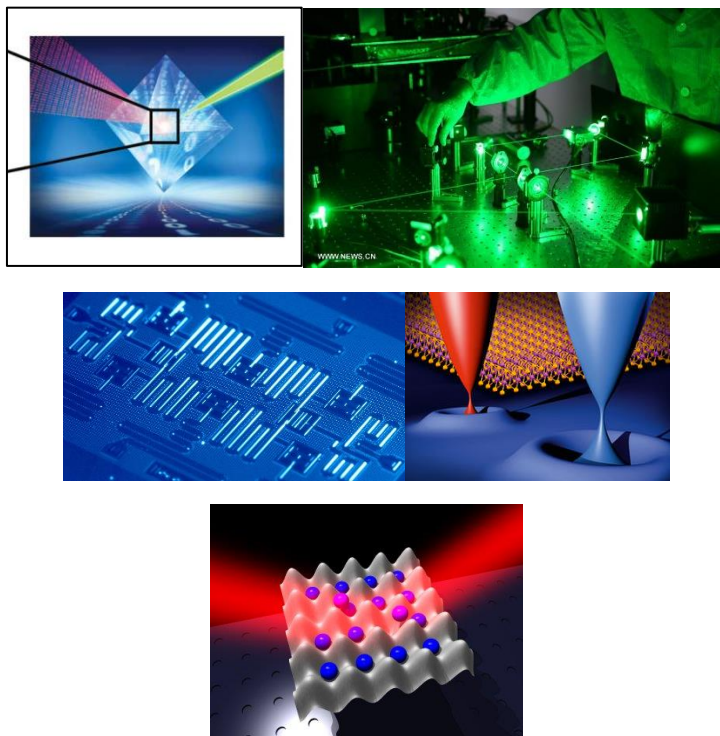


דוח מסכם של ועדת ההיגוי המייעצת לות"ת

לנושא מדע וטכנולוגיה קוונטיים



מוגש למליאת ות"ת

פברואר 2018

דבר פרופ' אורי סיון, יו"ר הוועדה

ברצוני להודות מקרב לב לחברי הוועדה על הזמן והמחשבה שהקדישו לבניית התכנית הלאומית האקדמית במדע וטכנולוגיה קוונטיים. מומחיותם, עומק הדיונים והיקפם הם שהובילו לתוצאה המפורטת מטה.

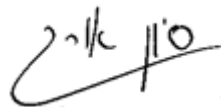
ברצוני להודות לחברי ות"ת ובפרט ליו"ר, פרופ' זילברשץ, על האמון המתמשך שנתנו בוועדה ועל המחויבות למטרה. תודה מיוחדת שלוחה גם למלווי הוועדה מטעם ות"ת: ד"ר ליאת מעוז, גב' נינה אוסטרוב'קו, ומר אמיר גת על מסירותם ותרומתם יוצאת הדופן לאורך הדרך.

"המהפכה הקוונטית השנייה", שהובילה להכרזות ות"ת על מדע וטכנולוגיה קוונטיים כשטח עדיפות בתוכנית החומש שלה, יצאה לדרכה. יעידו על כך תכניות לאומיות ורב לאומיות נרחבות שהוכרזו על ידי רוב המדינות המפותחות והשקעות נרחבות מצד התעשייה. התכנית המוצעת נועדה להניח את התשתית האקדמית הנדרשת להצטרפותה של מדינת ישראל לאותה מהפכה. היא נשענת על מצוינות קיימת ומתווה את הצעדים הנדרשים להרחבה ניכרת בהיקף הפעילות, שיפור יכולות המחקר, והכשרת כוח אדם מיומן שיניע את המהפכה באקדמיה, בתעשייה, ובביטחון.

תכנית אקדמית רחבה היא תנאי למיצוב ישראל בחזית המו"פ העולמי אך מימוש הפוטנציאל הלאומי מחייב גם הרתמות של גופים נוספים האמונים על הנחת התשתיות הנדרשות לפיתוח התעשייה והביטחון. בפגישות שקיימנו במהלך גיבוש התכנית עם גורמים ברשות לחדשנות ובמשרד הביטחון נוכחנו שגופים אלו זיהו זה מכבר את חיוניותם של המדע והטכנולוגיה הקוונטיים למדינת ישראל ואת הצורך בבניית תכנית לאומית משולבת. לפיכך נבנתה התכנית האקדמית מראש עם הממשקים המתאימים לגופים אלו ולגופים אחרים שיצטרפו והמבנה המוצע מניח הקמת תכנית לאומית המשלבת את כלל הגופים.

סוגיית ראשונה לשיתוף פעולה זה היא הקמת קרן מחקר משותפת לות"ת ולמשרד הביטחון. הקמת קרן זו לא הייתה מתאפשרת ללא מחויבותם העמוקה לנושא של ד"ר משה גולדברג, ד"ר נדב כהן, וד"ר טל דוד ממשרד הביטחון ופרופ' בני גייגר וד"ר תמר יפה מיטווך מהקרן הלאומית למדע.

בברכה,



פרופ' אורי סיון

יו"ר ועדת ההיגוי המייעצת לות"ת לנושא מדע וטכנולוגיה קוונטיים

אין ספק כי חוזקה האקדמי-מדעי של ישראל נשען בראש ובראשונה על החוקרים המעולים, אשר פועלים באקדמיה. על מנת לשמר ולהמשיך לפתח עוצמה זו, דרושים מאמצים והשקעות משמעותיות ועקביות ברכישת ושדרוג ציוד מחקרי ובתשתיות מחקר, ביצירת קהילה מדעית תוססת ופעילה, בהידוק שיתופי פעולה בינלאומיים, בשיפור מתמיד של תכניות הכשרה, ובהמשך קליטת חברי סגל אקדמי מהשורה הראשונה. בתכנית החומש הנכחית של ות"ת הושם דגש מיוחד על נושאים אלו, ושורינו לשם כך תקציבים משמעותיים.

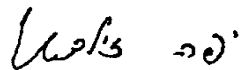
מרבית ההשקעות הן רוחביות, אך במקביל אותר מספר מצומצם של תחומים, אשר בהם פוטנציאל אדיר לקפיצת מדרגה ביכולות המחקריות הישראליות ולהובלה בזירה הבינלאומית; מאידך אלו תחומים אשר אם לא נשקיע בהם כיום, נשאר מאחור במרוץ העולמי. אחד מאלו הינו מדע וטכנולוגיה קוונטיים.

על מנת לבנות תכנית פיתוח אקדמית מקיפה למדע וטכנולוגיה קוונטיים, הקימה ות"ת ועדת היגוי מייעצת המורכבת ממדענים מובילים בתתי-התחומים המדעיים השונים הרלוונטיים. הועדה הוקמה בקיץ 2017, ועבדה באינטנסיביות לקראת הגשת דוח זה. המלצות הוועדה יובאו לדיון בות"ת לצורך קבלת החלטות, ויהיו בסיס להקמת תכנית לאומית לקידום התחום, ולשיתופי פעולה עם משרדי ממשלה אחרים, בפרט דרך פורום תל"ס.

אני, ועימי ות"ת כולה, מברכים את הוועדה על העבודה המאומצת והמקצועית שעשתה, ועל הגשת הדו"ח.

ברצוני להודות ליו"ר הוועדה, פרופ' אורי סיון, שהוביל את העבודה במסירות אין-קץ, בתבונה רבה ובמקצועיות, שידע תמיד לשאת עצה טובה, ושידע לרתום למטרה המשותפת את האוניברסיטאות כולן, כמו גם את שותפינו העתידיים המרכזיים - משרד הבטחון ורשות החדשנות. ברצוני גם להודות מקרב לב לחברי הוועדה, שפעלו במקצועיות וענייניות ראויים לציון, ושתרמו – כל אחת ואחד – מזמנם, ממרצם וממומחיותם לקידום יוזמה חשובה זו.

בברכה,



פרופ' יפה זילברשץ

יו"ר הוועדה לתכנון ותקצוב

תוכן העניינים

עמ'	
6	1. עיקרי הדו"ח
12	2. רקע
12	2.1 רקע ומטרות למינוי הוועדה
12	2.2 המהפכה הקוונטית השנייה
13	2.3 "מדע וטכנולוגיה קוונטיים" – גידור התחום
15	2.4 תכניות לאומיות בעולם
20	3. ישראל – תמונת מצב אקדמית
20	3.1 הפעילות המחקרית וההכשרה במוסדות השונים
20	3.1.1. מרכזי מחקר באוניברסיטאות הישראליות
21	3.1.2. היקף ואיכות המחקר בארץ
21	3.1.2.1 חוקרים ותלמידי קיימים
24	3.1.2.2 היקף, קדימות ואיכות המחקר בהשוואה בינלאומית
25	א. ניתוחים ביבליומטריים
27	ב. ניתוח זכיה במענקי ERC
30	ג. ניתוח H-index
31	3.1.2.3 מסקנות עיקריות
31	3.1.3 חוקרים חדשים – היצע מוערך
33	3.1.4 תכניות הכשרה
35	3.2 התכניות האסטרטגיות במוסדות השונים ל-5 השנים הקרובות
38	3.3 חסמים וחסרים לאומיים
39	3.4 שת"פ עם משרד הביטחון
39	3.5 שת"פ עם התעשייה
40	3.6 ממשק לתכנית הדגל האירופית
42	4. עבודת הוועדה
42	4.1 מינוי הוועדה והמנדט שניתן לה
42	4.2 אופן פעולת הוועדה
43	4.3 רשימת הגופים והאנשים איתם התייעצה הוועדה
46	5. תכנית לאומית אקדמית במדע וטכנולוגיה קוונטיים
46	5.1 חזון
46	5.2 כלים ויעדים מרכזיים למימוש החזון וההשפעה הצפויה בחמש ועשר השנים הקרובות
47	5.3 תיאור התכנית
47	5.3.1 רכיבי התכנית והתקציב הנדרש
48	5.3.1.1 קרן מחקר וציוד אישי
48	5.3.1.2 תמיכה במרכזי מחקר מוסדיים
49	5.3.1.3 פעילות לאומית, ניהול, ועתודה

50	5.3.2 מבנה ניהולי, לוחות זמנים וטווח התכנית
50	5.3.2.1 שותפים פוטנציאליים
50	5.3.2.2 וועדת היגוי לאומית
51	5.3.2.3 הנהלת התכנית
51	5.3.2.4 הוועדה המדעית המייעצת
51	5.3.2.5 מרכזים מוסדיים
51	5.3.2.6 ליווי ובקרת התכנית
52	5.3.2.7 לוחות זמנים
52	5.3.2.8 קיימות מעבר לחמש השנים הראשונות
53	5.4 רוח התכנית ונקודת העבודה בחלוקת המשאבים
53	5.5 מדדים להתקדמות התכנית
57	6. פירוט מרכיבים בתכנית והשפעתם על האקדמיה ומדינת ישראל
57	6.1 הכשרת כח אדם
59	6.2 העצמת הפוטנציאל המחקרי
59	6.3 קשר עם תעשייה ומערכת הביטחון
61	<u>7. נספחים</u>
61	א. חברי הוועדה
62	ב. פירוט לגבי תכניות לאומיות בעולם
71	ג. הערכת ההיצע של חוקרים בתחום ב-5 השנים הקרובות תשע"ח-תשפ"ב
73	ד. השאלון שנשלח לאוניברסיטאות המחקר
76	ה. נתונים לגבי היקף ואיכות המחקר בארץ

רקע

בשנים האחרונות הולכת ומתגבשת בעולם ההבנה כי המחקר הבסיסי והיישומי בתחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים (QST - Quantum Science and Technology) הביאו אותנו לסיפה של "המהפכה הקוונטית השנייה". מדובר במהפכה הטומנת בחובה פוטנציאל עצום לפריצות דרך טכנולוגיות, בעלות יישומים אזרחיים וביטחוניים בתחומי המחשוב, ההצפנה, התקשורת, ההדמיה, ועוד. לפיכך, מדינות רבות בעולם, כמו גם ארגונים בין מדינתיים וחברות בינלאומיות, משקיעות השקעות ענק בקידום התחום מתוך רצון להשתתף ולמצב את עצמן במרוץ ל"עליונות הקוונטית".

הועדה לתכנון ותקצוב (ות"ת) במועצה להשכלה גבוהה, כחלק מהתכנית הרב-שנתית להשכלה הגבוהה לשנים תשע"ז-תשפ"ב, החליטה, לאחר התייעצויות רחבות עם גורמים שונים במערכת האקדמית, לרכז מאמצים בפיתוח תשתיות מחקר גדולות בארבעה מוקדי מחקר משלימים. אחד ממוקדים אלו הינו המדע והטכנולוגיה הקוונטיים. במסגרת זו מונתה וועדת ההיגוי הנוכחית על מנת לגבש תכנית לאומית אקדמית לפיתוח התחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים במערכת ההשכלה הגבוהה בישראל – תכנית המפורטת בדוח זה. להלן עיקרי ממצאי הדוח והתכנית המוצעת בו.

תמונת המצב הנוכחי בארץ

- לפי דיווחי האוניברסיטאות יש היום בארץ 144 חוקרים שליבת מחקרם ב QST, ועוד 56 חוקרים בתחומים נושקים ל-QST. כמחצית מהם פיזיקאים, והשאר מהמחלקות/פקולטות להנדסה, כימיה, מדעי המחשב ומתמטיקה. החוקרים בליבת התחום מנחים 471 תלמידי מחקר (198 למאסטר, 273 לדוקטורט) ו-122 משתלמים לפוסט-דוקטורט.
- מחקר רב נעשה בתחומי החישובים הקוונטיים והחומרים הקוונטיים, ומשמעותית פחות בתחומי החישוב הקוונטי, התקשורת הקוונטית, הסימולטורים הקוונטיים וסביב עקרונות חדשניים של תורת הקוונטים עם השלכות לטכנולוגיה.
- שיעור החוקרים הישראלים המצטיינים בתחומי ה-QST גבוה מאוד בהשוואה למדינות אחרות, ובהשוואה לתחומי מדעים פיזיקליים והנדסה אחרים בארץ. הדבר נכון עוד יותר כשמתמקדים בחוקרים צעירים בתחום.
- מבין החוקרים הישראלים בליבת ה-QST, לחוקר הממוצע תפוקה ואימפקט מדעי גבוהים יחסית; שיעור גבוה יחסית מביניהם (10%-15%) הם חוקרים יוצאי-דופן מבחינת תפוקה ואימפקט מדעי.
- קורסים בתחומי ה-QST ניתנים כחלק מלימודי תארים בפיזיקה או בתארים משולבים של פיזיקה ומקצוע אחר. לגבי תארים בתחומים אחרים התמונה משתנה בין המוסדות, אך ככלל אין היצע מספק של קורסים בתחום, וסטודנטים שאינם לפיזיקה כמעט ואינם נחשפים לתחום – במיוחד בתואר ראשון, אך גם בתארים מתקדמים. גם במחלקות לפיזיקה החשיפה לנושאים כגון חישוב קוונטי או הצפנה ותקשורת קוונטית מוגבלת.
- נכון למועד כתיבת הדו"ח, ב-4 אוניברסיטאות קיימים מרכזי מחקר ייעודיים בתחום של QST - באוניברסיטה העברית, בטכניון, באוניברסיטת בן גוריון, ובאוניברסיטת בר-אילן. בשאר

אוניברסיטאות המחקר קיימים לרוב מרכזי מחקר בתחומים נושקים, ומתוכננים לקום מרכזי QST. המרכזים הקיימים מספקים תשתית לביצוע מחקר, יוצרים מסגרת של קהילת מחקר בין החברים (ולעיתים גם אבן שואבת לקהילה הישראלית כולה בנושא), מעודדים שיתוף ידע ומחקרים משותפים בין החברים, מהווים מסגרת לשיתופי פעולה מחקריים עם מערכת הביטחון או עם תעשייה וכן מסגרת לשיתופי פעולה בינלאומיים במחקר, בתכניות מלגות ובתכניות הכשרה.

תכניות הפיתוח האוניברסיטאיות

כל אוניברסיטאות המחקר בארץ הצהירו על כוונה לפתח את התחום ב-5 השנים הקרובות ואף מעבר לכך. בחלק מהאוניברסיטאות מדובר בתכניות מוסדיות אסטרטגיות אשר גובשו מזה זמן, ובחלקן נראה שפעולות ות"ת והוועדה האיצו את תהליכי החשיבה בנושא. תכניות הפיתוח כוללות גיוס סגל אקדמי חדש בתחום, רכישת ושדרוג תשתיות מחקר גדולות, גיוס סגל טכני בתחום, פיתוח תכניות הכשרה ותמיכה בסטודנטים לתארים מתקדמים וכיו"ב.

חסמים עיקריים לפיתוח התחום באקדמיה

- **מחסור בתלמידי מחקר שימשו כעתודה איכותית לגידול משמעותי במספר חברי הסגל ובחוקרים בתעשייה.** ע"פ ניתוחי הוועדה, ללא צעדי התערבות מיוחדים, צפוי במהלך 5 השנים הבאות גידול של כ-18% (שהם 24 חברי סגל) במספר חברי הסגל הליבתי בתחומי ה-QST (שאינם אמריטי). רובו של גידול זה צפוי להגיע מתחומי ההנדסה. בשאר התחומים הגידול הצפוי הוא קטן או אפסי. הסיבות לכך כוללות: מיעוט חברי סגל, שאינם מפזיקה או הנדסה, ובתחומי מדעי המחשב וההנדסה - גם תחרות עם התעשייה על סטודנטים מצטיינים. הגידול הצפוי במספר חברי הסגל הוא פחות ממחצית תכנית הגיוס של כלל המוסדות (54 חברי סגל חדשים) ולכן פוטנציאל גידול משמעותי טמון בשנים הקרובות במשיכת אנשי סגל ומשתלמים מתחומים משיקים.
- **הכשרה צרה של סטודנטים ומיעוט חשיפה לנושא ה-QST** מחוץ למחלקות לפיזיקה (בעיקר בתואר ראשון אך גם בתארים מתקדמים). הדבר מהווה חסם הן להכשרת כוח אדם מתאים ומעודכן למשק ולביטחון והן לבניית עתודת סגל איכותית בתחום.
- בכלל האוניברסיטאות **תשתיות המחקר חסרות** ויש צורך בשדרוגן ובהקמת תשתיות מחקר מתקדמות.
- **מחסור במשתלמי בתר-דוקטורט בינלאומיים ברמה גבוהה** בדומה למחסור הכללי בארץ במדעי הטבע.
- **רב-תחומיות מוגבלת** ושת"פ מחקרי מצומצם בתוך ובין מוסדות מקשה על ההתמודדות עם אתגרים מורכבים הדורשים קשת מיומנויות וידע.
- **קושי בגיוס סגל טכני איכותי**: בשל מגבלות רגולציה, השכר המוצע לסגל טכני נמוך משמעותית מהשכר המוצע בתעשייה.
- **מעורבות נמוכה של התעשייה**: מספר החברות הישראליות העוסקות בתחום זעום, דבר המוביל למיעוט מימון תעשייתי מצד אחד וקושי בהעברת ידע והכשרה של אנשי תעשייה מצד שני.

- **חיזוק תשתיתי ובר-קיימא של מעמדה, יכולותיה המחקריות ומצוינותה האקדמית של מדינת ישראל בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטים, הן בפן הבסיסי והן בפן היישומי.**
- **הנחת התשתית האקדמית ויסודות שיתוף הפעולה עם הגורמים הממשלתיים והתעשייה להבטחת שגשוגה הכלכלי וביטחונה של מדינת ישראל בתחומים הנשענים על מדע וטכנולוגיה קוונטיים.**

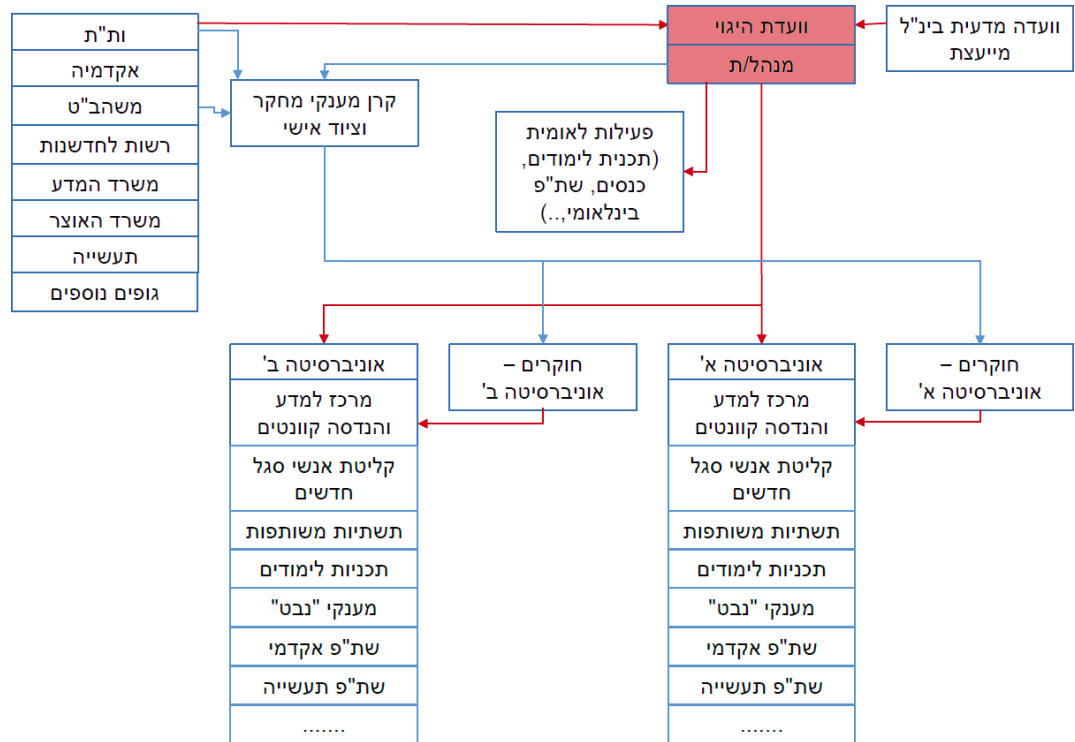
לפיתוח התחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים חשיבות עליונה למדינת ישראל. לפיכך יש לראות בתוכנית האקדמית שלב ראשון והכרחי בפיתוח תכנית לאומית מקיפה בשיתוף עם הרשות לחדשנות ומשרד הכלכלה, מערכת הביטחון, משרד האוצר והתעשייה הרלבנטית. מהצד האקדמי – מדעי ניתן לצפות גם לשותפות עם משרד המדע ועם האקדמיה הלאומית למדעים. כמו כן יתכן שמשרדי ממשלה נוספים ימצאו עניין בשותפות כולל משרד רו"מ ומערך הסייבר הלאומי, משרד התקשורת ואחרים.

לפיכך מאמינה הוועדה שהתכנית הלאומית האקדמית צריכה להבנות מראש כרגל מרכזית ונחשונת בתוכנית לאומית רחבה הכוללת את כל בעלי העניין. פירוט לגבי העניין האפשרי של כל אחד מהשותפים והחיבור לתכנית רוחבית לאומית מופיע בפרק 6 לדו"ח. התכנית אותה מציעה הוועדה בנויה כך שניתן לפתוח במימושה המיידי, כשלב ראשון לקראת הרחבתה מתחומי האקדמיה למישור הלאומי הכולל. הוועדה ממליצה על מימוש מידי כזה, לאור התחרות העולמית המתעצמת בתחום.

בהתאם לחזון גובשה תכנית פיתוח אקדמית, המניחה במקביל את התשתית להרחבת התכנית לתכנית לאומית כוללת המשלבת תעשייה, ביטחון ואקדמיה. מתוך החזון נגזרו היעדים המרכזיים לתכנית:

1. **עיבוי וחיזוק הקהילה המדעית** העוסקת במחקר אקדמי בסיסי ויישומי, בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטיים. הרחבת הקהילה באמצעות גיוס חברי סגל חדשים, משיכת חברי סגל מתחומים אחרים, הגדלת מספר המשתלמים לתארים גבוהים ולבטר-דוקטורט.
2. **העמדת התשתית המחקרית** הנדרשת לרשות החוקרים באוניברסיטאות המחקר ובתעשייה והעמדת משאבים נדרשים לביצוע מחקרים העומדים בדרישות תחרותיות של חדשנות ומצוינות.
3. **הרחבת ההכשרה** בנושאי מדע וטכנולוגיה קוונטיים, התאמת תכניות הלימודים וקידום תכניות הכשרה בין-תחומיות לסטודנטים ולחוקרים צעירים על מנת להכשיר כוח אדם מיומן למשק ולאקדמיה. בפרט, הרחבת בסיס הסטודנטים הלומדים בתחום מחוץ למחלקות לפיזיקה אל מחלקות ההנדסה ומדעי המחשב.
4. **העמדת התשתית האקדמית הנדרשת לפיתוח תעשייה ולביסוס ביטחונה של מדינת ישראל. פיתוח הממשקים של האקדמיה עם התעשייה ומערכת הביטחון:** שיתוף בתשתיות מחקר, קידום שתופי פעולה, יצירה והעברת ידע, תמרוץ השקעות חיצוניות במחקר אקדמי בתחום, עידוד מעבר של אנשים, חדשנות ורעיונות בין הסקטורים.
5. **יצירת קהילה ישראלית ע"י עידוד שתופי פעולה אקדמיים בין-תחומיים** על מנת לקדם פריצות דרך משמעותיות בתחום ושת"פ עם התעשייה ומערכת הביטחון.

להלן המבנה הניהולי המוצע של התכנית הלאומית האקדמית:



מוצע שהתכנית תנוהל על ידי וועדת היגוי לאומית שתשמש כ Board שהרכבו יכלול בנוסף לראש/ת הוועדה, מומחים אקדמיים בתחום, נציגי ות"ת ונציגי האקדמיה הלאומית למדעים, וכן נציגים של שאר הגופים הממשלתיים / תעשייה, שיתרמו סכום כסף משמעותי למימוש התוכנית. כמו כן לתכנית ימונה צוות ניהולי מצומצם בראשות ראש/ת וועדת ההיגוי שיהיה/תהיה איש/אשת אקדמיה בכיר/ה ומנהל/ת מקצועית. וועדת ההיגוי תיעזר בוועדה מדעית בינ"ל מייעצת לשם התוויית דרכה ובקרה על ביצוע התוכנית. קידום הפעילות האקדמית הלאומית יתבצע בשלושת הערוצים המתוארים להלן ובערוצים אחרים שיוקמו במידת הצורך.

עיקרי התכנית האקדמית

על מנת להשיג יעדים אלו גיבשה הוועדה תכנית פיתוח אקדמית המתמקדת בשלושה ערוצים עיקריים. התקציב הכולל הנדרש למימושה מוערך ב-600 מלש"ח ל-5 שנים ע"פ הפירוט הבא:

סכום מוערך ל-5 שנים		מטרה / שימושים	ערוץ
סה"כ: 75 מלש"ח	50 מלש"ח	דרך ה-ISF: מימון מחקרים	(א) קרן מחקר וציוד אישי (תכנית משותפת ות"ת-מפא"ת)
	25 מלש"ח	דרך ה-ISF: רכישת ציוד ייעודי למעבדות החוקרים הזוכים	
	25 מלש"ח	קרן מחקרים בניהול מפא"ת	
	120 מלש"ח	קליטת סגל חדש והקמת מעבדות עבורם	(ב) תמיכה במרכזי מחקר מוסדיים
	200 מלש"ח	רכישת ושדרוג ציוד תשתיתי	

סה"כ: 420 מלש"ח	70 מלש"ח	כוח-אדם טכני	
	30 מלש"ח	פיתוח תכניות לימודים, מלגות ושימושים אחרים	
סה"כ: 80 מלש"ח		• פלטפורמות לאומיות לפיתוח היבטים מדעיים-טכנולוגיים • הגדלת מספר משתלמי הבתר-דוקטורט המצטיינים הבינלאומיים שיגיעו לישראל • הכשרת תלמידי מחקר מדיסציפלינות שונות ב-QST • תכניות לאומיות בשיתוף התעשייה • עריכת כנסים בינ"ל • שת"פ בינלאומיים • בניית בסיס נתונים מתעדכן של מדדי התכנית • בניית בסיס נתונים הממפה את החוקרים הישראלים הנמצאים בחו"ל ועוסקים ב-QST	(ג) פעילות לאומית, ניהול ועתודה

א. קרן מחקר וציוד אישי: לצורך עידוד המחקר האקדמי ומשיכת חוקרים מצוינים מתחומים משיקים למחקר בתחומי ה-QST, מוקמת בימים אלו קרן מחקר ייעודית בהיקף של 100 מלש"ח שיפרשו על פני חמש השנים הקרובות. הקרן מוקמת במשותף ובתרומה שווה של ות"ת ומפא"ת 75 מלש"ח ינוהלו כתוכנית ייעודית במסגרת הקרן הלאומית למדע ו-25 מלש"ח ינוהלו על ידי מפא"ת. קרן המחקר בניהול הקרן הלאומית למדע תממן מחקרים ורכישת ציוד ייעודי למעבדות החוקרים על בסיס תחרותי. הקרן תהיה פתוחה לכלל החוקרים באוניברסיטאות המחקר ותאפשר הגשת הצעות משותפות של 1-5 קבוצות מחקר. בשיפוט ההצעות יינתן יתרון מסוים להגשה משותפת של מספר קבוצות מחקר מדיסציפלינות שונות, וזאת בהתאמה ליעדי התכנית. הקרן תתמוך במחקרים שימשכו 3 שנים עם אפשרות הארכה לשנתיים נוספות.

הסכום שהוקצב לתכנית הייעודית במסגרת הקרן הלאומית למדע, 75 מלש"ח על-פני חמש שנים, נקבע מתוך כוונה לשמור על אחוזי זכייה של כ-30% כמקובל בקרן, ובכך לשמור על רף המצוינות של הזוכים במענקים.

ב. תמיכה במרכזי מחקר מוסדיים: חלק הארי של המשאבים יופנה לפיתוח מרכזים באוניברסיטאות השונות (קיימים או כאלו שיוקמו). ערוץ זה מיועד לתמוך בקליטת אנשי סגל חדשים והקמת מעבדות עבורם, בעידוד השתלבות חוקרים מתחומים אחרים במחקר במדע וטכנולוגיה קוונטיים; בהקמה ושדרוג תשתיות מחקר שישרתו את כלל החוקרים והתעשייה במדינת ישראל; בפיתוח תכניות הכשרה והשתלמות בשיתוף התעשייה ועוד. התמיכה במרכזים האוניברסיטאיים תינתן על בסיס שיפוט תחרותי של הצעות מוסדיות שתוגשנה.

ג. פעילות לאומית, ניהול, ועתודה: ערוץ זה נועד לענות על צרכים לאומיים המשותפים לכלל החוקרים והמוסדות. בין סעיפים אלו נמנים:

- (1) הקמת פלטפורמות לאומיות שיאפשרו מחקר ופיתוח בתחומים כמו תקשורת קוונטית, חיישנים, ועוד.
- (2) הגדלת מספר משתלמי הבתר-דוקטורט המצטיינים הבינלאומיים שיגיעו לישראל – ע"י הקמת תכנית מלגות יוקרתית ייעודית ופתיחת מרכז ארצי למבקרים בינלאומיים לטווח קצר.
- (3) מתן מענה הולם להכשרת תלמידי מחקר מדיסציפלינות שונות בתחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים – בפרט הקמת תכנית לאומית אשר תציע לסטודנטים לתארים מתקדמים מכל הארץ קורסים ייעודיים לתואר שני/דוקטורט בתחומי ה-QST – כאלו שאין בנמצא בדרך כלל בכל מוסד בפני עצמו. קורסים כאלו ירוכזו ביום אחד בשבוע על-פני שנה אחת.
- (4) תכניות לאומיות בשיתוף התעשייה ובפרט הקמת קרן תמיכה שתסייע לחוקרים מהתעשייה להשתלב במחקר אקדמי.
- (5) עריכת כנסים בינ"ל.
- (6) שת"פ עם תכניות לאומיות של מדינות אחרות ועם תכנית הדגל האירופית
- (7) בניית בסיס נתונים מתעדכן של מדדי ההצלחה לתכנית.
- (8) בניית בסיס נתונים הממפה את החוקרים הישראלים הנמצאים בחו"ל ועוסקים במדע וטכנולוגיה קוונטיים.

