

פרק 1 : תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים

שעות	הנושא
3	1.1 ראיית עצמים, אפיון האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים
4	1.2 החזרת אור : חוקי ההחזרה, דמות במראה מישורית
7	1.3 שבירת אור : חוקי השבירה, החזרה חלקית ומלאה
5	1.4 עדשות כדוריות דקות : מהלך האור ויצירת דמויות
19	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
3	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמות : מבנה העין ; יצירת דמות של הנוף המשתקף מחלון (על מסך כגון קיר) באמצעות עדשה. - הדגמה : הצגת מקורות אור שונים. - הדגמה : חיתוך בין שתי אלומות אור. - הדגמה : הצגת אלומות אור שונות והצגת הקשר בין תבניות האור לייצוג הגרפי. - הדגמה : היווצרות צל וצללית. 		<ul style="list-style-type: none"> - מבנה העין ותנאים לראייה. - מקורות אור וגלאי אור. - אפיונים ראשוניים למהות האור : אור כנושא אנרגיה, התפשטות וכיוונית (יצירת צל), בדיקת אינטראקציה בין אור לאור ובין אור לחומר, אפיון גופים לפי תגובתם לאור (החזרה, בליעה, העברה), האם לאור יש מסה? ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים : • הכרת המושגים : "מקור אור נקודתי", "קרן", "אלומה" ואפיון אלומות אור שונות. • שימוש בתשימי קרניים לאיתור צל. 	1.1 ראיית עצמים, אפיון האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : החזרה של אלומה צרה ואלומה מתפזרת. - הדגמה : המחשת המושג "דמות מדומה" ואיתור מקומה (בעזרת מראה מישורית ושני נרות). 	זווית פגיעה = זווית החזרה	<ul style="list-style-type: none"> - מושגים : "קרן פוגעת", "קרן מוחזרת", "אנך למישור המראה", "זווית הפגיעה", "זווית ההחזרה". חוקי ההחזרה. - "דמות" של עצם במראה מישורית : <ul style="list-style-type: none"> • בניית מהלך האור ואיתור הדמות של עצם נקודתי. • הקשר בין רוחק העצם הנקודתי לרוחק דמותו. • בניית דמות של עצם קווי. • התנאים לראיית "דמות מדומה", "שדה ראייה". 	1.2 החזרת אור : חוקי ההחזרה, דמות במראה מישורית

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
7	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: שינוי מהלכה של אלומת אור צרה הפוגעת במשטח גבול בין תווכים שקופים (אוויר/נוזל/ מוצק). - ניסוי: חקירת תלות זווית השבירה בזווית הפגיעה. - הדגמה: ראיית מוט זכוכית בתוך אוויר ומים ויהיעלמותו בגליצרוֹל. - הדגמה: החזרה מלאה במנסרה ובסיב אופטי. - הדגמה: נפיצה במנסרה. 	$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$	<ul style="list-style-type: none"> - התופעות המלוות את פגיעת האור במשטח גבול בין תווך שקוף אחד למשנהו: אור מוחזר ואור מועבר. - חוקי השבירה. - המושג "מקדם השבירה" של חומר ביחס לריק. - המושג "זווית גבול", תופעת "ההחזרה המלאה". - מעבר אור במנסרה, "זווית ההסחה". - תופעת ה"נפיצה" ומשמעותה. 	<p>1.3</p> <p>שבירת אור: חוק השבירה, החזרה חלקית ומלאה</p>
5	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: עדשות כדוריות שונות – מבנה ומוקד. - הדגמה: מהלך 'קרן', אלומה מקבילה ואלומה מתפזרת בעדשות מרכזות ומפזרות. - ניסוי: חקירת עדשה מרכזת - הקשר שבין מיקום עצם למיקום הדמות ואופייה. 	$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ $\frac{H_i}{H_o} = \frac{ v }{ u }$	<ul style="list-style-type: none"> - אפיון צורני של עדשות כדוריות. - מושגים: "ציר אופטי", "מוקד עדשה", "רוחק מוקד", "קרניים מיוחדות". - דמותו של עצם בעדשה מרכזת ומפזרת: איתור מקום הדמות בעזרת 'קרניים מיוחדות', סרטוט מהלך קרן כלשהי, סימון שדה הראייה. - "הגדלה קווית". 	<p>1.4</p> <p>עדשות כדוריות דקות: מהלך האור ויצירת דמויות</p>

תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

מבוא

פרק זה הוא הראשון בשבעה פרקים המרכיבים את תכנית הלימודים ביחידת הלימוד "קרינה וחומר". מטרתו העיקרית להכין את תשתית הידע והמיומנויות ולעורר סקרנות לגבי מהות האור. הרעיונות המרכזיים של הפרק יידונו שוב במסגרת בניית מודלים של האור וחיפוש הסברים לתופעות במסגרת המודל החלקיקי, המודל הגלי והמודל הדואלי. באופן זה יתאפשר לתלמידים להפנים את הרעיונות בלמידה ספירלית.

בעת לימוד הפרק יש לצמצם את העיסוק בפתרון בעיות חישוב ו להימנע מדיון במערכות אופטיות מורכבות, כדוגמת אלה שאפיינו את יחידת הבחירה "אור וגלים" (מערכת של שתי עדשות, מערכת של עדשה ומראה וכו'). הדיון במערכת אופטית המורכבת משתי מראות מישוריות יצטמצם למקרים בהן המראות מאונכות או מקבילות זו לזו. מומלץ לעסוק בתופעות אופטיות המוכרות מחיי היום-יום ובתופעות טבע מוכרות ופשוטות - כגון העובדה שכפית הטבולה בכוס ובה נוזל נראית שבורה, השתקפות עצים במי אגם, מופעי הירח, ליקוי לבנה וליקוי חמה - בפרט כשקהל היעד מורכב מכלל התלמידים שיתמחו במדעי הטבע והחומר נלמד במסגרת נושאי היסוד בכיתה י'.

מקומו של הפרק, תכניו ומטרות ההוראה

בפרק זה יכירו התלמידים תופעות יסודיות הקשורות באור, במקורותיו ובאופן התפשטותו. הפרק מציג את הרעיון שמערכת אופטית כוללת מקורות אור ורכיבים אופטיים שונים (כמו מחסום, מראה, מנסרה, עדשה), וכן מתאר כיצד מהלך האור נקבע על-ידי מאפיינים חומריים וצורניים של רכיבי המערכת. בפרק תיושם שיטה לייצוג מהלך האור הנקראת: "ייצוג באמצעות קרניים" (מכונה לעיתים "מודל הקרניים").

לפרק מספר מטרות:

- א. הכרת תופעות הקשורות בהפקת אור ובהתפשטותו.
- ב. קישור בין חוויות ויזואליות (ראיית מקורות אור, עצמים ודמויות) לבין מהלך האור.
- ג. הכרת רכיבים אופטיים בסיסיים ושימוש בהם לביצוע ניסויים פשוטים במעבדה.
- ד. הכרת שיטת ה"ייצוג באמצעות קרניים": שיטה גרפית לייצוג מקורות אור, רכיבים אופטיים ומהלך האור.

ה. יישום השיטה "ייצוג באמצעות קרניים" להסבר תופעות ולפתרון בעיות פשוטות (בסרטוט ידני ובאמצעות תוכנת הדמיה).

ו. פיתוח סקרנות והצגת שאלות ותהיות ביחס למהות האור.

בפרק יידונו מספר תופעות מרכזיות הקשורות באור. תופעות אלו יישמשו בסיס עובדתי לבניית מודלים עבור האור בהמשך לימוד היחידה "קרינה וחומר":

א. אור נפלט מגופים הנקראים "מקורות אור" ומתפשט במרחב.

ב. אור הוא סוג של "אנרגיה".

ג. פליטת אור אינה מלווה (ככל הנראה) בשינוי משקלו של מקור האור.

ד. אור המתפשט בְּתוֹךְ אחיד נע לא שינוי כיוון ('בקווים ישרים').

ה. שתי אלומות אור הנחתכות אינן משפיעות זו על זו.

ו. האור משנה את כיוון התפשטותו בשני תהליכים - "החזרה" ו"שבירה", המתרחשים במשטח גבול בין תווכים שונים.

ז. תופעת ה"החזרה" מקיימת את החוקים הבאים:

(1) הקרן המוחזרת נמצאת במישור שנקבע על-ידי הקרן הפוגעת והאנך למשטח המחזיר, בנקודה שבה הקרן פוגעת.

(2) זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה.

ח. תופעת ה"שבירה" מקיימת את החוקים הבאים:

(1) הקרן הנשברת נמצאת במישור שנקבע על-ידי הקרן הפוגעת והאנך למשטח הגבול, בנקודה שבה הקרן פוגעת.

(2) זווית הפגיעה וזווית השבירה מקיימות את חוק סנל.

ט. תהליך השבירה תלוי גם בצבע האור הפוגע - תופעת ה"נפיצה".

ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים: רעיונות מרכזיים וקשיים אופייניים

של תלמידים

הרעיונות המרכזיים

פרק זה עוסק בתופעות אחדות הקשורות לאור הנראה, שאפשר לתאר אותן (בקירוב) באמצעות ייצוג גרפי הידוע כ"ייצוג מהלך אור באמצעות קרניים". גישה זאת מכונה גם "אופטיקה גאומטרית".

במסגרת המודלים הגליים של האור, התלמיד יעמוד על כך שהאופטיקה הגאומטרית אינה אלא קירוב של מודל גלים, במצבים שבהם אפשר להזניח את תופעות העקיפה. השימוש ב'קרניים' מאפשר **ייצוג של התפשטות האור במרחב והצגת שינויים בכיוון התפשטות האור** כתוצאה מאינטראקציה עם גופים שונים. התפשטות אור במרחב מתוארת על-ידי **אלומות אור** מתפזרות, מתכנסות או מקבילות. פרק זה עוסק בשלוש תופעות באור מבחינת השפעתן על התפשטותו: **בליעה, החזרה ושבירה**. הגופים שאתם האור מבצע אינטראקציות קרויים **רכיבים אופטיים**.

מקורות אור הם גופים שבהם מתבצעת התמרה של אנרגיה מושקעת כלשהי ל**אנרגיית אור**. קיימים מנגנוני התמרה מגוונים, ובהתאם לכך מקורות אור שונים. **מקור אור נקודתי** מוגדר כנקודה גאומטרית, שממנה מתפשט אור לכל הכיוונים בסימטריה כדורית. התפשטות האור מיוצגת על-ידי 'קרניים' (קווים מכוונים) המתפזרות באופן רדיאלי ממקור האור הנקודתי. כל קרן מייצגת כיוון התפשטות של האור. גזרה מרחבית של 'כדור האור' קרויה "אלומה" (מתפזרת או מתכנסת). כל מקור אור מורחב (מציאותי) מהווה אוסף אין-סופי של מקורות נקודתיים. שימוש במקור אור המפיק אלומת קרניים מקבילות, מאפשר ניתוח היבטים מרכזיים של האינטראקציה של האור עם רכיבים אופטיים, כגון הגדרת מוקד.

האור הנראה מתגלה על-ידי **גלאי אור** - מכשירים שבהם אנרגיית האור הופכת לאנרגיה אחרת, היוצרת אפקט שמאפשר תצפית. **העין** האנושית היא גלאי אור הרגיש לשינויים בעצמת האור ובצבעו.

קשיי תלמידים בייצוג מהלך אור באמצעות קרניים ובפתרון בעיות בנושא זה

ייצוג באמצעות קרניים מאפשר תיאור מסוים של המציאות האופטית לצורך הסבר תופעות, ניבוי תופעות ופתרון איכותי וכמותי של בעיות. כדי לקבוע באופן מלא את ההתנהגות של מערכת אופטית ולענות על שאלות כמו: "האם נוצרות דמויות?", "היכן נוצרות דמויות?", "מהיכן אפשר לראות את הדמויות?", "אילו סוגי דמויות נוצרים?", "האם יש הגדלה, ומהי?" - יש לתאר את מהלך אלומות האור במערכת. בתיאור כזה יש להתייחס לעצם (באמצעות אלומות האור המתפשטות ממנו), לתכונות הפיזיקליות של הרכיבים ולמיקום היחסי של העצם והרכיבים. תלמידים מתקשים לעתים בשימוש נכון של הייצוג באמצעות קרניים, כפי שנפרט בהמשך. עם זאת, עיקר הקושי מתבטא בפירוש מציאותי נכון של תרשים הקרניים ובשימוש בתרשים כזה לפתרון בעיות במציאות.

המקורות המשוערים לקשיים אלה הם תפיסות מוקדמות של התלמידים (למשל, "כדי לראות, העין שולחת 'מבט' [קו ראייה] אל העצם או אל מקור האור"), זלזול בצורך לדייק במימוש הייצוג

באמצעות קרניים ואי-הכרה בכך שייצוג כזה יכול לשמש לפתרון בעיות וכן חיקוי בלתי מבחין של 'קיצורי דרך' שהמורה מיישם בעת הסרטוט על הלוח (למשל, צמצום האלומה לגזרה הרלוונטית לרכיב הנדון, אי-קישור בין מהלך האור ליצירת הדמות וראייתה, שימוש בקרניים מיוחדות בלבד).

להלן סוגים אחדים של קשיי תלמידים:

1. שגיאות הנוגעות לייצוג האור

- א. שימוש בקרן בודדת במקום באלומת קרניים.
- ב. היעדר סימון של כיוון התפשטות האור, או אי-התייחסות למשמעות הסימון כאשר הוא מופיע.
- ג. היעדר הבחנה בין קווים המשמשים לתיאור מהלך אור לבין קווי עזר גאומטריים.
- ד. התעלמות ממהלכו של אותו חלק באלומת האור שאינו מבצע אינטראקציה עם הרכיב המטופל. לדוגמה: במערכת המכילה מקור אור ועדשה - תיאור מהלך האור רק לאלומה הפוגעת בעדשה ולא לאור העובר סביבה.

2. שגיאות הנוגעות לייצוג האינטראקציה

- א. יישום 'קיצורי דרך' גאומטריים בלי לבדוק את תקפותם במערכת הנתונה. לדוגמה: במערכת של מקור אור, מראה מישורית ומחסום - קביעת מיקום הדמות ושדה הראייה שלה בלי לוודא שהאור ממקור האור אכן פוגע במראה.
- ב. התעלמות מהקשר בין גודלו המוגבל של הרכיב האופטי לבין תחום ההשפעה שלו על אלומת האור הפוגעת בו. לדוגמה: במערכת של שתי עדשות - ייתכן שאלומת אור שעברה בעדשה הראשונה, לא תפגע כלל בעדשה השנייה ועל כן לא תיווצר דמות נוספת.
- ג. ייצוג חלקי של האור המבצע אינטראקציה עם הרכיב. לדוגמה: ייצוג מהלכן של 2-3 'קרניים מיוחדות' בעדשה בלי לדעת שמהלך דומה מתקיים לכל הקרניים הפוגעות בעדשה. דוגמה נוספת: בתיאור מעבר אור מאוויר לזכוכית - התעלמות מייצוג האור המוחזר.
- ד. ייצוג שגוי של תוצאת האינטראקציה עם רכיב נתון. לדוגמה: בתיאור מעבר אור מאוויר לזכוכית – מסרטטים את הקרן הנשברת באותו צד של האנך שבו סורטטה הקרן הפוגעת. דוגמה נוספת: בייצוג מהלך אור העובר במנסרה משולשת - סימון שגוי של האנכים או מדידה שגויה של זוויות.

3. שגיאות הנוגעות לייצוג ראייה

- א. אי-יכולת להראות את האלומה הספציפית המגיעה לעין נתונה.
- ב. התייחסות לשאלה "האם בייצוג הנתון מסורטט קרן שאכן מגיעה לעין?" במקום לשאלה "האם לעין הנתונה יכולות להגיע קרני אור ממקור האור הנתון?".
- ג. הכרעה בשאלות ראייה באמצעות קריטריון יחיד: אפשרות חיבור קו ישר בין העין לנקודה הנדונה.

