

11.11.2022

היסטוריה של לייזר האלקטרוני החופשיים (FEL) בישראל והקמת

המרכז לפיתוח מאיצים זעירים באריאל

אברהם גובר

מוקדש לזכרם של:

יגאל כהן אורגד ופרופסור יובל נאמן – מובילי פרויקט ה-FEL

חיים קליינמן, יז'י סוקולובסקי, מיקי קנטר, אריה אייכנבאום, בוריס קפילביץ' ודמיטרי בורודין

– חלוצי הפרויקט

במונוגרפיה זאת אציג את תולדות פיתוח מחקר FEL בישראל. אתמקד בהקמת מרכז

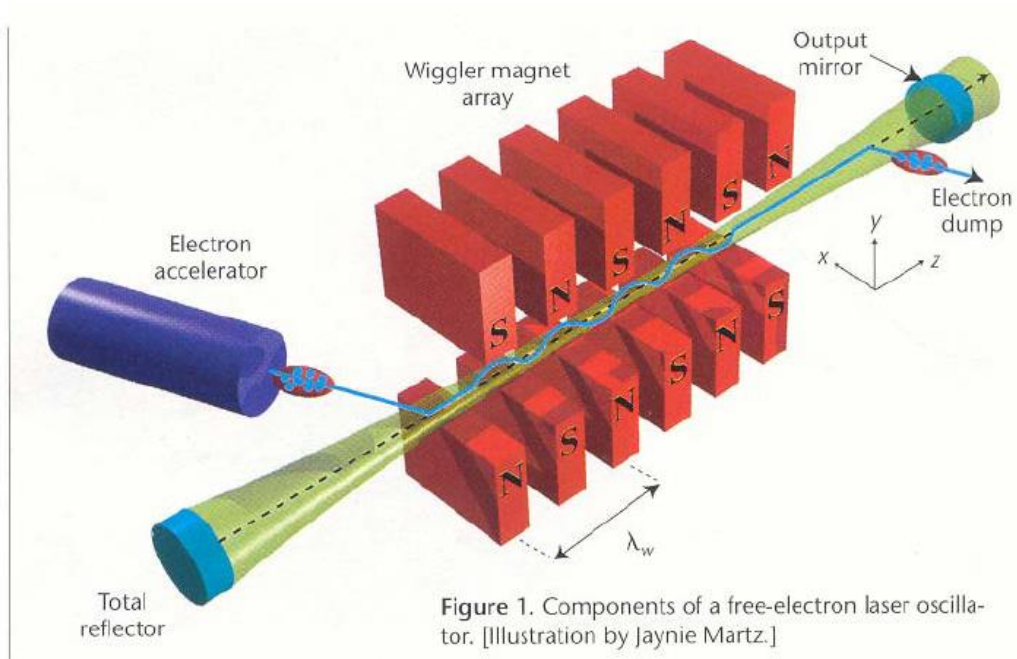
ה-FEL הישראלי המשותף לאוניברסיטאות תל אביב ואריאל והמרכז למאיצים זעירים

באריאל.

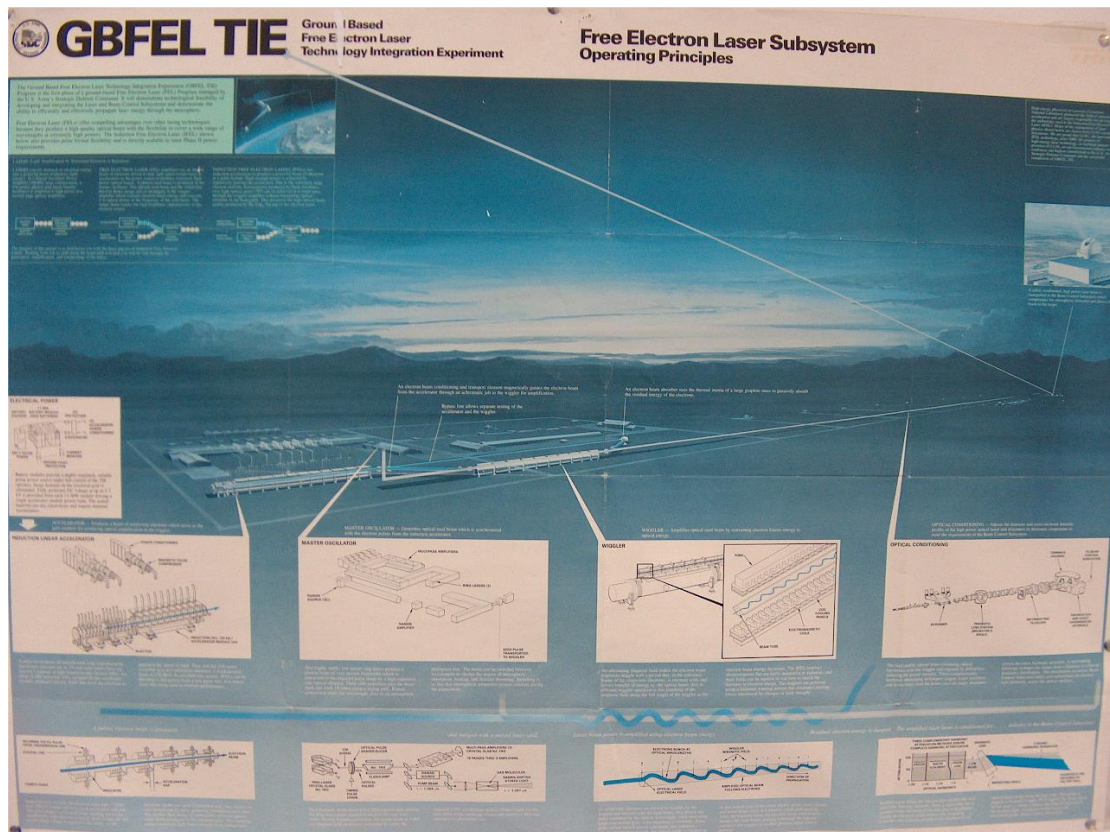
1. לייזר אלקטרוני חופשיים (Free Electron Laser – FEL)

לייזר אלקטרוני חופשיים (FEL) ידוע כלייזר של "מלחמת הכוכבים" (SDI - Strategic Defense Initiative) של הנשיא רייגן שהושקה ב-1983 בשלהי תקופת המלחמה הקרה [1], ונועדה לספק הגנה בפני מתקפת טילים על ארה"ב מצד ברה"מ. תקציבי עתק הוקצו על ידי ממשלת ארה"ב לפיתוח טכנולוגיות שונות של לייזרים רבי עוצמה ושל אסטרטגיות להולכת אלומות הלייזר דרך האטמוספירה בכדי לפגוע במהירות האור בטיילים בליסטים נושאי נשק גרעיני, והשמדתם בשלב מעופם בחלל לפני החדירה לאטמוספירה. טכנולוגיות לייזרים רבי עוצמה היו בשלב זה רחוקות מלספק את העוצמה הנדרשת למטרה זאת. הלייזרים שנחשבו בעלי סיכוי לפעול בעוצמות הדרושות לאחר פיתוח רב השקעה, היו בעיקר הלייזר הכימי ולייזר אלקטרוני חופשיים (FEL) [2]. לייזר FEL שהומצא על ידי John Madey באוניברסיטת סטנפורד בשנות השבעים של המאה הקודמת (ראה איור 1) היה אז בשלבים מוקדמים של מחקר ופיתוח, אך נחשב כמועמד טוב למטרה זאת מכיוון שבניגוד ללייזרים מקובלים

המבוססים על הגברת אור בחומר, הוא מבוסס על הגברת אור בריק באמצעות המרה יעילה של האנרגיה הקינטית של אלומת אלקטרונים לאלומת אור לייזר קוהרנטית רבת עוצמה. התצורה של מערכת הגנה בפני טילים המבוססת על FEL על פלטפורמה קרקעית מוצגת באיור 2.



איור 1 : מבנה סכמתי של לייזר אלקטרוני חופשיים (FEL). אלומת אלקטרונים מואצת לאנרגיה גבוהה במאיץ אלקטרוני, מוזרקת אל תוך מבנה מגנטי מחזורי (WIGGLER). עקב התנודה הרוחבית של מטען האלקטרונים נפלטת קרינה אלקטרומגנטית (אור). תדר הקרינה גבוה יותר ככל שאנרגיית האלקטרונים גבוהה יותר (ממיקרוגל עד קרני X). האיור מתאר מתנד FEL (Laser Oscillator) שבו הקרינה כלואה ומוגברת בין שתי מראות. במרבית השימושים הלייזר בנוי בתצורת מגבר (FEL amplifier), שבה אין מראות, ואלומת אור מוזרקת יחד עם אלומת האלקטרונים ויוצאת מוגברת לאחר ה-WIGGLER.



איור 2: איור מושגי של מערכת נשק לייזר של SDI (Strategic Defense Initiative) מבוססת FEL על פלטפורמה קרקעית ליירוט טילים בעלי ראש חץ גרעיני מתפצל בעת מעופם בחלל לפני החדירה לאטמוספירה. אלומת הלייזר רבת העוצמה המופקת במוצא ה-FEL משוגרת למרחק של מעל קילומטר על מנת שתתרחב ולא תזיק למראת הממסר אשר מכוונת אותה אל מחוץ לאטמוספירה. "מראות לוחמות" בחלל מכוונות וממקדות את האלומה על המטרה.

השקת תוכנית SDI והקצאת תקציבי עתק למימושה על ידי ממשלת ארה"ב, גררה מאמץ מקביל מצד ברית המועצות לשעבר. אף כי התוכנית הייתה בעיקרה תוכנית הגנה, החסינות שיכלה להשיג לצד אחד יכלה ליצור חשש של הצד השני שמאזן האימה הגרעיני יופר. אולם, למעשה אף טכנולוגיית לייזר, וגם לא FEL, היו בשלים באותו זמן, והיו רחוקים מאוד מיכולת לספק עוצמת קרן אור גבוהה למדי כדי לשמש בסיס למערכת נשק אופרטיבית. בכל זאת, להשקעה המסיבית בתחום זה של ארה"ב ובעלי בריתה הייתה משמעות אסטרטגית במאבק הבין-גושי במסגרת המלחמה הקרה בין ברה"מ והמערב. היסטוריונים רבים מייחסים

לתחרות זאת השפעה משמעותית על קריסת ברה"מ והתפרקות הגוש הסובייטי ב-1991 עקב אי יכולת לעמוד בעלויות הגבוהות של פיתוח מערכת הגנה אסטרטגית מקבילה ל-SDI.

ההשקעות של משרד SDI לפיתוח טכנולוגיות נשק לייזר צומצמו באופן דראסטי עם תום תקופת המלחמה הקרה בין הגושים. פיתוח מערכות נשק לייזר מכוון נמשך גם היום (בעיקר על בסיס לייזרי מצב מוצק ולייזרי סיבים אופטיים). בישראל, שהייתה שותפה זוטרה בפיתוח נשק לייזר, בעיקר באמצעות רפאל, נוצר בסיס ידע בתחום זה, שהוביל לאחרונה לפיתוח מערכת הגנה מבוססת לייזר מצב מוצק "מגן אור", אשר צפויה להיות יעילה להגנה בפני מתקפות רקטות ופצצות מרגמה [3].

