



פיתוח מודלים אנליטיים למתנד קצר מחזור

מבוא

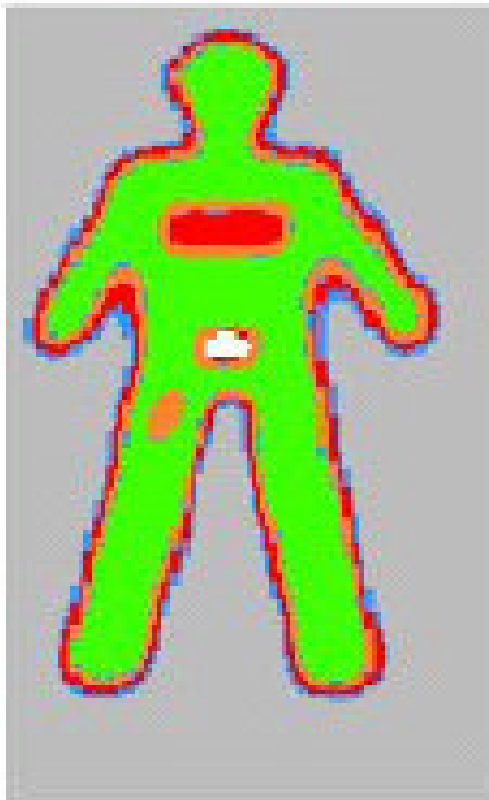
לייזר אלקטרוניים חופשיים (Free Electron Laser (FEL) הוא מתקן ליצירת קרינה אלקטרומגנטית קוהרנטית רבת עוצמה בתחום ספקטרי רחב. ה-FEL הישראלי נבנה על בסיס מאיץ ה-tandem האלקטרוסטטי של מכון ויצמן שהועבר זה לא מכבר למכללת יהודה ושומרון ופועל בתצורה חדשנית (עם מהוד פנימי) אשר מאפשרת עקרונית פיתוח המתקן להספקים גבוהים מאד ולכן לשימושים אנרגטיים וביטחוניים (ראה איור 1). קונסורציום ה-FEL הדגים פעולה של מקור הקרינה המקורי שפותח בתחום הגלים המילימטרים בהספק שיא של פולס (10kW) בתחום כוונון תדר רחב (70-130 GHz) ורוחב סרט צר (10^{-6}) שהינו שיא בקוהרנטיות המתקבלת ממקורות קרינה מסוג זה.



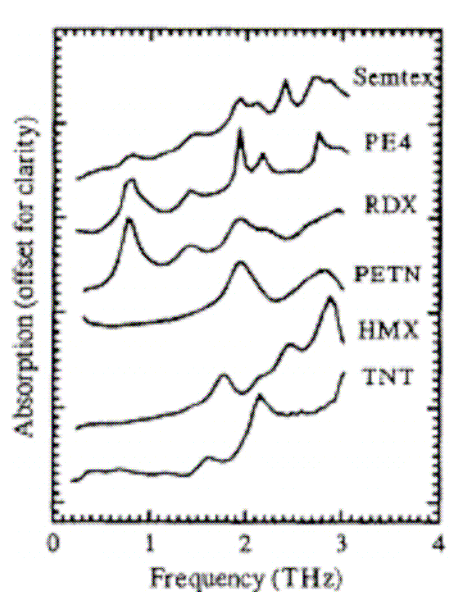
איור 1: מתקן ה-FEL הישראלי

לאחרונה יש התעניינות רבה בעולם מקורות רבי עוצמה בתחום הגלים התת מילימטריים (THz). תחום הגלים התת מילימטרים מתאפיין בקווים ספקטריים אופייניים של חומרי נפץ שונים ומכאן חשיבותו הביטחונית לצורך זיהוי ממרחק של חומרי נפץ מוסתרים. איור 2 מתאר הדמיה של חשוד הנושא חומרים מוסתרים שונים על גופו על ידי שימוש בקרינה תת-מילימטרית. קוד הצבעים הוא כדלהלן: לבן = מתכת, אדום = חומר נפץ RDX, כתום = סוכרייה, ירוק = עור, אפור = רקע. ניתן לראות שעל ידי שימוש בקרינה תת מילימטרית ניתן להבחין בין חומרים דיאלקטרים שונים כגון סוכרייה וחומר נפץ. יכולת זאת נובעת מספקטרום ההחזרה האופייני של החומרים בתחום הגלים התת-מילימטריים כמתואר באיור 3. על

