

ההיסטוריה של לייזר האלקטרונים החופשיים (FEL) בישראל והקמת המרכז לפיתוח מאיצים זעירים באריאל

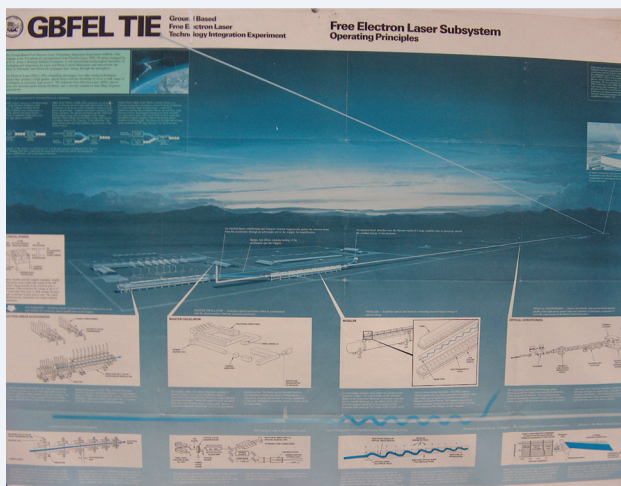
| אברהם גובר |



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



איור 2: איור מושגי של מערכת נשק לייזר של -

SDI (Strategic Defense Initiative)

מבוססת FEL על פלטפורמה קרקעית לייזר טילים בעלי ראש חץ גרעיני מתפצל בעת מעופם בחלל לפני החזירה לאטמוספירה. אלומת הלייזר רבת העוצמה המופקת במוצא ה־FEL משוגרת למרחק של מעל קילומטר כדי שתתרחב ולא תזיק למראת הממסר אשר מכוונת אותה אל מחוץ לאטמוספירה. "מראות לוחמות" בחלל מכוונות את האלומה אל המטרה וממקדות אותה בה

השקת תוכנית SDI והקצאת תקציבי עתק למימושה על ידי ממשלת ארצות הברית, גררה מאמץ מקביל מצד ברית המועצות לשעבר. אף כי התוכנית הייתה בעיקרה תוכנית הגנה, החסינות שיכלה להשיג לצד אחד יכלה לעורר חשש של הצד השני שמאזן האימה הגרעיני יופר. אולם בפועל, אף טכנולוגיית לייזר, גם לא FEL, לא הייתה בשלה אז, והן היו רחוקות מאוד מיכולת לספק עוצמת קרן אור גבוהה דיה כדי לשמש בסיס למערכת נשק אופרטיבית. בסופו של דבר, להשקעה המסיבית של ארצות הברית ובעלות בריתה בתחום זה הייתה משמעות אסטרטגית במאבק הבינ"י במסגרת המלחמה הקרה בין ברית המועצות והמערב. היסטוריונים רבים מייחסים לתחרות זאת השפעה רבה על קריסת ברית המועצות והתפרקות הגוש הסובייטי ב־1991 בשל אי היכולת לעמוד בעלויות הגבוהות של פיתוח מערכת הגנה אסטרטגית מקבילה ל־SDI.

ההשקעות של משרד SDI לפיתוח טכנולוגיות נשק לייזר צומצמו מאוד עם תום תקופת המלחמה הקרה בין הגושים. פיתוח מערכות נשק לייזר מכון נמשך גם היום (בעיקר על בסיס לייזרי מצב מוצק ולייזרי סיבים אופטיים). בישראל, שהייתה שותפה זוטרה בפיתוח נשק הלייזר, בעיקר באמצעות רפאל, נוצר בסיס ידע בתחום זה, והוא הוביל 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 הנכבדות בפיתוח טכנולוגיות לייזר רב עוצמה נשאו פרי בשימושים אזרחיים חשובים. פיתוח טכנולוגיות ה־FEL, ובעיקר שיפור אופייני הפעולה של מאיצים אלקטרוניים, אפשרו לנצל את יתרונו הבסיסי של ה־FEL, שהוא יכולתו לפעול בכל תדר (אורך גל) רצוי (בתלות באנרגיית המאיץ). זה הוביל לפיתוח מקורות קרינה קוהרנטיים ומתכווני תדר בתחומים ספקטראליים שבהם יש קושי למצוא לייזרים קונבנציונליים, בעיקר תחום תדרי טרהרץ (תחום

במונוגרפיה זאת אציג את תולדות פיתוח מחקר ה־FEL בישראל. אתמקד בהקמת מרכז ה־FEL הישראלי המשותף לאוניברסיטאות תל אביב ואריאל והמרכז למאיצים זעירים באריאל.

1. לייזר האלקטרוני החופשיים (Free Electron Laser – FEL)

לייזר האלקטרוני החופשיים (FEL) ידוע כלייזר של "מלחמת הכוכבים" (SDI – Strategic Defense Initiative) של הנשיא רייגן, שהושק ב־1983 בשלהי תקופת המלחמה הקרה^[1], ונועד לספק הגנה מפני מתקפת טילים על ארצות הברית מצד ברית המועצות. ממשלת ארצות הברית הקצתה תקציבי עתק לפיתוח טכנולוגיות שונות של לייזרים רבי עוצמה ושל אסטרטגיות להולכת אלומות לייזר דרך האטמוספירה כדי לפגוע במהירות האור בטיילים בליסטיים נושאי נשק גרעיני, ולהשמידם בשלב מעופם בחלל לפני החזירה לאטמוספירה. טכנולוגיות הלייזרים רבי העוצמה 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 האלקטרוני החופשיים^[2] (FEL). לייזר ה־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 מועמד 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.

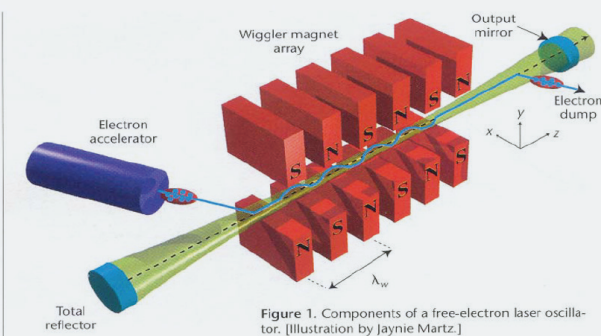


Figure 1. Components of a free-electron laser oscillator. [Illustration by Jaynie Martz.]