אף כי תוכנית SDI לא הגיעה לבשלות טכנית, ההשקעות המסיביות בפיתוח טכנולוגיות לייזר רב עוצמה נשאו פרי בשימושים אזרחיים חשובים. פיתוח טכנולוגיות ה-FEL, ובעיקר שיפור אופייני הפעולה של מאיצים אלקטרוניים, אפשרו לנצל את ייתרונו הבסיסי של ה-FEL לפעול בכל תדר (אורך גל) רצוי (בתלות באנרגיית המאיץ). זה הוביל לפיתוח מקורות קרינה קוהרנטיים ומתכוונני תדר בתחומים ספקטראליים בהם יש קושי למצוא לייזרים קונבנציונליים, בעיקר תחום תדרי טרהרץ (תחום ביניים בין מיקרוגל לתחום האופטי של אינפרא-אדום ואור נראה) ותחום קרינת X (קרינת רנטגן או X-RAY). ה-FEL הוא הלייזר היחידי שיכול לפעול באופן קוהרנטי ובבהיקות גבוהה מאוד בתחום קרינת X. איור 3 מציג את לייזר קרינת X הראשון שהופעל במעבדות (Stanford Linear Accelerator (SLAC) ב-2009 [4]. עשרות מרכזי לייזר FEL פותחו מאז בכל המדינות המפותחות בעולם, והם משמשים בעיקר למחקר מדעי בכל תחומי הפיזיקה, הכימיה והפיזיקה, מחקר שאפשרי רק תודות לתכונות הספקטראליות הייחודיות של ה-FEL.



איור 3: X-Ray FEL הראשון בעולם (SLAC-LCLS). לזר בפעם הראשונה ב-10 אפריל 2009 בתחום אורכי גל 1.5-15 Angstrom. ה-FEL מבוסס על מאיץ LINAC בעל אנרגיית האצה 13.6 גיגה-וולט באורך קילומטר ו- wiggler (undulator) באורך 112 מ'.

2. תחילת מחקר FEL בישראל

אברהם גובר, שהצטרף לאוניברסיטה תל אביב לפקולטה להנדסה ב-1977, היה אז מחלוצי המחקר של לייזר FEL לאחר שפיתח תיאוריה כוללנית למנגנוני הפעולה הפיזיקליים של הלייזר יחד עם המנחה שלו לדוקטורט ב- CALTECH – אמנון יריב [5]. בהתבסס על הקשרים שיצר עם הקהילה המדעית בתחום ה-FEL בארה"ב, גובר הקים מעבדה ראשונה למחקר FEL באוניברסיטת תל-אביב (את"א) ב-1978 בתמיכת משרד המחקר של חיל האוויר האמריקאי (AFOSR). במקביל הוא יצר קשר עם מפא"ת/מו"פ (מחלקת פיתוח אמצעי לחימה – תשתיות) של משרד הבטחון (ד"ר מאיר גולדשטיין וד"ר אברהם שטרנליב) והסביר כי לטכנולוגיות לייזר רבי עוצמה בכלל, ולייזר FEL בפרט, צפויים בעתיד שימושים צבאיים למטרות הגנה בתור נשק אנרגיה מכוונת. מפא"ת מינתה וועדת בדיקה לנושא בראשות פרופ' זאב לב. אף כי בשלב מוקדם זה, עוד לפני הכרזת תוכנית SDI, המחקר והפיתוח בתחום FEL היה עוד בחיתוליו, הדו"ח של פרופ' לב כלל המלצה לתמוך בתחום מחקר זה

בארץ בהיקף מתון. זאת מתוך הערכה שתשתית ישראלית בתחום לייזרים רבי עוצמה עשויה להיות חשובה בעתיד בתחומים ביטחוניים, וגם אחרים – מדעיים ותעשייתיים. דו"ח זה שימש בסיס לתמיכה מתמשכת של מפא"ת בפעילות מחקר FEL באוניברסיטה תל אביב, ובהמשך במכון וויצמן ואוניברסיטת אריאל.

בהיעדר מאיצים זמינים בארץ שיכולים לספק אלומת אלקטרונים באנרגיה גבוהה להזנת FEL, הוחלט להסתפק בשלב ראשון במאיצים זעירים (בעלי אנרגיה פחות מ-1 MeV) שאינם מתאימים ליצירת קרינה קוהרנטית בתחום הנראה, אך מתאימים ליצירת קרינה בתחום הגלים המילימטרים (גמ"מ) אשר גם לו יש שימושים ביטחוניים. בעזרת קשרים עם מדענים באוניברסיטת קולומביה בארה"ב (Tom Marshal - Perry Schlesinger) התקבלה מאוניברסיטת קולומביה ב-1982 (?) תרומה של מאיץ פולסי בעל אנרגיה של 800 keV. במסגרת שיתוף פעולה בין את"א ורפא"ל (יובל כרמל ושמעון אקהאוז – לימים יזם הייטק ידוע) הותקן המאיץ ברפא"ל, וסיפק לראשונה ב-1985 קרינת FEL בעוצמה גבוהה בתחום גמ"מ [6].

במקביל נבנה באוניברסיטת ת"א מתקן FEM (Free electron maser) מבוסס על ספק כוח של 70keV. זאת אנרגיית אלקטרונים נמוכה, ולכן הקרינה המופקת היא בתדר נמוך (מיקרוגל). מתקן זה נועד לחקירת הפיזיקה של ה-FEL בתחומי פעולה שונים מתוך הבנה שהפיזיקה של המתקן אינה תלויה באורך גל, ומסקנות המחקר במיקרוגל ישימות גם ל-FEL בכל תדר של הספקטרום האלקטרומגנטי. בהיעדר מאיץ זמין באנרגיה גבוהה, מחקר זה העניק לחוקרים הזדמנות ללמוד את עקרונות הפעולה של FEL על גבי מתקן קומפקטי (table-top) המתאים לעבודת מחקר בהיקף אוניברסיטאי (ראה איור 4). במסגרת מחקר זה פיתחה קבוצת המחקר הישראלית קונצפט חדשני של פעולת FEL (Superradiant FEL) [7,8]. כאשר הושקה תכנית SDI ב-1983, הוקצו תקציבי מחקר בסיסי בתחומי מדע רחבים למעבדות הלאומיות האמריקאיות, אך גם לאוניברסיטאות ולמעבדות מחקר מחוץ לארה"ב. פרופ' גובר זכה לנהל מחקר עבור SDI בנושא של FEL מבוסס על פלטפורמה קרקעית. הוא

ניהל מחקר זה בשנים 1986-1988 בעת ששהה במסגרת שבתון וחל"ת במעבדות Brookhaven National Laboratory וחברת SAIC. במהלך תקופה זאת הזדמנה לו אפשרות להתוודע עם חזית הידע המדעי והטכנולוגי בתחום זה במעבדות המחקר העיקריות בתחום זה: Lawrence-Livermore National Laboratory, Los-Alamos National Laboratory (LANL), ומרכזי מחקר אחרים. בשנת ... הזדמן לו להיפגש עם פרופ' אדוארד טלר - "אבי פצצת המימן" ויוזם תכנית SDI. הפגישה ב Livermore זומנה בהמלצת ידידו פרופ' יובל נאמן ונערכה בהשתתפות ראש תכנית פיתוח FEL ב-Livermore – Dr. Don Prosnitz.

בין השאר, כוונתו בפגישה הייתה להשפיע על נכונות לתמוך במחקר בתחום FEL באוניברסיטאות בישראל. בתקופה זאת כבר היה שיתוף פעולה חשוב של SDI עם רפאל, בעיקר בנושא של לייזר כימי (פרויקט נאוטילוס) ומערכות כיוון אלומות לייזר [9]. בשיחה הטכנית הדגיש טלר את העדפתו להצבת הלייזר על פלטפורמה קרקעית באזור יבש ודל משקעים והעברת אלומת האור דרך האטמוספירה למטרה בחלל באמצעות "מראות לוחמות" (ראה איור 2). **ייתכן שלאסטרטגית פעולה זאת עשויה להיות רלוונטיות לסיטואציות הגנה בעתיד גם של מדינה כמו ישראל, לא בהכרח עם FEL.**

3. פרויקט ה-TANDEM-FEL במכון ווייצמן

בעידוד מפא"ת ובתמיכת פרופ' יובל נאמן, שהיה באותו זמן שר המדע ושר האנרגיה, פרופ' גובר יזם בשנת-1988 יחד עם אילן בן צבי ויז'י סוקולובסקי ממכון ווייצמן, את המרת מאיץ הטנדם הישן של מכון ווייצמן (מאיץ יונים אלקטרוסטטי) למאיץ אלקטרונים לצורך שימוש להפעלת FEL. ליוזמה הצטרפו מדענים בכירים ממעבדות המחקר הלאומיות (שמעון אקהאוז, יובל כרמל, יוסי שילה מרפאל, אלכס וולף, אריה לוין, עודד שחל מקמ"ג), שהתארגנו לשיתוף פעולה מחקרי במסגרת "קונסורציום ה-FEL הישראלי". פרופסור נאמן היה פיזיקאי חלקיקים אלמנטריים בעל יוקרה עולמית ונשיא לשעבר של אוניברסיטה תל אביב. כאיש אשכולות הוא התעניין בכל תחומי המדע (ראה מאמר נדיר שלו בנספח א על תופעת הלזירה והתרשמותו הפואטית של אבא קובנר מהסבריו). לבקשתנו, הוא נאות ברצון לעמוד בראש וועדת ההיגוי של הקונסורציום.

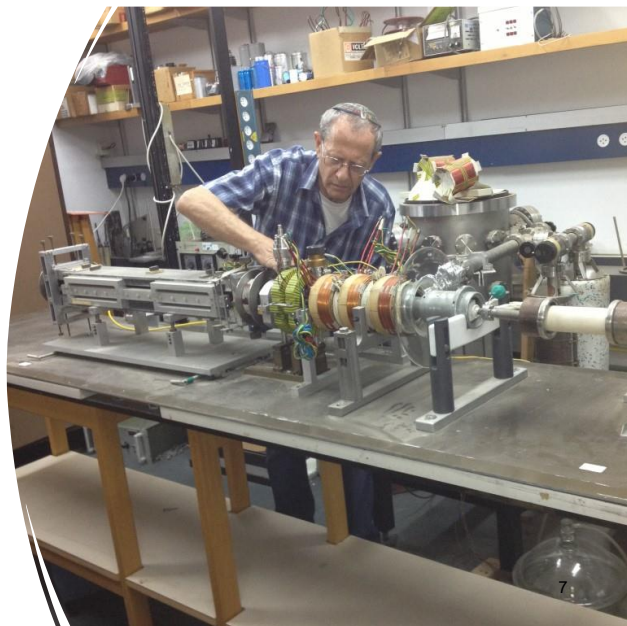
מאיץ הטנדם הוא מתקן שנתרם בתחילת שנות החמישים למכון ווייצמן ע"י קנצלר

גרמניה קונראד אדנהאור במסגרת הסכם השילומים. המתקן עמד ללא שימוש תקופה ארוכה, עד אשר, בעקבות היוזמה הנ"ל, אישר המכון ליוזמים להמיר את מאיץ היונים הישן למאיץ אלקטרונים שמכיל בתוכו FEL ליצירת אלומת קרינה רבת עוצמה. קונסורציום ה-FEL הצליח להדגים פעולת לייזר רב עוצמה ובהיקות בתחום הגלים המילימטרים בחנוכה 1997. דרגת הקוהרנטיות של אלומת הקרינה של הלייזר (רוחב פס התדרים) הציבה שיא עולמי לתחום ה-FEL [10]. התרומה המדעית הייחודית של בניית לייזר אלקטרונים חופשיים ראשון בישראל, אף כי קטן בעוצמתו ובביצועיו בהשוואה ללייזרי FEL גדולים בהרבה בארה"ב ובעולם, העניקה לקבוצת ה-FEL הישראלית כרטיס כניסה למועדון המצומצם של מעבדות מחקר לאומיות ביטחוניות ואקדמיות בארה"ב ובעולם, ואפשרות להחליף ולשאוב ידע מדעי וטכנולוגי לפיתוח תחום מחקר זה בארץ.