סיכום

המהפכה הקוונטית השנייה יצאה לדרכה והיא טומנת בחובה סיכויים למצטרפים וסיכונים למתעכבים. המערכת האקדמית ניצבת בנקודת פתיחה טובה מבחינת רמת המחקר והחוקרים, אך עם חסרים משמעותיים. אי מילוי חסרים אלו עלול להקרין על ההישגים האקדמיים העתידיים, וחשוב מכך, על יכולתה של מדינת ישראל להתמודד עם האתגרים הכלכליים והביטחוניים שמציבה המהפכה ולהנות מהיתרונות הצפויים למשתתפיה. הדו"ח הנוכחי מנתח את הפעילות האקדמית הקיימת, מאתר את צווארי הבקבוק ומתווה את המרכיב האקדמי של תכנית לאומית המיועדת לאפשר למדינת ישראל השתלבות באותה מהפכה, הן באמצעות עיבוי ושיפור המחקר והן באמצעות הכשרת כוח אדם מיומן ופיתוח טכנולוגיות שיזינו את התעשייה. כדי למצות את מלוא הפוטנציאל, יש ללוות את התכנית האקדמית בתכנית כלכלית וביטחונית. לשם כך נבנתה התכנית האקדמית מראש עם הממשקים המתאימים לתכניות משלימות המתמקדות באותם היבטים. מדינת ישראל מתחילה את ההערכות באיחור ועם היקף פעילות מוגבל, אקדמית ועוד יותר מכך תעשייתית. תהליכי הפיתוח איטיים ולפיכך הזמן דוחק.

2. רקע

2.1 רקע ומטרות למינוי הוועדה

כחלק מהתכנית הרב-שנתית להשכלה הגבוהה לשנים תשע"ז-תשפ"ב החליטה מל"ג/ות"ת, לאחר התייעצויות רחבות עם גורמים שונים במערכת האקדמית, לרכז מאמצים בפיתוח תשתיות מחקר גדולות בארבעה מוקדי מחקר משלימים. אלו הם מוקדים, אשר השקעה משמעותית ועקבית ברמה הלאומית בפיתוחם, ובפרט בפיתוח תשתיות המחקר עבורם, לאורך החומש הקרוב ואף מעבר לכך, צפויה להביא לקפיצת מדרגה ביכולות המחקר הישראליות, במעמדה העולמי של ישראל ובחזית הידע העולמי בתחום.

מוקד אחד מארבעת אלו שזוהו הוא **מדע וטכנולוגיה קוונטיים**.

על מנת לקדם את יוזמת ות"ת לפיתוח המחקר, ובפרט תשתיות המחקר בתחום המדע והטכנולוגיה הקוונטיים, החליטה ות"ת בישיבתה מיום 28.6.17 על הקמת ועדת היגוי, אשר תפקידה **ניסוח והמלצה על תכנית לאומית לפיתוח התחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים במערכת ההשכלה הגבוהה בישראל, בהתאם לנושאים שלהלן, וסיוע בהובלת יישומה**. פירוש מנדט הוועדה מופיע בפרק 3.

2.2 המהפכה הקוונטית השנייה

תורת הקוונטים מתארת תופעות והתנהגות של מערכות פיזיקליות קטנות. לכן, ככל שהתקנים מכניים, אלקטרוניים או אופטיים הולכים ונעשים זעירים, וככל שדיוק המדידה של מערכות הולך ועולה, כך עולה החשיבות של תופעות קוונטיות. התורה הקוונטית¹ קצרה הצלחות רבות במאה השנים האחרונות. היא הצליחה להסביר את מבנה החומר – האטום, המולקולה, הקשרים הכימיים, החומר המוצק, הגבישים וכיו"ב. התורה הקוונטית סיפקה את הבסיס לפיתוחים כמו הטרוניסטר, הלייזר, גלאי אור, תקשורת מהירה, שעונים מדויקים העומדים בבסיס מערכת הניווט הלוויינית, שיטות דימות

¹ פיזיקה קוונטית – כמה מושגי יסוד

יסודותיה של הפיזיקה הקוונטית נהגו ופותחו עוד בתחילת המאה ה-20, וחוללו מהפכה תפיסתית לגבי טבע היקום והחומר, לגבי החוקים השולטים בו וגם לגבי מהותו של המדע.

המונח "קוונטום" (Quantum) פירושו מנה – יחידה בסיסית. אחד מעקרונות היסוד של הפיזיקה הקוונטית הוא כי גדלים פיזיקליים מסוימים הניתנים למדידה יכולים לקבל אחד מסדרה של ערכים בדידים, הנבדלים זה מזה במרווחים של אותו "קוונטום" אפייני למערכת. כך למשל רמות אנרגיה של אטומים יכולות לקבל ערכים בדידים בלבד ולא ערכים רציפים.

עוד על פי התורה הקוונטית, ככל שעצמים קטנים יותר ואנרגטיים פחות, כך משמעותיות בהן יותר "תופעות קוונטיות": גל מתנהג גם כשטף של חלקיקים, וחלקיקים מגלים גם תכונות גליות ("האופי הדואלי"); חלקיקים מתוארים על-ידי פונקציות בעלות משמעות הסתברותית ולא דטרמיניסטית ("פונקציות גל") ובכל רגע לפני מדידתם נמצאים במספר מצבים – כל אחד מהם בהסתברות אחרת שבין 0 ל 100% ("עקרון הסופרפוזיציה"); לעומת זאת ברגע המדידה עובר החלקיק למצב אחד בלבד מתוכם בוודאות של 100% ("קריסת פונקציית הגל"); ישנם זוגות של ערכים הקשורים לחלקיק (כמו למשל מיקומו והמהירות שלו), כך שאין יכולת לדעת את שניהם בוודאות בעת ובעונה אחת ("עקרון אי הוודאות") ועוד.

ככל שמנסים להבין את הטבע, לתאר ולבנות תהליכים, מכשור או התקנים ברזולוציות מרחביות או זמניות גבוהות או באנרגיות נמוכות, כך הפיזיקה הקוונטית משחקת תפקיד יותר ויותר דומיננטי. מאידך, קיים אתגר משמעותי במדידה של אפקטים קוונטיים או בשימוש בהם, כשמדובר בסביבות עבודה בעולם המאקרוסקופי בו אנו חיים ופועלים (מבחינת סמפטרורה, מרחקים מרחביים וכיו"ב).

רפואי כ-MRI, ועוד. היא נבחנה בניסויים רבים והגיעה לדיוק חסר תקדים בהתאמה בין הניבוי לתוצאות הניסויים.

בשנים האחרונות הולכת ומתגבשת ההבנה כי המחקר התיאורטי והניסויי בתחום הביאו אותנו לסיפה של "המהפכה הקוונטית השנייה"². להבדיל מהמהפכה הקוונטית הראשונה שנבעה מהבנת מכניקת הקוונטים ופיתוח הטכנולוגיה הנדרשת לשליטה כוללת במצבים הקוונטיים של המערכת, המהפכה השנייה תישען על הבנת האינטראקציה בין דרגות חופש בודדות של המערכת (למשל, פוטונים ואטומים בודדים) ופיתוח הטכנולוגיה הנדרשת לשליטה בהן. יכולות אלו יאפשרו, ובחלקן כבר מאפשרות היום, בניית מחשב חזק לאין שעור מהקיים היום, תקשורת מוצפנת חסינה מהאזנה, סימולציה של מערכות מורכבות מכדי לחשבן באמצעות מחשבים קיימים, חישה ברגישות גבוהה מהשיטות המקובלות, פיתוח חומרים בעלי תכונות ייחודיות, ועוד.

ההכרה בפוטנציאל העצום הטמון במהפכה הקוונטית השנייה הביאו מדינות וחברות להשקעות ענק (ראה נספח 27). לאחרונה השיק האיחוד האירופי "ספינת דגל" בהיקף של חצי מיליארד יורו לחמש השנים הקרובות. ארה"ב, סין, קנדה, יפן, גרמניה, בריטניה ומדינות נוספות הכריזו על תכניות לאומיות לקידום טכנולוגיות קוונטיות ועל-פי דו"ח של McKinsey בשנת 2015 לבדה הושקעו במחקר לא מסווג של טכנולוגיות קוונטיות כ-1.5 מיליארד אירו בעולם. לסכומים אלו מצטרפות השקעות ענק של גופים ביטחוניים בסכומים לא ידועים והשקעות בהיקפים של מיליארדי דולרים על ידי חברות ענק כולל גוגל, מיקרוסופט, IBM, אינטל, ו-Alibaba³.

המהפכה יצאה לדרך וכדי להשתתף בפירותיה חייבת מדינת ישראל להיערך נכון ומהר. היערכות זו כוללת את האקדמיה, גופים ממשלתיים ובראשם משרד הביטחון והרשות לחדשנות, ותעשייה. מטרת הדו"ח הנוכחי להתוות תכנית פיתוח אקדמית ולהצביע על הממשקים החיוניים עם שאר הגופים.

2.3 "מדע וטכנולוגיה קוונטיים" – גידור התחום

שטחי המחקר הכלולים במהפכה הקוונטית השנייה רחבים ומאגדים בתוכם תחומי ידע מגוונים מדיסציפלינות שונות - פיזיקה, הנדסה, מדעי המחשב, מתמטיקה וכימיה. על מנת למקד את המאמץ הלאומי החליטה הועדה לתחם את המחקר שייתמך תחת "מדע וטכנולוגיה קוונטיים" למחקר תיאורטי או ניסיוני הנכלל באחד הסיווגים הבאים:

1. חישוב קוונטי
2. תקשורת קוונטית

² זאת לאחר "המהפכה הקוונטית הראשונה" שהולידה את ההמצאות שהוזכרו קודם - כמו הטריזיסטור, מקורות אור ולייזרים מבוססים מצב-מוצק, מערכות ניווט GPS ועוד.

³ להלן כמה דוגמאות מהזמן האחרון של המרוץ ל Quantum supremacy:

- [Alibaba הכריזה באוקטובר 2017 על השקעה של \\$15B במו"פ בנושאים של חישוב קוונטי, IOT, ניתוח מידע ובינה מלאכותית](#)
- [IBM הציגה בינואר 2018 בתערוכת CES בלאס וגאס אב-טיפוס של מעבד של 50-קיוביט](#)
- [אינטל גם הציגה בינואר 2018 שבב ניסיוני – מעבד של 49-קיוביט בשם "Tangle Lake"](#)
- [מיקרוסופט שחררה בינואר 2018 את Q# - שפה לכתובת אלגוריתמים קוונטיים כחלק מחבילת הפיתוח הקוונטי שלה. החברה גם משקיעה בפיתוח מחשב קוונטי טופולוגי.](#)

3. סימולציה באמצעות מערכות קוונטיות
4. מכשור וחיישנים קוונטיים כגון שעונים אטומיים, מדי שדה מגנטי, ומדי תאוצה קוונטיים
5. חומרים קוונטיים כגון חומרים טופולוגיים וחומרים מהונדסים קוונטית להצגת תכונות מיוחדות
6. יסודות תורת הקוונטים עם השלכה לטכנולוגיות עתידיות
7. מדע וטכנולוגיות קוונטיות חדשניים

להלן תיאור פופולארי הממחיש את האתגר המרכזי בכל אחד מהנושאים לעיל:

- **חישוב קוונטי (Quantum computing):** מודל החישוב הקוונטי מבוסס על עקרונות תורת הקוונטים ובמיוחד על העובדה שבעולם הקוונטי מערכת יכולה להימצא בתערובת (סופרפוזיציה) של מצבים עד שהתבצעה בחינה של מצבה. דוגמא פופולרית היא החתול של שרדינגר שנמצא בסופרפוזיציה של מצב חי ומת עד שבודקים זאת). במקום הביטים (bits) המקובלים שערכם 0 או 1, משתמש המחשב הקוונטי בביטים קוונטים – קיוביטים (Qubits) שערכם הוא בו-זמנית גם 0 וגם 1 – כל אחד בהסתברות שונה (סופרפוזיציה). מחשב כזה צפוי לפתור בעיות מסוימות ביעילות גבוהה הרבה יותר מאשר האלגוריתם המיטבי האפשרי עבור מחשב רגיל. פיתוח המחשב הקוונטי נמצא כיום בשלב המחקרי. הטכנולוגיה הקיימת עדיין אינה בשלה לבניית מחשב עדיף למחשבים המקובלים אבל ההשקעות העצומות בתחום מצד ממשלות ותעשייה מבטיחות התקדמות רציפה. יש סיבות רציניות להניח כי מחשב כזה, לכשיפותח (אם יפותח), יספק את פריצת הדרך המשמעותית ביותר בעולם המחשוב וההצפנה בעשורים הבאים והאתגרים העומדים לפתחנו הם מצד אחד להבין כיצד ניתן לקדם בניית מחשב כזה למרות הקשיים העצומים הכרוכים בכך, ומצד שני מה יכולים להיות השימושים למחשב כזה. המחקר בתחום החישוב הקוונטי כולל היבטים נסיוניים ותיאורטיים של ריאליזציה של מערכות קוונטיות שיכולות לבצע עיבוד מידע קוונטי, כולל טיפול בשגיאות, הבנת המגבלות והיכולות החישוביות והאלגוריתמיות של מערכות אלו, וכן הבנה רחבה יותר של מושגי סיבוכיות החישוב הקוונטית בהקשר של מערכות פיזיקליות יותר כלליות.
- **תקשורת קוונטית, הצפנה קוונטית ואבטחת מידע:** עקרונות תורת הקוונטים מאפשרים יצירת ערוץ תקשורת מוצפן ומוגן לחלוטין מפני האזנה. כאמור, אחד העקרונות הבסיסיים של תורת הקוונטים הוא שמדידה של חלקיק גורמת לקריסת פונקציית הגל שלו כלומר לקריסת אותה סופרפוזיציה של מצבים לאחד המצבים. בבסיסה, הצפנה קוונטית עושה שימוש בעיקרון זה כך שמאזין המצותת לשיחה מבצע למעשה מדידה על תערובת המצבים הנושאת את המידע ומשנה אותה. שני הצדדים – המצפין והנמען – יכולים לכן לחשוף אותו. בנוסף קיימות שיטות להחלפת מפתחות הצפנה קוונטיים, הטלת מטבע קוונטית, מחולל מספרים אקראיים קוונטי וטכניקות קריפטוגרפיות אחרות, כאשר אחד האתגרים החשובים הן מבחינה תיאורטית והן מעשית היא לגלות אפשרויות נוספות לשימוש ביתרונות התקשורת והקריפטוגרפיה הקוונטית, הן בפן התיאורטי והן המעשי. נציין שלכל השימושים שצוינו ישנם יישומים מרחיקי לכת ליצירת תקשורת מאובטחת, אבטחת מידע, ושמירה על פרטיות, ויישומן במערכות פיזיקליות גם הוא מציב אתגרים רבים, הן תיאורטיים והן נסיוניים, כגון התמודדות עם שגיאות, אימות המערכות, ועוד. תחום התקשורת וההצפנה הקוונטית מתקדם במיוחד מבחינת היישום שלו, וכבר היום קיימות מערכות תקשורת קוונטיות מוצפנות, כולל תקשורת קוונטית ללווין.
- **סימולציה (הדמיה) באמצעות מערכות קוונטיות:** סימולטורים קוונטיים הם מחשבים אנלוגיים המבוססים על חוקי פיזיקת הקוונטים ומאפשרים לדמות תכונות של חומרים או תרכובות כימיות (או

גם לפתור משוואות פיזיקליות מורכבות), אשר בשל מורכבותם לא ניתנים לחישוב באמצעות מחשבים משוכללים ואפילו לא באמצעות מחשבים קוונטיים כלליים לכשיבנו. כיום נחקרות מספר פלטפורמות המשמשות לבניית סימולטורים כאלו, וביניהן אטומים אולטרה-קרים בגבישים אופטיים, אטומים כלואים, ומערכים של qubits על-מוליכים או של quantum dots ופוטונים. סימולטורים קוונטיים הינן שלב ביניים בדרך למחשוב קוונטי מלא, כאשר התקווה היא שניתן יהיה להשתמש בסימולטורים אלו גם ללא תיקוני שגיאות. האפליקציות האפשריות רחבות ביותר וכוללות הבנת מערכות רבות ושונות בכימיה ובפיזיקה.

- **מכשור וחיישנים קוונטיים:** מאחר שתופעות קוונטיות כה רגישות להפרעות חיצוניות, ניתן להשתמש בהן כהתקנים למדידה ולחישה של תופעות שונות כגון שדה מגנטי, טמפרטורה, תאוצה ועוד, כמו גם למדידת זמן בדיוק גבוה ("שעונים אטומיים"). על ידי שימוש בתופעות קוונטיות שונות ניתן יהיה גם ליצור התקנים אלקטרוניים ואלקטרו-אופטיים המבוססים על עקרונות חדשים ובראשם שימוש במספר פוטונים ו/או אטומים קטן. התקנים אלו יצרכו פחות אנרגיה ויאפשרו את המשך תהליך המזעור. מעבר לכך, ניצול משאבים קוונטיים ייחודיים, כגון שזירה (entanglement) ודחיסה (squeezing), יאפשר רגישות מדידה ודיוק מעבר לגבולות האפשר באמצעים קלאסיים.
 - **חומרים קוונטיים:** ניתן לתכנן וליצור חומרים חדשים, אשר להם תכונות פיזיקליות חדשות ואקזוטיות הנובעות מתופעות קוונטיות המועצמות לרמה המקרוסקופית. כך למשל יש חומרים בהם נוצר צימוד חזק (strong correlation) בין דרגות חופש מיקרוסקופיות המקנה לחומר תכונות חדשות; יש חומרים בהם פונקציית הגל האלקטרונית מקבלת תכונות טופולוגיות מסוימות המשפיעות על תכונות המוליכות החשמלית, מוליכות החום, והפעילות האופטית של החומר. מעבר לחשיבותם של חומרים כאלו במגוון יישומים הם גם חיוניים ליישום מחשוב קוונטי, תקשורת קוונטית, חיישנים וסימולטורים קוונטיים.
 - **יסודות תורת הקוונטים עם השלכה לטכנולוגיות עתידיות:** תחום הטכנולוגיה הקוונטית מאפשר ונשען על אינטראקציה מרתקת בין שאלות שהן כביכול בין שני עברי המתנס: מצד אחד, שאלות הנוגעות ליסודות העמוקים ואפילו הפילוסופיים של תורת הקוונטים, ומאידך, לשאלות פרקטיות וניסוייות. הבנת הקשר בין שני אלו הוכחה כפורה ביותר בתחום הטכנולוגיות הקוונטיות, כאשר תובנות והתפתחויות בשאלות וכיוונים בסיסיים לחלוטין הובילו פעם אחר פעם להמצאות ולשימושים מפתיעים.
- העתיד צופן ללא ספק פריצות דרך מדעיות וטכנולוגיות אותן קשה לחזות כעת. על אלו נועד לענות סיווג 7 לעיל.

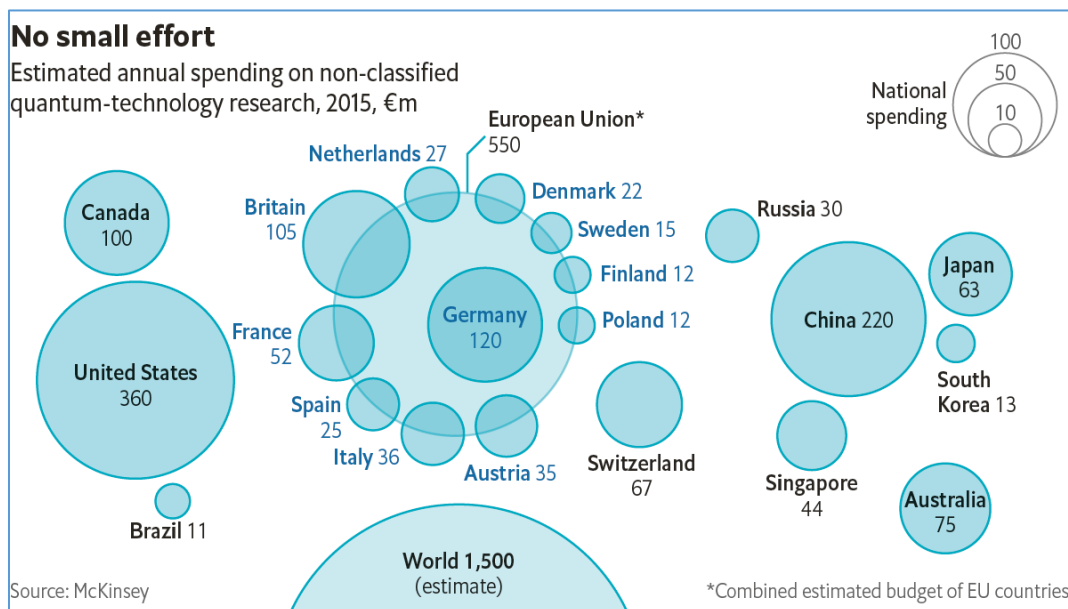
2.4 תכניות לאומיות בעולם

מדינות וארגונים משמעותיים בעולם החלו בשנים האחרונות בפיתוח תכניות מקיפות לקידום המדע והטכנולוגיה הקוונטיים ובייעוד השקעות משמעותיות לנושא, זאת מתוך הבנה כי פריצות הדרך המשמעותיות שהתחום צופן בחובו יובילו לפתרונות חדשים לאתגרים הגלובליים העכשוויים, לצמיחה כלכלית משמעותית וליתרונות תחרותיים בזירה הביטחונית. ממשלות שונות בעולם, המובילות שבהן – ארה"ב⁴, סין⁵, קנדה, יפן, גרמניה ובריטניה, הכריזו על תכניות לאומיות לקידום טכנולוגיות קוונטיות.

⁴ פרטים: [Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities, A joint report of the Committee on Science and the Committee on Homeland and National Security of the National Science and Technology Council, July 2016](#)

⁵ מאמר סקירה של היוזמה ניתן למצוא למשל ב:

על-פי דו"ח של McKinsey מ-2015⁶, בשנת 2015 לבדה הושקעו במחקר לא מסווג של טכנולוגיות קוונטיות כ-1.5 מיליארד אירו בעולם. המדינות שהובילו מבחינת גודל השקעות היו ארה"ב עם 360 מיליון אירו, סין עם 220 מיליון אירו, גרמניה עם 120 מיליון אירו, בריטניה עם 105 מיליון אירו, וקנדה עם 100 מיליון אירו. האיחוד האירופי כולו מוביל עם סך של כ-550 מיליון אירו. להלן תרשים המתאר את ההשקעות במדינות השונות ב-2015 (במיליוני אירו):

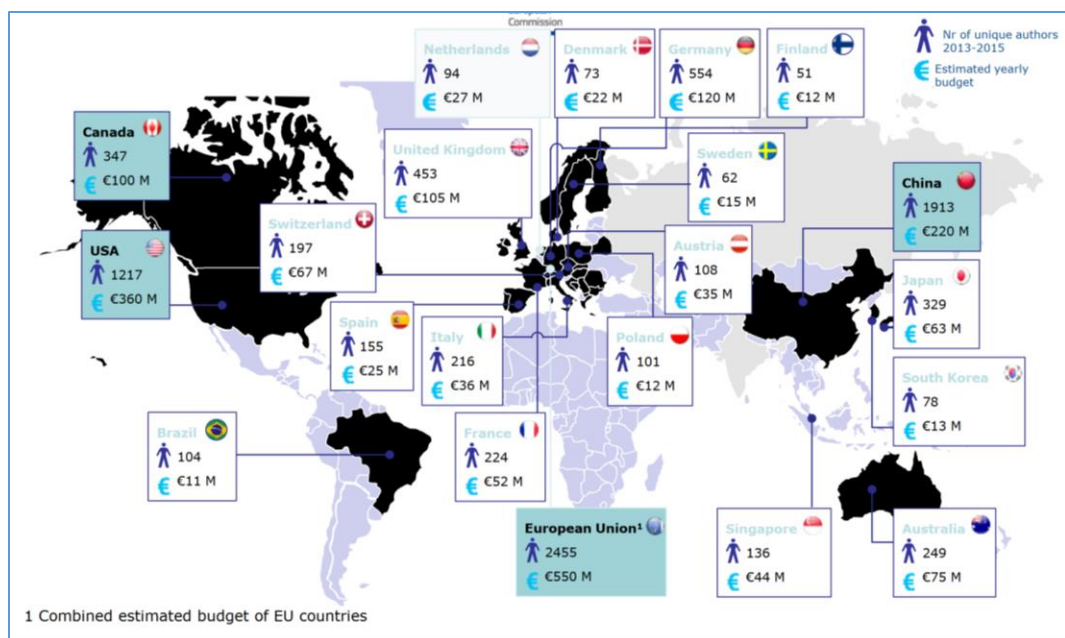


תרשים 2.1: הערכת ההשקעות במחקר לא-מסווג של טכנולוגיות קוונטיות במדינות השונות בשנת 2015 (מיליוני אירו)

ניתוח נוסף של חב' מקינזי מתאר בנוסף לתקציב גם את מס' החוקרים השונים החתומים על מאמרים בתחום בשנים 2013-2015 לפי מדינה:

[Chinese Efforts in Quantum Information Science: Drivers, Milestones, and Strategic Implications - Testimony for the U.S.-China Economic and Security Review Commission, March 16th, 2017, John Costello](#)

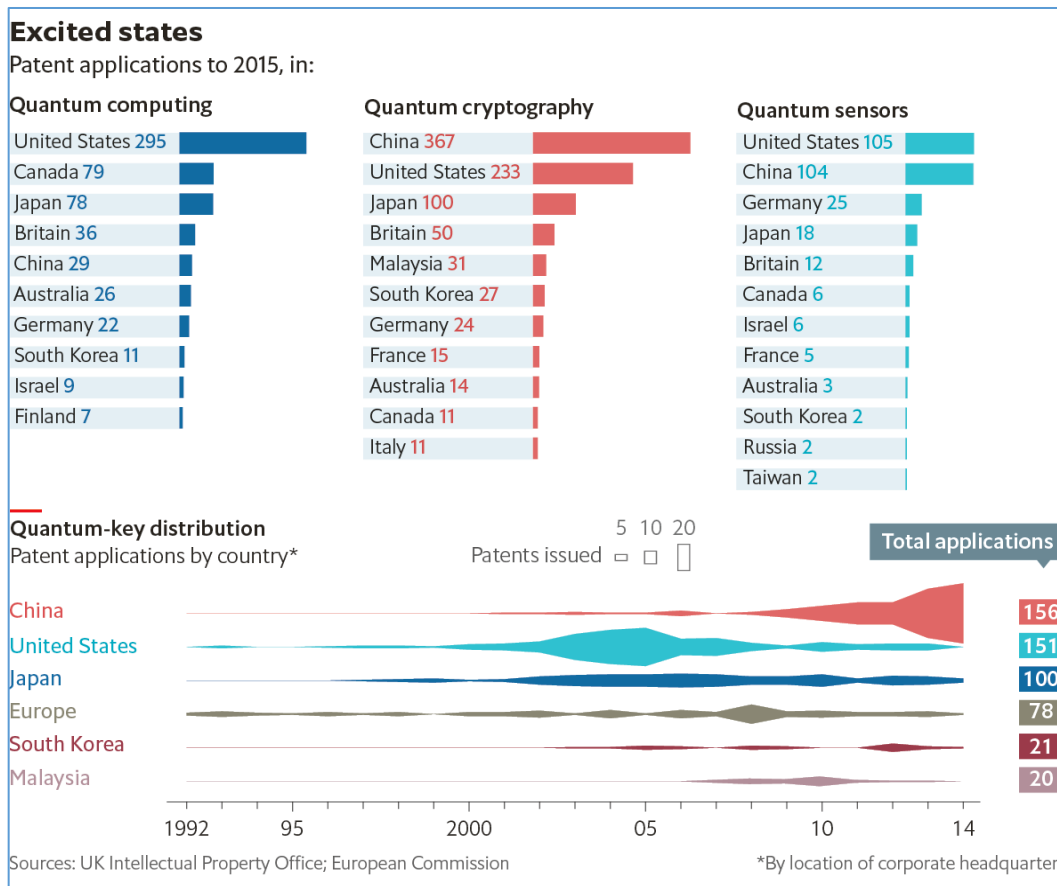
⁶ עיקרי ממצאיו מצוטטים בגיליון מרץ 2017 של The Economist תחת הכותרת Quantum Leaps



תרשים 2.2: מס' המדענים השונים החתומים על מאמרים בתחום בשנים 2013-2015, וההשקעות השנתיות במחקר בלתי-מסווג בתחום ב-2015 (מיליוני אירו)

שוב - כמדינות בודדות סין וארה"ב מובילות, אולם אם מסתכלים על האיחוד האירופי כולו, הוא מוביל עם כמעט 2,500 חוקרים פעילים בתחום. נכון ל-2015⁷, סין וארה"ב גם מובילות עולמית במספר הבקשות לפטנטים בתחום:

⁷ גם נתונים אלו נלקחו מגיליון מרץ 2017 של The Economist



תרשים 2.3: מס' בקשות הפטנטים ב-2015 לפי תחומים ומדינות ומס' בקשות הפטנטים ב quantum

key distribution לפי מדינה ושנה 1992-2015

בעקבות חלק מיוזמות לאומיות אלו, ובמקביל לחלקן, **האיחוד האירופי** החליט ב-2016 על יוזמת ענק חדשה בתחום – יוזמת ה Quantum Flagship⁸, במטרה להפוך את אירופה לשחקן שוביל את המהפכה הקוונטית השנייה, ושייחנה מפיתוח תעשייה משמעותית בתחום. במסגרת תכנית זו תשקיע הנציבות האירופית סכום של כ- 500 מיליון יורו בפרויקט שיתחיל ב-2019 כ Ramp-up phase, וב-2021 יעבור ל Full project phase (וזאת מעבר להשקעות מדינתיות נוספות).

בנספח 7.7 מופיע תיאור קצר של היוזמות הלאומיות המרכזיות במספר מדינות מובילות. לצערנו לא מצאנו נתונים לגבי גודל ההשקעות הלאומיות בתחום בשנים 2016-2017, אולם להלן היקפי תכניות לאומיות רב-שנתיות בתחום עליהן הכריזו לאחרונה מספר מדינות/ארגונים:

- **האיחוד האירופי**: 500M אירו ל-5 שנים (+כסף מדינתי)
- **בריטניה** – 270 מיליון פאונד⁹ ל-5 שנים (+30 מיליון פאונד ממקורות לאומיים ביטחוניים)
- **גרמניה** – 300 מיליון אירו ל-10 שנים
- **הולנד** – 135 מיליון אירו ל-10 שנים

⁸ פרטים: [Quantum Manifesto, A New Era of Technology, May 2016](#)
⁹ שהם כ-300 מיליון יורו (1 GBP ~ 1.1 Euro)

חשוב לציין שגם חברות מסחריות גדולות, וביניהן גוגל, מיקרוסופט, אינטל, טושיבה, עליבאבא, ו-IBM, משקיעות משאבים משמעותיים לקידום התחום ולפיתוח יישומים. במקרים רבים מצליחות החברות לגייס לשורותיהן חוקרים אקדמיים ומפתחים מובילים בתחום. היקף ההשקעות התעשייתיות אינו ידוע אך הוא מוערך במספר מיליארדי דולרים לשנה¹⁰.

¹⁰ עליבאבא לבדה הכריזה באוקטובר 2017 על השקעה של \$15B במו"פ בנושאים של חישוב קוונטי, IOT, ניתוח מידע ובינה מלאכותית

3. ישראל – תמונת מצב אקדמית¹¹

3.1 הפעילות המחקרית וההכשרה במוסדות השונים

תורת הקוונטים עומדת ביסוד המדע המודרני, במיוחד בתחום הפיזיקה והנדסת החשמל. לכן באקדמיה בישראל יש מספר ניכר של חוקרים העוסקים בתורת הקוונטים באופן ישיר או עקיף וקיימים קורסים בנושא לתואר ראשון ולתארים מתקדמים, בעיקר במחלקות / פקולטות לפיזיקה.

המוסדות נבדלים זה מזה בהיקף העיסוק בתחום, במגוון תתי התחומים, בהיקף ההכשרה המוצעת לסטודנטים ובמגוון המחלקות/הפקולטות בהן נעשה המחקר. בחלק מהמוסדות המחקר בתחום התפתח בצורה טבעית (חוקרים שבחרו לעסוק בתחום), ובחלקם התקבלו החלטות הנהלה מכוונות לפיתוח התחום, דבר שהתבטא למשל בהקמת מרכזי מחקר, רכישת תשתיות מחקר, וקליטת סגל.

