



# קרינת "ד" (טֶרַהֶרץ) ושימושיה העתידיים

רמי אריאלי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

## מבוא

גלים אלקטרומגנטיים משמשים ליישומים שונים. בני האדם קראו לתחומים שונים של הספקטרום האלקטרומגנטי בשמות שונים על פי היישומים של אותו תחום ספקטרום. התחום הספקטראלי של קרינת "ד" (טרהרץ -  $10^{12}\text{Hz}$ ) מהווה את המרווח בין תחום התדירויות המשמשות באלקטרוניקה לתחום התדירויות המשמשות בפוטוניקה (אלקטרו-אופטיקה).

- **תחום אורכי הגל של קרינת "ד":**  $\lambda = 30\text{-}3,000 \mu\text{m}$  (כלומר עד אורך גל של 3 מילימטר). התחום הספקטראלי הנכלל בקרינת "ד" נמצא בין האינפרא אדום לגלי מיקרו (ראה תרשים 1).
- **תחום התדירויות של קרינת "ד":** מ-100 ג'יגהרץ ועד 10,000 ג'יגהרץ או:  $\nu = 0.1 \text{ THz} - 10 \text{ THz}$ , או:  $10^{11} \text{ Hz} - 10^{13} \text{ Hz}$ .
- **תחום האנרגיות של פוטונים של קרינת "ד":**  $0.0004 \text{ eV} - 0.04 \text{ eV}$ .

התנאי ליישום שימושי של קרינה אלקטרומגנטית בתחום ספקטראלי נתון הוא קיום מקורות קרינה היוצרים אותה בעוצמה משמעותית וגלאים מתאימים. למעשה, עד לשנים האחרונות, כמעט ולא בוצע כל שימוש בתחום הספקטראלי שהשתרע בין האינפרא אדום לגלי המיקרו, בגלל העדר מקורות קרינה וגלאים מתאימים לשידור וקליטת הקרינה בתחום זה. תחום זה אף הוגדר בעבר כ"פער טרהרץ" (Terahertz gap) בו לא נעשה שימוש, מכיוון שהתדירויות היו גבוהות מדי עבור התקנים אלקטרוניים, ונמוכות מדי עבור התקנים פוטוניים (אופטיים). (ברור כי אין כל פער בספקטרום האלקטרומגנטי; כל גוף פולט קרינת גוף שחור שחלקה נמצא בתחום קרינת D).

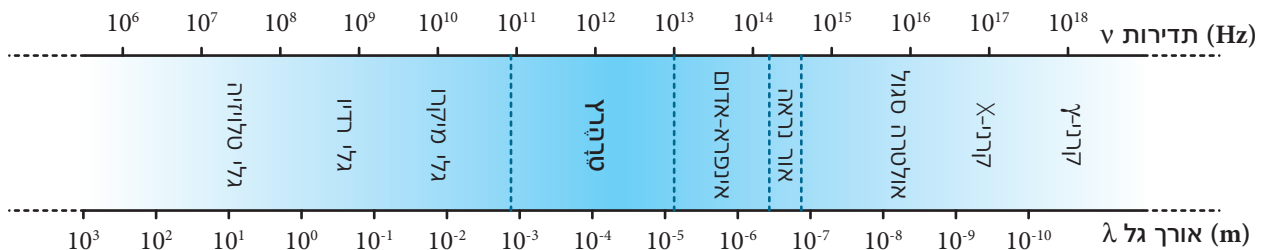
במאמר זה נציג מידע על הקרינה האלקטרומגנטית בתחום תדירויות הטררהרץ, נצביע על שימושים אפשריים של קרינה זו, ונתאר מה מצב המחקר והפיתוח בתחום זה.

קרינת "ד" אינה תגלית חדשה, היא התגלתה לראשונה בשנת 1896 על ידי היינריך רובנס (Heinrich Rubens) וארנסט פוקס ניקולס (Ernest Fox Nichols) מאוניברסיטת ברלין. בשנים 1896-1900 ביצע רובנס מדידות של הספק הקרינה הנפלטת מגוף שחור בכל אחד מתחומי הספקטרום. בשנת 1900 הוא התמקד באורך הגל של 50 מיקרון (תדירות של 6 טרהרץ) וביצע מדידות כמותיות של הספק הקרינה הנפלטת בתחום זה.