מנת שליזור האלקטרונים החופשיים הישראלי יוכל לייצר קרינה בתחום ספקטרלי מעניין זה יש צורך לבצע התאמות מסוימות במכשיר כמתואר לעיל:



איור 2: הדמיה של עצמים מוסתרים בתחום הגלים התת-מילימטריים

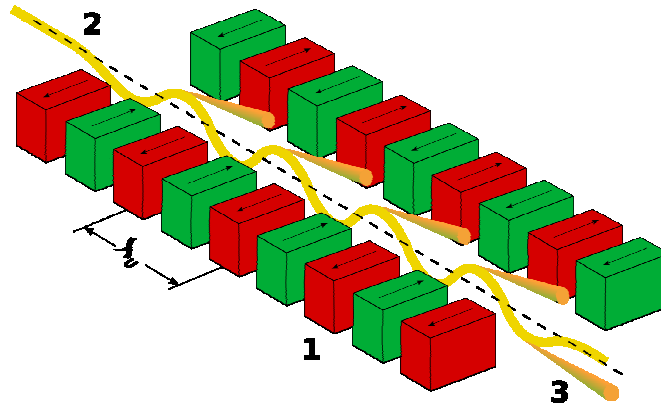


איור 3: ספקטרומים של חומרי נפץ שונים בתחום הגלים התת-מילימטריים

אורך הגל λ_s של הקרינה הנפלטת על ידי לייזר האלקטרונים החופשיים נקבע על ידי הנוסחה:

$$\lambda_s \approx \frac{\lambda_w}{2 \left(1 + \frac{eV}{m_e c^2} \right)^2}$$

כאשר e מטען האלקטרון, m_e מסת האלקטרון, c מהירות האור ו V מתח המאיץ. האורך λ_w הוא אורך המחזור של מבנה מגנטי מחזורי הנמצא במרכז המאיץ המכונה Wiggler ראה איור 4.

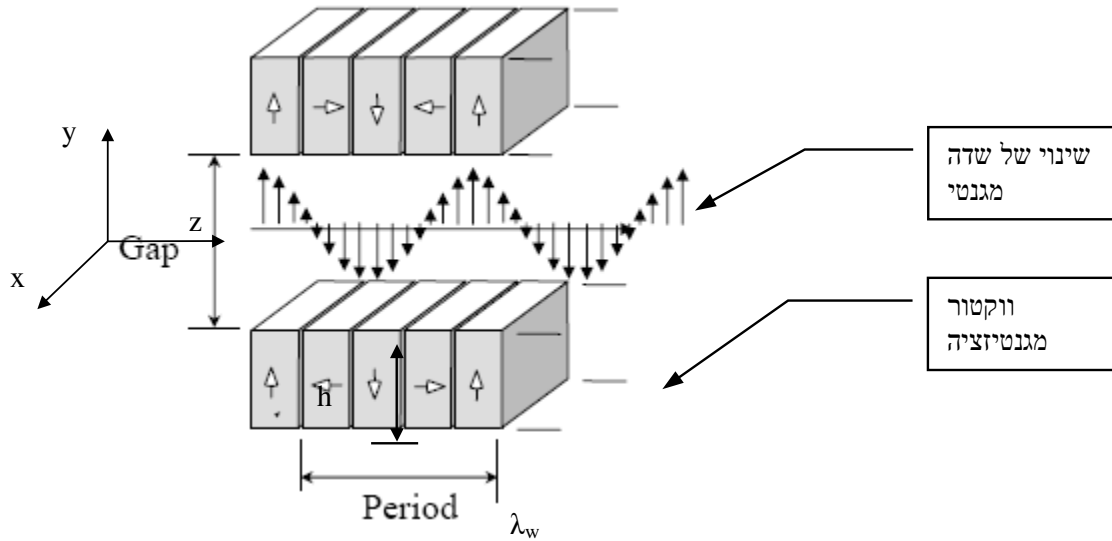


איור 4: המתנד (Wiggler) של לייזר האלקטרונים החופשיים

נוסחת אורך הגל של לייזר האלקטרונים החופשיים מכילה שני פרמטרים בלבד שאינם קבועי טבע בסיסיים. האחר הוא המתח V והשני הוא אורך המחזור של המתנד λ_w . ניתן להגדיל את מתח התאוצה של האלקטרונים בלייזר האלקטרונים החופשיים על ידי שימוש במאיץ רב עוצמה אפשרות זו היא יקרה ונידונה בהצעת מחקר אחרת. אפשרות נוספת היא הקטנת אורך המחזור של המתנד.

