



## לייזרים ויישומיהם

### הצעת קורס בחירה בפיסיקה לרמה של 5 יחידות לימוד לבגרות

רמי אריאלי, מחלקה להוראת המדעים מכון וייזמן למדע

” את הקורס הבסיסי באופטיקה גיאומטרית. קורס זה מהווה המשך ישיר לקורס ב”חומר וקרינה” אשר החל משנת תשנ”ד מהווה קורס חובה לכל התלמידים הניגשים לבחינת הבגרות בפיסיקה ברמה של 5 יחידות. הכוונה בקורס זה היא לחשוף את התלמידים להתפתחויות המדעיות והטכנולוגיות של השנים האחרונות (הלייזר הומצא ב-1960!), ולשלב בלימודי הפיסיקה גם יישומים אקטואליים והצצה אל חזית המדע והטכנולוגיה.

המוטיבציה לכתיבת הקורס נובעת מהעובדה שרוב לימודי הפיסיקה לקראת בחינות הבגרות מבוססים על פיסיקה שפותחה במאות הקודמות על-ידי ניוטון, גלילאו, קולון, פאראדי וכו’. גם הקורס ב”פיסיקה של המאה ה-20” כולל פיסיקה שפותחה עד לשנות ה-50 של המאה ה-20: רדיואקטיביות ומבנה האטום.

הקורס ”לייזרים ויישומיהם” מבוסס על מתמטיקה בסיסית (עד לרמה של משוואה דיפרנציאלית פשוטה מסדר ראשון) ואינו נכנס לפיתוחים של אלקטרודינמיקה קוואנטית. במקום הפיתוח המתמטי בנוי הקורס על **הבנת עקרונות פיסיקליים בסיסיים** וכולל דוגמאות מספריות רבות המבוססות על מיכשור אמיתי הנמצא בשימוש.

קורס על נושא ”לייזרים ויישומיהם” בשלב סיום לימודי הפיסיקה בבית הספר התיכון מהווה סגירת מעגל של מבט כולל על הפיסיקה תוך יישום חלק גדול מהתיאוריה להתקנים נסיוניים.

קורס בלייזרים מאפשר מספר רב של ניסויים והדגמות, אלא שבינתיים אין במעבדות בית הספר ציוד מתאים במידה מספקת. עם ההתקדמות הטכנולוגית בלייזרי דיודה (ראה מאמר נפרד על רכישת לייזר למעבדת בית הספר בחוברת זו) ירד גם מחיר הציוד למחירים אטרקטיביים למעבדות בתי הספר.

הכוונה היא לצרף לקורס חוברת ניסויים נילוויים, וספר הדרכה למורה. כמו כן תתלווה לקורס ערכת שקפים וסרטונים למורה, על מנת לעזור לו לפתור את הבעיות בהן

**לייזר** - מילת הקסם הפלאית שיותר ”שטויות” נכתבו עליה מאשר על כל טכנולוגיה אחרת.

לדוגמא, זוהי הטכנולוגיה השלטת בסיפורי הקומיקס ובסרטים המצויירים לילדים.

עם המצאתו הוגדר הלייזר כ”**פיתרון המחפש בעייה**”. היום מספר היישומים בהם משתמשים בלייזר גדל בקצב מסחרר, וכבר ניתן למצוא אותו גם במיגוון יישומים בחיי יום יום כגון:

1. **תקליטאור** - קומפקט דיסק - מערכת דיגיטלית להשמעת מוסיקה באיכות גבוהה, ולאחסון כמויות אדירות של אינפורמציה דיגיטלית (מידע סיפרתי).
  2. **תיקשורת אופטית בסיבים אופטיים** - ניתן להעביר עשרות אלפי שיחות טלפון בו-זמנית דרך סיב אופטי בודד המחבר שתי נקודות הנמצאות במרחק של מאות קילומטרים.
  3. **קורא אופטי במרכול** - סורק את קוד הפסים המוטבע על המוצרים ומעביר את המידע למחשב.
  4. **יישומים תעשייתיים** - לכיוון מערכות מדוייקות, לעיבוד חומרים.
  5. **יישומים רפואיים** - לביצוע ניתוחים, לאיבחון, ואף לריפוי.
  6. **יישומים צבאיים** - מדי טווח, מערכות טיווח, מערכות סינוור, ותיקשורת אופטית באטמוספירה.
- הלייזר הוא כלי המאפשר לבצע דברים שבלעדיו הם קשים לביצוע, או אף בלתי ניתנים לביצוע כלל. יישומיו של הלייזר שונים ומגוונים, וככל שלומדים עליו יותר ומפתחים אותו, גדלים יישומיו בהתאם (בדומה למחשב). הלייזרים ויישומיהם מוצאים שימוש כמעט בכל תחומי הפיסיקה והטכנולוגיה.
- למרות היישומים הרבים, אין עדיין מודעות מהו בדיוק אותו מכשיר מופלא החודר לחיינו. למילוי חיסרון זה מוצע קורס ללימוד הנושא. קורס זה מיועד להילמד באמצע כיתה י”ב, בנושא בחירה, אחרי שהתלמידים למדו בכיתה

