



ציוני דרך בתולדות התפתחות הלייזרים - מבט היסטורי

שאל יציב, מכון רקח לפיזיקה, האוניברסיטה העברית ירושלים*

מבוא

הרצאת פתיחה זו מוקדשת לזכרו של ד"ר אמנון צירבינסקי שנפצע אנושות במעבדות לייזר גז דינמי (Gas Dynamic Laser - GDL) - במחלקה לאווירונאוטיקה של הטכניון.

כשנתתי הרצאה זו לפני שנים הקהל היה מצומצם, הכרתי אישית כמעט כל אחד מהנוכחים והם הכירו אותי. רוב האנשים בקהל היו פיזיקאים. המהנדסים לא היו מודעים אז לפוטנציאל היישומי העצום של לייזרים עד כדי כך שהלייזר אופייני על ידי אמירה: "הלייזר הוא פתרון המחפש בעיה". אני אסיר תודה על ההזדמנות שניתנה לי לייצג את הדור שיזכה לראות את לידת אלקטרוניקת הקוונטים במה שמכונה היום "זמן אמת". התקשורת הבליטה לאחרונה את התפקיד החשוב שממלאים הלייזרים בלחימה המודרנית. מרשים במיוחד הוא ה-"point killer designator", שבעזרתו משוגרת תחמושת במדויק לנקודה הנתונה בזמן ה"נכון".

כאשר פיתח אינשטיין את מודל ההסתברויות של מעברים קרינתיים בין רמות אנרגיה בדידות, לא יכול היה לחזות שיצירי מוחו ימלאו תפקיד כה מחריד בהרס. אבל התיאוריה שלו, ובמיוחד המושג של פליטה מאולצת, הוא אבן הפינה של אלקטרוניקת הקוונטים המודרנית בלעדיו לא היו מגלים את המייזר של גלי המיקרו ואת המייזר האופטי שנקרא היום לייזר. דבר זה ידוע וודאי לרבים, כמו גם העובדה שהרדאר הוא טכניקה החיונית להתפתחות תחום המחקר של ספקטרוסקופיית גלי המיקרו. אבל רק מעטים מודעים לכך כי יעודו המקורי של הרדאר היה חיפוש אחר "קרן מוות" בתחום גלי הרדיו. זו המשמה שניתנה ל-Sir Watson Watt בשנת 1935 ושבעיקבותיה התפתח תחום האלקטרוניקה הקוואנטית.

כיום נסגר המעגל. הרדאר, שנוצר מתוך הדרישה למצוא קרן מוות, הוליד את המייזר שהוביל אל הלייזר, שהוא כלי מפתח עבור טיל מונחה לייזר (Precision Guided Missile – PGM),

העונה על המשאלה המקורית מקרני הרדאר. יש לי רושם (למרות הפרסומים) שהמטרה המקורית של פיתוח "קרן מוות" שתשמיד מטרות בעזרת הקרינה עצמה טרם הושגה. נושא ההרצאה היום הוא החלק המוקדם של התפתחות זו.

ראשית הרדאר והמצאת המגנטרון

ביום חורף ב-26 בפברואר 1935, עמדה קבוצת אנשים בשדה בדרום אנגליה. ביניהם היה מרשל האווירייה הבריטי Sir Hugh Dowding, ראש הוועדה להגנה אווירית בבריטניה Sir Henry Tizard, וממציא הרדאר Sir Watson Watt. חודשים אחדים קודם לכן ביקש Dr. Henry Wimperis, מנהל המחקר המדעי במשרד האווירייה הבריטי, מ-Sir Watson Watt לייצג לו בעניין "האפשרות לפתח קרן רדיו קטלנית בעלת אנרגיה המספיקה להוצאת מטוס מכלל פעולה". התשובה ניתנה על ידי Arnold Wilkins (עוזר של Watt), בדו"ח בעל חשיבות מכרעת, שכותרתו "גילוי ואיתור מטוסים בשיטות רדיו".

Dowding התרשם מהדו"ח והשכיל להבין את חשיבותו. הוא ביקש הדגמה מעשית פשוטה. באותו יום פברואר טס מפציץ מסוג הייפורד (Heyford) במקום כלשהו בטווח של כ-12 ק"מ מתחנת שידור של ה-BBC שפעלה בתדר של 60 Mc (אורך גל של 50 מטר) שבקרבתה עמדו הצופים המכובדים. אחרי זמן קצר הופיע על מסך האוסילוסקופ אות ההד החוזר של פולסים שנשלחו מתחנת השידור שהצביע על נוכחות כלי טייס במרחק של כ-12 ק"מ. Dowding שוכנע!!