Free Electron Maser demonstration
experiment in TAU

AFOSR, ONR (1977-1984)
Israel MOD (MAFAT/MATAT)

H. Kleinman
A. Eichenbaum
S. Ruschin



איור 4: מערכת ניסוי Free Electron Maser (FEM) באוניברסיטה תל אביב. הצילום מראה את המערכת בשלב בו מהנדס המעבדה חיים קליינמן מפרק את המתקן לקראת העברתו לאריאל. המתקן מוצב היום במרכז המבקרים בכניסה למרכז המאיצים באריאל, ומשמש להדגמת עקרונות הפעולה של Superradiant FEL.

The W. I. Tandem van der Graaff ion Accelerator

6->12 MeV electrostatic accelerator.
Donated as part of the German
compensation agreement by K.
Adenauer (1954).

First lasing 1997:

Abramovich, A., A. Arensburg D. Chairman, A.
Eichenbaum, M. Draznin, A. Gover, H. Kleinman et
al.

"Lasing and radiation mode dynamics in a Van de
Graaff accelerator-free-electron laser with an
internal cavity."

Applied physics letters 71, 3776(1997).



9

איור 5: מתקן ה- FEL הראשון במכון ווייצמן שנבנה על ידי קונסורציום ה-FEL אחרי המרת
מאיץ יונים אלקטרוסטטי (TANDEM van der Graaff) למאיץ אלקטרונים. לזירה ראשונה
בגלים מילימטרים הודגמה בחנוכה 1997.

4. העתקת פרויקט ה-TANDEM-FEL לאריאל

לאחר הצלחת פרויקט בניית ה-FEL, ובעקבות פרישתו של אילן בן צבי ממכון ווייצמן, ביקש מכון ווייצמן לפנות את שטח מעבדת המאיץ לצורך הקמת מעבדה חדשה עבור פרופ' דניאל זייפמן (לימים נשיא המכון), והציע לקבוצת המחקר להעניק לה את המאיץ והציוד הנלווה, אם תגייס את האמצעים להעברתם לאוניברסיטה תל אביב או לאכסנייה אקדמית אחרת. באותו זמן פרופ' יוסי פנחסי (לימים דיקאן הפקולטה להנדסה של אוניברסיטת אריאל) סיים את עבודת הדוקטורט שלו כסטודנט מצטיין בקבוצת מחקר ה-FEL של פרופ' גובר, והצטרף לסגל המחלקה החדשה להנדסת חשמל במכללת אריאל. פרופ' פנחסי יעץ ליגאל כהן אורגד, אז יו"ר הוועד המנהל של מכללת אריאל, לשקול את העברת המאיץ וה-FEL לאריאל כפרויקט מחקרי בולט שירים את קרנה של המכללה. יגאל התלהב מיד מהאתגר, אף כי היה ברור שהוא גדול בהיקפו מקנה המידה הרגיל של פרויקטי מחקר באוניברסיטאות בכלל, ובמיוחד במכללה חדשה הממוקמת בלב השומרון. לאחר שהתייעץ עם פרופסור יובל נאמן, וקיבל את ברכתו, יגאל פנה לפרופ' חיים הררי, נשיא מכון ווייצמן, וביקש לבדוק את המאיץ בכדי לשקול את קליטתו.

פרופ' גובר מתאר את הדיווח האנקדוטי שסיפר לו יגאל: "באתי לבדוק אישית את המתקן, ומצאתי טנק פלדה גדול המכיל בתוכו הרבה חלקים אלקטרוניים. התברר לי שהמאיץ הוא מתקן ישן מאוד – שימוש ממוחזר של מאיץ יונים שנתרם למכון ווייצמן בשנות החמישים על ידי קנצלר גרמניה קונראד אדנהאואר במסגרת הסכם השילומים. כל מה שהיה ביכולתי לבדוק הוא שאין על הטנק חלודה ולראות שהמתקן עדיין עובד" [11]. פרופ' גובר ממשיך בעדותו: "יגאל היה מנהיג נועז בהחלטותיו, אבל גם איש שמחליט רק לאחר כניסה לעומק הפרטים, הוא חקר אותי שעות ארוכות על עקרונות הפעולה של המאיץ וה-FEL, ועשה זאת גם מתוך עניין וסקרנות אינטלקטואלית בניסיון להבין את העקרונות הפיזיקליים של המאיץ והלייזר ברמה בסיסית. הוא ביקש להבין את ייחודו של ה-FEL

הישראלי ואת החשיבות האקדמית של המחקר והשימושים האפשריים. לאחר שנועץ שוב עם פרופ' נאמן, הוא פנה לראש ות"ת דאז, פרופ' נחמיה לב ציון, וסיפר לו על כוונתו להעביר את המאיץ של מכון ווייצמן לאריאל. לדבריו, פרופ' לב ציון הגיב שיתנגד בכל כוחו לכל מימון אפשרי של מהלך כזה, כי פרויקט מדעי בעל נראות ציבורית בהיקף כזה עלול להכשיר את המכללה בכוונותיה להפוך לאוניברסיטה. דווקא תשובה זאת גרמה להבשלת ההחלטה בליבו של יגאל להמשיך במהלך זה." [11]

ההחלטה של יגאל להגשים את המהלך הנחשוני של העברת המאיץ לאריאל לא הייתה פשוטה כלל. היה ברור כי אין ביכולתה הכספית של המכללה לממן את העברתו המסובכת, את רכישת המערכות הנלוות למאיץ שלא ניתנו להעברה, וכמובן, את החזקתו השוטפת. היה צריך לבנות בניין מיוחד ממוגן קרינה עם קירות בטון בעובי מטר וחצי ואמצעי מיגון ובטיחות שונים, ולמצוא מימון של כחצי מיליון דולר לרכישת ציוד נספח ייעודי ולהשלמת מערכות נלוות שלא היו ניתנות לפירוק מהמכון. הצעד הטכני של פירוק המאיץ והעברתו ללא נזק לאריאל דרך הכפרים הערביים בכביש המתפתל הישן, עוד לפני שנשלל המשכו של כביש 5 בגבעות השומרון, היה אתגר נועז רב סיכונים. בנוסף, היה צורך לשכנע את הצוות הטכני של המאיץ – מומחי המאיצים יז'י סוקולובסקי, מהנדסי המאיץ מיקי קנטר, חיים קליינמן ושוקי וולובלסקי וטכנאים, להסכים לעבור לעבוד במקום שנראה להם אז מעבר להרי החושך, ולהיטלטל בדרכים מבתיהם במרכז הארץ.

כל זה לא היה גורם מרתיע עבור יגאל, כדרכו, הוא פנה להסיר את המכשולים אבן אחר אבן. קונסורציום ה-FEL הפך להיות פרויקט משותף של אוניברסיטה ת"א ומכללת אריאל במסגרת עמותה להקמת "מרכז ידע FEL למקורות קרינה ושימושיהם" בראשות פרופ' גובר וניהול מדעי באריאל של פרופ' יוסי פנחסי. בעקבות הגשת הצעות מחקר משותפות, הועברו באמצעות שני המוסדות תקציבי מחקר לצורך העברת המאיץ ובנייתו מחדש במימון משותף של שלושה משרדי ממשלה: משהב"ט, האנרגיה והמדע בהיקף של 300 אלף דולר. התנהלות תקצוב מתואם כזה של שלושה משרדי ממשלה הייתה אירוע חריג וקשה מבחינת נהלי הממשלה, והתאפשר רק עקב מעורבות אישית של יגאל ומאמצי שכנוע ללא לאות של

השרים ומנכ"ל המשרדים, להקצות תקציבים מיוחדים למטרה זאת. במקביל, יגאל גייס קבלן בניין ערבי מהסביבה להקים את בניין המאיץ על פי תוכניות צוות מדעני המרכז ומגבלות הבטיחות. יגאל נכנס לפרטי הפרטים של הבניה, כולל בדיקה כלכלית וטכנית של חלופות (עופרת או חצץ) לקיר המגן הרחב שנדרש, ושדרש השקעה יקרה של מטר וחצי קירות בטון. מתוך חזון לעתיד, הוא דאג להשאיר שריון ברזל בולט להרחבת הבניין בעתיד על ידי תוספת קומות (ב-2022 נבנית עתה הקומה השנייה במימון הנדבן שלזינגר שאותו גייס יגאל לפרויקט לפני מותו). במקביל הוא הפעיל את כל כוח השכנוע שלו לגייס את צוות המאיץ של מכון ווייצמן לעבור יחד עם המאיץ על מנת להרכיבו ולתפעלו מחדש, דבר שאיש מלבדם לא היה יכול לעשות. יגאל, שמלבד היותו איש חזון, היה איש של אנשים, מצא דרך אל ליבם של אנשי הצוות, סוקולובסקי, קנטר ווולובלסקי, כולם בגיל מתקדם ועם בעיות בריאות, דאג לסידורי תחבורה מיוחדים עבורם, והדביק אותם בהתלהבותו להצליח באתגר המשותף ולהצטרף לצוות באריאל.

כך תיאר זאת פרופ' פנחסי, שבמהלך שנות התשעים של המילניום הקודם סיים את הדוקטורט שלו (בנושא "לייזרים של אלקטרונים חופשיים") באוניברסיטת ת"א בהנחיית פרופ' גובר, החל ללמד במכללה, ונזקק למאיץ החלקיקים למחקרו: "במקביל, מתוך הבנה שללא מחקר מדעי לא תהפוך המכללה האקדמית לאוניברסיטה, תמך יגאל בכל יוזמה להבאת מחקר משמעותי למחלקות האקדמיות הצעירות, אפילו אם מדובר בפרויקטים גדולים, להם נדרשת הקצאה מיוחדת של משאבים, כוח אדם ומכשור מתקדם. כשנתבקשנו לאתר מיקום אליו נוכל להעביר את 'מאיץ האלקטרונים', ששימש אותנו במחקר לייזרים של אלקטרונים, ממכון ווייצמן, פניתי ליגאל ולדן [נשיא המכללה, פרופסור מאירשטיין], שנרתמו והובילו להקמה של המרכז למקורות קרינה ומאיצים קומפקטיים, אשר לימים הוכר כמרכז ידע לאומי, הכולל היום כבר כמה מאיצים" [11].