בפרק זה נפרט מעט לגבי תמונת המצב האקדמית בישראל בתחום – הן בפני עצמה, והן בהשוואה לעולם. מקורות המידע המרכזיים לתמונה שתוצג בהמשך הינם דיווחי המוסדות עצמם (המענה לשאלוני הוועדה, ופגישות שנערכו בין חברי הוועדה לחוקרים ולנציגי הנהלה מהמוסדות השונים – ראו פירוט בפרק 4), נתוני ות"ת ולמ"ס, נתוני זכיה בקרנות מחקר, וניתוחים ביביליומטריים של פרסומים וציטוטים.

3.1.1 מרכזי מחקר באוניברסיטאות הישראליות

נכון למועד כתיבת הדו"ח, ב-4 אוניברסיטאות קיימים מרכזי מחקר ייעודיים בתחום של QST: **האוניברסיטה העברית** (המרכז לאינפורמציה קוונטית, Quantum Information Science Center, שהוקם ב-2011 ומונה 26 חברי סגל), **אוניברסיטת בן גוריון** (Center for Quantum Information, ¹²Science & Technology שהוקם ב-2014 ומונה 28 חברי סגל¹³), **הטכניון** (Center for Quantum science matter and engineering, שהוקם ב-2016 ומונה 40 חברי סגל) ו**אוניברסיטת בר-אילן** (Quantum Entanglement Science and Technology -QUEST, שהוקם ב-2016 ומונה 7 חברי סגל).

בשאר האוניברסיטאות קיימים מרכזי מחקר בתחומים נוספים ומתוכננים לקום מרכזי QST:

באוניברסיטת תל אביב קיים מרכז מחקר העוסק בתחום רחב יותר (LMI מרכז לאינטראקציה של אור וחומר, שהוקם ב-2016 ומונה 17 חברי סגל), ויש כוונה להקים מרכז QST בשנה הקרובה (שימנה כ-25 חברי סגל). **במכון ויצמן** למדע ישנה פעילות מחקר רבה בתחום, אולם נכון להיום אין מרכז מחקר ייעודי לנושא. שני מכוני מחקר כאלו צפויים לקום במהלך השנתיים הקרובות

Institute for quantum Science and Technology

Institute for Advanced and Intelligent Materials which will host a "Quantum Materials" unit

¹¹ על אף שבמקרים רבים בפרק זה ובדו"ח כולו רשום מדען/חוקר/ראש וועדה וכיו"ב בלשון זכר, הכוונה היא לנשים ולגברים כאחד.

¹² המרכז רואה את ייחודו בכך שהתמקם בחיבור שבין המחקר הבסיסי ליישומי.

¹³ המוסד ציין כי 50 חברי סגל שהביעו רצון להיות חברים תורמים במרכז

באוניברסיטת אריאל קיימים מרכז שלזינגר למאצנים קומפקטיים ומקורות קרינה (המונה 8 חברי סגל) ומרכז לחקר החומרים (המונה 10 חברי סגל). ישנה כוונה להקים מרכז לפיתוח ומחקר מדע וטכנולוגיה קוונטיים תחת מרכז המאצנים.

באוניברסיטת חיפה נשלמת בימים אלו הקמתו של "המרכז לחקר פיזיקה תאורטית ואסטרופיזיקה - אוניברסיטת חיפה" אשר ירכז בשנים הקרובות את המחקר ב-QST באוניברסיטה וימנה 4 חברי סגל.

המרכזים הקיימים יוצרים בדרך כלל מסגרת של קהילת מחקר בין החברים (ולעיתים גם אבן שואבת לקהילה הישראלית כולה בנושא), מעודדים שיתוף ידע ומחקרים משותפים בין החברים, מהווים מסגרת לשיתופי פעולה מחקריים עם מערכת הביטחון או עם תעשייה וכן מסגרת לשיתופי פעולה בינלאומיים במחקר, בתכניות מלגות ובתכניות הכשרה.

(א) **תשתיות מחקר קיימות**: תשתיות המחקר העומדות לרשות החוקרים ברוב המוסדות הן מבזורות וכוללות את מרכזי המיקרו וננו-מדע וטכנולוגיה, אם קיימים באוניברסיטה, ובהם ציוד פבריקציה מתקדם. בחלק מהמוסדות התשתיות כוללות גם מרכזים לחומרים (עם תשתיות אפיון וסינתזה), מעבדות פוטוניקה, מרכזי מיקרוסקופיית אלקטרוניים וכיו"ב. מרכזי התשתיות משמשים בדרך כלל בעיקר את חוקרי המוסד עצמו (כלומר אינם מתפקדים כמרכזים לאומיים) אם כי בחלק מהמוסדות הציוד משמש גם את התעשייה וחוקרים ממוסדות אחרים בהיקף של עד כ 20-30% משעות השימוש. הציוד התשתיתי הקיים תומך חלקית בפעילות ה-QST אך נדרש שדרוג משמעותי שלו והרחבת היכולות כדי לתמוך במחקר מתקדם בתחום.

(ב) **היקף תקציבי**: ארבעת המרכזים הקיימים ל-QST שונים זה מזה מבחינת מקורות והיקף התקציב. **בבר-אילן ובבן גוריון** אין למרכז תקציב משלו, אלא לכל חוקר במרכז יש תקציב מחקר שגייס בעצמו (בבר אילן למשל מסתכמים תקציבים אלו בכ-2.5 מלש"ח שנתי); **באוניברסיטה העברית**, מעבר לתקציבי החוקרים מקציבה האוניברסיטה סכום שנתי שעמד בעבר על 100 אלש"ח והשנה עלה ל-300 אלש"ח. מעבר לכך המרכז זכה במימון של 1.5 מלש"ח לשנה לפרויקט מרכזי של תקשורת קוונטית. **בטכניון**, מעבר לתקציבי החוקרים עצמם (שהסתכמו בשנתיים האחרונות לכ-15 מיליון אירו) נערך גיוס תרומות לטובת המרכז שהסתכם עד כה ב-8 מיליון דולר.

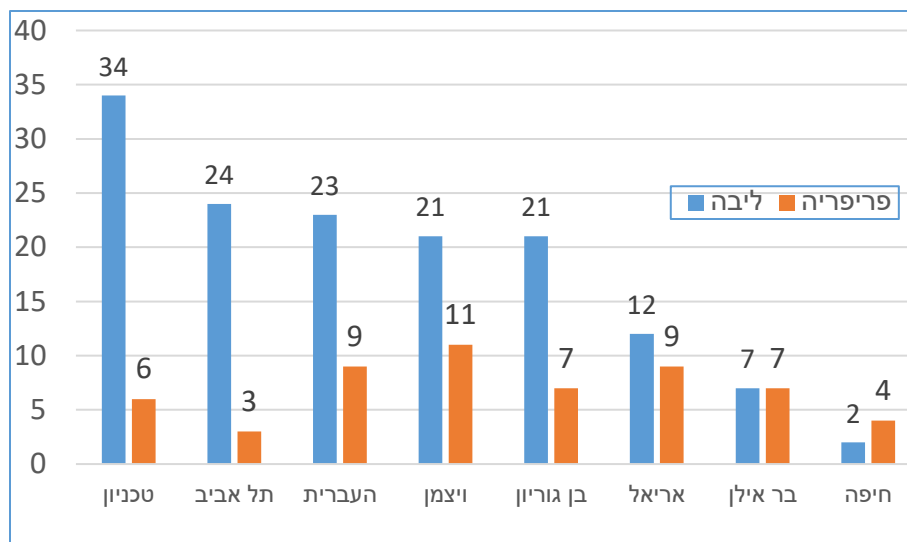
(ג) **פעילויות של המרכזים לגיבוש ויצירת קהילת מחקר**: המרכזים כולם מארגנים ויוזמים כנסים לאומיים ובינלאומיים. חלקם גם עורכים סימפוזיונים, סדנאות ובתי ספר קיץ לתלמידי מחקר, סמינרים שבועיים, וכן הרצאות Outreach לקהל הרחב. המרכז באוניברסיטת בן גוריון עוסק גם ביצור שבבים ברמה גבוהה למעבדות ברחבי העולם וחלק מהמרכזים מעמידים חלק מתשתיות המחקר שלהם לרשות הקהילה.

3.1.2 היקף ואיכות המחקר בארץ

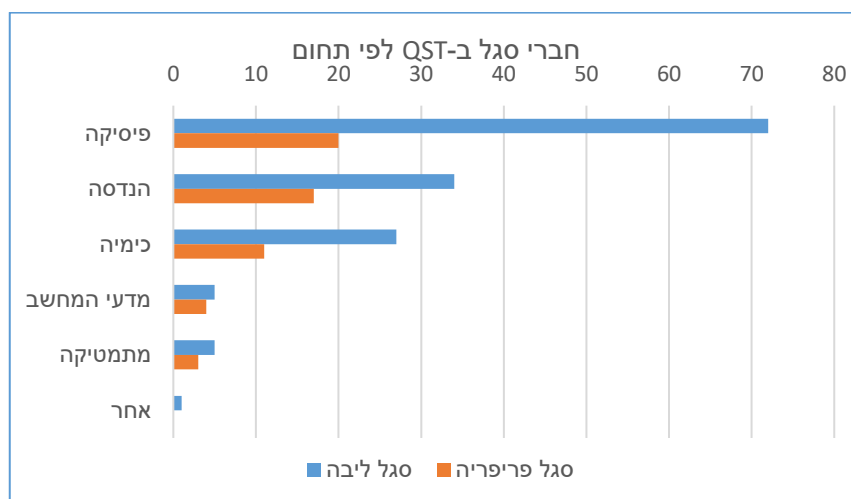
3.1.2.1 חוקרים ותלמידי מחקר קיימים

על-פי דיווחי האוניברסיטאות, יש כיום 144 חוקרים, ש-QST הינו בליבת המחקר שלהם, ועוד 56 חוקרים אשר חוקרים תחומים סמוכים/נושקים ל-QST¹⁴. החוקרים בליבת התחום מנחים 471 תלמידי מחקר (198 למאסטר, 273 לדוקטורט) ו-122 משתלמים לפוסט-דוקטורט. חלק מחוקרי הליבה שדווחו אינם עוסקים בליבה ולהערכתנו מספר החוקרים האמיתי שלילת עיסוקם QST הוא כ 110 ומספר הסטודנטים המתאים הוא כ 380. להלן פילוח של אותם חוקרים – על פי דיווחי המוסדות:

¹⁴ הניתוחים המופיעים להלן הינם בהתאם לדיווחי המוסדות, ולכן מופיעים בספירה גם חוקרים אשר המוסדות שייכו לליבת התחום או לפריפריית התחום והוועדה הייתה משייכת לפריפריית התחום / כלא שייכים לתחום בהתאמה. יש לשים לב כי המספרים הנ"ל כוללים פרופ' אמריטי.

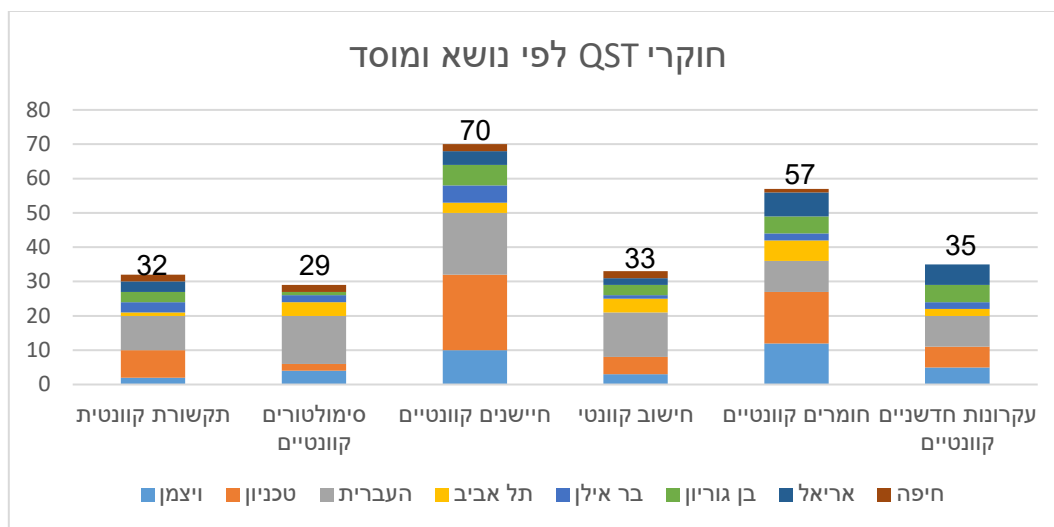


גרף 3.1: חוקרים בליבת ופריפריית QST בפילוח לפי מוסד. סה"כ: 144 חברי סגל ליבה (מתוכם 11-אמריטני) ו-56 פריפריה



סגל פריפריה	סטודנטים ליבה				סגל ליבה	
	סה"כ	פוסט	דוקטורט	מאסטר		
21	259	52	122	85	72	פיזיקה
17	173	26	79	68	34	הנדסה
11	120	38	50	32	27	כימיה
4	11	1	5	5	5	מדעי המחשב
3	20	5	13	2	5	מתמטיקה
0	10	0	4	6	1	אחר
56	593	122	273	198	144	סה"כ

טבלה וגרף 3.2: חוקרים בליבת ופריפריית QST בפילוח לפי מחלקה/פקולטה; תלמידי מחקר של חוקרי ליבת QST לפי אותו פילוח



גרף 3.3: חוקרים בליבת ופריפריית QST בפילוח לפי תת-תחום של QST

ניתן אם כן לראות כי רוב המחקר בארץ נעשה היום במסגרת המחלקות לפיזיקה, ויחסית מעט מאוד במדעי המחשב ובמתמטיקה. כמו כן ניתן לראות כי מחקר רב סובב סביב תחומי החיישנים הקוונטיים והחומרים הקוונטיים, ומשמעותית פחות בתחומי החישוב הקוונטי, תקשורת קוונטית, סימולטורים קוונטיים ועקרונות חדשניים של תורת הקוונטים עם השלכות לטכנולוגיה¹⁵.

ניתוח מעניין נוסף הוא השלב בקריירה האקדמית של החוקרים בתחום. ע"פ הערכות שעשינו להלן פילוח חברי הסגל בליבת התחום ע"פ השלב בקריירה והקירבה לגיל פרישה:

סה"כ סגל ליבה	אמריטוס לפרוש תוך 5 שנים	צפויים לפרוש בעוד בין 5 ל-10 שנים	צפויים לפרוש עוד יותר מ-10 שנים
פיזיקה	72	3	8
הנדסה	34	4	0
כימיה	27	4	5

¹⁵ יש לסייג ולומר כי תחומי החיישנים הקוונטיים והחומרים הקוונטיים הם תחומים רחבים מאוד ולכן חוקרים רבים יותר, כולל רבים מאלו ששווגו בליבת QST על אף שאינם, גם יטו לשווג את מחקרם תחת כותרות אלו.

מדעי המחשב	5	1	1	0	3
מתמטיקה	5	0	2	0	3
אחר	1	0	1	0	0
סה"כ	144	11	17	10	106

טבלה 3.4: חברי סגל בליבת התחום ע"פ השלב בקריירה והקרבה לגיל פרישה

ניתוח זה ימשמש אותנו בהמשך בבחינת השינויים הצפויים במספר חברי הסגל בתחום בשנים הבאות. בנוסף מעניין לבחון את הפילוח המגדרי של החוקרים בתחומי ה-QST. כאן ניתן לראות כי התמונה דומה לתמונה הכללית במדעים הללו, עם ייצוג נמוך של נשים בסגל¹⁶:

סה"כ	סגל ליבה	סגל פריפריה	סגל פוטנציאלי	סה"כ
סה"כ	144	55	11	210
גברים	135	50	9	194
נשים	9	5	2	16
אחוז הנשים	6%	9%	18%	8%

טבלה 3.5: חוקרים בתחום (ליבה, פריפריה, פוטנציאליים) לפי פילוח מגדרי

3.1.2.2 היקף, קדימות, ואיכות המחקר בהשוואה בינלאומית

קשה למצוא נתונים אשר יתנו אינדיקציה מדויקת לגבי היקף ואיכות המחקר בתחום בארץ **בהשוואה בינלאומית**, במיוחד לאור כך שהתחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים, כפי שהוגדר ע"י הוועדה נפרש על פני הרבה שטחים ותתי שטחים בסיווגים המקובלים (פיזיקה, הנדסות שונות, כימיה, מדעי המחשב, מתמטיקה – ותתי תחומים שונים שלהם)¹⁷. לכן נביא בפרק זה מספר אינדיקציות עקיפות אשר ניתן להסיק מהן לגבי היקף ואיכות המחקר בארץ בתחום. הנתונים המלאים מצויים בנספח 7ה'.

¹⁶ אחוז הנשים ב-QST נמוכים מעט מהאחוזים הכלליים של נשים בסגל בתחומים הרלוונטיים, אולם יש לזכור כי מדובר במספרים קטנים ולכן השגיאה הסטטיסטית משמעותית. שיעור הנשים בסגל האקדמי באוניברסיטאות בתשע"ג (לא כולל מכון ויצמן בו קיימים נתונים המערבים סגל עם עמיתי מחקר ולכן מעוותים את התמונה) היו בין 7% ל-15% במדעים פיסיקליים, בין 5% ל-11% במתמטיקה ומדעי המחשב, ובין 10% ל-21% בהנדסה ואדריכלות. ¹⁷ בפרט, רוב הניתוחים הביבליומטריים הקיימים נעשים על-פי הסיווג של תומסון רויטרס הכולל 22 שטחי מחקר וכ-250 תתי-שטחים.

(א) ניתוחים ביבליומטריים¹⁸:

- **מדדי קדימות**¹⁹: בשנים 2007-2011 השטחים המובילים בקדימות בישראל היו רפואה קלינית (23%), פיזיקה (11.4%), כימיה (7.2%) והנדסה (6.4%). מתוכם שלושת האחרונים רלוונטיים לנושאי QST.

בהשוואה עולמית²⁰ ניתן לראות כי מתוך הנושאים הרלוונטיים ביותר לתחומי ה-QST: **בפיזיקה, מתמטיקה ומדעי המחשב יש קדימות גבוהה בישראל מאשר בממוצע העולמי**; בהנדסה – קדימות זהה; ואילו בכימיה ומדעי החומרים קדימות נמוכה יותר.

- **מדדי כמות/היקף:**

מדד מרכזי להיקף פעילות הוא מספר הפרסומים הישראלים בשטחים שונים ושיעורם בפרסומי העולם ומדינות OECD בכל שטח.

בטבלה ה-4 המופיעה בנספח 7' ניתן לראות כי בהשוואה של תחומי מחקר שונים **בשנים 2007-2011, נפח הפעילות בישראל היה גבוה במיוחד בשטחי המתמטיקה (1.74% מפרסומי העולם) ומדעי המחשב (1.70% מפרסומי העולם) וגבוה יחסית גם בשטח הפיזיקה (1.34% מפרסומי העולם)**. בתחומי מדעי החומרים, הכימיה וההנדסה נפח הפעילות היה קטן יותר (0.51%, 0.65% ו-0.78% מפרסומי העולם בכל תחום בהתאמה).

בניתוח מגמות על פני השנים (השוואה בין התקופה 2007-2011 לבין 2002-2006), רואים כי נפח הפעילות היחסית של ישראל ביחס לפרסומי השטח ב-OECD, גדל במדעי המחשב ובמדע החומרים, וקטן מעט בשאר התחומים הרלוונטיים²¹.

ניתן גם לנרמל את מספרי הפרסומים במספר הנפשות שבכל מדינה. במקרה זה ניתן לראות כי בשנים 2007-2011, מתמטיקה הוא השטח היחיד בו ישראל מובילה עולמית במספר פרסומים לנפש²².

- **מדדי איכות:**

(i) ציטוטים לפרסום

¹⁸הנתונים הם מתוך "תפוקות מחקר ופיתוח בישראל: פרסומים מדעיים בהשוואה בינלאומית 1990-2011", ד"ר דפנה גץ, ד"ר אבישג גורדון, ד"ר נועה לביד, יאיר אבן-זוהר, איריס אייל, אלה ברזני, מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה, אוגוסט 2013.

¹⁹ קדימות מוגדרת כשיעור הפרסומים בשטח מדעי מכלל פרסומי המדע במדינה הנתונים מופיעים בנספח 7', טבלה ה-3.

²¹ ההצטמצמות ל-OECD מנטרלת את ההשפעה הדרמטית של כניסתן של מדינות המזרח לזירת המחקר האקדמית (במיוחד סין והודו). אם מסתכלים על מגמות של נפח הפעילות הישראלית ביחס לעולם לשאר העולם רואים קיטון בכל השטחים פרט לאחד (מדעי החלל).

²² נתונים מפורטים מצויים בדוח מוסד שמואל נאמן, שם.

אם נתבונן בממוצע הציטוטים לפרסום בישראל ביחס לממוצע העולמי ולממוצע ה-OECD בשני חלונות זמן 2002-2006 ו- 2007-2011 נקבל את התמונה הבאה :

	שטח	2007-2011		2002-2006	
		ממוצע הציטוטים לפרסום ביחס לממוצע העולמי	ממוצע הציטוטים לפרסום ביחס לממוצע ה-OECD	ממוצע הציטוטים לפרסום ביחס לממוצע העולמי	ממוצע הציטוטים לפרסום ביחס לממוצע ה-OECD
↓ ↓	Materials Science	1.59	1.31	1.66	1.42
↓ ↓	Space Science	1.53	1.37	1.57	1.43
↑ ↑	Plant & Animal Science	1.46	1.27	1.36	1.22
↓ ↓	Physics	1.42	1.20	1.46	1.27
↑ ↑	Geosciences	1.32	1.14	1.17	1.03
↓ ↓	Agricultural Sciences	1.30 ¹¹	1.10	1.40	1.25
↑ ↑	Molecular Biology & Genetics	1.30	1.18	1.15	1.08
↓ ↓	Chemistry	1.29	1.05	1.35	1.12
↑ ↑	Microbiology	1.25	1.09	0.96	0.89
↑ ↑	Biology & Biochemistry	1.24	1.10	1.11	1.02
↓ ↓	Pharmacology & Toxicology	1.15	1.02	1.24	1.15
↑ ↑	Clinical Medicine	1.13	1.03	0.92	0.87
↑ ↑	Economics & Business	1.11	1.05	1.06	1.03
↑ ↑	Immunology	1.06	0.98	0.85	0.81
↑ ↑	Neuroscience & Behavior	1.06	0.99	1.01	0.97
↓ ↓	Engineering	1.01	0.97	1.19	1.11
↑ ↑	Psychiatry/Psychology	1.00	0.96	0.94	0.92
↓ ↓	Environment/Ecology	0.98	0.89	1.00	0.92
↓ ↓	Computer Science	0.96	0.90	1.69	1.55
↓ ↓	Mathematics	0.96	0.88	1.12	1.01
↑ ↑	Social Sciences, general	0.94	0.88	0.74	0.71

עיבוד של מוסד שמואל נאמן לנתוני Thomson Reuters

טבלה 3.6: ממוצע הציטוטים לפרסום בישראל ביחס לממוצע העולמי ולממוצע ה-OECD בשני חלונות זמן 2002-2006 ו- 2007-2011

ניתן לראות כי בתחומי מדע החומרים, הפיזיקה והכימיה ממוצע הציטוטים לפרסום בישראל גבוה ביחס לממוצע העולמי וה-OECD (במדעי החומרים ישראל מקום #5 בעולם במדד זה, בפיזיקה מקום #11 ובכימיה #10); בהנדסה הממוצע הישראלי דומה לממוצעים הללו (ישראל מדורגת #23 בדירוג העולמי), ובמדעי המחשב ומתמטיקה מעט נמוך מהממוצעים הללו (בדירוג עולמי של #20 ו-#26 בהתאמה)²³.

יש בידנו גם ניתוח של ממוצע ציטוטים לפרסום מנורמל בתת-השטח של Nanoscience & Nanotechnology²⁴. בתחום זה הנתונים מראים כי בשנים 2007-2011 דירוג ישראל בין כלל המדינות היה גבוה ועמד על #6 במדד זה (הנתונים בטבלה ה-5. בספח ה').

(ii) פרסומים מצוטטים ביותר

²³ לשם השוואה בממוצע על כל התחומים, ישראל נמצאת במקום #14 בדירוג העולמי במדד זה. ניתוחים של תתי שטחים נוספים רלוונטיים, אך משנים מוקדמות יותר ניתן למצוא בדוחות קודמים של מוסד שמואל נאמן, למשל Computer Science – Theory and Methods, Computer Science – Interdisciplinary, Optics Applications ו-Optics לשנים 2004-2008 בדו"ח "תפוקות מחקר ופיתוח בישראל: פרסומים מדעיים בהשוואה בינלאומית", ד"ר דפנה גץ, יאיר אבן זוהר, בלה זלמנוביץ', ד"ר ערן לק, אפריל 2011.

ניתוח של מספר הפרסומים המצוטטים ביותר בעולם בשטחים השונים, מספר הפרסומים הישראליים במאגר זה ושיעורם מכלל הפרסומים המצוטטים ביותר בשטח לשנים 2001-2011 (נתונים בטבלה ה.6 בנספח ה'), מראה כי ארבעת השטחים המובילים בישראל במדד זה הם: מדעי החלל (#1), ביולוגיה מולקולרית וגנטיקה (#2), מדעי המחשב (#3), פיזיקה (#4) -שני האחרונים רלוונטיים לתחומי ה-QST.

להלן טבלה המסכמת את הממצאים מהניתוח הביבליומטרי:

קדימות התחום ביחס לעולם	היקף הפעילות בתחום בארץ בהשוואה לעולם	איכות הפרסומים בתחום בארץ ביחס לעולם	
פיזיקה	גבוהה	גבוה	ציטוטים לפרסום גבוה (#11); שיעור גבוה מאוד מהפרסומים המצוטטים ביותר בעולם
הנדסה	קטנה	לא גבוה	ציטוטים לפרסום ~ ממוצע עולמי
כימיה	קטנה	לא גבוה	ציטוטים לפרסום גבוה (#10)
מדעי החומרים	קטנה	לא גבוה; במגמת עליה ביחס ל-OECD	ציטוטים לפרסום גבוה מאוד (#5)
מדעי המחשב	גבוהה	גבוה מאוד (ובמגמת עליה ביחס ל-OECD)	ציטוטים לפרסום נמוך מעט מהממוצע בעולם; שיעור גבוה מאוד מהפרסומים המצוטטים ביותר בעולם
מתמטיקה	גבוהה	גבוה מאוד; הובלה עולמית במס' פרסומים לנפש	ציטוטים לפרסום נמוך מעט מהממוצע בעולם
ננו-מדע וטכנולוגיה	N/A	N/A	ציטוטים לפרסום גבוה מאוד (#6)

טבלה 3.7: ממצאי הניתוח הביבליומטרי לגבי תחומי המחקר הרלוונטיים ל-QST

(ב) ניתוח זכיה במענקי ERC^{26,25}:

מענקי ה-ERC של תכנית המו"פ האירופית הינם מענקים יוקרתיים, אשר הזוכים בהם מוכרים כמובילים בתחומם (יחסית לשכבת הגיל). לכן הם מהווים אינדיקטור מעניין לאיכות המחקר בתחום בכל מדינה ובהשוואה בינלאומית:

²⁵ יש לקחת בחשבון כי לעיתים קרובות הצעות מקבלות ניקוד כמעט זהה וכך קורה כי גם הצעות ברמה גבוהה ביותר לעיתים נדחות (בפרט כי מספר הזוכים בכל שנה בכל ועדה הוא קטן). לכן מדד זה הוא מעט בעייתי, ומעניין היה להתסכל גם על מדד כמו מספר ההצעות שהגיעו לשלב הבחינה הסופי בכל ועדה.

²⁶ המענקים הינם מ-3 סוגים: StG = Starting Grant – מענקים לחוקרים בראשית דרכם, במרחק 2-7 שנים מסיום הדוקטורט; CoG=Consolidator Grant – מענקים לחוקרים צעירים בוגרים, במרחק 7-12 שנים מסיום הדוקטורט; AdG=Advanced Grant – מענקים לחוקרים מבוססים, במרחק של מעל 12 שנה מסיום הדוקטורט;

- מתוך כלל 144 אנשי הסגל אשר אוניברסיטאות המחקר ציינו כעוסקים בליבת תחום ה-QST, 39 זכו במהלך השנים עד 2016-2007, במענקי ERC על מחקר הקשור לתחומי ה-QST. להלן פילוח של אותם זוכים לפי תחומים, מוסדות ולפי שנים וסוג המענק:

מוסד	פיזיקה	הנדסה	כימיה	מדעי המחשב	מתמטיקה	סה"כ
ויצמן	11	0	5	0	0	16
טכניון	3	2	0	0	0	5
העברית	4	1	2	1	3	11
תל אביב	1	3	0	0	0	4
בר אילן	1	1	0	1	0	3
בן גוריון	0	0	0	0	0	0
אריאל	0	0	0	0	0	0
סה"כ	20	7	7	2	3	39

טבלה 3.8: חוקרים שדווחו כעוסקים בליבת QST, שזכו במענקי ERC לפי מוסד ותחום 2007 - 2016

סה"כ	StG	AdG	CoG	סה"כ
2007	0	0	0	0
2008	0	4	0	4
2009	0	1	0	1
2010	0	2	0	2
2011	1	0	0	1
2012	0	1	0	3
2013	1	4	1	9
2014	8	1	2	11
2015	3	2	2	7
2016	3	1	0	4
סה"כ	19	17	6	42

טבלה 3.9: מענקי ERC לחוקרים שדווחו בליבת ה-QST לפי שנת וסוג מענק²⁷, 2007 - 2016

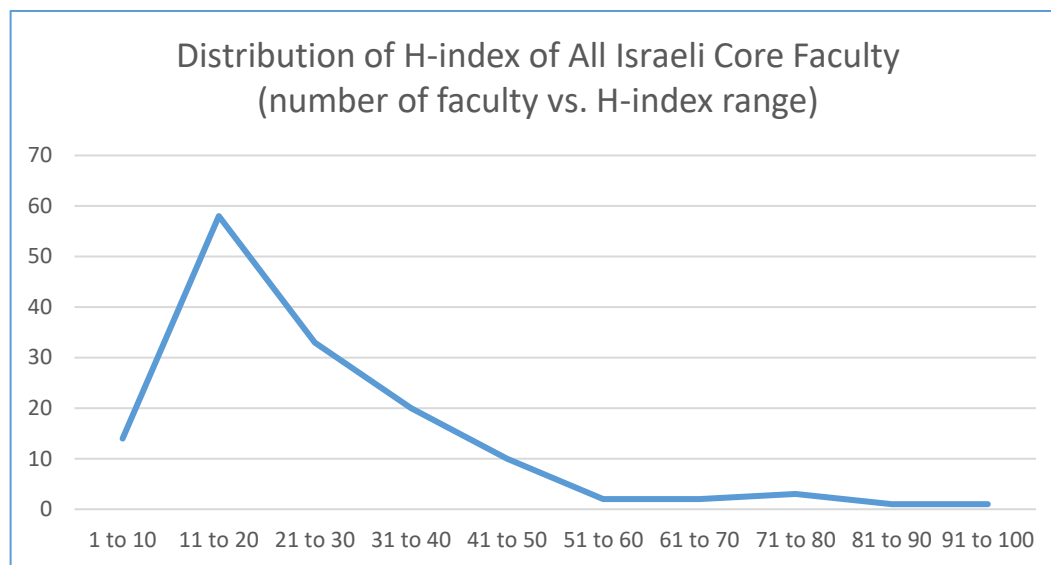
²⁷ המספר הכולל כאן הוא 42 לעומת 39 בטבלה הקודמת, בשל חוקרים שזכו בשני מענקי ERC כל אחד.

ניתן לראות כי מספר הזכיות היה גבוה במיוחד במכון ויצמן ובאוניברסיטה העברית, וכי היה שיפור ניכר בזכיות בשנים 2013-2016. רוב הזכיות בשנים אלו היו לחוקרים בתחילת דרכם (StG).