Sir Watson Watt, שמילא תפקיד מפתח בהדגמה, אמר:

"בריטניה שבה וחזרה להיות איי"

("Britain has become an island once more").

ארבע שנים לאחר מכן, ערב פרוץ מלחמת העולם השנייה, היה החלק הדרומי של אנגליה מכוסה ברשת של תחנות רדאר להתראה; קראו להן Chain Home. מזלם הגדול של בריטניה הגדולה ושאר העולם החופשי היה קיום רשת זו בתקופה הקריטית. באנציקלופדיה הביוגרפית שלו כותב

* על פי הרצאת הפתיחה בכינוס הבינלאומי ה-11 על אלקטרואופטיקה ומיקרוואולקטרוניקה, תל-אביב. 9.11.99.

להתנהל כלל ללא עזרת הרדאר. ב-1940 ביקר Tizard יחד עם הוועדה שלו בארצות הברית והביא אתו דוגמאות של המגנטרונים הראשונים. בעקבות ביקור זה הוקמה ב-MIT מעבדה לחקר הקרינה (Radiation Laboratory). שפעלה בתוכנית מזורזת, בה מילא Isidor Rabi* תפקיד מרכזי. במשך חמש שנות פעולתה הגיע מספר המדענים שעבדו בה ל-4000. כפשרה בין השאיפה להפעיל את הרדאר בתדר גבוה ככל האפשר לבין המגבלות הטכניות באותו זמן, בחרו האמריקנים באורך גל של 1.2 ס"מ. זה היה ביש מזל משום שבמהרה התברר שבתדר הזה יש קווי בליעה של אדי מים, ואלה אינם חסרים במזרח ארה"ב שם נערך עיקר המחקר בשנות המלחמה. אבל בסריקת התדרים שיחק להם המזל: באורך גל של 1.25 ס"מ (תדר של 24000Mc) התגלתה באקראי בליעה חזקה מאוד של מולקולת האמוניה (NH_3). מולקולה זו אינה מרכיב נפוץ באטמוספירה. "האגדה" מספרת שבליעת האמוניה הובחנה כאשר אֶרְבָּה (barge) מלאת זבל שטה בקרבת תחנת קליטה שהוצבה על גדת הנהר. לתגלית זו היו תוצאות לא צפויות והשלכות מרחיקות לכת.

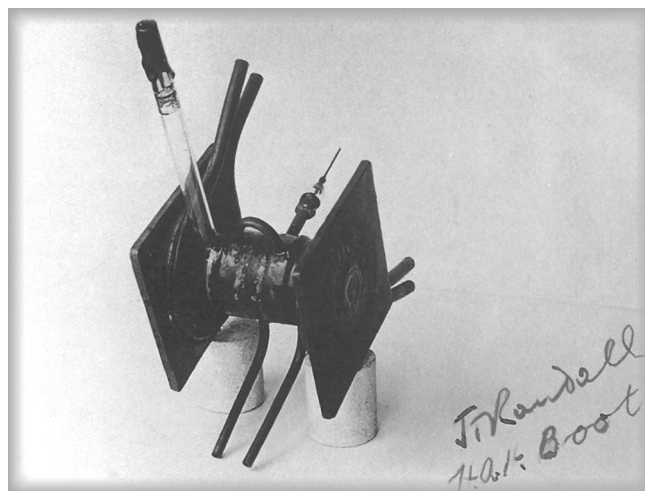
המייזר והלייזר

צירלס טאונס (Charles Townes)**, כרבים אחרים, הועסק בשנות המלחמה בתכנון מערכות הפצה נתמכות רדאר במעבדות חברת בל (Bell) בניו ג'רסי. איזידור רבי, שהיה בעל עין חדה לאיתור פיזיקאים צעירים מבטיחים, גייס את טאונס לצוות המחקר של אוניברסיטת קולומביה. תחת שרביטו של רבי זכתה אוניברסיטת קולומביה בפרסי נובל רבים מכל אוניברסיטה אחרת. היחידי, שהיה גם הוא שם, אבל הועבר לאוניברסיטת שיקגו (במסגרת תוכנית מנהטן) לפני שזכה בפרס נובל, היה אנריקו פרמי. בתום המלחמה שלט טאונס בטכניקות הרדאר. הוא הקים מעבדה לספקטרוסקופיה של גלי-מיקרו לחקר מעברים בין רמות מולקולריות סיבוביות (רוטציוניות) של מולקולות גז. הוא גם ידע היטב פיזיקה.