תיאוריה של Wiggler (מתנד) מטיפוס הולבך הנמצא בלייזר האלקטרונים החופשיים הישראלי

זה Wiggler זה אוסף מגנטים מסודרים בצורה כזאת שהשדה המגנטי בתוכו התנהג כגל מחזורי. כדי להרחיב את ההסבר נראה סכמתית איך עובד אותו מכלול הנקרא Wiggler מטיפוס הולבך (ראה איור 5). כפי שנאמר קודם, שדה בתוך המכלול ה-Wiggler מתנהג בצורה מחזורי, לגל מחזורי יש אורך מחזור. אורך המחזור של ה-Wiggler נקבע על פי גודל של ארבעת המגנטים כפי שמצוין באיור 1. למשל אם גודל המגנט שווה ל-11.1mm אז אורך המחזור (λ_w) שווה ל- $11.1\text{mm} \times 4 = 44.4\text{mm}$. החצים על גבי המגנטים באיור מסמנים את ווקטור המגנטיזציה של כל אחד מהמגנטים שמרכיבים את המכלול. למשל, מגנטים עם מגנטיזציה בכיוון x ייצרו שדה מגנטי כלפי מעלה (בכיוון x) ומגנטים עם מגנטיזציה בכיוון y, ייצרו שדה כלפי מטה (בכיוון ציר y). למגנטים עם מגנטיזציה בכיוון ציר z יש גם משמעות רבה, הם תורמים לגודל השדה.



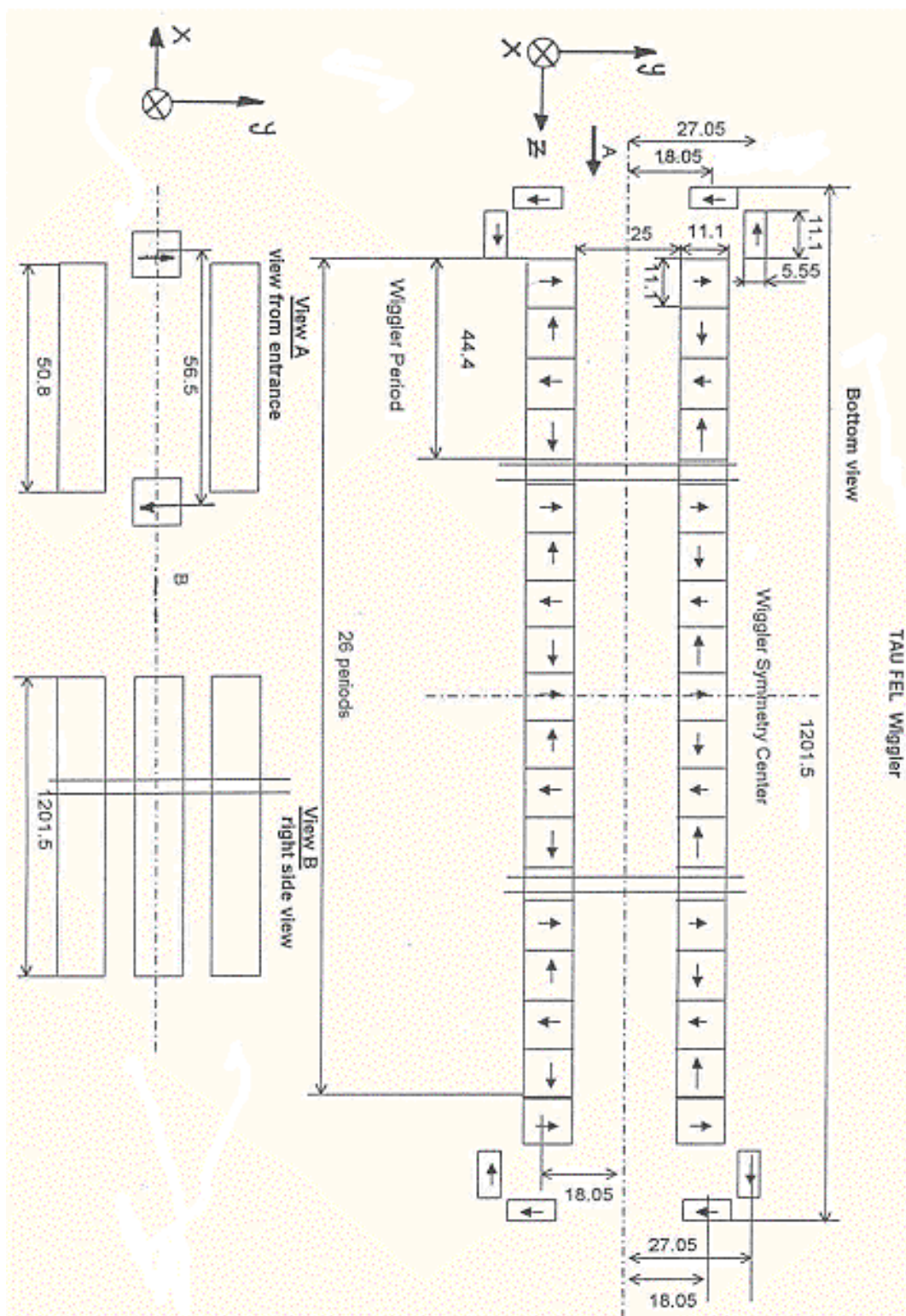
איור 5: Wiggler מטיפוס הולבך והשדה מגנטי שלו