- (i)
- על מנת לערוך השוואה של ישראל עם מדינות אחרות ערכנו שני ניתוחים:
- השוואה של כלל הזוכים בכל סוגי המענקים על פני כל השנים 2007-2016:
- השוואה בינלאומית של מספר זוכי ה-ERC בשנים 2007-2016 בתחומי המדעים הפיזיקליים וההנדסה PS&E (סה"כ 3,196 כאלו), אשר בתיאור מחקרם מופיעה המילה Quantum (בסה"כ 623 כאלו).
- מתוך 623 המענקים הקשורים לקוונטום, 27 (המהווים 5%) הוענקו לישראלים. במדד זה ישראל נמצאת ב-8 יחד עם אוסטריה (הנתונים בטבלה ה-7. בנספח ה'). **כלומר, בין זוכי ה-ERC בתחומי הקוונטום, שיעור החוקרים הישראלים הוא גבוה, וזאת למרות הפערים העצומים בגודל קהילת המחקר בין ישראל למדינות האחרות.**
 - אפשר להשוות מדד זה לחוזקה היחסית של כל מדינה בתחום ה-PS&E (מדעים פיזיקליים והנדסה) בכללותו. אם נעשה זאת נראה שמתוך סך 3,196 מענקים, חוקרים ישראלים זכו ב-134 מענקים המהווים 4%, עדיין בדירוג #8 (הנתונים בטבלה ה-8. בנספח ה'). **כלומר בתחומי הקוונטום ישראל אפילו יותר חזקה מאשר בתחומי המדעים הפיזיקליים וההנדסה בכללותם.**
 - מדד נוסף הוא – לכל מדינה אחוז מתוך המענקים בתחומי המדעים הפיזיקליים וההנדסה, אשר קשורים לתחום הקוונטום (אשר בתיאור נושא המענק מופיעה המילה Quantum). אם נסתכל על מדד זה באותן 10 מדינות, נראה כי ישראל נמצאת במקום גבוה יותר מאשר במדדים הקודמים (דרוג #5), **כלומר מתוך המענקים שישראל מקבלת, אחוז גבוה יחסית למדינות אחרות הוא בתחומי ה-QST (הנתונים בטבלה ה-9. בנספח ה').**
- (ii)
- התמקדות באיכותם של חוקרים צעירים בתחום בשנים האחרונות:**
- השוואה בינלאומית של מספר זוכי ה-ERC מסוג StG בשנים 2013-2016 בתחומי המדעים הפיזיקליים וההנדסה PS&E (סה"כ 628 כאלו), אשר בתיאור מחקרם מופיעה המילה Quantum (בסה"כ 120 כאלו).
- כלל המדינות זכו כאמור ב-120 מענקים כאלו. מתוכם 10 (המהווים 8%) הם ישראלים. בדירוג המדינות המובילות במדד זה, ישראל היא במקום #4 מיד אחרי גרמניה, צרפת ובריטניה (נתונים בטבלה ה-10. בנספח ה'). **כלומר, למרות גודל קהילת המחקר הקטן יחסית של ישראל, כשמתמקדים בחוקרים הצעירים המצטיינים בתחום ה-QST בשנים האחרונות, ישראל חזקה באופן יוצא דופן וממוקמת מיד אחרי מדינות עם קהילות מחקר גדולות משמעותית.**
 - אפשר להשוות מדד זה לחוזקה היחסית של חוקרים צעירים בכל מדינה בתחום ה-PS&E בכללותו בשנים האחרונות. אם נעשה זאת נראה (נתונים בטבלה ה-11. בנספח ה'), שמתוך סך 628 מענקים כאלו, חוקרים ישראלים זכו ב-7% מהמענקים וישראל בדירוג אחד יותר נמוך (#5). **כלומר המדענים הצעירים בישראל בתחומי הקוונטום, אפילו יותר חזקים מאשר החוקרים הצעירים בישראל בתחומי המדעים הפיזיקליים וההנדסה בכללותם בשנים האחרונות.**
 - מדד נוסף הוא האחוז המסוים מתוך מענקי StG בשנים 2013-2016, בתחומי המדעים הפיזיקליים וההנדסה, הקשור לתחום הקוונטום (בתיאור נושא המענק מופיעה המילה Quantum). אם נסתכל על מדד זה באותן 11 מדינות ניתן לראות כי ישראל מקבלת, אחוז גבוה יחסית של מענקים בתחומי ה-QST

(22% מהמענקים הישראלים הנ"ל קשורים לקוונטום, מה שמציב את ישראל בדירוג #4 במדד זה מתוך 10 המדינות המובילות במספר מענקי QST מהסוג המדובר - אחרי דנמרק, אוסטרליה וגרמניה – הנתונים מופיעים בטבלה ה-12 בנספח ה'). **כלומר מתוך המענקים שחוקרים צעירים ישראלים מקבלים, אחוז גבוה יחסית למדינות אחרות הוא בתחומי ה-QST.**

(ג) ניתוח H-index:



תרשים 3.10: התפלגות מס' חוקרי הליבה ב-QST בישראל ע"פ H-index

מדד מקובל באקדמיה, גם אם שנוי במחלוקת, למדידת תפוקה ואימפקט מדעי של חוקרים הוא ה-H-index²⁸. ערכו ניתוח של ערכי ה-H-index לאותם 144 חוקרים אשר סומנו כחוקרי ליבה על ידי אוניברסיטאות המחקר. להלן ההתפלגות המתקבלת (בציר x טווחים של ערכי H-index ובציר y מספר החוקרים אשר המדד שלהם נמצא באותו טווח):

יש לציין שני מאפיינים של ההתפלגות:

²⁸ ה-H-index הוא מדד ברמת החוקר הבודד, אשר מנסה לבטא שילוב של התפוקה המדעית שלו עם האימפקט המדעי (בדמות ציטוטים לפרסום). לחוקר משויך מדד h אם פרסם h מאמרים, אשר כל אחד מהם צוטט לפחות h פעמים. מדד זה הוצע ב-2005 ע"י הירש – פיזיקאי מ UCSD. לשם קבלת סדר גודל, לפי הירש, לפיזיקאים h~12 הוא ערך טיפוסי לקבלת קביעות באוניברסיטאות מחקר מובילות, h~18 ערך טיפוסי לקבלת פרופסורה מלאה, h~15-20 ערך שמתאים לחברות ב American Physical Society ו h>45 מתאים לחברות באקדמיה הלאומית האמריקאית למדעים; הוא גם גורס שאחרי 20 שנות מחקר, למדען מצליח יהיה h~20, למדען יוצא דופן h~40 ולמדען מיוחד h~60.

יש לציין כי למדד זה מספר מאפיינים, חסרונות ומגבלות שחשוב לקחת בחשבון: (א) קשה להשוות אותו בין חוקרים מתחומים שונים, בשל השוני בנהגי הציטוט בתחומים שונים; (ב) המדד מוטה באופן טבעי לטובת חוקרים ותיקים, ולרעת חוקרים צעירים; (ג) המדד נותן ערך נמוך לחוקרים עם מעט פרסומים, גם אם היו יוצאי דופן בחשיבותם המדעית; (ד) המדד אינו מתחשב במיקום החוקר ברשימת כותבי המאמר; (ה) המדד מושפע מציטוטים עצמיים.

בניתוח אשר אנו עורכים בפרק זה אנו מניחים כי בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטים – גם אם מדובר בדיסציפלינות שונות – מדד ה-h-index של חוקרים שונים הינו בר השוואה. עם זאת ברור כי עדיין יש הבדלים בנהגי הציטוט שבין התחומים, ומכאן המוגבלות שבניתוח המוצע.

- i. ה-H-index הממוצע על פני כל החוקרים הוא 25 – ערך גבוה יחסית (ראה קנה מידה להשוואה בהערת שוליים 27) והנפוץ ביותר הוא בטווח של 20-11. ערך זה מושפע גם מכך שרבים מהחוקרים בתחום הם צעירים יחסית אקדמית (לכ-75% נותרו למעלה מעשר שנים עד פרישה צפויה).
- ii. ה-H-index המקסימלי הוא 94. ל-19 חוקרים (שהם 13% מסך חוקרי הליבה בתחום) יש מדד של 41 ומעלה, שנחשב כאמור (ראה הערת שוליים 27) לערך של מדען יוצא דופן לאחר כ-20 שנות עשייה מדעית. כלומר, יש בישראל בתחום שיעור גבוה יחסית של חוקרים מעולים.

3.1.2.3 מסקנות עיקריות

- מכלל הניתוחים שהוצגו בסעיפים הקודמים לגבי היקף ואיכות המחקר האקדמי בתחום בארץ ניתן לזקק מספר מסקנות, שתשמנה כנקודות מוצא לתכנית הלאומית שתתואר בפרק 5:
- (א) לפי דיווחי המוסדות, יש כיום כ-144 חוקרים בארץ, אשר QST הינו בליבת המחקר שלהם (מתוכם כ-11 אמריטי). הערכה ריאלית יותר של הוועדה היא כ-110 חוקרים.
- (ב) רוב המחקר בארץ נעשה היום במסגרת המחלקות לפיזיקה, ויחסית מעט מאוד במדעי המחשב ובמתמטיקה.
- (ג) מחקר רב בתחומי החישובים הקוונטיים והחומרים הקוונטיים, ומשמעותית פחות בתחומי החישוב הקוונטי, תקשורת קוונטית, סימולטורים קוונטיים ועקרונות חדשניים של תורת הקוונטים עם השלכות לטכנולוגיה.
- (ד) 1. בהשוואה עולמית, חוקרים ישראלים פעילים מאוד בתחומי מדעי המחשב, המתמטיקה והפיזיקה.
2. הפרסום הישראלי הממוצע במדעי החומרים, ננו-מדע וננו-טכנולוגיה, כימיה ופיזיקה הוא מצוטט מאוד.
3. בתחומי מדעי המחשב והפיזיקה יש מצוינות ישראלית מיוחדת: שיעור גבוה מאוד של פרסומים ישראלים מבין הפרסומים המצוטטים ביותר בעולם.
- (ה) בתחומי ה-QST, שיעור החוקרים הישראלים המצטיינים הוא גבוה מאוד בהשוואה למדינות אחרות, ובהשוואה לתחומי מדעים פיזיקליים והנדסה אחרים בארץ. הדבר נכון עוד יותר כשמסתכלים על חוקרים צעירים בתחום.
- (ו) מבין החוקרים הישראלים בליבת ה-QST, לחוקר הממוצע תפוקה ואימפקט מדעי גבוהים יחסית; שיעור גבוה יחסית מבינים (10%-15%) הם חוקרים יוצאי-דופן מבחינת תפוקה ואימפקט מדעי.

3.1.3 חוקרים חדשים – היצע מוערך

- ב-5 השנים הקרובות צפויים לפרוש מספר חוקרים בתחום ומנגד צפויים להצטרף חוקרים חדשים. חוקרים אלו יכללו:
- (א) תלמידי דוקטורט (שנים 3,4,5) ופוסט-דוקטורנטים העוסקים בתחום ויקבלו משרה כסגל אקדמי חדש בארץ.
- (ב) תלמידי דוקטורט (שנים 3,4,5) ופוסט-דוקטורנטים, העוסקים בתחומים סמוכים, יבחרו להמשיך ולחקור בתחום, ויקבלו משרה כסגל אקדמי חדש בארץ.
- (ג) חברי סגל אקדמי קיימים מתחומים קרובים/ משיקים, אשר יבחרו לשנות את תחום מחקרם ולהתמקד בתחומי ה-QST.
- (ד) מספר קטן של חברי סגל שאינם ישראלים או כאלו הלומדים לקראת דוקטורט במוסדות בחו"ל.

ע"פ הנתונים וההנחות המפורטים בנספח 7.ג, אנו מעריכים שב 5 השנים תשע"ח-תשפ"ב²⁹ המספרים בקטגוריות א'-ג' מעלה יהיו :

- פרישות : מתוך החוקרים שבליבת התחום צפויים לפרוש כ-17 ע"פ הפילוח הבא :
 - כ-8 בפיזיקה
 - כ-0 בהנדסה
 - כ-5 בכימיה
 - כ-1 במדעי המחשב
 - כ-2 במתמטיקה
 - כ-1 ב"אחר"
- חוקרים חדשים מקטגוריה א' : כ-42 בפילוח הבא
 - כ-13 בפיזיקה
 - כ-21 בהנדסה
 - כ-5 בכימיה
 - כ-1 במדעי המחשב
 - כ-1 במתמטיקה
 - כ-1 ב"אחר"

ללא צעדי התערבות אנו צופים בעוד 5 שנים את מספרי חברי הסגל הבאים בליבת התחום :

תחום	סגל ליבה 2018	סגל ליבה צפוי עוד 5 שנים (2023)
פיזיקה	69 + 3 אמי'	74 (+7%) + 11 אמי'
הנדסה	30 + 4 אמי'	51 (+70%) + 4 אמי'
כימיה	23 + 4 אמי'	23 (+0%) + 9 אמי'
מדעי המחשב	4 + 1 אמי'	4 (+0%) + 2 אמי'
מתמטיקה	5	4 (-20%) + 2 אמי'
אחר	1	1 (+0%) + 1 אמי'

²⁹ חשוב לציין כמה הסתייגויות לניתוח זה :

(א) הנחנו כי היחס בין מס' דוקטורנטים למס' חברי סגל נקלטים בתחומי ה-QST יהיה דומה לזה בתחומי המחקר הרחבים של הסגל (מדעים פיסיקליים, הנדסה ואדריכלות, מדעי המחשב ומתמטיקה) ; עם זאת, בהסתמך על המגמה המסתמנת, ככל הנראה בתחומי ה-QST ניתן לצפות ליחסים נמוכים יותר (כלומר ליותר גיוסים)

(ב) מדובר במספרים קטנים ולכן השגיאה האפשרית משמעותית.

סה"כ	133 + 12 אמ'	157 (+18%) 29+ אמ'
------	--------------	-----------------------

טבלה 3.11: צפי מס' אנשי הסגל בליבת התחום בעוד 5 שנים, לפי דיסציפלינות

ניתן לראות אם כן כי ללא צעדי התערבות מיוחדים צפוי גידול של כ-18% במספר חברי הסגל בתחומי ה-QST (שאינם אמריטי). מספר זה הוא פחות ממחצית תכניות הגיוס של כלל המוסדות ולכן צפוי מחסור. רובו של גידול זה צפוי להגיע דווקא מתחומי ההנדסה. בשאר התחומים הגידול הצפוי הוא קטן או אפסי. גידול במס' חברי הסגל בתחום יוכל להגיע בטווח 5 השנים הקרובות בעיקר מחוקרים מסוג ג': חברי סגל אקדמי קיימים מתחומים קרובים/ משיקים, אשר יבחרו לשנות את תחום מחקרם ולהתמקד בתחומי ה-QST.

אם נרחיב את היריעה ונסתכל על 10 השנים הבאות, הרי שמספר הפורשים הצפויים יגדל לכ-27 והחוקרים החדשים שיכנסו לתחום יהיו מכמה סוגים:

- (א) תלמידי דוקטורט נוכחיים (שנים 1,2), תלמידי מאסטר נוכחיים (שנים 1,2) ותלמידי שנה ג' של תואר ראשון אשר היום עוסקים או לא עוסקים בתחום ואשר יקבלו משרה כסגל אקדמי חדש בארץ בטווח של 5-10 שנים מהיום.
 - (ב) חברי סגל אקדמי קיימים מתחומים קרובים/ משיקים, אשר יבחרו לשנות את תחום מחקרם ולהתמקד בתחומי ה-QST.
 - (ג) מספר קטן של חברי סגל שאינם ישראלים או כאלו הלומדים לקראת דוקטורט במוסדות בחו"ל.
- כמובן שמספרים אלו יושפעו במידה קריטית ממהלכי התערבות ארוכי טווח שיבוצעו.

3.1.4 תכניות הכשרה

תואר ראשון:

קורסים בתחומי ה-QST ניתנים תמיד כחלק מלימודי תואר ראשון בפיזיקה או בתארים משולבים של פיזיקה ומקצוע אחר. לגבי תארים בתחומים אחרים התמונה משתנה בין המוסדות, אך ככלל אין חובת קורסים בסיסיים ואין היצע מספק של קורסים בתחום. לפיכך, סטודנטים שאינם לפיזיקה כמעט ואינם נחשפים לתחום³⁰.

³⁰ בטכניון בפקולטות הרלוונטיות מתקיימים קורסים במכניקה קוונטית, אך הם זקוקים לשדרוג ולהתאמה כקורסים ייעודיים לסטודנטים בפקולטות השונות; בפקולטה לכימיה קיימים קורסים; מאחר שכשליש מתלמידי הנדסת חשמל בטכניון לומדים גם את התכנית הרגילה בפיזיקה, הרי שרבים בכל זאת נחשפים לתחום ברמה מספקת. במדעי המחשב והנדסת מחשבים אין כמעט הכשרה מתאימה.

באוניברסיטה העברית ישנם 5 קורסים בנושאי קוונטים הניתנים מדי שנה ופתוחים לתלמידי תארים שאינם פיסיקה (3 לתלמידי הנדסת חשמל ומחשבים - אופטיקה קוונטית, מבוא לקוונטים למהנדסים, טכנולוגיות קוונטיות; כימיה קוונטית ושימושיה לתלמידי כימיה ומבוא לחישוב קוונטי למסלול מדעי המחשב). בנוסף ישנם קורסים הניתנים על בסיס דו-שנתי

תארים מתקדמים:

בתארים המתקדמים התמונה קצת טובה יותר. מעבר לתלמידי הפיזיקה שנחשפים לקורסים בתחום³¹, סטודנטים מתחומים אחרים, שצריכים ללמוד נושאים במדע וטכנולוגיה קוונטיים לצרכי המחקר שלהם בדרך כלל נשלחים ע"י המנחים ללמוד קורסים כאלו ברחבי הקמפוס. ברוב המוסדות הקורסים המתקדמים מוצעים בעיקר ע"י המחלקה לפיזיקה. זאת אומרת שבהרבה מקרים הקורסים יניחו ידע מוקדם שלא דווקא קיים, ולא יהיו מותאמים לרקע של סטודנטים שאינם מפיזיקה. כמו כן, בדרך כלל חסרים קורסים בתחומים כמו תאוריה של חישוב קוונטי (שמתאים להיות מוצע ע"י המחלקה למדעי המחשב) או אלקטרוניקה קוונטית.

בהקשר זה יש לציין כמה יוצאי דופן, כמו למשל אוני' ת"א בה בהנדסת חשמל ניתן קורס בסיס "אלקטרוניקה קוונטית"; בכימיה - הקורס כימיה קוונטית מתקדמת וקורסים מתקדמים כגון יסודות התהודה המגנטית, מבוא לתורת מצב מוצק, דינמיקה קוונטית וספקטרוסקופיה מתקדמת ומצב מוצק של מערכות ננוסקופיות מקוונטיות; במדעי המחשב - אחת לכמה שנים ניתן הקורס מיחשוב קוונטי.

יש גם לציין כי באריאל טרם נפתח תואר שני בפיזיקה, ולכן מוצעים שם כיום בעיקר קורסים בכימיה קוונטית ואלקטרוניקה קוונטית לתואר שני. בעתיד מתוכננים להיפתח קורסים לתואר שני במכניקה קוונטים מתקדמת ותורת השדות.

באוניברסיטת תל אביב

- בתואר ראשון בהנדסת חשמל יש קורס חובה בסמסטר שלישי "פיזיקה קוונטית ומצב מוצק". קורסים מתקדמים יותר כגון "התקנים אלקטרוניים" ו"מבוא ללייזרים" מתבססים בחלקם על קורס זה;
- בתכנית במדע והנדסה של חומרים בכימיה יש קורס חובה בסמסטר הרביעי "קוונטים וקשר כימי";
- בכימיה - יש קורס חובה "קוונטים וקשר כימי" וקורס מתקדם הנקרא "כימיה קוונטית". קורס בספקטרוסקופיה. קורסי בחירה - דינמיקה קוונטית, מצב מוצק של מערכות ננוסקופיות מקוונטיות.

היום באוניברסיטה יש כ-50 סטודנטים שלומדים הנדסת חשמל ופיזיקה ולכן לומדים פיזיקה קוונטית ברמה גבוהה. יש כ-50 סטודנטים שלומדים מדעי המחשב והנדסת חשמל ואינם נחשפים לנושא (פרט לקורס של שדות וגלים שאינו מספק), ויש כ-250 סטודנטים שלומדים רק הנדסת חשמל ואינם נחשפים לתחום. במדעי המחשב יש נכון להיום קורס שניתן אחת לשנתיים בחישוב קוונטי.

בראייה קדימה, האוניברסיטה שוקלת לפתוח קורס חדש ב quantum information לתלמידי מדעי המחשב/הנדסת חשמל/מתמטיקה ואולי גם קורס אונליין על יסודות תורת הקוונטים.

באוניברסיטת בר-אילן התלמידים במסלול הדו-ראשי פיזיקה-הנדסה לומדים פיזיקה קוונטית בצורה נרחבת כפיזיקאים, וכן אופטיקה מודרנית ולייזרים. תלמידים אלו גם משתתפים כפיזיקאים בהשתלמויות קיץ במעבדות המחקר ונחשפים למחקר ב-QST. כל התלמידים בהנדסת חשמל לומדים קורס בסיסי בתורת הקוונטים. קורסים במצב מוצק, התקנים מוליכים למחצה, לייזרים ואופטיקה מודרנית ניתנים במסלולי ההתמחות המתאימים בהנדסה.

באוניברסיטת בן-גוריון מוצעים הקורסים Charge and Energy transport through nanoscale systems, photovoltaic and solar energy uses, advanced quantum mechanics. החוקרים בתחום העלו במיוחד את הצורך להשלים ידע לתלמידי הנדסת חשמל, מאחר שכיום קוונטים 2 לא ניתן / לא מתאים לתלמידי הנדסה.

באוניברסיטת חיפה פרופ' שי גירון ילמד בסמסטר אביב השנה (תשע"ח) קורס ניסיוני הניתן פעם ראשונה באוניברסיטה בנושא "חישובים קוואנטים" לתלמידי החוג במתימטיקה.

³¹ האוניברסיטה העברית מיוחדת בכך שפתחה תואר שני בפיזיקה (ובפיזיקה יישומית) עם התמחות בטכנולוגיה ואינפורמציה קוונטית.

3.2 התכניות האסטרטגיות במוסדות השונים ל-5 השנים הקרובות

בתגובות לבקשת המידע ששלחה הוועדה לאוניברסיטאות המחקר, דיווחו כל האוניברסיטאות על כוונתן להשקיע בפיתוח התחום ב-5 השנים הקרובות, להמשיך ולפתח מרכזים קיימים אם יש או להקים מרכזים חדשים לנושא. בחלק מהאוניברסיטאות מדובר בתכניות מוסדיות אסטרטגיות אשר גובשו מזה זמן, ובחלקם אין ספק כי פעולות ות"ת והוועדה האיצו את תהליכי החשיבה בנושא.

כלל דיווחי האוניברסיטאות (לא כולל עלויות של מלגות לתלמידי מחקר ופוסט-דוקים) מסתכמים להערכה הבאה לתקופה של 5 שנים :

מס'	הערכת עלות (מיליון ש"ח)	
קליטת סגל אקדמי	54	150
ציוד תשתיתי (ללא בינוי)		265
תוספת סגל טכני	52	85
סה"כ		500

טבלה 3.12: סיכום עלויות קליטת סגל אקדמי, תשתיות וסגל טכני לפי דיווחי האוניברסיטאות לגבי כוונות הפיתוח שלהן בתחום ל-5 השנים הקרובות

מבחינת תפיסתן את חשיבות התחום כקטר צמיחה פוטנציאלי למוסד : אוניברסיטת חיפה רואה ב"מדע וטכנולוגיה קוונטיים" קטר צמיחה פוטנציאלי של האוניברסיטה בעדיפות דומה למספר תכניות פיתוח אחרות, וכל שאר אוניברסיטאות המחקר רואות בתחום קטר צמיחה פוטנציאלי בעדיפות גבוהה יחסית לתמיכה בתוכניות פיתוח אחרות במוסד.

להלן סיכום קצר של הצהרות הכוונות ששלחו נשיאי האוניברסיטאות לוועדה :

א. האוניברסיטה העברית

- קליטה של כ-10 חוקרים (כ-7 נסיונאים וכ-3 תיאורטיקנים) בדגש על חוקרים רב תחומיים.
- הקמה ושדרוג של מספר תשתיות תומכות לטובת המחקר הניסיוני ב-QST, ביניהן מעבדת אפיון וייצור ממשקים קוונטים בשכבות דקות, מעבדת אלקטרוניקה ובקרה, מערכת סינכרון ולייזר מסרק ושדרוג בית המלאכה המכני.
- קליטה והכשרה של כ-6 אנשי סגל טכני חדשים.
- הרחבת תכנית המוסמך למדע וטכנולוגיה קוונטיים למכונים נוספים (מעבר לפיזיקה ופיזיקה יישומית). תכנית זו נמצאת בהרצה ובעוד כשנה יוסקו מסקנות על איכות ההוראה וההכשרה הקיימת ויוצעו שיפורים. יעשה מאמץ לגייס עוד סטודנטים כדי לתמוך בהיקף הרצוי למחקר.
- הקמת post-doc hub למשיכת וגיוס פוסט-דוקטורנטים מעולים.
- הקמה של קבוצות מיקוד רב תחומיות ע"י מענקי הזנק פנימיים קטנים, כדי לאפשר לחוקרים להתניע שיתופי פעולה ברמת ההיתכנות.
- המשך פיתוח השת"פ הבינלאומי עם IQST (המרכז הקוונטי של אוניברסיטת ULM ו-MPQ בשטוטגרט) ועם ETH והרחבת תכניות למלגות משותפות.

- עידוד יזמות בתעשייה ע"י הקמה והשתלבות ביוזמות HU-START וחברת היישום (מערך התמיכה הכללי START של האוניברסיטה בנושא זה). איגוד מערך התמיכה הנ"ל בכל הקשור למחקר יישומי והקמת חברות קוונטיות במסגרת ייעודית.

ב. הטכניון

- קליטה של 7 חברי סגל חדשים בתחום, מהם 2 בכירים ו-5 צעירים.
- שדרוג והרחבת תשתיות המחקר הקיימות בעיקר סביב גידול חומרים דו-ממדיים ועל-מוליכים : שדרוג יכולות הפבריקציה במרכז לננו-אלקטרוניקה, אפיון חומרים, שדרוג מרכז מיקרוסקופיית האלקטרונים ושדרוג מערכות אפיון לאופטיקה קוונטית.
- קליטה והכשרה של 5-10 חברי סגל טכני.
- פתיחת תכניות לימוד מעודכנות לתואר ראשון בפקולטות ההנדסיות שמטרתן להעמיק את הידע בשטחי הקוונטום השונים.
- הקצאת מלגות לתלמידי מחקר ופוסט-דוקים.
- פיתוח תכנית נבט פנימית ובשיתוף פעולה עם מוסדות אחרים בארץ ובעולם.
- המשך והעמקת שיתופי פעולה בינלאומיים וכן עם התעשייה ומערכת הביטחון.

ג. אוניברסיטת בר-אילן

- קליטה של 10 חברי סגל חדשים בתחום של טכנולוגיות קוונטיות – במחלקות לפיזיקה, הנדסה ומדעי המחשב ומתמטיקה שימושית.
- יצירת מרכז פיסי למכון (בנין חדש או הקצאה ושיפוץ של בנין קיים).
- רכישת ציוד משותף למרכז החדש (ליתוגרפיה, ננו-פבריקציה, מיקרוסקופיה, גידול יהלומים ועוד).
- קליטת 10 מהנדסים ותומכי מחקר למעבדות מחקר חדשות, מרכז ציוד משותף ומעבדות הוראה חדשות.
- בנית מס' תכניות לימוד חדשות ומשולבות בין פיזיקה, הנדסה ומדעי המחשב להענקת תואר להנדסה קוונטית וליצירת התמחות בחישוב קוונטי.
- הענקת מלגות לתלמידי מחקר ופוסט-דוקים.
- הקמת קרן תמיכה תחרותית לעידוד בדיקות היתכנות של מחקרים בין-תחומיים בין חברי המרכז.
- ארוח אורחים מחו"ל לטובת קידום שת"פ קיימים וחדשים.
- עזרה לחברי המרכז בהקמת שת"פ עם התעשייה ומערכת הביטחון במסגרת תמיכה קיימת באוניברסיטה.

ד. אוניברסיטת בן-גוריון

- קליטה של לפחות 4-5 חברי סגל חדשים בתחום.
- הקמת מעבדות חדשות בבניינים החדשים בקמפוס הצפוני למדע וטכנולוגיה קוונטיים וחדרים נקיים.
- בניית מעבדות משותפות וציוד תשתיתי כלל-אוניברסיטאי.
- המשך שתוף פעולה עם התעשייה (כולל עם החברות אשר בפארק המדע הסמוך לקמפוס) ועם מערכת הביטחון.

ה. אוניברסיטת תל אביב

- הקמת מרכז מחקר ייעודי לנושא QST בתוך שנה-שנתיים.
- קליטה של כ-6-8 חברי סגל, בתחומי הפיזיקה, הנדסת החשמל, הכימיה ומדעי המחשב - כמחציתם ניסיונאים וכמחציתם תאורטיקאים.
- רכש של מיקרוסקופ אלקטרוני חודר (TEM) ותשתיות מחקר נוספות.
- קליטת 2 מהנדסי מעבדה.
- שיפור תכנית ההכשרה – תוספת קורסים מתקדמים לבתי הספר לפיזיקה, הנדסת חשמל וכימיה; יישקל פיתוח קורס חדש לתואר ראשון בנושאים אלגוריתמיים של מחשוב קוונטי; ישקל פיתוח של קורס מקוון (MOOC) על עקרונות תורת הקוונטים.
- חלוקת 5-10 מלגות פוסט-דוקים בתחום.
- עידוד הקצאת מענקי Seed כשעיקר התמיכה מקרנות חיצוניות.
- עידוד שת"פ מחקרי בנ"ל תוך מימון פנימי ראשוני.
- המשך קידום שת"פ עם התעשייה ו/או מערכת הביטחון

ו. מכון ויצמן למדע

- המכון נמצא בתהליכי הקמה של 2 מכונים רלוונטיים אשר יושלמו בשנתיים הקרובות: (א) מכון למדע וטכנולוגיה קוונטיים – יתארח בפקולטה לפיזיקה ויכלול 3 מוקדים – מצב מוצק QST, פיזיקה אטומית מולקולרית ואופטית (AMO), QST, מרכז לתאוריה של טכנולוגיה ומדע קוונטיים (ב) מכון לחומרים מתקדמים וחכמים אשר יארח יחידה של "חומרים קוונטיים" - המכון לחומרים מתקדמים יתארח בפקולטה לכימיה.
- קליטה של כ-5 חברי סגל חדשים בתחום.
- הקמת תשתיות מחקר מרכזיות וביניהן מתקן ננו-פבריקציה חדש, מיקרוסקופיית אלקטרונים מתקדמת, כלי פבריקציה פוטוניים מתקדמים, מתקן שעון מרכזי וסורק תדרים אופטי ועוד.
- קליטה של כ-10 עמיתי מחקר ומהנדסים.
- קידום שתופי פעולה בין-תחומיים בקמפוס והמשך יצירת וקידום שת"פ בינלאומיים (כדוגמת הכנס המשותף עם ETH).
- הרחבת שתופי הפעולה עם מערכת הביטחון והתעשייה.

ז. אוניברסיטת אריאל

- הקמת מרכז לפיתוח ומחקר בנושא, שיוקם מתחת למרכז המאצים.
- קליטה של כ-6 חברי סגל חדשים.
- רכישת ושדרוג תשתיות ביניהן – מערכת פבריקציה לננו-טכנולוגיה, מנדפות, מערכת למיחזור/ניזול הליום ומגבר ללייזר פמטו-שניות.
- קליטת 3 מהנדסים וטכנאי חדשים.

- הוספת קורסים לתכנית הלימודים לתארים מתקדמים, ובהמשך גם קורסים נוספים כמו חישוב קוואנטי.
- מלגות ל 5 פוסט-דוקטורנטים ולכ-20 תלמידי מאסטר ודוקטורט ממגוון תחומים (פיזיקה, הנדסת חשמל ואלקטרוניקה, כימיה, מכטרוניקה, מדעי המחשב).
- עידוד שת"פ במחקר בין-תחומי במסגרת המרכז.
- העמקת שת"פ בני"ל קיימים ויצירת חדשים.
- המשך שת"פ עם מערכת הביטחון והוא"א ויצירת שת"פ עם תעשייה.