הוא עלול להיתקל. בקיץ תשנ"ג תיערך השתלמות מורים ראשונה בנושא. בהמשך מתואר הנושא בקצרה ביחד עם ראשי הפרקים של הקורס המוצע.

## רקע היסטורי

בשנת 1917 הראה אלברט איינשטיין במאמרו: "התיאוריה הקוואנטית של הקרינה" את העיקרון של פליטה מאולצת, ובכך הניח את הבסיס התיאורטי של פעולת הלייזר. מאמר זה דן באינטראקציה של קרינה אלקטרומגנטית עם אטומים, יונים ומולקולות. המאמר מנתח את תהליכי הבליעה והפליטה הספונטנית של אנרגיה, ותוך שימוש בעקרונות תרמודינמיים מוביל למסקנה שחייב להיות תהליך שלישי של אינטראקציה - **פליטה מאולצת**.

בשנת 1954 הצליחה קבוצת חוקרים מאוניברסיטת קולומביה שבראשה עמד צ'ארלס טאונסנד (Townsend) להפעיל מתקן שהגביר קרינת מיקרוגל באמצעות התהליך של פליטה מאולצת. המכשיר נקרא על פי ראשי התיבות באנגלית של עיקרון פעולתו:

**MASER** - "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

או בעברית: **"מייזר"** - הגברת קרינת מיקרוגל באמצעות פליטה מאולצת.

בשנת 1958 פירסמו צ'ארלס טאונסנד וארתור שולו (Schawlow) את המאמר הראשון המתאר את הרחבת עקרונות הפעולה של המייזר לתחום האופטי (Light) של הספקטרום האלקטרומגנטי, ומכאן השם המקובל:

**לייזר** - הגברת קרינת אור באמצעות פליטה מאולצת, או באנגלית:

**LASER** - "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

למעשה ברוב הלייזרים מתרחש תהליך של תנודות (Oscillations), ולא הגברה של אור מבחוץ. אך קיים "קושי קטן" לקרוא למכשיר על פי ראשי התיבות של שמו באנגלית:

**LOSER** - "Light Oscillations by Stimulated Emission of Radiation" = "מפסיד".

הלייזר הראשון נבנה על-ידי תאודור מיימן (Maiman) במעבדות יוז (Hughes) בארה"ב בשנת 1960. לייזר זה יצר תהליך לזירה בגביש סינטי מסוג רובי (Ruby), והתקבלה ממנו קרינה בצורת פולסים של אור אדום באורך גל של  $0.6943\mu\text{m}$  (694.3nm).

לייזר הגאז הראשון היה מסוג הליום-נאון. הוא הומצא בשנת 1961 ופלט קרינה רציפה בתחום ספקטרום האינפרא אדום, באורך גל של  $1.15\mu\text{m}$ .

בשנת 1962 הופעל לייזר הליום-נאון רציף בתחום ספקטרום הנראה (אור אדום) באורך גל של  $0.6238\mu\text{m}$ . בסוף שנת 1962 הופעל לראשונה לייזר דיודה בחומר מוליך למחצה מסוג גליום ארסניד (GaAs).

ראשי התיבות של השם "לייזר" מכסים כמעט את כל התיאוריה הגלומה במתקן זה. אלא, שהגדרה זו שהיא מדוייקת מבחינה פיסיקלית, אינה מסבירה כמעט כלום לקורא שאינו בקיא בנושא.

השם "לייזר" כולל סוגים שונים של מתקנים. קיימים לייזרי דיודה בגודל ראש סיכה, ולעומתם לייזרים לביצוע מיזוג (fusion) גרעיני מבוקר שהם מתקנים בגודל בניין גדול. קיימים לייזרים בהספקים של אלפיות וואט לסימון מיקום, ולעומתם לייזרים בהספקים של מאות מליוני וואט שפותחו במסגרת פרויקט "מלחמת הכוכבים" כנשק להגנת ארצות הברית.