בהארה יצירתית הסיק שעל ידי הפיכת אוכלוסייה בין שתי רמות אנרגיה סמוכות של מולקולה הוא יוכל לעורר אותן להגביר את עוצמתה של קרינה אלקטרומגנטית רזוננטית בתוך מהוד. כך, בפעם הראשונה בהיסטוריה, יוכל לקיים תנודה עצמית הניזונה על ידי פליטה מאולצת במעבר בין

אסימוב: "עם כל הכבוד לתעוזתם ואומץ ליבם של הטייסים הבריטיים, הרדאר הוא שניצח בקרב על בריטניה". אלה מאתנו שזוכרים את הימים הקודרים ההם, יודעים להעריך אל נכונה את חשיבותו.

אולם, התדר שבו השתמשו באותו ניסוי היסטורי שתיארת, היה נמוך. הטווח וכושר ההפרדה הזוויתי של מערכות הרדאר הראשונות לא היו מספיקים כדי לעמוד במשימה. לפיכך פתחו במאמץ מרוכז להשגת משדר בעל תדרים והספק גבוהים יותר. ב-1939, שנת פרוץ מלחמת העולם השנייה, המציאו Randall ו-Boot מאוניברסיטת בירמינגהם, את המגנטרון (Magnetron), גנרטור חדש ושונה ממה שהיה מוכר עד אז, של גלי רדיו קצרים מאוד, בתחום של סנטימטרים. יתרון חשוב של אורך הגל הקצר (בהשוואה לגלי רדיו) הוא בכך שניתן לקבל בנקל הגדרה זוויתית צרה לאלומת הקרינה הנשלחת, וכך לקבל פרטים עדינים של כל מטרה. בדיעבד התברר שמבנה המגנטרון מאפשר קבלת פולסים של קרינה בהספקי שיא גבוהים, שעלו בזמן קצר מקילו-וואט לתחום של מגה-וואט. עוצמה זו הגדילה במידה ניכרת את טווח הגילוי של מערכת הרדאר, בה היווה המגנטרון מרכיב חיוני. בכך הפך הרדאר לכלי רב עוצמה.



תצלום של המגנטרון הראשון שנבנה על-ידי המדענים הבריטיים J. T. Randall ו-H. A. H. Boot בשנת 1939.

אורך הגל התקצר מ-10 ס"מ (תדר של 3000Mc) בתחילה ל-1 ס"מ (תדר של 30000Mc) בסוף המלחמה. התחבורה האווירית האינטנסיבית הגואה היום, לא הייתה יכולה

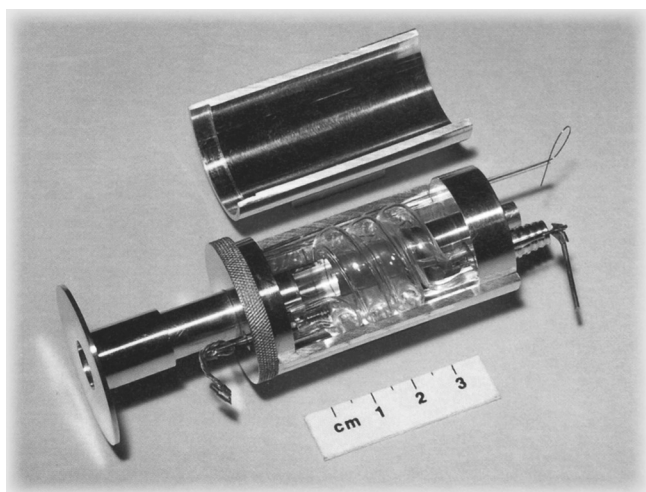
* איזידור רבי זכה בפרס נובל ב-1944 על שיטת התהודה לרישום התכונות המגנטיות של גרעיני האטומים.
** צירלס טאונס קיבל פרס נובל ב-1964 על עבודותיו הבסיסיות בתחום האלקטרוניקה הקוונטית שהובילה לבניית אוסילטורים ומגברים המושתתים על עקרון המייזר-לייזר.