ח. אוניברסיטת חיפה

- בימים אלה נשלמת הקמתו של "המרכז לחקר פיזיקה תאורטית ואסטרופיזיקה - אוניברסיטת חיפה", אשר ירכז בשנים הקרובות את המחקר ב-QST באוניברסיטה.
- אוניברסיטת חיפה מעבה בימים אלה מערך של חוקרים תיאורטיים בתחום הטכנולוגיות הקוואנטיות. המוסד מתכוון לקלוט עוד 5 חברי סגל חדשים במחקר תיאורטי בפיזיקה, מתמטיקה ומדעי המחשב.
- שדרוג משמעותי של היכולת החישובית באוניברסיטה ע"י הרחבה של אשכול המחשבים מרובה-המעבדים הקיים.
- קליטת איש טכני ייעודי למתן תמיכה, וגיוס מנהלן למרכז.
- הכפלת שטח התשתיות הפיזיות העומדות לרשות המרכז
- הצעת תכנית לתואר ראשון B.Sc. במדעים מסלול פיזיקה-מדעי המחשב.
- טיפוח שת"פ עם חוקרים מחו"ל.
- מתן סדרת הרצאות לקהל הרחב.

3.3 חסמים וחסרים לאומיים

במהלך עבודת הוועדה והפגישות שקיימה, עלו מספר נושאים אשר מעכבים את התפתחות התחום באקדמיה בארץ. להלן רשימה של צווארי הבקבוק העיקריים:

- **תשתיות מחקר חסרות** - בכלל המוסדות מצטייר מחסור בתשתיות פבריקציה ואפיון מתקדמות. בנוסף לכך מצטייר מחסור בתשתית לאומית רחבה בעיקר בנושאי זמן ותדר וכן בפלטפורמה לאומית עליה ניתן יהיה לבצע ניסויים בתקשורת קוונטית.
- **תשתיות הוראה** – הכשרת כוח אדם מיומן מצריכה חשיפה להיבטים הניסיוניים של התחום כבר במהלך הלימודים. כיום תשתית זו חסרה בכלל המוסדות ובכלל התארים.
- **נוכחות נמוכה של מדעי המחשב ומתמטיקה בתחום.**
- **מחסור בתלמידי מחקר בתחום שימשו כעתודה איכותית לגידול משמעותי במספר חברי הסגל בתחום³².** הדבר נכון במיוחד לתחומים כמו כימיה או מתמטיקה בהם אין הרבה חברי סגל העוסקים בתחום שיכולים להנחות סטודנטים כנ"ל. בתחומי מדעי המחשב וההנדסה מתווספת לקושי זה תחרות

³² ראה ניתוח כמותי בפרק 3.1.3

עם התעשייה - גובה המלגות המוצעות באקדמיה נמוך משמעותית מהשכר המוצע בתעשייה ורבים מבוגרי תואר ראשון ושני עוזבים את האקדמיה.

- **חוסר בהכשרת סטודנטים המשלבת את תחומי הידע הרלוונטים, החל מהתואר הראשון:** הכשרה מיטבית בתחום ה-QST בתואר ראשון, רצוי שתכלול קורסי בסיס בשני תחומי ידע רלוונטיים ל-QST או יותר (למשל פיזיקה ומדעי המחשב או פיזיקה והנדסת חשמל). נכון להיום, מעט סטודנטים לומדים תארים משולבים במהלך התואר הראשון. מעבר לכך אין כמעט חשיפה במהלך התואר הראשון או תארים מתקדמים לנושא ה-QST מחוץ למחלקות לפיזיקה. בחלק מהמחלקות למדעי המחשב/הנדסה/כימיה במוסדות רווחת גישה המתנגדת להרחבת ההכשרה. גם במחלקות לפיזיקה פעמים רבות הסטודנטים אינם נחשפים לנושאים כגון חישוב קוונטי, ולרוב אינם מקבלים הכשרה במושגי יסוד של מדעי המחשב/הנדסה/כימיה. ההכשרה הצרה במהלך התואר הראשון מהווה חסם הן להכשרת כוח אדם מתאים ומעודכן למשק והן לבניית עתודת סגל איכותית בתחום.
- **מחסור בפוסט-דוקים בינלאומיים ברמה גבוהה בתחום** (בדומה למחסור הכללי בארץ במדעי הטבע).
- **רב-תחומיות מוגבלת** ושת"פ מחקרי מוגבל (בתוך מוסדות ובין מוסדות) מקשה על ההתמודדות עם אתגרים מורכבים הדורשים קשת מיומנויות וידע.
- **קושי בגיוס סגל טכני איכותי:** בשל מגבלות רגולציה, השכר המוצע לסגל טכני נמוך משמעותית מהשכר המוצע בתעשייה.
- **מעורבות נמוכה של התעשייה:** מיעוט מימון תעשייתי מצד אחד וקושי בהעברת ידע והכשרה של אנשי תעשייה מצד שני.

3.4 שת"פ עם משרד הביטחון

משרד הביטחון מממן מחקרים בתחום מזה מספר שנים. המימון מוענק בדרך כלל על בסיס אישי, אולם לאחרונה הורחבה התמיכה להקמת מדגים לאומי (ע"י האוניברסיטה העברית). רוב מענקי המחקר ניתנים ע"י מפא"ת, וחלקם גם ע"י ממ"ג, קמ"ג וגופי בטחון בארה"ב. ההיבט הביטחוני מהווה מרכיב מרכזי בצורך בפיתוח התחום במדינת ישראל והתוכנית המתוארת בפרקים 5,6 מתייחסת לכך.

3.5 שת"פ עם התעשייה

מרבית שתופי פעולה עם התעשייה נעשים על בסיסי אישי ולא מוסדי. חלק ניכר משיתופי הפעולה סביב סביב תעשיות ביטחוניות – ביניהן דיווחו המוסדות על שתופי פעולה עם רפא"ל ואקיוביט, אלביט ותעשייה אוירית/רמת"א/אלתא מערכות³³.

שיתופי פעולה נוספים של חוקרים עם חברות ישראליות ורב-לאומיות כוללים את מלנוקס, אינטל, גוגל, GM, ולנטיס, מכתשים אגן, Qlight (שנרכשה ע"י מרק), נורטרופ-גרומן וחברות הזנק שונות³⁴. בולטים בחסרונם שיתופי פעולה עם חברות גלובליות כמו גוגל, מיקרוסופט ו IBM המשקיעות משאבים ניכרים במו"פ מחשוב קוונטי.

³³ מתוך הדיווחים קשה להעריך עד כמה שתופי הפעולה הנ"ל הינם ב-QST או שחלקם נעשים מול חוקרים במרכזי המחקר המוסדיים, אך בתחומים אחרים.

³⁴ כנ"ל

ההיבט התעשייתי ושיתוף הפעולה עם הרשות לחדשנות מהווה מרכיב מרכזי בתוכנית הלאומית המתוארת בפרקים 5,6.

3.6 ממשק לתכנית הדגל האירופית

כפי שהוזכר בפרק 2.4 וכפי שמוצג בנספח 7.ב, האיחוד האירופי הכריז על הקמת תכנית דגל ייעודית לנושא הקוונטום: The Quantum Flagship, תחת תכנית המו"פ האירופית Horizon2020, במסגרתה תשקיע הנציבות האירופית סכום של כ- 1 מיליארד יורו על פני 5-10 שנים. מאחר שישראל היא חברה (Associated Country) בתכנית המו"פ האירופית, כל הקולות הקוראים של תכנית הדגל האירופית יהיו פתוחים גם לישראלים, מה שצפוי למנף את ההשקעות הלאומיות הישראליות בתחום.

האיחוד האירופי החל כבר בהשקעות בנושא קוונטום. ההתחלה הייתה דרך תכנית משותפת (2016-2017) לאיחוד ולמדינות שהיו מעוניינות בכך (QuantERA) בסך כולל של 36M יורו וקול קורא ראשוני להקמת (CSA) Action Coordination and Support בסך 0.5M יורו.

כעת נפתח במסגרת האיחוד האירופי שלב ה-ramp-up (2018-2020) לתוכנית הדגל. בשלב זה יצאו ויוצאים קולות קוראים: ל-CSA ³⁵ (2M יורו ב-2018) ול-Flagship Research & Innovation Actions (130M יורו ב-2018 מתוך זה 110M יורו למינוף העברת ידע מהאקדמיה לתעשייה ו-20M יורו להמשך פרויקטי מחקר ארוכי טווח). כמו כן פורסם קול קורא בסך 15M יורו להקמת Quantum Key Distribution Testbed. בהמשך מתוכננת פעילות המשך של תכנית 2019 QuantERA. מ-2020 תכנס התכנית לשלב היישום המלא עם סדרה של קולות קוראים חדשים. במסגרת הפעילות הקים האיחוד האירופי High Level Steering Committee בשיתוף חוקרים מובילים מהאקדמיה ונציגי חברות מובילות בתחום. הועדה פרסמה ביוני 2017 מסמך יעדים – Quantum Technologies Flagship Final Report.

ברמה הלאומית, איסרד³⁶ – המנהלת הישראלית למו"פ האירופי – דואגת לייצוג ישראל בגופים המנהלים השונים של התכנית – אלו הקיימים ואלו המתוכננים לקום. נכון להיום כלל הגופים המממנים מיוצגים ב-BoF (Board of Funders), אשר יחד עם הנציבות האירופית הוא הגוף מקבל ההחלטות. מתחתיו עומד כיום ה-High Level Steering Committee. עם התחלת שלב "תכנית הדגל" מתוכנן גוף זה להתחלף ב-Strategic Advisory Board - גוף שיהיה אמון על הייעוץ האסטרטגי; מתחתיו יפעלו גופים האמונים על נטוורקינג ותיאום – ה-CSA (Coordination & Support Action) וה-SEB (Science & Engineering Board).

כחלק מפעילות ה-CSA הקיימת כיום, הוקם גוף מייצג טכני (NQN National Quantum Coordinator Network) אשר עזר למנהלי ה-CSA לבנות ולתכנן את מבנה הפעילות של תכנית הדגל וכן נתן המלצות ביחס לנושאים השונים שיש לפתח במסגרת התוכנית.

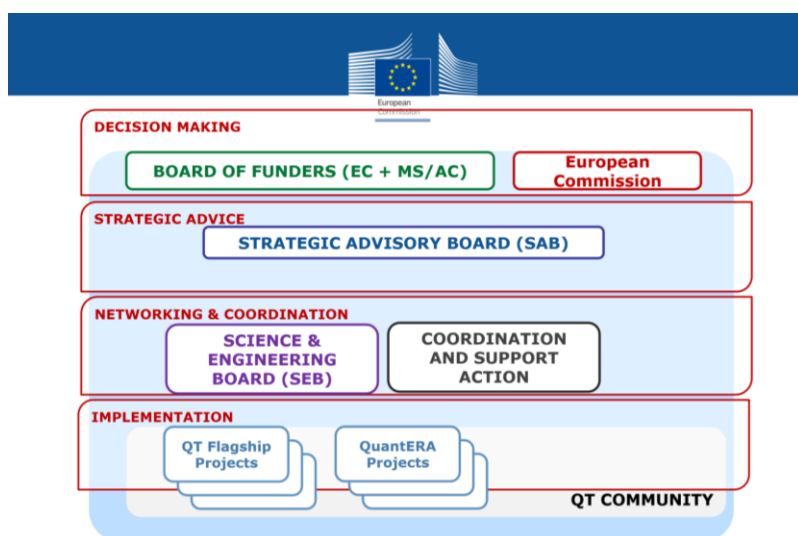
ישראל הצליחה לשלב נציג בגוף ה-NQN (פרופ' נדב כץ מהאוני' העברית) אשר עזר לייצג את עמדות ישראל לקראת פרסום תכנית הדגל. בהמשך הועבר לראשי התוכנית בבריסל שמו של פרופסור ניר

³⁵ Coordination and Support Action

³⁶ איסרד הינה גוף בין משרדי שהוקם ע"י הוועדה לתכנון ולתקצוב (ות"ת) של המועצה להשכלה גבוהה, משרד הכלכלה, משרד המדע והטכנולוגיה, ומשרדי האוצר והחוץ. תפקידיה העיקריים הם:

- קידום שיתופי פעולה בין ישראל לאירופה בתוכניות המו"פ הנושאות ו/או הדו-לאומיות
- פעילות במוסדות השונים של תכניות המו"פ באירופה
- ניהול מערכת ענפה של קשרים עם סוכנויות מקבילות באירופה
- סיוע באיתור שותפים בארץ ובאירופה
- הדרכה בנוגע להצעות מחקר ומעקב אחר הטיפול בהן

דוידסון (מכון וויצמן) מתוך כוונה לשלב ב-HLSC. איסרד בתיאום עם ות"ת, משרד הכלכלה, מפא"ת ושאר בעלי העניין, מנסה לדאוג לנציגות ישראלית גם בגופים האחרים. לשילוב של תכנית לאומית לקידום התחום יחד עם תכנית כלל אירופאית יש יחדיו פוטנציאל לאימפקט משמעותי מאוד על קהילת המחקר הישראלית. יש לציין כי האיחוד מצפה לראות שעלוב וסינרגיה בין התוכניות הלאומיות של כל מדינה ושל האיחוד האירופאי וייתן לעובדה זו משקל מיוחד בניקוד הקולות הקוראים העתידיים.



איור 3.13: מבנה המשימות המוצע של ה FET FLAGSHIP ON QUANTUM

4. עבודת הוועדה

4.1 מינוי הוועדה והמנדט שניתן לה

- כאמור בפרק 2, על מנת לקדם את יוזמת ות"ת לפיתוח המחקר והקמת תשתיות בתחום המדע והטכנולוגיה הקוונטיים, החליטה ות"ת בישיבתה מיום 28.6.17 על הקמת ועדת היגוי, אשר תפקידה **ניסוח והמלצה על תכנית לאומית לפיתוח התחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים במערכת ההשכלה הגבוהה בישראל, בהתאם לנושאים שלהלן, וסיוע בהובלת יישומה:**
1. תחימה מדעית של תחומי המחקר הנכללים תחת "מדע וטכנולוגיה קוונטיים"
 2. אפיון ותעדוף הצרכים המחקריים של הקהילה האקדמית הרלוונטית בארץ לצורך קידום התחום בחומש הקרוב, ומתוך ראייה קדימה לעשור הקרוב
 3. סיוע באפיון ומציאת שותפים לקידום התחום (כגון מפא"ת, רשות החדשנות ומשרד הכלכלה, גופים פרטיים בתעשייה, פילנתרופיה וכיו"ב) וקיום קשר מדעי מול שותפים אלו
 4. סיוע בגיבוש המתווה התקציבי להקצאות הייעודיות לתמיכה בתחום בחומש הקרוב, כולל הקצאת המשאבים הפנימית לכל אחד מהצרכים שאותרו
 5. המלצה על מנגנוני יישום רלוונטיים
 6. במידת הצורך, השתתפות בפורומים הקשורים ל-Quantum Flagship, ולפי הרלוונטיות בפורומים נוספים בעולם אשר ישראל תהיה חברה בה
 7. ליווי בשלבי היישום של התכנית וייעוץ שוטף ככל שיידרש

חברי הוועדה נבחרו בהיותם אנשי אקדמיה בכירים ממגוון תתי התחומים הרלוונטיים תחת "מדע וטכנולוגיה קוונטיים" וממגוון מוסדות רלוונטיים. כמו כן חברים בוועדה שני נציגי ות"ת. יו"ר הוועדה, פרופ' אורי סיון מהטכניון, הינו איש אקדמיה בכיר בעל רקע וניסיון בהובלת פרויקטים רחבי היקף של תשתיות מחקר. רשימת חברי הוועדה מופיעה בנספח 7.א למסמך זה. הוועדה רוכזה ע"י אנשי ות"ת.

כל חברי הוועדה חתומים על טפסי אי-ניגוד עניינים. יו"ר ועדת ההיגוי והחברים התמנו לתפקידם ע"י יו"ר ות"ת לתקופה של 3 שנים עד ליום 28.6.20, עם אפשרות הארכה לשלוש שנים נוספות בלבד.

4.2 אופן פעולת הוועדה

א. תהליך

הוועדה נפגשה 5 פעמים בתאריכים: 24.7.17, 25.9.17, 23.11.17, 4.1.18, 8.2.18 וכמו כן בין הפגישות ערכו חברי הוועדה דיונים בדוא"ל.

לצרכי עבודת הוועדה נפתח אתר אינטרנט סגור ששימש לשיתוף חומר בין הצוות המקצועי בות"ת ובין חברי הוועדה. הועדה זימנה לישיבותיה נציגים של אוניברסיטאות המחקר השונות, וחברי הוועדה שרצו בכך הצטרפו ליו"ר לסיורי המשך באוניברסיטאות ובמכון ויצמן. בסיורים אלו נפגש היו"ר עם קהילת החוקרים בכלל המוסדות ועם נשיאי המוסדות או נציגיהם. יו"ר הוועדה נפגש עם

פורום סגני נשיא למחקר, הציג להם את התכנית ושמע מהם משוב; יו"ר ות"ת, החברה בוועדה, הציגה את הנושא גם לפני ועד ראשי האוניברסיטאות.

מעבר לכך הועדה הזמינה לישיבותיה נציגים של משרד הביטחון ושל הרשות לחדשנות על מנת להכיר את כלל הפעילות הארצית בתחום ולעמוד על ממשקים אפשריים.

בסיס המידע על פיו פעלה הוועדה כלל בין השאר שאלונים שנשלחו לנשיאי האוניברסיטאות. שאלונים אלו ביקשו הן למפות את תמונת המצב הקיימת בתחום באוניברסיטה והן את כוונות הפיתוח של האוניברסיטה ל 5-10 השנים הבאות. התשובות שהתקבלו נדונו על ידי חברה הועדה ושימשו אותם בבואם לנסח את הדו"ח המסכם.

ב. נושאים בהם דנה הוועדה

- מדע וטכנולוגיה קוונטיים – הגדרות ומאפיינים
- מיפוי יוזמות דומות בעולם
- מיפוי גופים רלוונטיים בארץ
- איסוף ומיפוי המצב הקיים היום באקדמיה בארץ, התכניות והצרכים המוסדיים
- בחינת החסמים להתפתחות מספקת של התחום
- מטרות התכנית
- מבנה התכנית הלאומית
- מדיניות התמיכה בהיבטים השונים והאיזון ביניהם
- פלטפורמות שונות לקידום התחום
- הכשרת סטודנטים ואנשי תעשייה
- ממשק עם גופים ממשלתיים ותעשייה
- אינטגרציה לכלל המלצות ותכנית עבודה

4.3 רשימת הגופים והאנשים איתם התייעצה הוועדה

א. מוסדות אקדמיים:

האוניברסיטה העברית

הנהלה: פרופ' ראם סרי (ס' נשיא למחקר)

חוקרים: פרופ' נדב כץ (ראש מכון המחקר QISC), פרופ' דורית אהרונב (חברת הוועדה), פרופ' רוני קוזלוב (חבר הוועדה), פרופ' אלכס רצקר, פרופ' יוסי פלתיאל, פרופ' ירון ברומברג, פרופ' חגי אייזנברג, ד"ר שמחה קורנבליט, פרופ' מיכאל בן-אור, ד"ר הדר שטיינברג, פרופ' רונן רפפורט.

אוניברסיטת בן-גוריון

הנהלה: פרופ' רבקה כרמי (נשיאה), פרופ' דן בלומברג (ס' נשיאה למחקר), שרונה ריטברג (ראש ר' המחקר).

חוקרים: פרופ' אברהם אבדולחלים, פרופ' אמנון אהרונ (חבר הוועדה), פרופ' אורה אנטין, פרופ' שלומי ארנון, פרופ' רמי ברושטיין, ד"ר מני גבעון, פרופ' יובל גולן, ד"ר איתן גרוספלד, פרופ' יונתן דובי, פרופ'

דורון כהן, ד"ר אבישי כרמי, ד"ר אור סתת, פרופ' רון פולמן, ד"ר אלינה קרבצ'בסקי, פרופ' ראובן שוקר, פרופ' משה שכטר.

מכון ויצמן

הנהלה: פרופ' דניאל זייפמן (נשיא), פרופ' מיכל נאמן (ס' נשיא למחקר)

חוקרים: פרופ' עדי שטרן (חבר הוועדה), פרופ' רועי עוזרי (חבר הוועדה), פרופ' מוטי הייבלום, פרופ' עופר פירסטנברג, פרופ' עמית פינקלר, פרופ' שחל אילני, פרופ' אורן טל, פרופ' שמעון לויט, פרופ' ניר דוידסון, פרופ' ברק דיין, פרופ' דן אורון, פרופ' אלי זלדוב, פרופ' יובל אורג, פרופ' יובל גפן, פרופ' קרן מיכאלי, פרופ' בינגהאי יאן.

אוניברסיטת בר-אילן

חוקרים: פרופ' מיכאל רוזנבלו, פרופ' אבי פאר (חבר הוועדה), פרופ' עמנואל דה לה טורה, פרופ' ריצ'רד ברקוביץ, פרופ' אביעד פרידמן, פרופ' אפרת שמשוני.

אוניברסיטת תל אביב

הנהלה: פרופ' יוסי קלפטר (נשיא), פרופ' ירון עוז (רקטור), פרופ' יואב הניס (סגן נשיא למחקר)
חוקרים: פרופ' עדי אריה (חבר הוועדה), ד"ר משה בן-שלום, ד"ר משה גולדשטיין, פרופ' טל אלנבוגן, ד"ר פבל גינזבורג, פרופ' עודד הוד, פרופ' אמיר גולדבורט, ד"ר גיא כהן, ד"ר טל שוורץ, ד"ר אבנר פלישר, פרופ' יורם דגן, ד"ר אלון באב"ד, ד"ר רוני אילן

הטכניון

הנהלה: פרופ' פרץ לביא (נשיא), פרופ' אדם שוורץ (משנה בכיר לנשיא), פרופ' ווין קפלן (משנה נשיא למחקר), וועדת פיתוח

חוקרים: פרופ' גדי אייזנשטיין, פרופ' מוטי שגב (חבר הוועדה), פרופ' נתנאל לינדנר, פרופ' דוד גרשוני

אוניברסיטת אריאל

הנהלה: פרופ' מיכאל זינגרד (רקטור)

חוקרים: פרופ' אהרון פרידמן, ד"ר קונסטנטין בורודיאנסקי, ד"ר מיכאל זובקוב, פרופ' אליהו פרבר, ד"ר אלבינה מוסין, פרופ' חיה קורנוויץ, פרופ' שמואל שחם, ד"ר שמואל זילברג, פרופ' משה עינת, ד"ר אריאל נעוס, ד"ר מאיה רדיון.

אוניברסיטת חיפה

חוקרים: פרופ' אופיר אלון

א. **הקרן הלאומית למדע (ISF)** - פרופ' בני גייגר (יו"ר), ד"ר תמר יפה-מיטווד (מנכ"לית), פרופ' רוני קוזלוב (חבר ההנהלה האקדמית של הקרן; חבר וועדה)

ב. **משרדי ממשלה וגופי מטה:**

מפא"ת

ד"ר דני גולד (ראש מפא"ת), ד"ר משה גולדברג, ד"ר נדב כהן, ד"ר טל דוד

הרשות לחדשנות

ד"ר עמי אפלבוים (מדען ראשי ויו"ר), אהרון אהרון (מנכ"ל), אילן פלד, ד"ר אביב זאבי

משרד רוה"מ

אלי גרונר (מנכ"ל), פרופ' אבי שמחון (ראש המועצה הלאומית לכלכלה)

איסוד

נילי שלו (מנכ"לית), דן סקר

משרד המדע

ד"ר פאדיל סאלח

האקדמיה הישראלית למדעים

פרופ' יהושע יורטנר, פרופ' יעקב זיו

גורמים נוספים

פרופ' איציק בן ישראל, ראש סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון וראש מרכז הסייבר באוניברסיטת תל אביב ויו"ר סוכנות החלל הישראלית במשרד המדע והטכנולוגיה

נציגי משרדי ממשלה רלוונטיים בעולם / גופים בינלאומיים

פרופ' תומסו קלרקו ופרופ' יורגן מלינק – נציגי תכנית ה FLAGSHIP האירופית

נציגים בכירים של ה-NSFC הסינית (Natural Science Foundation of China):

- i. Prof. Shen Yan, VP
- ii. Prof. Feng Feng, DG, Bureau of International Cooperation
- iii. Ms. Di Ming, Director of Division, Bureau of personnel
- iv. Prof. Ni Pei-gen, Program Officer, Dept. of Mathematical and Physical Sciences

5. תכנית לאומית אקדמית במדע וטכנולוגיה קוונטיים*

פרק זה והפרק הבא מתארים בהרחבה מתווה לתכנית אקדמית במדע וטכנולוגיה קוונטיים, כפי שהתבקשה הוועדה לעשות ע"י ות"ת. עם זאת, כאמור, הוועדה סוברת כי נדרשת הערכות לאומית רחבה, בשיתוף של האקדמיה יחד עם גופים ממשלתיים נוספים, על מנת שמדינת ישראל תוכל ליהנות באופן משמעותי מפירותיה של המהפכה הקוונטית השנייה.

ללא ספק, התכנית האקדמית המוצגת בדוח זה תהווה מרכיב מרכזי בתכנית לאומית רחבה שכזו, ועל כן במקומות שונים בהמשך פרקים 5,6 מוצגים כבר מבנים ניהוליים ואחרים, אשר יוכלו לשמש כבסיס לתכנית לאומית מקיפה.

5.1 חזון

א. חיזוק תשתיתי ובר-קיימא של מעמדה ויכולותיה המחקריות של מדינת ישראל בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטיים, הן בפן הבסיסי והן בפן היישומי

ב. הנחת התשתית האקדמית ויסודות שיתוף הפעולה עם הגורמים הממשלתיים והתעשייה להבטחת שגשוגה הכלכלי וביטחונה של מדינת ישראל בתחומים הנשענים על מדע וטכנולוגיה קוונטיים

* "מדע וטכנולוגיה קוונטיים" מתייחסים לתחומי הידע הבאים: חישוב קוונטי; תקשורת קוונטית; סימולציה באמצעות מערכות קוונטיות; מכשור וחיישנים קוונטיים; חומרים קוונטיים; יסודות תורת הקוונטים עם השלכה לטכנולוגיות עתידיות; מדע וטכנולוגיות קוונטיות חדשניים

5.2 כלים ויעדים מרכזיים למימוש החזון וההשפעה הצפויה בחמש ועשר השנים הקרובות

1. עיבוי וחיזוק הקהילה המדעית האיכותית העוסקת במחקר אקדמי תיאורטי וניסיוני, בסיסי ויישומי, בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטיים. הרחבת הקהילה באמצעות גיוס חברי סגל חדשים, משיכת חברי סגל מתחומים אחרים, הגדלת מספר המשתלמים לתארים גבוהים ולפוסט-דוקטורט
2. העמדת התשתית המחקרית הנדרשת לרשות החוקרים באוניברסיטאות המחקר ובתעשייה והעמדת משאבים נדרשים לביצוע מחקרים העומדים בדרישות תחרותיות של חדשנות ומצוינות.
3. הרחבת ההכשרה בנושאי מדע וטכנולוגיה קוונטיים, התאמת תכניות הלימודים וקידום תכניות הכשרה בין-תחומיות לסטודנטים ולחוקרים צעירים על מנת להכשיר כוח אדם מיומן למשק ולאקדמיה. בפרט, הרחבת בסיס הסטודנטים הלומדים בתחום מחוץ למחלקות לפיזיקה אל מחלקות ההנדסה ומדעי המחשב.
4. העמדת התשתית האקדמית הנדרשת לפיתוח תעשייה ולביסוס ביטחונה של מדינת ישראל. פיתוח הממשקים של האקדמיה עם התעשייה ומערכת הביטחון: שיתוף בתשתיות מחקר, קידום שתופי

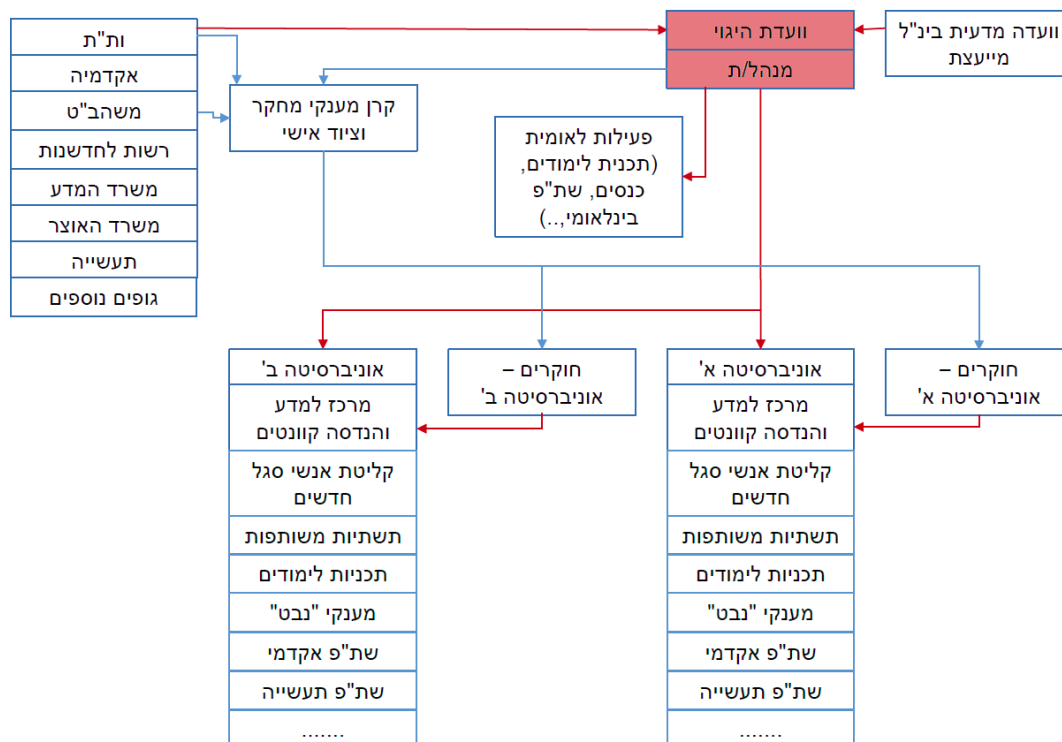
פעולה, יצירה והעברת ידע, תמרוץ השקעות חיצוניות במחקר אקדמי בתחום, עידוד מעבר של אנשים, חדשנות ורעיונות בין הסקטורים

5. יצירת קהילה ישראלית ע"י עידוד שתופי פעולה אקדמיים בין-תחומיים על מנת לקדם פריצות דרך משמעותיות בתחום ושת"פ עם התעשייה ומערכת הביטחון

5.3 תיאור התכנית

5.3.1 רכיבי התכנית והתקציב הנדרש

המבנה המוצע של התוכנית מתואר באיור 5.1. המבנה משקף את שדרת הניהול ואת שלושת ערוצי הפעילות האקדמית המתוכננים: קרן מחקר וציוד אישי, מרכזי מחקר עצמאיים באוניברסיטאות, ופעילות לאומית. המבנה מניח הרתמות משמעותיות של משרדים ממשלתיים ותעשייה להקמת התכנית. עם הזמן ובמידת הצורך ניתן יהיה להסתמך על המבנה המוצע כדי להקים תכנית רחבה יותר עם ערוצי פעילות נוספים משלימים לאקדמיים.



איור 5.1: מבנה התכנית האקדמית הלאומית

התוכנית תנוהל על ידי וועדת היגוי לאומית שתשמש כ-Board בו ייוצגו כלל השותפים הממנים, וצוות ניהולי מצומצם בראשות המנהל/ת המקצועית/ראש/ת וועדת ההיגוי. וועדת ההיגוי תיעזר להתוויית דרכה ולבקרה על ביצוע התוכנית בוועדה מדעית בינ"ל מייצעת. קידום הפעילות האקדמית הלאומית יתבצע בשלושת הערוצים המתוארים להלן ובערוצים אחרים שיוקמו במידת הצורך. התקציב הכולל הנדרש לתכנית האקדמית מוערך בכ-600 מלש"ח על-פני 5 שנים, כאשר הפירוט של סכום זה מופיע בהמשך.

5.3.1.1 קרן מחקר וציוד אישי

לצורך עידוד המחקר האקדמי, שדרוג מעבדות החוקרים והתאמתן למחקר בתחום מוקמת בימים אלו **קרן מחקר ייעודית בהיקף של 100 מלש"ח** שיפרשו על פני חמש השנים הקרובות. הקרן מוקמת במשותף ובתרומה שווה של ות"ת ומפא"ת.