איור 1: מבנה סכמתי של לייזר אלקטרוני חופשיים (FEL).

אלומת אלקטרוני מוצאת לאנרגיה גבוהה במאיץ אלקטרוני, מוזרקת אל תוך מבנה מגנטי מחזורי (WIGGLER). כתוצאה מהתנודה הרוחבית של מטען האלקטרוני נפלטת קרינה אלקטרומגנטית (אור). תדר הקרינה גבוה יותר ככל שאנרגיית האלקטרוני גבוהה יותר (ממיקרוגל עד קרני X). האיור מתאר מתנד FEL (laser Oscillator) שהקרינה כולאה בו ומוגברת בין שתי מראות במרבית השימושים הלייזר בנוי בתצורת מגבר (FEL amplifier), שבה אין מראות, ואלומת אור מוזרקת עם אלומת האלקטרוני ויוצאת מוגברת לאחר ה־WIGGLER.

מתאימים ליצירת קרינה קוהרנטית בתחום הנראה, אך מתאימים ליצירת קרינה בתחום הגלים המילימטרים (גמ"מ) שגם לו יש שימושים ביטחוניים. בעזרת קשרים עם מדענים באוניברסיטת קולומביה בארצות הברית (Tom Marshall ו-Perry Schlesinger) התקבלה מאוניברסיטת קולומביה ב־1982 תרומה של מאיץ פולסי בעל אנרגיה של 800 keV. במסגרת שיתוף פעולה בין אוניברסיטת תל אביב 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 תל אביב מתקן FEM (Free electron maser) מבוסס על ספק כוח של 70 keV. 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 קונפלט חדשני של פעולת FEL^[8,7] (Superradiant FEL).

כאשר הושקה תכנית SDI ב־1983, הוקצו תקציבי מחקר בסיסי בתחומי מדע רחבים למעבדות הלאומיות האמריקניות, אך גם לאוניברסיטאות ולמעבדות מחקר מחוץ לארצות הברית. פרופ' גובר זכה לנהל מחקר עבור SDI בנושא FEL על בסיס פלטפורמה קרקעית. הוא ניהל מחקר זה בשנים 1986-1988 בעת ששהה במסגרת שבתון וחל"ת במעבדות Brookhaven National Laboratory ובחברת SAIC. במהלך תקופה זאת הזדמנה לו אפשרות להתוודע אל חזית הידע המדעי והטכנולוגי במעבדות המחקר העיקריות בתחום זה: Los-Alamos National Laboratory (LANL), Lawrence-Livermore National Laboratory (LLNL), ובמרכזי מחקר אחרים. לקראת סוף תקופת שהותו בארה"ב (בשנת 1988) הזדמן לו להיפגש עם פרופ' אדוארד טלר - "אבי פצצת המימן" ויוזם תוכנית SDI. הפגישה ב־Livermore זומנה בהמלצת ידידו פרופ' יובל נאמן ונערכה בהשתתפות ראש תוכנית פיתוח FEL ב־Livermore Dr. Don - Prosnitz.

כוונתו בפגישה, בין השאר, הייתה להשפיע על הנכונות לתמוך במחקר בתחום FEL באוניברסיטאות בישראל. בתקופה זאת כבר היה שיתוף פעולה חשוב של SDI עם רפא"ל, בעיקר בנושא של ליזר כימי (פרויקט נאוטילוס) ומערכות כוונן אלומות ליזר^[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 לוחות" (ראה איור 2). ייתכן שלאסטרטגיית פעולה זאת עשויה להיות רלוונטיות לסיטואציות הגנה בעתיד, גם של מדינה כמו ישראל, לא בהכרח ב־FEL.

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 הכימיה והפיזיקה, מחקר שאפשרי רק הודות לתכונות הספקטרליות הייחודיות של ה־FEL.



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

2. תחילת מחקר ה־FEL בישראל

אברהם גובר, שהצטרף לפקולטה להנדסה באוניברסיטת תל אביב ב־1977, היה אז מחלוצי המחקר של לייזר FEL לאחר שפיתח תיאוריה כוללתית למנגנוני הפעולה הפיזיקליים של הלייזר עם המנחה שלו לדוקטורט ב־CALTECH - אמנון יריב^[5]. על בסיס הקשרים שיצר עם הקהילה המדעית בתחום ה־FEL בארצות הברית, הקים גובר מעבדה ראשונה למחקר FEL באוניברסיטת תל אביב (את"א) ב־1978 בתמיכת משרד המחקר של חיל האוויר האמריקני (AFOSR). במקביל הוא יצר קשר עם מפא"ת/מת"ט (מחלקת פיתוח אמצעי לחימה - תשתיות ותשתיות טכנולוגיות) של משרד הביטחון (ד"ר מאיר וינשטיין וד"ר אברהם שטרנליב) והסביר כי לטכנולוגיות לייזר רב עוצמה בכלל, וללייזר FEL בפרט, צפויים בעתיד שימושים צבאיים למטרות הגנה בתור נשק אנרגיה מכוונת. מפא"ת מינתה ועדת 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 הכיל 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 באוניברסיטת תל אביב, ובהמשך במכון ויצמן ובאוניברסיטת אריאל.

בהיעדר מאיצים זמינים בארץ שיכולים לספק אלומת אלקטרונים באנרגיה גבוהה להזנת FEL, הוחלט להסתפק בשלב ראשון במאיצים זעירים (בעלי אנרגיה פחותה מ־1 MeV) שאינם



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

4. העתקת פרויקט ה-TANDEM-FEL לאריאל

לאחר הצלחת פרויקט בניית ה-FEL, ובעקבות פרישתו של אילן בן צבי ממכון ויצמן, ביקש מכון ויצמן לפנות את שטח מעבדת המאיץ כדי להקים בו מעבדה חדשה בשביל פרופ' דניאל זייפמן (לימים נשיא המכון), והציע לקבוצת המחקר את המאיץ והציוד הנלווה, אם תגייס את האמצעים להעברתם לאוניברסיטת תל אביב או לאכסנייה אקדמית אחרת. באותו זמן פרופ' יוסי פנחסי (לימים דקן הפקולטה להנדסה של אוניברסיטת אריאל) סיים את עבודת הדוקטור 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 מהאתגר מיד, 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, פנה יגאל לפרופ' חיים הררי, נשיא מכון ויצמן, וביקש לבדוק את המאיץ כדי לשקול את קליטתו.