בתרשים 2 רואים את מערכת הניסוי שלו. הוא השתמש בגלאי מסוג **בולומטר** (Bolometer) המגיב לכל תחומי הספקטרום כדי למדוד את הספק הקרינה הנפלט. לכיול המערכת השתמש רובנס בספקטרום הנראה שהתקבל על מסך, בזוויות מתאימות.

**בולומטר** הוא גלאי שהתנגדותו החשמלית משתנה עקב התחממותו כתוצאה מהקרינה הנבלעת בו. מחברים את הבולומטר כענף בגשר ויטסטון, המאפשר מדידה מדויקת ואמינה של ההתנגדות החשמלית.

את תוצאות המדידות מסר רובנס למקס פלנק (Max Plank), בביקור אצלו עם אשתו, ב-7 באוקטובר 1900. על פי תוצאות אלו גילה פלנק, כבר באותו ערב, את חוק הקרינה הנקרא על שמו. פלנק כתב בשנת 1922 שרק בזכות תוצאות מדידותיו של רובנס הוא הצליח להגיע לחוק הקרינה.



תרשים 1: הספקטרום האלקטרומגנטי על תחומיו השונים

מהתרשים ניתן לראות שתי תופעות בולטות:

1. עוצמת הקרינה הכוללת הנפלטת מגוף שחור גדלה עם עליית הטמפרטורה של הגוף.
2. אורך הגל ( $\lambda$ ) של שיא עוצמת הקרינה הנפלטת קצר יותר ככול שהטמפרטורה גבוהה יותר.

מגדירים **מצב בו גוף נמצא בשיווי משקל תרמי עם הסביבה שלו**, כמצב בו כמות הקרינה שהוא פולט שווה לכמות הקרינה שהוא קולט בכל רגע.

**אורך הגל במקסימום של הקרינה הנפלטת על-ידי גוף שחור**,  $\lambda_{max}$ , תלוי באופן הופכי בטמפרטורה ונתון על-ידי **חוק ויין (Wien)**:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^7}{T}$$

כאשר כאן  $T$  היא הטמפרטורה בקלווין ו- $\lambda_{max}$  הוא אורך הגל של שיא הקרינה באנגסטרם (**אנגסטרם** שווה ל- $10^{-10}$  מטר). בתרשים 3 רואים קו ישר אלכסוני המחבר את נקודות שיאי הגרפים.

### מנגוני האינטראקציה בין קרינת "D" לחומר

- בלעת** קרינת "D" נגרמת בעיקרה על ידי תהליכים הכוללים מטענים חשמליים בתנועה, כגון:
1. אלקטרונים הנעים בחופשיות - כמו לדוגמה במתכת.
  2. מומנטי דיפול המסתובבים בצורה חופשית - כמו בנוזלים קוטביים (מים).
  3. אופני תנודה פונוניים מסוימים בחומרים מוצקים.

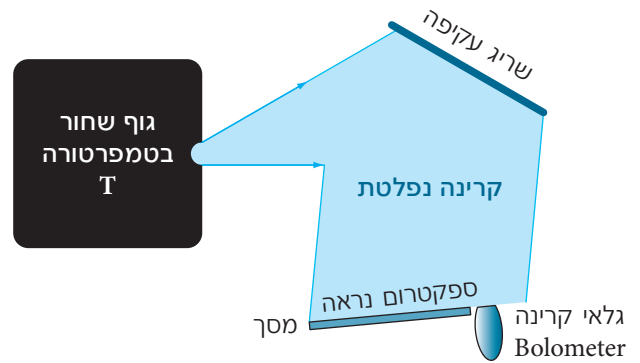
### האינטראקציה בין קרינת "D" לחומר

עיקר האינטראקציה היא עם אופני ויברציה של **קשרים בין מולקולות**. האינטראקציה משפיעה על המקדם הדיאלקטרי של החומר, ובאה לידי ביטוי במקדם השבירה, השונה לכל אורך גל.

באופטיקה של אור נראה נהוג להתייחס למקדמי השבירה של **חומרים שקופים בלבד**, מכיוון שאלומת אור הפוגעת במשטח הגבול בין שני תווכים בעלי מקדמי שבירה שונים משנה את כיוונה (חוק סנל). רוב החומרים בהם משתמשים בחיי יום-יום, שקופים לקרינת "D", ולכן ניתן להתייחס למקדמי השבירה שלהם עבור קרינת "D".