מתוך הסכום הכולל 75 מלש"ח ינוהלו כתוכנית ייעודית במסגרת הקרן הלאומית למדע ו 25 מלש"ח ינוהלו על ידי מפא"ת. קרן המחקר תממן מחקרים ורכישת ציוד ייעודי למעבדות החוקרים על בסיס תחרותי כמקובל בקרן הלאומית למדע ובמפא"ת, בהתאמה. הקרן תהיה פתוחה לכלל החוקרים באוניברסיטאות המחקר ותאפשר הגשת הצעות משותפות של 1-5 קבוצות מחקר. בשיפוט ההצעות יינתן יתרון מסוים להגשה משותפת של מספר קבוצות מחקר מדיסציפלינות שונות.

הקרן תתמוך במחקרים שימשכו 3 שנים עם אפשרות הארכה לשנתיים נוספות. החוקרים הזוכים יוכלו לפנות בבקשה להגדלת התקציב ב 50% נוספים לצורך רכישת ציוד ייעודי למחקר.

הסכום שהוקצב לתכנית הייעודית במסגרת הקרן הלאומית למדע, 75 מלש"ח על-פני חמש שנים, נקבע מתוך כוונה לשמור על אחוזי זכייה של כ-30% כמקובל בקרן, ובכך לשמור על רף המצוינות של הזוכים במענקים³⁷.

5.3.1.2 תמיכה במרכזי מחקר מוסדיים

חלק הארי של המשאבים יופנה לפיתוח מרכזים באוניברסיטאות השונות. ערוץ זה מיועד לתמוך ברכיבים הבאים:

- קליטת אנשי סגל חדשים והקמת מעבדות עבורם. הגיוס יעשה דרך הפקולטות/מחלקות לפי שיפוטן.
- עידוד השתלבות חוקרים מתחומים אחרים במחקר במדע וטכנולוגיה קוונטיים
- הקמה ושדרוג תשתיות מחקר שישרתו את כלל החוקרים והתעשייה במדינת ישראל
- גיוס וטיוב כוח אדם טכני וכוח עזר מדעי
- תחזוקת ציוד תשתיתי והכשרת משתלמים ואנשי תעשייה לשימוש בו
- מלגות לסטודנטים לתארים מתקדמים ולמשתלמי בתר-דוקטורט
- בניית והתאמת תכניות לימוד שיעניקו את הידע הנדרש למו"פ בתחומי מדע וטכנולוגיה קוונטיים
- Seed funding למחקרים חדשים עם דגש על רב תחומיות וחדשנות
- תכניות הכשרה והשתלמות בשיתוף התעשייה
- פיתוח נכסים אינטלקטואליים

³⁷ אם נניח מענק ממוצע לקבוצת מחקר (PI) שבין 400 ל 600 אלש"ח לשנה, הרי שבתקציב הנ"ל ניתן לממן את עלות המענקים בתקופה של חמש שנים, כאשר בשלוש הראשונות מתחילים שלושה מחזורי זוכים – אחד כל שנה (כ"א ל-5 שנים), בסה"כ בין 30 ל-47 קבוצות מחקר. בהנחה של אחוזי זכייה של כ-30%, מדובר בכ 90 עד 156 קבוצות מחקר מגישות, ואכן מספר זה הוא בהלימה למספר החוקרים שזוהו בתחומי ה-QST בארץ.

- שת"פ עם תעשייה, חשיפה הדדית של צרכי התעשייה ויכולות האקדמיה
- שת"פ עם מוסדות אקדמיים בארץ ובעולם וכן עם תכניות בינ"ל
- ארגון כנסים, בתי ספר, וכדומה.

לצרכים אלו ידרשו להערכת הוועדה 420 מלש"ח על פני חמש שנים³⁸, מתוכם:

- 120 מלש"ח לקליטת סגל חדש³⁹
 - 200 מלש"ח לרכישת ושדרוג ציוד תשתית⁴⁰, מתוכם:
 - תשתיות ייצור חומרים – כ-50 מיליון ₪
 - תשתיות אפיון חומרים – כ-60 מיליון ₪
 - תשתיות ייצור התקנים – כ-60 מיליון ₪
 - תשתיות ייצור פוטוניות – כ-10 מיליון ₪
 - תשתיות זמן ותדר – כ-15 מיליון ₪
 - תשתיות אלקטרוניקה ומכניקה – כ-5 מיליון ₪
 - 70 מלש"ח לכוח-אדם טכני⁴¹
 - 30 מלש"ח לתחזוקת ציוד, פיתוח תכניות לימוד, הקמת מעבדות הוראה, מלגות למשתלמים ובתור-דוקטורנטים, מענקי seed למחקרים חדשניים ולשיתוף פעולה עם התעשייה, יצירת נכסים אינטלקטואליים והגנה עליהם, ושימושים אחרים
- התמיכה במרכזים האוניברסיטאיים תינתן על בסיס תחרותי במענה להצעות שיוגשו וישפטו על ידי וועדת ההיגוי בסיוע הוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת.
- וועדת ההיגוי בסיוע הוועדה הבינ"ל תעקוב על בסיס שנתי אחר התקדמות התוכניות הממומנות ותאשר או תשנה את התקציב המיועד בהתאם להתקדמות ביצוען.

5.3.1.3 פעילות לאומית, ניהול, ועתודה

ערוץ זה נועד לענות על צרכים לאומיים המשותפים לכלל החוקרים והמוסדות. סעיפים אלו כוללים:

³⁸ כפי שתואר בפרק 3 טבלה 3.12, סך הערכות העלות של המוסדות לנושאי קליטת סגל, תשתיות וסגל טכני ל-5 שנים עמדו על כ-500 מלש"ח. לפי חישובינו ניתן להסתפק בתקציב המוצע.

³⁹ בטבלה 3.11 הערכנו כי בתוך 5 שנים תגדל קהילת הליבה שאינם אמריטטי מ 133 ל 157 חוקרים (+18%) ובהכללת אמריטטי מ 145 ל 188 (+30%). ברור שחלק מאותם אמריטטי לא יישארו פעילים כך שהגידול הצפוי נמוך יותר. בהערכה ריאליסטית תגדל הקהילה בחמש השנים הקרובות בכ 20-25%. מאחר ומספר החוקרים האמיתית בליבת התחום נמוך יותר מדיווחי המוסדות ומוערך ע"י הוועדה ב 110, הקהילה צפויה לגדול בכ 25 חוקרים. הכפלת קצב גידול הקהילה במהלך חמש שנים ל 50 חוקרים (160 חוקרים ב 2023) תחשב להצלחה מרשימה. התקציב המבוקש מניח קליטה של 40-45 אנשי סגל ב-5 השנים בכלל האוניברסיטאות (הערכת אמצע בין התסריט הוודאי והתסריט האופטימלי), מתוכם כ 2/3 ניסיונאים (עלות קליטה של כ-4 מלש"ח לחוקר) ו-1/3 תיאורטיקנים (עלות קליטה של כ-350 אלש"ח לחוקר).

⁴⁰ הערכה זו נעשתה על בסיס תשובות המוסדות לשאלונים בנוגע לתכניות רכישת ושדרוג התשתיות שלהן ועל סמך הניסיון שנצבר בתוכנית הנווטכנולוגיה הלאומית. המוסדות העריכו את צרכי התשתיות שלהם בסכום כולל של 265 מלש"ח.

⁴¹ מבוסס על הערכת קליטה של 40 אנשי סגל טכני (מהנדסים ומדענים) בתקופה בכלל המוסדות, ועלות שכר ממוצעת של 350 אלש"ח לשנה.

- הוצאות ניהול התכנית (מנהל/ת + עזרה אדמיניסטרטיבית) וכן הוצאות הכרוכות בארגון מפגש המעקב השנתי (כולל הטסת הוועדה המדעית המייעצת), פרסום חומר מודפס, עריכת סקרים, וכדומה.
- הגדלת מספר משתלמי הבתר-דוקטורט המצטיינים הבינלאומיים שיגיעו לישראל
- הקמת קרן מלגות לביצוע השתלמות בתר-דוקטורט של ישראלים במוסדות מובילים בחו"ל
- מתן מענה הולם להכשרת תלמידי מחקר מדיסציפלינות שונות בתחום של QST ובכללן בניית השלמה משותפת לכלל המשתלמים לתארים גבוהים במדינת ישראל
- תכניות לאומיות בשיתוף התעשייה כמו הקמת קרן תמיכה שתסייע לחוקרים מהתעשייה להשתלב במחקר אקדמי
- עריכת כנסים בינ"ל
- שת"פ עם תכניות לאומיות של מדינות אחרות ועם תכנית הדגל האירופית
- בניית בסיס נתונים הממפה את החוקרים הישראלים הנמצאים בחו"ל ועוסקים במדע וטכנולוגיה קוונטיים לשם החזרתם ארצה
- בניית בסיס נתונים מתעדכן לגבי ערכי המדדים השונים המפורטים בסעיף 5.5.
- עתודה לפיתוח תכניות חדשות

להערכת הוועדה הסכום הנדרש לערוץ הנוכחי מגיע ל 80 מלש"ח על פני חמש שנים.

5.3.2 מבנה ניהולי, לוחות זמנים וטווח התכנית

5.3.2.1 שותפים פוטנציאליים

לפיתוח התחום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים יש חשיבות עליונה למדינת ישראל. כפי שתואר בפרק הרקע של דוח זה, "המהפכה הטכנולוגית השנייה" טומנת בחובה פוטנציאל כלכלי-מסחרי אדיר וכן פוטנציאל בטחוני מכריע, מה שמסביר את המרוץ העולמי ל "Quantum supremacy".

לפיכך ניתן לצפות כי שותפים טבעיים לפיתוח התחום בישראל יהיו הרשות לחדשנות ומשרד הכלכלה כמו גם מערכת הביטחון ומשרד האוצר. מהצד האקדמי – מדעי ניתן לצפות גם לשותפות עם משרד המדע ועם האקדמיה הלאומית למדעים. כמו כן יתכן שמשרדי ממשלה נוספים ימצאו עניין בשותפות כולל משרד רוה"מ ומערך הסייבר הלאומי, משרד התקשורת ואחרים.

לפיכך מאמינה הוועדה שהתכנית הלאומית האקדמית צריכה להבנות מראש כרגל מרכזית ונחשונת בתוכנית לאומית רחבה הכוללת את כל בעלי העניין. פירוט לגבי העניין האפשרי של כל אחד מהשותפים והחיבור לתכנית רוחבית לאומית מופיע בפרק 6 לדוח זה. הוועדה מדגישה עם זאת את הצורך להשיק את התוכנית האקדמית ללא דיחוי.

5.3.2.2 וועדת היגוי לאומית

בראש וועדת ההיגוי יעמדו מדען/מדענית ישראלים בעלי שיעור קומה וניסיון ניהולי. הרכב הוועדה יכלול בנוסף לראש הוועדה מומחים אקדמיים בתחום, נציגי ות"ת ונציגי האקדמיה הלאומית למדעים, וכן נציגים של שאר הגופים הממשלתיים / תעשייה, שיתרמו סכום כסף משמעותי למימוש התוכנית.

וועדת ההיגוי (או וועדה שתוקם מטעמה) תהיה אחראית על הערכת ההצעות שיגישו המוסדות כמענה לקול הקורא ועל חלוקת התקציב, תוך הסתייעות בוועדה המדעית המייעצת. וועדת ההיגוי הלאומית תתכנס לפחות פעמיים בשנה כדי לשמוע דיווחים על התקדמות התוכנית ולהתוות את תכנית הפעולה לתקופה הקרובה. מפגש אחד מבין מפגשים אלו ייערך במשותף עם הוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת ויתמקד במעקב אחר התקדמות התוכנית בכלל הערוצים. לקראת מפגש זה יגישו המרכזים המוסדיים דיווח על ביצוע התכנית בשנה החולפת ואת תכנית העבודה לשנה הבאה. במפגש זה יציגו המרכזים את עיקרי הדו"חות ומפא"ת והקרן הלאומית למדע ידווחו על מצב הקרן המשותפת. בעקבות מפגש זה תוערך מחדש תכנית העבודה הארצית לשנה הקרובה ויעודכן התקציב ואופן חלוקתו.

5.3.2.3 הנהלת התוכנית

הנהלת התכנית תכלול את ראש/ת וועדת ההיגוי ומנהל/ת מקצועית, שניהם בשכר. אחריותם תכלול את ביצוע התוכנית המותווה על ידי וועדת ההיגוי, קיום קשר עם הוועדה הבינ"ל המייעצת, קיום ופיתוח קשרים עם הקהילה הבינ"ל, ייזום מרכיבי פעילות חדשים וניהול המרכיב המשותף של התוכנית, גיוס משאבים והוספת שותפים לתכנית, ומעקב אחר ביצוע מרכיבי התוכנית במסגרת קרן המענקים והמרכזים המוסדיים. הנהלת התכנית תהיה אחראית לארגון מפגש המעקב השנתי ולפרסום דו"ח שירכז את ממצאיו.

5.3.2.4 הוועדה המדעית המייעצת

בראש הוועדה המדעית המייעצת יעמוד/תעמוד מדען/מדענית ישראלית בעלת שיעור קומה שתחום עיסוקו/ה מדע וטכנולוגיה קוונטיים. הוועדה תכלול בנוסף 2-3 מדענים זרים בעלי שם בתחום שיכסו יחדיו שטחים שונים הנמצאים בליבת המחקר והיישום של מדע וטכנולוגיה קוונטיים ובמידת האפשר מוביל עולמי מתחום התעשייה (לדוגמא אדם בכיר ב IBM, גוגל, מיקרוסופט, וכיו"ב). הוועדה תסייע לוועדת ההיגוי בשיפוט ההצעות המוסדיות, במעקב אחר התקדמותן, ובהכוונת התוכנית הלאומית על שלל ערוציה. לשם כך תתכנס הוועדה פעם בשנה למפגש עם וועדת ההיגוי הלאומית שמטרתו מתוארת בסעיף 5.3.2.2.

5.3.2.5 מרכזים מוסדיים

מוסד המשתתף בתוכנית יקים מרכז ייעודי למדע וטכנולוגיה קוונטיים שירכז את כלל הפעילות בתחום ויעמוד בקשר שוטף עם מנהל התכנית הלאומית. מנהל המרכז יהיה מדען בעל מעמד בתחום שימונה לתפקידו על ידי נשיא האוניברסיטה. לצד מנהל המרכז תוקם וועדה מנהלת המורכבת מחוקרים המייצגים מגוון שטחי פעילות.

מנהל המרכז ירכז את כלל הפעילות המוסדית במדע וטכנולוגיה קוונטיים. הוא יגיש את תכנית הפיתוח של המרכז כמענה לקול הקורא, ינהל את כלל הפעילות המשותפת בתחום על שלל היבטיה, יערוך את הדו"ח השנתי ויצג אותו מדי שנה בפני וועדת ההיגוי הלאומית והוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת.

5.3.2.6 ליווי ובקרת התוכנית

מאחר ומדובר בתכנית רחבת היקף וארוכת טווח, המצופה ליצור אימפקט רחב באקדמיה בתעשייה ובמערכת הביטחון, חשוב מאוד לקבוע לה מראש מנגנוני ליווי ובקרה ואבני דרך מדידות. בנוסף, מאחר שהתחום המדובר דינמי ופעילים בו שחקנים רבים בעולם - מדינות, חברות וארגונים שונים, חשוב שהתכנית עצמה תהיה גמישה ושניתן יהיה לערוך בה שינויים והתאמות בהתאם להתפתחויות בארץ ובעולם.

בהתאם לקביעת היעדים והמדדים הספציפיים לתכנית, וועדת ההיגוי הלאומית יחד עם הוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת יקבעו מנגנונים קונקרטיים לליווי ובקרה ואבני דרך לכל אחד מרכיבי התוכנית והתכניות המוסדיות. הצעה למדדים מפורטת בסעיף 5.5.

5.3.2.7 לוחות זמנים

על מנת להפיק את התועלת המרבית מן התכנית, להשתלב בעשייה הבינלאומית (כמו למשל תכנית הדגל האירופית), ולהציב את ישראל בנקודת פתיחה טובה ב"מרוץ הגלובלי לעליונות הקוונטית", חשוב להתחיל ביישום התכנית מוקדם ככל האפשר. מומלץ ליישם את התוכנית בצורה מודולרית כך שעיקוב ביישום רכיב אחד לא יעכב את יישומם של האחרים.

לעצם קיומה של תכנית אקדמית לאומית, כמפורט בדוח הנוכחי, יש משמעות מכרעת בפיתוח קשרים ושתופי פעולה מול מדינות אחרות ומול האיחוד האירופי.

נראה שהרכיב הראשון "קרן מחקר וציוד אישי" יכול לצאת לדרך בהקדם, לאור התקדמות השיחות בין ות"ת, מפא"ת, והקרן הלאומית למדע. ההערכה היא כי ניתן יהיה לפרסם קול קורא כבר באביב 2018 ולצפות להפעלת המחזור הראשון של המענקים כבר בתחילת 2019.

הרכיב השני של התכנית (תמיכה בפעילות מרכזים מוסדיים) דורש תיאום מול שותפים נוספים וסבב התייחסויות של המוסדות. בנוסף תדרוש הפעלת ערוץ זה את הקמת הגופים הניהוליים והוועדה המדעית המייעצת שתוארו לעיל. לפיכך הציפיה היא שקול קורא להגשת תכניות פיתוח של המרכזים יוכל להתפרסם לכל המוקדם בתחילת קיץ 2018, הצעות המוסדות יגיעו בסתיו 2018 ומימון התכניות הזוכות יחל באביב 2019.

הרכיב השלישי, פעילות לאומית, דורש גם הוא את הקמת הגופים שתוארו לעיל. יש חשיבות רבה למינוי מנהל לתוכנית בהקדם האפשרי. בהתאם לקצב הצטרפות השותפים והגעת תקציב, ניתן יהיה להתחיל בפעילויות הלאומיות באופן מדורג. בהערכה סבירה ניתן יהיה להפעיל מרכיב זה בסתיו 2018.

5.3.2.8 קיימות מעבר לחמש השנים הראשונות

מימוש מלא של ההשקעה בתכנית דורש טווח ארוך יותר מחמש שנים. פירות התכנית המוצעת יראו רק בתקופה של 5-10 שנים מתחילתה: אלו הם טווחי הזמן בהם תלמידי מחקר שיוכשרו בתכנית יוכלו להיקלט כסגל חדש בארץ, וטווחי הזמן בהם מחקרים יבשילו וממצאי אותם מחקרים, כמו גם פטנטים שינבעו מהם, יוכלו להתממש בצורת חברות ופיתוחים תעשייתיים. גם בתכנית הננו-טכנולוגיה, שדומה לתכנית זו מבחינת ההיקף, הפוטנציאל, ורמת הפיתוח של התחום ביציאה לדרך, רבים מהפירות המשמעותיים נראו רק בתקופה של 5-10 שנים מתחילת יישום התכנית. לפיכך, חשוב מאוד להבטיח, כבר בשלב זה, כי ההשקעות הרבות שיושקעו בתכנית יהיו לטווח ארוך, וכי התכנית תמשיך להתקיים גם מעבר לחמש שנותיה הראשונות. לשם כך ניתן לחשוב על מנגנונים שונים:

רכיב מענקי המחקר: רכיב זה בנוי מלכתחילה כך שמענקים שיינתנו במהלך חמש השנים הראשונות ימשיכו להתקיים גם לאחר מכן (כל מענק יכול להמשיך לתקופה של עד 5 שנים).
רכיב המרכזים המוסדיים: כאן ניתן להציע מנגנונים של קרן תחזוקה שהמרכז יפריש לטובת הקיימות העתידית של המרכז; מנגנוני מימון עתידיים של שימוש בתשתיות המחקר הלאומיות, מכירת שירותים לתעשייה ולמערכת הביטחון.

רכיב הפעילות הלאומית: וועדת ההיגוי הלאומית תצטרך להבטיח את קיימותן של כל אחת מהיוזמות הרלוונטיות, ככל הניתן. למשל- מימון לתכנית graduate יכול להינתן מראש למספר מחזורים, כל אחד לתקופה של 5 שנים; כנ"ל מימון מענקים לבתר דוקטורט או למדענים מבקרים לתקופות קצרות וכיו"ב. עם זאת, חשוב שהגופים המקימים יתנו את דעתם מראש לחמשת השנים השניות כך שניתן יהיה לתכנן מראש לעשר שנים ולהשיג תמורה מיטבית להשקעה העצומה במשאבי כסף וכוח אדם.

5.4 רוח התכנית ונקודת העבודה בחלוקת המשאבים

תכנית לאומית מעצם טיבה נעה בטווח שבין תמיכה רחבה ושוויונית ובין עידוד מצוינות. דעתה החד-משמעית של הוועדה הייתה שיש לשים דגש על מצוינות ותחרותיות תוך הותרת חלק מסוים ולא גדול מהמשאבים לתמיכה על בסיס שוויוני (תוך הערכת פוטנציאל השיפור) כדי לאפשר פיתוח רוחבי של התחום. בנוסף, הוועדה קוראת לוועדת ההיגוי ומנהל התוכנית להקפיד על התמקדות בתחומים המצוינים בסעיף 2.3 ולהיזהר מלהתפזר לתחומים אחרים, גם אם הם מכילים את המילה "קוונטום". כפי שתואר בפרק הקודם, חלק הארי של התקציב יוקדש למרכזים המוסדיים. התמיכה במרכזים אלו תינתן כאמור על בסיס תחרותי במענה להצעות שיוגשו וישפטו על ידי ועדת ההיגוי בסיוע הוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת.

המלצת הוועדה היא כי תקציב כל מרכז יקבע בהתאם לטיב ההצעה תוך מתן משקל מרכזי למצוינות. כדי לאפשר תכנון ארוך טווח ושימוש אופטימלי במשאבים, התקציב שיקבע לאחר תהליך השיפוט יוקצה מראש לחמש שנים בכפוף לדיווח השנתי אחר התפתחות התכניות המוסדיות ועמידתן באבני הדרך. שינויים משמעותיים בתכנית ידרשו את קבלת אישור ועדת ההיגוי. התקציב יוקצה למרכזים עבור (א) קליטת סגל אקדמי חדש והקמת מעבדות עבורם, וכן עבור (ב) מטרות מחקר והוראה נוספות כפי שיפרטו המוסדות וע"פ המתואר בסעיף 5.3.1.2.

הוועדה דנה בשאלה כיצד להבטיח את המצוינות והתחרותיות בהקצאת התקציבים. אחת ההצעות שעלתה היא שהתקציב למטרות (ב), שיהווה כאמור כשני שלישים מסך התקציב למרכזים המוסדיים, יוקצה מראש לכל מרכז, לאחר השיפוט התחרותי, לתקופה של 5 שנים (כמובן תחת שינויים שיוכלו להערך בעקבות המעקב אחר התקדמות ביצוע התוכניות). אך כי התקציב למטרה (א), שיהווה כאמור כשליש מסך התקציב למרכזים המוסדיים, יוקצה – בחלקו הקטן (כ 20%-30% ממנו) לכל מוסד יחד עם הקצאת התקציב למטרות (ב) ע"פ תכנית הקליטה שיוגשו כחלק מהצעת המוסד; ויוקצה בחלקו הגדול (כ 70%-80% ממנו) מדי שנה בהליך שיפוט תחרותי על בסיס מצוינות אקדמית של המועמדים לקליטה, ללא התחשבות בשיוך המוסדי הספציפי של כל מועמד – בהליך דומה לזה של תכנית מלגות אלון. הכוונה היא כי בצורה כזו תובטח איכותם האקדמית והרלוונטיות לתחום ה-QST של רוב הנקלטים במוסדות, אך גם כי למוסדות תנתן אוטונומיה מסוימת בקליטות וכי כל מוסד יקבל תקציב קליטות מינימלי, אשר יאפשר לו להרחיב את פעילותו בתחום.

מכל מקום, ועדת ההיגוי תצטרך לתת את הדעת בהמשך על הסוגיה ולהחליט על מנגנון הקצאה מתאים.

5.5 מדדים להתקדמות התכנית

לכל אחד מהיעדים מעלה ניתן לשייך מדדים – הן כמותיים הניתנים למדידה ישירה באמצעות כלים קיימים, והן איכותניים או הדורשים פיתוח של כלי מדידה חדשים.

המדדים הכמותיים הישירים דורשים איסוף נתונים לגבי ערכם בנקודת הפתיחה, על מנת שניתן יהיה להעריך את ההתקדמות בהם לאורך השנים והוועדה ממליצה שוועדת ההיגוי שתוקם תפעל לאלתר לבניית מנגנון איסוף נתונים אלו. בהמשך לכך יהיה צורך לקבוע יעדים (מוחלטים או יחסיים – ביחס להתפתחות התחום בעבר, ביחס לתחומים אחרים בארץ או ביחס להתפתחות התחום בעולם).

כלל המדדים נוגעים למעגלי השפעה שונים – מהחוקרים, דרך המוסדות להשכלה גבוהה ומערכת ההשכלה הגבוהה בישראל, וכלה בחברה ובמשק הישראליים ובתרומה לידע העולמי.

יש לציין כי חלק מהמדדים ניתנים להערכה כבר בתום תקופת ה-5 שנים, אך חלקם דורשים זמן ארוך יותר להבשלה ויש לצפות לתוצאות מדידות בתום תקופה ארוכה יותר של כ-10 שנים.

(I) היעד: עיבוי וחיזוק הקהילה המדעית העוסקת במחקר אקדמי בסיסי ויישומי, בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטיים. הרחבת הקהילה באמצעות גיוס חברי סגל חדשים, משיכת חברי סגל מתחומים אחרים, הגדלת מספר המשתלמים לתארים גבוהים ולבתר-דוקטורט

מדדים כמותיים ישירים:

- א. (i) מס' החוקרים הראשיים (PI) בליבת התחום⁴² ואיכותם (מדד מסוג H-index)⁴³.
- (ii) מס' החוקרים הראשיים (PI) בפריפריה של התחום ואיכותם (מדד מסוג H-index), כל אחד מאלו בפילוח של חוקרים תיאורטיים/ניסיוניים; חוקרים בתתי התחומים השונים של QST; חוקרים מכל אחת מהדיסציפלינות; כמה מהם התחנכו בתחום, כמה הסבו מחקרם לתחום, כמה עברו מחו"ל לישראל.
- ב. מספר פרסומים ואיכותם (impact factor / citations).
- ג. מספר זכויות במענקי ERC, בקרנות מחקר תחרותיות אחרות ובפרסים יוקרתיים בתחום.
- ד. מס' תלמידי המחקר ברמות התואר השונות (לפי פילוח של תיאורטיקאים/ניסיונאים; תתי התחומים השונים של QST; דיסציפלינות) ואיכותם.
- ה. רמת פעילות כקהילה מדעית – מס' כנסים, סמינרים, בתי ספר קיץ וכיו"ב.

מדדים איכותניים וכמותיים חדשים:

- ו. שיפור במודעות של תלמידי מחקר ושל חוקרים מתחומים משיקים בישראל לאפשרויות המחקר בתחום ה-QST בישראל
- שיפור באטרקטיביות של האקדמיה הישראלית לחוקרים מבטיחים בתחום בעולם, במיתוג של המחקר הישראלי ובמודעות בחו"ל לאקדמיה הישראלית ולמאמצים היזומים שנעשים בתחום.
- העמדת משאבים ראויים לשדרוג מעבדות חוקר קיימות ולהסבת חוקרים מתחומים אחרים.
- העמדת סל קליטה ראוי לחוקרים חדשים.
- הגברת החשיפה של חוקרים באקדמיה הישראלית ליישומים אפשריים של המחקר האקדמי לתעשייה ולמערכת הביטחון. היווצרות תחושה ש-QST הוא תחום חם.

(II) היעד: העמדת התשתית המחקרית הנדרשת לרשות החוקרים באוניברסיטאות המחקר ובתעשייה והעמדת משאבים נדרשים לביצוע מחקרים העומדים בדרישות תחרותיות של חדשנות ומצוינות

⁴² בטבלה 3.11 הערכנו כי בתוך 5 שנים תגדל קהילת הליבה שאינם אמריטטי מ-133 ל-157 חוקרים (+18%) ובהכללת אמריטטי מ-145 ל-188 (+30%). ברור שחלק מאותם אמריטטי לא יישארו פעילים כך שהגידול הצפוי נמוך יותר. בהערכה ריאליסטית תגדל הקהילה בחמש השנים הקרובות בכ-20-25%. מאחר ומספר החוקרים האמיתיים בליבת התחום נמוך יותר מדיווחי המוסדות ומוערך ע"י הוועדה ב-110, הקהילה צפויה לגדול בכ-25 חוקרים. הכפלת קצב גידול הקהילה במהלך חמש שנים ל-50 חוקרים (160 חוקרים ב-2023) תחשב להצלחה מרשימה. הגדלת מספר חוקרי הליבה ל-170 חוקרים על פני עשר השנים הבאות היא מטרה ראויה והגדלת המספר ל-210 תחשב להצלחה יוצאת דופן.

⁴³ אם נסתכל לדוגמה בגרף 3.10 המתאר את התפלגות חוקרי הליבה בתחום בארץ לפי H-index, או בכל גרף דומה המתאר מס' חוקרים כפונקציה של איכותם המדעית, נשאף כי בהשפעת התכנית הגרף כולו יגבהה, הערך המקסימלי שלו יזוז ימינה, וה"זנב" הימני יגבה יותר מאשר הגרף בכללותו.

מדדים כמותיים ישירים :

- א. מס' מרכזי התשתית הרלוונטיים במוסדות
- ב. מס' אנשי הסגל טכני המתפעלים את התשתיות המחקריות במוסדות
- ג. היקף ההשקעה בתשתיות המחקר כולל השקעות עצמיות של האוניברסיטאות בשיפור ושדרוג

מדדים איכותניים וכמותיים חדשים :

- רמת השירות הניתן לחוקרים מהמוסדות השונים ומהתעשייה במרכזי התשתית שבכל אוניברסיטה
- היקף השימוש התעשייתי בתשתיות המחקר האוניברסיטאיות

(III) היעד: הרחבת ההכשרה בנושאי מדע וטכנולוגיה קוונטיים, התאמת תכניות הלימודים וקידום תכניות הכשרה בין-תחומיות לסטודנטים ולחוקרים צעירים על מנת להכשיר כוח אדם מיומן למשק ולקדמיה. בפרט, הרחבת בסיס הסטודנטים הלומדים בתחום מחוץ למחלקות לפיזיקה אל מחלקות ההנדסה ומדעי המחשב.

מדדים כמותיים ישירים :

- א. מספר ומגוון הקורסים המוצעים ב-QST לרמות תואר שונות במחלקות השונות במוסדות השונים
 - ב. מספר ומגוון ההתמחויות שיוצצו ב-QST בתוך תארים קיימים
 - ג. קיומה של תכנית לימודים ארצית ב-QST המפעילה קורסים ייעודיים לתלמידי תארים מתקדמים
 - ד. מס' בתי ספר לתקופות קצרות לסטודנטים ולחוקרים צעירים
- מדדים איכותניים וכמותיים חדשים :

התאמת היצע כוח האדם המוכשר באוניברסיטאות בתחום לביקוש המתעורר במשק (מספרים ואופי ההכשרה)

(IV) היעד: יצירת קהילה ישראלית ע"י עידוד שתופי פעולה אקדמיים בין-תחומיים, על מנת לקדם פריצות דרך משמעותיות בתחום ושת"פ עם התעשייה ומערכת הביטחון

מדדים כמותיים ישירים :

- א. פרסומים משותפים של חוקרים מתתי תחומים שונים, דיסציפלינות שונות ומוסדות שונים
- ב. מס' קבוצות מחקר שהתגבשו (למשל בהגשות לתכניות האירופיות)
- ג. מס' הגשות לתכנית המענקים של הקרן המשותפת לות"ת ומפא"ת דרך ה-ISF, פעילות והצלחת הקבוצות שזכו
- ד. מס' הכנסים המשותפים לחוקרי QST מדיסציפלינות שונות

מדדים איכותניים וכמותיים חדשים :

- קידום מהלכים "גדולים" ביוזמת קבוצות חוקרים מובילים מתחומי המחקר השונים

(V) היעד: העמדת התשתית האקדמית הנדרשת לפיתוח תעשייה ולביסוס ביטחונה של מדינת ישראל. פיתוח הממשקים של האקדמיה עם התעשייה ומערכת הביטחון: שיתוף בתשתיות מחקר, קידום שתופי פעולה, יצירה והעברת ידע, תמרוץ השקעות חיצוניות במחקר אקדמי בתחום, עידוד מעבר של אנשים, חדשנות ורעיונות בין הסקטורים.

