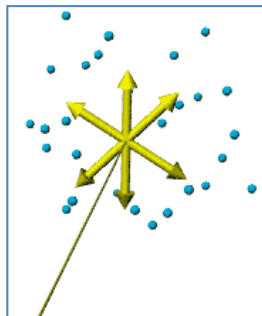
באיור 12 ניתן לראות שתי נקודות שנמצאות על רצועה זו, A ו-B. כיוון הקיטוב של האור בכל אחת מנקודות מאונך למישור שמכיל את הנקודה, את הצופה ואת השמש. כאשר בוחנים מישורים שונים, מתברר כי הקיטוב המכסימלי מתרחש במישור שמכיל את השמש, את הצופה, ואת נקודת הזניט; מידת הקיטוב במישור זה מופיע באיור 13.



איור 13: קיטוב האור בנקודות שונות במישור שמכיל את נקודת הזניט.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

כפי שהוזכר בסעיף קודם, פיזור האור על ידי מוליקולות האוויר הוא הגורם לקיטובו של האור. האור המגיע מהשמש אינו מקוטב; השדה החשמלי מתנודד בכל מיני כיוונים במישור הניצב לכיוון התקדמות האור, כפי שניתן לראות באיור 14.



איור 2: קיטוב האור בנקודות שונות במישור שמכיל את נקודת הזניט.

כתוצאה מכך נגרם במוליקולות האוויר עירור של דיפולים, וגם הם יתנודדו בכל הכיוונים במישור שניצב לכיוון ההתקדמות של האור.

עבור צופה שמביט על החלקיקים מהצד, כיוון התנודות של האור המפוזר ניצב למישור המוגדר על ידי הכיוון של התפשטות האור וכיוון ההסתכלות. כתוצאה מכך, אור שמפוזר ב- 90° יהיה מקוטב לינארית.

דוגמאות ליישומים של תופעת הקיטוב

בין יישומיה המתקדמים יותר של תופעת הקיטוב ניתן למנות את ההדמיה התלת-מימדית ואת טכנולוגיית ה-LCD (Liquid Crystal Display), ששימושיה הראשונים היו שעונים דיגיטליים ומחשבוניים אלקטרוניים, וכיום מבוססים עליה צגי מחשב, ומקרנים למיניהם.

כאן נפרט מעט לגבי שניים מהיישומים הנפוצים – משקפי הפולרואיד וצגי ה-LCD.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

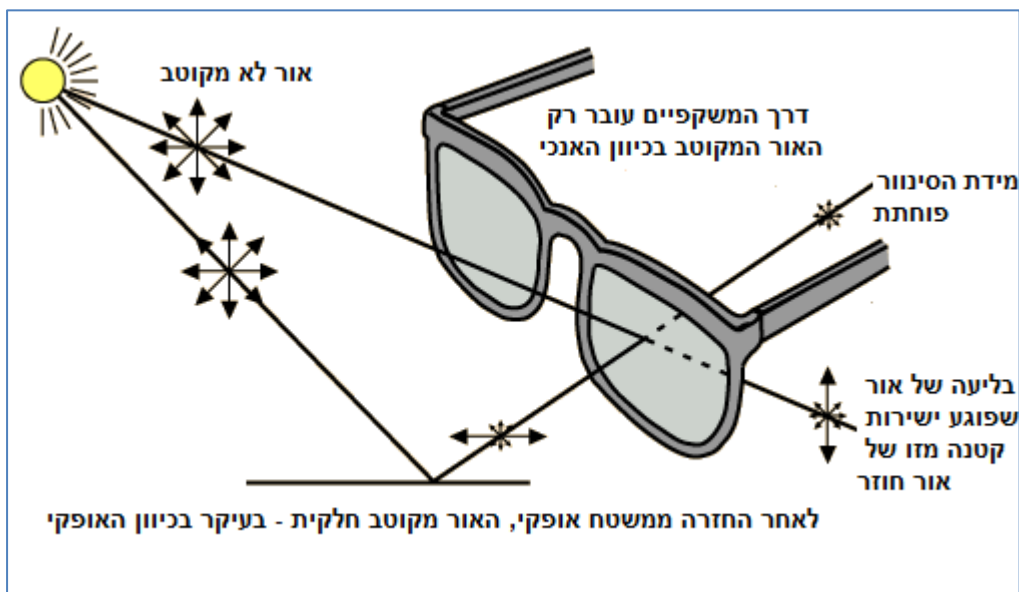
משקפי פולרואיד

משקפיים מקטבים משמשים כדי להקטין את הבוהק מעצמים המחזירים את אור השמש. במשקפיים כאלה נמצא מקטב (פולרואיד) הבולע אור מקוטב אופקית, וכך מקטינים השתקפויות אור ממשטחים אופקיים, בעיקר משטחים חלקים כמו פני מים או משטחים של מכוניות (ראה איור 15).

במשקפיים מקטבים משתמשים בעובדה שבוהק טבעי – כזה שנוצר על ידי החזרה מפני מים, לדוגמה – מכיל בעיקר אור מקוטב בכיוון אופקית. הסיבה לכך קשורה בעובדה שאור השמש מגיע מלמעלה, ומוחזר במקרים רבים ממשטחים אופקיים.

מקדם ההחזרה של הקיטוב המקביל למישור הפגיעה בזוויות פגיעה קטנות הינו נמוך, והולך וקטן ככל שזווית הפגיעה מתקרבת לזווית ברוסטר, כפי שניתן לראות באיור 9.

מכאן, שהאור החוזר ממשטחים אופקיים, מקוטב בעיקר בניצב למישור הפגיעה, כלומר בכיוון האופקי.



איור 15: משקפי פולרואיד; אור שפוגע בזוויות שטוחות מוחזר כשאחד הקיטובים (האופקי) חזק יותר, וזהו הקיטוב שנבלע על ידי המשקפיים

כיוון ההעברה במשקפי פולרואיד הינו הכיוון האנכי, ולכן הם מפחיתים את הבוהק ממשטחים אופקיים.

במצלמות משתמשים באותו עיקרון לצילום תמונות של מים ללא השתקפויות של השמש, כדי לצלם עצמים שנמצאים מתחת לפני המים, או עצמים שנמצאים מעבר לשמשת חלון.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

טכנולוגיית LCD

פירושן של ראשי התיבות LCD הוא: Liquid Crystal Display, כלומר – צג גביש נוזלי.

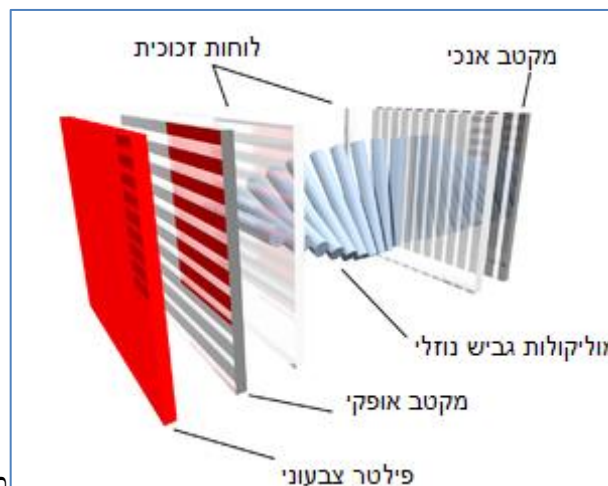
שלשת מצבי הצבירה (Phases) המוכרים הם גז, נוזל ומוצק. גבישים הינם סוג של מוצק, שמאופיינים על ידי סידור מוגדר של המולקולות שלהם; בנוזלים אין סידור מוגדר של המולקולות, מה שגורם להיותם איזוטרופיים - תכונותיהם זהות בכל הכיוונים.

ב-1888 התגלה מצב צבירה חדש, שמהווה מצב ביניים בין נוזל למוצק; מצב צבירה זה ידוע בתור the nematic phase, וחומרים במצב זה נקראים גבישים נוזליים. בגביש נוזלי רמת הסדר של המולקולות היא בדרגת ביניים בין זו של נוזל ובין זו של מוצק: תכונותיו של הגביש הנוזלי תלויות בכיוון, אם כי החומר עצמו הוא נוזלי. מולקולות אופייניות של גביש נוזלי הן בצורה של מוטות, שאורך כל אחד מהם הוא כ-25 אנגסטרם.

כיום ידועות מעל 20,000 תרכובות שקיימת עבורן הפאזה הנמאטית. התכונה החשובה של החומרים הללו היא שניתן לסובב את המולקולות שלהם על ידי שינויים בשדה חשמלי חיצוני שמופעל על החומר.

משמעות העובדה כי התכונות האופטיות של גבישים נוזליים תלויה בכיוון היא שהחומרים הללו הם birefringent – יש להם שני מקדמי שבירה שונים. אור שחודר לגביש נוזלי נמאטי, מתפצל לשתי קרניים - קרן אחת שנעה בכיוון המהיר (ordinary ray) וקרן אחרת שנעה בכיוון האיטי (extraordinary ray). גבישים נמאטיים הם גבישים חד-ציריים חיוביים; לגביש נמאטי אופייני n_o הוא בקירוב 1.5, וההבדל המקסימאלי Δn משתנה בין 0.05 ל-0.5. בהתאם לכיוון הקיטוב של האור ביחס לכיוון של מוליקולות הגביש.