פרופ' גובר מתאר את הדיווח האנקדוטי של 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 ויצמן 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 בפרופ' נאמן, יגאל פנה לראש ות"ת דאז, פרופ' נחמיה לב ציון, וסיפר לו על כוונתו להעביר את המאיץ של מכון ויצמן לאריאל. לדבריו, פרופ' לב ציון אמר שיתנגד בכל כוחו לכל מימון אפשרי של מהלך כזה, כי פרויקט מדעי בעל נראות ציבורית בהיקף כזה עלול להכשיר

3. פרויקט ה-TANDEM-FEL במכון ויצמן

בעידוד מפא"ת ובתמיכת פרופ' יובל נאמן, שהיה אז שר המדע ושר האנרגיה, יזם פרופ' גובר בשנת 1988 עם אילן בן צבי ויזי סוקולובסקי ממכון ויצמן, את המרת מאיץ הטנדרס הישן של מכון ויצמן (מאיץ יונים אלקטרוסטטי) למאיץ אלקטרוניים לצורך הפעלת ה-FEL. ליוזמה הצטרפו עמיתיו באוניברסיטת תל אביב - שלמה רושין ואלי גרבי (כיום פרופסורים באוניברסיטת תל אביב) ומדענים בכירים ממעבדות המחקר הלאומיות (שמעון אקהאוז, יובל כרמל, יוסי שילה מרפא"ל, 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 אוניברסיטת תל אביב. כאיש אשכולות הוא התעניין בכל תחומי המדע (ראה מאמר נדיר שלו בנספח א על תופעת הלזירה והתרשמותו הפואטית של אבא קובנר מהסבריו). לבקשתו, הוא נאות ברצון לעמוד בראש ועדת ההיגוי של הקונסורציום.

מאיץ הטנדרס הוא מתקן שתרם למכון ויצמן בתחילת שנות החמישים קנצלר גרמניה קונראד אדנהאואר במסגרת הסכם השילומים. המתקן עמד ללא שימוש תקופה ארוכה, עד אשר, בשל היוזמה הזאת, אישר המכון ליוזמים להמיר את מאיץ היונים הישן למאיץ אלקטרוניים שמכיל בתוכו FEL ליצירת אלומת קרינה רבת עוצמה. קונסורציום ה-FEL הצליח להדגים פעולת לייזר רב עוצמה ובהיקות בתחום הגלים המילימטריים בחנוכה 1997. דרגת הקוהרנטיות של אלומת הקרינה של הלייזר (רוחב פס התדרים) הציבה שיא עולמי בתחום ה-FEL [10]. התרומה המדעית הייחודית של בניית לייזר אלקטרוניים חופשיים ראשון בישראל, אף כי קטן בעוצמתו ובביצועיו בהשוואה ללייזרי FEL גדולים בהרבה בארצות הברית ובעולם, העניקה לקבוצת ה-FEL הישראלית כרטיס כניסה למועדון המצומצם של מעבדות מחקר לאומיות ביטחוניות ואקדמיות בארצות הברית ובעולם, ואפשרות להחליף ולשאוב ידע מדעי וטכנולוגי לפיתוח תחום מחקר זה בארץ.



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

את המכללה בכוונתה להפוך לאוניברסיטה. דווקא תשובה זאת גרמה להבשלת ההחלטה בליבו של יגאל להמשיך במהלך זה.^[11] ההחלטה של יגאל להגשים את המהלך הנחשני 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 נלווה ייעודי ולהשלמת מערכות נלוות שלא היה אפשר לפרק מהמכון. הצעד הטכני של פירוק המאיץ והעברתו ללא נזק לאריאל דרך הכפרים הערביים בכביש המתפתל הישן, עוד לפני שנסלל המשכו של כביש 5 בגבעות השומרון, היה אתגר נועז ועתיר סיכונים. כמו כן, היה צורך לשכנע את הצוות הטכני של המאיץ - מומחה 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 מבתיים במרכז הארץ. כל אלו לא הרתיעו את יגאל, וכדרכו, הוא פנה להסיר את המכשולים בזה אחר זה. קונסורציום ה־FEL הפך לפרויקט משותף של אוניברסיטת תל אביב ומכללת אריאל במסגרת עמותה להקמת "מרכז ידע FEL למקורות קרינה ושימושיהם" בראשות פרופ' גובר ובניהול מדעי של פרופ' יוסי פנחסי באריאל. הודות להגשת הצעות מחקר משותפות, הועברו באמצעות שני המוסדות תקציבי מחקר לצורך העברת המאיץ ובנייתו מחדש במימון משותף של שלושה משרדי ממשלה - הביטחון, האנרגיה והמדע - בהיקף של 300 אלף דולר. התנהלות תקצוב מתואם כזה של שלושה משרדי ממשלה הייתה אירוע חריג וקשה מבחינת נהלי הממשלה, והתאפשרה רק עקב מעורבות אישית של יגאל ומאמצי שכנוע בלתי נלאים של השרים ומנכ"לי 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 הבנייה, ובכללם 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 הוספת קומות (ב־2022 הוחלט על בניית הקומה השנייה במימון הנדבן שלזינגר שיגאל גייס לפרויקט לפני מותו). במקביל הוא הפעיל את כל כוח השכנוע שלו לגיוס צוות המאיץ של מכון ויצמן למעבר עם המאיץ כדי להרכיבו ולתפעלו מחדש, דבר שאיש מלבדם לא היה יכול לעשות. יגאל, שנוסף על 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 בעבורם, 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 תל אביב 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, שנדרשת להם הקצאה מיוחדת של משאבים, כוח אדם ומכשור מתקדם. כשנתבקשנו לאתר מיקום שאליו נוכל להעביר את 'מאיץ האלקטרונים', ששימש אותנו במחקר לייזרים של אלקטרונים, ממכון ויצמן, פניתי ליגאל ולדן (נשיא המכללה, פרופסור מאירשטיין), שגרתמו 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 ויצמן לאריאל ב־2 ביוני 1999 על פי לוח הזמנים של ההתחייבות כלפי המכון. יגאל גייס למטרה זאת את ידידו, הבעלים של "אבי מנופים" והלה ביצע את ההעברה בהתנדבות במחיר עלות (איור 6). ההעברה בדרכים המפותלות המלאות פניות חדות, נתקלה בלא מעט קשיים. היה צורך במימון ובגיוס מומחים מיוחדים מחו"ל ומהארץ כדי למנוע 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 ומזכוכית, והשאת המאיץ בחוץ (עם כיסוי) בתנאי מזג האוויר, ישביתו את פעולת המאיץ וה־FEL. אך הפעולה 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 ביוני 2000 במעמד מכובד וקונצנזואלי (בכוונת מכון 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 של משרד התשתיות הלאומיות, פרופ' מרדכי בשארי - מנכ"ל משרד המדע, 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 אהרונביץ - סגן נשיא למחקר ופיתוח של אוניברסיטת תל אביב, פרופ' דוד מוכמל - דקן הפקולטה לפיזיקה במכון ויצמן, רון נחמן - ראש עיריית אריאל, פרופ' יובל נאמן - נשיא העמותה לפיתוח מקורות ושימושי קרינה ופרופ' אברהם גובר - ראש קונסורציום ה־FEL (ראה נספח ב). ה־FEL חזר לפעולה לראשונה ב־5 בספטמבר 2003 והדגים לזירה צרת סרט ורבת הספק שהציגה שיא חדש של קוהרנטיות קרינה, גבוהה בסדר גודל מהשיא שהושג בעלב הקודם במכון ויצמן^[12].

