

נושא הפרויקט :

חקירה של תמונות המתקבלות מגלאי קרינה גזיים

לרא ג'יפרי ושמעון כהן

נובמבר 2014

תוכן עניינים

1	חלק ראשון: רקע
1	גילוי בוזון היגס והחיפוש אחר פיזיקה חדשה ב-LHC
2	ה-LHC – המאיץ המעגלי העכשווי
2	ILC – המאיץ הקווי העתידי
2	תיאור המבנה העקרוני של ניסוי כלשהו
5	תרומת מכון וייצמן למדע בנושא זה
6	התפתחות משפחת גלאי ה-THGEM לאור הדרישות הטכנולוגיות
7	חלק שני – העבודה הניסויית
7	חלק 1 - מטרת העבודה
7	חלק 2 הניסויים
7	2.1 – מבני ה-THGEM השונים
9	2.2 המערכת הניסויית
10	2.3 התלות בשטף
14	חלק 3 - סיכום ודיון
15	נספחים
15	נספח 1 – תמונות של המערכת
15	נספח 2 – ספקטרום הקרינה הנפלט משפורפרת קתודית
16	נספח 3 – הסיבה לשימוש בתערובת של גז אציל וגז מולקולרי (פולי-אטומי)
17	נספח 4 – הסבר לגבי המערכת האלקטרונית ורכיביה
18	נספח 5 – מקור פליטת קרינת x
18	נספח 6 – אופן פעולת שרשרת הכיול
19	נספח 7 – 3 התופעות המתרחשות בין אור לחומר
21	מקורות

חלק ראשון: רקע

גילוי בוזון היגס והחיפוש אחר פיזיקה חדשה ב-LHC

גילוי חלקיק הבוזון היגס בניסוי LHC ביולי 2012 [1] השלים את התצפית החסר של המודל הסטנדרטי של פיזיקת החלקיקים. למרות זאת, לדעת רבים המודל הסטנדרטי [2] נשאר מודל חלקי בלבד בשל מספר הסיבות הבאות [3]:

1. הוא לא עונה על השאלה מדוע לניוטרינו יש מסה.

2. הוא לא מסביר מדוע יש עדיפות של החומר ביקום על פני האנטי-חומר.

3. הוא לא מסביר מהם החומר האפל והאנרגיה האפילה.

בשל סיבות אלה וסיבות נוספות (שלא הובאו לעיל) קיימות היום מספר תיאוריות חלופיות הנקראות בשם

הכולל "פיזיקה חדשה" המנסות להרחיב את המודל הסטנדרטי לתיאור מלא יותר של המציאות. לשם אישוש תיאוריות אלו, יש צורך בהמשך ביצוע ניסויים במאיצי חלקיקים. כיום, המאיץ החזק ביותר הוא ה-LHC (Large Hadron Collider), השוכן בגבול שבין שוויץ לצרפת.

ה-LHC – המאיץ המעגלי העכשווי

ה-LHC [4] הוא מאיץ מעגלי, בעל היקף מסלול של 27 ק"מ היוצר התנגשויות בין שתי אלומות נגדיות של פרוטונים באנרגיה כוללת של עד 14 TeV. לאורך המאיץ יש ארבע נקודות מפגש בין האלומות, סביבן ממוקמים ניסויים (גלאים) גדולים. גלאים אלה (שגודלם יכול להגיע לעשרות מטרים), מורכבים משכבות רבות של גלאי משנה, שתפקידם לזהות את החלקיקים הנוצרים בהתנגשות בין הפרוטונים ולמדוד את התנע והאנרגיה שלהם בכדי שניתן יהיה לנתח את התהליך שהתרחש בהתנגשות. שני הניסויים העיקריים ב-LHC הם ATLAS [5] ו-CMS [6] אשר גילו במשותף את ההיגס. מעבר לגילוי ההיגס, ניסויים אלה, ביחד עם הניסויים הנוספים ב-LHC, אמורים לנסות ולמצוא סימנים לפיזיקה חדשה, מעבר למודל הסטנדרטי. לעת עתה לא נמצאו סימנים כאלה, אך המחקר צפוי להימשך עוד שנים רבות, במקביל לשרדוג אנרגית ה-LHC וגלאיו, ולאור הכמות האדירה של המידע המופק בניסויים.