4. שגיאות הנוגעות לייצוג מושגים

- א. ייצוג דמות על-ידי מפגש בין קרניים לפני האינטראקציה עם הרכיב, לבין קרניים אחרי האינטראקציה עם הרכיב.
- ב. ייצוג דמות על-ידי מפגש בין קרניים שמקורן בעצמים נקודתיים שונים.

5. קשיים נוספים של תלמידים

תלמידים רבים מתקשים בפתרון בעיות בתחום הבנת הנקרא, בקישור בין סיפור המעשה לידע הפיזיקלי ובבקרת הפתרון. כמו כן, תלמידים רבים (בעיקר בכיתה י) מתקשים באלגברה ובגאומטריה, וקשיים אלה משתקפים בשגיאות בפתרון בעיות כמותיות. השימוש בפונקציות טריגונומטריות לצורך חוק סנל או לפתרון בעיות שונות, מוסיף קושי לתלמידים שיכולתם המתמטית עדיין אינה מפותחת.

תלמידים קושרים את מופעי הירח לליקויי לבנה וחמה, את עונות השנה - להבדל מרחק הארץ מן השמש בקיץ ובחורף, ואת האור המגיע מכוכבים - כאור השמש המוחזר מן הכוכבים. יש לטפל בתפיסות שגויות אלה.

1.1 ראיית עצמים, אפיון האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים (3 שעות)

מבנה העין ותנאים לראייה

- א. מומלץ לפתוח את הפרק בשאלה "האם רואים אור?" ולהגיע להבנה שאי-אפשר לראות אלומת אור הנעה במרחב ואינה חודרת לעין. ניתן להדגים זאת, למשל, באמצעות אלומת לייזר הנעה לרוחב הכיתה. יש לעמוד על כך שבתופעות שבהן רואים לכאורה אלומות אור - כגון בערפל - רואים למעשה את חלקיקי הערפל באמצעות האור המוחזר מהם.
- ב. יש להדגיש את תפקוד העין כרכיב שמאפשר חדירת אור דרך האישון ויצירת 'תמונה' בעזרת העדשה. כדאי להדגים זאת בכיתה בעזרת דגם של העין או בעזרת עדשה ומסך.

- ג. יש לעמוד על כך שהתנאים לראות עצם מסוים הם אלה: העצם מפיץ אור, האור חודר לעין דרך האישון ומגיע לרשתית, אותות חשמליים עוברים בעצבי העין למוח.
- ד. יש להתייחס לתפיסות שגויות של התלמידים, למשל: "כדי לראות, העין שולחת 'מבט' (קו ראייה) אל העצם או מקור האור".
- ה. יש לדון בשאלה "מדוע אי-אפשר לראות אלומת אור באמצעות אלומת אור המוטלת עליה?" (בשונה מקיר שאפשר לראותו באמצעות אלומת אור המוטלת עליו).

מקורות אור וגלאי אור

- א. חשוב לבדוק באמצעות שאלון או דיון כיתתי מהו הידע המוקדם של התלמידים על ייצוג האור ותופעות אופטיות פשוטות. אפשר לעורר דיון בשאלות כמו "היכן יש אור בחדר?", "מה פירוש לראות את הפרח?", "מה אפשר לראות במערה בלתי מוארת?", "מה אני רואה במראה?".
- ב. מומלץ להציג מקורות אור שונים ולציין שהכוכבים הם מקורות אור. כדאי למיין מקורות אור שונים לפי מנגנון המרת אנרגיה, צבע אופייני וספקטרום ולהתייחס למושג "האור הנראה".
- ג. כאן ניתן לאזכר את פעולת העין כגלאי אור ואת תפקיד הרשתית.
- ד. אפשר לאפיין גופים לפי השפעתם על האור: **בליעה, החזרה, העברה.**
- ה. הדיון במקורות אור ובראייה חשוב לבניית המודל של האור כ'דבר' שנע ומתקדם ממקור האור לכיוונים שונים.

אפיונים ראשוניים למהות האור

- א. כדאי להסביר כי לאור מהירות והוא מתפשט גם בריק.
- ב. ראוי להדגיש שהצל קיים במרחב, לעומת הצללית שמופיעה על משטח.
- ג. הדיון בהתהוות הצל וצורתו (ובפרט השוליים החדים של הצללית) חשוב לתפיסת האור כ'דבר' שמתפשט ב'קווים ישרים' ממקור האור לכיוונים שונים.
- ד. כדאי לאזכר את מופעי הירח, את ליקויי הלבנה והחמה.

ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים

- א. חשוב להבהיר ש'קרן' היא קו מכוון, המייצג כיוון התפשטות של האור ולא ישות פיזיקלית.
- ב. חשוב להמחיש את הקשר שבין מהלך האור במציאות לבין הייצוג באמצעות קרניים.

- ג. בכל פעם שמשתמשים בטכניקת הייצוג באמצעות קרניים, יש להדגים שימוש באלומות קרניים כלליות ולא רק באותו חלק של האלומה הפוגע ברכיב.
- ד. מומלץ להפעיל את התלמידים בפתרון בעיות פשוטות ולהימנע מחישובים המבוססים על דמיון משולשים. במקום זאת, כדאי לפתור בעיות כמותיות באמצעות תרשימים בקנה-מידה.

1.2 החזרת אור, חוקי ההחזרה, דמות במראה מישורית (4 שעות)

חוקי ההחזרה

- א. דיון מקדים: "אילו תופעות מצביעות על קיומה של תופעת החזרה של אור?", או "מה נוכל להסיק מהתופעות הבאות על השפעת המשטח על התפשטות האור (ראיית משטחים, סנוור באמצעות מראה, מראה כמחסום)?"
- ב. הדגמה באמצעות אלומת אור צרה (לייזר או אור לבן): החזרה כאינטראקציה המשנה את כיוון התפשטות האור. רצוי להדגים תחילה את מהלך האור המוחזר במרחב (על-ידי פיזור אבקת גיר) ולהסיק שיש מישור משותף לקרן הפוגעת, לקרן המוחזרת ולאנך למראה. לאחר מכן עוברים להדגמה על משטח מישורי ומגלים את הקשר שבין זווית הפגיעה לזווית ההחזרה.
- ג. רצוי להשתמש בהדמיה לייצוג מהלך אור בתהליך החזרה ולהדגים את ההבדל בין החזרה מסודרת והחזרה מפוזרת באמצעות אלומת אור מקבילה: במראה מישורית, אלומת אור מקבילה מוחזרת כאלומת אור מקבילה; במשטח מחזיר מחוספס (דף נייר, קיר לבן), אלומת אור מקבילה אינה מוחזרת כאלומת אור מקבילה.

דמות הנוצרת על-ידי מראה מישורית

יצירת דמות של עצם נקודתי

- א. מומלץ להדגים את ההחזרה של אלומת אור מתפזרת ממראה מישורית. מסמנים את גבולות האלומה הפוגעת ואת גבולות האלומה המוחזרת, מאתרים את מרכז האלומה הפוגעת ואת מרכז האלומה המוחזרת, ואז מקשרים בין המיקומים של מרכזי האלומות. חוזרים על תהליך זה לגבי מיקום שונה של מקור האור.
- ב. רצוי להשתמש בהדמיה לייצוג החזרה של אור ממקור נקודתי במראה מישורית. כדאי לשנות את המיקום היחסי של המראה ושל מקור האור.

- ג. חשוב להדגיש את הקשר שבין מהלך הקרניים לבין היווצרות הדמות, ולא להסתפק בקיצור הדרך "רוחק העצם שווה לרוחק הדמות". יש להימנע מדיון במצב שבו קיים מחסום בין מקור האור למראה מישורית.
- ד. יש להתייחס לעצם קווי כאוסף גדול מאוד של עצמים נקודתיים.

התנאים לראיית דמות הנוצרת על-ידי מראה מישורית

- א. רצוי לבצע הדגמה של ראיית דמות מדומה של נר דולק ואיתור מקומה באמצעות שיטת "ביטול הפרלקסה".
- ב. יש להימנע מאמירות מסוג: "העין והמוח ממשיכים את הקרניים, וכך רואים דמות מדומה". כדי להבין את ראיית הדמות המדומה, יש להשוותה לראיית מקור אור או עצם ממשי. העין קולטת אלומת אור שמרכזה בעצם, ומרכזת אותה על הרשתית.
- ג. כדי לראות את הדמות הנוצרת במראה המישורית, העין צריכה להיות בתחום אלומת האור המוחזרת מהמראה - זהו שדה הראייה של הדמות. לעניין זה ניתן להדגים את "ניסוי הסיכות": איתור הדמות על-ידי זיהוי המיקום שבו 'נמצא' הדבר שמעורר תחושת ראייה. בניסוי זה, האיתור מתבצע על-ידי חיתוך קווי ראייה שמייצגים אור המוחזר ממראה.
- ד. כאמור במבוא, הדיון במערכת אופטית המורכבת משתי מראות מישוריות יתמקד רק במקרים שבהם המראות מאונכות או מקבילות זו לזו.

1.3 שבירת אור: חוק השבירה, החזרה חלקית ומלאה (7 שעות)

- א. רצוי להתחיל מאזכור תופעות המרמזות שהאור משנה את כיוונו במעבר בין סביבות שקופות. לדוגמה: עיפרון הטבול בכוס מים נראה שבור. אפשר להתחיל בהצגת תופעות מפתיעות, כמו 'המטבע הצף' או 'המקל השבור', ולדון במשמעות שלהן בהקשר למהלך האור העובר בין חומרים שקופים.
- ב. כאשר מדגימים מעבר אור מאוויר למים, יש להדגיש את קיומה של החזרה החלקית המתלווה לשבירה. כך נוכל להבין איך אדם רואה את דמותו משתקפת בחלון זכוכית ובו-בזמן רואה את העצמים בחוץ.
- ג. כאשר מסרטטים את גרף זווית השבירה כתלות בזווית הפגיעה, יש לשים לב שמשמעותו של הגרף העקום אינה רק היעדר קשר לינארי, אלא גם שזווית הסטייה גדלה עם זווית הפגיעה. רצוי למצות את המסקנות הישירות מהגרף לפני המעבר לגרף הסינוסים.

ד. לא רצוי ללמד בהזדמנות זו את כל הפונקציות הטריגונומטריות. נסתפק בפונקציית סינוס, ובכיתות מתאימות נְתַרְגֵל מעט. לפי רמת התלמידים, ניתן להחליף את פתרון הבעיות של חוק סנל בפתרון גרפי או בפתרון כמותי מקורב בזוויות קטנות. בשלב זה, מומלץ להיעזר בהדמיית מחשב.

ה. יש להסביר את המושג זווית הסטייה, אולם אין צורך להוכיח בפירוט את נוסחת זווית הסטייה במנסרה. אם נותר זמן, אפשר להציג את הנוסחה ולהצדיק את מסקנותיה.

ו. יש להדגים נפיצה במנסרה ולהסביר שזווית הסטייה של האור האדום קטנה מזווית הסטייה של האור הסגול.

1.4 עדשות כדוריות דקות: מהלך האור ויצירת דמויות (5 שעות)

אפיון צורני של עדשות כדוריות

א. מומלץ לאפשר לתלמידים למשש עדשות בעלות משטחים שונים (דו-קמורות, קמורות מישוריות, דו-קעורות). פעולה כזאת תבליט את האופי התלת-ממדי של העדשה לעומת התרשים הדו-ממדי שלה.

ב. המפתח להבנת מהלך האור בעדשות הוא הרעיון של סטייה שונה בכיוון האור הפוגע בנקודות שונות על פני העדשה. מבארים את הרעיון על-ידי הצגת העדשה כצירוף של מנסרות משולשות, בעלות זוויות ראש הולכות וגדלות, ומתן הסבר על סטיית אלומות שונות.

מושגי יסוד

א. מומלץ להדגים מהלך של אלומת אור צרה הפוגעת באזורים שונים ולהראות את השוני בזווית הסטייה. בהקשר זה אפשר להציג את המושג "ציר אופטי" ראשי.

ב. מומלץ להדגים מהלך של אלומת אור מקבילה בעדשה דו-קמורה ודו-קעורה ולהגדיר את המושג "מוקד" (ממשי ומדומה).

ג. יש להראות כיצד המוקד מאפשר הגדרת מהלכן של 'קרניים מיוחדות'.

דמותו של עצם בעדשה מרכזת ומפזרת

א. מומלץ להציע לתלמידים להתבונן דרך עדשות שונות בעצמים קרובים ורחוקים. בדרך זאת הם יגיעו באופן חווייתי להכרה שעדשות משנות את מהלך האור ושהמרחק בין העצם לעדשה משפיע על פעולת העדשה. אפשר להסתייע בתופעה שלפיה עיניים נראות גדולות או קטנות יותר כאשר מרכיבים משקפיים. ניתן לבצע זאת במהלך האפיון הצורני.

- ב. יש להדגים היווצרות דמויות ממשיות בעדשה מרכזת באמצעות "ספסל אופטי" ולחקור באופן איכותי וכמותי את הקשר בין מיקום העצם לאופי הדמות ולמיקומה.
- ג. יש לאפשר לתלמידים לערוך ניסוי של חקירת הדמות הממשית בעדשה מרכזת. לעיבוד התוצאות, מומלץ להשתמש בגיליון אלקטרוני.
- ד. במהלך ייצוג הדמות באמצעות קרניים, אין להסתפק באיתור מקום הדמות על-ידי 'קרניים מיוחדות' בלבד. יש להראות מהלכן של אלומות קרניים נוספות, המגיעות אל העדשה מאותה הנקודה על העצם. כמו כן יש להתייחס לשדה הראייה של הדמות.
- ה. מומלץ להשתמש בהדמיה כדי להציג את מודל הקרניים עבור מעבר האור בעדשות. אמצעי זה יחסוך זמן ומאמץ ויאפשר להציג את השינוי במיקום הדמות ואופיה כתלות בשינוי מרחק המוקד ובמיקום העצם.
- ו. יש לאפשר לתלמידים לחוות ראייה של דמות ממשית ללא מסך. דבר זה מחייב הצבת התלמיד במרחק של כחצי מטר מהדמות ומיקום ראשו של התלמיד כך שאלומת האור תפגע ממש בעינו. שימוש בלוח זכוכית מט או בדף נייר לאיתור הדמות, והזזתו בהדרגה, מקלים על התלמיד להתרכז בדמות.