מדדים כמותיים ישירים:

- א. הקף השימוש של גורמים חוץ-אקדמיים בתשתיות בכל מוסד בשנה
 - ב. מס' ההגשות בתחום לתכניות העברת ידע של הרשות לחדשנות
 - ג. מס' הגשות ואישור פטנטים בתחום
 - ד. מס' והיקף העברת טכנולוגיה מהאקדמיה לתעשייה
 - ה. מספר חברות ההזנק שהוקמו בתחום
 - ו. מס' האנשים שעברו בין הסקטורים. סטודנטים שנקלטו בתעשייה מצד אחד ומס' אנשי התעשייה שהשתתפו במחקר אקדמי או השתלמו באקדמיה מצד שני
- מדדים איכותניים וכמותיים חדשים:
- איכות שיתוף הפעולה שבין הסקטורים וחשיבות ההישגים אליהם הגיע

6. פרוט מרכיבים בתכנית והשפעתם על האקדמיה ומדינת ישראל

6.1. הכשרת כוח אדם

התוצר העיקרי של אוניברסיטאות המחקר הוא כוח אדם מיומן בעל שלוש דרגות הכשרה: תואר ראשון, תואר שני, ותואר שלישי.

א. **תואר ראשון** – בוגרי תואר ראשון רלוונטי לתחום המדע והטכנולוגיה הקוונטיים מתחלקים לבוגרי פקולטות מדעיות (פיזיקה, כימיה, מדעי המחשב, מתמטיקה) ובוגרי פקולטות הנדסיות (חשמל, מכונות, חומרים, הנדסה כימית), או שילוב בין פקולטות אלה. למעט בוגרי פיזיקה ומסלולים משולבים המכילים פיזיקה, ובמידה מסוימת בוגרי כימיה, ההכשרה הנוכחית בתואר הראשון אינה חושפת את הסטודנטים לרקע הפיזיקלי הנדרש לעיסוק במדע וטכנולוגיה קוונטיים. מאידך, סטודנטים שנחשפים למדע וטכנולוגיה קוונטיים לרוב חסרים רקע בתחומי הדעת האחרים כמו מדעי המחשב, הנדסה וכימיה. הרחבת מעגל הבוגרים בעלי ידע בסיסי בתחום חיונית לפיתוח תעשייה מבוססת קוונטים כמו גם להגדלת מאגר הסטודנטים הממשיכים לתואר מתקדם בתחומי המחקר הרלוונטיים.

כדי להשיג מטרה זו ממליצה הוועדה לתמרץ הוספת מקצועות מתאימים לתוכנית הלימודים של הפקולטות/מחלקות ההנדסיות ומדעי המחשב. במקביל, ממליצה הוועדה לממן פיתוח פרויקטי סטודנטים לתואר ראשון במדע וטכנולוגיה קוונטיים בכלל הפקולטות/מחלקות.

ב. **תארים מתקדמים** – בוגרי תואר שני ושלישי מהווים את שדרת המחקר בתעשייה. ממצאי הסקר שנערך באוניברסיטאות, עולה שכיום מונחים בכלל נושאי הליבה של מדע וטכנולוגיה קוונטיים 198 סטודנטים לתואר שני ו-273 סטודנטים לדוקטורט. בהנחה שתואר שני אורך שנתיים ודוקטורט 4 שנים נוספות ובהנחת נשירה זניחה, מסיימים בכל שנה כ-100 סטודנטים בעלי תואר מאסטר וכ-70 בעלי תואר דוקטור⁴⁴. מתוך 100 מסיימי המאסטר, כ-60 ממשיכים לדוקטורט, ולכן רק כ-40 יוצאים לשוק העבודה. קשה לנבא את צרכי התעשייה אבל מכך שמסיימי תואר מתקדם בתחומים הרלוונטיים נחטפים כבר היום על ידי התעשייה, ובהנחה שעלינו לבנות כבר היום את התשתית האנושית שתאפשר את השתלבות מדינת ישראל במהפכה הקוונטית השנייה, ברור שעל מדינת ישראל להגדיל משמעותית את מספר המשתלמים לתואר מתקדם ולשפר את הכשרתם. צעדים אלו גם יסייעו לגידול הנדרש במספר חברי הסגל העוסקים בנושא ובהיקף המחקר האקדמי שאחד מפרותיו הוא נכסים אינטלקטואליים ומסחורים. במילים אחרות, גידול משמעותי בנפח הפעילות האקדמית ורמתה הם תנאי לפיתוח תעשייה קוונטית.

ג. **הרחבת תכנית הלימודים** – גם כאן, תכניות הלימודים המשלבות פיזיקה עם תחום נוסף⁴⁵ נותנות מענה טוב מבחינת הכשרה, אך גם מענה זה אינו שלם. השילוב האופטימלי תלוי בתת התחום – נושאים שעוסקים בחישוב קוונטי דורשים שילוב של פיזיקה עם מדעי המחשב, נושאים הקשורים לחיישנים דורשים שילוב של פיזיקה עם הנדסת חשמל וכיו"ב. תכניות לימוד רבות אינן מספקות

⁴⁴ המספר 70 כולל כ-60 בוגרי מאסטר בשנה שממשיכים לדוקטורט ועוד כ-10 בתכניות לדוקטורט ישיר
⁴⁵ וכן התכנית הייחודית באוניברסיטה העברית

לסטודנטים מבחר קורסים מתאימים⁴⁶. לכאורה פתוחים בפני כל הסטודנטים קורסים בפיזיקה, אלא שהרקע החסר הנגרר מלימודי התואר הראשון מקשה מאד על סטודנטים שאינם מפיזיקה המעוניינים לקחת קורסים אלו. בפרט, למעט התוכנית הייחודית באוניברסיטה העברית, ובמידה מסוימת לימודי הפיזיקה, אין מסלולים מוסדרים המאפשרים רכישת ידע מובנה בתחומי המדע והטכנולוגיה הקוונטיים. בולט מאוד החסר בפקולטות/מחלקות למתמטיקה ומדעי המחשב, שם מצוי פוטנציאל רב לקידום תחום החישוב הקוונטי. באופן דומה בולט חוסר ההכשרה במכניקת הקוונטים בפקולטות להנדסת חשמל, הנדסת חומרים וכו' המקשה על השתלבות סטודנטים מתחומים אלה.

ד. **הקמת תכנית לימודים משותפת לתארים מתקדמים במדע טכנולוגיה קוונטיים - מגוון הקורסים והמומחיות באוניברסיטאות השונות מוגבל עקב החוסר במסה קריטית של חוקרים.** כדי להתמודד עם מגבלה זו מציעה הוועדה לבנות תכנית לימודים ארצית שתציע מגוון רחב של קורסים לכלל המשתלמים לתארים מתקדמים במדינת ישראל. הקורסים ירוכזו ביום אחד בשבוע על-פני שנה אחת (וייתכן כי יושלמו ע"י מיני-קורסים ממוקדים בחורף/קיץ) ויהיו יחד כ-8 נקודות זכות. לתכנית תמונה ועדה אקדמית שתורכב מנציגי כל האוניברסיטאות, אשר ירכיבו יחד את רשימת הקורסים ויבחרו את המרצים מבין כלל האוניברסיטאות (לאילו יחשבו שעות הוראה אלו כחלק מחובות ההוראה המוסדיות). התכנית תהיה פתוחה לסטודנטים לתואר מתקדם מכל האוניברסיטאות, ואלו תתחייבנה להכיר בנקודות הזכות שמקנים אותם קורסים לטובת התואר שהן מעניקות לסטודנטים.

מס' מוגדר מראש של סטודנטים מובילים (כ 20-15 במחזור מכלל המוסדות) יוכלו להתקבל רשמית לתכנית ולקבל לטובת כך תוספת מלגה. הכוונה היא להפוך את התכנית ליוקרתית, להגדיל את החשיפה אליה בקרב בוגרי תואר ראשון ולמשוך אליה את הטובים שבבוגרים מכלל המחלקות והאוניברסיטאות.

ה. **החסר בהכשרה נוגע גם לצד הניסיוני.** מעבדות הלימוד ומרכזי הפרויקטים אינם מכילים כמעט כרגע התנסות מעשית רלוונטית לתחום. לפיכך, הוועדה הקצתה תקציב משמעותי **להוספת קורסים רלוונטיים ולשדרוג מעבדות הוראה בתארים המתקדמים.**

ו. **הכשרה בביצוע מחקר** – השתתפות פעילה בביצוע מחקר שבחזית המדע מהווה מרכיב מרכזי בהכשרת חוקרים בעלי תואר מתקדם. היקף ההכשרה, ובמידה מסוימת טיבה, מוגבלים היום על ידי מספר חברי הסגל העוסקים בתחום ועל ידי מחסור בתשתיות מחקר, הן במעבדות החוקרים והן במרכזי התשתית. כדי להסיר חסמים אלו ממליצה הוועדה לנקוט בסדרת צעדים: (1) **הקצאת משאבים ניכרים לגיוס אנשי סגל חדשים והקמת מעבדות מחקר מתקדמות עבורם**; (2) **הקצאת משאבים לשדרוג מעבדות מחקר**; (3) **הקצאת משאבים למשיכת אנשי סגל מתחומים אחרים והתאמת מעבדות המחקר שלהם לעיסוק בתחום**; (4) **הקצאת משאבים משמעותיים לרכישה ושדרוג של ציוד תשתיתי**; (5) **מימון העסקת כוח אדם טכני מתקדם וגיבוש מסלול קידום עבורם**. (6) **הקצאת משאבים למימון ביקורים ארוכים (מספר חודשים) של סטודנטים ישראליים במעבדות מחקר מובילות מחוץ לישראל.**

⁴⁶ בחלק מהאוניברסיטאות התווסף בשנים האחרונות קורס במידע קוונטי, אך חסרים עדיין קורסים חשובים כמו אלגוריתמים וסיבוכיות, שאת חלקם ניתן לקחת בפקולטות/מחלקות אחרות. שאר תכניות הלימוד, ובמיוחד בפקולטות ההנדסיות, אינן מספקות מבחר קורסים מתאימים.

6.2. העצמת הפוטנציאל המחקרי

הגדלת מספר משתלמי הבתר-דוקטורט הזרים ואיכותם - מרכיבים מרכזיים הנוגעים להעצמת הפוטנציאל המחקרי מצוינים בסעיף ו' לעיל. בנוסף נתנה הוועדה את דעתה על הגדלת מספר משתלמי בתר-דוקטורט זרים ושיפור באיכותם. משתלמי בתר דוקטורט מהווים מרכיב מרכזי בקידום המחקר במדינות מובילות. למרבה הצער, מדינת ישראל מתקשה להביא מספר משמעותי של משתלמים איכותיים מחו"ל בכלל מדעי הטבע. קושי זה נובע משילוב של סיבות: ריחוקה של ישראל מ"זירת ההתרחשות המרכזית" של המדע (מקומות מובילים בארה"ב ובאירופה) וההשלכה של כך על סיכויי קבלת משרה אח"כ במקום מוביל בעולם; המצב הביטחוני בישראל וסוגיות פוליטיות; בעיות אשרה (בפרט יכולות עבודה של בני/בנות זוג שאינם זכאי חוק השבות); גובה המלגה בישראל (שבד"כ אינו תחרותי למקומות המובילים בעולם); ובתחומים מסוימים – איכות וזמינות ציוד מחקרי ותשתיות מחקר.

לרוב הנקודות הללו קשה יהיה לתת מענה הולם ולכן הועדה רואה שתי אפשרויות פעולה – כל אחת מהן עם חסרונותיה:

א. הקמת תכנית מענקים ישראלית יוקרתית (שתתבטא בגובה מלגה ובמיתוג), למשתלמי בתר-דוקטורט ב-QST. ניתן לשקול לאפשר בה השתלמות משולבת אצל מנחה ישראלי ומנחה שאינו ישראלי, על מנת לאפשר למלגאים להתקרב ל"לב ההתרחשות המדעית" בארה"ב או באירופה.

ב. הקמת מרכז למבקרים בינלאומיים לתקופות של 6 חודשים ומעלה מרמת הדוקטורנטים, דרך בתר-דוקטורט וכלה בחברי סגל אקדמי בכל הדרגות. יוזמה כזו תכשיר את הקרקע להפיכת ישראל למוקד התרחשות בינלאומי בתחום ותאפשר זרימה של מדענים בינלאומיים לארץ, ושיתופי פעולה. בטווח הרחוק יותר, מרכז כזה גם צפוי להגדיל את סיכויי ההצלחה של תכנית בתר-דוקטורט מהסוג שתואר בסעיף א'.

6.3. קשר עם תעשייה ומערכת הביטחון

א. **עדכון הידע של מדענים ומהנדסים הנמצאים בתעשייה ובמערכת הביטחון** - רבים מהמדענים והמהנדסים בתעשייה לא נחשפו במהלך לימודיהם לתשתית הידע הנדרשת למחקר ופיתוח בתחום ולכלים התאורטיים והניסיוניים העדכניים. התיישנות הידע היא כמובן בעיה כללית אך בהקשר הנוכחי היא מועצמת נוכח מיעוט ההכשרה בנושא במהלך הלימודים וקצב ההתפתחות המהיר של המחקר. כדי להתמודד עם בעיה זו ממליצה הוועדה לנקוט בצעדים הבאים:

- **ארגון כנסים וימי השתלמות המיועדים לתעשייה ולמערכת הביטחון.** מטרת כנסים אלו לחשוף את מדעני התעשייה ומהנדסיה לפוטנציאל הטמון בתחום. בנוסף למדענים מהאקדמיה חשוב להזמין לכנסים אלו מרצים מתעשיות כמו IBM, אינטל, גוגל, ומיקרוסופט בהם כבר מתקיימת פעילות רחבה בתחום.
- **הקמת קרן שתממן השתלבות אנשי תעשייה ומערכת הביטחון במחקר אקדמי** למשך שנה או שנתיים, אם כהשתלמות ואם כחלק מתואר מתקדם.
- **בניית מנגנון שיקל על אנשי אקדמיה לבצע שנת שבתון בתעשייה או במערכת הביטחון.**

• **חשיפת אנשי סגל וסטודנטים לאתגרי התעשייה הרלוונטיים ולאתגרים הביטחוניים.**

מעבר לרעיונות יישומיים שבוודאי יצוצו במהלך מפגשים אלו יסייע המפגש הבלתי אמצעי ביצירת שיח שיפרה את שני הצדדים.

ב. **העמדת תשתיות מתקדמות ומוקדי ידע לשימוש התעשייה** – מעבר לשיפור יכולות המחקר והכשרת הסטודנטים יועמדו כלל התשתיות והמומחיות שבהפעלתן לרשות התעשייה. כבר היום, מספר החברות הנעזרות בתשתיות הנמצאות באקדמיה, ובראשן חברות הזנק, הוא גדול. בהערכה גסה, המבוססת על מספרים ממרכזי הננו, מגיעים אחוזי השימוש של התעשייה בתשתיות האקדמיות לכ 20% משעות השימוש בציוד.

ג. **נכסים אינטלקטואליים, חברות הזנק, והעברת טכנולוגיה לתעשייה** – קשה כמובן להתנבא לגבי היקף הנכסים האינטלקטואליים, מספר חברות ההזנק, והיקף העסקאות להעברת טכנולוגיה מהאקדמיה לתעשייה במהלך התוכנית המוצעת. ניתן אולי להעריך מספרים אלו על בסיס הישגי התוכנית הלאומית לננוטכנולוגיה שנמשכה בין השנים 2005-2016 ובמהלכה הושקעו באוניברסיטאות כ-380 מיליון דולר, כשליש מהם על ידי הממשלה (מעניין לציין שהשקעה זו מונפה ע"י האקדמיה לגיוס 900 מיליון דולר מקרנות מחקר). במהלך שנים אלו התוכנית הובילה מעבר להישגים האקדמיים להישגים המסחריים הבאים⁴⁷:

- 888 בקשות לפטנטים שאושרו
- הקמת 120 חברות הזנק מהן 60 פעילות ביולי 2017, מועד פרסום דו"ח הוועדה הלאומית לננוטכנולוגיה
- 272 עסקאות להעברת ידע מהאקדמיה לתעשייה
- 1,942 פרויקטים משותפים של האקדמיה והתעשייה

למרות הישגים אלו, אחד מלקחי תכנית הננו הוא שהעברת הטכנולוגיה לחברות הגדולות הצליחה באופן חלקי בלבד ולא הובילה עד כה לבניית חברות ננו גדולות. ניתן לנתח את הסיבות לחולשה זו אך המסקנה המידית לגבי תכנית הקוונטום המוצעת היא שיש לתת את הדעת על היבט זה מלכתחילה. אחת הדרכים המבטיחות לכך היא רתימת אחת או יותר מחברות הענק הפעילות בתחום זה (מיקרוסופט, גוגל, IBM, אינטל, עליבאבא...) ופעילות גם בישראל, כבר בשלב מוקדם של התכנית. בנוסף ניתן לחשוב על הקמת קונסורציום משותף לחברות ישראליות ולאקדמיה.

⁴⁷ דו"ח הוועדה הלאומית לננוטכנולוגיה, יולי 2017

נספחים

א. חברי הוועדה

- פרופ' אורי סיון, הפקולטה לפיזיקה, הטכניון – יו"ר הוועדה
- פרופ' יפה זילברשץ, יו"ר ות"ת
- פרופ' ישעיהו טלמון, חבר ות"ת, הפקולטה להנדסה כימית, הטכניון
- פרופ' דורית אהרונוב, בית הספר להנדסה ולמדעי המחשב, האוניברסיטה העברית
- פרופ' אמנון אהרוני, המחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת בן-גוריון
- פרופ' עדי אריה, הפקולטה להנדסה, בית הספר להנדסת חשמל, אוניברסיטת תל אביב
- פרופ' רועי עוזרי, הפקולטה לפיזיקה, המחלקה לפיזיקה של מערכות מורכבות, מכון ויצמן למדע
- פרופ' אבי פאר, המחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת בר-אילן
- פרופ' רוני קוזלוב, המחלקה לכימיה פיזיקלית, האוניברסיטה העברית
- פרופ' מוטי שגב, הפקולטה לפיזיקה, הטכניון
- פרופ' עדי שטרן, הפקולטה לפיזיקה, המחלקה לפיזיקה של חומר מעובה, מכון ויצמן למדע

1. סין

- מוטיבציות עיקריות:
 - תקשורת מאובטחת
 - תחרות כלכלית – טכנולוגיות מתקדמות יחד עם יכולת הייצור וההון האנושי יכולות להבטיח לה מובילות גלובלית בשוק פתרונות המידע הקוונטי
 - תחרות צבאית אסטרטגית - בעיקר סביב חישוב קוונטי, יחד עם יכולות AI ו-big data
- נשיא סין Xi Jinping, גילה עניין בתחום מאז 2013, ובנובמבר 2015 בקונגרס המפלגה הכריז על "תקשורת קוונטית" כאחד הפרויקטים בעדיפות גבוהה לפריצות דרך משמעותיות עד 2030
- הערכת ההשקעה הלאומית בתחום לשנת 2015: כ- 220M יורו
- בתר"ש הסינית ל-R&D 2016-2020, אינפורמציה קוונטית ו-quantum control סומנו בעדיפות גבוהה תחת "מחקר בסיסי הקשור לדרישות לאומיות אסטרטגיות"
- לשנים 2016-2017 סומנו 6 משימות מחקר:
 - Related electronic systems
 - Small quantum systems
 - Artificial band-gap systems
 - Quantum comm.
 - Quantum comp.
 - Quantum precision measurement
- בתכנית מסחור הטכנולוגיה הסינית "Made in China 2025", ממאי 2015 סומן מחשוב קוונטי כנושא בעדיפות

תכנית הקוונטום של סין: הישגים עיקריים עד כה

- חישוב קוונטי
 - אקדמיה – מדענים ב-USTC פיתחו שבב קוונטי מוליך למחצה שיאפשר ביצוע פעולות קוונטיות ועיבוד מידע (08/16); הצליחו להכין ולמדוד 600 זוגות של חלקיקים קוונטיים שזורים (08/16); פיתחו שערים קוונטיים לוגיים מדויקים לטובת שליטה קוונטית (10/16)
 - תעשייה – מאמצים גדולים ב-Alibaba Quantum Computing Lab. הציבו יעדים ל-2020 לעשות מניפולציה קוהרנטית של 30 qubits; ל-2030 פרוטוטיפ של מחשב קוונטי עם 50-100 qubits
- הצפנה ותקשורת קוונטית
 - 8/16 - שיגור הלוויין הקוונטי הראשון Micius : established a quantum key distribution network with the transmission of quantum information between the satellite and multiple ground stations (חלק מתכנית QUESS – quantum experiments at space scale מ-2011)

- 9/16 – מאמר של Pan Jianwei מ-USTC (עשה ד"ר אצל Zeilinger בוינה), שמדגים טלפורטציה קוונטית של פוטונים בסיב אופטי במרחק 12.5 ק"מ
- 6/17 Pan Jianwei מדגים בלווין הקוונטי שזירה במרחק כולל לוויין-קרקע של בין 1,600 ל-2,400 ק"מ, והתפלגות שזירה של מעל 1,200 ק"מ בין תחנות ממסר.
- 7/17 – ניסוי מוצלח ל Beijing-Shanghai quantum network (2,000 ק"מ) – הניסוי נערך בין 200 טרמינלים שונים בעיר Jinan ברשת שמכסה כמה מאות ק"מ²
- 1/18 – הלוויין הקוונטי Micius מדגים Quantum key distribution בין סין לאוסטריה, מרחק של 7,600 ק"מ
- **חישה קוונטית**
- ספטמבר 16 : קב' מדענים מ CETC יחד עם Pan Jianwei מ-USTC ומדענים מאוני' ננג'ינג יצרו רדאר single-photon המבוסס על שזירה בין פוטונים, שיכול לחוש במטרות במרחק של עד 100 ק"מ (פי 5 ממה שדווח עד אז)

2. [ארה"ב](#)

בשנים האחרונות ניכר גידול בעיסוק האקדמי בתחום. להלן גרף המתאר את הגידול במס' הפרסומים בתחומי ה Quantum Information Science בשנים 2000-2015 לפי תתי תחומים (מידע, מיחשוב ותקשורת):

Fifteen Years of Growth in QIS

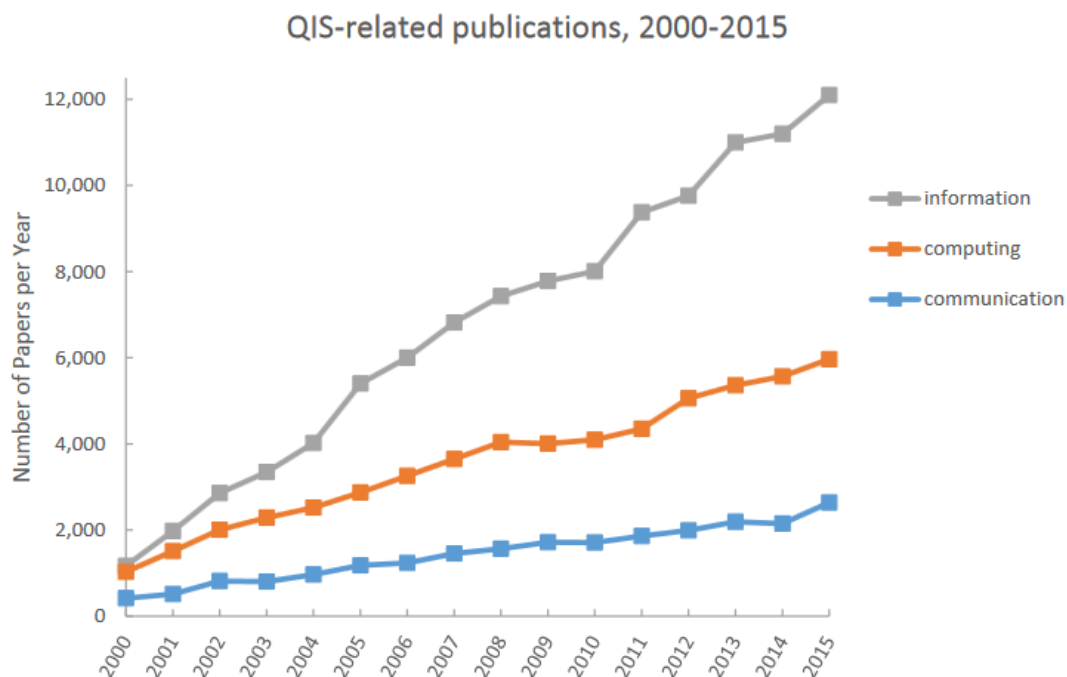


Figure 1. A Google Scholar search for publications (excluding patents and citations) containing the terms “quantum information,” “quantum computing,” and “quantum communication” illustrates how the field has grown in recent years.

גרף 1.ב : הגידול במס' הפרסומים הקשורים ל-QIS (מדע האינפורמציה הקוונטית) בשנים 2000-2015 שנכתבו ע"י חוקרים אמריקאים, לפי תת-תחום (מידע, מחשוב ותקשורת)

ב-2008 נוסח החזון הפדרלי לתחום של QIS:

*The United States will create a scientific foundation for controlling, manipulating, and exploiting the behavior of **quantum matter** and identifying the physical, mathematical, and computational capabilities and limitations of **quantum information processing** systems in order to build a knowledge base for this 21st century technology.*

*To succeed the US must identify the critical scientific elements and target them as **research** priorities, **train** a new generation of scientists in the underlying disciplines that contribute to QIS, and share results and **coordinate** efforts.*

תמיכות פדרליות ב-QIS:

- מעל 20 שנים של תמיכה
- ב-2016 : סדר גודל \$200M לשנה

▪ תמיכה שוטפת במחקר בסיסי (DOD services ו- Office of the Secretary
of defense ,NIST ו-NSF)

▪ תמיכות בסדרות של פרויקטים (DARPA ,IARPA)

▪ ב-2017 גם DOE מתכנן לתמוך בתחום

▪ חיבור חזק עם ה- NSCI (National Strategic Computing Initiative) מ-2015

גוף	תמיכות
DOD	• מיקוד ביישומים בטחוניים (ניווט מדויק, שעונים ורשתות קוונטיות מאובטחות • בשנים 2011-2015 OSD מימן 12 Multidisciplinary University Research Initiative awards (MURI) - מימון גבוה לתקופות זמן ארוכות במיוחד: מתאים לפרויקטים מורכבים וקבוצתיים (פרויקט הוא ל 2+3 שנים במימון של 1-½ מליון \$ לשנה) • ב-2016 OSD יממן Tri-Service Quantum Science and Engineering Program (QSEP) ,זיכרון קוונטי ויישומי חיישנים קוונטיים רגישים. לבניית אב-טיפוס לרשת קוונטית scalable, • תכניות נוספות גם ב-AFOSR ,ASO ,ONR כולל שת"פ עם אקדמיה (למשל באוני' מרילנד) • DARPA תמכה ותומכת בפרויקטים ספציפיים כמו QuASAR לחיישנים , OLE לסימולטורים, QuEST לפרויקטים חדשניים במיוחד ו- Detect למידול ויצור של גלאי פוטונים
DOE	• בעשור האחרון פיתוח מומחיות בתחום רלוונטיים להם • מ-2017 תכנית ליבה בנושא יישום של סימולטורים וחישוב קוונטיים לשאלות חשובות ל-DOE • סדנה לגבי צרכי מחקר בסיסי בחומרים קוונטיים בעבור טכנולוגיות אנרגיה
IARPA	• תמיכות בקידום המחשוב הקוונטי כמו: • The Logical Qubits Program - overcome the limitations of current multi-qubit systems by building a logical qubit from a number of imperfect physical qubits • Quantum Enhanced Optimization Program - harness quantum effects required to enhance quantum annealing solutions to hard combinatorial optimization problems. • קדימה – גם פיתוח אלגוריתמים מתאימים
NIST	• תכניות מזה 20 שנה והישגים מרשימים מאז

- התכנית הנכחית מתמקדת במטרולוגיה (לטובת תקשורת קוונטית), חישוב קוונטי ומדידות קוונטיות

- ב-2016 תכנית מיוחדת לחישובים קוונטיים

- ב-2017 תמיכה מוגדל בחישוב קוונטי

- תמיכה ב-2 מרכזים באוני' מרילנד

NSF

- מעל עשור - תכנית תחת "פיזיקה" של "Quantum Information Science and Revolutionary Computing"

- מימון של 2 מרכזי מחקר בתחום – בקאלטק (מאז 2011) וב-JQI באוני' מרילנד (מאז 2008)

- ב-2016 דירקטורט ההנדסה בחר בתקשורת קוונטית כתחום חדש לתכנית החדשנות שתומכת בקבוצות רב-תחומיות למחקר משנה-פרדיגמות

- מטה-תכנית חדשה מ-2017 - "Connections in Quantum Information Science" : משותפת ל MPS (מתמטיקה ופיזיקה), ENG ו CISE (מחשבים והנדסה) לתכניות רב-תחומיות

טבלה 2.2 : תמיכות הגופים הפדרליים המרכזיים בארה"ב

החסמים לפיתוח מיטבי של התחום (ע"פ דו"ח NSTC 2016)

- **חסמים מוסדיים** – אין מספיק שת"פ בין מחלקות בתוך מוסדות מחקר ובין מוסדות – יש צורך במגוון כישורים ומומחיות כדי להתקדם
- **חינוך והכשרת כ"א** – אין מספיק הכשרת בנושא מחוץ למחלקות הפיזיקה (מדעי המחשב, מתמטיקה יישומית, EE, הנדסת מערכות)
- **טכנולוגיה והעברת ידע** – אין מספיק העברת ידע לתעשייה- אין מסגרת מתאימה לתמוך בהפיכת אב-טיפוס מהמעבדה למוצר מסחרי; הערכת שווי גבוהה של IP בנושא; חיבור לא מספק של בוגרים עם חברות הדורשות כישורים ספציפיים
- **חומרים ופבריקציה** – חוסר זמינות מספקת של יכולות פבריקציה לחומרים קוונטיים (כמו יהלום NV)
- **רמת ועקביות המימון** – נבע מחוסר תיאום בין סוכנויות פדרליות; הביא לכך שחוקרים רבים טובים עברו תחום או עזבו את ארה"ב

המלצות קדימה של ה-NIST

גישה קוהרנטית כלל-ממשלתית שתכלול:

- תכניות ליבה יציבות ובנות-קיימא שניתן לתגבר כאשר הזדמנויות חדשות יעלו, ולבנות מחדש אם מכשולים יצוצו

▪ השקעה אסטרטגית בתכניות ממוקדות ומוגבלות בזמן להשגת יעדים קונקרטיים ומדידים

▪ מעקב ממושך והדוק אחר התחום, כדי להעריך את תוצאות ההשקעות ולהתאים בזריזות תכניות כדי לנצל פריצות טכנולוגיות

3. האיחוד האירופי

עם ההבנה המתגבשת של הפוטנציאל הכלכלי שטומנת בחובה "המהפכה הקוונטית השנייה", החליטה הנציבות האירופית כי עליה לחזק את מסחור הידע בנושא ולהעלות את העניין של שחקנים תעשייתיים גדולים באירופה בטכנולוגיות המפותחות. באפריל 2016 פורסם ה- Quantum Manifesto 48 אשר מתווה תכנית עקרונית לפיתוח התחום באירופה ואשר עמדו מאחוריו מעל 3,500 בעלי עניין, ביניהם מדענים, מכוני מחקר וחברות באירופה. כתגובה למניפסט, הנציבות האירופית הציעה במאי 2016 השקה של תכנית דגל שאפתנית ורחבת היקף אשר מטרותיה:

- הפיכת אירופה לכח המוביל את המהפכה הקוונטית השנייה
 - איגום משאבים והרחבה של המצוינות והמובילות האירופית במחקר קוונטי, ובכלל זה הכשרה ופיתוח הכישורים הרלוונטיים
 - התנעה של תעשייה תחרותית אירופאית בטכנולוגיה קוונטית, אשר תמצב את אירופה כמובילה בשוק התעשייתי הגלובלי העתידי
 - הפיכת אירופה לאיזור דינמי ומושך למחקר חדשני, לעסקים ולהשקעות בטכנולוגיה קוונטית, ובכך האצת הפיתוח שלהם והאימוץ שלהם בשוק.
 - הפיכת הטכנולוגיות הטרנספורמטיביות לזמינות עבור כלל האוכלוסיה
- ליוזמה הוקמה בספטמבר/אוקטובר 2016 ועדה עליונה (HLSC: High Level Steering Committee) בראשות פרופ' יורגן מלינק. המבנה המשילותי כולו של היוזמה מתואר בפרק XX בדוח זה. תחת ספינת הדגל נבחרו ארבעה תחומי מדע וטכנולוגיה: תקשורת קוונטית, חישוב קוונטי, סימולציה קוונטית וחישה קוונטית. הפיתוח של כולם יעשה ע"י תמיכה במדע בסיסי, בחינוך/הכשרה, בתוכנה/תיאוריה ובהנדסה/בקרה.