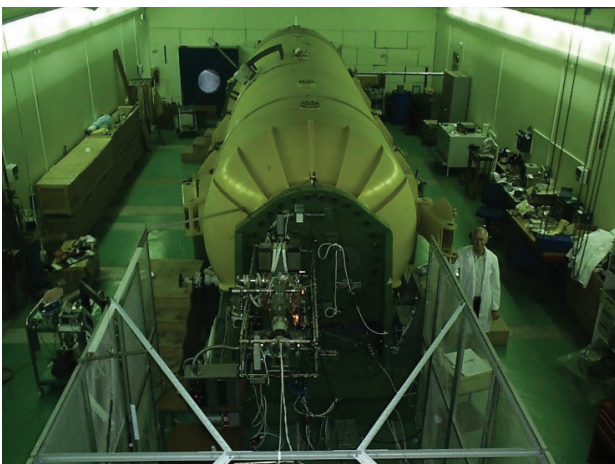
העברת המאיץ לאריאל, אתגר הפעלתו כ־FEL והשימוש בו כמרכז לאומי לשימושי קרינה גיבשו קבוצה של מדענים, רובם בוגרי אוניברסיטת תל אביב מקבוצתו של פרופ' גובר, בהם פרופ' אשר יהלום ופרופ' משה עינת, אשר המשיכו בעקבות פרופ' יוסי פנחסי את ניהול פיתוח ה־FEL באריאל ושימושי הקרינה. מדענים בכירים נוספים (פרופ' בוריס קפילביץ ז"ל ופרופ' ולדימיר ברטמן) שהגיעו ממעבדות מחקר מאיצים מתקדמות ברוסיה, הצטרפו בהמשך לצוות המחקר ולסגל הצעיר של המכללה. הייתה לכך השפעה על חיזוק המעמד הבינלאומי של ה־FEL הישראלי, על העלאת היוקרה המדעית של מכללת אריאל והמחלקה להנדסת חשמל, ועל פיתוח ידע ייחודי ומוקדי הצטיינות בתחומים מדעיים



איור 6: הוצאת מאיץ הטנדס ממכון ויצמן על ידי "אבי מנופים".



איור 7: ינאל על רקע המאיץ לאחר העברתו לאריאל, מימין גובר וסוקולובסקי, משמאל צוות מומחי המאיצים מרומניה.



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

משיקים של אלקטרומגנטיות, תקשורת אלחוטית, גלים מילימטריים, קרינת טרהרץ, מגנטיקה ומקורות מיקרוגל רבי עוצמה (ג'ירטרוניס). במקביל המשיכה קבוצת המחקר בפיתוח תיאורטי וניסויי של קונצפט ה-Superradiant FEL. מתקן ה-Superradiant FEL באוניברסיטת ת"א (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 מדעי ה-FEL, ובשנת 2005 הוענק לפרופסור גובר פרס ה-FEL על תרומתו לנושא (איור 10).

קונסורציום ה-FEL המשיך לפעול במסגרת עמותה שכללה את אוניברסיטת תל אביב, מכללת אריאל, רפאל וקמ"ג. פרופ' נאמן נאות להמשיך לעמוד בראש ועדת ההיגוי שכללה את נציגי הקבוצות השותפות בקונסורציום (פרופ' אבי גובר - אוניברסיטת תל אביב, ד"ר יוסי פנחסי - מכללת אריאל, ד"ר יוסי שילר - רפאל, ד"ר אלכס וולף - קמ"ג) ונציגי משרדי הממשלה שתמכו בפרויקט (ד"ר אברהם שטרנליב - משרד הביטחון, יוסי ון-זוארן וד"ר מרדכי בשארי מנכ"ל משרד המדע, אמנון עינב וד"ר יולי מילשטיין - משרד האנרגיה והתשתיות). הקשרים ההדוקים עם מעבדות המחקר הלאומיות ובעיקר עם רפאל סייעו רבות לבניית ה-FEL מחדש באריאל, וכן לחיזוק מעמד הקבוצה מול גופי המימון של מחקר מדעי. ב-2001 פנתה ועדת ההיגוי לאקדמיה למדעים בבקשה לבדוק הצעה להקמת מרכז ידע לאומי למקורות קרינה ושימושיהם על בסיס ה-FEL הישראלי. הוקמה ועדה בראשות פרופ' משה דויטש, והוועדה ערכה סקר משתמשים פוטנציאליים בקרינת ה-FEL באמצעות ד"ר יוסי סגל מהאקדמיה למדעים. 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 קטן בהרבה מהנדרש, אך היה זה שלב חיוני ליוקרת המרכז, ולביסוס מקורות תקציב אחרים בעבורו.

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 חלקן ראויה להישגיה 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.