פרופ' גובר מתאר את מבצע העברת המאיץ בניצוחו של יגאל. אף כי טרם הושלמה בניית הבניין לאכסון מעבדת המאיץ, התבצעה העברת המאיץ ממכון ווייצמן לאריאל ב-2 ליוני 1999 על פי לוח הזמנים של ההתחייבות כלפי המכון. יגאל גייס למטרה זאת את ידידו,

בעלי "אבי מנופים" שביצע את ההעברה בהתנדבות במחיר עלות (איור 6). ההעברה בדרכים מפותלות ופניות חדות, נתקלה בלא מעט קשיים. היה צורך במימון ובגיוס מומחים מיוחדים מחו"ל ומהארץ לצורך מניעת נזק לחלקים רגישים של המאיץ, ולצורך כיוון מחדש של המערכות. היה חשש כבד שטלטלות הדרך, ובעיקר סכנת סדיקה של צינורות ועמודי ההאצה של המאיץ העשויים מקרמיקה וזכוכית, והשארית המאיץ בחוץ (עם כיסוי) תחת תנאי מזג האוויר, ישביתו את פעולת המאיץ וה-FEL. למרות זאת פעולה זאת עברה בהצלחה (איור 7). המאיץ הורכב בחזרה בתוך בניין המאיץ באריאל (איור 8) עם כל הציוד הנלווה החדש שנרכש, תודות למאמצי הצוות והתגייסות המכללה ומשרדי הממשלה למימון הוצאות ההרכבה והתחזוקה. מרכז ה-FEL נחנך ב-7 ליוני 2000 במעמד מכובד וקונצנזואלי (בכוונת מכוון של יגאל) בהשתתפות מתן וילנאי – שר המדע, גיורא שלגי - מנכ"ל רפאל, ד"ר מאיר ויינשטיין - ראש מת"ט/מפא"ת, ד"ר אמנון עינב - המדען הראשי משרד תשתיות לאומיות, עמי ארבל - יו"ר ארגון תעשיות האלקטרוניקה בישראל, פרופ' משה ארנס - יו"ר חבר הנאמנים של מכללת אריאל, פרופ' דן מאירשטיין - נשיא מכללת אריאל, פרופ' יאיר אהרונוביץ - סגן נשיא למחקר ופיתוח של אוניברסיטת ת"א, פרופ' דוד מוכמל – דיקאן הפקולטה לפיזיקה מכון ווייצמן, רון נחמן – ראש עיריית אריאל, פרופ' יובל נאמן - נשיא העמותה לפיתוח מקורות ושימושי קרינה, פרופ' אברהם גובר – ראש קונסורציום ה-FEL (ראה נספח ב'). ה-FEL חזר לפעולה לראשונה ב-5 ספטמבר 2003 והדגים לזירה צרת סרט ורבת הספק שהציגה שיא חדש של קוהרנטיות קרינה, גבוהה בסדר גודל מהשיא שהושג בשלב הקודם במכון ווייצמן [12].

העברת המאיץ לאריאל והאתגר של הפעלתו כ-FEL ושימוש כמרכז לאומי לשימושי קרינה גיבש קבוצה של מדענים, רובם בוגרי אוניברסיטה ת"א מקבוצתו של פרופ' גובר, בהם פרופ' אשר יהלום ופרופ' משה עינת, אשר המשיכו בעקבות פרופ' יוסי פנחסי את ניהול פיתוח ה-FEL באריאל ושימושי הקרינה. מדענים בכירים נוספים (פרופ' בוריס קפילביץ ז"ל ופרופ' וולדימיר ברטמן) שהגיעו ממעבדות מחקר מאיצים מתקדמות ברוסיה, הצטרפו יותר מאוחר לצוות המחקר ולסגל הצעיר של המכללה. לכך הייתה השפעה לחיזוק המעמד

הבינלאומי של ה-FEL הישראלי, להעלאת היוקרה המדעית של מכללת אריאל והמחלקה להנדסת חשמל, ולפיתוח ידע ייחודי ומוקדי הצטיינות בתחומים מדעיים משיקים של אלקטרומגנטיות, תקשורת אלחוטית, גלים מילימטרים, קרינת טרהרץ, מגנטיקה ומקורות מיקרוגל רבי עוצמה (ג'יירוטרונים). במקביל המשיכה קבוצת המחקר בפיתוח תיאורטי וניסויי של קונצפט ה-Superradiant FEL. מתקן ה-Superradiant FEM (איור 4) לזר לראשונה ב-2001 בתחום תדרי מיקרוגל, ושימש בסיס לחקירת קונצפט ה-Superradiant FEL כגרסה חדשנית למקורות קרינה קומפקטיים מבוססי אלקטרונים חופשיים בעולם [8, 13], וכן, בהמשך, לפיתוח ה-THz superradiant FEL באריאל. התרומה של הקבוצה לתחום זה זכתה להוקרת הקהילה הבינלאומית של מדעני ה-FEL, ובשנת 2005 הוענק לפרופסור גובר פרס ה-FEL על תרומתו לנושא (איור 10).

קונסורציום ה-FEL המשיך לפעול במסגרת עמותה שכללה את אונ' ת"א, מכללת אריאל, רפאל וקמ"ג. פרופ' נאמן נאות להמשיך לעמוד בראש וועדת ההיגוי שכללה את נציגי הקבוצות השותפות בקונסורציום (פרופ' אבי גובר – אונ' ת"א, ד"ר יוסי פנחסי – מכללת אריאל, ד"ר יוסי שילה – רפאל, ד"ר אלכס וולף – קמ"ג) ונציגי משרדי הממשלה שתמכו בפרויקט (ד"ר אברהם שטרנליב - בטחון, יוסי ון-זוארן – מדע, פרופ' אמנון עינב - אנרגיה). הקשרים ההדוקים עם מעבדות המחקר הלאומיות ובעיקר עם רפאל סייעו רבות לבניית ה-FEL מחדש באריאל, וכן לחיזוק מעמד הקבוצה כלפי גופי המימון של מחקר מדעי. ב-2001 פנתה וועדת ההיגוי לאקדמיה למדעים בבקשה לבדוק הצעה להקמת מרכז ידע לאומי למקורות קרינה ושימושיהם על בסיס ה-FEL הישראלי. וועדה בראשות פרופ' משה דויטש הוקמה, וערכה באמצעות ד"ר יוסי סגל מהאקדמיה למדעים סקר משתמשים פוטנציאליים בישראל בקרינת ה-FEL. הוועדה המליצה למשרדי הממשלה לאשר הקמת מרכז ידע כזה ולאשר את התוכנית התקציבית שהוגשה (3 מיליון דולר ל-3 שנים). בעקבות המלצה זאת הכיר משרד המדע ב-2004 ב-"מרכז הידע FEL למקורות קרינה ושימושיהם" כמרכז ידע לאומי, אחד מתשעה מרכזי ידע לאומיים שזכו במימון מיוחד לתחזוקת כוח אדם ופיתוח

שימושים. התקציב היה מצומצם בהרבה מהנדרש, אך שלב זה היה חיוני ליוקרת המרכז, ולביסוס מקורות תקציב אחרים עבורו.

הצלחת פרויקט ה-FEL המבוסס על מאיץ אלקטרוסטטי ישן הייתה הישג מרשים שהעניק אשראי מדעי וטכנולוגי לקבוצת המחקר, ועזר לרקום קשרי מדע ולקבל סיוע טכנולוגי ממרכזי מדע בינלאומיים חשובים הפעילים בתחום זה, ביניהם המעבדה לפיזיקה שימושית של האקדמיה למדעים הרוסית בניז'ני נובגורוד, אוניברסיטת מרילנד, אוניברסיטת UCLA והמעבדה הלאומית למאיצים בברוקהייבן, ארה"ב. ההישג, ושיתוף הפעולה ההדוק עם אוניברסיטת תל-אביב, תרמו לשיפור מעמדה של מכללת יהודה ושומרון בקהילה המדעית בישראל. המאיץ וה-FEL היו חלון ראווה להצגת הישגיה האקדמיים של המכללה בפני אורחים מהארץ ומחו"ל, ביניהם שרים רבים וראשי ממשלה (פרס, אולמרט, נתניהו). איור 9 מציג את ביקור שר המדע ראלב מג'אדלה והשר רפי איתן במרכז ב-2009.

איור 6: הוצאת מאיץ הטנדם ממכון ווייצמן על ידי "אבי מנפים".



איור 7: יגאל על רקע המאיץ לאחר העברתו לאריאל, מימינו – גובר וסוקולובסקי, משמאלו – צוות מומחי המאיצים מרומניה.



איור 8: מאיץ הטנדם במשכנו החדש בבניין המאיצים באריאל. הצינור בקצה המאיץ מוליך את קרינת ה-FEL לחדר משתמשי קרינה דרך קיר מגן ברוחב 1.5 מ'. עומד לצד המאיץ מיקי קנטר, מהנדס המאיץ.



איור 9: ביקור שר המדע ראלב מג'אדלה במרכז ה-FEL ב-2009. בתמונה פרופ' דן מאירשטיין – נשיא המכללה, יגאל כהן-אורגד, פרופ' אברהם גובר – ראש המרכז, השר רפי איתן.



איור 10: פרופסור גובר בעת קבלת פרס ה-FEL לשנת 2005 בכינוס ה-FEL הבינלאומי ב-Stanford עבור תרומתו לפיתוח קונצפט FEL Superradiant (שהיווה בהמשך הבסיס לבניית ה-FEL Superradiant THz במרכז המאיצים באריאל). עומדים לצדו John Galayda יו"ר הכנס (מימינו), Alexander Van der Meer יו"ר וועדת הפרס (משמאלו).

<http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/fel2005/index.php>

5. פרויקט THz Super-radiant FEL מבוסס מאיץ RF-LINAC

היה ברור בשלב זה, בתחילת שנת 2006, שבכדי להצעיד את מרכז ה-FEL ואת מדינת ישראל לחזית המחקר העולמית בתחום ה-FEL והמאיצים, יש לפעול להתנעת פאזה חדשה בתוכניות פיתוח המרכז, שתתבסס על מאיצים מודרניים. מאיצים מודרניים מבוססים על קרינת מיקרוגל (RF) במבנה לינארי (RF-LINAC). מאיצים כאלה יכולים להאיץ אלקטרונים לאותה אנרגיה של המאיץ הישן בתוך מבנה קטן עשרות מונים בממדיו. יתרונם הנוסף הוא שניתן לצרף יחידות מאיץ כאלה בצורה מודולרית ולהאיץ לאנרגיות גבוהות מאוד ככל שנוספות יחידות נוספות (כמו במאיצי החלקיקים ב-CERN וב-SLAC). בד בבד עם הצורך המדעי, יגאל הכיר בצורך להציב את מרכז ה-FEL כפרויקט לאומי ברמה אקדמית בינלאומית מוכרת, אשר תשמש כספינת דגל במאמצי המכללה לזכות בהכרה ממשלתית בה כאוניברסיטה (מאמצים שצלחו כעבור שנה ביולי 2007). בעצת פרופ' גובר וצוות ה-FEL, יגאל הציב מטרה חדשה לצוות – ייזום הקמת "מרכז לאומי למאיצים קומפקטיים ומקורות קרינה רבי הספק – FEL שיתבסס על מאיץ RF-LINAC זעיר (אנרגית האצה 6 מיליון אלקטרון-וולט), אנרגיה זאת מספיקה להפעלת FEL בתחום תדרי הטררהרץ (תחום ביניים בין מיקרוגלים לאור נראה שבו נצפו יישומים מדעיים רבים), שיפעל בהספק גבוה במנגנון "קרינת-על" (Super-radiance) החדשני שהומצא על ידי קבוצת המחקר הישראלית. התוכנית ארוכת הטווח הייתה שמאיץ זה ישמש בעתיד בסיס להרחבה לאנרגיות האצה גבוהות יותר, ולפיתוח מאיצים נוספים ומקורות קרינה בכל התחום הספקטרוני עד X-RAY. החלטה לצלוח לשלב פיתוח טכנולוגי חדש זה הצריכה שוב החלטה נחשנית להיכנס להרפתקה לא פחות קשה מההחלטה הראשונה של הכנסת המכללה לתחום מחקר המאיצים. המכשולים הצפויים היו: גיוס תקציבים בהיקפים של מיליוני דולרים לרכישת ציוד ותחזוקת המתקן החדש וצוותו, בניית בונקר בטון חדש ממוגן קרינה לצד בניין המאיץ הקיים, והכשרת וגיוס מדענים בעלי מומחיות בטכנולוגיה המיוחדת של מאיצי RF-LINAC שכמעט לא