טכנולוגיית ה-LCD היא טכנולוגיה לבניית צגים דקים העשויים ממספר מקטעים. בדרך כלל, כל מקטע מהווה מרכיב צבע אחד מפיקסל (Picture Element). כל מקטע (או תת-פיקסל) בצג מורכב



כימיה וביולוגיה ולהוראה מסחרי, פרסום באתר אחר ית כלשהי של קובץ זה או

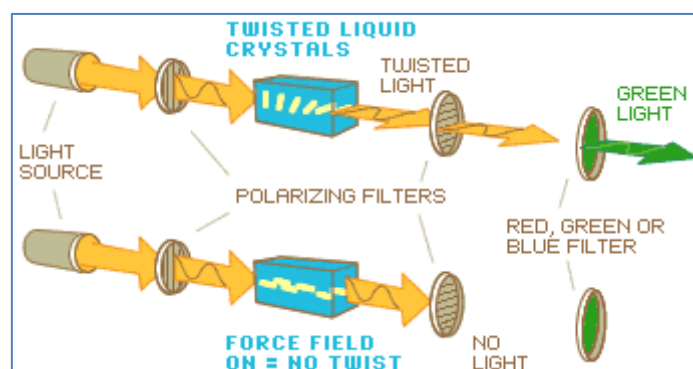
איור 16: סיבוב מישור הקיטוב על ידי גביש נוזלי

כל קובץ המועלה לאתר בכיתותיהם. אין לעשות (למעט אתר בית הספר)

מאוסף מוליקולות של הגביש הנוזלי, הנתונות בין שתי אלקטרודות שקופות (לוחות זכוכית שאליהם מולחמות אלקטרודות מיוחדות), ובין שני מקטבים אשר בדרך כלל מצויים בקיטוב אנכי זה לזה. פני השטח של כל אחד מלוחות הזכוכית טופלו כך שמולקולות הגביש הנוזלי ליד אותו הלוח יסתדרו במקביל לכיוון ההעברה של המקטב הקרוב לאותו הלוח. כיווני המקטבים ניצבים זה לזה, ולכן כיוון המולקולות מאולץ להשתנות בהדרגה ב- 90° (עובר תהליך "פיתול") בין שני צידי התא. (ראה איור 16).

ללא מולקולות הגביש, אור שעובר דרך אחד המקטבים, ייחסם על ידי המקטב השני. אולם שינוי זווית המולקולות גורם לשינוי קיטוב האור, כך שהאור יעבור במקטב השני למרות שהוא ניצב למקטב הראשון. תא כזה יראה בהיר.

כאשר מופעל שדה חשמלי (על ידי מתח באלקטרודות) על תא כזה, יסתובבו המולקולות כתוצאה מהכוח האלקטרוסטטי – הפיתול יבוטל (ראה איור 16). שינוי זווית המולקולות יגרום לשינוי קיטוב האור, כך שהאור ייחסם במקטב; התא יראה שחור. רמת המתח המופעל באלקטרודה שולטת על מידת האור העובר. במילים אחרות: השליטה על הכיוון של המולקולות, ואיתו התכונות האופטיות של החומר, נעשית על ידי הפעלת שדות חשמליים. טכנולוגיה זו נקראת TN (Twisted Nematic).



איור 17: הפעלת שדה חשמלי במקביל לכיוון התקדמות האור מבטלת את הפיתול ומאלצת את המולקולות להמצא בכיוון שבו אינן משפיעות על קיטוב האור

בהמשך פיתוחם של צגי ה-LCD טופלו היבטים כגון שליטה בצבע, זמני תגובה, זווית צפייה בצג, יחס ניגודיות (contrast), ובהירות.

פרט לטכנולוגיית ה-TN קיימות טכנולוגיות נוספות ביניהן – super twisted nematic (STN), active-matrix (AM), Thin Film Transistor (TFT).

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

ג. ערכת פעילויות בנושא הקיטוב - המרכיב היישומי

שיעור חשיפה לנושא הקיטוב

המפגש הראשון בנושא הקיטוב מוקדש לחשיפה לתופעת הקיטוב ולכמה מיישומיה, במטרה לעורר בקרב התלמידים עניין בנושא, ולקדם הבנה ראשונית של התופעה.

החלק הראשון של השיעור נבנה כך שיציג את פריטי הידע הקודם שנלמד בעבר וחיוני לבניית הידע בנושא החדש: מושג הגל המחזורי; המושג גל רוחב; המושג גל אלקטרומגנטי; יצירת גלים אלקטרומגנטיים; הקשר בין עוצמת קרינה ובין האמפליטודה של הגל; שבירת האור כולל המושג מקדם שבירה וחוק סנל; חוק ההחזרה.

המצגת שנכתבה (מצורפת לעבודה זו) מאפשרת לעקוב אחרי הפריטים והרעיונות הללו, בלוי הפניות לסרטוני וידיאו ולסימולציות ממוחשבות, ובשילוב הדגמות שניתן להציג בפני התלמידים באסטרטגיית POE (Predict Observe Explain).

- המקור של הגלים האלקטרומגנטיים הוא מטען חשמלי מואץ; בשלב זה יש הפניה לסימולציה מאתר Phet שבה מוצג האופן בו מטען חשמלי מתנוודד יוצר גל אלקטרומגנטי. <http://phet.colorado.edu/simulations/emf/emf.jnlp>
- מרכיביו השונים של הספקטרום האלקטרומגנטי; בשלב זה יש הפניה לסימולציה <http://www.edumedia-sciences.com/en/a189-electromagnetic-spectrum>
- הגל האלקטרומגנטי - גל רוחב מחזורי, שבו כיוון השדה החשמלי וכיוון השדה המגנטי של גל אלקטרומגנטי מאונכים זה לזה, ושניהם מאונכים לכיוון התפשטות הגל האלקטרומגנטי; בשלב זה יש הפניה לסימולציה <http://www.edumedia-sciences.com/en/a185-transverse-electromagnetic-wave>
- עוצמת הגל נקבעת ע"י המשרעת של השדה החשמלי (או לחילופין ע"י המשרעת של השדה המגנטי).

החלק השני של המפגש כולל את החשיפה עצמה לנושא הקיטוב. התלמידים יצפו בהדגמות בתוך הכיתה ומחוצה לה (ראה נספח ג), וכן בסרטונים שבהם באה לביטוי תופעת הקיטוב: השפעתם של זוג מקטבים על אור שעובר דרכם (הדגמה זו התנהלה בגישת POE); השפעת מקטב על האור המגיע מכיוונים שונים מהשמיים ועל אור המגיע מקשת בענן; צפייה דרך מקטב באור שמוחזר ממשטחי זכוכית שונים, ובמסך LCD; השפעת מקטב על אור שמגיע ממקורן המחובר למחשב.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בהמשך יבוא הסבר (ראה פרק ב – רקע פיזיקאלי) על מהותה של תופעת הקיטוב, על סוגי הקיטוב שונים, ויתנהל דיון על פעולתו של מקטב. בשלב זה מומלץ להדגים את השימוש במקטב של מערכת גלי מיקרו. (ניתן להיעזר בסרטון בנושא מצורף).

היתרון של השימוש במערכת גלי המיקרו קשור למימדיו של המקטב; בגלל סדר הגודל של אורך הגל, המרחק בין מוטות המתכת שמהם המקטב בנוי הוא מסדר גודל של ס"מ, כך שקל לראות כיצד הוא בנוי, בשונה ממקטב לאור.

חלקו האחרון של המפגש יוקדש לסקירה קצרה של יישומים של תופעת הקיטוב.

פעילויות לביצוע על ידי תלמידים

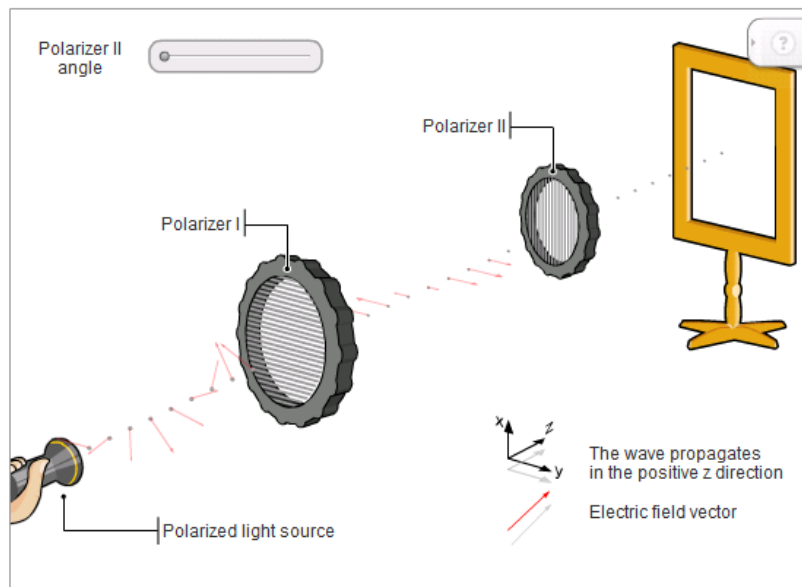
עבודה מול סימולציות

הסימולציה הראשונה עוסקת בתופעת הקיטוב וסוגי הקיטוב באופן כללי.