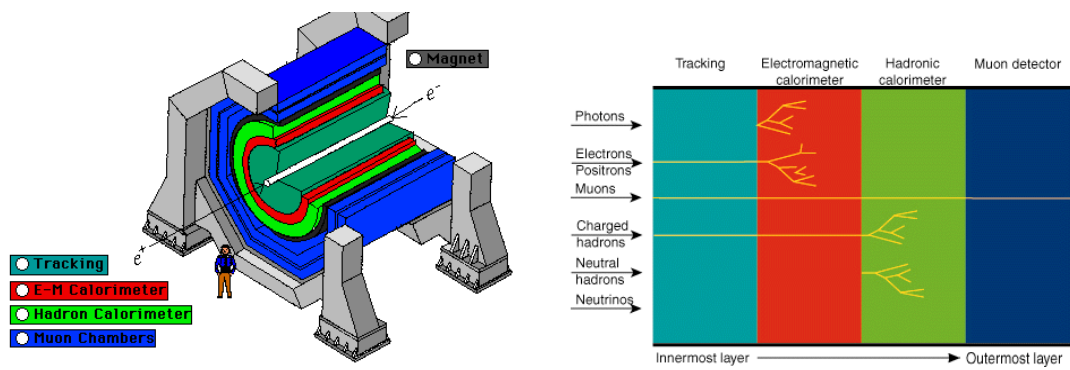
ILC – המאיץ הקווי העתידי

במקביל להמשך הפעילות ב-LHC, מתקיים כיום מאמץ כלל עולמי לתכנון מאיץ חדש – ה-ILC (International Linear Collider) [7]. בשונה מה-LHC המעגלי, ה-ILC יהיה מאיץ קווי של אלקטרונים ופוזיטרונים.

מאחר שהאלקטרון והפוזיטרון הם חלקיקים אלמנטאריים (בניגוד לפרוטון המורכב משלושה קווארקים), המדידות ב-ILC יהיו "נקיות" יותר מאשר ב-LHC והן אמורות לתת מענה טוב יותר לחיפוש אחרי סימנים לפיזיקה חדשה. ב-ILC יהיו שני גלאים, שיוצבו לחילופין, סביב נקודת מפגש אחת של האלומות: ה-ILD (International Large Detector) [8] וה-SiD (Silicon Detector) [9]. הפרויקט בו לקחנו חלק עוסק בפיתוח טכנולוגיות גילוי חדשות עבור ניסוי ה-SiD. בכדי להבין את ההקשר הכללי של הפרויקט יש צורך בתיאור המבנה העקרוני של ניסוי כזה.

תיאור המבנה העקרוני של ניסוי כלשהו

גלאי רב-משימתי כמו ה-SiD (וכן ILD, CMS ו-ATLAS) בנוי ממספר שכבות של גלאי משנה הממלאות פונקציות משלימות [10], ומתעדות את מסלוליהם של כל החלקיקים הנוצרים בהתנגשות, אשר זמן החיים שלהם ארוך ממספר ננו-שניות (חלקיקים בעלי זמן חיים קצר יותר דועכים סמוך לנקודת ההתנגשות לחלקיקים ארוכי חיים). תרשים סכמטי של גלאי כזה מופיע באיור 1.