4. בריטניה

מטרת התכנית:

"Create a coherent government, industry and academic quantum technology community that gives the UK a world-leading position in the emerging multi-billion-pound new quantum technology markets, and to substantially enhance the value of some of the biggest UK-based industries"

ב-2013 הצהיר ג'ורג' אוסבורן על מימון ממשלתי של £ M270 לנושא על-פני 5 שנים ;
ב-2014 הציגה בריטניה תכנית 5-שנתית לטכנולוגיות קוונטיות שכוללת הקמה ותמיכה ב- HUB-4 ים חדשים בתחומי טכנולוגיה ממוקדים: לחיישנים ומטרולוגיה (בהובלת אוני' בירמינגהם), לתקשורת (אוני'

⁴⁸<http://gurop.eu/manifesto>

יורק) Networked QIT, (אוקספורד), דימות (גלוגו). מתוך המימון הממשלתי (270 מליוני פאונד ל-5 שנים), 120 מליון פאונד ניתנו דרך EPSRC ל-4 מוקדי המחקר הנ"ל, כ"א שת"פ אקדמיה-תעשייה ומובל ע"י אוניברסיטה. בסה"כ שותפות במוקדים 17 אוניברסיטאות ו-132 חברות.

בנוסף ה-DSTL (Defense Science and Technology Laboratory), יחד עם משרד הביטחון, הכריזו על עוד £ M30 ליצירת מדגימים לאומיים (בתחומים: quantum timing, navigation and gravity imaging devices).

ב-2016 הכריזה בריטניה על יוזמה נוספת להכשרת כח אדם מיומן בטכנולוגית הקוונטים. הוקמה ועדה מייעצת (QT SAB) המונה 12 חברים בראשות פרופ David Delpy מ-UCL עם נציגי אקדמיה ותעשייה עיקרי המלצותיה:

- השקעה בתכנית 10 שנתית שתתמוך באקדמיה, תעשייה ועוד שותפים
 - המשך השקעה בתשתיות המחקר
 - תמרוץ השקעות פרטיות
 - להנגיש לתעשייה תשתיות אוניברסיטאיות
 - פיתוח כ"א דינמי
 - תמיכה במעבר אנשים, חדשנות ורעיונות בין אקדמיה, תעשייה וממשל
 - ליצור רגולציה וסטנדרטיזציה מתאימים
 - לשמר יתרון תחרותי כספקית גלובלית של התקנים ומערכות קוונטיים ולהמשיך לשחק תפקיד משמעותי גלובלי בפיתוח הטכנולוגיות
- אלו הם רכיבי התכנית המרכזיים - מחקר וטכנולוגיה, חדשנות, העברת ידע, כישורים וציוד קפיטלי:

How the programme works



המימון הממשלתי (270 מיליוני פאונדים ל-5 שנים) ניתן נכון להיום ל-4 מסלולי תמיכה

עיקריים:

- מימון 4 מוקדי מחקר בתחומי טכנולוגיה ממוקדים, כמפורט קודם (120 מיליון פאונד ל-5 שנים)
- מענקים לחברות בריטיות לזיהוי ופיתוח שימושים, יישומים ושווקים לטכנולוגיות החדשות שישפיעו על העסקים שלהם.
- מענקים לפרויקטים בהובלת חברות
- מרכזי הכשרה לדוקטורנטים

5. הולנד

- ב-2015 הכריזה הולנד על תכנית 10-שנתית להאצת הפיתוח של מחשוב קוונטי במכון לטכנולוגיה קוונטית שבאוניברסיטת DELFT.
- יוזמה של אוני' Delft ושל TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research), HTSM, STW, FOM, NWO.
- מימון משותף בסך 135M יורו ל-10 שנים
- מעל 100 מדענים והמספר צפוי להיות מוכפל תוך 5 שנים
- חברות שונות כבר החליטו להכנס לשתי"פ עם המרכז ולתמוך בפעילות בו, ביניהן אינטל (בהשקעה של \$50M על פני 10 שנים) ומיקרוסופט.

6. גרמניה – יוזמת QUTEGA

- יוזמה של ה-BMBF אשר הוכרזה ב-05/16 ;
- השקעה מתוכננת של כ-300M יורו על פני 10 שנים
- המטרה: להתכוון ליוזמת הפלגשיפ האירופי
- הוקמה לנושא ועדה מדעית בת 28 מדענים ובראשה Prof. Dr Gerd Leuchs, ראש מכון מקס פלנק למדע האור ב-Erlangen
- ב-2017 הוועדה פרסמה ניר מדיניות ולפיו אלו הן עיקרי התכנית:
- קולות קוראים יצאו תחת 5 נושאים – מחשוב קוונטי; חיישנים קוונטיים; תקשורת קוונטית; מודלים תיאורטיים חופפים; טכנולוגיות מפתח למערכות קוונטיות
- כלי מדיניות מומלצים:

- קידום מו"פ – יותר שת"פ אקדמיה-תעשייה ע"י (א) קידום קונסורציומים; (ב) יצירת מרכזי טכנולוגיה קוונטית לתשתיות כבדות ולשתפ עם תעשייה כמו בננו; (ג) שבתונים הדדיים

- אמצעים מבניים – הכשרה: תכנים לת"ל בהנדסה; מבנה אוניברסיטאות: יצירת משרות אקדמיות במוסדות בגודל בינוני, חיזוק חברי הסגל החדשים והכוונה שלהם; יצירת גוף מתכלל – פדרלי ולכל המדינות, לאקדמיה לתעשייה ולמממנים פרטיים

- יח"צ וחינוך – הגדלת היכרות הציבור הרחב עם "המהפכה הקוונטית השנייה", תכנים בבי"ס, תערוכות, מידע זמין באינטרנט

▪ צעדים ראשונים:

- תמיכה ב-3 פרויקטי פיילוט ראשונים: סנסורים מגנטיים לממשקי אדם-מכונה, שעונים אטומיים ניידים, Quantum key distribution with cube-sats (קונסורציומים של תעשייה ואקדמיה);

הפרויקט הראשון - לפיתוח optical single ion clock החל במאי 17' ומובל ע"י Toptica Photonics. מימון כולל 6 מליון יורו ל-3 שנים (מ-4.5 BMBF ו-1.5 מהשותפים התעשייתיים)

- קול קורא למכרזים לתקשורת קוונטית

על מנת להעריך את היצע החוקרים בתחום ב-5 השנים הקרובות ערכנו את החישוב הבא:

- (א) הנחנו כי המועמדים הרלוונטיים הינם תלמידי דוקטורט נוכחיים של חוקרים מתחומי ליבה ב-QST בתחומים השונים (פיזיקה, הנדסה, כימיה, מדעי המחשב, מתמטיקה ואחר)⁴⁹.
- (ב) חישבנו את היחס בין מס' קליטות של חברי סגל לשנה לבין מספר בוגרי דוקטורט בשנה עבור 3 תחומי אב: מדעים פיזיקליים⁵⁰, הנדסה⁵¹, מדעי המחשב ומתמטיקה⁵². השתמשנו במוצע השנתי של נתוני קליטות הסגל באוניברסיטאות (ממוצע ע"פ 5 השנים תש"ע-תשע"ד) ובנתוני בוגרי הדוקטורט בתשע"א; להלן היחסים שהתקבלו:

היחס	בוגרי דוקטורט בשנה	ממוצע קליטת סגל חדש בשנה	
11%	202	22	מדעים פיזיקליים
26%	150	39	הנדסה
25%	87	22	מדעי המחשב ומתמטיקה

טבלה ג.1: היחס בין מס' קליטות של חברי סגל לשנה לבין מספר בוגרי דוקטורט בשנה עבור 3 תחומי אב

- (ג) הכפלנו את מס' תלמידי הדוקטורט הנכחיים של חוקרים מתחומי ליבה ב-QST ביחסים הני"ל כדי לקבל אומדן של מס' קליטות הסגל הצפויות בתחום במהלך 5 שנים⁵³:

⁴⁹ המועמדים האמיתיים הם כמובן כאלו שיסיימו פוסט-דוקטורט ב-5 השנים הקרובות, ולכן הם כאלו שכעת נמצאים במהלך פוסט-דוקטורט (שנה ראשונה/שנייה/שלישית) וכאלו שהם כעת תלמידי דוקטורט בשנים 3,4,5 לתואר. מה שאנו באמת מחשבים אם כן הוא מספר המועמדים הרלוונטיים לשנים תשע"פ-תשפ"ה. יש כאן הנחה אם כן, שלא היה שינוי גדול במספרי הסטודנטים לדוקטורט ב-QST בשנתיים האחרונות. כמו כן הנחנו אורך דוקטורט ממוצע של 5 שנים.

⁵⁰ כולל כימיה, כימיה אורגנית, כימיה פיסיקלית, כימיה תעשייתית, פיזיקה, פיזיקה גרעינית, ננו-מדעים וננו-טכנולוגיה, גיאופיזיקה, גאולוגיה, אוקיאנוגרפיה, הידרולוגיה, מדעי האקלים, גיאולוגיה ימית.

⁵¹ כולל הנדסת בניין, גיאוטכנולוגיה, הנדסת תחבורה ותעבורה, הנדסה ואדריכלות סביבתית, הנדסה גאודטית, הנדסה וניהול משאבי מים, הנדסת מכונות, מכניקה הנדסה, הנדסת חשמל, הנדסת אלקטרוניקה, הנדסת מערכות תקשורת, הנדסת – אירונאוטיקה וחלל, הנדסה כימית, הנדסת מזון וביוטכנולוגיה, הנדסת תעשייה וניהול, הנדסת מערכות מידע, הנדסת מערכות טכניון, הנדסת תוכן וייצור, ניהול והנדסת בטיחות, ארכיטקטורה ובינוי ערים, עיצוב תעשייתי, הנדסת חומרים, הנדסה גרעינית, הנדסה חקלאית, הנדסה ביו-רפואית, לימודים בין-תחומיים בהנדסה, הנדסת פולימרים, הנדסה ביוטכנולוגית, אבטחת איכות המוצר, הנדסת אנרגיה.

⁵² כולל מתמטיקה, סטטיסטיקה, מדעי המחשב, מע' מידע וניהוליות.

⁵³ הנחנו כאן: (i) דוקטורט ממוצע בתחומים אלו אורך 5 שנים; (ii) הזנחנו את שעורי הנשירה במהלך הדוקטורט (iii) היחס קליטת סגל/בוגרי דוקטורט בתחומי ה-QST דומה ליחס שבתחומים הרחבים של מדעים פיזיקליים, הנדסה ומדעי המחשב ומתמטיקה (iv) היחס קליטת סגל/בוגרי דוקטורט בתחום "אחר" (שהוא למעשה מדעי הרוח) הוא כ- 25%

מס' תלמידי דוקטורט של חוקרים בליבת QST	היחס סגל נקלט/בוגרי דוקטורט	קליטות סגל צפויות ב-5 שנים	
122	11%	13	פיזיקה
79	26%	21	הנדסה
50	11%	5	כימיה
5	25%	1	מדעי המחשב
13	25%	1	מתמטיקה
4	25%	1	אחר
273		42	סה"כ

טבלה ג.2 : אומדן של מס' קליטות הסגל הצפויות בתחום במהלך 5 שנים

(ד) ממספרים אלו הורדנו את מס' הפרישות הצפויות במהלך 5 השנים הקרובות לפי תחום⁵⁴ :

סה"כ חוקרי ליבה ב-QST	מתוך חוקרי הליבה: אמריטוס היום	מתוך חוקרי הליבה: צפויים לפרוש ב-5 השנים הקרובות	
72	3	8	פיזיקה
34	4	0	הנדסה
27	4	5	כימיה
5	1	1	מדעי המחשב
5	0	2	מתמטיקה
1	0	1	אחר
144	11	17	סה"כ

טבלה ג.3: צפי הפרישות של חוקרי ליבה נכחיים במהלך 5 השנים הקרובות לפי תחום

⁵⁴ מספרי חברי הסגל אמריטוס ואלו שצפויים לפרוש בעוד כ-5 שנים הוערכו כאקסטרפולציה מתוך בדיקה פרטנית של 80% מכלל 144 החוקרים (בתחומים השונים)

חלק א' – מיפוי פעילות מחקר והכשרה קיימת

א. **מרכז מחקר** - האם קיים במוסד מרכז מחקר או מכון למדע וטכנולוגיה קוונטיים (QST), או כזה העוסק בתחומים קרובים או חופפים חלקית לנושא ?

אם קיים, אנא ציינו את הפרטים הבאים לגבי פעילותו הנוכחית:

- (1) שם המרכז/מכון :
- (2) תאריך ההקמה :
- (3) מספר חברי סגל :
- (4) מספר משתלמים :
- (5) מספר אנשי סגל טכני המועסקים במרכז (FTE) לטובת תחזוקת ציוד משותף ומתן שרותי מחקר בנושאי QST :
- (6) סדר גודל תקציבי שנתי של המרכז :
- (7) מרכזי התשתית המשותפת הקיימת היום ורכיבי הציוד העיקריים המותקנים בהם :
- (8) שתופי פעולה מרכזיים עם תעשייה, אם קיימים :
- (9) שתופי פעולה מרכזיים עם מערכת הביטחון, אם קיימים :
- (10) שתופי פעולה בינלאומיים מרכזיים, אם קיימים :
- (11) פעילויות של המרכז לטובת כלל הקהילה האקדמית בתחום (כגון כנסים וסדנאות, בתי ספר, קורסי קיץ או מיני-קורסים וכיו"ב) :

ב. חברי סגל הנוגעים לנושא :

- (I) אנא מלאו באנגלית את טבלת האקסל המצורפת (Faculty.xls).
- (1) הגיליון המכונה Core faculty נועד לרכז את רשימת השמות של חברי סגל שליבת עשייתם ב QST. המידע כולל את שם החוקר/ת, השייכות האקדמית (פקולטה, מחלקה), תחום המחקר, מספר סטודנטים מונחים בתחום (לתואר שני, שלישי ומלגאי פוסט-דוקטורט), .
 - (2) הגיליון המכונה Peripheral faculty נועד לרכז את אותו מידע עבור חברי סגל שתחום מחקרם נוגע ל QST אך זו אינה ליבת עיסוקם.
 - (3) הגיליון המכונה Potential faculty נועד לרכז את אותו מידע עבור חברי סגל שאינם עוסקים ב QST אך יש סיכוי שתחומי המחקר שלהם יתרחבו ויכללו QST.
- (II) האם קיימת במוסדכם כיום תכנית קליטת אנשי סגל חדשים ב QST? אם כן - האם הוקצו תקנים אקדמיים לנושא וכמה?

ג. שטחי מיקוד מחקרי

באילו מהתחומים הבאים קיימת היום פעילות מחקרית במוסדכם? ציינו את מספר החוקרים, שייכותם האקדמית, ואת סוג הפעילות (תאורטית/ניסיונית, סוג המערכת - למשל אטומים קרים או אופטיקה קוונטית) :

- (1) תקשורת קוונטית
- (2) סימולטורים קוונטיים
- (3) חיישנים קוונטיים
- (4) חישוב קוונטי
- (5) חומרים קוונטיים דוגמת חומרים טופולוגיים, חומרים המנצלים עקרונות קוונטיים חדשניים לשליטה בתכונותיהם
- (6) עקרונות חדשניים של תורת הקוונטים עם השלכה לטכנולוגיה
- (7) נושאים אחרים אותם אתם רואים כנוגעים ישירות ל QST (פרטו).

ד. פעילות הכשרה

אם קיימת, אנא תארו בקצרה את פעילות ההכשרה בנושא QST המתקיימת במוסדכם (או בשיתוף עם מוסדות אחרים):

(1) לתלמידי תואר ראשון שאינו פיזיקה:

(2) לתלמידי תארים מתקדמים:

(3) לפוסט-דוקטורנטים:

חלק ב' - הצרכים והמטרות של הנהלת המוסד בפיתוח תחום ה-QST לשנים הקרובות

כאמור, ות"ת, באמצעות ועדת ההיגוי, שוקדת על פיתוח תכנית לאומית אקדמית לקידום התחום בשנים הקרובות. לתכנית כזו יהיו מספר מרכיבים, שהמרכזיים שבהם הינם – (1) קרן תחרותית לתמיכה בחוקרים ובקבוצות מחקר בתחום; (2) תמיכה במרכזי/מכוני QST מוסדיים; בהנחה שהמרכיב (2) יכלול בנוסף לתמיכת ות"ת גם השקעה של המוסדות עצמם במרכזים, אנו מעוניינים להבין ולהכיר את הצרכים והתכנון של כל מוסד. לצורך התכנון בלבד תוכלו להניח סדר גודל תקציבי של עד כ-10 מלש"ח בשנה למוסד ממקורות חיצוניים לו – ות"ת ומקורות אחרים – וזאת כמובן מעבר למקורות העצמיים שהמוסד יקדיש לנושא. אנו מדגישים שאין לראות במספר זה התחייבות אלא עזר תכנוני; ובכל מקרה תקציב כל מוסד יושפע מפרמטרים שונים וביניהם נפח ואיכות הפעילות המחקרית הקיימת במוסד בתחום.

א. באיזו מידה אתם צופים כי נושא ה-QST יוכל/צריך להוות קטר צמיחה בפיתוח המחקר במוסדכם בשנים הבאות? אנא פרטו כיצד אתם רואים את מקומו לצד נושאים אחרים בעדיפות מחקרית במוסדכם.

[] עדיפות גבוהה יחסית לתמיכה בתוכניות פיתוח אחרות במוסד

[] עדיפות דומה לזו של מספר תוכניות פיתוח אחרות

[] תוכניות אחרות נמצאות בעדיפות על תכנית זו

ב. אם ציינתם שבמוסדכם לא קיים מרכז או מכון מחקר בתחום ה-QST או בתחומים משיקים לו, האם המוסד מתכוון להקים מרכז כזה?
אם כן מהו טווח הזמן הצפוי להקמתו?
אם לא, מהו המבנה המתוכנן במוסד על מנת לפתח את התחום?

ג. תארו תכנית סכמטית 5-שנתית למוסדכם, שמכילה סעיפים כדוגמת הסעיפים הבאים, כולל סדרי גודל תקציביים (ממקורות המוסד וממקורות חיצוניים):

- קליטת אנשי סגל חדשים (כולל רכישת ציוד לסגל חדש)
- רכישת/שדרוג תשתיות מחקר מרכזיות
- קליטת והכשרת סגל טכני תומך
- בניית תכניות לימודים והכשרה בנושא
- מלגות לתלמידי מחקר ופוסט-דוקטורנטים
- קידום שת"פ מחקריים אינטר-דיסציפלינריים בתחום
- קידום מחקרים בעלי פוטנציאל פורץ דרך בתחום (high risk-high return)
- קידום שת"פ מחקריים בינלאומיים
- קידום שת"פ עם התעשייה ומערכת הביטחון, והעברת ידע בתחום

לגבי ארבעת הסעיפים הראשונים ברשימה, אנא שימו לב לענות גם על הנקודות הבאות לגבי כל אחת מהן:

- קליטת אנשי סגל חדשים בחמש השנים הקרובות

- 1) מהו לדעתכם הצורך ויכולת הקליטה של המוסד בתחום ב-5 השנים הקרובות?
- 2) בכמה אתם מעריכים את תקציב ההצטיידות הנדרש לקליטת אותם אנשי סגל בחמש השנים הקרובות?

- **תשתיות מחקר משותפות**: אנא פרטו את רשימת הציוד התשתיתי אותו הייתם מעוניינים לרכוש למוסדכם במהלך 5 השנים הקרובות. סדרו את הרשימה לפי סדר העדיפויות שלכם. ציינו עלות משוערת לכל רכיב ציוד ואת העלות הכוללת.

- **כוח אדם טכני**: האם בכוונתכם להגדיל את מצבת כוח האדם הטכני או את רמת הכשרתו כדי לענות על הצרכים ב 5 השנים הקרובות? אם כן, פרטו והעריכו עלויות.

- **פעילות הכשרה**: האם לדעתכם יש צורך בשינוי תכניות הלימודים וההכשרה בנושא לתלמידי תואר ראשון ו/או תארים מתקדמים? אם כן אנא פרטו את השינויים שלדעתכם מוסדכם ירצה לערוך ועלויות משוערות

מוסד	מס' חברי סגל ליבה	מס' חברי סגל בפריפריה	מס' חברי סגל פוטנציאליים
ויצמן	23	11	0
טכניון	32	6	0
העברית	23	9	3
תל אביב	24	3	3
בר אילן	7	7	5
בן גוריון	21	7	0
אריאל	12	9	0
חיפה	2	4	0
סה"כ	144	56	11
	211		

טבלה ה.1: חוקרי QST במוסדות השונים ע"פ קרבה לתחום – ליבה, פריפריה ופוטנציאל

מוסד	תקשורת קוונטית	סימולטורים קוונטיים	חיישנים קוונטיים	חישוב קוונטי	חומרים קוונטיים	עקרונות חדשניים בתורת הקוונטים
ויצמן	2	4	10	3	12	5
טכניון	8	2	22	5	15	6
העברית	10	14	18	13	9	9
תל אביב	1	4	3	4	6	2
בר אילן	3	2	5	1	2	2
בן גוריון	3	1	6	3	5	5
אריאל	3	0	4	2	7	6
חיפה	2	2	2	2	1	—
סה"כ	32	29	70	33	57	35

טבלה ה.2: חוקרים בליבת ופריפריה QST בפילוח לפי תת-תחום של QST

הנתונים בטבלאות הבאות: ה.3, ה.4, ה.5, ה.6 הם מתוך "תפוקות מחקר ופיתוח בישראל: פרסומים מדעיים בהשוואה בינלאומית 1990-2011", ד"ר דפנה גץ, ד"ר אבישג גורדון, ד"ר נועה לביד, יאיר אבן-זוהר, איריס אייל, אלה ברזני, מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה, אוגוסט 2013

שטח	דירוג הקדימות של השטח בישראל	דירוג הקדימות של השטח בעולם
Clinical Medicine	1	1
Physics	2	3
Chemistry	3	2
Engineering	4	4
Social Sciences, general	5	7
Biology & Biochemistry	6	6
Mathematics	7	12
Psychiatry/Psychology	8	14
Neuroscience & Behavior	9	11
Plant & Animal Science	10	5
Molecular Biology & Genetics	11	13
Computer Science	12	16
Materials Science	13	8
Environment/Ecology	14	9
Geosciences	15	10
Economics & Business	16	18
Space Science	17	21
Immunology	18	20
Microbiology	19	19
Pharmacology & Toxicology	20	17
Agricultural Sciences	21	15

עיבוד של מוסד שמואל נאמן לנתוני Thomson Reuters

טבלה 3. : דירוג קדימות שטחי מחקר שונים בישראל ובעולם 2007-2011

2011-2007			2006-2002			שטח
תרומת ישראל לשטח ב-OECD (%)	תרומת ישראל לשטח בעולם (%)	מספר פרסומים	תרומת ישראל לשטח ב-OECD (%)	תרומת ישראל לשטח בעולם (%)	מספר פרסומים	
0.67	0.46	599	0.81	0.65	554	Agricultural Sciences
1.33	1.07	3,190	1.42	1.25	3,290	Biology & Biochemistry
1.04	0.65	4,291	1.11	0.78	4,229	Chemistry
1.32	1.14	13,761	1.53	1.39	12,750	Clinical Medicine
2.22	1.70	2,001	2.08	1.73	2,540	Computer Science
1.16	1.03	1,056	1.45	1.37	850	Economics & Business
1.12	0.78	3,806	1.32	1.03	3,644	Engineering
0.90	0.72	1,190	1.03	0.88	1,032	Environment/Ecology
0.85	0.66	1,087	0.89	0.74	906	Geosciences
1.42	1.26	827	1.56	1.45	855	Immunology
0.87	0.51	1,365	0.79	0.54	1,114	Materials Science
2.44	1.74	2,812	2.71	2.15	2,383	Mathematics
1.08	0.86	825	1.14	1.02	749	Microbiology
1.62	1.39	2,182	1.58	1.45	1,826	Molecular Biology & Genetics
1.60	1.43	2,319	1.61	1.49	2,075	Neuroscience & Behavior
0.82	0.61	688	0.76	0.64	517	Pharmacology & Toxicology
1.95	1.34	6,825	1.98	1.52	6,548	Physics
0.98	0.74	2,298	1.15	0.96	2,382	Plant & Animal Science
1.88	1.76	2,539	1.90	1.82	1,943	Psychiatry/Psychology
1.38	1.22	3,428	1.48	1.36	2,320	Social Sciences, general
1.68	1.44	921	1.48	1.31	768	Space Science

טבלה 4. : מספר פרסומים ישראלים לפי שטח ותורמתם לשטח בעולם וב-OECD

בשתי תקופות זמן – לשנים 2002-2006 ולשנים 2007-2011 :

2002-2006				2007-2011			
		מספר פרסומים	ממוצע ציטוטים לפרסום מנורמל			מספר פרסומים	ממוצע ציטוטים לפרסום מנורמל
1	USA	10,678	1.5	1	USA	24,974	1.43
2	Israel	355	1.36	2	Ireland	529	1.43
3	Netherlands	746	1.23	3	Switzerland	1,689	1.36
4	Austria	384	1.2	4	Netherlands	1,734	1.34
5	Denmark	248	1.18	5	UK	4,502	1.24
6	Germany	3,683	1.18	6	Israel	890	1.21
7	Sweden	535	1.17	7	Sweden	1,282	1.19
8	Hong Kong	435	1.11	8	Germany	7,209	1.14
	OECD	29,054	1.1	9	Singapore	2,303	1.13
9	Switzerland	743	1.06	10	Australia	1,979	1.12
10	Belgium	602	0.99	11	OECD	66,130	1.1
11	UK	2,103	0.98		Hong Kong	1,104	1.07
12	Canada	963	0.97	12	Austria	770	1.07
13	Spain	963	0.92	13	Denmark	650	1.07
14	Australia	583	0.83	14	Canada	2,612	0.98
15	Japan	4,236	0.81	15	China	17,162	0.96
16	South Korea	2,218	0.77	16	Spain	2,865	0.95
17	Greece	274	0.76	17	Finland	570	0.94
18	China	3,884	0.75	18	Japan	7,377	0.9
19	France	2,250	0.75	19	Belgium	1,299	0.9
20	Finland	217	0.74	20	France	4,852	0.84

עיבוד של מוסד שמואל נאמן לנתוני Thomson Reuters

ממוצע הציטוטים לפרסום של כל מדינה בטבלה הינו ביחס לממוצע הציטוטים לפרסום בשטח,

שעמד ב-2006-2002 על 1.07, וב-2011-2007 על 2.90

טבלה ה.5 : ממוצע ציטוטים לפרסום מנורמל בתת-השטח של Nanoscience & Nanotechnology בשני חלונות זמן 2002-2006 ו 2007-2011

שטח (מדורג לפי מספר הפרסומים המצוטטים ביותר)	מספר הפרסומים המצוטטים ביותר בשטח במאגר	מספר הפרסומים הישראליים במאגר ושיעורם מהשטח
רפואה קלינית	20,704	340 (1.6%)
כימיה	11,962	127 (1.1%)
פיזיקה	9,170	210 (2.3%)
הנדסה	7,989	86 (1.1%)
ביולוגיה/ביוכימיה	5,453	98 (1.8%)
מדעי החי והצומח	5,276	111 (2.1%)
מדעי החברה	4,726	42 (0.9%)
מדע החומרים	4,692	56 (1.2%)
מדעי המוח וההתנהגות	3,017	41 (1.4%)
מדעי כדור הארץ	2,906	43 (1.5%)
מדעי הסביבה ואקולוגיה	2,822	24 (0.9%)
ביולוגיה מולקולרית וגנטיקה	2,792	72 (2.6%)
מדעי המחשב	2,620	66 (2.5%)
מתמטיקה	2,560	39 (1.5%)
פסיכיאטריה/פסיכולוגיה	2,441	42 (1.7%)
חקלאות	2,045	23 (1.1%)
פרמקולוגיה וטוקסיקולוגיה	1,906	17 (0.9%)
מיקרוביולוגיה	1,687	30 (1.8%)
כלכלה ומנהל עסקים	1,659	23 (1.4%)
מדעי החלל	1,239	47 (3.8%)
אימונולוגיה	1,207	13 (1.1%)

עיבוד של מוסד שמואל נאמן לנתוני Thomson Reuters

טבלה ה.6: מספר הפרסומים המצוטטים ביותר בעולם בשטחים השונים, מספר הפרסומים הישראליים במאגר זה ושיעורם מכלל הפרסומים המצוטטים ביותר בשטח לשנים 2001-2011

מדינה	מס' מענקי של PS&E המדינה שקשורים לקוונטום	אחוז מסך מענקי PS&E שקשורים לקוונטום	דירוג
DE	96	15%	1
FR	89	16%	2
UK	77	13%	3
CH	57	10%	4
NL	43	8%	5
SP	41	7%	6
IT	36	6%	7
IL	27	5%	8
AU	27	5%	8
SW	15	3%	9

טבלה ה.7: זכויות ERC בתחום ה PS&E שקשורות לקוונטום בפילוח לפי מדינות

מדינה	מס' מענקי של PS&E המדינה	אחוז מסך מענקי PS&E	דירוג
DE	458	14%	2
FR	444	14%	3
UK	507	17%	1
CH	239	8%	5
NL	228	7%	6
SP	187	6%	7
IT	360	12%	4
IL	134	4%	8
AU	76	2%	10
SW	93	3%	9

טבלה ה.8: זכויות ERC בתחומי ה PS&E בפילוח לפי מדינות

מדינה	אחוז הזכויות שקשורות לקוונטום	דירוג
DE	21%	4
FR	20%	5

8	15%	UK
2	24%	CH
6	19%	NL
3	22%	SP
9	10%	IT
5	20%	IL
1	36%	AU
7	16%	SW

טבלה ה.9: אחוז מזכיות ה-ERC בתחום PS&E של כל מדינה הקשורות לקוונטום

מדינה	מס' מענקי PS&E של המדינה שקשורים לקוונטום	אחוז מסך מענקי PS&E מסוג StG שקשורים לקוונטום	דירוג
DE	22	18%	1
FR	19	16%	2
UK	12	10%	3
IL	10	8%	4
NL	9	8%	5
CH	8	7%	6
SP	7	6%	7
AU	6	5%	8
IT	5	4%	9
DK	5	4%	9
BE	5	4%	9

טבלה ה.10: זכיות ה-ERC מסוג StG בשנים 2013-2016 בתחום ה PS&E שקשורות לקוונטום בפילוח לפי מדינות

מדינה	מס' מענקי PS&E מסוג StG של המדינה	אחוז מסך מענקי PS&E מסוג StG	דירוג
DE	85	15%	2

3	14%	90	FR
1	16%	98	UK
5	7%	45	IL
4	9%	54	NL
6	6%	39	CH
7	6%	36	SP
10	3%	17	AU
8	5%	30	IT
12	1%	7	DK
9	4%	28	BE

טבלה ה.11: זכויות ERC מסוג StG בשנים 2013-2016 בתחומי ה PS&E בפילוח לפי מדינות

מדינה	אחוז הזכויות PS&E מסוג StG שקשורות לקוונטום	דירוג
DE	23%	3
FR	21%	5
UK	12%	10
IL	22%	4
NL	17%	7
CH	21%	6
SP	19%	8
AU	35%	2
IT	17%	7
DK	71%	1
BE	18%	9

טבלה ה.12: אחוז מזכויות ה-ERC מסוג StG בשנים 2013-2016 בתחום PS&E של כל מדינה הקשורות לקוונטום