קיימים שני סוגי חומרים עיקריים שאינם שקופים לקרינת "D" והם:

- א. **מתכות** - המחזירות את רוב קרינת "D" הפוגעת בהן (!) לכן ניתן לזהות גופים מתכתיים (כגון כלי נשק) המוסתרים מתחת לבגדים, או בתוך אריזות (חבילות, מזוודות, ...)<sup>1</sup>.



תרשים 2: מערכת המדידה בה השתמש רובנס בשנת 1900.

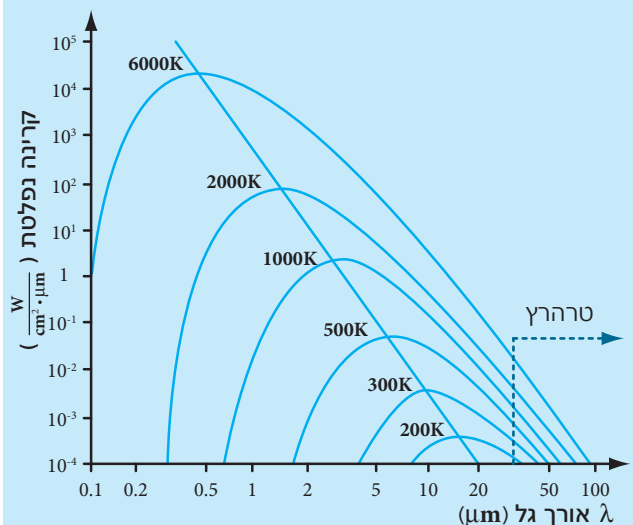
**קרינת "D"** מהחלל נמדדה רבות על ידי אסטרונומים. לטענתם, מחצית מסך כל ההארה (luminosity) ו-98% מסך כל הפוטונים שנפלטו מאז המפץ הגדול, נמצאים בתחום הספקטראלי שבין גלים תת-מילימטריים לבין האינפרא-אדום. המכשיר הראשון המאפשר לבצע ספקטרוסקופיה בתחום קרינת "D" פותח בשנת 1995 במעבדות בל בארה"ב.

### מהי קרינת גוף שחור?

גוף הבולע את כל הקרינה הפוגעת בו מוגדר כ"**גוף שחור**" (Black Body).

כל גוף הנמצא בטמפרטורה השונה מהאפס המוחלט, פולט קרינה אלקטרומגנטית. תחום התדרים (ספקטרום) של הקרינה הנפלטת מגוף שחור, וסך כל האנרגיה הנפלטת, נקבעים על פי הטמפרטורה בה נמצא הגוף.

**גרף התפלגות פלנק** מתאר את אופיין הקרינה הנפלטת כתלות בטמפרטורה. ניתן לראות אותו בתרשים 3:



תרשים 3: התפלגות הקרינה של גוף שחור בטמפרטורות שונות.

ב. **מים** (שהמולקולות שלהם קוטביות) וכן חומרים המכילים כמות גדולה של מולקולות מים - **הבולעים** אחוז ניכר של קרינת T. לדוגמה: שכבת מים בעובי 100 מיקרון בולעת יותר מ 90% מהקרינה. לחומרים הבנויים ממולקולות קוטביות (פולריות) הנמצאים **במצב גזי**, יש קווי בליעה חדים וחזקים בתחום קרינת "T", וכך ניתן לזהותם. מספר החומרים המשמשים בחיי יום-יום השקופים לקרינה בתחום הספקטרום הנראה או האינפרא-אדום קטן בהרבה ממגוון החומרים השקופים לקרינת T.

יש להבחין בין שתי שיטות עקרוניות של שימוש בקרינת "T":

- **שיטה פסיבית** בה נקלטת קרינה הנפלטת באופן טבעי מגופים חמים (קרינת גוף שחור). שיטה זו דומה לשיטה הנהוגה במערכות ראייה תרמית ("ראיית לילה") הקולטות קרינה בתחום האינפרא-אדום הנפלטת מכל גוף חם. **הדמאה** (צילום - imaging) של הסביבה בתחום הספקטרום של קרינת "T" היא פעולה פסיבית, כלומר קולטים קרינה בתחום קרינת "T" הנפלטת מהאדם או החפץ הנבדק באופן טבעי, מבלי שיש צורך להקרין אותו ולמדוד קרינה מוחזרת ממנו.