איור 1 : תרשים סכמתי של הגלאי הרב-משימתי בחתך רוחבי ובמבט ממעל

השכבה הראשונה, הקרובה ביותר לנקודת המפגש של האלומות, נקראת ה-tracker. שכבה זו רגישה לחלקיקים טעונים - אלקטרונים ופוזיטרונים, מיאונים והדרונים טעונים (פרוטונים, פיונים וקאונים) ושקופה לחלקיקים ניטראליים (פוטונים, והדרונים ניטראליים). חלקיקים טעונים עוברים דרך ה-tracker ומשאירים בו אנרגיה מועטה. תפקיד ה-tracker הבנוי בדרך כלל מלוחות סיליקון דקים המחולקים לפיקסלים בגודל כמה עשרות מיקרון הוא למדוד את תנע החלקיק ע"י מעקב אחרי מסלולו בשדה מגנטי חזק. כיוון הטיית המסלול מלמד אם החלקיק שלילי או חיובי. השכבה השנייה נקראת הקלורימטר האלקטרומגנטי (electromagnetic calorimeter) ותפקידה הוא למדוד את האנרגיה של הפוטונים, האלקטרונים והפוזיטרונים. חלקיקים אלה נעצרים לחלוטין בשכבה זו (כלומר, הם משקיעים בה את כל האנרגיה שלהם) בעוד ששאר החלקיקים האחרים (הדרונים טעונים ומיאונים) משאירים אנרגיה מועטה בשכבה זו וממשיכים הלאה לשכבות הבאות. השכבה השלישית של הגלאי נקראת הקלורימטר ההדרוני (hadronic calorimeter). זוהי שכבה עבה יחסית (עובייה ב-SiD כ-1 מטר) אשר תפקידה למדוד את האנרגיה של הדרונים (פרוטונים, ניטרונים, פיונים וקאונים). אלה נעצרים בתוך השכבה, תוך השקעה מלאה של האנרגיה שלהם בתוכה. כל הדרון יוצר בקלורימטר "מבול" (shower) של חלקיקים משניים טעונים, הנקראים בשם הכולל Minimally Ionizing Particles (MIPs). אלה יכולים להיות פיונים, מיאונים, אלקטרונים, פוזיטרונים, או פרוטונים. מדידת האנרגיה של ה-MIPs (במישרין, או ע"י ספירתם), נותנת את אנרגיית ההדרון המקורי. השכבה החיצונית והאחרונה של הגלאי נקראת הספקטרומטר המיאוני (muon spectrometer). המיאונים הם החלקיקים היחידים המצליחים להגיע לשכבה זו מבלי להיעצר בשכבות הפנימיות יותר. תפקידה למדוד את התנע של המיאונים העוברים דרכה. בדרך כלל שכבה זו כוללת גם היא שדה מגנטי חזק שתפקידו להטות את מסלול המיאונים החוצים את השכבה. זיהוי החלקיקים בניסוי מתבצע ע"י סיכום המידע מכל שכבות הגלאי, כאשר חלקיקים מסוגים שונים ישאירו בהן חתימות שונות (ראה ציור 1). כך לסיכום הדברים נקבל שהאלקטרונים והפוזיטרונים ישאירו עקבות ב-tracker (כי הם טעונים) וישקיעו את מלוא האנרגיה שלהם בקלורימטר האלקטרומגנטי. הפוטונים (גאמות באנרגיה גבוהה) לא ישאירו עקבות כלל ב-tracker (כי הם ניטראליים) ויזוהו ע"י "חבילת" האנרגיה שישקיעו בקלורימטר האלקטרומגנטי. הדרונים הטעונים ישאירו עקבות ב-tracker ובקלורימטר האלקטרומגנטי אך ישקיעו את מלוא האנרגיה שלהם בקלורימטר ההדרוני בצורת showers. הדרונים הניטראליים יופיעו רק בקלורימטר ההדרוני ולבסוף המיאונים הם היחידים אשר ישאירו עקבות בכל שכבות הגלאי.

אחד התהליכים המעניינים והחשובים במאיצי חלקיקים הוא יצירת סילונים הדרוניים (hadronic jets) [11]. סילונים כאלה נוצרים כאשר בעת ההתנגשות נוצר קווארק או גלואון חופשי. מאחר שחלקיקים אלה אינם יכולים להתקיים כחלקיקים חופשיים (קווארקים יכולים להתקיים רק בזוגות או בשלושות בשל חוקי הסימטריה השונים), הם דועכים תוך זמן אפסי לסילון של הדרונים, הכולל מספר אופייני של 10-15 פרוטונים, ניטרונים, פיונים וקאונים. חלקיקים אלה נעים במהירויות יחסותיות במשפך צר החוצה מנקודת האינטראקציה בין אלומות החלקיקים המתנגשים ונעצרים לבסוף בקלורימטר ההדרוני תוך יצירת showers של MIPs. ההדרונים הטעונים המרכיבים את הסילון משאירים עקבות ב-tracker ובקלורימטר האלקטרומגנטי, ואילו ההדרונים הניטראליים משאירים את חותמם רק בקלורימטר ההדרוני.

אחת הדרישות המרכזיות מן הניסויים ב-ILC, היא מדידה מדויקת מאוד של אנרגית סילונים הדרוניים (בדיוק גבוה לפחות פי 2 מכפי שניתן לקבל ב-ATLAS ו-CMS). לצורך כך, הקלורימטרים (האלקטרומגנטי וההדרוני) של ה-SiD וה-ILD יהיו מחולקים למספר עצום של פיקסלים, שיאפשרו הדמאה מדויקת של תבנית ה-hadronic showers [8,9], כך יהיה ניתן לשייך לכל מסלול של הדרון טעון ב-tracker את ה-shower ההדרוני שלו. מאחר שה-tracker מאפשר מדידה מדויקת מאוד של אנרגיית הדרון הטעון, אנרגיית ההדרונים הטעונים בסילון תחושב באמצעות ה-tracker ולא בקלורימטר ההדרוני (בו מדידה מדויקת של האנרגיה קשה יותר). אנרגיית החלק הניטרלי של הסילון (כ-10% מסך האנרגיה שלו), תחושב ע"י ספירת המסלולים של MIPs בתוך ה-showers של ההדרונים הניטרלים בקלורימטר ההדרוני. כך, חוסר הדיוק יוגבל לחלק קטן מסך האנרגיה של הסילון והדיוק הכללי יהיה גבוה מאוד.