ביניים בין מיקרוגלים לאור נראה שבו נצפו יישומים מדעיים רבים), שיפעל בהספק גבוה במנגנון "קרנת-על" (Super-radiance) החדשני שהמציאה קבוצת המחקר הישראלית. התוכנית ארוכת הטווח הייתה שמאיץ זה ישמש בעתיד בסיס להרחבה לאנרגיות האצה גבוהות יותר, ולפיתוח מאיצים נוספים ומקורות קרינה בכל התחום הספקטרי עד X-RAY.

ההחלטה לעלות לשלב פיתוח טכנולוגי חדש זה הצריכה החלטה נחשנית נוספת להיכנס להרפתקה לא פחות קשה מההחלטה הראשונה של הכנסת המכללה לתחום מחקר המאיצים. המכשולים הצפויים היו: גיוס תקציבים בהיקפים של מיליוני דולרים לרכישת ציוד ולתחזוקת המתקן החדש וצוותו, בניית בונקר בטון חדש ממוגן קרינה לצד בניין המאיץ הקיים, וגיוס מדענים בעלי מומחיות בטכנולוגיה המיוחדת של מאיצי RF-LINAC שכמעט לא הייתה קיימת בארץ באותו זמן והכשרתם. גם הפעם לא נרתע יגאל מפני האתגר ורקם תוכנית 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 שיסייע לפתח את המאיץ החדשני לטובת 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. ההתלבטות העיקרית הייתה אם לבחור טכנולוגיה חדשנית של מאיצים סופר-מוליכים שהיה אפשר לרכוש מחברה מסחרית (AES) ושדרשה קירור קריוגני של המערכות ותחזוקה יקרה, או טכנולוגיית מאיצים קונבנציונלית שהיה אפשר לרכוש בפיתוח משותף עם קבוצת המחקר של פרופ' גיימי רוזנצווייג ב-UCLA, תוך ניצול קשרי שיתוף הפעולה המדעיים שהתבססו בין קבוצה זאת והקבוצה הישראלית במהלך השנים הקודמות. יגאל קיבל את המלצת הצוות לתמוך באופציה השנייה משיקולים של הקטנת סיכוני קליטת הטכנולוגיה, ומשיקול חשוב נוסף: בפיתוח המשותף של המאיץ החדש במסגרת אוניברסיטאית ב-UCLA נכללה האפשרות לשתף פוסטדוקים ישראלים שישתתפו בפיתוח ויביאו גם את הידע הטכנולוגי המתקדם הדרוש להפעלתו הנכונה ולהמשך פיתוחו בארץ. מהלך זה נחל הצלחה רבה. יגאל השתתף אישית בפגישות עם פרופ' רוזנצווייג בלוס אנג'לס, ובקסם האישי שלו יצר עימו 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 נעם - שסיימו דוקטורט באוניברסיטת תל אביב בהנחיית פרופ' גובר, השתתפו בפיתוח המאיץ בתקופות עוקבות של שנתיים. יגאל היה מעורב אישית בהבטחת כלכלתם בלוס אנג'לס ובקליטתם בצוות המאיץ עם חזרתם. שניהם נקלטו כחברי סגל במחלקות לפיזיקה ולחשמל של אוניברסיטת אריאל. עם הבאת המאיץ לאריאל ביוני 2016 הם היו היחידים שיכלו



איור 9: ביקור שר המדע ראלב מל'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 על תרומתו לפיתוח קונצפט Superradiant FEL (שהיה בהמשך הבסיס לבניית ה-THz Superradiant FEL במרכז המאיצים באריאל). לימני John Galayda יו"ר הכנס, ולשמאלו Alexander Van der Meer יו"ר ועדת הפרס. <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/fel2005/index.php>

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

בתחילת שנת 2006 היה ברור, שכדי להצעיד את מרכז ה-FEL ואת מדינת ישראל לחזית המחקר העולמית בתחום ה-FEL והמאיצים, יש לפעול להתנעת פאזה חדשה שתתבסס על מאיצים מודרניים בתוכניות פיתוח המרכז. מאיצים מודרניים (קרנת מיקרוגל (RF) במבנה לינארי - Linear Accelerator (RF-LINAC). מאיצים כאלה יכולים להאיץ אלקטרונים לאותה אנרגיה של המאיץ הישן בתוך מבנה קטן עשרות מונים בממדיו. יתרונם הנוסף הוא שאפשר לצרף יחידות מאיץ כאלה בצורה מודולרית ולהאיץ לאנרגיות גבוהות מאוד ככל שמתווספות 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 כאוניברסיטה (מאמצים שצולחו 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 (אנרגיה האצה 6 מיליון אלקטרון-וולט), אנרגיה זאת מספיקה להפעלת FEL בתחום תדרי הטררהץ (תחום

להתקינו במקום, ולהביאו לפעולה.

המכשול השני היה מימון הפרויקט. הערכת עלות בניית המאיץ ב־UCLA בתקופה של שלוש שנים הייתה כ־1.5 מיליון דולר. כמו כן, נדרש תקציב נוסף למימון הצוות הטכני לשנים מספר ולהוצאות פיתוח מעבדות למשתמשים בקרינה. השגת תקציב זה ללא גיבוי הייתה אתגר לא מבוטל והרפתקה מרתקת גדושה במהמורות ובהפתעות. התוכנית של יגאל הייתה לפעול לקבלת אישור תקציבי בהיקף גדול יחסית מוועדת תל"מ - ועדה בין־משרדית הכוללת נציגויות של משרדי הממשלה - ביטחון, מדע, תעשייה ומסחר, ות"ת והאקדמיה למדעים, המאשרת מימון משותף של פרויקטים לאומיים גדולים. לפני הפנייה 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 שלמשרד הביטחון 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 חמישה מיליון דולר עם התחייבות חלקית של משרד הביטחון בהיקף של שני מיליון דולר. במאי 2006 הנהלת מרכז ה־FEL - גובר, פנחסי וחרדון, עם יגאל, הציגו לראש מפא"ת תא"ל שמואל קרן בלשכתו, את תוכנית הפיתוח והמודרניזציה של מאיצים ומקורות קרינה בישראל לטווח הקרוב והרחוק ואת תוכנית הפיתוח של מרכז ה־FEL הישראלי, וקיבלו ממנו את ברכת הדרך.