עבור כל סוג הקיטוב של האור היוצא מהפנס - אליפטי, מעגלי, ולינארי, הסימולציה מאפשרת לתלמיד לבחון כיצד משתנה ההיטל של וקטור השדה החשמלי במישור ניצב לכיוון ההתקדמות של האור במהלך הזמן.

הסימולציה השנייה מציגה את ההשפעה של זוג מקטבים על האור העובר דרכם.

בעבודה עם הסימולציה הזו התלמיד יכול לשנות את הזווית היחסית בין המקטבים, ולעקוב אחרי השינויים בוקטור השדה החשמלי לפני המקטבים, בין שני המקטבים ואחריהם; בנוסף, התלמיד יכול לעקוב אחרי השינויים בעוצמתו של כתם האור שמתקבל על מסך אחרי פעולת המקטב השני (ראה איור 18).



לוגיה ולהוראה יסום באתר אחר של קובץ זה או

איור 18: צילום מסך מסימולציה של פעולת מקטבים

כל קובץ המוכיחותיהם. א (למעט אתר

הסימולציה השלישית עוסקת באופן בו מתרחש קיטוב אור על ידי החזרה ובזווית ברוסטר.

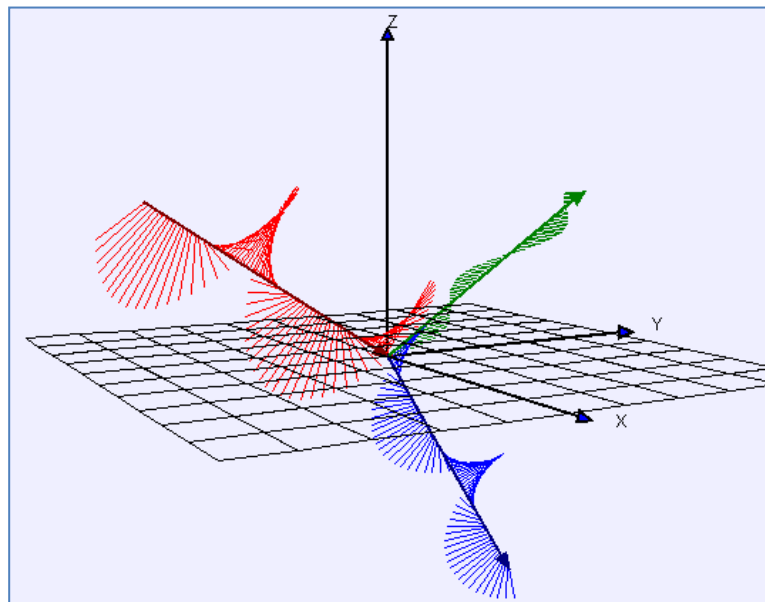
בסימולציה זו התלמיד יכול לבדוק את חוקי ההחזרה והשבירה, את ההחזרה הפנימית המלאה, ואת הקיטוב החלקי או המלא של הגל החוזר, עבור גל אלקטרומגנטי מישורי שמגיע למשטח הגבול שבין שני תווכים (ראה איור 19).

הסימולציה מאפשרת לקבוע את יחס מקדמי השבירה, את משרעת הרכיב בכיוון מקביל למישור הפגיעה ואת משרעת הרכיב בכיוון ניצב למישור הפגיעה, וכן את הפרש המופע שבין שני הרכיבים. ניתן גם להציג את השדה החשמלי הכולל, במקום את רכיביו.

התצוגה היא תלת מימדית, וניתן לסובב את המערכת, להזיז אותה, ולקבל תמונת תקריב. כמו כן ניתן להציג מערכת צירים קרטזית שצמודה למישור הפגיעה ולמשטח הגבול.

הכותבים רואים בפעילויות שמבוססות על עבודה מול הסימולציות הללו כלי שרצוי לשלבו בתהליך ההוראה הללו משני טעמים:

1. תופעת הקיטוב היא תופעה **תלת מימדית ודינאמית**; הסימולציות מספקות ייצוג חזותי דינאמי של תופעת הקיטוב ושל סוגי הקיטוב השונים.
2. גם כאשר מדובר בגל אלקטרומגנטי עם אורך גל מסדר גודל גדול יחסית – כמו, לדוגמה, גלי מיקרו, הרי שבמציאות התלמיד יכול **לראות** בצורה מוחשית רק את השינויים שמתרחשים **בעוצמת הגל**, בעוד שבעזרת הסימולציה הוא רואה **ייצוג של "הגל עצמו"**.



איור 19: צילום מסך מסימולציה של קיטוב על ידי החזרה ובזווית ברוסטר

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הפעילויות נבנו כך שהן כוללות מגוון משימות שהן בגדר **ביצועי הבנה**: התלמיד אמור לנבא מה יקרה כתוצאה פעולות שיבצע על המערכת, לערוך השוואה בין מצבים שונים, לתת הסבר.

דפי תדריך לתלמיד לביצוע פעילויות מול סימולציות – ראה נספח ד'.

תדריכים לניסויים

נכתב תדריך לניסוי המאשר את חוק מאלוס (ראה נספח ה'). הכותבים רואים בניסוי זה ובתוצאותיו הצפויות על פי החוק של מאלוס כלי מתאים להעמקת ההבנה את ההבנה של היבטים כללים בתורת הגלים – ריבוע האמפליטודה כמדד לעוצמה.

תדריכים לעיבוד תוצאות ניסויים מצולמים בווידיאו

מערכת גלי המיקרו הינה שבדרך כלל אינה בהישג יד של תלמידים בבתי הספר. יחד עם זאת קיימים יתרונות לביצוע הניסויים שקשורים לתופעת הקיטוב בתחום זה של גלים אלקטרומגנטיים, שאורך הגל שלהם הוא מסדר גודל כמו של גלי המיקרו.

לעבודה זו צורפו (בדיסק נילוה) צילומי וידיאו של שני ניסויים – ניסוי לאימות חוק מאלוס, וניסוי למציאת זווית ברוסטר. בנספח ו' מצורפים תדריכים לניסויים הללו. התדריכים הינם דפי עבודה שיחולקו לתלמיד, בעזרתם התלמיד יאסוף נתונים ויעבד אותם.

ד. תיאור ההתנסות

נושא הקיטוב, כאמור, אינו נכלל בתכנית הלימודים בפיזיקה בהיקף 5 יחידות לימוד. בשנים האחרונות, תופעת איבוד שעות ההוראה לטובת פעילויות אחרות, מקשה על מורי הפיזיקה להגיע לכלל הפעלה של תכנית הלימודים במלואה.

כמי שמכירים את המגבלות והאילוצים הללו ומנהלים בתוכם את שגרת עבודתנו כמורים, בחרנו לבצע את ההתנסות במתכונת אשר תאפשר לתלמידים לכלול את תוצרי הלמידה שלהם בתיק עבודות שהם נדרשים להציג במסגרת יחידת הבגרות במעבדה. בבחינה עצמה התלמיד נבחן על אחת העבודות, בדרך של הגרלה. העבודה על קיטוב, שכללה שתי פעילויות עם סימולציות וניסוי מעבדה בנושא חוק מאלוס, התווספה למאגר העבודות שעליהן יבחנו התלמידים בבחינת המעבדה.

ההתנסות נערכה בכיתה י"ב בביה"ס התיכון המקיף "בית ירח", עמק הירדן. המעבדה לפיזיקה בבית הספר מצוידת בציוד רב, בחלקו ציוד מתקדם ביותר, כתוצאה של השקעה רבת שנים. בכלל זה קיימות מערכות מדידה ממוחשבות, שאחת מהן היא מערכת של Pasco עם חיישנים שונים, כולל חיישן אור, וספסל אופטי של Pasco. לצורך הפעלת ההתנסות בלימוד נושא הקיטוב, בית הספר נענה לבקשת המורה לפיזיקה (אחת מכותבי העבודה) ורכש במהלך השנה זוג מקטבים מתאימים לספסל האופטי.

ההתנסות התרחשה לאחר אמצע שנת הלימודים, מאחר ולימוד נושא הקיטוב מצריך בסיס ידע שכלול בפרקים מסוימים בתכנית הלימודים (ראה פרק ב), שנלמדים בשלבים מתקדמים של השנה. קבוצה בת 10 תלמידים מתוך כיתה בת 15 תלמידים, לקחה חלק ברמות שונות של ההתנסות. חלקם השתתף רק במפגש החשיפה, מכיוון שבשלב בו ההתנסות התקיימה נוכחות התלמידים בשיעורים מפסיקה להיות רצופה עקב מגוון סיבות, כגון בחינות מתכונת ובגרות במקצועות שונים ובמגמות לימוד שונות, וזימונים לצה"ל.

התקיים מפגש חשיפה לנושא הקיטוב, בליווי מצגת עם הפניות לאנימציות וסימולציות (מצורפת בדיסק נלווה לעבודה זו), והדגמות במעבדה ומחוצה לה, לפי המתכונת המוצעת במסגרת עבודה זו.

בהמשך התלמידים ביצעו את שתי הפעילויות הראשונות שמבוססות על סימולציות, המוזכרות בפרק ב. הפעילות השלישית לא נכללה בהתנסות, מכיוון שבמסגרת ההתנסות, נושא הקיטוב על ידי ההחזרה נלמד באופן איכותי, בלי ההיבט הכמותי שכולל את זווית ברוסטר.