למעבר מוכר היטב בתדר גלי המיקרו. אלה **מסולקות מהאלומה** והנותרות, ברמה העליונה "מורשות" להיכנס אל חלל תהודה מתאים שם אמורה פליטה ספונטנית באורך גל של 1.25 ס"מ לעורר תנודה אלקטרומגנטית בתוך המהוד. "היפוך האוכלוסייה" על-ידי השדה הקוואדרופולי מאפשר לקבל הגברה "נטו" של הקרינה האלקטרומגנטית. כל המולקולות, אלה שמורשות להיכנס למהוד ואלה המוצאות מן האלומה, נשאבות ומסולקות מן התהליך. השדה החשמלי הבורר ממלא את תפקיד השד של מקסוול כבורר בין מולקולות בשני מצבים קוונטיים שונים. הזרימה באלומה והשאיבה נמשכות ברציפות. כמו בלייזר שהתפתח בעקבות המייזר, לאחר שנבנה השדה האלקטרומגנטי בתוך המהוד, הוא מאלץ את המולקולות שממשיכות להכנס להתפרק מאנרגיית העירור בצורה מזוזות ולשחרר קרינה קוהרנטית בתוך המהוד.

שלוש שנים נוספות היו דרושות למימוש ניסיוני של הרעיון. ב-1954 פורסם לראשונה המאמר על המייזר של האמוניה. זה היה גרעין לצמיחת עץ שהלך וגדל במשך השנים ושלה ענפים לכיוונים רבים. היום – שנת 2000 – הוא ממשיך לצמוח. אבני פינה בהתפתחות היו :

1956 - מייזר פְּרִמְיִנְטִי בו תדר התנודה ניתן לכוונון (Tune).
 1958 - פרסום המאמר (ביחד עם שולוב) בו תואר לראשונה המבנה הסביר למייזר האופטי. המייזר האופטי השיל את עורו והפך ללייזר של ימינו. LASER:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



תצלום של לייזר הרובי המקורי שנבנה על-ידי תאודור מיימן במעבדות המחקר של Hughes במאי 1960.

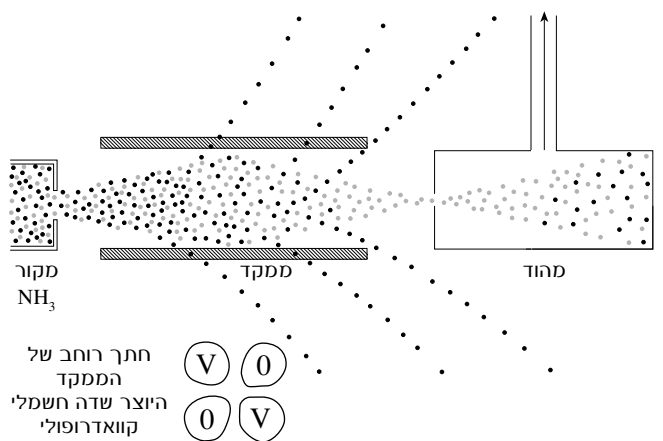
שתי רמות אנרגיה בדידות (דיסקרטיות) במערכת קיימת בטבע. למזלו של טאוונס היה אורך הגל מתאים למהוד בעל מימדים צנועים של מספר סנטימטרים. הטכנולוגיה של המהוד ושל צימוד הגלים אל צרכן חיצוני הייתה מוכרת היטב. זו הייתה רתימת טכנולוגיה מוכרת לרעיון מבריק. המכשיר כונה MASER ראשי תיבות של המשפט:

(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

טאוונס עצמו ואיש מבני דורו לא יכלו לשער אז (1954) אילו השלכות מרחיקות לכת תצמחנה מהמצאה זו.

ייחוד בולט של המייזר היה היותו מקור קרינה קוהרנטי במידה גבוהה יותר מכל מקור קרינה "טבעי" אחר. גם התדר שנקבע על ידי המעבר בין רמות אנרגיה מוגדרות היה קבוע מאוד. מאוחר יותר שימש התדר הקבוע בסיס לשעון מולקולרי יציב מאוד.

הורתו של הרעיון היתה בבוקר אחד בשנת 1950. טאוונס השתתף בכינוס בושינגטון, שם שהה בחדר אחד עם תלמידו וגיסו לעתיד ארתור שולוב (Arthur Schawlow)***. היה מוקדם מאוד והוא לא רצה להעיר את חברו לחדר. יצא אל הגן הסמוך וישב רעב על אחד הספסלים. **שנים של השתלמות, הכנה ורכישת ידע בשלו במוחו לרעיון שהכיל מראשיתו את כל הדרוש להצלחת הניסוי.** במתקן שתכנן במוחו שני חלקים עיקריים: האחד הוא שדה חשמלי בעל מבנה קוודרופולי (מצוי היום בספקטרומטרים של מסות) שתפקידו להפריד פיסית, מתוך אלומת מולקולות אמוניה את אלה **הנמצאות ברמת האנרגיה התחתונה**, מתוך שתיים השייכות



מייזר אמוניה. מולקולות האמוניה המעוררות משחררות את המטען האנרגטי כפוטון המאולץ להצטרף אל קרינת הרזוננס בתוך המהוד. תפקיד הממקד הקוואדרופולי לברור ולהשאר באלומה רק את המולקולות המעוררות.