הנוסחה על פיה ניתן לחשב בקירוב את שינוי של שדה המגנטי בתוך המכלול ה-Wiggler נקראת Halbach Formula. הנוסחה כוללת את עובי המגנט (h), מרחק בין השורות (g), אורך המחזור (λ_w) ומגנטיזציה של מגנט בודד (B_r).

$$B_n = 2B_r \cdot \frac{\sin\left(n\frac{\pi}{4}\right)}{n\frac{\pi}{4}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2n\pi h}{\lambda_w}}\right) \cdot e^{-\frac{n\pi g}{\lambda_w}} \cdot \cos\left(2n\pi \frac{z}{\lambda_w}\right)$$

when $n=1,2,3...$

ב-Wiggler אמיתי, חוץ משורת המגנטים המסודרים כפי שמופיע באיור 5, יש עוד חלקים שתורמים לשדה הכולל של המכלול. החלקים אלו נקראים מגנטים אורכיים, שהם בעצם שני מגנטים ארוכים המורכבים לאורך Wiggler כולו בין שתי שורות שהזכרנו קודם ומגנטי מיקוד האלומה, בכניסה וביציאה של המכלול. השימוש במגנטים אורכיים מורגש יותר כאשר אלומת האלקטרונים עוברת דרך ה-Wiggler, הם מאזנים את האלומה ולא נותנים לה להתבדר ולצאת מגבולות המותרים. מגנטי מיקוד לא תורמים בכלל לשדה הכולל של ה-Wiggler אלא, משמשים אותנו לצורך מיקוד האלומה (חלק אופטי של ה-Wiggler). איור 6 מתאר את המידות הרלוונטיות של ה-Wiggler העכשווי של ה-FEL:



איור 6: שרטוט ה Wiggler המשמש בלייזר האלקטרונים החופשיים הישראלי

מתנדים אלטרנטיביים

המתנד המופיע באיור 4 שונה ממתנד הולבך (איור 5) בכך שאין הוא מכיל מגנטים עם מגנטיזציה אופקית. לכאורה הסרת המגנטים עם מגנטיזציה אופקית מקצרת את מחזור המגנט פי שניים ולכן מאפשרת הכפלת התדר. יחד עם זאת ייתכן ויש לכך השפעה שלילית על עוצמת השדה המגנטי ולכן גם על הגבר המתנד. לצורך המחקר השתמשנו במודל של שדה מגנטי הנובע מלבנה ממוגנטת באחידות המתואר על ידי סט המשוואות הבא ליחידת מגנט:

$$B_x = -\text{Log}[-b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2-2by+y^2-2cz+z^2}] + \text{Log}[-b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2-2by+y^2-2cz+z^2}] + \\ \text{Log}[b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2+2by+y^2-2cz+z^2}] - \text{Log}[b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2+2by+y^2-2cz+z^2}] + \\ \text{Log}[-b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2-2by+y^2+2cz+z^2}] - \text{Log}[-b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2-2by+y^2+2cz+z^2}] - \\ \text{Log}[b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2+2by+y^2+2cz+z^2}] + \text{Log}[b+y+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2+2by+y^2+2cz+z^2}]$$