החלק האחרון של ההפעלה כלל ביצוע של ניסוי חוק מאלוס (ראה תדריך בנספח ה), באור ובגלי מיקרו; התלמידים סיכמו את הניסוי בדו"ח מעבדה.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

ה. משוב והערכה

הערכת ההתנסות שהתבצעה עם תלמידים

התכנים הנדרשים כחלק מהידע המוקדם לנושא הקיטוב נלמדים בשלבים מתקדמים של השנה בכתה י"ב, תקופה שבה הנוכחות של התלמידים בביה"ס איננה סדירה, מה שהקשה על ביצוע ההתנסות ועל הערכתה.

מתוך עשרה תלמידים שנחשפו לנושא הקיטוב, ארבעה בחרו לבצע את הפעילויות שהוצגו בפניהם ולכלול את הנושא בתיק העבודות שעליהם להציג כחלק מיחידת המעבדה בבחינת הבגרות. עם שניים מהם התקיימו ראיונות (ראה נספח ח') כמשוב על תהליך הלמידה שעברו.

הראיונות התבססו על סדרת שאלות שנכתבו מלכתחילה במבנה של שאלון (ראה נספח ז').

מהראיונות עולה כי רמת ההיכרות הקודמת של התלמידים עם הנושא היתה נמוכה, וכי שניהם רואים בנושא הקיטוב עצמו נושא **מעניין וחשוב**. שני התלמידים סבורים כי הזמן שהוקדש ללימוד הנושא לא היה זמן מבוזבז, למרות שהנושא אינו נכלל בחומר לבחינת הבגרות העיונית; יתרה מזאת, שניהם מתנגדים לגישה לפיה יש לעסוק במסגרת שיעורי הפיזיקה **רק בתכנים שקשורים לבחינת הבגרות**. הנקודה הזו באה לביטוי בצורה מודגשת בדבריו של תלמיד א', שמתלונן כי " הנושאים שלומדים לבגרות די מוגבלים".

תלמיד א מציין בצורה מפורשת את **הקשר** בין ידע שלמד בנושא ההתאבכות והעקיפה לבין ידע שרכש במסגרת לימוד נושא הקיטוב; הוא מדגיש את חשיבות הנושא וההצדקה לעסוק בו למרות אילוץ הזמן, בגלל **התרומה של הנושא להבנה של נושאים אחרים**.

שני התלמידים מתייחסים אל חשיבותו של המימד **הביצועי** בלמידה, ובפרט את עיבוד הנתונים של ניסוי כהליך שמסייע להבנה.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מחקרים מראים שהידע של התלמידים מקוטע; הם לא יוצרים קשרים בין: פיסות של תיאוריה, מושגים ורעיונות שנרכשו בתחומי ידע שונים, ידע שנלמד בזמנים שונים, ידע שנלמד בפעילויות שונות, רמות שונות של פירוט (מיקרו ומקרו). על פי הספרות המחקרית ידע מקוטע מקשה על זכירה של החומר (Eylon & Reif, Bagno & Eylon), הבנת מושגים (de Jong, Eylon & Reif), פתרון בעיות (Larkin, Chi et al, Heller&Reif), טרנספר מתחום אחד לשני (Bagno & Eylon), פתרון בעיות (Larkin, Chi et al, Heller&Reif), טרנספר מתחום אחד לשני (Salomon & Perkins).

על הרקע הזה, הצגנו בפני תלמידים בכתה י"ב לאחר שסיימו את לימוד הנושא חשמל ומגנטיות שאלה, אודות הקשר שיש לדעתם בין נושא החשמל והמגנטיות ובין נושאים אחרים שלמדו בפיזיקה (ראה נספח ג). מספר התלמידים שהשיבו לשאלה היה 17, 11 תלמידים מקבוצה I - שנחשפה לנושא הקיטוב, ו-6 תלמידים מקבוצה II, שלא נחשפה לנושא הקיטוב. התברר כי רוב התלמידים (70%) סבורים כי יש קשר בין נושא הגלים ובין נושא החשמל והמגנטיות, כאשר בקרב תלמידי קבוצה I, שיעור התלמידים שסבורים כך היה גבוה (82%) בהשוואה לתלמידי קבוצה II (50%). יחד עם זאת, בשתי הקבוצות רוב התלמידים (64% בקבוצה I ו-83% בקבוצה II) היו סבורים כי אין קשר בין נושא האופטיקה ובין נושא החשמל והמגנטיות.

אנחנו ממליצים על שילוב המסגרת שבה התנסו בהוראה, גם אם בהיקף מינימאלי, בגלל מכלול היתרונות שנרמז עליהם בחלקה השונים של עבודה זו; חשיפת התלמידים לנושא הקיטוב מהווה הזדמנות ללימוד נושאים שהם מעבר לנושאים הנלמדים כחלק מתוכנית הלימודים (במסגרת ההכנה לבגרות) מחד, ומאפשרת ליצור רשת קשרים עשירה יותר בין מושגים ורעיונות פיזיקאליים שנלמדים במסגרת תכנית הלימודים מאידך.

המסגרת המתאימה, לדעתנו, להפעלת החומרים שפותחו בהיקף רחב יותר, היא מסגרת פל"א - פיזיקה לומדים אחרת, שנוצרה לאחרונה ביוזמת המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן, וזכתה לתמיכת הפיקוח על הוראת הפיזיקה בארץ. מטרתה המרכזית של מסלול פל"א היא ללמד פיזיקה בגישה מבוססת חקר, מתוך כוונה להגביר את המוטיבציה והעניין של התלמידים בלמידת הפיזיקה.

פעילויות החשיפה וההדגמות אשר כלולות בערכה יכולות לשמש בתור "הזמנה לחקר", במונחי מסגרת פל"א. שני התלמידים ציינו כי היו שמחים להרחיב את הידע על נושא הקיטוב; תלמיד א מצוין בצורה מפורשת כי בעקבות ההדגמות שבוצעו בשלב החשיפה, נשארו שאלות שנראות מעניינות והיה רוצה ללמוד עליהן. מסגרת פל"א מעודדת את מורי הפיזיקה לארגן את ההוראה כך שתלמידים יבצעו חקר בהיקפים שונים, החל מחקר מודרך וכלה במיני-פרוייקטים ובפרוייקטים.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

על מנת להכשיר מורים לשילוב נושא הקיטוב במגוון רמות בהוראה שלהם, ניתן לקיים השתלמות בהיקף של יומיים. ההשתלמות תכלול לימוד של הרקע התיאורטי של נושא הקיטוב ברמה אקדמית, וכן הכרות עם הפעילויות שפותחו עבור תלמידים והתנסות בהן.

נספח א: תיאור מתמטי של תופעת הקיטוב

חשבון מטריצות ג'ונס מתאר קיטובים על ידי וקטורים, ואלמנטים אופטיים המשפיעים לינארית על הקיטוב (כמו לוחיות גל ומקטבים) - באמצעות מטריצות.

תיאור מצבי קיטוב בעזרת וקטורי Jones

נתייחס לקרן אור, או לגל אלקטרומגנטי מישורי שמתקדם בכיוון z , אשר וקטור השדה החשמלי הרגעי שלו נתון על ידי

$$\vec{E}(k, t) = \hat{i} E_x(k, t) + \hat{j} E_y(k, t)$$

כאשר

$$E_y = E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \varphi_y)}, \quad E_x = E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)}$$

בהצגה אחרת – שילוב הרכיבים:

$$\vec{E} = \hat{i} E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)} + \hat{j} E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \varphi_y)}$$

או

$$\vec{E} = \left[\hat{i} E_{0x} e^{i\varphi_x} + \hat{j} E_{0y} e^{i\varphi_y} \right] e^{i(kz - \omega t)}$$

$$\vec{E} = \tilde{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

האיברים בסוגריים או \tilde{E} מייצגים את האמפליטודה המרוכבת של הגל המישורי.

מצב הקיטוב של האור נקבע על ידי האמפליטודות היחסיות (E_{0x}, E_{0y}) , הפאזות היחסיות של $(\delta = \varphi_y - \varphi_x)$ הרכיבים הללו.

את האמפליטודה המרוכבת ניתן לכתוב כמטריצת שני אלמנטים – וקטור Jones

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} = e^{i\varphi_x} \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} e^{i\delta} \end{bmatrix}$$

• וקטור Jones של אור מקוטב (לינארית) אופקית:

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

תנודות השדה החשמלי הן רק לאורך ציר x, כלומר:

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} e^{i\varphi_x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ 0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

כאשר לוקחים את הפאזה $\varphi_x = 0$ לשם נוחות. הצורה המורמלת היא: $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$.