פרק 2 : המושג "מודל", תפקידיו, המודל החלקיקי של האור

שעות	הנושא
2	2.1 המושג "מודל", תפקידי המודל
2	2.2 המודל החלקיקי של האור
2	2.3 ניבויי המודל החלקיקי של האור
6	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2			<ul style="list-style-type: none"> - הצגת עובדות יסודיות של האור (תמצית הפרק "תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים"). - הצגת המושג "מודל". - תפקיד המודל והצגת דוגמאות כגון: ארבעת היסודות של אריסטו, תאוריית הכבידה של ניוטון. 	2.1 המושג "מודל", תפקידי המודל
2	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: שינוי כיוון של תנועת כדור המתגלגל על הרצפה, על-ידי הפעלת כוח רגעי בכיוון שונה מכיוון תנועתו. 		<ul style="list-style-type: none"> - בנייה ראשונית של המודל על סמך העובדה שלאור מקורות והוא מתפשט במרחב. - המשך פיתוח המודל כדי להסביר עובדות אלה: <ul style="list-style-type: none"> • מסתו של מקור הפולט אור אינה פוחתת. • אלומת אור מתפשטת בקווים ישרים. • שתי אלומות אור נחתכות אינן משפיעות זו על זו. • החזרת אור. • מעבר אור מתווך לתווך. • נפיצת אור. • אור כאנרגיה. 	2.2 המודל החלקיקי של האור
2	<ul style="list-style-type: none"> - צפייה בסרט "לחץ האור" (PSSC). 	<p>נוסחה אמפירית: $v=c/n$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ניבוי המודל: אור מפעיל לחץ. - ניבוי המודל: מהירות האור בזכוכית גדולה מזו שבאוויר. - הצגת תוצאות אמפיריות של ניסויים (פוקו, מייכלסון) שבאמצעותם גילו כי מהירות האור בזכוכית קטנה מזו שבאוויר פי מקדם השבירה של החומר ביחס לאוויר. - מעמדו של המודל החלקיקי: ציון תופעות שאפשר להסביר באמצעות המודל ושל אלו שאי-אפשר להסביר באמצעותו. 	2.3 ניבוי המודל החלקיקי של האור

המושג "מודל", תפקידיו, המודל החלקיקי של האור: פירוט, דגשים, הערות דיזקטיות

2.1 המושג "מודל", תפקידי המודל (2 שעות)

- א. מומלץ לפתוח נושא זה בהצגת העובדות היסודיות על אודות האור שנלמדו בפרק הקודם. אם מלמדים את הנושא בכיתה י', לא מומלץ להציג את תופעות העקיפה וההתאבכות בשלב מוקדם.
- ב. יש לדון בשיטה המדעית של חקר בתחום מסוים: איסוף עובדות לגבי הנושא הנחקר, בניית מודל (בעזרתו ניתן להסביר את העובדות הידועות לגבי התחום הנחקר) והעלאת ניבויים מפורשים לגבי תוצאותיהם של תצפיות או של ניסויים עתידיים.
- ג. יש להדגיש כי לא קיים מודל מדעי "נכון". ככלל, תועלתו של מודל מדעי היא בהסבר עובדות ידועות ובניבוי תופעות או תכונות חדשות.
- ד. יש לציין כי לא ניתן לאשר תאוריות או מודלים, אלא רק להפריכם. כאשר תוצאות ניסוי עולות בקנה אחד עם תאוריה – יש בכך אישוש לתאוריה (ולא אישור). כאשר תוצאות ניסוי אינן עולות בקנה אחד עם תאוריה – הדבר עלול להפריכה.
- ה. למרות שהתלמידים נפגשו בחטיבת הביניים עם המושג "מודל" בהקשר של המודל החלקיקי של החומר או המודל האטומי - דיון מופשט בנושא מודל מדעי עלול להיות קשה לתלמידים. לכן מומלץ להקדיש למודל כשעה-שעתיים בלבד, ובהמשך הלימוד לבסס את הרעיונות הקשורים בו במסגרת דיון במודלים הקונקרטיים של האור.

2.2 המודל החלקיקי של האור (2 שעות)

- א. מומלץ שאבן היסוד הראשונה של המודל תהיה ציון העובדה שמקורו של אור הוא גוף מאיר וכי האור מתפשט מהגוף המאיר במרחב. על סמך זאת יש להציע שאור הוא זרם של חלקיקים היוצאים מן הגוף המאיר ונעים במרחב. לאחר כן, כדאי לסקור את התופעות הקשורות לאור, ועל פיהן להמשיך ולבנות את המודל. לדוגמה: על סמך העובדה ששתי אלומות אור חותכות האחת את השנייה ללא אינטראקציה ביניהן – יש להוסיף למודל את ההשערה שהמרחק בין חלקיקי האור הוא גדול בהרבה מגודלם של החלקיקים.
- ב. מסקנות מן המכניקה, כגון זו האומרת שבעקבות התנגשות אלסטית בין כדור לקיר הכדור מוחזר כך ש"זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה", יש להדגים בכיתה י'. בכיתה י"ב תבוא ההוכחה של המסקנות הללו על סמך עקרונות המכניקה.

2.3 ניבויי המודל החלקיקי של האור (2 שעות)

א. יש להציג שני ניבויים של המודל החלקיקי :

(1) אור מפעיל לחץ על עצמים שבהם הוא פוגע.

(2) מהירות האור בזכוכית, למשל, גדולה ממהירות האור באוויר.

ב. לאחר הצגת הניבויים, יש לדון בהם על בסיס תוצאות הניסויים: ניסוי המראה כי אור אכן מפעיל לחץ, וניסוי המראה כי מהירות האור בזכוכית דווקא קטנה ממהירות האור באוויר (כתלות במקדם השבירה של הזכוכית ביחס לאוויר).

ג. מומלץ לסכם את הנושא "המודל החלקיקי של האור" בדיון במעמדו: מחד גיסא, המודל מצליח להסביר עובדות רבות ולנבא תופעות שאכן מתגשמות; מאידך גיסא, אין מצליחים להסביר באמצעותו את העובדה שבמעבר אור מתווך אחד למשנהו, שבירת האור מלווה בהחזרת אור. יתר על כן, הניבוי לגבי מהירות האור בזכוכית עומד בסתירה לתוצאות ניסויים שמבוססים על עקרונות המכניקה.

פרק 3 : גלים מכניים ואלקטרומגנטיים

שעות	הנושא
4	3.1 תכונות של פולסים והשוואתן לתכונות האור
4	3.2 גלים מחזוריים חד-ממדיים
4	3.3 תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור
10	3.4 התאבכות ועקיפה בגלי מים ובאור
6	3.5 גלים אלקטרומגנטיים, ספקטרום, יישומים ורקע היסטורי
28	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : תנועת פולס בקפיץ (אורך ורוחב). - ניסוי : ניתוח סרטון וידאו המתאר תנועת פולס. - הדגמה : התקדמות שני זעזועים בקפיץ. - תרגול : בניית סופרפוזיציה באמצעות נייר ועיפרון. - ניתוח ממוחשב של סופרפוזיציה בהדמיה או בגיליון אלקטרוני. - הדגמה : החזרה בקפיץ. - הדגמה : מעבר פולס מתווך לתווך בקפיצים. 		<ul style="list-style-type: none"> - המושגים : "פולס" (זעזוע), "פולס רוחב", "פולס אורך". - תיאור של פולס : • המושגים : "מקום", "העתק" ו"משרעת". • תיאור פונקציית העתק-מקום : $y(x)$. • תיאור פונקציית העתק-זמן : $y(t)$. - מהירות פולס וסוג התנועה בתווך אחיד, השוואה לאור, מהירות חלקיקי תווך שבו מתפשט פולס. - "עקרון הסופרפוזיציה" : • היעדר אינטראקציה בין פולסים, השוואה לאור. • הסבר עקרון הסופרפוזיציה. • המושגים : "התאבכות", "התאבכות בונה", "התאבכות הורסת", "נקודת צומת". - החזרת פולס מקצה חפשי ומקצה קשור. - מעבר פולס מתווך אחד למשנהו, השוואה לאור. - פולס נושא אנרגיה, השוואה לאור. 	<p>3.1 תכונות של פולסים והשוואתן לתכונות האור</p>
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדמיה : גלים מחזוריים. - הדגמות וניסויים באמבט גלים : יצירת פולסים וגלים מחזוריים ומדידת מהירות ואורך-גל. - פעילות ממוחשבת או סרטון וידאו : הקשר בין סופרפוזיציה לגלים עומדים. - ניסוי Melde. 	$f = \frac{1}{T}$ $v = \lambda f$ $l = n \frac{\lambda}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> - גלים מחזוריים : • פונקציית "העתק-מקום" של גל מחזורי, המושגים : "גל מחזורי במקום", "אורך-גל". • פונקציית "העתק-זמן" של מקור גלים מחזורי, המושגים : "מקור גלים מחזורי בזמן", "זמן-מחזור", "תדירות". • הקשר בין תנועת מקור הגל לבין צורת הגל. • הקשר בין מהירותו של גל מחזורי, תדירותו ואורך-הגל שלו. - סופרפוזיציה בגלים מחזוריים : "התאבכות בונה", "התאבכות הורסת", "נקודות צומת". - גלים עומדים : אורכי הגל והתדירויות המותרות, חשיבות תנאי השפה. 	<p>3.2 גלים מחזוריים חד-ממדיים</p>

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדמיית אמבט גלים: התבוננות בחתכים ניצבים לאמבט תוך שינוי פרמטרים שונים. - ניסוי רגיל, ממוחשב או ניתוח סרטון וידאו: החזרה ממחסום ישר באמבט גלים. 	$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$	<ul style="list-style-type: none"> - מושגי יסוד: "חזית גלי", "כיוון התפשטות", "גל ישר", "גל מעגלי", "עקרון הויגנס". - השוואה בין החזרה של גלי מים להחזרת אור. - השוואה בין מעבר גל מים מתווך אחד למשנהו למעבר אור מתווך לתווך. - השוואה בין נפיצת גלי מים לנפיצת אור. 	3.3 תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור
10	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי: התאבכות באמבט גלים - מציאת אורך-גל על פי הפרש מרחקים של נקודה על קו מקסימום או על קו מינימום משני המקורות. - ניסוי או הדמיה: התאבכות באמבט גלים - תלות תבנית ההתאבכות בפרמטרים השונים. - ניסוי או הדמיה: תמונת התאבכות של אור מונוכרומטי (לייזר) דרך שני סדקים ותמונת עקיפה. - ניסוי או הדמיה: עקיפה באמבט גלים - תלות תבנית העקיפה בפרמטרים השונים. - ניסוי או הדמיה: תמונת עקיפה של אור מונוכרומטי (לייזר) ושל "אור לבן" דרך סריג עקיפה. 	<p>קווי מקסימום עבור $L \gg d$:</p> $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} \approx n \frac{\lambda}{d}$ <p>קווי צומת עבור $L \gg d$:</p> $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} \approx (n - \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{d}$ <p>עבור $L \gg d$ וזוויות קטנות:</p> $\frac{\Delta x}{L} \approx \frac{\lambda}{d}$ $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} = n \frac{\lambda}{w}$ $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} = nN^* \lambda$	<ul style="list-style-type: none"> - התאבכות גלי מים משני מקורות: "מקורות שוי-מופע", "מקורות שוני-מופע". - התאבכות אור משני חריצים, "מקורות אור קוהרנטיים". - השפעת הפרש המופע בין המקורות על תבנית ההתאבכות. - "עקיפה": תבנית העקיפה כהתאבכות המתקבלת מרצף של מקורות נקודתיים. - "סריג עקיפה", שימושים. - המודל הגלי של האור והאופטיקה הגאומטרית. - מעמדו של מודל הגלים המכניים, מהו התווך שהאור מרעיד? 	3.4 התאבכות ועקיפה בגלי מים ובאור

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
6	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : תופעות גליות של גלי מיקרו. - הדגמה : תופעת הפלואורסצנסיה של קרינה על-סגולה. - הדגמה : החזרה של קרינה תת-אדומה משלט-רחוק. - סרט על הספקטרום האלקטרומגנטי ושימושו. 		<ul style="list-style-type: none"> - עיקרי המודל האלקטרומגנטי של האור, ניבוי התאוריה האלקטרומגנטית. - גלים אלקטרומגנטיים – היבטים מדעיים, טכנולוגיים והיסטוריים : • השפעת האטמוספירה על קרינה אלקטרומגנטית. • התחומים השונים של ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית, יישומים טכנולוגיים. - קשיים של מודל הגלים האלקטרומגנטיים. 	3.5 גלים אלקטרומגנטיים, ספקטרום, יישומים ורקע היסטורי

גלים מכניים ואלקטרומגנטיים: פירוט, דגשים, הערות

דידקטיות

מבוא

מקומו של הפרק

פרק זה, המציג תופעות גליות מכניות ואלקטרומגנטיות, הוא שלב נוסף ביחידת הלימוד "קרינה וחומר" והוא בונה מערכת מושגים וקשרים בתחום תוכן זה. בד-בבד, הפרק ממשיך בפיתוח רעיונות חשובים לגבי התאמת מודל לאור תוך התייחסות לקשר שבין תופעות למודלים, בהצגת דרכים לאישוש או להפרכה של מודל ובגבולות ישימות של מודל. מבחינה היסטורית, הפרק מלווה את התפתחות המודל הגלי של האור במאות ה-18 וה-19 תוך ציון תרומתם של מדענים ידועים.

תכנים ומטרות

מטרות הפרק הן להכיר ולבחון את התופעות הגליות ואת המאפיינים של גל מתקדם (חד-ממדי ודו-ממדי), ללמוד על המשותף והמבחין בין גל מתקדם לחלקיק בתנועה, להכיר תופעות גליות באור, להכיר את הגלים האלקטרומגנטיים ולברר את גבולות המודל הגלי של האור. בתיאור הגלים והתנהגותם יודגש התיאור הצורני בלי לפתח את התיאור המתמטי. (עוד בנושא זה ראו בסעיף **דרכי הוראה**, להלן).

ייחודו של הפרק וארגון ההוראה

הוראת הגלים בחטיבה העליונה שונה באופייה מהוראת המכניקה והחשמל מבחינת השימוש בייצוגים מתמטיים מופשטים. בהוראת המכניקה והחשמל אנו מקפידים על בניית חוקים מוכללים שמייצגים את התפתחות המערכת במהלך הזמן (החוק השני של ניוטון, חוק פארדיי, חוקי שימור וכיו"ב), ועוסקים בהצגת פתרונותיהם הפורמליים אפילו עבור מקרים כלליים (תאוצה קבועה עבור כוח קבוע כלשהו, תנועה הרמונית עבור כוח לינארי וכיו"ב). לעומת זאת, לא נהוג להציג את משוואות הגלים ואת הצורה הכללית של הפתרונות ($f(x \pm vt)$), משום שהצגה מופשטת כזאת מקשה על התלמידים. שיטת הוראה זאת מחייבת גישה פנומנולוגית הצמודה לאמצעי המחשה, כלומר, מדגישים את התיאור הצורני של הגלים ולא מפתחים את התיאור המתמטי, וכן נעזרים ביכולת המחשה של אמבט הגלים, הקפיץ או המיתר.

להבנת פרק זה נתבעת מהתלמידים בשלות מתמטית ופיזיקלית – הן כדי להבין לעומק את המודל הגלי (בממד המרחב ובממד הזמן) והן כדי ליישם אותו תוך בחינת תופעות ופתרון בעיות בגלים מכניים ובגלים אלקטרומגנטיים. לכן יש לתכנן את מבנה ההוראה בהתאמה להתפתחות הידע והמיומנות של התלמידים.

בכיתה י' מתרכזים בהכרת תופעות גליות בגלים מכניים ועוסקים בעיקר בצד הצורני של הגלים כמו שמירת הצורה, המהירות הקבועה, עקרון הסופרפוזיציה, הקשר בין מהירות, תדירות ואורך-גל. מתוודעים לתופעות גליות באור הנראה (התאבכות ועקיפה בסדק ובסריג) ומשתמשים בהן לביסוס המודל הגלי של האור ולביסוס השלכותיו השימושיות והתאורטיות, כמו קישור בין תחושת הצבע ותדירות האור, זיהוי חומרים, ניתוח הרכב הכוכבים וטנועתם. בכל תופעה גלית, רצף ההוראה ישלב את ההדגמה הנצפית ומיד לאחריה את התופעה באור, או ידגים את כל התופעות הגליות ולאחר מכן יבדוק את התאמת המודל לאור.

בכיתה י"ב יש להדגיש את הגדלים הפיזיקליים שהגלים נושאים (אנרגיה ותנע) ואת מהות הגלים: גלי קול (וגלים סייסמיים) כתנודות אלסטיות של תווך; גלי אור כהתנהגות מחזורית של השדה האלקטרומגנטי; גלי מים, המסייעים בהמחשה, אך אינם אף אחד משני הסוגים הקודמים. יש לציין כי הגלים הנוצרים באמבט הם מורכבים וכוללים תנודות אורכיות ורוחביות. יש להימנע מדיון במורכבות זו ולהיעזר ביכולת ההמחשה של האמבט, הקפיץ או המיתר.

בהתאם לרמת הכיתה, ניתן להעמיק יותר ביסודות המחלוקת בין מודל הגלים ובין מודל החלקיקים בנושא התנהגות האור, ולהכין את הרקע לאפקט הפוטואלקטרי. בכיתות מתקדמות ניתן לעסוק בקצרה בעקרון פרמה ובאפקט דופלר.