- **שיטה אקטיבית** בה מבוצעת הקרנת גופים בקרינת "T" ובדיקת הקרינה המוחזרת ו/או מועברת מהגופים הנבדקים.

### תחזית יישומים של קרינת T:

מכיוון שהמחקר של קרינת T נמצא בשלבים ראשוניים, קיימים רעיונות רבים לגבי יישומים אפשריים. רוב הנושאים הוכחו ברמה עקרונית, ונמצאים בשלבים שונים של בניית יישומים מסחריים:

#### שימושים רפואיים

עיקר היישומים ברפואה מבוססים על העובדה שתדירויות מסוימות של קרינת "T" חודרות לעומק של מספר סנטימטרים של רקמה ביולוגית, ומוחזרות חזרה בצורה יחודית מהשכבות השונות המרכיבות אותה. מכיוון שקיימת ספציפיות בתגובת הרקמות השונות לקרינה בתדירויות השונות בספקטרום קרינת "T", ניתן להשתמש בה לזיהוי תופעות חריגות ברקמות.

קרינת "T" היא קרינה בלתי מייננת, ובכך יש לה יתרון גדול על פני קרינת הרנטגן (X) המייננת המשמשת כיום להדמאה של חלקים פנימיים בגוף האדם, אך עלולה לגרום נזק ל-DNA.

- **הדמאה בתחום הרפואי - איבחון רקמות סרטניות, וזיהוי סוג הסרטן בהן** - גם לאחר ההוצאה מהגוף (in vitro) וגם במצב בו הגידול עדיין בגוף (in vivo) כגון סרטן עור ללא צורך לבצע ביופסיה, הדבר מאפשר מעקב מתמשך אחר התפתחות גידולים סרטניים בגוף והערכה לגבי דרגת הריפוי של פצעים מתחת לתחבושות מבלי להסירם.

רוב הגידולים הסרטניים (85%) נמצאים בשכבת האפיתל, כלומר, על שכבת העור החיצוני, או קרוב אליה. כיום, כאשר חושדים בקיום גידול סרטני על העור, יש צורך להוציא בתהליך ניתוחי את האזור החשוד (ביופסיה) ולשלוח אותו לאנליזה פתולוגית כדי לאבחן האם זהו גידול ממאיר או שפיר. זיהוי גידול סרטני באמצעות קרינת "T" מבוסס על הבליעה החזקה על ידי מים של קרינה אלקטרומגנטית בתדירויות שבין 0.1 - 3 טרהרץ (קרינת "T"). בתאים סרטניים כמות המים גדולה יותר מאשר בתאים בריאים, וכך ניתן באמצעות בדיקות ההחזרה של הקרינה מהרקמה הביולוגית לאבחן גם את קיום הגידול הסרטני, וגם למפות במדויק את גבולותיו, וכל זאת לפני ביצוע פעילות ניתוחית.

- **זיהוי מחלות שיניים** - (קרינת "T" חודרת דרך חומרי השן, ומאפשרת מיפוי תלת ממדי של המבנה, תוך זיהוי תהליכי דמינרליזציה (הרס השן) כבר בשלבים המוקדמים שלו, כאשר עוד ניתן לתקן את הנזק באמצעות טיפול בפלואור. לעומת צילום בקרינת X אשר מזהה את הנזק רק לאחר שנוצרים חורים, שזהו השלב בו ניתן רק לבצע סתימה (קידוח ומילוי חומר זר).

#### שימושים אחרים

- **בדיקות ללא הרס** - הדמאה תלת ממדית של מבנים כגון כמוסות של תרופות לזיהוי קצב ההתפרקות שלהן בגוף. מחקר נוסף, המתבצע במעבדות NASA בארה"ב, בוחן את האפשרות לבדיקת פגמים בהדבקת אריחי הקצף המצפים את מעבורת החלל. קרינת "T" עשויה לאפשר את בחינת האריחים לאחר הצבתם על המעבורת, וגילוי פגמים פנימיים בהדבקה, שעלולים לגרום להתרסקות המעבורת כפי שהתרחש במקרה של קולומביה.

- **בדיקת חומרים תחת מיקרוסקופ** - ניתן לבצע מדידות של הרכב שכבות, ומבנה תלת ממדי, ללא צורך לפרק את הגוף הנבדק.