הייתה קיימת בארץ באותו זמן. שוב יגאל לא נרתע מפני האתגר ורקם תכנית להשגת היעד של הקמת המרכז החדש. השלב הראשון בקידום הפרויקט היה טכני-מדעי: בחירת טכנולוגיית RF-LINAC מתאימה לכושר הקליטה הראשוני של טכנולוגיה כזאת בישראל, וספק או שותף פיתוח מתאים בחו"ל שסייע לפתח את המאיץ החדשני עבור המרכז הישראלי. בנושא זה שהיה כרוך בהבנה טכנית-מדעית וקשרי מדע, יגאל סמך על שיקול הדעת של צוות הנהלת מרכז ה-FEL, פרופ' גובר, פרופ' פנחסי, ודני חרדון שהצטרף לצוות בתחילת 2005 כמנהל המאיץ (היום - מנהל רשות המחקר של האוניברסיטה). הצוות המדעי ניצב בפני בחירה אסטרטגית של טכנולוגיית מאיצי RF-LINAC שיקדמו את קבוצת המחקר לחזית המחקר הטכנולוגי בעולם בתחום זה ושתוכל להיקלט על ידי הצוות הקיים במשאבי תקציב מוגבלים. השיקול העיקרי היה לבחור בין טכנולוגיה חדשנית של מאיצים סופר-מוליכים שניתן היה לרכוש מחברה מסחרית (AES) ושדרשה קירור קריוגני של המערכות ותחזוקה יקרה, לבין טכנולוגית מאיצים קונבנציונלית שניתן היה לרכוש בפיתוח משותף עם קבוצת המחקר של פרופ' ג'יימי רוזנצווייג ב-UCLA, תוך ניצול קשרי שיתוף הפעולה המדעיים בין קבוצה זאת והקבוצה הישראלית שהתבססו משך השנים הקודמות. יגאל קיבל את המלצת הצוות לתמוך באופציה השנייה משיקולים של הקטנת סיכוני קליטת הטכנולוגיה, ומשיקול חשוב נוסף: הפיתוח המשותף של המאיץ החדש במסגרת אוניברסיטאית ב-UCLA כלל את האפשרות לשתף פוסטדוקים ישראלים שישתתפו בפיתוח ויביאו עמם יחד עם הציוד גם את הידע הטכנולוגי המתקדם הדרוש להפעלתו הנכונה והמשך פיתוחו בארץ. מהלך זה הצליח היטב. יגאל השתתף אישית בפגישות עם פרופ' רוזנצווייג בלוס אנג'לס, ובקסם האישי שלו יצר עמו יחסי אמון והבנה – יחסים הכרחיים בסיטואציה שאינה בנויה על רווח כלכלי, אלא על יחסי שיתוף פעולה מדעי וחברתי. כאשר הסכמי הרכישה ושיתוף הפעולה יצאו לפועל בסוף 2011, שני פוסטדוקים – ד"ר איגור דיונין וד"ר אריאל נעוס – שסיימו דוקטורט באוניברסיטת ת"א בהנחיית פרופ' גובר, השתתפו בפיתוח המאיץ בתקופות עוקבות של שנתיים. יגאל היה מעורב אישית בהבטחת כלכלתם בלוס אנג'לס וקליטתם בצוות המאיץ עם חזרתם. שניהם נקלטו כחברי סגל במחלקות לפיזיקה וחשמל של אוניברסיטת אריאל. עם

הבאת המאיץ לאריאל ביוני 2016 הם היו היחידים שהיו יכולים להתקינו במקום, ולהביאו לפעולה.

המכשול השני עליו היה צורך להתגבר היה מימון הפרויקט. הערכת עלות בניית המאיץ ב-UCLA בתקופה של שלוש שנים הייתה כ-1.5 מיליון דולר. בנוסף, היה צורך בתקציב נוסף למימון הצוות הטכני למספר שנים והוצאות פיתוח מעבדות למשתמשים בקרינה. השגת תקציב זה ללא גיבוי הייתה אתגר לא מבוטל של הרפתקה מרתקת גדושה במהמורות והפתעות. התוכנית של יגאל הייתה לפעול לקבלת אישור תקציבי בהיקף גדול יחסית מועדת תל"מ – ועדה בין-משרדית הכוללת נציגויות של משרדי הממשלה – בטחון, מדע, תעשייה ומסחר, ות"ת והאקדמיה למדעים, המאשרת מימון משותף של פרויקטים לאומיים גדולים. לפני הפניה לגוף זה, הוחלט כשלב מקדים, לפנות למשהב"ט/מפא"ת בבקשה לממן את רכישת המאיץ. מאחר שמפא"ת/מת"ט תמכו בפרויקט ה-FEL באופן רציף ועקבי מתחילת הפרויקט, ומאחר שלמשהב"ט יש משקל נכבד בוועדת תל"מ, האסטרטגיה של יגאל הייתה לערב את מפא"ת בצורה עמוקה בפרויקט החדש, ולהניע אותם להציג את הפרויקט החדש לתל"מ לקבלת תקציב כולל של 5 מיליון דולר עם התחייבות חלקית של משהב"ט בהיקף של 2 מיליון דולר. במאי 2006 הנהלת מרכז ה-FEL – גובר, פנחסי וחרדון, יחד עם יגאל, הציגו לראש מפא"ת תא"ל שמואל קרן בלשכתו, את תוכניות הפיתוח והמודרניזציה של מאיצים ומקורות קרינה בישראל לטווח הקרוב והרחוק ואת תכנית הפיתוח של מרכז ה-FEL הישראלי, וקיבלו ממנו את ברכת הדרך.

בפגישה במת"ט ב-20 אוגוסט 2007, בהשתתפות ד"ר משה גולדברג (ראש מת"ט) וד"ר אברהם שטרנליב ממת"ט, יגאל, גובר, פנחסי ודני חרדון, הותוותה תכנית לרכישת מאיץ RF-LINAC בעזרת משהב"ט, בהמלצת שותפי המחקר המדעי ברפאל (ראה בנספח ג' מכתבו של ד"ר יצחק שניצר ראש מנהלת לוחמת אנרגיה) הוחלט לקדם את הצעת קבוצת ה-FEL. בפגישה יגאל התחייב לפעול בפגישה מתוכננת קרובה עם נשיא האקדמיה למדעים וראש ועדת תל"מ – פרופ' יעקב זיו, ולקבל את אישורו להקמת וועדת בדיקה של הצעה כוללת לתל"מ לפיתוח "מרכז למאיצים קומפקטיים ומקורות קרינה רבי הספק – FEL". בלי

להמתין להבשלת התהליך הממושך של הקמת ועדת הבדיקה ואישור תל"מ, יגאל הזדרז לקדם מיד את הנושא בעזרת משהב"ט. הקשרים ההדוקים שקשר יגאל עם בכירי מפא"ת ומת"ט – תא"ל יעקב נגל, ד"ר יגאל קליין, ד"ר אברהם שטרנליב, וראש מת"ט ד"ר משה גולדברג, הבשילו ביולי 2008 תכנית לרכישת המאיץ על ידי משרד הביטחון באמצעות תקציב הסיוע הביטחוני של ארה"ב לישראל (FMS) על פי תכנית מיוחדת למימון מחקרים בארה"ב לטובת משהב"ט. דא עקא, לאחר התקדמות מה בהגשמת התוכנית, התברר שהסכם הסיוע הביטחוני, מאפשר רק מימון מחקרים בתחומי ארה"ב, אך לא רכישת ציוד מדעי שיועבר לישראל. כאן באה לידי ביטוי התושייה וחכמת המעשה של יגאל. הוא הציע לפצל את הסכם הרכישה עם UCLA לשני הסכמים: הסכם אחד בהיקף של כ-600 אלף דולר יכסה את המחקר והפיתוח ב-UCLA וימומן מכספי FMS, והסכם שני בהיקף של כ-800 אלף דולר יכסה את רכישת הציוד המדעי, וימומן על ידי משהב"ט. במכתב שיגאל שלח לראש מת"ט ב-12 מרץ 2008, התחייב יגאל להחזיר את עלות ההסכם השני למשהב"ט לאחר ביצוע הרכישה (ראה נספח ג'). יגאל שם את יהבו על תקצוב של תל"מ שטרם אושר או נדון כלל. בלהט העשייה שלו, יגאל הקדים נעשה לנשמע ולקח סיכון של התחייבות כספית ללא כיסוי מובטח באותו זמן. הייתה למהלך זה חשיבות עצומה: הוא אפשר לפרויקט לצאת לדרך תוך ניצול ההזדמנות של תקציב FMS ללא עיכובים ארוכים, ובנוסף לכך, רכישת הציוד דרך משהב"ט פישטה בהרבה את התהליך של השגת רישיון ייצוא עבור לייזר רב עוצמה ורכיבים אחרים של מערכת המאיץ. ב-1 מאי 2009 הוגשה הזמנת עבודה ל-UCLA ממשלחת הקניות בארה"ב, ובדצמבר 2011 נחתמו שני החוזים עם המעבדה של פרופ' רוזנצווייג ב-UCLA, ופרויקט בניית המאיץ יצא לדרך.

במקביל, פעלו יגאל וקבוצת ה-FEL לקבלת תמיכה של תל"מ ב- "מרכז לאומי למאיצים קומפקטיים ומקורות קרינה רבי הספק – FEL". באוקטובר 2009 הוגשה הצעה בנושא זה והוקמה על ידי האקדמיה למדעים וועדה להערכת ההצעה שבראשה עמד שנית פרופ' משה דויטש. הוועדה הגישה את המלצותיה ביוני 2010, וועדת תל"מ שהתכנסה לאחר קבלת המלצות ביוני 2010 הגיעה להפתעת הכול להחלטה מאכזבת מאוד. המלצות

הוועדה היו פושרות, בעיקר מאחר שאימצו דעה של אחד המומחים בוועדה שהמסלול העדיף לפיתוח טכנולוגיות מאיצים ו-FEL מתקדמים בארץ הוא דרך טכנולוגיית מאיצים סופר-מוליכים – אותה טכנולוגיה שלאחר בדיקה מדוקדקת, קבוצת ה-FEL פסלה כרבת סיכונים, יקרה ובלתי מתאימה לאפשרויות הקליטה הטכנולוגית באותו זמן. הוועדה הציעה השתתפות צנועה בהמשך פיתוח היוזמה, כתוספת להקצבה הנכבדה של 2 מיליון דולר שהובטחה על ידי משרד הביטחון. עקב כך משך נציג משהב"ט את ההצעה משולחן הדיונים, וקבוצת ה-FEL מצאה את עצמה בפני שוקת שבורה לאחר מאמצים רבים לגיוס התקציב החיוני להשקת הפרויקט רב ההיקף.