בכיתה י"ב יתוארו גם "קשרי הרוחב" בין פרק הגלים לבין יחידות המכניקה, וכן האלקטרומגנטיות. קישור למכניקה – לדוגמה: דיון ברמה האיכותית (מתוך קישור לחוקי ניוטון) על השפעת מתיחות המיתר וצפיפות המסה שלו על מהירות ההתפשטות של גל לאורכו; קישור לאלקטרומגנטיות - הוראת נושא האלקטרומגנטיות מוביל לדיון איכותי במשוואות מקסוול, המהוות בסיס לרעיון הגלים האלקטרומגנטיים המתפשטים במהירות האור, ולניסוי הרץ (1880) המקשר בין האור לגלים אלקטרומגנטיים.

דרכי הוראה מומלצות

בתחילת לימוד הנושא התלמידים מתקשים בהבנת המושג "גל". על כן יש להסביר כי גל מכני הוא יצירת הפרעה במצב שיווי-המשקל של תווך חומרי (לדוגמה: טבילת חפץ במים, או פריטה על מיתר מתוח). יצירת הפרעה גורמת ליתגובת שרשרת, המתבטאת בהתקדמות ההפרעה לכיוונים שונים

כתלות בתנאי הסביבה שהיא נעה בתוכה. יש ללוות את ההסבר בהדגמת תנועת פולס על קפיץ. מאוחר יותר יש להדגיש בפני התלמידים כי הגלים האלקטרומגנטיים שונים מהותית מהגלים המכניים בכך שאינם נישאים על גבי תווך, ולהזכיר את המושג "אתר", שהומצא על מנת להסביר את מאפייני ההתפשטות של האור.

אמנם התופעות הגליות המעניינות בחיי היום-יום קשורות לגלי הקול ולגלים אלקטרומגנטיים ובכללם האור, אך לשם המחשה בהירה יש להיעזר בגלים במיתר ובאמבט. יש להוסיף כי האופי המיוחד של הגל במרחב ובזמן **מחייב** להיעזר בהמחשות רבות. את ההמחשות ניתן לבצע באמצעות תצפית ישירה, ניתוח סרטי וידאו של מערכות פיזיקליות מתנוודדות (מיתרים וקפיצים בממד אחד, אמבט גלים בשני ממדים) ובאמצעות הדמיות ממוחשבות בעלות ייצוגים גרפיים מתאימים.

המחשב מאפשר להציג תמונה דינמית של התפשטות ההפרעה, כזאת שאפשר לשלוט בה, לעצור אותה מדי פעם ולבחון את ההשפעה של שינוי פרמטרים בצורה נוחה ביותר. (ללא מחשב, המורה מציג באמצעות לוח וגיר סדרה סופית של מצבים עוקבים כמיטב כישרון הציור שלו, אלא שאין בהם כדי לתת תמונה דינמית).

עקרון הסופרפוזיציה הוא מרכזי בגלים ומסביר הן את תופעת ההתאבכות והן את היעדר האינטראקציה בין הגלים. אלה הם מאפיינים חשובים, שיש להתעכב עליהם ולהבחין בינם לבין המאפיינים של ההתנהגות החלקיקית. אחת השאלות הקשות להמחשה היא: מה מתרחש בעת ששני גלים מזדמנים מכיוונים שונים לאותו אתר. מה התרחש בזמן החפיפה? מה מתרחש בעקבותיה? הדמיית המחשב מאפשרת שיגור גלים שונים-צורה, שונים-תדירות או שונים-משרעת והמחשה כי בכל רגע ורגע ובכל נקודה ונקודה ההפרעות מצטרפות זו לזו, לפי חיבור אלגברי פשוט; לאחר מכן, כל אחת ממשיכה בדרכה כאילו לא פגשה כלל בהפרעה השנייה.

הערה: בהיעדר מחשב, ניתן להתגבר חלקית על קשיי ההמחשה על-ידי שימוש בסדרת שקפים מתאימה.

3.1 תכונות של פולסים והשוואתן לתכונות האור (4 שעות)

המושגים "פולס" ("זעזוע"), "פולס רוחב" ו"פולס אורך"

א. מוצע לפתוח את הפרק "גלים מכניים ואלקטרומגנטיים" בחיפוש אחר 'ישות' פיזיקלית השונה מחלקיקים, שתשמש בסיס למודל של אור. על 'ישות' פיזיקלית זו להיפלט ממקור כלשהו ולנוע במרחב. כאן המקום להציג תנועת פולס על קפיץ ולבנות את הבסיס למודל של הגלים המכניים: אור מתנהג כפולס מכני.

ב. את הפולס על הקפיץ יוצרים על-ידי תנועת היד בכיוון מאונך לקפיץ הנייח, ואז מסתבר שכל שאר חלקיקי הקפיץ נעים בכיוון מאונך לכיוון התפשטות הפולס. אפשר לעשות זאת בכמה

- דרכים : ניתוח סרטון וידאו, מעקב בחושך אחר תנועת נורית הקשורה לנקודה כלשהי של הקפיץ, מעקב אחר תנועת סרט-נייר או סרט-בד הקשורים לנקודה כלשהי של הקפיץ. אחרי פעילויות אלה, מוצע להגדיר את המושגים "פולס רוחב" ו"פולס אורך".
- ג. מומלץ להדגים גם פולס מים (למרות שהוא שייך לנושא "גלים דו-ממדיים") ולהראות שגוף הצף על פני המים עולה ויורד עם מעבר הפולס ואינו מתקדם אתו.

קשיי תלמידים

- א. תלמידים נוטים לבלבל בין כיוון ההתפשטות של פולס רוחב, לבין כיוון התנועה של חלקיקי התווך. בהקשר זה יש להדגיש כי מים בקרבת חוף ים ("גלי חוף") אינם תנועה גלית, אלא שילוב של תנועה גלית ותנועת המים לעבר החוף או ממנו. תנועת המים במרחקים העולים על מאות מטרים מן החוף היא בדרך כלל גלית בלבד.
- ב. עם השלמת הלימוד של סעיף זה, רצוי שתצטייר אצל התלמידים התמונה הבאה: פולס רוחב נע בקפיץ - חלקיקי הקפיץ הנמצאים לפני שיא הפולס מתרחקים מקו הקפיץ (הקו שלאורכו משתרע הקפיץ הנייח) בכיוון מאונך לקו הקפיץ; חלקיקי הקפיץ שנמצאים מאחורי שיא הפולס מתקרבים לקו הקפיץ בכיוון מאונך לו, ובסופו של דבר נעצרים לאורך קו הקפיץ. יוצא שצורת הפולס הנע אינה משתנה כמעט במהלך תנועתו.

תיאור של פולס

- א. יש לאפיין את מקומו של חלקיק קפיץ באמצעות ציר x , את מקומו של חלקיק מים על פני המים באמצעות מערכת צירים x ו- y , ואת מקומו של חלקיק אוויר באמצעות מערכת צירים x , y ו- z , ובהתאם לכך למיין את הגלים לחד-ממדיים, דו-ממדיים ותלת-ממדיים.
- ב. יש להציג בעזרת תרשים את המושג "העתק". בגל חד-ממדי, יש להגדיר נוסף לציר x גם ציר y המאונך לקו הקפיץ, כך שראשיתו בקו הקפיץ. ההעתק של נקודת קפיץ מסוימת, שמקומה הוא x , מוגדר כשיעור נקודת הקפיץ בציר ה- y .
- ג. אחד הקשיים של תלמידים בנוגע למושג "גל" הוא הבנת תלות ההעתק במקום ובזמן: $y(x, t)$. לכן יש לדון בשתי תמונות של גל: ההעתק כפונקציה של המקום עבור **רגע מסוים**, ובקיצור פונקציית "העתק-מקום" (התמונה המתקבלת כאשר מצלמים קפיץ שבו מתפשט גל); העתק כפונקציה של הזמן עבור **מקום מסוים** של הקפיץ, (התמונה המתקבלת כאשר מצלמים אותה נקודה במספר תמונות עוקבות), ובקיצור פונקציית "העתק-זמן".

מהירות פולס וסוג התנועה בתווך אחיד, השוואה לאור ומהירות חלקיקי התווך

- א. התווך שבו מתקדם הפולס המכני הוא בעל תכונות פיזיקליות (לדוגמה: אלסטיות), שמאפשרות את תהליך העברת האנרגיה והתנע ממקום למקום. לדוגמה: ניתן להסביר גלי קול המתקדמים בגזים כמין 'מירוץ שליחים', שבו האנרגיה מועברת באמצעות המולקולות לאורך המסלול. כל מולקולה המקבלת בשלב מסוים את האנרגיה והתנע, מתנוודדת ומעבירה הלאה את הגדלים הפיזיקליים האלה.
- ב. יש להראות, למשל באמצעות סרטון וידאו, כי מהירות פולס בקפיץ אחיד היא קבועה. זאת בדומה לאור, שמהירותו בתווך אחיד היא קבועה.
- ג. יש לעמוד על ההבדל בין מהירות התקדמותו של הפולס המכני לבין מהירותם וכיוון התקדמותם של חלקיקי התווך.

עקרון הסופרפוזיציה

- א. אחת התופעות הבסיסיות הקשורות לאור היא העובדה ששתי אלומות אור הנחתכות אינן משפיעות זו על זו.
- ב. יש להדגים חיתוך שני פולסים בקפיץ כדי להיווכח שכל פולס ממשיך בדרכו ואינו מושפע מן החיתוך עם הפולס האחר וכדי להראות שההעתק המתקבל בנקודת החיתוך הוא סכום העתקי הפולסים הבודדים.

מעבר פולס מתווך אחד למשנהו, השוואה לאור

- א. יש להדגיש שכאשר הפולס מגיע למשטח המעבר בין תווך אחד למשנהו, אין בדרך כלל התאמה שמאפשרת העברה של כל האנרגיה מתווך לתווך. כתוצאה מכך, רק חלק מן הגל מועבר, בעוד שחלק אחר מוחזר. החלק המוחזר מתקדם כך שזווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה. (העברה מושלמת מצריכה "התאמת אימפדנסים" - נושא שאין מלמדים בבית הספר.)
- ב. באמצעות מערכת של שני קפיצים השונים זה מזה במסה ליחידת אורך, יש להדגים כי בדומה לאור, גל הנע בקפיץ ופוגע בנקודת הקשר עם קפיץ אחר, מתפצל לגל מוחזר ולגל עובר. כאן רואים יתרון מובהק של מודל הגלים המכניים על פני המודל החלקיקי – באמצעות המודל החלקיקי אי-אפשר להסביר החזרה של אור עם מעבר לתווך השני.
- ג. יש להבחין בין מעבר גל מקפיץ 'קל' לקפיץ 'כבד', לבין מעבר גל מקפיץ 'כבד' לקפיץ 'קל'.

החזרת פולס, קצה חופשי וקצה קשור

- א. באמצעות קפיץ, יש להדגים כי בדומה לאור, גם פולסים מוחזרים כאשר הם מגיעים לתוך שאינו חדיר עבורם.
- ב. יש להדגים החזרת פולס מקצה חופשי של הקפיץ והחזרה מקצה קשור של קפיץ ולעמוד על השוני בהחזרה.

פולס נושא אנרגיה, השוואה לאור

- א. יש לדון בכך שפולס, בדומה לאור, נושא אנרגיה (מקורה בעבודה שעשה מקור הגל על קצה הקפיץ), וכן בסוגי האנרגיה של הפולס בקפיץ.
- ב. יש לציין כי האנרגיה של פולס היא פרופורציונית לריבוע משרעת הפולס ולא לזמן.

ההבדל והדמיון בין חלקיק בתנועה לבין גל

לסיכום הנושא, יש לעזור לתלמידים לחדד את ההבדלים בין חלקיקים לגלים ולהדגיש את ההבדלים הבאים:

1. לחלקיק חומרי אנחנו מייחסים מיקום נקודתי במרחב, בעוד שלגל מייחסים תחום קיום מורחב, שבכל נקודה בו קיימת מידה מסוימת של הפרעה לשיווי-המשקל.
2. חלקיק חומרי הנע ממקום למקום נושא עמו מסה, אנרגיה, תנע קווי ותנע זוויתי. גל מתקדם נושא גם הוא אנרגיה, תנע קווי ותנע זוויתי ממקום למקום, אך ללא העברה של מסה. מדגימים שוני זה על-ידי אבן הנזרקת לעבר לוח זכוכית וגורמת לזעזוע או לשבירה, לעומת גל-קול המתקדם באוויר, פוגע בלוח הזכוכית וגורם גם הוא לזעזוע או שבר.
3. חלקיקים חומריים אינם יכולים לחפוף זה את זה, כלומר להתקיים באותו מיקום במרחב. לעומת זאת, גלים שונים יכולים להתקדם באותם אזורים במרחב, לחפוף זה את זה ולהצטרף על פי "עקרון הסופרפוזיציה". "התאבכות" ו"עקיפה" הם מאפיינים מובהקים של גלים: שני גלים יכולים לבטל זה את זה בנקודות מסוימות – דבר שאינו אפשרי עבור שני חלקיקים חומריים.
4. בין חלקיקים חומריים מתקיימות אינטראקציות אשר גורמות לשינויים באנרגיה, בתנע הקווי ובתנע הזוויתי שלהם. בין גלים לא מתקיימת אינטראקציה גם כאשר נוצרת ביניהם חפיפה, והם יוצאים מאזור החפיפה עם אותן תכונות פיזיקליות שאתן נכנסו לאזור זה.

3.2 גלים מחזוריים חד-ממדיים (4 שעות)

- א. מוצע לפתוח את הנושא בהדגמת גלים מחזוריים הנעים על קפיצים ולהגדיר מהי "מחזוריות הפונקציה".
- ב. מומלץ לחלק את הדיון בגלים מחזוריים לשניים: דיון בפונקציית העתק-מקום - $y(x)$ ודיון בפונקציית העתק-זמן - $y(t)$.
- ג. בהקשר לפונקציה $y(x)$, יש להגדיר את המושגים "מחזור הפונקציה" ו"אורך-גל". לגבי הפונקציה $y(t)$, יש להגדיר את המושגים "מחזור הפונקציה", "זמן מחזור" ו"תדירות".
- ד. יש לדון בסופרפוזיציה של גלים מחזוריים ובמושגים "התאבכות בונה" (כאשר שתי הפרעות יוצרות הפרעה חזקה יותר) ו"התאבכות הורסת" (כאשר הפרעה מבטלת הפרעה אחרת). יש להדגיש שכל אחד מהמושגים הוא מקרה פרטי של סופרפוזיציה בנקודה כלשהי בתווך שבו הגלים עוברים.
- ה. יש לעמוד על התנאים ליצירת "גל עומד" ו"נקודות צומת". יש לעמוד על אורכי הגל והתדירויות המותרות ועל תנאי השפה.

3.3 תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור (4 שעות)

מושגי יסוד

- א. יש להבהיר את ההבדל בין חזית הגל ובין כיוון ההתפשטות. יש להסביר מהו צילום סטרובוסקופי ומה ניתן למדוד בעזרתו.
- ב. יש לעמוד על ההבדל בין גל ישר הנוצר על-ידי מקור גלים ישר, ובין גל מעגלי הנוצר על-ידי מקור נקודתי. כדאי להדגים כבר בשלב זה גל מישורי שהופך למעגלי לאחר מעבר דרך חריצים שונים.
- ג. עקרון הויגנס מסביר את התקדמות הגל על-ידי ההנחה שכל נקודה בחזית הגל מהווה מקור נקודתי לגל הזהה לזה שמקור ההפרעה יוצר. עיקרון זה אכן מסביר תופעות הקשורות בגלים אך גם מעורר קשיים. עקרון הויגנס אינו חוק טבע כמותי, אלא מעין עקרון-על יעיל לגבי התהליך הגלי.