• וקטור Jones של אור מקוטב (לינארית) אנכית:

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

תנודות השדה החשמלי הן לאורך ציר y בלבד, כלומר: $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ כאן הפאזה $\varphi_y = 0$, והצורה המנורמלת היא $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

• וקטור Jones של אור מקוטב קווית בכיוון כלשהו:

$$\frac{E_{0x}}{E_{0y}} = (-1)^m \frac{E_{0x}}{E_{0y}}$$

כאשר הפאזה ממשית הפרש הפאזה מקיים $\delta = \pi$ או 0, מקבלים $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right)$ במקרה כזה וקטור Jones הוא פשוט קו שנטוי בזווית α שמקיימת

הצורה המנורמלת היא

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{0y} \end{bmatrix} = A(-1)^m \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

• וקטור Jones של אור מקוטב מעגלית:

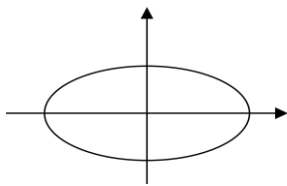
$$E_{0x} = E_{0y} = A \quad \text{וכי } E_x \text{ מקדים את } E_y \text{ ב- } 90^\circ = \frac{\pi}{2}$$

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A e^{i\pi/2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$$

הצורה המנורמלת היא: $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$. כאן הוקטור של השדה החשמלי מסתובב נגד כיוון השעון כאשר האור מתקדם כלפי הצופה; מצב זה נקרא קיטוב מעגלי שמאלי.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad \text{ואז נקבל } \left(-\frac{\pi}{2} \right) \text{ ב- } \frac{\pi}{2} \text{ נחליף את } \frac{\pi}{2} \text{ ב- } \left(-\frac{\pi}{2} \right)$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



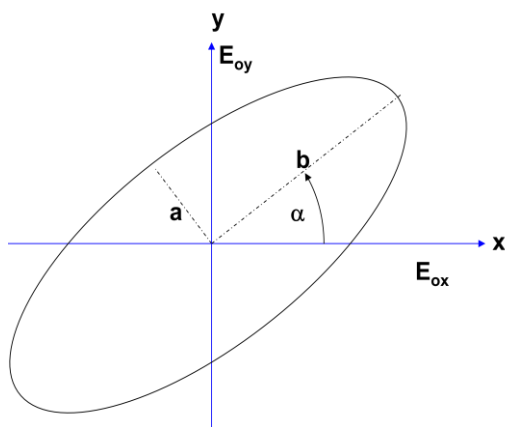
• וקטור Jones של אור מקוטב אליפטית:

$$E_{0y} = B, E_{0x} = A \text{ נרשום: } E_{0x} \neq E_{0y}$$

וקטור Jones שמתאים למקרה כזה:

$$\begin{bmatrix} A \\ -iB \end{bmatrix} \text{ כאשר הסיבוב של וקטור השדה החשמלי הוא נגד כיוון השעון, ו-}$$

וקטור השדה החשמלי הוא עם כיוון השעון.



מה קובע את הצירים הראשיים של האליפסה?

במקרה הכללי, וקטור Jones עבור מקרה כלשהו,

$$\text{שבו } \delta \neq m\pi, \delta \neq (m + 1/2)\pi \text{ יהיה}$$

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} e^{i\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B(\cos \delta + i \sin \delta) \end{bmatrix}$$

כאשר

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}$$

תיאור אלמנטים אופטיים בעזרת מטריצות Jones:

• מקטב לינארי

חוסם באופן סלקטיבי את מרבית התנודות של השדה E פרט לתנודות בכיוון מסוים.

• מטריצת Jones של מקטב לינארי

נניח שכיוון ההעברה של המקטב הוא ציר y. נייצג את

המקטב בעזרת M - מטריצה 2x2, ונפעיל אותה על אור

מקוטב לינארית בכיוון האנכי. האור שעובר יהיה גם כן מקוטב בכיוון האנכי, כלומר:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

כאשר נפעיל את אותו מקטב על אור מקוטב לינארית בכיוון האופקי, נקבל 0 העברה, כלומר:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מכאן $M = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ היא המטריצה שמייצגת מקטב לינארי עם ציר העברה (TA - Transmission Axis) (Axis אנכי).

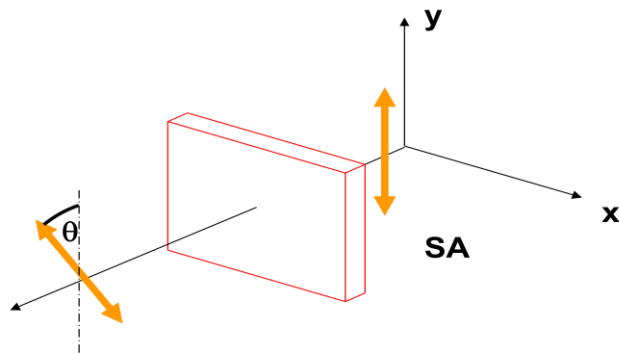
$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} : \theta \text{ בזווית (TA) העברה עם ציר העברה (TA) בזווית } \theta$$

• Rotator

מסובב בזווית מסוימת את כיוון הקיטוב של אור מקוטב לינארי.

• מטריצת Jones של Rotator

וקטור \vec{E} מתנוודד בכיוון θ , מסובב בזווית β . כלומר התנודה תהיה בכיוון $(\beta + \theta)$:



$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta + \theta) \\ \sin(\beta + \theta) \end{bmatrix}$$

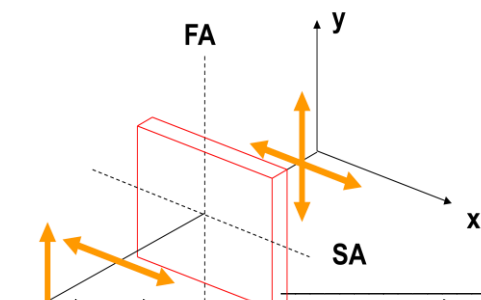
מכאן שהמטריצה $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ במקרה זה היא $M = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$.

• מעכבי פאזה (Phase Retarder)

יוצר הפרש פאזה $\Delta\phi$ בין רכיבים ניצבים – בין הציר המהיר (FA) ובין הציר האיטי (SA).

• מטריצת Jones של מעכב פאזה

המטריצה המבוקשת:



כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

תהפוך את $E_{0x}e^{i\varphi_x}$ ל- $E_{0x}e^{i(\varphi_x+\varepsilon_x)}$

ואת $E_{0y}e^{i\varphi_y}$ ל- $E_{0y}e^{i(\varphi_y+\varepsilon_y)}$

קל להראות כי המטריצה היא $M = \begin{bmatrix} e^{i\varepsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\varepsilon_y} \end{bmatrix}$, כאשר ε_x ו- ε_y הם התזוזה בפאזה של כל אחד מהרכיבים.

• מטריצת Jones של לוחית $\frac{\lambda}{4}$.

כאן $\Delta\varepsilon = \frac{\pi}{2}$. עבור ציר אנכי איטי, ניקח את $\varepsilon_x = -\frac{\pi}{4}$ ו- $\varepsilon_y = \frac{\pi}{4}$. המטריצה שמייצגת לוחית

$$.M = \begin{bmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix} = e^{-i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \text{ כזו היא:}$$

• מטריצת Jones של לוחית $\frac{\lambda}{2}$.

כאן $|\Delta\varepsilon| = \pi$, והמטריצות הן:

$$M = \begin{bmatrix} e^{-i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{bmatrix} = e^{-i\pi/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ עבור ציר איטי (SA) אנכי,}$$

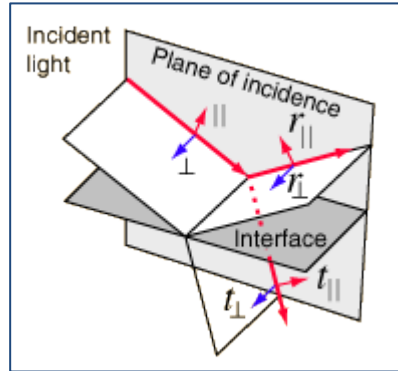
$$M = \begin{bmatrix} e^{i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{bmatrix} = e^{i\pi/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ עבור ציר איטי (SA) אופקי.}$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נספח ב: משוואות פרנל

החישוב מתייחס לגל מישורי שפוגע במשטח גבול אינסופי שטוח ואחיד.

מקדמי החזרה והעברה של משוואות פרנל כתובים בנפרד לכל קיטוב: לחלק הגל המקוטב במקביל למישור הפגיעה, הידוע כקיטוב 'p', ושל חלק הגל המקוטב בניצב למישור הפגיעה, הידוע כקיטוב 's'.



תרשים 1: החזרה והעברה של אור לא מקוטב דרך משטח גבול; הקיטוב הניצב למישור הפגיעה והקיטוב המקביל למישור של הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת והקרן העוברת.

סימונים:

E_{oi} – אמפליטודת הגל הפוגע; E_{or} – אמפליטודת הגל המוחזר; E_{ot} – אמפליטודת הגל העובר.

מקדמי החזרה והעברה של האמפליטודות (השדה החשמלי)

$$r_p = r_{\parallel} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$

$$r_s = r_{\perp} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$

$$t_p = t_{\parallel} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$

$$t_s = t_{\perp} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בעזרת הקשר בין זווית הפגיעה וזווית ההעברה (השבירה) מחוק סנל (Snell's Law), ובעזרת טריגונומטריה, אפשר לקבל את המקדמים כתלות בזוויות בלבד:

$$r_p = r_{\parallel} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}$$

$$r_s = r_{\perp} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$t_p = t_{\parallel} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\parallel} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)}$$

$$t_s = t_{\perp} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

מקדמי ההעברה ומקדמי החזרה מקיימים: $r_p + 1 = t_p$; $r_s - 1 = t_s$.