בפגישה במת"ט ב־20 באוגוסט 2007, בהשתתפות ד"ר משה גולדברג (ראש מת"ט) וד"ר אברהם שטרנליב ממח"ט, יגאל, גובר, פנחסי ודני חרדון, הותוותה תוכנית לרכישת מאיץ RF-LINAC בעזרת משרד הביטחון. 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 התחייב יגאל לפעול בפגישה מתוכננת קרובה עם נשיא האקדמיה למדעים וראש ועדת תל"מ - פרופ' יעקב זיו, ולקבל את אישורו להקמת ועדת בדיקה של הצעה כוללת לתל"מ לפיתוח "מרכז למאיצים קומפקטיים ומקורות קרינה רבי הספק - FEL". יגאל לא המתין להבשלת התהליך הממושך של הקמת ועדת הבדיקה ואישור תל"מ, והזדרז לקדם מייד את הנושא בעזרת משרד הביטחון. 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 לכדי תוכנית לרכישת המאיץ על ידי משרד הביטחון באמצעות תקציב הסיוע הביטחוני של ארצות הברית לישראל (FMS) על פי תוכנית מיוחדת למימון מחקרים בארצות הברית לטובת משרד הביטחון. דא עקא, לאחר התקדמות מה בהגשמת התוכנית, התברר שהסכם הסיוע הביטחוני, מאפשר רק מימון מחקרים בתחומי ארצות הברית, ולא מאפשר רכישת ציוד מדעי שיועבר לישראל. כאן באו לידי ביטוי התושייה וחוכמת 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 ויממן מכספי FMS, והסכם שני בהיקף של כ־800 אלף דולר יכסה את רכישת הציוד המדעי, ויממן על ידי משרד הביטחון. במכתב ששלח יגאל לראש מת"ט ב־12 במרץ 2008, התחייב יגאל להחזיר את עלות ההסכם השני למשרד

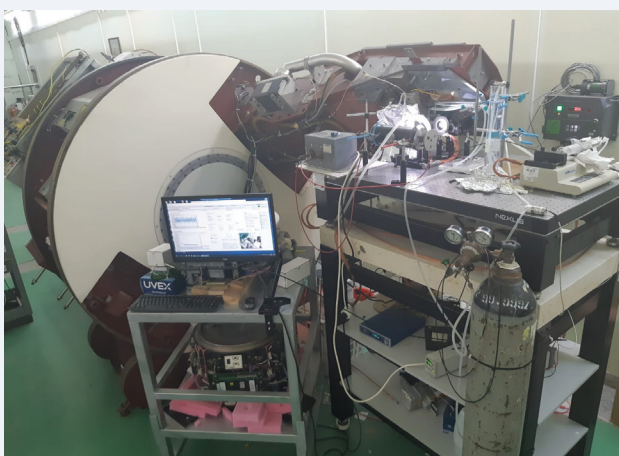
הביטחון לאחר ביצוע הרכישה. יגאל שם את יהבו על תקצוב של תל"מ שטרם אושר או אף נדון. בלהט העשייה שלו, הקדים יגאל נעשה לנשמע והסתכן בהתחייבות כספית ללא כיסוי מובטח באותו זמן. הייתה למהלך הזה חשיבות עצומה: הוא אפשר לפרויקט לצאת לדרך תוך ניצול ההזדמנות של תקציב FMS ללא עיכובים ארוכים, ובנוסף לכך, רכישת הציוד דרך משרד הביטחון פישטה מאוד את התהליך של השגת רישיון ייצוא בעבור לייזר רב עוצמה ורכיבים אחרים של מערכת המאיץ. ב־1 במאי 2009 הוגשה הזמנת עבודה ל־UCLA ממשלחת הקניות בארצות הברית, ובדצמבר 2011 נחתמו שני החוזים עם המעבדה של פרופ' רוזנצווייג ב־UCLA, ופרויקט בניית המאיץ יצא לדרך.

במקביל, פעלו יגאל וקבוצת ה־FEL בות"ת (בסיוע פרופ' אהוד גזית סגן נשיא אוניברסיטת תל אביב) ובמשרדי הממשלה לקבלת תמיכה של תל"מ ב"מרכז לאומי למאיצים קומפקטיים ומקורות קרינה רבי הספק - FEL". באוקטובר 2009 הוגשה הצעה בנושא זה והאקדמיה למדעים הקימה ועדה 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 שלפיה המסלול העדיף לפיתוח טכנולוגיות מאיצים ר־FEL מתקדמים בארץ הוא דרך טכנולוגית מאיצים סופר־מוליכים-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 שני מיליון דולר שהבטיח משרד הביטחון. עקב כך משך נציג משרד הביטחון את ההצעה משולחן הדיונים, וקבוצת ה־FEL מצאה את עצמה בפני שוקת שבורה לאחר מאמצים רבים לגיוס התקציב החיוני להשקת הפרויקט רב ההיקף.

הייתה זאת מפלה קשה בתוכנית הפעולה של הפרויקט, אך יגאל לא אמר נואש. 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 בינינו 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, מיהר יגאל 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 ויצמן, כדי להמליץ אם להמשיך בפרויקט במתכונת מצומצמת. ההכרעה הייתה חיובית, ואפשרה להשלים את מהלך חתימת ההסכם עם UCLA. יגאל עמד בדיבורו, והעביר את תקציב רכישת הציוד מהאוניברסיטה למשרד הביטחון כפי שהבטיח. מנהלי המחקר במת"ט שעסוקים בהעברת תקציבים לאוניברסיטאות במסגרת חוזה מחקר כעניין שבשגרה, התבדחו עם צוות ה־FEL: זאת הפעם הראשונה שמשרד הביטחון זכה לקבל העברת תקציב בכיוון ההפוך...

נותר אתגר נוסף למימוש פרויקט המאיץ החדש: בניית מבנה הבונקר בצמוד לבניין המאיץ לצורך אכסון המאיץ החדש. כאן בא



איור 12: מאיץ לשימושי כימיה קרינתית

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, ולקבל תקציב ייעודי להמשך פיתוח שימושי המאיצים וה-FEL. בראש ועדת ההיגוי עומד שוב פרופ' משה דויטש.

למרות 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 (במקביל למשימות חשובות רבות אחרות), הוא כיום המרכז האקדמי המוביל בארץ בתחום המאיצים וה-FEL, הביא יוקרה בינלאומית רבה לאוניברסיטאות אריאל ותל אביב השותפות במיזם, ותרם תרומה נכבדה לקידום המחקר והמציאות האקדמית של מכללת אריאל והפיכתה לאוניברסיטה.