השוואה בין החזרה של גלי מים להחזרת אור

- א. מומלץ לפתוח את הנושא בהדגמה, באמבט גלים, של גל ישר הנע לעבר מחסום ישר, מתנגש בו ומוחזר ממנו. מן ההדגמה נוכחים לדעת שמהלך הגל לעבר המחסום וחזרתו ממנו דומה מאוד למהלך אור הפוגע במראה ומוחזר ממנה.

- ב. מומלץ להציג תצלום של גל ישר במהלך התנגשותו עם המחסום, או להתבונן ולהיווכח באמצעות סרטון וידאו או הדמיה שהזווית בין חזית הגל הפוגע לבין המחסום שווה לזווית שבין חזית הגל המוחזר לבין המחסום.
- ג. יש להראות שזוויות הפגיעה והחזרה, כפי שהן מוגדרות עבור גלים, שוות בהתאמה לזוויות הפגיעה והחזרה כפי שהוגדרו עבור אור.
- ד. מומלץ לדון בהחזרה של גל מעגלי ממחסום ישר ולהשוותה ליצירת דמותו של מקור אור נקודתי באמצעות מראה מישורית.

השוואה בין מעבר גל מתווך אחד למשנהו למעבר אור מתווך לתווך

- א. באמבט גלים, יש להראות שמהירות הגל במים רדודים תלויה בעומק המים, כלומר שני תחומים של מים שבהם עומק המים שונה יכולים לשמש שני תווכים שונים למעבר גלי מים. ניתן לבצע זאת לפי השלבים האלה:
- לערוך ניסוי באמבט גלים, שבו גל ישר מחזורי עובר ממים עמוקים למים רדודים בזווית פגיעה השווה לאפס, לראות כי אורך הגל במים הרדודים קצר יותר, ומכאן להסיק כי מהירות הגל במים הרדודים נמוכה יותר.
 - לחזור על הניסוי כאשר זווית הפגיעה שונה מאפס, לצפות בשבירה ולהוכיח, על סמך עקרון הויגנס, כי מתקיים הקשר: $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$.
 - להראות כי מקשר זה נובע כי בתווך שבו מהירות הגל נמוכה יותר – הזווית קטנה יותר, וזאת בהתאמה למה שקורה במעבר אור מתווך לתווך. כאן נוכחים שוב ביתרון בולט של מודל הגלים המכניים על פני המודל החלקיקי.
- ב. באמצעות מודל הגלים המכניים, יש להסביר את שבירת האור במעבר האור מתווך אחד למשנהו (למשל מאוויר לזכוכית).

השוואה בין נפיצת גלי מים לאור

- א. מומלץ להדגים באמבט גלים נפיצה של גלים על-ידי מעבר גל מחזורי ממים עמוקים למים רדודים בזווית פגיעה שונה מאפס, ולהיווכח ששיעור השבירה תלוי באורך הגל.
- ב. יש לציין בפני התלמידים שתופעת הנפיצה מתקיימת גם באור, אך בהבדל מסוים: באור, ככל שאורך הגל קצר יותר – שיעור השבירה גדול יותר. (הגוון הסגול של האור משנה את כיוון

התפשטותו בשיעור גדול מזה של הגוון האדום.) לעומת זאת, בגלי מים, ככל שתדירות הגל גבוהה יותר – שיעור שינוי הכיוון כתוצאה מהמעבר לתווך האחר נמוך יותר.

3.4 התאבכות ועקיפה בגלי מים ובאור (10 שעות)

א. נושא זה אינו קל להבנה, וסדר ההוראה הוא אפוא חשוב ביותר. להלן הצעה דידיקטית להוראת הנושא "התאבכות", הבנויה על הדגמה באמבט גלים במקביל לשימוש במקורן שקפים:

1. באמבט גלים מדגימים גל מעגלי מחזורי יחיד, ולאחר מכן מפעילים שני מקורות נקודתיים קוהרנטיים לגלים כאלה.

2. מסרטטים על דף נייר את שני הגלים המעגליים המחזוריים (סרטוט חזיתות בהפרש λ).

3. דנים בקשר שבין תבנית ההתאבכות לבין עקרון הסופרפוזיציה.

4. מוסיפים בתרשים את קווי המקסימום ואת קווי המינימום.

5. מאפיינים את התנאי הגאומטרי שמקיימת נקודה על קו מקסימום (הפרש המרחקים שלה משני המקורות שווה למספר שלם של אורכי גל) ואת התנאי שמקיימת נקודה על קו מינימום (ההפרש שלה משני המקורות שווה למספר אי-זוגי של חצי אורך-גל).

6. מודדים אורך-גל באמבט גלים על-ידי בחירה של נקודות שונות על קווי מקסימום ועל קווי מינימום, ומחשבים את אורך הגל על פי התנאי הגאומטרי שמקיימת כל נקודה.

7. נעזרים בזוג שקפים (בכל שקף מסורטט גל מעגלי מחזורי) כדי לנתח את השפעת המרחק בין המקורות על תבנית ההתאבכות.

8. משנים את המרחק בין המקורות באמבט הגלים ואת אורך הגל ובוחנים כיצד כל פרמטר משפיע על תבנית ההתאבכות.

9. דנים בשאלה: כיצד הפרש מופע בין המקורות משפיע על תבנית ההתאבכות.

10. דנים בשאלה: באמבט גלים נוצרת תבנית התאבכות, וכל 10 שניות משתנה באופן אקראי הפרש המופע בין המקורות. מה יראה צופה המתבונן באמבט הגלים? לאחר מכן דנים באותה שאלה, אלא שמשנים את הפרש המופע כל 5 שניות, כל 1 שנייה, כל מאית שנייה. מכאן מגיעים למושג "מקורות קוהרנטיים" ("מקורות צמודים").

11. דנים בשאלה: מדוע לא מתקבלת תבנית התאבכות יציבה משני מקורות אור קרובים אך בלתי תלויים.

12. עורכים ניסוי דמוי "ניסוי יאנג".

13. דנים במגבלות השיטה למדידת אורך-גל של אור בעזרת מדידת הפרשי מרחקים של נקודה הנמצאת על קו מקסימום משני המקורות.

14. מפתחים את הנוסחה $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} \approx n \frac{\lambda}{d}$ עבור המצב שבו המרחק L בין המקורות למסך,

גדול מאוד ביחס למרחק d בין שני המקורות (ומפתחים את הנוסחה המתאימה לקווי מינימום).

15. מזהים שקווי המקסימום וקווי המינימום הם היפרבולות ודנים בקירוב ההיפרבולות באמצעות אסימפטוטות (כאשר מתקיים התנאי $L \gg d$).

16. מפתחים את הנוסחה $\frac{\Delta x}{L} \approx \frac{\lambda}{d}$ עבור המקרה שבו הזוויות θ_n הן קטנות.

17. דנים בהתאבכות של אור לבן.

ב. אין צורך לטפל באופן מתמטי בתבנית התאבכות כאשר יש הפרש מופע בין המקורות. יש ללמד זאת איכותית בלבד.

ג. יש לציין כי קיימות שלוש תופעות שבהן האור משנה את כיוון התפשטותו: החזרה, שבירה ועקיפה. יש להדגיש כי האופטיקה הגאומטרית היא קירוב של המודל הגלי של האור במצבים שבהם אין שינוי כיוון כתוצאה מעקיפה.

קשיי תלמידים

תלמידים מתקשים להבין מדוע בתבנית התאבכות בגלי מים התמונה היא דינמית (בשפת האמבט מגיעים שיאים ושפלים של הגל בזה אחר זה), ואילו באור – התמונה היא סטטית (עצמת האור בקווי המקסימום נראית קבועה), לכן יש לדון בכך.

3.5 גלים אלקטרומגנטיים, ספקטרום, יישומים ורקע היסטורי (6 שעות)

עיקרי המודל האלקטרומגנטי

א. יש להציג את הדרכים ליצירת שדה חשמלי:

1. על-ידי הפרדת מטענים באמצעות -

(I) שפשוף.

(II) הנעת מוט בתוך שדה מגנטי.

2. על-ידי השראה אלקטרומגנטית ושינויים בזמן בשדה המגנטי.

כמו כן יש להציג את הדרכים ליצירת שדה מגנטי:

1. על-ידי זרם (ניסוי ארסטד).

2. על-ידי שדה חשמלי משתנה (השערת מקסוול).

- ב. יש להסיק על קיומם של גלים אלקטרומגנטיים מהתאוריה של מקסוול ולהציג את תכונותיהם:
1. המקור של גלים אלקטרומגנטיים הוא מטען חשמלי מואץ.
 2. גל אלקטרומגנטי הוא שדות חשמליים ושדות מגנטיים המשתנים בזמן, שיוצרים זה את זה, שמאונכים זה לזה ושמאונכים לכיוון התפשטות הגל.
 3. גל אלקטרומגנטי הוא גל רוחב.
 4. גל אלקטרומגנטי מתקדם בריק במהירות האור בלי קשר למהירות מקור הגל או לתדירות שלו. גל אלקטרומגנטי יכול להתקדם גם בחומר, ואז מהירותו משתנה בהתאם לחומר ובמידה מסוימת גם בהתאם לתדירות הגל (נפיצה).
 5. האנרגיה שגל אלקטרומגנטי נושא נקבעת על-ידי משרעת השדה החשמלי. (משרעת השדה החשמלי ומשרעת השדה המגנטי פרופורציוניות זו לזו). האנרגיה קשורה לשדות ולא לחלקיקי התווך.
- ג. יש להציג את תוצאות ניסוייו של הרץ בגלים אלקטרומגנטיים.
- ד. יש להדגיש את ההבדל בין גל מכני לגל אלקטרומגנטי: גל מכני מתבטא בשינויים שהגל מחולל בתווך, בעוד שגל אלקטרומגנטי מתבטא בשינויים בעצמותיהם של השדה החשמלי והשדה המגנטי.
- ה. יש להציג תרשים של הספקטרום האלקטרומגנטי ולדון בתכונות המשותפות לכל הגלים ובשוני בין הגלים.

גלים אלקטרומגנטיים – היבטים מדעיים, טכנולוגיים והיסטוריים

- א. השפעת האטמוספירה על קרינה אלקטרומגנטית
1. מבוא לאסטרונומיה: יש להציג את התחומים השונים של הקרינה האלקטרומגנטית הנבלעת באטמוספירה, ואת התחומים השונים של הקרינה המגיעה לקרקע כדור הארץ (ה"חלונות"). יש לדון ב"תצפיות" בגרמי השמים בתחומי הקרינה האלקטרומגנטית השונים מן האור הנראה.
 2. שכבת האוזון: יש לדון בהשפעתה של שכבת האוזון על הקרינה העל-סגולה ה"קשה" הנפלטת מן האטמוספירה, וכן בבעיית "החור באוזון" ובהשפעתה על האדם והצומח.
 3. גוני השמים: יש לדון בגוון השמים במהלך היום ובעת שקיעת השמש, ובסיבות לגוונים אלה.
- ב. התחומים השונים של ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית
1. תחום גלי הרדיו

רקע היסטורי: המצאת התקשורת האלחוטית על-ידי מרקוני; שידורי רדיו הנושאים את קולו של האדם.

שימושים: שידורי רדיו וטלוויזיה (יש להציג גם את השפעת היונוספרה על גלי הרדיו המשודרים מן הקרקע).

2. גלי מיקרו

שימושים: תקשורת לוויינים, מערכות מכ"מ, תנורי מיקרו-גל.

3. קרינה תת-אדומה

רקע היסטורי: גילוי הקרינה התת-אדומה על-ידי ויליאם הרשל.

מקורות: גופים 'חמים'.

דרכי גילוי: מד-חום, תאי חישה בעור, לוחות צילום. (נחשים ממשפחות מסוימות רואים את הטרף באמצעות קרינה תת-אדומה הנפלטת ממנו.)

שימושים: אפקט החממה בחקלאות (בהקשר זה יש לדון גם באפקט החממה באטמוספירה), שְלטים.

קשיי תלמידים: כיוון שקרינה תת-אדומה מחממת והיא מכונה לעתים "קרינת חום", יש הנוטים לחשוב שקרינה תת-אדומה היא קרינה של חום. יש להבהיר ששיעור גבוה ממנה נבלע בחומר לכן היא מחממת, אך אין מדובר בקרינה של חום.

4. קרינה על-סגולה

מקורות טבעיים ומקורות מלאכותיים: שמש, מעבר זרם חשמלי דרך אדי כספית.

דרכי גילוי: לוחות צילום, פלואורסצנציה.

שימושים: עיקור מזון, טיהור מים, "מלבינים אופטיים" באבקות כביסה, צבע של עט הדגשה, מיקרוסקופים לקרינה על-סגולה.

5. קרינת רנטגן

רקע היסטורי: גילוי הקרינה עלידי רנטגן, האופן שבו התגלה כי הקרינה היא אלקטרומגנטית (ניסוי פון-לאואה).

מבנה: מבנה שפופרת רנטגן.

תכונות: השחרת לוח צילום, יוניזציה של גז שהקרינה עוברת דרכו, הרס רקמות.

שימושים: ברפואה: צילום רנטגן, מעקב אחר צנתר, טיפול בגידולים ממאירים; בתעשייה:

גילוי פגמים במוצקים; במחקר: חקר מבנה ה-DNA.

6. קרינת גמא

רקע היסטורי: גילוי הקרינה על-ידי הנרי בקרל, מחקר על-ידי הזוג מארי ופייר קירי, הפרדת הקרינה הרדיואקטיבית לשלוש קרינות באמצעות שדה מגנטי ושדה חשמלי.

שימושים: ברפואה: אבחון רפואי, טיפול בגידולים ממאירים; בתעשייה: גילוי פגמים

במוצקים; במחקר: מחקר בסיסי של החומר.

מגבלות מודל הגלים האלקטרומגנטיים

בסיום הוראת מודל הגלים האלקטרומגנטיים, יש להציג את גילוי האפקט הפוטואלקטרי על-ידי הרץ. המודל מסביר מדוע ניתן לעקור אלקטרונים ממתכת על-ידי אור, אך מתקשה להסביר את התופעות הנוספות של האפקט, כמו התלות בתדירות האור.

פרק 4: מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור

שעות	הנושא
5	4.1 האפקט הפוטואלקטרי, הסבר איינשטיין וניסוי מיליקן
1	4.2 אפקט קומפטון
1	4.3 קרינת רנטגן לאור הסבריו של איינשטיין
1	4.4 המודל הדואלי של הקרינה האלקטרומגנטית
8	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
5	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי: הדגמה איכותית של האפקט הפוטו-אלקטרי. - ניסוי: תלות מתח עצירה בתדירות הקרינה. 	$E_{\text{פוטון}} = hf$ $E_{\text{פוטון}} (\text{eV}) = \frac{12,400}{\lambda (\text{\AA})}$ $E_{\text{פוטון}} = E_k + B$	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה איכותית של האפקט הפוטואלקטרי. - אי-יכולתה של תאוריית מקסוול להסביר חלק מן העובדות הניסיוניות לגבי האור, השערת פלנק. - התא הפוטואלקטרי, חקירת תלותו של מתח העצירה בתדירות הקרינה הפוגעת, ניסוי מיליקן. - המודל של איינשטיין לאפקט הפוטואלקטרי. - יישומים: פתיחת דלתות, מנגנוני אזעקה, מכפיל-אור. 	4.1 האפקט הפוטו-אלקטרי, הסבר איינשטיין וניסוי מיליקן
1		$p = \frac{h}{\lambda}$	<ul style="list-style-type: none"> - תיאור איכותי של אפקט קומפטון. - הביטוי לתנע של פוטון, הפוטון כחלקיק. 	4.2 אפקט קומפטון
1	<ul style="list-style-type: none"> - צפייה בסרטים בנושא. 		<ul style="list-style-type: none"> - הכרת החלקים העיקריים של שופרת ליצירת קרינת רנטגן ותפקידיהם: שופרת ריק, קתודה, מטרה, מערכת קירור המטרה, מקור מתח מאיץ, נימה, מקור מתח חימום. - קרינת רנטגן כקרינת האטה וכקרינה אופיינית לחומר המטרה. - הספקטרום הרציף של קרינת רנטגן הנפלטת משופרת, הקשר בין המתח המאיץ לבין אורך הגל המינימלי. 	4.3 קרינת רנטגן לאור הסבריו של איינשטיין
1			<ul style="list-style-type: none"> - מיון ואפיון תופעות הקשורות באור המוסברות על-ידי האופי החלקיקי, וכאלה המוסברות על-ידי האופי הגלי. - תלות המודל החלקיקי במודל הגלי, ולהפך. 	4.4 המודל הדואלי של הקרינה האלקטרו-מגנטית

מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור: פירוט,

דגשים, הערות דידקטיות

4.1 האפקט הפוטואלקטרי (5 שעות)

א. מומלץ לפתוח את לימוד הנושא בתיאור ההרגשה שרווחה בסוף המאה ה-19 כאילו הפיזיקה בת-הזמן מסוגלת להסביר את כל תופעות הטבע. כדאי לצטט בהקשר זה את מייכלסון, (1894): "החשובים שבחוקי היסוד ובעובדות כבר התגלו, והם כיום מבוססים כל כך, עד כי האפשרות שיוחלפו אי-פעם כתוצאה מגילויים חדשים רחוקה עד מאוד..."