מימוש גישה זו למדידת אנרגיה של סילונים הדרוניים מציב דרישות מיוחדות בפני הניסוי. כך, ב-SiD יהיה מגנט על-מוליך פנימי שיכלול את ה-tracker, את הקלורימטר האלקטרומגנטי והקלורימטר ההדרוני וייצור בהם שדה אחיד גבוה של 5T (בכדי להפריד את מסלולי ההדרונים ואת ה-showers שלהם בצורה מיטבית). הקלורימטר ההדרוני יהיה בנוי מ-40 שכבות של לוחות טונגסטן או פלדה (שתפקידן ליצור את ה-showers), וביניהן אלמנטים דקים של גלאים גזיים שתפקידם למפות ולספור את מסלולי ה-MIPs ("אלמנטי דגימה"). מאחר שהקלורימטר חייב להיות מוכל בתוך השדה המגנטי יש מגבלה חמורה על קוטרו החיצוני ולכן עובי הגלאים הגזיים צריך להיות קטן מ-10 מ"מ (כולל המעטפת החיצונית, התווך הגזי, אלקטרודות המתח הגבוה והאלקטרוניקה לקריאת הסיגנלים). השטח הכולל של שכבות הגלאים הגזיים יהיה כ-4000 מ"ר – שטח עצום שאין יכולת מעשית לכסות אותו בגלאים המבוססים על אף טכנולוגיה אחרת. בכדי להגיע להדמאה באיכות טובה של ה-showers, הגלאים יהיו מחולקים לפיקסלים בגודל 1x1 סמ"ר. בסה"כ יהיו בקלורימטר כ-40 מליון פיקסלים כאלה, כל אחד עם ערוץ משלו לקריאת הסיגנל. דרך פרקטית להתמודד עם מספר כה גדול של ערוצים, המכונה "DHCAL" (Digital Hadronic Calorimetry), היא לבסס את הגילוי על קריאה בינארית של אלמנטי הדגימה ("1" אם עבר דרך הפיקסל חלקיק, "0" אם לא), במקום על קריאה אנלוגית של גובה הסיגנל [9]. מדידת האנרגיה של ה-shower בסכימה זו מבוססת על ספירה פשוטה של מספר הפגיעות של MIPs (נמצא שאנרגיית ה-shower מתכונתית למספר הפגיעות). מימוש סכימת ה-DHCAL מציב מספר דרישות לגלאים הגזיים האמורים לממש אותה (מעבר למגבלה על

העובי הכולל): יעילות גבוהה לגילוי MIPs (מעל 95%), מניעת cross-talk בין פיקסלים כך שכל פגיעה תיספר פעם אחת בלבד ועמידות גבוהה בפני "מטחים" הדרוניים (העלולים להביא לפריצות חשמליות). כיום, ישנן מספר טכנולוגיות שונות של גלאים גזיים הנבדקות למטרה זו, בהן:

* RPCs (Resistive Plate Chambers) [12].

* MICROMRGAS (Micro Mesh Gaseous Structures) [13].

* double-GEMs (double gaseous Electron Multipliers) [14].

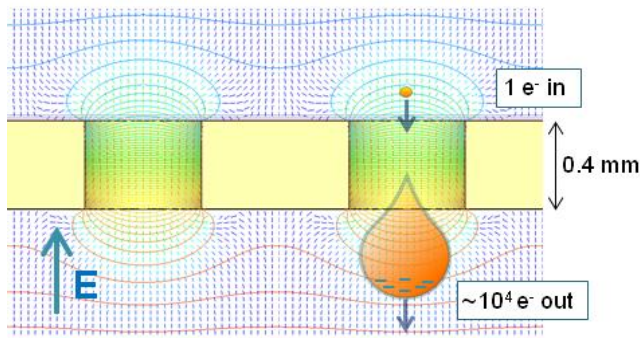
תרומת מכון וייצמן למדע בנושא זה

בשנים האחרונות, קבוצת מדענים בראשותו של פרופסור עמוס ברסקין ממכון וייצמן, בשיתוף מספר קבוצות מחקר מרחבי העולם פיתחו תכנון ראשוני (prototypes) של אלמנטי דגימה מבוססי THGEM לשם יישומם בקלורימטר ההדרוני של ה-SiD [15-17].