למרות שתווד הלזירה יכול להיות בכל מצב צבירה אפשרי, והשקעת האנרגיה בלייזר יכולה להיעשות בדרכים שונות ומשונות, **כל הלייזרים מבוססים על אותם עקרונות פיסיקליים בסיסיים** אותם ינסה קורס זה להסביר.

על מנת להבין את דרך פעולתו של הלייזר, יש להבין את מבנה החומר (אטומים ומולקולות), את התיאוריה של קרינה אלקטרומגנטית, את האינטראקציה של הקרינה האלקטרומגנטית עם חומר ("פיסיקה מודרנית"), את תורת האופטיקה והגלים בשילוב עם עקרונות מתורת הקוואנטים. הפיסיקה המלאה של פעולת הלייזר נקראת גם **"אלקטרו דינמיקה קוואנטית"** וכוללת בתוכה מקצועות לימוד רבים כגון:

1. תורת הקוואנטים.
  2. אופטיקה מתקדמת.
  3. דינמיקה של גאזים.
  4. פיסיקה של מוליכים למחצה.
  5. פיסיקה אטומית ומולקולרית.
  6. תורת המהוד האופטי.
- אין הכוונה בקורס זה להספיק ללמוד ביסודיות את כל הנושאים הללו, אלא רק לתת כלים ללמוד לשם הבנה של עקרונות בסיסיים.

- להלן התוכן של הספר הנכתב בימים אלו - (טיוטה ראשונית):
1. הקדמה - קרינת הלייזר ומאפייניה.
    - 1.1 קרינה אלקטרומגנטית - בריק ובחומר.
    - 1.2 תכונות קרינת הלייזר: מונוכרומטיות, כיווניות, קוהרנטיות.
  2. תהליכי לזירה.
    - 2.1 מודל האטום לפי בוהר.
    - 2.2 פוטונים ודיאגרמת רמות האנרגיה.
    - 2.3 בליעת קרינה אלקטרומגנטית.
    - 2.4 פליטה ספונטנית של קרינה אלקטרומגנטית.
    - 2.5 שיווי משקל תרמודינמי - עקרון בולצמן.
    - 2.6 היפוך אוכלוסיה.
    - 2.7 פליטה מאולצת.
    - 2.8 משוואות קצב.
    - 2.9 מעברים מאולצים.
    - 2.10 הגברה.
    - 2.11 לייזר בעל 3 רמות.
    - 2.12 לייזר בעל 4 רמות.
  3. מערכת הלייזר.
    - 3.1 התווך הפעיל.
    - 3.2 מנגנון העירור.
    - 3.3 מנגנון המשוב.
    - 3.4 מצמד מוצא.
  4. מהוד אופטי ואופני תנודה.
    - 4.1 גלים עומדים.
    - 4.2 אופני תנודה (modes) אורכיים בלייזר.
    - 4.3 אופני תנודה רוחביים של גל אלקטרומגנטית.
    - 4.4 מבנה המהוד.
  5. הגברה בלייזר.
    - 5.1 צורת קו הפלואורסצנסיה של הלייזר.
    - 5.2 הגברה במהלך מסלול סגור הלוך ושוב בין מראות המהוד.
    - 5.3 "שריפת חור" בעקומת ההגברה של הלייזר.
  6. סוגי הלייזרים השונים ומאפייניהם.
    - 6.1 לייזרים גאזיים
      - 6.1.1 לייזר הליום-נאון (He-Ne).
- 6.1.2 לייזר אדי מתכת - אדי נחושת, אדי זהב. גאזים יוניים:
- 6.1.3 לייזר יון הארגון.
  - 6.1.4 לייזר הליום - קדמיום (He-Cd). גאזים מולקולריים:
  - 6.1.5 לייזר פחמן דו-חמצני ( $\text{CO}_2$ ).
  - 6.1.6 לייזר חנקן.
  - 6.1.7 לייזר אקסימר.
  - 6.1.8 לייזר כימי - HF/DF.
  - 6.1.9 לייזר באינפרא-אדום-רחוק (FIR = Far Infra-Red)
- 6.2 לייזרים מצב מוצק
- רקע: רמות אנרגיה של אטום הזיהום במוצק, שיטות שאיבה, איבודי החזרת פרנל.
- 6.2.1 לייזר רובי.
  - 6.2.2 לייזר ניאודימיום-יאג ולייזר נאודימיום גלאס (זכוכית).
  - 6.2.3 לייזר אלכסנדרייט.
  - 6.2.4 לייזר מרכז צבע.
- 6.3 לייזר הזרקה מחומר מוצק מוליך למחצה.
- 6.4 לייזר צבע נוזלי (Dye Laser).
- 6.5 לייזרים מיוחדים:
- 6.5.1 לייזר אלקטרוניים חופשיים (FEL = Free Electron Laser).
  - 6.5.2 לייזר קרני X.
7. מאפייני הקרינה הנפלטת מהלייזר. מדידות מאפייני קרינת הלייזר.
8. שליטה על תכונות הלייזר.
- 8.1 שליטה על תכונות מרחביות.
    - 8.1.1 צורת הקרינה במהוד.
    - 8.1.2 בחירת אופן תנודה רוחבי באמצעות חריר.
    - 8.1.3 תיכנון מצמד היציאה.
    - 8.1.4 מרחיב אלומה.
    - 8.1.5 פילטרים מרחביים.
  - 8.2 שליטה באורך הגל:
    - 8.2.1 על-ידי פריזמה (מנסרה).
    - 8.2.2 על-ידי שריג עקיפה.
    - 8.2.3 על-ידי Etalon.
    - 8.2.4 על-ידי הכפלת תדר קרינת הלייזר.