- **ספקטרוסקופיה** - זיהוי חומרי נפץ, זיהוי אבקות כגון סמים, חומרי לוחמה כימית, וחומרי לוחמה ביולוגית. חומרי נפץ פלסטיים ניתנים לעיצוב בצורות שונות, ולצביעה לצורך הסתרה. הדרך היחידה לזהותם היא באמצעות מדידות ספקטרוסקופיות. **היתרון** של השימוש בקרינת T הוא שניתן לבצע בדיקה ספקטרוסקופית דרך מעטפות סגורות או מתחת לבגדים השקופים לקרינת T. כדוגמה ניתן להזכיר את הבעיה של מעטפות הדואר בארה"ב בהן היו נגיפי אנטרקס, לעומת מעטפות אחרות שעוררו בהלה, והייתה בהן אבקה לבנה בלתי מזיקה.

- **בקרת איכות של חלקים מפלסטיק**, כגון אריזות ויכולתן להחזיק מים (בדיקת מיקרו נזילות דרכם).

- **זיהוי חומרים מתחת לשכבות צבע**, כמו למשל בצוירים

עתיקים כדי לזהות שינויים שבוצעו בצירור במהלך השנים על ידי מריחת שכבות צבע נוספות.

- **בדיקת תכולת מים של רקמות** ביולוגיות, של צמחים, ושל זרעים. הדבר יכול לשמש בביקורת איכות בתעשיית המזון כמו לדוגמה בדיקת בשר לכמות השומן בו ולכמות המים בו.

- **בדיקת מצב קיפאון של חומרים** כגון מזון משומר.

- **שימוש בפולסים קצרים (פמטו-שניות)** של קרינת לייזר להקרנת חצאי מוליכים יוצרת פליטת קרינת T אופיינית מהם, המאפשרת זיהוי ובחינת מעגלים אלקטרוניים של חצאי מוליכים. הנושא נקרא:

LTEM = Laser Terahertz Emission Spectroscopy

- **זיהוי סימני מים (water marks)** בתוך שטרות כסף.

- **קריאת כתב יד (דיו) בתוך מעטפה סגורה**, ללא צורך בפתיחתה.

- **בקרת איכות של מזון באריזה** – כמו למשל ספירת אגוזים והתפלגותם בתוך "שוקולד אגוזים", או ספירת צימוקים באריזת דגני בוקר.

- **זיהוי תהליכי חלודה** המתפתחים מתחת לשכבות צבע

- **גילוי מוקשים חבויים בקרקע** – אם מעטפת המוקש עשויה מפלסטיק, אפשר לגלות את חומרי הנפץ במוקש באמצעות שיטות ספקטרוסקופיות. אם מעטפת המוקש עשויה ממתכת, קרינת T תוחזר ממנה. אולם לעתים קרובות מצויים שרידים של חומר הנפץ על המעטפת, כך שגם במקרה זה אפשר להשתמש בקרינת T לגילוי חומר הנפץ.

### ספקטרוסקופיית טרהרץ בתחום הזמן

זוהי שיטת מדידה **אקטיבית** בה מקרינים את הדוגמה הנבדקת בקרינת "T".

התחום בו משתמשים בשיטה זו נקרא באנגלית בשני השמות:

TDS = Time Domain Terahertz Spectroscopy

THz TDS = Terahertz Time Domain Spectroscopy

טכנולוגיה זו פותחה במעבדות בל בארה"ב ופורסמה בשנת 1995. משתמשים בפולסים קצרים מאוד (פמטו-שניות –  $10^{-15}$  שניות) של קרינת לייזר (לדוגמה מלייזר מסוג טיטניום ספיר). מכיוונים את קרינת הלייזר אל גביש חצי מוליך, הבולע קרינה זו, ופולט חזרה פולסים קצרים של קרינת "T".

קרינת "T" זו מכוננת אל האובייקט אותו רוצים למדוד (ליצור הדמאה ספקטראלית שלו).

חלק מהקרינה עובר דרך הגוף הנבדק, כאשר הקרינה מוחזרת בצורה שונה (אופיינית לחומרים) מהשכבות הפנימיות של הגוף.

### טומוגרפיה ממוחשבת

באמצעות סריקה של הגוף מכיוונים שונים, ובדיקת הזמן העובר מרגע שפולס נפלט, ועד שהוא מוחזר מכל אחת מהשכבות אל הגלאי, ניתן לבנות תמונה תלת ממדית של הרכב השכבות הפנימיות מהן מורכב הגוף, בדומה לטכנולוגיה המוכרת של טומוגרפיה ממוחשבת בתחום קרינת X (CT = Computerized Tomography).