עוצמת השדה החשמלי מוגדרת כ- $|E|^2$, ולכן הביטויים עבור מקדמי החזרה והעברה הם

$$T_{s/p} = t_{s/p}^2 \quad R_{s/p} = r_{s/p}^2$$

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \left[\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right]^2$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right)^2 = \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right]^2$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

1. השפעת זוג מקטבים על אור "רגיל"

מניחים כל מקטב בנפרד על משטח הזכוכית של מטול שקפים, כאשר אור המטול מוקרן על מסך לבן. מסובבים את המקטבים הנפרדים, כדי לראות שאין שינוי בעוצמת האור.

כעת מניחים את המקטבים האחד על גבי השני, ומסובבים אחד מהם; תוך כדי הסיבוב עוצמת האור משתנה.

2. השפעת מקטב על אור המקרן של המחשב

בעזרת מקרן שמחובר למחשב, מקרינים על מסך ציור של צורה גיאומטרית כלשהי, שנצבעה בצבע לבן. מציבים מקטב בדרכה של אלומת האור היוצאת מהמקרן, ומגלים שתוך כדי סיבוב המקטב משתנה הצבע של האור שמגיע למסך; הדגמה זו ממחישה את העובדה שהאור הנפלט מהמקרן הינו אור מקוטב.

3. השפעת מקטב על אור הנפלט ממסך מחשב

מתבוננים במסך מסוג LCD של מחשב דרך מקטב. כאשר מסובבים את המקטב ניתן לגלות כי האור שנפלט ממסך ה-LCD הוא אור מקוטב.

4. השפעת מקטב על אור מוחזר מלוח זכוכית

מתבוננים בהשתקפויות של ממקורות אור שנמצאים בתוך החדר שמתקבלות בשמשת החלון דרך מקטב; תוך כדי סיבוב המקטב, ההשתקפויות נעלמות ומופיעות לסירוגין, מה שמעיד על כך שהאור החוזר משמשת החלון הוא אור מקוטב קווית.

5. מקטב של גלי מיקרו

מציבים גלאי של גלי מיקרו ומולו משדר. מפעלים את המשדר, ומסובבים אותו או את הגלאי סביב צירו; ניתן לראות כי קריאת הגלאי משתנה, מה שמראה כי הקרינה מקוטבת ליניארית.

מחזירים את המשדר ואת הגלאי למצב בו מתקבלת קריאה מקסימאלית; מכניסים ביניהם סריג מתכתי המתפקד כמקטב קווי, ובודקים את קריאת הגלאי בזוויות שונות של הסריג.

6. קיטוב השמים

בזמן שהשמיים נקיים מעננים, מתבוננים לכיוונים שונים בשמים דרך מקטב. אפשר לגלות שבכיוונים מסוימים האור שמגיע לעיני הצופה הוא אור מקוטב.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נספח ד: דפי פעילות עם סימולציות

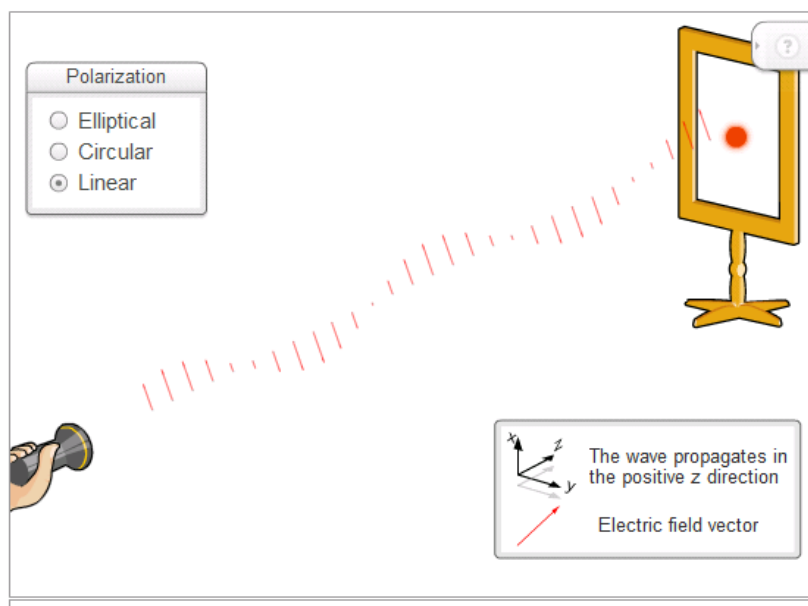
פעילות מבוססת סימולציה בנושא סוגי קיטוב

<http://www.edumedia-sciences.com/en/a454-polarizer>

מבוסס על edumedia,

תיאור הסימולציה:

לאחר בחירת סוג הקיטוב (אליפטי / מעגלי / לינארי) הסימולציה ממחישה את הקיטוב ע"י הצגת השדה החשמלי המתאים והתקדמותו במרחב, החל מיציאתו ממקור אור ועד פגיעתו במסך, והופעת כתם אור על המסך.



אופן השימוש בסימולציה:

בחלק השמאלי העליון של הסימולציה ניתן לבחור את סוג הקיטוב של האור היוצא מהפנס: אליפטי, מעגלי, ולינארי.

כאשר ממקמים את העכבר על וקטור השדה החשמלי המתאים לאור המקוטב (הקווים האדומים) ניתן לראות כיצד משתנה ההיטל של וקטור השדה החשמלי במישור XY במהלך הזמן.

פעילויות

בחר באופציה של קיטוב אליפטי - **Elliptical**, על מנת לבחון את אופן ההשתנות של וקטור השדה החשמלי עם הזמן.

1. מקם את העכבר על הקווים המייצגים את וקטור השדה החשמלי (הקווים האדומים).

תקבל מישור צהוב ועליו יופיע באדום ההיטל של וקטור השדה החשמלי במישור XY.

כיצד משתנה הכיוון וכיצד משתנה גודלו של ההיטל?

2. הגדר את חוקיות השינוי.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

חזור על סעיפים 1 ו-2 עבור האופציות של קיטוב מעגלי (Circular) וקיטוב לינארי (Linear).

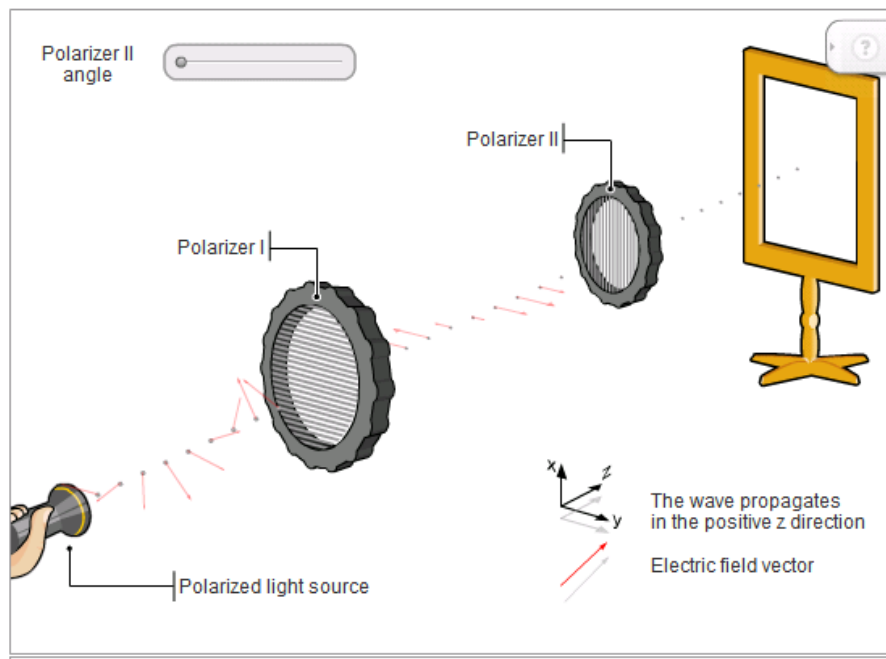
פעילות מבוססת סימולציה בנושא עבודה עם מקטבים

<http://www.edumedia-sciences.com/en/a456-polarization>

מבוסס על: edumedia,

תיאור הסימולציה:

מקור אור פולט אור מקוטב אליפטית, אשר מתקדם לאורך הכיוון החיובי של ציר Z. בשלב הראשון עובר האור דרך מקטב קבוע, והקיטוב הופך להיות קיטוב לינארי. בהמשך עובר האור דרך מקטב נוסף, בו ניתן לשנות את זווית הקיטוב בעזרת גלילה. בסימולציה ניתן לראות את וקטור השדה החשמלי לפני הקיטובים ואחריהם, ואת כתם האור המתקבל (או לא מתקבל...) על מסך אחר פעולת המקטב השני.



אופן השימוש בסימולציה:

כאשר ממקמים את העכבר על וקטור השדה החשמלי המתאים לאור המקוטב (הקווים האדומים) ניתן לראות את היטל וקטור השדה החשמלי במישור XY.

הזזת העכבר מאפשרת לעקוב אחר השתנותו של כיוון וקטור השדה החשמלי.

ניתן לשנות את לשנות כיוונו של המקטב השני ע"י גלילה.