ב. מומלץ להדגיש כי ראיית העולם המכניסטית שרווחה בסוף המאה ה-19 התבססה על שלושה גורמים: ודאות, דטרמיניזם וסיבתיות. בהקשר זה כדאי לצטט פיזיקאים מן המאה ה-19. דוגמאות:

לפלס: "מצבו הנוכחי של העולם הוא פועל יוצא של מה שהיה רגע אחד קודם".
פואנקרה: "אילו ידענו את חוקי הטבע ואת העולם ברגע ההתחלה שלו, היינו יכולים לנבא מה יהיה מצב העולם רגע אחד אחר כך".

ג. אין חובה ללמד את הנושא "קרינה של גוף שחור", אולם כדאי לתאר את "הקטסטרופה של האולטרה-סגול" בקשר לקרינה של גוף שחור. יש להציג את הנחת פלאנק בדבר 'חבילות' אנרגיה (קוונטים), שבאמצעותן הסביר פלאנק את התפלגות הקרינה הנפלטת מגוף שחור.

הדגמה איכותית של האפקט הפוטואלקטרי

א. כמבוא לאפקט הפוטואלקטרי, יש להציג שתי תופעות שהיו מוכרות בשלהי המאה ה-19: (1) קרינה אולטרה-סגולה הפוגעת בכדור הטעון במטען שלילי, משפיעה על קצב ההתפרקות החשמלית בינו לבין כדור הטעון במטען חיובי. לעומת זאת, אור נראה אינו משפיע על ההתפרקות החשמלית (תגלית של הרץ משנת 1887).

(2) סרט צילום מושפע מאור לבן, אולם אינו מושפע מאור אדום. תופעות אלה לא התיישבו עם הפיזיקה הקלאסית, שבה האנרגיה של גל פרופורציונית לריבוע משרעת הגל.

ב. את האפקט הפוטואלקטרי מוצע להציג תחילה באמצעות ניסוי איכותי (הטלת קרינות שונות על לוחות מתכת שונים, שכל אחד מהם מונח על לוחית של אלקטרוסקופ טעון). יש להציג את הניסוי האיכותי כך שיעורר שאלות לגבי עובדות שאינן מתיישבות עם הפיזיקה הקלאסית.

ג. חשוב שתלמידים יוכלו לתאר במילים את האפקט הפוטואלקטרי ויבינו כי התופעה של עקירת אלקטרונים ממתכת על-ידי קרינה אינה סותרת את התורה הקלאסית. (תלמידים נוטים לחשוב להפך).

חקירת תלות מתח העצירה בתדירות הקרינה הפוגעת

א. לאחר הטיפול האיכותי, יחקרו התלמידים באמצעות ניסוי את הקשר שבין מתח העצירה בתא פוטואלקטרי לבין תדירות הקרינה הפוגעת בפולט, ואת השפעת עצמת ההארה על פליטת אלקטרונים.

ב. יש להציג את ההנחות של איינשטיין לאפקט הפוטואלקטרי ואת נוסחת איינשטיין. יש להדגיש את המושגים: "קוונטיזציה", "אנרגיית קשר".

ג. מומלץ להראות כי שלושת הגדלים - הקבוע של פלאנק, מכפלת תנע קווי באורך, תנע זוויתי - נמדדים כולם באותה יחידה.

ד. כדי לפשט את החישובים מומלץ לפתח את הנוסחה:

$$E_{\text{פוטון}} (\text{eV}) = \frac{12,400}{\lambda \left(\overset{0}{\text{A}} \right)}$$

חשוב להדגיש כי נוסחה זו מתאימה רק עבור פוטונים. (תלמידים נוטים להשתמש בה גם עבור אלקטרונים).

ה. מומלץ להציג ציטטות המעידות כי הרעיונות של איינשטיין לגבי האפקט הפוטואלקטרי נדחו על-ידי הקהילה המדעית קרוב ל-20 שנה. דוגמאות לציטטות:

הוועדה שדנה בשנת 1913 במועמדותו של איינשטיין לחברות באקדמיה הפרוסית למדעים (פלאנק היה אחד מחברי הוועדה), המליצה על קבלתו של איינשטיין בזכות הישגיו המפוארים, למרות מה שהיא כינתה "הספקולציה הלא מוצלחת שלו בדבר האופי הקוונטי של האור...".

מיליקן (1916): "... מפתיע שהתוצאות הניסיוניות מתאימות לנוסחת איינשטיין שנבעה מן התאוריה הקוונטית שכיום נזנחה".

ו. יש לציין יישומים ומנגנונים המבוססים על האפקט הפוטואלקטרי, כמו מנגנוני אזעקה ומכפיל-אור.

הדגמות וניסויים

א. ניסוי איכותי להדגמת האפקט הפוטואלקטרי: מניחים לוח ברזל על אלקטרוסקופ הטעון במטען שלילי, ומאירים אותו תחילה באור לבן ואחר כך בקרינה אולטרה-סגולה. חוזרים על הניסוי עם לוח פח מגולוון (במקום לוח הברזל). מגלים כי האלקטרוסקופ נפרק רק במצב שבו לוח הפח המגולוון מוקרן בקרינה אולטרה-סגולה.
שאלות שהניסוי מעורר:

(1) מדוע אלקטרוונים אינם נעקרים מלוח הברזל?

(2) מדוע רק קרינה על-סגולה עוקרת אלקטרוונים מלוח הפח המגולוון?

(3) מדוע פליטת האלקטרוונים היא מיידית, גם כשהקרינה חלשה?

ב. ניסוי כמותי לחקר האפקט הפוטואלקטרי (מציאת הקשר בין תדירות הקרינה הפוגעת בפולט לבין האנרגיה הקינטית של האלקטרוונים הנפלטים ממנו): מחברים את הפולט ואת הקולט של תא פוטואלקטרי למקור מתח משתנה, כך שפוטנציאל הפולט גבוה מפוטנציאל הקולט. מאירים את הפולט בתדירויות שונות של אור, ובכל פעם מודדים את המתח המינימלי הדרוש (בין הקולט לפולט) כדי שאלקטרוונים לא יגיעו אל הקולט (הזרם במעגל מתאפס). ניתוח הממצאים כולל גרף המתאר את האנרגיה הקינטית של האלקטרוונים כפונקציה של תדירות הקרינה הפוגעת.
בניסוי זה יש לבחון גם את השפעת עוצמת ההארה על האנרגיה הקינטית של האלקטרוונים.

4.2 אפקט קומפטון (1 שעה)

- א. יש להציג את אפקט קומפטון באופן איכותי.
- ב. חשוב להסביר לתלמידים כיצד אפקט קומפטון מעיד על האופי החלקיקי של הקרינה האלקטרומגנטית.
- ג. יש לייחס לפוטון תנע. את הביטוי לתנע ניתן להציג ללא הוכחה פורמלית. כדאי לציין כי גם התנע הוא גודל קוונטי.

4.3 קרינת רנטגן לאור הסבריו של איינשטיין (1 שעה)

- א. יש לציין את חלקי השפופרת ליצירת קרני רנטגן ואת תפקידו של כל חלק.
- ב. יש לדון בגרף המתאר את עוצמת הקרינה היחסית (הנפלטת מן השפופרת) כתלות באורך הגל ולהסביר מדוע מתקבל אורך-גל מינימלי.

ג. יש לקשור את החלק הרציף של הגרף עם קרינת האטה (Bremsstrahlung) ואת החלק הבדיד של הגרף - עם מעבר של אלקטרונים פנימיים (במתכת שממנה עשויה המטרה) מרמות אנרגיה גבוהות לרמות נמוכות. עם זאת, חשוב לזכור שהתלמידים אינם בקיאים בנושא רמות האנרגיה.

4.4 המודל הדואלי של הקרינה האלקטרומגנטית (1 שעה)

- א. יש לאפיין את התופעות שניתן להסביר באמצעות המודל הגלי ואת התופעות שניתן להסביר באמצעות המודל החלקיקי.
- ב. המודל הדואלי מעורר קשיים מושגיים: לא רק שאין מודל אחד המתאר את כל תופעות האור, אלא שלא ניתן להפריד את המודל הגלי מן המודל החלקיקי. בתופעה שבה מתבטא האופי החלקיקי - הביטוי hf לאנרגיה של פוטון כולל את המושג תדירות שהוא מושג גלי. מאידך גיסא, את תבנית ההתאבכות (שבה מתבטא המודל הגלי) מגלים על מסך - וזו אינטראקציה של אור עם חומר, כלומר תופעה בעלת אופי חלקיקי.
- ג. התבוננות ודיון בציוור של אָפֶּר (ראו תרשים) עשויים לסייע בהבנת התמונה הדואלית.



ציוור של אָפֶּר

- ד. מומלץ לדון בניסוי של טיילור כדי לקשור בין התמונה הגלית לתמונה החלקיקית. כתרגיל, מומלץ להציג תמונה של התאבכות ולדון במאפייני התמונה המתאימים לאופי הגלי ובמאפייני התמונה המתאימים לאופי החלקיקי.

פרק 5: מבנה האטום

שעות	הנושא
2	5.1 גילוי האלקטרון
1	5.2 מודל האטום על פי תומסון
2	5.3 ניסוי רתרפורד והמודל הפלנטרי של האטום
1	5.4 ספקטרום הפליטה הניסיוני של אטום המימן
4	5.5 מודל בוהר לאטום המימן
2	5.6 ניסוי פרנק-הרץ
4	5.7 ספקטרום בליעה וספקטרום פליטה
1	5.8 עקרון ההתאמה של בוהר
17	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	ניסויים והדגמות: - שופרת צלב מלטיזי: הסחה בשדה חשמלי ובשדה מגנטי. - מדידת היחס e/m . - אלקטרולוזה.		- קרני קתודה - רקע היסטורי (ויכוחים לגבי מהות הקרניים). - ניסויים לחשיפת תכונות קרני קתודה.	5.1 גילוי האלקטרון
1			- הצגת המודל ומגבלותיו.	5.2 מודל האטום על פי תומסון
2	- המחשת המודל בעזרת מתקן מכני (ראו הערות דידקטיות). - הדמיית מחשב: פיזור חלקיקי α על-ידי גרעין זהב.		- ניסוי רתרפורד; גרעין האטום. - חישוב רדיוס אטום המימן בעזרת ערך ניסיוני של אנרגיית היינון. - מגבלות המודל.	5.3 ניסוי רתרפורד והמודל הפלנטרי של האטום
1	- מדידת אורכי הגל בתחום הנראה, הנפלטים מגז מימן חד-אטומי.	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	- סדרות לימן, בלמר, פשן וברקט, ומקומן בספקטרום האלקטרומגנטי. - נוסחה אמפירית לחישוב אורכי הגל של הסדרות.	5.4 ספקטרום הפליטה הניסיוני של אטום המימן

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4		$2\pi r_n \cdot mv_n = nh$ $r_n = a_0 n^2$ $a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2}$ כאשר: $E_n = -\frac{R^*}{n^2} = -\frac{13.6\text{eV}}{n^2}$ כאשר: $R^* = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} = 13.6\text{eV}$	<ul style="list-style-type: none"> - הנחות בוהר. - גזירת ביטויים עבור "רמות האנרגיה" האטומיות ועבור רדיוסי המסלולים של האלקטרונים. - דיאגרמת רמות אנרגיה (רמות בדידות ורצף). - חישוב אורכי הגל של ספקטרום הפליטה. - המושגים: "מצב יסוד" של האטום, "מצבים מעוררים", "אנרגית יינון". 	5.5 מודל בוהר לאטום מימן
2	- ניסוי פרנק-הרץ או דומה לו.		- מערכת הניסוי, מהלך הניסוי ותוצאותיו.	5.6 ניסוי פרנק-הרץ
4			<ul style="list-style-type: none"> - ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה של גזים שונים. - עירור אטומי על-ידי חלקיקים. - השוואה בין ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה של אותו אטום. - הקשר בין קרינה הנפלטת מאטום לבין רמות האנרגיה האטומיות. 	5.7 ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה
1			<ul style="list-style-type: none"> - הצגת העיקרון. - חישוב תדירויות הקרינה הנפלטת מאטום מימן בעל רדיוס גדול - בעזרת התורה האלקטרומגנטית הקלאסית ובעזרת מודל בוהר. 	5.8 עקרון ההתאמה של בוהר

מבנה האטום: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

5.1 גילוי האלקטרון (2 שעות)

- א. מומלץ לסקור את חילוקי הדעות בסוף המאה ה-19 (לפני גילוי האלקטרון) לגבי מהותן של קרני קתודה שנוצרו בשפופרות קתודיות.
- ב. יש לבצע ניסויים שמטרתם לחקור תכונות קרני קתודה, וניסויים שמטרתם למדוד את היחס e/m לגבי האלקטרון.
- ג. מומלץ לבצע ניסוי באלקטרוליזה, שממנו ניתן להסיק כי מטענים חשמליים הם תמיד כפולה שלמה של מטען בסיסי.

הדגמות וניסויים

- ניסוי א: חקר קרני קתודה. דוגמה למערכת ניסוי מתאימה היא השפופרת המכונה **צלב מלטזי**. באמצעות השפופרת ניתן:
- (1) לבחון צללית שנוצרת בשעה שמקרינים קרני קתודה וצללית שנוצרת בשעה שמקרינים אור, ולהשוות בין שתי הצלליות.
- (2) לבחון את השפעתו של שדה מגנטי על קרני קתודה.
- ניסוי ב: מדידת היחס e/m . מערכת ניסוי מתאימה היא, לדוגמה, השפופרת המכונה **שפופרת הטיה**. בניסוי זה ניתן להאיץ אלקטרונים במתח ידוע, להטות אותם בשדה חשמלי ו/או בשדה מגנטי ולחקור את תנועתם בהשפעת שני השדות.
- ניסוי ג: אלקטרוליזה. הצעה לניסוי מופיעה למשל בכתב העת **תהודה**, כרך 15, חוברת 2.

5.2 מודל האטום על פי תומסון (1 שעה)

אין צורך להרבות בחישובים של מרחקי אלקטרונים ממרכזי האטומים השונים. ניתן להסתפק בתיאור המודל, ציון יתרונותיו (יציבות האטום) וחישוב תדירויות האור הנפלט מאטומי מימן על פי המודל. התדירויות המתקבלות אינן תואמות את הערכים הנמדדים.