על אותם עקרונות מבוססת **ההדמאה הטומוגרפית של קרינת "T"**, אלא שמשתמשים במקורות הפולטים פולסים קצרים (פיקושניות =  $10^{-12}$  שניות) בעלי טווח תדירויות רחב (broadband) המשתרע מ 300 גיגהרץ ( $3 \times 10^{11}$  Hz) ועד 10 טרהרץ ( $10^{10}$  Hz).

### שימושים לביטחון

האמצעים בהם משתמשים כיום לבדיקה ביטחונית של אנשים בכניסה למקומות עם קהל הם בעיקר גלאי מתכות. אין לגלאים אילו יכולת לגלות חומרי נפץ פלסטיים, כמו אלו המשמשים "מחבלים מתאבדים".

מערכת המבוססת על קרינת "T" יכולה לשמש לצורך **גילוי כלי נשק חבויים על גופם של אנשים** (כולל כלי נשק מפלסטיק), וכן את חומרי הנפץ עצמם, (על פי ההיענות הספקטראלית שלהם) גם כאשר הם מוסווים, אפילו מטווח של מספר מטרים. לשם כך יש צורך להשתמש בקרינת "T" בתדר הנמוך מ 0.5 טרהרץ, מכיוון שתדירויות גבוהות יותר נבלעות על ידי אדי המים באוויר, ולכן הטווח שלהן באוויר הוא מסדר גודל של מטר.

### שיטות לייצור קרינת T

אחת השיטות המקובלות כיום ליצירת קרינת "T" באורך גל של 0.5 טרהרץ היא על ידי שימוש במשדרי מיקרוגל, אשר הקרינה הנפלטת מהם עוברת דרך "מכפילי תדר קרינה" הממירים אותם לתדרים של קרינת "T". הבעיה כיום היא שיעילות מכפילי תדר אלו נמוכה, ולכן כמות קרינת "T" הנפלטת מהמכשיר קטנה מידי ליישומים הנדרשים.

לא נפרט במאמר זה את השיטות השונות **הנחקרות** ליצירת קרינת "T", מכיוון שזהו תחום חדשני הנמצא בפיתוח. למתעניינים רשומים להלן המושגים העיקריים באנגלית, המאפשרים לבצע חיפוש באינטרנט לגבי מידע רלבנטי לגבי שיטות ליצירת קרינת "T":

- **לייזר אלקטרוני חופשיים** (FEL = Free Electron Laser) (הסברים בעברית ניתן למצוא באתר הלייזרים בכתובת:

<http://stwww.weizmann.ac.il/lasers>.

- **קרינת סינכרוטרון<sup>2</sup>** – ליצירת קרינת "T" ניתן להשתמש בקרינת סינכרוטרון. **קרינת סינכרוטרון** (Synchrotron) נוצרת כאשר אוסף חלקיקים טעונים, בדרך כלל אלקטרונים,

## קשיים ביישום קרינת "T":

- אין מספיק מקורות הפולטים קרינה זו בעוצמה מספקת עבור יישומים, ואין גלאים רגישים לקליטת קרינה זו – הטכנולוגיה של ייצור הקרינה באופן מלאכותי וגילוייה היא חדשנית ונמצאת רק בתחילת דרכה.
- המכשור הקיים ליצירת קרינת "T" הוא גדול ומסורבל, ומיוצר ביחידות בודדות, ולכן גם עלותו יקרה.

## מערכות שלמות של קרינת "T"

הפיתוחים החדשים משלבים טכנולוגיות מתחום המיקרוגל עם טכנולוגיות מהתחום האופטי, ליצירת מערכת אחת בה נוצרת קרינת "T" מועברת מנקודה לנקודה, ומגלים אותה בנקודה החדשה.

מנחי גלים עבור גלים בתחום המיקרוגל מבוססים על צינור מתכתי חלול.

מנחי גלים לתחום האופטי מבוססים על העברת הקרינה בחומר דיאלקטרי (סיבים אופטיים).