*** שולוב זכה בפרס נובל ביחד עם בלומברגן בשנת 1981 על תרומתם לפיתוח ספקטרוסקופית הלייזר.

אין צורך לדאוג. המדע ימשיך להתקדם כאשר מוחות "מוכנים" יוליכו אותנו בשבילים חדשים. וויליס למב ממילא קיבל פרס נובל על המאמר ההוא.

מראי מקום ולקריאה נוספת:

The Maser by J.P.Gordon, Scientific American **199**, pp. 42-50, December 1958.

Atomic Clocks by Harold Lyons, Scientific American, **196**, February 1957, pp. 71- 82.

Buderi, R., The Invention that Changed the World, Simon and Schuster, New York, 1997.

What is a Maser? http://einstein.stanford.edu/gen_int/faqs/maser.html

The Magnetron Tube - Structure and Operation, <http://www.gallawa.com/microtech/magnetron.html>.

<http://Collegestudent infoplease.com/CE5/CEO33194.html>. Parker, P., Electronics, Arnold, London, 1950.

Townes, C. H., How the Laser Happened - Advtures of a Scientist, Oxford University Press, Oxford 1999.

אריאלי, ר., לייזרים ויישומיהם, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1996.

Acknowledgment

We acknowledge with thanks the help of the following people who granted us permission to use photographs from the book: "Physics in the 20th Century", in Prof S. Yatsiv's article:

1. Judy R. Franz and John S. Rigden, editors of "Physics in the 20th Century".
2. The MIT Museum, Cambridge, MA, for the photograph of the first magnetron.
3. David L. Weeks, Hughes Research Laboratories, LLC, Malibu, CA, for the photograph of the original ruby laser.

1960 – הלייזר הראשון של הרובי (תיאודור מיימן

(Theodore Maiman

1960 – הלייזר הגזי הראשון של He – Ne (עלי גיוון -

Ali Javan

1961 – לייזר ענק במיתוג Q (Hellwarth McLung), כאן

התקבלו לראשונה שטפי הספק שאיש לא קיבל לפני

כן ואפשרו את פיתוח האופטיקה הלא לינארית.

1961 – הכפלה הרמונית של אור (פטר פרנקן (Peter Franken

1962 – תגלית אפקט ראמן המאולץ (Ng and Woodbury).

ועוד מקבץ הולך ומתעשר של טכנולוגיות ותחומי מחקר

חדשים שהתאפשרו בעזרת הכלים המשוכללים שהוכנסו

למעבדה.

סיכום:

אלקטרוניקה קוונטית ואלקטרו-אופטיקה נולדו כמיזוג של:

(א) המודל של פליטה מאולצת

(ב) פיתוח המגנטרון ושימושי הרדאר

(ג) חקר המעברים בין רמות סיבוביות מולקולריות בדידות

בעזרת גלי רדאר (Microwave Spectroscopy)

(ד) יצירתיות והפלטות הדמיון האנושי

שנים אחר כך הייתי אחראי על הרצאות הקולוקוויום

השבועיות במחלקה לפיזיקה של האוניברסיטה העברית

(מכון רקח של ימינו עוד טרם הוקם). Willis Lamb * (חתן

פרס נובל בשנת 1955) שעמד לתת הרצאה, הזמין אותי

לספריה. שם פתח את האפנדיקס למאמרו המפורסם מ-1950

(יחד עם Retherford) והראה לי את המשפט הבא: "כאשר

האוכלוסייה בין שני מצבים מתהפכת מקבלים 'בליעה

שלילית'". "אתה רואה", הוא חייך: "בליעה שלילית היא

הגברה מאולצת. אילו נתתי את הדעת לכך אז הייתי אני

הממציא של ה-LASER".

זו הייתה דוגמה מובהקת של מוח שאינו מוכן

(Unprepared Mind).

* Willis Lamb חתן פרס נובל בשנת 1955 עבור התגליות המתייחסות למבנה הדק של ספקטרום המימן.

תהודה