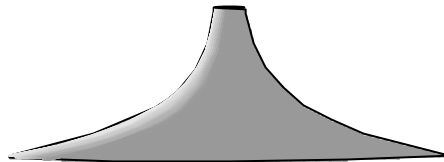
5.3 ניסוי רתרפורד והמודל הפלנטרי של האטום (2 שעות)

- א. יש להציג את ההשערה של רתרפורד לגבי תוצאות הניסוי, לתאר את מערך הניסוי ואת ממצאיו.

- ב. יש לתאר את המודל שבאמצעותו הסביר רתרפורד את תוצאות הניסוי - רוב המסה של האטום מרוכזת בגרעין קטן ביחס לאטום, והמטען החשמלי של הגרעין הוא חיובי.
- ג. מומלץ לחשב בעזרת המודל הפלנטרי את רדיוס האטום המימן (על פי החוק השני של ניוטון לגבי האלקטרון, הביטוי לאנרגיה המכנית הכוללת של מערכת הגרעין והאלקטרון, ואנרגיית היינון של אטום המימן הידועה באופן אמפירי).
- ה. יש להציג את מגבלות המודל הפלנטרי:
- (1) האטומים יציבים למרות שהאלקטרונים מואצים. אלקטרונים מואצים אמורים לקרוך, לאבד אנרגיה וליפול בסופו של דבר על גרעין האטום.
 - (2) לא נמצאה דרך לקשור בין המודל הפלנטרי לבין הספקטרום של אטום המימן.
 - (3) המודל אינו קובע את רדיוס האטום, ולא ברור מדוע לכל אטומי המימן (בתנאים 'רגילים') אותה אנרגיית קשר.

הדגמות וניסויים

- א. מומלץ להיעזר במתקן מכני, כדוגמת זה המתואר בתרשים, כדי להסביר את פיזור חלקיקי α . (מניחים את המתקן על משטח אופקי ומגלגלים לעברו כדורי פלדה.)



מודל מכני להדגמת פיזור חלקיקים חיוביים על-ידי גרעין אטום

- ב. מומלץ להשתמש בהדמיות מחשב לתיאור מסלולים של חלקיקי α המפוזרים על-ידי אטומים הבנויים על פי מודל תומסון ועל-ידי אטומים הבנויים על פי המודל של רתרפורד. לגבי כל אחד משני המודלים, מומלץ לבנות (באמצעות מחשב) גרף המתאר את מספר החלקיקים המפוזרים כפונקציה של הזווית.

5.4 ספקטרום הפליטה הניסיוני של אטום המימן (1 שעה)

מומלץ לעסוק תחילה באורכי הגל של ארבעת הקווים הספקטרליים בתחום הנראה, וכן בנוסחה האמפירית של בלמר. לאחר מכן מתארים את סדרת בלמר הכללית, וכן שלוש או ארבע סדרות נוספות, ולבסוף מציגים את נוסחת רידברג.

הדגמות וניסויים

מומלץ לערוך מדידה ספקטרוסקופית של אורכי הגל של האור הנראה, הנפלט משפופרת התפרקות המכילה גז מימן. (כאשר מעבירים בשפופרת זרם, היא מכילה לצד מולקולות המימן גם אטומי מימן).

5.5 מודל בוהר לאטום המימן (4 שעות)

- א. יש להציג את ההנחות של בוהר לגבי אטום המימן: הנחה ראשונה בדבר קיום מסלולים סטציונריים שבהם האלקטרון אינו קורן; הנחה שנייה בדבר פליטה או בליעה של אנרגיה במעבר אלקטרון ממסלול סטציונרי אחד למשנהו. אם המושג "תנע זוויתי" מוכר לתלמידים, ניתן להציג את ההנחה השלישית כקוונטיזציה של התנע הזוויתי: $r_n m v_n = n(h/2\pi)$. אם מושג זה אינו מוכר לתלמידים, ניתן להציג את ההנחה השלישית כקוונטיזציה של הגודל המתקבל ממכפלת התנע הקווי של האלקטרון בהיקף מסלולו: $2\pi r_n \cdot m v_n = nh$.
- ב. חשוב לקשור את ההנחה השנייה של בוהר עם חוק שימור האנרגיה. יש להראות כי חוק שימור התנע מחייב שאטום המימן יירתע, וכי אנרגיה זו ניתנת להזנחה ביחס לאנרגיות המעורבות.
- ג. חשוב להדגיש כי מודל האטום של בוהר מבוסס על הנחות קלאסיות ועל הנחות שאינן קלאסיות.
- ד. יש לפתח את הביטוי עבור רדיוסי המסלולים האפשריים של אלקטרון באטום המימן, ואת הביטוי עבור האנרגיה המכנית הכוללת של מערכת הפרוטון והאלקטרון - אנרגיה קינטית ופוטנציאלית-חשמלית. (האנרגיה הקינטית של הפרוטון זניחה ביחס לאנרגיות האחרות).
- ה. מושגים חדשים: "רמות אנרגיה", "מצב יסוד", "מצבים מעוררים", "אנרגיית יינון". נוסף לייצוג רמות האנרגיה על-ידי נוסחה, יש לייצגן על-ידי הסכמה המקובלת.
- חשוב שהתלמידים יבינו מדוע משתמשים במונח **רמות אנרגיה של האטום** ולא במונח **רמות אנרגיה של האלקטרון**. כמו כן חשוב שתלמידים יבינו מדוע רמות האנרגיה נקבעות רק עד כדי קבוע. (לעתים קרובות, תלמידים אינם מקשרים בין נושאי לימוד שונים בפיזיקה, למשל בין המכניקה לבין הפיזיקה המודרנית).

5.6 ניסוי פרנק-הרץ (2 שעות)

- א. מומלץ לתאר את הניסוי המקורי שבוצע על-ידי פרנק והרץ.
- ב. חשוב להדגיש כי העובדה שהאנרגיה הקינטית של האלקטרונים אינה משתנה בקירוב כתוצאה מהתנגשויות אלסטיות, נובעת מצירוף של שני גורמים:

- (1) מסת אטום הכספית גדולה מאוד ממסת האלקטרון.
- (2) מהירות האלקטרונים גדולה מאוד ביחס למהירות אטומי הכספית. (ניתן להשוות בין המהירויות על-ידי חישוב מהירות אלקטרון שמואץ במתח של 1 וולט, למשל, וחישוב, במסגרת המודל של גז אידאלי, של מהירות אטום כספית בטמפרטורה של 150°C).
- ג. תלמידים נוטים לחשוב כי ירידות בעצמת זרם במתחים של 4.9V, 9.8V וכו' מתאימות למעברים בין רמת היסוד ורמות אנרגיה מעוררות שונות. לכן חשוב לעמוד על כך שמדובר במעבר בין רמת היסוד ובין אותה רמה מעוררת.

הדגמות וניסויים

מומלץ לבצע ניסוי דמוי ניסוי פרנק-הרץ, למשל באמצעות שפופרת המכילה גז כסנון או ארגון.

5.7 ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה (4 שעות)

א. יש להציג תצלומים המהווים ספקטרה של פליטה וספקטרה של בליעה, ולהסיק כי:

- (1) בתנאים מסוימים, גז פולט קרינה. הקרינה אינה נפלטת בתחום רציף של אורכי גל, והיא אופיינית לסוג הגז הפולט את הקרינה.
- (2) בתנאים מסוימים, גז בולע קרינה. הקרינה אינה נבלעת בתחום רציף של אורכי גל, והיא אופיינית לסוג הגז הבולע את הקרינה.
- ב. יש לדון בשני מנגנונים לעירור אטום:
- (1) התנגשות האטום עם חלקיק אחר (כגון אלקטרון, יון, מולקולה טעונה). שימוש בתופעה זו נעשה למשל בהתפרקות חשמלית המתרחשת בשלטי פרסומת שבהם מצוי גז ניאון.
- (2) בליעה של פוטון.
- כדי שעירור אטומי יתרחש במנגנון הראשון, אנרגיית החלקיק צריכה להיות גדולה מן הפער בין רמת היסוד לרמה מעוררת או שווה לו. במנגנון השני, אנרגיית הפוטון צריכה להיות שווה לפער בין רמות האנרגיה האטומיות.
- ג. יש לציין כי בתהליך של עירור אטומי באמצעות קרינה אלקטרומגנטית, תתרחשנה התופעות הבאות:
- (1) הקרינה הנפלטת מן הגז יכולה לכלול אורכי גל שלא נכללו בקרינה הפוגעת.
- (2) בספקטרום הפליטה מופיעים קווים שחורים, למרות שאורכי הגל שנבלעו גם נפלטו.
- ד. יש לדון ביישום של זיהוי אטומים על פי הקרינה הנפלטת מהם. בהקשר זה ראוי להציג את הספקטרום של אור השמש (קווי פרנהופר).

מומלץ לדון גם בשיטה לקביעת מהירות תנועתם של גרמי שמים על פי הסחת אורכי הגל של הקרינה הנפלטת מהם (אפקט דופלר, באופן איכותי).

5.8 עקרון ההתאמה של בוהר (1 שעה)

א. ניסוח עקרון ההתאמה: תורת הקוונטים צריכה לתת תוצאות דומות לתוצאות הפיזיקה הקלאסית בגבול של מספרים קוונטיים גדולים.

ניסוח 'פשוט' יותר: התאוריה של בוהר צריכה לתת תוצאות דומות לתוצאות הפיזיקה הקלאסית עבור רמות אנרגיה גבוהות של אטום המימן.

ב. אפשר להדגים את עקרון ההתאמה בשתי דרכים:

(1) לפתח את הביטוי לתדירויות הקרינה הנפלטת מאטום מימן על פי התאוריה הקלאסית

(מתקבלת התדירות $f = \frac{e}{2\pi r} \sqrt{\frac{k}{mr}}$ וכפולות שלמות שלה) ועל פי מודל בוהר, עבור אטום

שיורד מרמת אנרגיה גבוהה לרמת אנרגיה גבוהה פחות. (במקרה זה מתקבל הביטוי

$f = \frac{e}{2\pi r} \sqrt{\frac{k}{mr}} p$, כאשר p הוא מספר טבעי המייצג את הפרש המספרים הקוונטיים של שתי

הרמות.)

(2) על סמך עקרון ההתאמה של בוהר, ניתן להסיק את תנאי הקוונטיזציה של בוהר - התנע

הזוויתי של האלקטרון שווה לכפולה שלמה של \hbar .

כפעילות סיכום של הנושא "מבנה האטום", מוצע:

1. לערוך רשימה של העובדות הניסוייות הקשורות במבנה האטום.
2. לתאר את המודל של בוהר (ורתרפורד) לאטום המימן.
3. להסביר באמצעות המודל את העובדות הניסוייות שתוארו בסעיף (1) לעיל.
4. לנבא תופעות על סמך המודל ולבחון את הניבויים (למשל לגבי אטום הליום מיון פעם אחת).
5. לסקור את מגבלות המודל.

פרק 6: מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר

שעות	הנושא
3	6.1 גלי דה-ברויי
2	6.2 המודל הקוונטי-הסתברותי של אור ושל חלקיקים
2	6.3 עקרון אי-הוודאות
7	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
3	- התאבכות אלקטרוניים לאחר מעברם דרך עלה גבישי דק.	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$	- הנחת דה-ברויי. - ניסוי תומסון (G.P. Thomson): - התאבכות אלקטרוניים. - הסבר הקוונטיזציה של אנרגיית האטום בעזרת גלים עומדים, ומגבלותיו.	6.1 גלי דה-ברויי
2			- עקרון הקומפלמנטריות של בוהר. - ההסבר של מקס בורן להתאבכות משני חריצים. - תוצאות ניסויים של מעבר פוטונים זה אחר זה דרך חריץ ודרך זוג חריצים. - תוצאות ניסויים של מעבר אלקטרוניים זה אחר זה דרך חריץ ודרך זוג חריצים.	6.2 המודל הקוונטי-הסתברותי של אור ושל חלקיקים
2		$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$	- הכרת העיקרון. - יישום העיקרון לעקיפה בסדק.	6.3 עקרון אי-הוודאות

מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

6.1 גלי דה-ברויי (3 שעות)

- א. יש לציין כי אלקטרונים מתנהגים כחלקיקים נקודתיים, למשל כאשר אלקטרון מפעיל מכשיר מדידה כגון מונה-חלקיקים.
- ב. על סמך הנחת דה-ברויי, מומלץ לחשב את אורך הגל המיוחס לאלקטרון בעל אנרגיה קינטית של מספר אלקטרון-וולט. לאור התוצאה, יש לדון בשאלה מהו סדר הגודל של רוחב החריצים בסריג עקיפה שיאפשר לצפות בתבנית ההתאבכות של האלקטרונים.
- ג. מומלץ לבצע ניסוי של התאבכות אלקטרונים, ובעזרת תוצאות הניסוי לאשש את הנחת דה-ברויי (ראו להלן "הדגמות וניסויים").
- ד. מומלץ להראות כי ההנחה הראשונה של בוהר מתישבת עם התפיסה שלפיה מצב יציב של אלקטרון באטום מתרחש כאשר הגל המיוחס לאלקטרון הוא גל עומד, שנוצר לאורך המסלול המעגלי של האלקטרון.

הדגמות וניסויים

- א. בעזרת שפופרת של חברת Teltron (Tel 555) ניתן לבצע ניסוי של התאבכות אלקטרונים: אלקטרונים שהוצאו עוברים דרך עלה גבישי המורכב מצירוף מקרי של מיקרוגבישים. על חזית השפופרת - זכוכית המצופה בחומר פלורסצנטי - מתגלים עיגולים בהירים וכהים. את רדיוסי העיגולים אפשר לשנות על-ידי שינוי המתח המאיץ את האלקטרונים.
- ב. לצד הניסוי הנ"ל, ניתן להעמיד מערכת ניסויית נוספת, שבה אור פוגע בשני סריגים, שבהם חריצי הסריג האחד מאונכים לחריצי הסריג השני. כאשר זוג הסריגים מסתובב, מתגלה תבנית התאבכות הדומה לתבנית ההתאבכות שבשפופרת האלקטרונים.

6.2 המודל הקוונטי-הסתברותי של אור ושל חלקיקים (2 שעות)

- א. חשוב להדגיש כי עקרון ה"השלמה" (קומפלמנטריות) אומר שהתכונה החלקיקית והתכונה הגלית של חומר הן היבטים משלימים של ישות קוונטית. בנסיבות מסוימות החומר מתנהג כחלקיק ובנסיבות אחרות הוא מתנהג כגל. ההכרעה אם הישות מתנהגת כחלקיק או כגל תלויה במכשיר המדידה שבו משתמשים.
- ב. יש להציג את הנחת בורן: הגל המיוחס לאלקטרון הוא גל רק במובן ההסתברותי; הוא ישות מתמטית מופשטת לחלוטין.

ג. חשוב לציין כי על פי התפיסה של בורן, אלקטרונים אינם חלקיקים ממשיים העשויים חומר, אלא ישויות מתמטיות. את המציאות הקוונטית לא ניתן להסביר באמצעות "השכל הישר".

ד. יש לתאר תוצאות של ניסוי: משגרים פוטון אחר פוטון כלפי מסך בעל שני חריצים סמוכים. לאחר שהפוטונים עוברים את החריצים, הם פוגעים בלוח שעליו נרשמות פגיעותיהם. כאשר רק חריץ אחד פתוח - מתקבל כתם בהיר שנוצר מפגיעת הפוטונים שעברו בחריץ ופגעו בלוח, כדוגמת תבנית העקיפה המתקבלת מפגיעת אלומת אור בחריץ יחיד. כאשר שני החריצים פתוחים, התמונה המתקבלת מפתיעה מאוד: למרות שדרך כל חריץ עובר פוטון יחיד - אין מקבלים על לוח המטרה כתם בהיר גדול וגם לא שני כתמים בהירים מול שני החריצים. מקבלים סדרה של פסים בהירים וכהים, המעידים על פעולת התאבכות, כאילו הפוטונים הם גלים שעברו בעת ובעונה אחת בשני החריצים והתאבכו ביניהם על הלוח. שאלות שהניסוי מעורר:

- (1) בעוברו דרך חריץ אחד, כיצד הפוטון 'יודע' שהחריץ השני פתוח ושיעליו לנוע' לאחד מאזורי הפסים הבהירים?
- (2) בעוברו דרך חריץ אחד, כיצד הפוטון 'יודע' שהחריץ השני סגור, ושיהוא חופשי' לפגוע בכל נקודה בלוח שמעבר לחריצים?
- (3) כיצד פתיחתו או סגירתו של חריץ אחד יכולה להשפיע על התנהגות הפוטון שעובר בחריץ השני, בלי שהחריצים מחליפים ביניהם מידע על מצבם?
- (4) כיצד פוטון בודד, שעובר בחריץ אחד, יכול לגלות תכונה של התאבכות, שהיא תוצאה של מעבר בשני החריצים בעת ובעונה אחת?