פעילויות

נסה לשער כיצד ישתנה וקטור השדה החשמלי אם המקטב השני יסתובב. _____

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נסה לשער כיצד מושפע כתם אור שיתקבל על המסך במצבים השונים של המקטב השני. _____

כעת סובב את המקטב השני, ותאר כיצד משתנה הגודל וכיצד משתנה הכיוון של וקטור השדה החשמלי; התייחס לכל אחד משלושת האזורים הבאים: מהפנס ועד למקטב הראשון, בין שני המקטבים, ובין המקטב השני למסך. _____

מקם את העכבר על הקווים המייצגים את וקטור השדה החשמלי (הקווים האדומים). תקבל מישור צהוב ועליו יופיע באדום ההיטל של וקטור השדה החשמלי במישור XY, כך שתוכל לעקוב בצורה יותר נוחה אחרי השינויים בכיוונו ובגודלו של היטל זה.

מהי החוקיות של השינוי? התייחס לשלושת האזורים שהוגדרו בסעיף קודם. _____

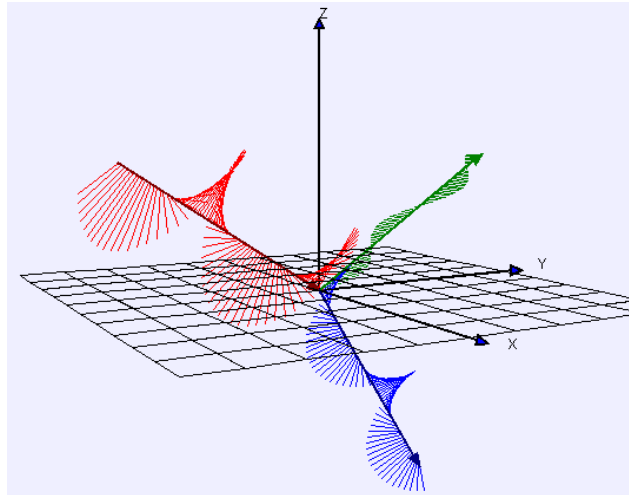
מה קורה לכתם האור על המסך כאשר מסובבים את המקטב השני? _____

מה הזווית של המקטב השני ביחס למקטב הראשון במצב בו לא התקבל כלל אור על המסך? _____

The Open Source Physics Project

Supported by NSF DUE-0442581

<http://www.compadre.org/osp/index.cfm>



תיאוריה:

לפי הכלל של ברוסטר, האור המוחזר מקוטב לינארית בכיוון ניצב למישור הפגיעה (ומקביל למשטח הגבול) אם $\theta_i + \theta_r = \pi/2$, כאשר: θ_i – זווית הפגיעה, θ_r – זווית השבירה.

תיאור הסימולציה:

גל אלקטרומגנטי מישורי מגיע למשטח הגבול שבין שני תווכים.

ניתן לבדוק את חוקי ההחזרה והשבירה, את ההחזרה הפנימית המלאה, ואת הקיטוב החלקי או המלא של הגל החוזר.

אופן השימוש בסימולציה:

בתחתית המסך אפשר לקבוע את יחס מקדמי השבירה n_2/n_1 , את המשרעת בכיוון מקביל למישור הפגיעה ($E_{\parallel} = E_{par}$) ואת המשרעת בכיוון ניצב למישור הפגיעה ($E_{\perp} = E_{per}$). כמו כן ניתן לקבוע את הפרש המופע (δ =delta) שבין שני הרכיבים.

אם בוחרים באפשרות **Total E**, מקבלים את השדה החשמלי הכולל, במקום את רכיבו.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אפשר גם לבחור האם תוצג מערכת צירים קרטזית שצמודה למישור הפגיעה ולמשטח הגבול.

אפשר לשנות את נקודת המבט על התצוגה התלת-מימדית בעזרת העכבר.

אפשר להזיז את התמונה כולה אם לוחצים על **Ctrl** ביחד עם העכבר.

קיימת אפשרות לתקריב (zoom), לשם כך יש לחוץ **Shift** בזמן שמזיזים את סמן העכבר למעלה או למטה.

על כל אחד מכפתורי השליטה על הסימולציה ניתן לקבל מידע אם מניחים את הסמן של העכבר על אותו הכפתור.

מהלך הפעילות

בחר ב-**Incidence** כדי לבדוק ששלוש הקרניים נמצאות באותו המישור.

קבע ערכים זהים למשרעת בכיוון המקביל למישור הפגיעה ולמשרעת בכיוון הניצב למישור הפגיעה ($E_{par}=E_{per}$), והפרש מופע $\delta = 90^\circ$, כך שהאור הפוגע יהיה מקוטב מעגלית.

על ידי שינוי זווית הפגיעה, בדוק את החוק של ברוסטר.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נספח ה: תדריכים לניסויים

תדריך לניסוי חוק מאלוס

תיאוריה

כאשר אור עובר דרך זוג מקטבים, אשר הזווית בין כיווני ההעברה שלהם היא θ , עוצמת האור המועבר, I' , נתונה ע"י $I' = I_0 \cos^2 \theta$, כאשר I_0 היא עוצמת האור שעבר דרך המקטב הראשון.

מערכת הניסוי

מקור אור מוצב על ספסל אופטי, ובהמשך זוג מקטבים, וחיישן אור המחובר למחשב.

מהלך הפעילות

הציבו את מקור האור על הספסל האופטי ומולו את זוג המקטבים כך שכיווני הקיטוב שלהם מקבילים. בהמשך למקטבים הציבו את חיישן האור.

סובבו את אחד המקטבים ב- 10° , ורשמו את הקריאה של חיישן האור.

חזרו על הפעולה כאשר הזווית גדלה ב- 10° בכל פעם, עד 180° .

עיבוד הנתונים

הציגו גרפים של:

תלות העוצמה בזווית, תלות העוצמה ב- \cos הזווית, ותלות העוצמה ב- \cos^2 של הזווית.

השוו את הגרפים עם התיאוריה.

נספח ו: תדריכים לניסויים מצולמים בוידאו

ניסוי א: חוק מאלוס בגלי מיקרו

בדיקת התלות בין תגובת הגלאי לזווית של המשדר ביחס לגלאי

בחלק זה נצפה בצילום של ניסוי בו נבדק הקשר בין קריאת הגלאי לבין הזווית בה מסובב המשדר ביחס לגלאי.

במצב ההתחלתי גם אנטנת המשדר וגם אנטנת הגלאי אופקיות.

נסובב את המשדר בקפיצות של 10 מעלות בכל פעם, עד השלמת סיבוב של 180 מעלות.

בכל שלב נבדוק מהי קריאת הגלאי.

א. עקוב אחר קריאת הגלאי ורשום אותה בעמודה המתאימה.

זווית ההטייה α	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	0
ערך נמדד בגלאי																		
$\text{Cos}^2\alpha$																		

ב. אבחן את מגמת השינוי, הקף את הברירה המתאימה (פוחתת/גוברת) ואת הערך החסר:

- העוצמה פוחתת / גוברת מ-0 מעלות עד ___ מעלות.

- העוצמה פוחתת / גוברת מ ___ מעלות עד 180 מעלות.

ג. חשב את ערכי $\text{Cos}^2\alpha$ עבור כל אחת מהזוויות.

ד. הצג גרף של העוצמה כתלות ב- $\text{Cos}^2\alpha$.

ה. איזו מסקנה ניתן להסיק מהגרף? השוו לתיאוריה.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

ניסוי ב: מציאת זווית ברוסטר בגלי מיקרו

בניסוי זה נבדוק כיצד משתנה עוצמת הגל המוחזר ממשטח מישורי אנכי במצבי קיטוב שונים של הגל המשודר.

בחלק הראשון הגל המשודר מקוטב בכיוון אנכי.

בחלק השני נסובב את המשדר ב-90 מעלות על מנת שהגל המשודר יהיה מקוטב בכיוון אופקי.

בכל אחד מחלקי הניסוי נשנה בהדרגה את זווית הפגיעה, נמצא את הזווית בה ההחזרה מירבית, ונמדוד את עוצמת הגל המוחזר באותה זווית.

חלק א – קיטוב אנכי.

1. השלם את הנתונים הבאים בעזרת התוצאות המוצגות בניסוי המצולם.

55	50	45	40	35	30	זווית הפגיעה
						זווית ההחזרה עבור עוצמה מירבית
						עוצמת הגל המוחזר

2. שרטט גרף של עוצמת הגל המוחזר כפונקציה של זווית ההחזרה.

3. שים לב שאין זווית עבורה עוצמת הגל המוחזר היא אפס.

חלק ב – קיטוב אופקי.

השלם את הנתונים הבאים בעזרת התוצאות המוצגות בניסוי המצולם.

55	50	45	40	35	30	זווית הפגיעה
						זווית ההחזרה עבור עוצמה מירבית
						עוצמת הגל המוחזר

1. שרטט גרף של עוצמת הגל המוחזר כפונקציה של זווית ההחזרה.

2. מהי הזווית עבורה עוצמת הגל המוחזר היא אפס? _____

זווית זו הינה "זווית ברוסטר", הזווית עבורה הגל המקוטב אופקית לא מוחזר.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

3. הסבר כיצד ניתן להשתמש במשקפי פולארויד להפחתת הסנוור הנגרם כתוצאה מהחזרת אור מאגם או מהים. האם יש לתכנן את המשקפיים כך שיחסמו אור מקוטב אופקי או אנכי?