לא איש כיגאל יירפו ידיו עקב מהמורה בדרכו, גם אם הייתה זאת מפלה קשה בתוכנית הפעולה של הפרויקט. פרופ' גובר נזכר באמירה אנקדוטית ששמע מיגאל באותו זמן, כשיגאל ניסה לעודד אותו: יגאל סיפר שאימו לימדה אותו בילדותו לטחון בשר במטחנת בשר ידנית (המבוגרים שבינינו עדיין זוכרים את המכשיר). היא הסבירה לו שכשדוחפים את הבשר, צריך גם לסובב את הידית, ולהפך: לדחוף בלי לסובב זה לא עובד, וגם לסובב בלי לדחוף לא יעבוד...".

בעקבות המפלה, יגאל מיהר אל מכריו במפא"ת, אישר שהתחייבותו להשלמת תקציב רכישת המאיץ נותרה בתוקף, וביקש להמשיך במהלך רכישת המאיץ ללא השתתפות תל"מ. בפגישה עם ראש מת"ט ד"ר משה גולדברג וד"ר אורי דאי הוסכם על הקמת ועדה מדעית מצומצמת בראשות פרופ' ניר דוידזון ממכון ווייצמן, על מנת להמליץ אם להמשיך בפרויקט במתכונת מצומצמת. ההכרעה הייתה חיובית, מה שאפשר להשלים את מהלך חתימת ההסכם עם UCLA. יגאל עמד בדיבורו, והעביר למשהב"ט מהאוניברסיטה את תקציב רכישת הציוד כפי שהבטיח. מנהלי המחקר במת"ט שברגיל עסוקים בהעברת תקציבים לאוניברסיטאות במסגרת חוזי מחקר, התבדחו עם צוות ה-FEL: זאת הפעם הראשונה שמהב"ט זכה לקבל העברת תקציב בכיוון הפוך...

נותר אתגר נוסף למימוש פרויקט המאיץ החדש: בניית מבנה הבונקר בצמוד לבניין המאיץ לצורך אכסון המאיץ. כאן בא לעזרתו של יגאל פרופ' טוביה שלדינגר, מומחה מיגון

קרינה וחבר סגל אוניברסיטת אריאל. פרופ' שלזינגר שערך את תכנית מיגון בניין ה-FEL המקורי, והיה גם הוא נלהב למימוש הפרויקט, קישר את יגאל עם בן דודו ארנולד שלזינגר, נדבן יהודי תושב לוס אנג'לס. יגאל יצר קשר אישי עם ארנולד שלזינגר ושכנע אותו לתרום לבניית התוספת לבניין והקמת מעבדת פיתוח מאיצים שתקרא על שם משפחת שלזינגר. בינתיים הצטרף למרכז ולסגל האוניברסיטה ב-2013 פרופ' אהרון פרידמן, גם הוא מראשוני ומהמצטיינים שבתלמידיו של פרופ' גובר. פרידמן חזר לארץ אחרי שהות ארוכה בארה"ב, שבתוכה גם התמחה בתחום המאיצים במעבדות מחקר בחזית התחום המדעי. פרופסור פרידמן התמנה לראש מרכז שלזינגר לפיתוח מאיצים. יחד עם יחיאל ושדי, שהחליף את דני חרדון ב-2012 בתפקיד מנהל מרכז המאיצים וה-FEL, הם פעלו להשלמת פרויקט בניית מאיץ ה-RF-LINAC ב-UCLA וקליטתו באריאל במבנה שנבנה למטרה זאת בצמוד לבניין הישן (ראה איור 11). מרכז שלזינגר למאיצים נחנך ביוני 2017 בנוכחות משפחת שלזינגר וד"ר יובל שטייניץ, שר האנרגיה דאז ועוד אורחים נכבדים שליוו את הפרויקט לאורך השנים.

גם לאחר הצלחת שלב זה יגאל לא שקט על שמריו במאמציו לבסס את אוניברסיטת אריאל כמרכז מחקר מוביל בתחום המאיצים. ליגאל נודע מפרופ' דן מאירשטיין, מי שהיה נשיא האוניברסיטה, כי מאיץ אלקטרונים באוניברסיטה העברית ששימש למחקרים בכימיה קרינתית, התקלקל בשנת 2014 ללא אפשרות תיקון. הוצע למרכז המאיצים לבנות מאיץ חליפי למטרה זאת, שישרת את מחקריו של פרופ' דן מאירשטיין ושל חוקרי פיזיקה גרעינית מקמ"ג ומקומות אחרים. התקציב הנדרש למאיץ חדש היה 10 מיליון ₪, הוגשה בקשה לקרן עיזבונות של האפוטרופוס הכללי, והתקבלה תשובה חיובית על תרומה של 300 אלף ₪ בלבד, בשלב הראשון נראה שאין מה לעשות בסכום כ"כ נמוך, יגאל אמר: "כסף לא מחזירים, מהכסף הזה יהיה מאיץ, תתחילו לחשוב מחוץ לקופסא". ואכן, צוות המאיץ בראשות פרופ' אהרון פרידמן, חיפש ומצא שבית חולים איכילוב מחליף את המאיצים הרפואיים שלו, ותודות למיומנות של המרכז בתחום המאיצים יהיה אפשר להסב מאיץ כזה לצורך ניסויים בכימיה קרינתית בעלות של 1.5 מיליון ₪, התבצעה פניה למשפחת שלזינגר

שהשלימו את היתרה של 300 אלף דולר, כך נרכש המאיץ והותקן ביוני 2015 (ראה איור 12). בהמשך התקבל תקציב מקרן פאזי על סך 1.3 מיליון ש"ח לפיתוח מערך הניסוי המיוחד לכימיה.

העדר תקציב לאומי בהיקף מתאים לפיתוח ארוך טווח של הטכנולוגיות החשובות של מאיצים מודרניים ומקורות קרינה רבי הספק, העיק והקשה על תוכניות הפיתוח של מרכז המאיצים וה-FEL הישראלי. המצב חייב מאמצי גיוס תקציבי מחקר מצומצמים ממקורות מימון מחקר שונים בישראל. בדצמבר 2017 הצליח המרכז לזכות שנית בהכרה כמרכז ידע לאומי של משרד המדע, עם תקציב ייעודי להמשך פיתוח שימושי המאיצים וה-FEL. בראש וועדת ההיגוי עומד שוב פרופ' משה דויטש.

על אף כל המכשולים, חזונו של יגאל להקמת המרכז לפיתוח מאיצים ומקורות קרינה רבי הספק צלח עוד בחייו. מרכז זה, שלהקמתו הקדיש יגאל חלק גדול מזמנו ומרצו משך תקופה של כעשרים שנה (כאשר באותו זמן היה עסוק כמובן במשימות חשובות רבות אחרות), הינו כיום המרכז האקדמי המוביל בארץ בתחום המאיצים וה-FEL, הביא יוקרה בינלאומית רבה לאוניברסיטאות אריאל ותל אביב השותפות במיזם, ותרם תרומה נכבדה לקידום המחקר והמצוינות האקדמית של מכללת אריאל והפיכתה לאוניברסיטה. הבאת מחקר בהיקף כזה למכללה צעירה, עם חברי סגל מעטים ומשאבים מוגבלים, הייתה ללא ספק אבן דרך מכרעת בתולדות המוסד האקדמי המתפתח בלב השומרון, והפיכתו בשנת 2013 לאוניברסיטה השמינית בישראל. כפי שכתב פרופ' טוביה מילוא מאוניברסיטת ת"א, מי שהיה חבר בוועדת הבדיקה להפיכת המרכז האוניברסיטאי (המכללה בגלגול קודם) לאוניברסיטה, בדו"ח שהגיש לוועדה בתחילת 2012: "פרויקט הדגל המחקרי של המרכז הוא עדיין בתחום לייזר האלקטרונים החופשיים. שמחתי לשמוע שמערכת הביטחון בארץ ממשיכה בתמיכתה בפרויקט חשוב זה במימון של כמיליון דולר."

6. עדכון סטטוס מרכז המאצים ופרויקט ה-FEL 2022

השלמת בינוי מרכז המאצים ע"ש שלזינגר

ב-2019 התקבלה תרומה נוספת ממשפחת שלזינגר לתוספת קומה שלישית לבניין מרכז המאצים. הבניין נמצא בכניסה לקריית המדע של אוניברסיטת אריאל, ומלבד תפקודו המדעי, הוא מיועד להציג חזות אסטטית למבקרים בקמפוס המדעי העליון. הוחל בבניה ב-2022 (איור 13) בכוונה להשלים את הבניה ב-2024 (ראה תכנית מבנה באיור 14).

במקביל התקבלה תרומה ממשפחתו של מיקי קנטר להקמת מבואה ומרכז מבקרים ע"ש מיקי קנטר בכניסה לבניין המאצים. תצוגת המרכז תוכננה בשיתוף פעולה עם מוזיאון המדע בירושלים ומיועד להציג למבקרים את עקרונות מדעי הפיזיקה והטכנולוגיה באמצעות דגמים. מערכת ניסוי Free Electron Maser (FEM) של אוניברסיטת ת"א (איור 4) שהועברה לאריאל הוסבה לדגם להסברת עקרונות הפעולה של FEL ו-SUPERRADIANT-FEL (איור 15).

מרכז ה-FEL הישראלי: מקור קרינה סופר-רדיאטיבי לשימושי קרינה בתחום תדרי THz

שבע שנים מהצבת מאיץ אורגד באריאל בשנת 2016 והתקנתו במרכז המאצים באריאל על ידי אגור דיונין ואריאל נעוס, הושלמה בניית מערכת ה-FEL, כולל Magnetic Wiggler שנבנה בבית המלאכה המקומי על ידי המהנדס המכני... ומערכת להובלת הקרינה לחדרי משתמשים. מאמץ הפיתוח נוהל על ידי פרופ' אהרון פרידמן ראש מרכז שלזינגר למאצים ויחיאל ושדי מנהל המרכז והשתתפו בו מדעני המרכז, סטודנטים, מהנדסים וטכנאים רבים.

איור 16 מציג את מערכת המאיץ וה-FEL בבונקר המאיץ באוקטובר 2022. איור 17 מציג את תכנית מערכת הובלת הקרינה שנבנתה לצורך העברת קרינת הטררהץ לחדרי המשתמשים.