9. יישומי לייזרים.
- 9.1 יישומים תעשייתיים.
- 9.1.1 מדידות מדוייקות (מרחק, תנועה, אינטרפרומטריה).
- 9.1.2 עיבוד חומרים (חיתוך, הקשייה, אידוי).
- 9.1.3 אנליזות ספקטראליות (עירור מולקולות ובדיקת הקרינה הנפלטת מהן, בדיקת זמני הדעיכה של מולקולות מרמות מעוררות, ספקטרוסקופיית ראמאן, פירוק קשרים כימיים בצורה נקודתית - לייזר אקסימר).
- 9.2 יישומים רפואיים.
- 9.2.1 דיאגנוסטיקה (איבחון).
- 9.2.2 ניתוחים.
- 9.2.3 ריפוי ושיכוך כאבים (!?) (Soft Lasers).
- 9.3 יישומים צבאיים.
- 9.3.1 מד טווח לייזר, מעקב אחר גופים נעים (Tracking).
- 9.3.2 נשק לייזר (!).
- 9.3.3 חישה מרחוק.
- 9.4 יישומים בחיי יום יום.
- 9.4.1 סורק אופטי במרכול (Bar Code Scanner).
- 9.4.2 תקליטור (Compact Disk) - איכסון אינפורמציה דיגיטלית ושליפתה המהירה.
- 9.4.3 עיבוד נתונים (מחשב אופטי) - במהירות האור!
- 9.4.4 תיקשורת (סיבים אופטיים).
- 9.4.5 מדפסת לייזר.
- 9.4.6 תצוגה, אומנות ובידור (מופעי לזריום).
- 9.5 יישומים במחקר מדעי.
- 9.5.1 מדידות מדוייקות.
- 9.5.2 ספקטרוסקופיה בכימיה אנליטית ופיסיקה אטומית.
- 9.5.3 מיזוג גרעיני (כליאה באמצעות קרינת לייזר).
- 9.5.4 העשרת איזוטופים (בעיקר אורניום ופלוטוניום).
10. הולוגרפיה.
- 10.1 עקרונות ההולוגרפיה.
- 10.2 סוגי ההולוגרמות.
- 10.3 יישומי ההולוגרמות.
- ביבליוגרפיה.
- בפרק 8 מפורטים הלייזרים השונים. אין הכוונה ללמד את כל סוגי הלייזרים במסגרת קורס בחירה המוגבל בשעות. אולם מכיוון שאין בנמצא חומר לימוד מתאים בעברית על נושאים אלו, הם מופיעים בספר זה. פירוט זה בא להקל על תלמידים הבוחרים לייזר מסויים כנושא לעבודה, ועל מורה המעוניין לבחור בסוג לייזר מסויים.
- עדיין לא מוגדר אלו מבין הנושאים המוצעים יהוו את חלק החובה בקורס ואלו ישמשו להרחבה והעמקה.