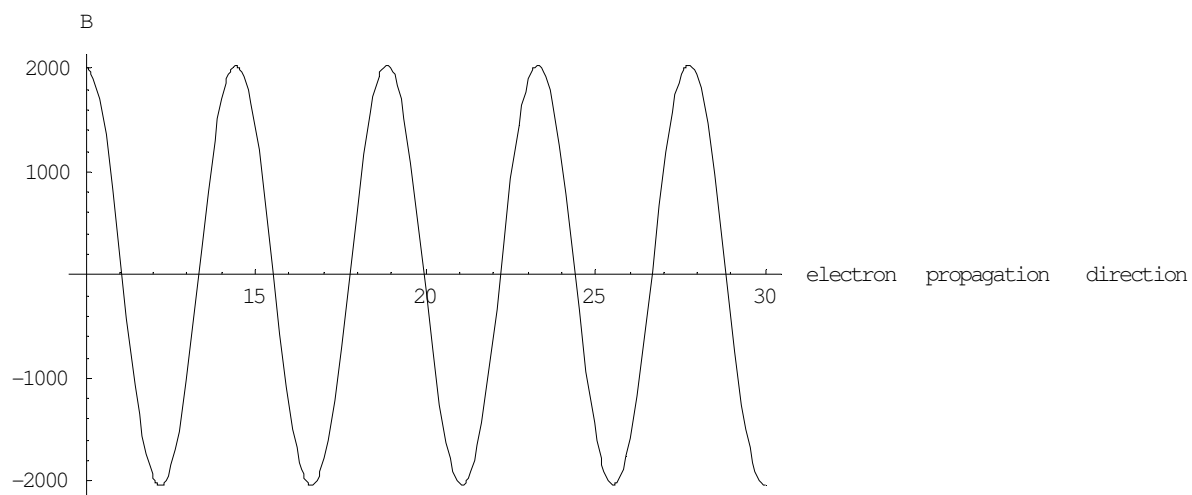
$$B_y = -\text{Log}[-a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2-2by+y^2-2cz+z^2}] + \text{Log}[a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2-2by+y^2-2cz+z^2}] + \\ \text{Log}[-a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2+2by+y^2-2cz+z^2}] - \text{Log}[a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2+2by+y^2-2cz+z^2}] + \\ \text{Log}[-a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2-2by+y^2+2cz+z^2}] - \text{Log}[a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2-2by+y^2+2cz+z^2}] - \\ \text{Log}[-a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2+2by+y^2+2cz+z^2}] + \text{Log}[a+x+\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2+2by+y^2+2cz+z^2}]$$

$$B_z = \text{ArcTan}\left[\frac{(-a+x)(-b+y)}{(-c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2-2by+y^2-2cz+z^2}}\right] + \text{ArcTan}\left[\frac{(a+x)(b-y)}{(-c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2-2by+y^2-2cz+z^2}}\right] + \\ \text{ArcTan}\left[\frac{(a-x)(b+y)}{(-c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2+2by+y^2-2cz+z^2}}\right] + \text{ArcTan}\left[\frac{(a+x)(b-y)}{(-c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2+2by+y^2-2cz+z^2}}\right] - \\ \text{ArcTan}\left[\frac{(-a+x)(-b+y)}{(c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2-2by+y^2+2cz+z^2}}\right] - \text{ArcTan}\left[\frac{(a+x)(b-y)}{(c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2-2by+y^2+2cz+z^2}}\right] - \\ \text{ArcTan}\left[\frac{(a-x)(b+y)}{(c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2-2ax+x^2+2by+y^2+2cz+z^2}}\right] - \text{ArcTan}\left[\frac{(a+x)(b-y)}{(c+z)\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ax+x^2+2by+y^2+2cz+z^2}}\right]$$

כאשר Z הוא כיוון המגנט ו a, b, c הם חצאי מידות המגנטים בכיוונים x, y, z בהתאמה. במודל חיברנו זוג מגנטים לזוג ההפוך כמתואר באיור 4. כמו כן הנחנו שהמגנטים מונחים על ברזל מה שמכפיל את מידותיהם בכיוון המגנט. הפרמטרים שנבחרו:

מידה	גודל (ס"מ)	הסבר
a	2.54	ראה איור 6
b	1.11	נבחר כך שהשדה המקסימלי יהיה 2000 גאוס כמו שמקובל היום, השדה B_r שנבחר הוא 10000 גאוס (ראה דוח ביניים קודם)
c	1.11	ראה איור 6

קיבלנו אם כן אורך מחזור של 4.44 ס"מ כמו במקרה של הולבך כלומר הקונפיגורציה המגנטית החדשה **אין יתרון** ביחס לקונפיגורציה הקודמת. כמובן ייתכן קיצור באורך המחזור במידה וניתן יהיה להגדיל את הזרם מהקתודה כך שההפחתה בהגבר תקוּז. איור 7 מתאר את השדה המגנטי שהתקבל.



איור 7: השדה המגנטי המתקבל מהמתנד המוצע