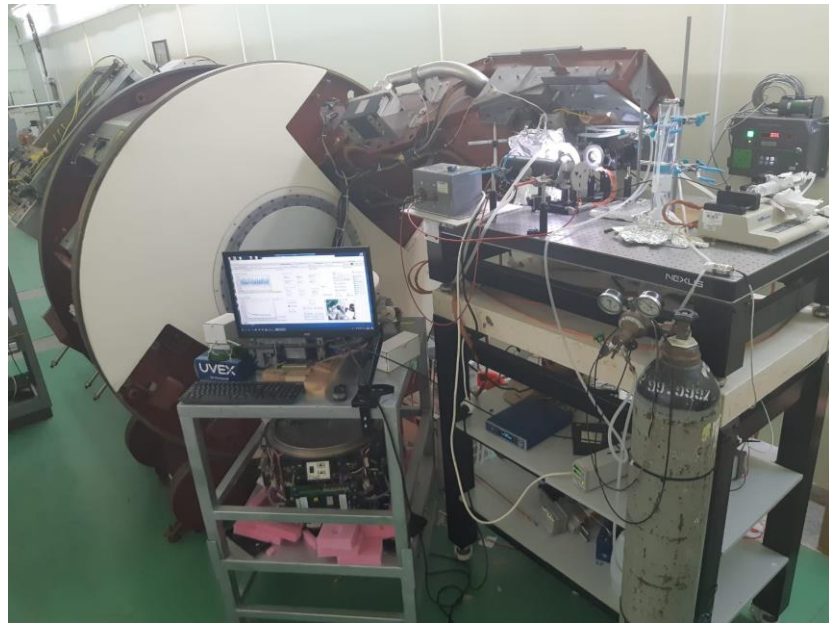
מדידה ראשונה של קרינת THz סופר-רדיאטיבית מה-FEL

המטרה העיקרית של פרויקט ה-THz Superradiant FEL הוסגה ב-31 אוקט' 2022, עשר שנים לאחר תחילתו. איור 18 מראה את אות פולס ה-THz beam הראשון שנוצר בתדר של כ-3 THz על ידי ה-FEL עם מקבץ אלקטרונים מואצים לאנרגיה של 6MeV. זאת הדגמה ראשונה של הפקת קרינה סופר-רדיאטיבית בתחום ה-THz, בהלימה מלאה עם התחזית התיאורטית המוקדמת של קבוצת מחקר ה-FEL [8, 13]. עבודה נמרצת לשיפור עוצמת הקרינה ואפיונה יימשכו מאז תאריך זה. הישג זה צפוי להתקבל בהתלהבות על ידי קהילת ה-FEL בעולם מכיוון שאנרגיות קרינה דומות בתחום ה-THz שנוצרו במעבדות אחרות בעולם ללא שימוש בסכמת ה-"bunched beam superradiance" דרשו מתקנים ומאצים גדולים מאוד ואנרגיות האצת אלקטרונים גבוהה בהרבה.

לאחר שכלול המערכת ושיפור פרמטרי הקרינה, קבוצת ה-FEL מצפה שהמתקן הייחודי שלה ישרת חוקרים משתמשי קרינה רבים מכל תחומי המדע – ביולוגיה, כימיה, חומרים ורפואה.



איור 11: מאיץ אורגד: Optically-pumped RF-Gun Accelerator Device



איור 12: מאיץ לשימושי כימיה קרינתית.



איור 13: קומה שלישית למרכז המאיצים בתרומת משפחת שלזינגר בשלב התחלת בניה 2022.



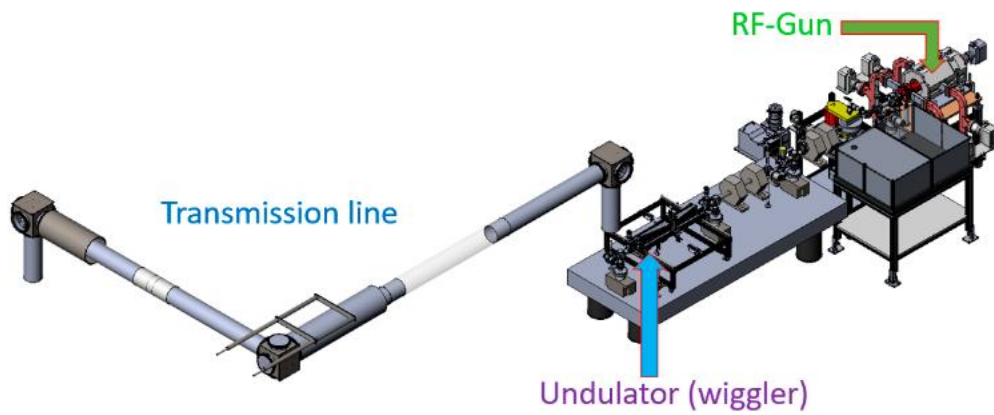
איור 14: המבנה המתוכנן של מרכז המאיצים ומבואת המבקרים. יעד השלמה 2024.



איור 15: דגם דידקטי להסברת עקרונות הפעולה של FEL / SUPERRADIANT-FEL במבואת המבקרים ע"ש מיקי קנטר. הדגם מבוסס על מערכת ניסוי Free Electron Maser (FEM) של אוניברסיטת ת"א (איור 4) שהועברה לאריאל.



איור 16: מתקן Superradiant THz FEL הישראלי אוקטובר 2022. בקטע הרחוק מאיץ
 ,ORGAD, בקטע הקרוב Magnetic Wiggler ומוצא הקרינה. עומדים משמאל לימין: אריאל
 נעוס, אברהם גובר, אהרן פרידמן, יחיאל ושדי.



איור 17: מקור קרינת ה-THz וקו העברת הקרינה מאולם המאיץ לחדרי משתמשים.



איור 18: מדידה ראשונה של קרינת THz סופר-רדיאטיבית ב-31 אוקט' 2022

References

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Strategic_Defense_Initiative
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Free-electron_laser
3. <https://www.ynet.co.il/news/article/h1uh0lsv9>
4. <https://lcls.slac.stanford.edu/>
5. A. Gover, A. Yariv, "Collective and Single Electron Interactions of electron beams with Electromagnetic Waves and Free Electron Lasers" (invited paper) Appl. Physics 16, 121-138 (1978).
6. I. Shraga, C. Leibovitch, S. Eckhouse, Y. Goren, A. Gover, "Doppler Shifted Cyclotron Maser Radiation Pumped by an Asymmetric Undulator", Appl. Phys. Lett. 46, 936-938 (1985).
7. M. Arbel, A. Abramovich, A.L. Eichenbaum, A. Gover, H. Kleinman, Y. Pinhasi, I.M. Yakover, "Super-Radiant and stimulated super-radiant emission in a Pre-Bunched Beam Free Electron Maser", Phys. Rev. Lett., 86, p 2561-2564 (2001).
8. A. Gover, "Superradiant and stimulated superradiant emission in prebunched electron-beam radiators – part I: Formulation", Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams Vol. 8 (030701) (2005).
9. <https://breakingdefense.com/2021/03/israel-seeks-us-help-on-lasers/>
10. A. Abramovich, M. Canter, A. Gover, J.S. Sokolowski, Y.M. Yakover, Y. Pinhasi, I. Schnitzer, J. Shiloh, "High spectral coherence in long pulse and continuous free

electron laser measurements and theoretical limitations”, Phys. Rev. Lett.,82, 5257 (1999).

11. יוסי גולדשטיין, ללא מעצור – סיפור חייו של יגאל כהן-אורגד" הוצאת אוניברסיטה אריאל בשומרון.
12. Socol, Y., Gover, A., Eliran, A., Volshonok, M., Pinhasi, Y., Kapilevich, B., Yahalom, A., Lurie, Y., Kanter, M., Einat, M. and Litvak, B., 2005. Coherence limits and chirp control in long pulse free electron laser oscillator. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 8(8), p.080701.
13. Gover, A., Ianculescu, R., Friedman, A., Emma, C., Sudar, N., Musumeci, P., & Pellegrini, C. (2019). Superradiant and stimulated-superradiant emission of bunched electron beams. *Reviews of Modern Physics*, 91(3), 035003.

נספחים

נספח א': מאמרו של יובל נאמן ושירו של אבא קובנר
נספח ב': חנוכת ה-FEL הראשון באריאל
נספח ג': המלצת רפאל למפא"ת 20.8.2007

הנדסת חשמל
ואלקטרוניקה

שירו של אבא קובנר בעקבות הבנת הלייזר

פרופ' יובל נאמן*

במטה, כבמטה – דומה שפעלנו יחדיו יומם וליל. תחילה היה זה ב"מבצע גייסי" (גבעתי, יפתח, סרגיי) – כש"סרגיי" היה כינויה של חטיבת הנגב של הפלמ"ח; ואחר-כך היו אלה ההכנות למבצע "יואב" והמבצע עצמו, ובעקבותיו המצור על כיס פלוגיה ולבסוף התפניתנו מן הדרום והמעבר ל"חיים שקטים" בשרון, עד לשחרורו של אבא קובנר וחזרתו לקיבוץ.



פרופ' יובל נאמן

הקשרים עם אבא ועם רעייתו ויטקה נמשכו. נעשיתי איש מדע ומצאתי לי דרכים לשמור על הקשר עימו – למשל כאשר רעייתי ואנוכי הבאנו עימנו ידידים מצרפת להכרת הקיבוץ – על-ידי סיור בעין החורש בהדרכת ויטקה או אבא. הקמתי מצפה כוכבים ליד מצפה רמון ואבא ובתו סיירו במתקן והביטו בכוכבים. ביקרנו בתערוכת ציורי בנו, מיכאל. נעשיתי לנשיא אוניברסיטת תל-אביב ובקמפוס נבנה נכס מיוחד לעם היהודי – בית התפוצות. כאן פטר אותנו אבא ממשר ארוך וקיבל על עצמו את תכנון המוזיאון, תכנון שהצליח להפליא. באותם ימים הזדמן אבא קובנר הרבה לקמפוס וקשרינו שגשגו.

באותם ימים שאלני פעם אבא מהו "לייזר". הסברתי את המנגנון הרגיל בו נפלט אור, למשל ממתכת מחוממת, שבאטומיה "מועלים" האלקטרונים למסלולים אנרגטיים יותר ורחוקים יותר מן הגרעין (אילו דובר כאן בכוחות הכבידה, היינו אומרים שהאלקטרונים מועלים למרפסות גבוהות יותר). מדי פעם קופץ לו אלקטרון מטה (כלומר, למסלול פחות אנרגטי) והפרש האנרגיה נפלט בפיטון – קוואנטום של אור. בלייזר, הסברתי, קופצים כל

הידידות שנקשרה בין המשורר אבא קובנר (1918-1987) לביני נולדה והתגבשה בשדות פלשת בקיץ תשי"ח. תחילתה בהערצה שהערצתי "מרחוק", אותו מרחק שהבדיל בין מטה חטיבת "גבעתי" – אליו הצטרף אבא קובנר ערב פלישת צבאות ערב לארץ – לבין גדוד 51, בו שרתתי כסמנ"ד. הזדהיתי לחלוטין עם גישתו, עם הצגתו הבלתי סימטרית לגבי הצדדים הלוחמים. "מוות לפולשים", נרשם בראש הדפים הקרביים של החטיבה אותם ערך. כך הייתה התמונה חדה וברורה והצדיקה את הנשק בו אחזנו ואת הלחיצה על ההדק ככל שהזדמנה מטרה. אנו מגינים על מולדתנו – והם פולשים זרים שאין להם מה לעשות כאן, מלבד לטבוח ולרצוח, כפי שאכן מושר ב"מרסיליז", ההמנון שהפיהו רוח קרב במתגייסים לצבא העם בעת המהפכה הצרפתית וקרא ללוחמים לשפוך את דמו הטמא של הפולש ולהשקות בו את התלמים.

מצפונית, הרבה יותר קל להילחם כך, מאשר בימים אלה, כאשר מדברים על "סיבלם" של הפלסטינים, וכאשר "ההיסטוריונים החדשים" אף מחילים את הגישה הסימטרית על מלחמת תשי"ח ולפתע מסתבר, שאנחנו היינו התוקפן והיינו החוזקים, כנגד כמה ערבים מסכנים. באבא קובנר, אחד מגיבורי מרד גטו וילנה, פעמה אהבת המולדת ההיסטורית, של אותה ארץ-ישראל "שלנו", ועל כך תעדנה למשל, מילותיו של הדף הקרבי שכתב "בין לכיש לבין עזקה באפס דמים".