נספח ז: שאלוני המשוב לתלמידים

שאלון משוב של התלמידים

(1) ציין/ני באיזו מידה הינך מסכים/מה עם כל אחד מההיגדים הבאים; (4) – מסכים, (1) לא מסכים.

(1)	(2)	(3)	(4)	
				תופעת הקיטוב היתה מוכרת לי לפני שעסקנו בה בשיעורי פיזיקה
				ההכרות עם נושא הקיטוב תרמה להבנתי בנושא הגלים באופן כללי
				נושא הקיטוב הוא נושא חשוב לדעתי
				נושא הקיטוב הוא נושא מעניין בעיני
				הזמן שהוקדש ללימוד על נושא הקיטוב היה זמן מבוזבז
				אני מקווה שהניסוי עליו אבחנו בבחינת המעבדה יהיה בנושא הקיטוב
				הייתי רוצה להעמיק את ידיעותי על נושא הקיטוב
				במסגרת שיעורי הפיזיקה צריך לעסוק רק בתכנים שקשורים לבחינת הבגרות

(2) ציין/ני מהי מידת התרומה של כל אחת מהפעילויות הבאות להבנת נושא הקיטוב:

מזגת חשיפה לנושא הקיטוב	גבוהה	בינונית	נמוכה	הערות
הדגמות במעבדה (*)				
הדגמה מחוץ למעבדה (התבוננות בשמים דרך מקטב)				
פעילויות מבוססות סימולציה				
ניסוי חוק מאלוס				

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

(*) ההדגמות:

השפעת זוג מקטבים על אור "רגיל"
השפעת מקטב על אור המקרן של המחשב
השפעת מקטב על אור הנפלט ממסך מחשב
השפעת מקטב על אור מוחזר מלוח זכוכית.

נספח ח': תוכן הראיונות עם התלמידים

תלמיד א:

ש: ציין מהי מידת ההסכמה שלך עם כל אחד מההיגדים הבאים, ונסה לנמק אותה:

- 1) תופעת הקיטוב היתה מוכרת לי לפני שעסקנו בה בשיעורי פיזיקה
- 2) ההכרות עם נושא הקיטוב תרמה להבנתי בנושא הגלים באופן כללי
- 3) נושא הקיטוב הוא נושא חשוב לדעתי
- 4) נושא הקיטוב הוא נושא מעניין בעיני
- 5) הזמן שהוקדש ללימוד על נושא הקיטוב היה זמן מבוזבז
- 6) אני מקווה שהניסוי עליו אבחן בבחינת המעבדה יהיה בנושא הקיטוב
- 7) הייתי רוצה להעמיק את ידיעותי על נושא הקיטוב
- 8) במסגרת שיעורי הפיזיקה צריך לעסוק רק בתכנים שקשורים לבחינת הבגרות

ת:

- 1) (2)
- 2) (3); דוגמה ראשונה - דרך העבודה עם המקטב של גלי המיקרו הבנתי לא רק את מנגנון הקיטוב של גל אלקטרומגנטי, אלא גם את אופן היצירה של גל אלקטרומגנטי. דוגמה שניה – ההתאמה בין מימדי המקטב של גלי מיקרו ובין אורך הגל השתלבה עם מה שידעתי על ההתאמה בין מימדי החריצים ובין אורך הגל בתופעות ההתאבכות והעקיפה.
- 3) (4); בגלל התרומה להבנה של נושאים אחרים.
- 4) (2); אופטיקה וגלים הכי פחות מעניינים בעיני, כי זה הכי פחות מתקשר לנושאים בחזית המדע, או שאני עדיין לא מבין איך זה מתקשר.
- 5) (1); הנימוק כמו ב-3).
- 6) (3); התוצאות יצאו ברמת דיוק פחות טובה מאשר בניסויים אחרים. מצד שני מערכת הניסוי יציבה ונוחה.
- 7) (3); לא כל כך הבנתי איך הקיטוב של הקשת בענן קורה.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

8) (1); הנושאים שלומדים לבגרות די מוגבלים. אני מרגיש שאני לומד אותם דברים שלמדו לפני 20 שנה, וכאילו המדע לא מתקדם; אנחנו לא נוגעים בדברים שבחזית המדע, לרוב את רק רומזת עליהם (יחסות, קוונטים, חלקיקים), כי אין זמן להיכנס לזה. חבר טוב שלי לומד באנגליה [תלמיד א למד באנגליה עד כתיב ט'], את המכניקה שלמדנו הוא למד בתור Applied Math, והפיזיקה היא יותר כמו ללמוד ביולוגיה, ללמוד על הרבה עובדות ולא רק מתמטיקה. אין שם מיקוד. יש לי ספר חזרות שלהם; הוא כולל הכל, כל מה שיוורד לנו במיקוד – גזים אידיאליים, תנועה הרמונית, קיטוב, אסטרופיזיקה, חלקיקים (אנטי חומר, קווארקים), דואליות החומר שלדעתי היה חסר לנו. כיתת הלימוד בנויה מתלמידים שימשיכו במדעים או בהנדסה.

ש: ציין/ני מהי מידת התרומה של כל אחת מהפעילויות הבאות להבנת נושא הקיטוב:

הערות	נמוכה	בינונית	גבוהה	
עדיין לא הרגשתי שאני מבין מה זה קיטוב		+		מצגת חשיפה לנושא הקיטוב
		+		הדגמות במעבדה (*)
בשלב הזה הבנתי כבר מה הולך			+	הדגמה מחוץ למעבדה (התבוננות בשמים דרך מקטב)
ויזואלית רואים איך הוקטור משתנה, ומה קורה לעוצמה			+	פעילויות מבוססות סימולציה
בהכנת הדו"ח, כשמעבדים גרפים בחלק המעשי של הנושא זה עוזר להבנה.			+	ניסוי חוק מאלוס

תלמיד ב:

ש: ציין מהי מידת ההסכמה שלך עם כל אחד מההיגדים הבאים, ונסה לנמק אותה:

- 1) תופעת הקיטוב היתה מוכרת לי לפני שעסקנו בה בשיעורי פיזיקה
- 2) ההכרות עם נושא הקיטוב תרמה להבנתי בנושא הגלים באופן כללי
- 3) נושא הקיטוב הוא נושא חשוב לדעתי
- 4) נושא הקיטוב הוא נושא מעניין בעיני
- 5) הזמן שהוקדש ללימוד על נושא הקיטוב היה זמן מבוזבז
- 6) אני מקווה שהניסוי עליו אבחן בבחינת המעבדה יהיה בנושא הקיטוב
- 7) הייתי רוצה להעמיק את ידיעותי על נושא הקיטוב
- 8) במסגרת שיעורי הפיזיקה צריך לעסוק רק בתכנים שקשורים לבחינת הבגרות

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

ת:

- (1) (2); ידעתי שקיים, לא ידעתי מה זה.
(2) (2); ניסיתי לעשות השוואה עם מה שלמדנו על גילוי האפקט הפוטואלקטרי; הידיעה שאור מונוכרומטי מקוטב גרמה לי להבין את הקשת.
(3) (4);
(4) (4);
(5) (1); מההיבט של בחינת הבגרות זה זמן מבוזבז, מבחינת הידע – לא.
(6) (1);
(7) (3);
(8) (1);

ש: ציין/ני מהי מידת התרומה של כל אחת מהפעילויות הבאות להבנת נושא הקיטוב:

הערות	נמוכה	בינונית	גבוהה	
הרבה דוגמאות ויזואליות			+	מצגת חשיפה לנושא הקיטוב
			+	הדגמות במעבדה (*)
די התקשיתי לראות מה שאחרים ראו	+			הדגמה מחוץ למעבדה (התבוננות בשמים דרך מקטב)
			+	פעילויות מבוססות סימולציה
התופעה מורכבת, אני מבין יותר את מה שהניסוי מראה			+	ניסוי חוק מאלוס

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

Kickbusch K., Teaching for Understanding: Educating Students for Performance
<http://learnweb.harvard.edu/alps/tfu/index.cfm>

Perkins D., Teaching For Understanding, the American Educator, the quarterly journal of the American Federation of Teachers, v17 n3, pp. 8,28-35, Fall 1993

החומר לרקע הפיזיקלי התיאורטי נלקח מהמקורות:

1. Allan A. Mills, Polarization of Light from the Sky, and its application to timetelling and Navigation, Bulletin of the Scientific Instrument Society, No. 33, pp. 8-14 (1992)
2. Hecht E., Optics, 4th Edition, Eddison Wesley
3. מבוא לאופטיקה קלאסית ומודרנית, כרך ב, האוניברסיטה הפתוחה 1997

וכן מהאתרים הבאים:

1. Liquid Crystal Group, Department of Physics, University of Colorado,
<http://bly.colorado.edu/lcphysics/lcintro/>
2. PLC- Polymers & Liquid Crystals,
<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/textbook.htm>
3. History and Properties of Liquid Crystals,
http://nobelprize.org/educational/physics/liquid_crystals/history/
4. http://people.seas.harvard.edu/~jones/es151/prop_models/propagation.html
5. HyperPhysics, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>