הרעיון הנחקר כיום הוא **שילוב מערכות (מתכת + דיאלקטרי)** כפי שניתן לקרוא במאמר שהתפרסם בעיתון: Opt. Lett. 29 (15), 1751-1753, Aug 2004

## גלאי חדשני לקרינת "T"

תגלית משנת 2004 היא **שתיל מתכת פשוט מהווה מנחה גלים טוב עבור קרינת "T"**. תהליך העברת הקרינה בתיל המתכת מבוסס על תנועת האלקטרונים בחוט כפי שמתרחש באנטנה של גלי רדיו. ההבדל הוא שהאלקטרונים נעים רק מספר מילימטרים, ויוצרים תוך כדי כך אזורים בהם צפיפות האלקטרונים גבוהה ומוכה לסירוגין. התופעה של הבדלי הצפיפויות היא המתפשטת לאורך תיל המתכת, בדומה להתפשטות גלי הקול באוויר. כאשר תופעת ההבדלים של צפיפויות האלקטרונים מגיעה לקצה התיל המתכתי, היא יוצרת מחדש את קרינת "T" הנפלטת לאוויר. הנושא נחקר ודווח לאחרונה<sup>3</sup>.

## מראי מקום

1. Clery, D., Brainstorming their Way to an Imaging Revolution, Science, **297** no: 5582, pp. 761-73, August 2002.
2. שטיינברגר, י. ויונת, ע., קרינת סינכרוטרון, תהודה (2) **21**, עמ' 16-6, דצמבר 2000.
3. Mittleman, D. M., Nature 432, pp.376-379, 2004.

תהודה

המואצים למהירויות גבוהות (קרובות למהירות האור), מאולצים לנוע במסלול מעגלי על ידי שדה מגנטי חזק. השתמשו בקרינת סינכרוטרון להפקת קרינה אלקטרומגנטית בתחום ספקטראלי רחב ביותר מאינפרא אדום ועד לקרינת X. המטרה כיום היא להפיק גם קרינת "T" הנמצאת בתחום האנרגיות הנמוכות יותר (אורכי גל בתחום שבין 100 מיקרון ל 3 מילימטר).

- אפקטים לא ליניאריים בגבישים (NLO = Non Linear Optics) – מאפשרים יצירת הרמוניות שניות (הכפלה) ושלישיות של תדר הקרינה.

- QCL = Quantum Cascade Lasers, מקור לייזר שניתן לתכנן אותו באופן שילוט בתדר רצוי, והצליחו להפעילו גם בתחום קרינת T.

## סיכום

### יתרונות קרינת T:

- **בליעה ספקטראלית ספציפית** – לרוב המולקולות הכימיות והביולוגיות יש **ספקטרום בליעה אופייני** ("טביעת אצבע") בתחום קרינת T, דבר המאפשר זיהוי שלהן באופן מוחלט.

- **תחום העברה (שקיפות) ספקטראלי** – חומרים רבים בהם משתמש האדם בחיי יום-יום שקופים לקרינת T, כגון נייר, קרטון, בד, עץ, פלסטיק, חומרים קרמיים, חצאי מוליכים, וכו'. לכן ניתן לבצע בדיקות בלתי פולשניות של אנשים, חבילות וציוד לגילוי כלי נשק מוסתרים, סמים, או חומרי נפץ כאשר הם מוסתרים מתחת לבגדים, בתוך חבילות או מזוודות וכו'. למעשה, **רוב החומרים היבשים, שאינם מתכות, או חומרים המורכבים ממולקולות קוטביות, שקופים לקרינת "T"**.

- לקרינת T יכולת הפרדה (סלקטיביות, בררנות) גבוהה בהרבה מזו של קרינת X (רנטגן), עקב **התגובה השונה המתקבלת עם מגוון החומרים בהם היא עוברת** (האינטראקציה בין הקרינה לחומרים השונים היא אופיינית לחומר).

- הסיכונים בהקרנה בקרינת "T" נמוכים בהרבה מאלו הקיימים בשימוש בקרינת X, מכיוון שלפוטונים של קרינת "T" אין מספיק אנרגיה להוצאת אלקטרונים מאטומים, כפי שיש לפוטונים של קרינת X.

- בתחום הגלים המילימטריים (שאורך הגל שלהם גדול מקרינת "T") אין לרוב החומרים חתימה ספקטראלית אופיינית ולכן אין אפשרות לזהותם באמצעות קרינה זו.

- אורך הגל של קרינת "T" הוא חלקי מילימטרים, ולכן **כושר ההפרדה המרחבית של הדמאה באמצעותה גבוהה מזו האפשרית בגלים מילימטריים, עקב ההבדלים באורך הגל.**