ביולי 48 הוצבתי למפקדת החטיבה כ"קצין מבצעים ב", כשמאיר דווידזון (מקיבוץ אילון) הוא "קצין מבצעים א". אבא קובנר (חבר קיבוץ עין החורש) היה קצין ההסברה של החטיבה ובראש הפירמידה הפיקודית עמד המח"ט שמשון אבידן (קוד), איש קיבוץ עין השופט. כעבור זמן מה נתווספה משבצת ה"סמח"ט". מאיר דווידזון שובץ בה ואני נעשיתי "א".

* נשיא הלשכה. הדברים נאמרו בנתיחת הכנס להנדסה אלקטרו-אופטית ב-1999.

הנדסת חשמל ואלקטרוניקה

חלקיק של שניה – כי אז היה כדור הארץ זוכה לובנג שהיה מקפוצו היטב.
אבא קובנו הרהר והבין – אך מחשבתו נישאה הלאה. כעבור שנים, ולאחר נטירתו, הודיעתני ויטקה אלמנתו שבעזבונו נמצא שיר שהקדיש לי – והריתו לפניכם, בברכתה האדיבה של ויטקה, ותודתנו נתונה לה.

אלקטרוניס מטה יחד במאורגן (stimulated emission) ומושגת על-כך קרינה מוגברת מאוד – ומכאן השם: laser - light amplification by stimulated emission of radiation. תאר לך, הצעתי, שכל הסינים היו מטפסים על שולחנות ופצים מהם – לא היה קורה דבר. אך אילו הייתה ממשלתם יזרה על קפיצה של כל מאות מיליוני הסינים מהשולחנות באותו

אנוש למחשבה

ליובל נאמן

750 מיליון סינים מקפצים מפלטפורמות בגובה של 2 מטרים סכהגול עשויים לחולל רציחת אדמה מצויה.
750 מיליון סינים מחיכים בקצה קפצו מפלטפורמות קדי 53.8 דקות בקצב גלי הרצש הטבעי: שזורים לפנים מקרום האדמה מביאים בקיצת רגליהם הקטנות שואה גיאופיזית על ארצות רחוקות, על-ידי סלם ריקטר דרגה 6.
מיליון ומחצית המליון ילדים מסיחים אנרופים קטנים והולכים בקתלי אושוויץ. ויש סלם ריקטר והוא לא זע לא נשמע.

מיליון ומחצית המליון פציטות נורקים מפלטפורמות בגובה שני מטרים מדי תנשים ושלש נקודה שמונה דקות קדייק מקקר בקצב גלי הרצש הטבעי: וזורים מתחת לקרום פפת רגלינו האמנם לא נרשמה רצידו שמים בדרגה פלשהי מן סלם יעקב?



אבא קובנו כפרטיזן ב-1944

הנדסת חשמל ואלקטרוניקה

העיתון המקצועי של אגודת מהנדסי חשמל ואלקטרוניקה
גליון 36 • טבת תשס"ב • דצמבר 2001

- מה הקשר בין עמידות פסי צבירה בפני תהודה – ואסון "ורסאי"?
- כיצד חושמלה העיר תל-אביב? (לקראת ערב "התעשייה האלקטרומכנית כחול לבן")
- השפעה הדדית בין קווי חשמל עיליים לבין צינורות תת-קרקעיים

לשכת המהנדסים, האדריכלים והאקדמאים במקצועות הטכנולוגיים בישראל (ע"ר)



העמותה לפיתוח מקורות ושימושי קרינה המכללה האקדמית יהודה ושומרון

מתכבדים להזמיןכם

יום עיון בנושא

לטקס חנוכת

שימושי קרינה עתידים של FREE ELECTRON LASER (F.E.L.)

סדר היום:

09:00 - התכנסות

09:20 מושב א' - ה- F.E.L הישראלי

יו"ר ד"ר יוסי שילה - רפאל

ברכות:

פרופ' דן מאירשטיין, נשיא המכללה האקדמית יהודה ושומרון
פרופ' יובל נאמן, נשיא העמותה לפיתוח מקורות ושימושי קרינה

פרופ' אברהם גובר, אוניברסיטת תל-אביב - פרויקט ה- F.E.L הישראלי

ד"ר יוסי פנחס, המכללה האקדמית יהודה ושומרון - פרמטרים אופיינים לביצועי ה- F.E.L.

11:00 מושב ב' - שימושי קרינה

יו"ר פרופ' גי דויטשר - אוניברסיטת תל-אביב

Dr Michelle Shinn, Laser Processing experiments in the F.E.L. User Facility of
Thomas Jefferson Lab. U.S.A

ד"ר אשר הלום, המכללה האקדמית יהודה ושומרון - התכנית השנתית של מרכז המשתמשים

ד"ר פרדי אורנט, Material Systems - יישומים של F.E.L בחיבור חומרים.

ד"ר אדוואן נולדשטיין, מכון הקרמיקה, מוסד הטכניון למחקר - סינטור קרמיקה של גופים

תלת מימדיים ודו מימדיים באמצעות קרינת גלים מילימטריים

13:00 - ארוחת צהריים

13:30 מושב ג' - שימושי קרינה

יו"ר פרופ' מרדכי בישארי

ד"ר צבי זלוטניק/מר יוני נוימן, E.O.R.D, מוסד הטכניון למחקר - הדמיה בתחום גג"מ גבוה

ד"ר מישה קליימן, המכון הביולוגי בנס ציונה, שיטות אינברסיה לחילוץ התפלגות גדלים

של טיפות בעננים בתחום אורכי גל של F.E.L.

ד"ר ישראל גנות, אוניברסיטת תל-אביב - F.E.L מכשיר פוטונציאלי ברפואה ובביולוגיה

פרופ' דן דוידוב, האוניברסיטה העברית - שימושים בקרינת גלים מ"מ שמקורה ב- F.E.L.

לצורך יישומים ב- Near Field Microscopy

15:00 - טקס חנוכת מעבדת ה- F.E.L.

המעבדה ללייזר אלקטרוני חופשיים

אולם המאיץ ע"ש Manfred Korytowski ז"ל

אורח הכבוד: ח"כ מתן וילנאי, שר המדע התרבות והספורט

בהשתתפות:

פרופ' יאיר אהרונוביץ - סגן נשיא ודיקן למחקר, אוניברסיטת תל-אביב

פרופ' משה ארנס - יו"ר חבר הנאמנים, המכללה האקדמית יהודה ושומרון

פרופ' אברהם גובר - ראש קונסורציום - F.E.L, אוניברסיטת תל-אביב

מר עמי הראל - יו"ר איגוד תעשיות האלקטרוניקה בישראל

ד"ר מאיר ויינשטיין - ראש מת.ט.מפ"ת, משרד הביטחון

פרופ' אליהו ענתבי - נציג משפחת התורמים

פרופ' דן מאירשטיין - נשיא המכללה האקדמית יהודה ושומרון

פרופ' דוד מוכמל - דיקן הפקולטה לפיזיקה, מכון ויצמן

פרופ' יובל נאמן - נשיא העמותה לפיתוח מקורות ושימושי קרינה

מר אמנון עינב - המדען הראשי, המשרד לתשתיות לאומיות

מר רון נחמן - ראש עיריית אריאל

מר גיורא שלגי - מנכ"ל רפאל

הטקס יתקיים בקמפוס המכללה האקדמית יהודה ושומרון באריאל

ביום רביעי, ד' בסיון תש"ס,

7 יוני 2000 בשעה 15:00

הסעות ייצאו מתחנת רכבת צפון, תל-אביב (ליד אל-על) בשעה 13:30.

וליום העיון: בשעות 07:15, 10:45

הסעה מאל-על לרפאל:
13:30 יפה ג' 8765x

20/8/2007

ד"ר משה גולדברג – ר' מת"ט/ מפא"ת
ד"ר אברהם שטרנליב – רמ"ח טכנולוגיות מתקדמות/מת"ט
פרופ' אברהם גובר – מרכז FEL/הנדסת חשמל ואלק'אונ' ת"א

הנדון: קידום מו"פ תשתיתי בנושא Photocathode RF e-Gun

במכתב זה אנו מבקשים לתמוך ביזומה המוצעת ע"י פרופ' אבי גובר וצוותו לפיתוח טכנולוגיה של תותח אלקטרונים מבוסס פוטוקתודה והאצת RF.

כידוע לכם, המוקד שלנו ברפאל מלווה בעניין רב, ואף בשיתוף מדעי, את מחקרי ה-FEL בראשות פרופ' גובר מזה כשני עשורים. קבוצתנו פיתחה את תותח האלקטרונים המקורי במאיץ הנוכחי שהביא לפרסומים משותפים חשובים ולתנופה מחקרית שהעמידה דור חוקרים בתחום הייחודי בו אנו פועלים.

הרעיון למנף את הידע העיוני והנסיוני הרב שנצבר בקבוצת ה-FEL בשני עשורים האחרונים לטובת מקורות FEL קומפקטיים וייחודיים מסוגם נדון ביננו מזה מספר שנים. ההצעה הנוכחית אמורה להתייע את התהליך בעקבות תעוזות (מוצלחות) דומות שהודגמו במרכזים ספורים אחרים בעולם. לכשיוכתר בהצלחה האב-טיפוס הישראלי, נכל לכלול מקורות FEL ברשימה המצומצמת של מקורות קרינה רלוונטיים לשורה של יישומים ביטחוניים.

תותח RF בשילוב קתודה המעוררת מלייזר רב עוצמה ובקצב גבוה מאפשר יצירת פולסי קרינה חזקים (THz, ובעוד תחומים מעניינים), רחבי-סרט, ובקצב גבוה. כל זה, במתקן קומפקטי יחסית לטכנולוגיות אחרות. אופן יצירת קבצי האלקטרונים, הכלאה של מקור RF (קליסטרון לדוגמא) ומקור לייזר פולסי (בהרמוניה) מאפשר מניפולציות רבות בזמן-תדר שלא יושגו בסכימות פשטניות יותר. יכולת כזו צפיה להניב יישומים עתידיים שטרם נהגו.

חשיבות המו"פ המוצע היא גם במגוון ההתמחויות הטכנולוגיות הקשורות בכך: מהודי RF, מקורות RF, האצת RF, לייזרים רבי עוצמה ומכפילי תדר, פולסים קצרים רחבי סרט (דיאגנוסטיקה של...), סימולציות PIC, פליטה ספונטנית, מאולצת (ומה שביניהם), טכנולוגיות ואקום, אינטראקציות קרינה-חומר מהירות, ועוד. כל אלו התמחויות קריטיות לפעילויות רבות במשהב"ט. הדוגמא המרכזית ביותר היא אולי במנהלת לוחמת אנרגיה ברפאל העוסקת ביישומי מיקרוגל רב-עוצמה, הספק בדפקים, פלסמה, לייזרים רבי-עוצמה, ויישומי עימות מוגבל וטרור. אנו משועים לחוקרים בשלים בתחומים אלו.

לאור כל אלו, אבקשכם לשקול בחיוב תמיכה במו"פ התשתיתי להבאת הטכנולוגיה המוצעת לארץ. אנו ברפאל נמשיך במעקב קרוב וקשרי מדע עם הפעילות לעדכון הדדי של יכולות, צרכים, וכו' איכותי.

בברכה,

ד"ר יצחק שניצר
ר' מנהלת לוחמת אנרגיה