הבאת מחקר בהיקף כזה למכללה צעירה שבה חברי סגל מעטים ומשאבים מוגבלים, הייתה ללא ספק אכן דרך מרעת בתולדות המוסד האקדמי המתפתח בלב השומרון, והפיכתו בשנת 2013 לאוניברסיטה השמינית בישראל. כפי שכתב פרופ' טוביה מילוא מאוניברסיטת תל אביב, 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 המאיצים ופרויקט ה-FEL 2023

השלמת בינוי מרכז המאיצים על שם שלזינגר

ב־2019 התקבלה תרומה נוספת ממשפחת שלזינגר להוספת קומה שלישית לבינוי מרכז המאיצים. הבינוי נמצא בכניסה לקריית המדע של אוניברסיטת אריאל, ומלבד תפקודו המדעי, הוא מיועד להציג חזות אסתטית למבקרים בקמפוס המדעי העליון. הוחל בבניה ב־2022 (איור 13) בכוונה להשלים את הבנייה ב־2024 (ראה תוכנית מבנה באיור 14).

לעזרתו של יגאל פרופ' טוביה שלזינגר, מומחה מיגון קרינה וחבר סגל אוניברסיטת אריאל. פרופ' שלזינגר שערך את תוכנית 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 ולהקמת מעבדת פיתוח מאיצים שתיקרא על שם משפחת שלזינגר. בינתיים הצטרף למרכז ולסגל האוניברסיטה ב־2013 פרופ' אהרון פרידמן, גם הוא מראשוני תלמידיו של פרופ' גובר ומהממציאים שבהם. פרידמן חזר לארץ אחרי שהות ארוכה בארצות הברית, שבמסגרתה גם התמחה בתחום המאיצים במעבדות מחקר בחזית התחום המדעי. פרופסור פרידמן התמנה לראש מרכז שלזינגר לפיתוח מאיצים. 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 לבינוי הישן (ראה איור 11). מרכז שלזינגר למאיצים נחנך ביוני 2017 בנוכחות משפחת שלזינגר וד"ר יובל שטייניץ, שר האנרגיה דאז, ואורחים נכבדים נוספים שליוו את הפרויקט לאורך השנים.



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

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, שישירת את מחקריו של פרופ' דן מאירשטיין ושל חוקרי פיזיקה גרעינית מקמ"ג וממקומות אחרים. התקציב שנדרש למאיץ חדש היה עשרה מיליון ש"ח, הוגשה בקשה לקרן עיזבונות של האפוטרופוס הכללי, והתקבלה תשובה חיובית על תרומה של 300 אלף ש"ח בלבד, בשלב הראשון נראה שאין מה לעשות בסכום נמוך כל כך, אך יגאל אמר: "כסף לא מחזירים, מהכסף הזה יהיה מאיץ, תתחילו לחשוב מחוץ לקופסה". ואכן, צוות המאיץ בראשות פרופ' אהרון פרידמן, חיפש ומצא שבית החולים 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 ש"ח, התבצעה פנייה 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.

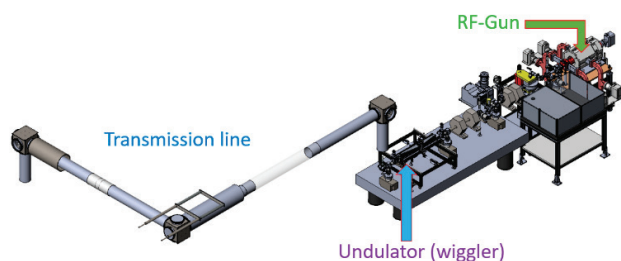
מרכז ה-FEL הישראלי: מקור קרינה סופר-רדאיטיבי לשימושי קרינה בתחום תדרי THz

שבע שנים לאחר הצבת מאיץ אורגד באריאל בשנת 2016 והתקנתו במרכז המאצים באריאל על ידי אגור דיונין ואריאל נעם, הושלמה בניית מערכת ה-FEL, ובכללה Magnetic Wiggler שנבנה בבית המלאכה המקומי על ידי המהנדס המכני ד"ר וולרי דלגץ 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.

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



אורך 16: מתקן ה-Superradiant THz FEL הישראלי, אוקטובר 2022. בקטע הרחוק מאיץ ORGAD, בקטע הקרוב Magnetic Wiggler ומוצא הקרינה. עומדים משמאל לימין: אריאל נעם, אברהם גובר, אהרון פרידמן, יחיאל ושדי

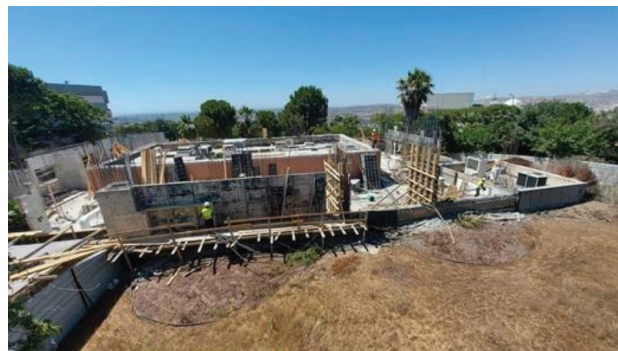


אורך 17: מקור קרינת ה-THz וקו העברת הקרינה מאולם המאיץ לחדרי משתמשים

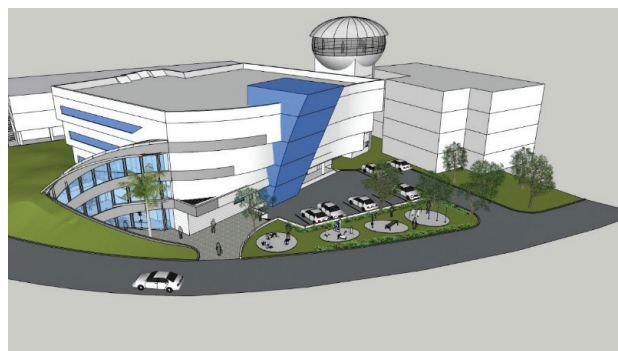


אורך 18: מדידה ראשונה של קרינת THz סופר-רדאיטיבית ב-31 באוקטובר 2022

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



אורך 13: קומה שלישית למרכז המאצים בתרומת משפחת שלזינגר בשלב התחלת הבנייה, 2022



אורך 14: המבנה המתוכנן של מרכז המאצים ומבואת המבקרים, יעד השלמה: 2024



אורך 15: דגם ידיקטי להסברת עקרונות הפעולה של FEL ו-SUPERRADIANT-FEL במבואת המבקרים על שם מיקי קנטר. הדגם מבוסס על מערכת ניסוי Free Electron Maser (FEM) של אוניברסיטת תל אביב שהועברה לאריאל. (אורך 4)