6.3 עקרון אי-הוודאות (2 שעות)

- א. יש להדגיש כי בעולם התת-אטומי לא ניתן לדעת בעת ובעונה אחת את מקומו ואת מהירותו של חלקיק כמו גם את הזמן והאנרגיה. אי-ידיעה זו נובעת מכך שמדידת תכונה אחת של החלקיק משבשת את האפשרות למדוד את תכונתו האחרת. כלומר, בעולם התת-אטומי לא ניתן לבצע מדידה בלי לשבש את המערכת הנמדדת.
- ב. דוגמה מרכזית של עיקרון זה היא עקיפת אלקטרונים בסדק יחיד. יש להראות דוגמה זו.
- ג. חשוב להדגיש כי אי-הוודאות היא עקרונית ואינה תוצאת מגבלות טכניות של מכשירי המדידה.
- חשוב להדגיש כי בגלל אי-היכולת לקבוע בו-זמנית את המקום ואת המהירות של חלקיק, לא ניתן לקבוע את מסלולו של חלקיק תת-אטומי.

פרק 7: הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים

שעות	הנושא
1	7.1 מבנה הגרעין והכוח החזק
3	7.2 תהליכים גרעיניים
4	7.3 התפרקות רדיואקטיבית
3	7.4 אנרגיית קשר גרעינית
3	7.5 חלקיקים יסודיים
14	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
1			<ul style="list-style-type: none"> - תופעות שמהן ניתן ללמוד על מבנה הגרעין: רדיואקטיביות, פיזור רתרפורד. - המושגים: "מספר אטומי", "מספר מסה", "יסוד", "איזוטופ". - מרכיבי הגרעין, מסותיהם ומטעניהם. - הכוח הגרעיני החזק ותכונותיו. 	7.1 מבנה הגרעין והכוח החזק
3			<ul style="list-style-type: none"> - תהליכי פליטת α, β^-, β^+, γ, גילוי הנויטרינו (בהקשר לשימור חוקי השימור). - לכידת אלקטרון. 	7.2 תהליכים גרעיניים
4	<ul style="list-style-type: none"> - בניית רמות אנרגיה גרעיניות של גרעין-בן, על סמך ערכי האנרגיה של הקרינה הרדיואקטיבית הנפלטת מגרעין-האב. 	$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ $N = N_0 e^{-\lambda t}$ $R = \lambda N$ $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "סדרה רדיואקטיבית" (הכרת דוגמה). - אקראיות ההתפרקות הרדיואקטיבית של גרעין יחיד, החוקיות הסטטיסטית בהתפרקות גרעיניים במדגם גדול, המושג "קבוע הדעיכה". - מספר גרעיני-האב במדגם רדיואקטיבי כפונקציה של הזמן; המושגים: "זמן מחצית החיים", "פעילות". - יישומים: קביעת גיל של עצמות בעזרת כמויות פחמן, הריסת תאים סרטניים, איתור דליפת מים מצינור הטמון בקרקע. 	7.3 התפרקות רדיו-אקטיבית
3	<ul style="list-style-type: none"> - בניית גרף של אנרגיית קשר ממוצעת כפונקציה של מספר הנוקליאונים. 	$\Delta E = \Delta mc^2$	<ul style="list-style-type: none"> - האקוויוולנטיות בין מסה ואנרגיה. - אנרגיית הקשר הגרעינית, תלות אנרגיית הקשר הגרעינית הממוצעת לנוקליאון במספר הנוקליאונים. - תהליכי ביקוע גרעיני ויישומיו. - תהליכי מיזוג גרעיני. 	7.4 אנרגיית קשר גרעינית
3			<ul style="list-style-type: none"> - הכוחות היסודיים, וחלקיקים נושאי הכוחות. - חלקיקים ואנטי-חלקיקים. - אנהילציה ויצירת זוגות (איכות). 	7.5 חלקיקים יסודיים

הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות.

7.1 מבנה הגרעין והכוח החזק (1 שעה)

- א. מומלץ לפתוח בתיאור תופעות שמהן ניתן ללמוד על מבנה הגרעין, כמו רדיואקטיביות. כדאי לציין את הקרינות השונות הנפלטות בתהליך ולהסביר מה מתרחש כאשר קרינות רדיואקטיביות עוברות בשדה מגנטי, ומה מתרחש כאשר הן עוברות בשדה חשמלי.
- ב. יש לחזור על המושגים: "מספר אטומי", "מספר מסה", "ייסוד", "איזוטופ".
- ג. יש להסביר כי גרעיני האטומים בנויים מנויטרונים ופרוטונים, וכי משיכה ביניהם על-ידי הכוח הגרעיני החזק היא קצרת טווח (מסדר גודל של גרעין האטום – 2-3 פרמי).
- ד. בשלב זה ניתן לציין את תרומתם של הנויטרונים, חסרי המטען החשמלי, ליציבות הגרעין.
- ה. על התלמידים להכיר את סדרי הגודל של קוטרי הגרעינים וקוטרי אטומים.

7.2 תהליכים גרעיניים (3 שעות)

- א. על התלמידים לדעת כיצד משתנה מספר המסה והמספר האטומי של גרעין בתהליכים אלה: פליטת α , פליטת β^- , פליטת β^+ , פליטת γ , לכידת אלקטרון.
- ב. על התלמידים לדעת כי חלקיקי β נפלטים ברצף של אנרגיה, מערך אפס עד ערך מרבי האופייני לגרעין. קרינת α עשויה להיפלט מגרעינים מסוג מסוים, במספר אנרגיות מוגדרות האופייניות לגרעין. יש לציין את סדרי הגודל של אורך-הגל של קרינת α .
- ג. בקשר לקרינה מסוג β^- , יש להבהיר:
 1. על סמך עקרון אי-הוודאות, מדוע אלקטרון אינו יכול להיות במצב קשור בתוך הגרעין (בהנחת אינטראקציה חשמלית).
 2. מדוע קרינת β עשויה להיפלט ברצף של ערכי אנרגיה. כדאי להזכיר את 'הכוח החלש' ואת דמיונו לקרינה האלקטרומגנטית. (בשלב זה של ההוראה, לא מומלץ להוסיף כי הוא מועבר על-ידי חלקיק כבד).
- ד. יש להסביר את קיומם של הנויטרונים והאנטי-נויטרונים ומדוע 'הומצאו' חלקיקים אלו זמן רב לפני שהוכח קיומם.
- ה. יש להסביר באופן איכותי את ההבדל בין תהליכי הביקוע לבין תהליכי המיזוג.

7.3 התפרקות רדיואקטיבית (4 שעות)

- א. מומלץ לפתוח את הנושא בתיאור הרקע ההיסטורי לגילוי הרדיואקטיביות על-ידי הנרי בקרל ולחקר הרדיואקטיביות על-ידי הזוג מארי ופייר קירי.
- ב. יש להציג לתלמידים לפחות דוגמה אחת של "סדרה רדיואקטיבית" ('משפחה רדיואקטיבית').
- ג. על התלמידים להכיר היטב את המושגים: "זמן מחצית החיים", "קבוע הדעיכה", "פעילות".
- ד. יש להדגיש את היישומים והשימושים השונים של תהליכי ההתפרקות הרדיואקטיבית ברפואה ובתעשייה.

קשיי תלמידים

תלמידים נוטים לסבור כי על פי זמן מחצית החיים אפשר לקבוע מתי גרעין מסוים יתפרק. חשוב להבחין בין אי יכולת הניבוי לגבי גרעין מסוים לבין יכולת הניבוי לגבי מספר גדול של גרעינים. בהקשר זה יש להראות שלמרות שהגרף המתקבל דומה לגרף הזרם במעגל RC, מדובר בתהליך אחר.

פעילויות

קביעת רמות אנרגיה גרעיניות - דוגמה: התהליך הרדיואקטיבי $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$. ניתן להיכנס לאתר אינטרנט שבו מוצגים איזוטופים רדיואקטיביים, סוגי הקרינה שפולט כל איזוטופ וערכי האנרגיות של החלקיקים הרדיואקטיביים הנפלטים. דוגמה לאתר כזה:

<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/index.asp>

אטומי האורניום $^{238}_{92}\text{U}$ פולטים חלקיקי α בשלושה ערכי אנרגיה, וקרינת גמא - בשני ערכי אנרגיה. על פי המסה של האטום $^{238}_{92}\text{U}$, המסה של האטום $^{234}_{90}\text{Th}$ וערכי האנרגיה של ה- α וה- γ , ניתן לחשב את ערכי האנרגיה של שתי רמות מעוררות של אטום ה- $^{234}_{90}\text{Th}$.

7.4 אנרגיית קשר גרעינית (3 שעות)

- א. מומלץ לפתוח את הנושא בתיאור עובדות ניסוייות הקשורות בהבדלים שבין מסת גרעין לבין מסות מרכיביו.
- ב. על התלמידים להבין את משמעות הנוסחה $\Delta E = \Delta mc^2$.

- ג. יש לחשב את הקשר בין יחידת המסה האטומית (u) לבין יחידת האנרגיה MeV
 $(931.49 \text{ MeV} = 1u)$.
- ד. יש להסביר את הגרף של אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקליאון כפונקציה של מספר הנוקליאונים בגרעין.
- ה. על התלמידים לדעת לחשב את האנרגיה המשתחררת בתהליך של ביקוע גרעיני ובתהליך של מיזוג גרעיני.
- ו. מומלץ לשלב דיון על היתרונות והסכנות בשימוש באנרגיה גרעינית.

פעילויות

התלמידים ישתמשו בטבלת איזוטופים (המוקלדת בגיליון אלקטרוני), הכוללת פירוט של האיזוטופים השונים הקיימים בטבע, מספר הפרוטונים בגרעין, מספר הנוקליאונים בגרעין וערכי המסות של האטומים. התלמידים יתבקשו לחשב את אנרגיית הקשר הגרעינית הממוצעת לנוקליאון, ולאחר מכן לבנות (בגיליון האלקטרוני) גרף של אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקליאון כפונקציה של מספר הנוקליאונים בגרעין.

7.5 חלקיקים יסודיים (3 שעות)

הערה: לא ניתן לקיים הוראה משמעותית של החלקיקים היסודיים במסגרת הזמן המוקצב לתכנית. לכן נמליץ על הכנת מצגת שתבסס על הנקודות הבאות. בבחינה לא תוצגנה שאלות בנושא זה.

א. מומלץ להתחיל את הדיון בסיכום ארבעת הכוחות היסודיים הידועים כיום ולהסביר כי האינטראקציה מתבצעת על-ידי חלקיקים הנושאים את הכוחות כמו הפוטונים (במקרה של הכוח האלקטרומגנטי), הגלואונים (הכוח הגרעיני החזק), הגרביטון (כוח המשיכה) וחלקיקי W^\pm ו- Z^0 (הכוח החלש).

ב. כדאי לציין כי כיום ידועים עשרות חלקיקים יסודיים המאופיינים (נוסף למסה, למטען וליציבות) במושגים (הנלמדים במסגרת הפיזיקה הגרעינית), כמו ספין, מספר בריוני או לפטוני, מוזרות, זוגיות, איזוספין I ו- I_3 . חשוב להדגיש שכל החלקיקים מציינים בכל אינטראקציה לחוקי השימור הקלאסיים: אנרגיה-מסה, מטען, תנע קווי ותנע זוויתי; ואף יותר מכך - גם לחוקי שימור המספרים הבריוניים והלפטוניים. ניתן להוסיף שיש חוקי שימור

(שנתגלו בשנות ה-50 : מוזרות, איזוספין I ו- I₃) שנשמרים באינטראקציות החזקות, אך אינם נשמרים באינטראקציות החלשות.

ג. על התלמידים לדעת כי אלקטרוניים ופוטוניים נחשבים לחלקיקים יסודיים ואילו פרוטוניים ונויטרוניים אינם יסודיים והם בנויים מקווארקים. ניתן לציין כי הקווארקים אינם יכולים להשתחרר מהנוקלאונים כי הם נמצאים ב"בור פוטנציאל אין-סופי". (האנרגיה האדירה הדרושה לשחרורם היא בסדר גודל של מליארדי אלקטרון-וולט [GeV], וסביר להניח שחלקה יהפוך למסה, כך שנקבל תוצרי פירוק אחרים, או שתוצרי הפירוק לא יעידו על האינטראקציה והקווארק בנאמנות).

ד. יש לעמוד על קיומם של אנטי-חלקיקים ועל ההבדל בין חלקיק לאנטי-חלקיק שלו (אלקטרון-פוזיטרון, פרוטון-אנטי-פרוטון).

ה. יש להסביר מהו תהליך יצירת זוגות ומהו תהליך האניחילציה. כדאי לציין כי רוב העדויות על קיומם של הקווארקים מתקבלות בתהליכים המתבצעים במאיצים באנרגיות גבוהות (GeV) באופן מבוקר.

ו. בסיום הלימוד, כדאי שהתלמידים יכירו את הטבלה הבאה :

חלקיקים המושפעים על-ידי הכוח החזק - הדרוניים	חלקיקים שאינם מושפעים על-ידי הכוח החזק	
בריונים (כגון : פרוטון, נויטרון וחלקיקים כבדים יותר)	לפטונים (אלקטרון, מואון, נויטרינו)	פרמיונים (ספין חצי-שלם)
מזונים (כגון : פאונים, קאונים)	החלקיקים המעבירים את האינטראקציות (פוטון, גרביטון, W [±] ו- Z ⁰)	בוזונים (ספין שלם)

בקשר לטבלה מומלץ להבהיר :

1. שהספין של חלקיק אינו תלוי בתנועת החלקיק. ערכי הספין של חלקיקים הם כפולות שלמות של מחצית היחידה \hbar .

2. מה הוא עיקרון פאולי וכיצד ניתן להסביר באמצעותו מדוע האלקטרוניים באטום אינם מאכלסים כולם את הרמה הנמוכה ביותר, אלא מסתדרים ב'קליפות'.

3. שהפרמיונים מאופיינים על-ידי ספין חצי-שלם ($\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \dots$) ומהווים את מרכיבי החומר. הם מציינים לחוקי שימור נוספים, כך שלא נוצרים או נעלמים פרמיונים בלי שייווצרו או ייעלמו פרמיונים אחרים. הפרמיונים 'מציינים' לעקרון האיסור של פאולי.
4. שהבוזונים, המעבירים את הכוחות הבסיסיים בטבע, אינם מציינים לעקרון פאולי, והם בעלי ספין שלם ($0, \hbar, 2\hbar, \dots$). עבור חלקיקים אלו, המשמעות של אי-ציות לחוק האיסור של פאולי היא שלא חל עליהם מושג ה"צפיפות" והם יכולים לחלוף אחד דרך השני, למשל.
5. ההדרונים בנויים מקווארקים, כאשר כל בריון בנוי משלושה קווארקים וכל מזון משני קווארקים: קווארק ואנטי-קווארק.
6. החלוקה בטבלה מתייחסת לאפיונים מסוימים של החלקיקים ואינה סותרת את העובדה שחלקיקים (כמו הדרונים) יכולים להתפרק לחלקיקים אחרים (לפטונים, למשל) ובלבד שלא יופרו חוקי שימור מסוימים.