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., Ianconescu, 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

מידה ראשונה של קרינת THz סופר־רדיואטיבית מה־FEL

המטרה העיקרית של פרויקט ה־THz Superradiant FEL הושגה ב־31 באוקטובר 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 6 MeV. זאת הדגמה ראשונה של הפקת קרינה סופר־רדיואטיבית בתחום ה־THz, בהלימה מלאה עם התחזית התיאורטית המוקדמת של קבוצת מחקר ה־13, FEL^[6]. עבודה נמרצת לשיפור עוצמת הקרינה ואפיונה נמשכו 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 ומאיצים 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.

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 התפניתו 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 ממשבר 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 בפוטון – קוואנטום של אור. בלייזר, הסברתי, קופצים כל

הידידות שנקשרה בין המשורר אבא קובנר (1918-1987) לביני נולדה והתגבשה בשדות פלשת בקיץ תש"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 כסמג"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 שהפיח 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 תש"ח ולפתע מסתבר, שאנחנו היינו התוקפן והיינו החזקים, 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".

ביוני '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 בפתיחת הכנס להנדסה אלקטרו-אופטית ב-1999.

הנדסת חשמל וואלקטרוניקה

חלקיק של שניה – כי אז היה כדור הארץ זוכה לזכנג שהיה מקפצו היטב.
אבא קובנר הרהר והבין – אך מחשבתו נישאה הלאה. כעבור שנים, ולאחר וזירתו, הודיעתני ויטקה אלמנתו שבעזבונו נמצא שיר שהקדיש לי – והריהו לפניכם, בברכתה האדיבה של ויטקה, ותודתנו נתונה לה.

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

אנוש למחשבה

ליובל נאמן

750 מליון סינים מקפצים מפלטפורמות בגובה של 2 מטרים סכהגול עשויים לחולל רעידת אדמה מצויה.
750 מליון סינים מחיכים בקקדה יקפצו מפלטפורמות מדי 53.8 דקות בקצב גלי הרעש הטבעי: שוחרמים לפנים מקרומ האדמה מביאים בקריעת רגליהם הקטנות שואה גיאופיזית על ארצות רחוקות, על-ידי סלם ריכטר דרגה 6.
מליון ומתצית המליון גללים מסיחים אגרופים קטנים והולכים בקתלי אושוויץ. ויש סלם ריכטר והוא לא זע לא נשמע.
מליון ומתצית המליון פצוצות גורקים מפלטפורמות בגובה שני מטרים מדי חג שים ושלש בקורה שמוגת דקות בדיוק מבקר בקצב גלי הרעש הטבעי: וורמים מתחת לקרום פפת רגלינו האמנם לא נרשמה רעידת שמים בדרגת כלשהי מן סלם יעקבי?



אבא קובנר כפרטיון 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)

הנדסה

העמותה לפיתוח מקורות ושימושי קרינה המכללה האקדמית יהודה ושומרון

מתכבדים להזמין

יום עיון בנושא

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

סדר היום:

09:00 - התכנסות

09:20 מושב א' - ה-F.E.L. הישראלי

י"ד ד"ר יוסי שילה - רפא"ל

ברכות:

פרופ' ד"ר 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 מנחסי, המכללה האקדמית יהודה ושומרון - פרמטרים אופייניים לביצועי ה-F.E.L.

11:00 מושב ב' - שימושי קרינה

י"ד פרופ' ג' דוויטש - אוניברסיטת תל-אביב

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

י"ד אשר יהלום, המכללה האקדמית יהודה ושומרון - התכנית השנתית של מרכז המשתמשים

י"ד פרדי אורט, Material Systems - שימושים של F.E.L. בחיבור חומרים.

י"ד אדריאן אלדשטיין, מכון הקרמיקה, מוסד הטכניון למחקר - סינטור קרמיקה של גופים חלתי מומדים ודו מימדים באמצעות קרינת גלים מילימטריים

13:00 - ארוחת צהריים

13:30 מושב ג' - שימושי קרינה

י"ד פרופ' מרדכי בישארי

י"ד צבי זלטינסקי/מר יוני ווימן, E.O.R.D. מוסד הטכניון למחקר - הדמיה בתחום גמ"מ גבוה

י"ד משה קליימן, המכון הביולוגי בנס ציונה, שיטות אינברסיה לחילוף התפלות גדלים

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

י"ד ישראל גות, אוניברסיטת תל-אביב - F.E.L. מכשיר פוטוציטלי במופא ובביולווגיה

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

לצורך יישומים ב- Near Field Microscopy

15:00 - עסק תונות מעבדת ה-F.E.L.

לטקס חנוכה

המעבדה ללייזר אלקטרוניים 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 דיקן 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

י"ד מאיר ויינשטיין - ראש מכתב מפא"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 אמונו עינב - המדען הראשי, המשרד לתשתיות לאומיות

מר רון נחמן - ראש עיריית אריאל

מר גיורא שלגי - מנכ"ל רפא"ל

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 לנאמנים וראשי:

8765 x8765

חטיבת מערכות חיסוש
סינהלת הגנה

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 ביוזמה 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 להתניע את התהליך בעקבות תעוזות (מוצלחות) דומות שהודגמו במרכזים ספורים אחרים בעולם. לכשיוכתר בהצלחה האב-טיפוס הישראלי, נוכל 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 צפויה 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 המרוכזת ביותר היא אולי במנהלת לוחמת אנרגיה ברפאל העוסקת ביישומי מיקרוגל רב-עוצמה, הספק בדפקים, פלסמה, לייזרים רבי-עוצמה, ויישומי עימות מוגבל וטרור. אנו משוועים 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, וכ"א איכותי.

בברכה,

ד"ר יצחק שניצר
ר' מנהלת לוחמת אנרגיה