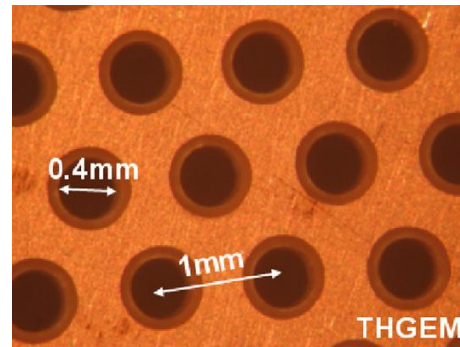
ה-THGEM (Thick Gas Electron Multiplier) [18,19] הוא גלאי גזי המתאים לכיסוי שטחים נרחבים באמצעות אלקטרודות גילוי פשוטות ועמידות. ככל הגלאים הגזיים, עקרון הפעולה שלו הוא יצירת סינגל חשמלי ע"י הכפלה אקספוננציאלית של מטען חופשי ראשוני הנוצר בגז בתגובה למעבר קרינה מייננת דרכו.

ה-THGEM מיוצר בטכנולוגיית מעגלים מודפסים (PCB - Printed Circuit Boards). הוא מורכב מלוח מבודד דק עשוי FR4 (או חומרים מבודדים אחרים) המצופה נחושת משני עבריו, ובו מערך צפוף של חורים זעירים קדוחים בניצב לפני השטח. איכול כימי של הנחושת המבוצע לאחר קידוח החורים, יוצר טבעות מבודדות דקות סביב היקפם (איור 2). כאשר מופעל מתח של כמה מאות וולט בין שני צידי הגלאי, נוצר בחורים שדה חשמלי גבוה (מסדר גודל של 10-20 kV/cm). אלקטרונים חופשיים הנוצרים בקרבת ה-THGEM בעקבות מעבר חלקיק טעון בגז, נסחפים לתוך החורים בהשפעת שדה חשמלי (שדה סחיפה) חיצוני. בתוך השדה הגבוה שבחורים, האלקטרונים צוברים אנרגיה קינטית גבוהה מספיק ליינון אטומי הגז בהתנגשות איתם, כך שמספר האלקטרונים גדל אקספוננציאלית במהלך תנועתם דרך החור, עד יציאתם מעברו השני (איור 3). על כל אלקטרון הנכנס לחור מתקבלים כמה אלפי אלקטרונים ביציאה ממנו (ממוצע היחס בין מספר האלקטרונים ביציאה למספר האלקטרונים בכניסה לגלאי נקרא ההגבר הגזי שלו – gas gain). תהליך הכפלת האלקטרונים, הנקרא באנגלית multiplication avalanche ("מפולת הכפלה"), חיוני ליצירת סינגל חשמלי שיהיה גבוה מספיק מעל הרעש האלקטרוני. אם הגבר הגז של שלב יחיד אינו גבוה מספיק, ניתן להרכיב סדרה של שניים או יותר THGEMs בזה אחר זה, כך שהאלקטרונים היוצאים מן השלב הראשון עוברים הכפלה נוספת בשלב השני וכן הלאה.

היתרונות של הבסיסיים של ה-THGEM הם היותו גלאי עמיד, פשוט וזול, המתאים להתקנה קלה על פני שטחים גדולים. יתרונות אלה, ובנוסף ההגבר הגבוה הניתן להשגה בשלב הכפלה יחיד, הופכות אותו למועמד מוביל כחלק משכבת הגילוי שב-DHCAL.



איור 3 : תיאור סכמתי של תהליך הכפלת האלקטרונים בתוך החור



איור 2 : מערך החורים בלוח המבודד FR4

התפתחות משפחת גלאי ה-THGEM לאור הדרישות הטכנולוגיות

מחקר רב נעשה על THGEM הן באופן ניסיוני והן באופן תיאורטי לשם מציאת הקונפיגורציה האופטימאלית שתאפשר יעילות גילוי גבוהה מבלי להתפשר על העמידות הנדרשת בסביבה הדרונית מאתגרת. בסביבה כזו, לצד MIPs המותירים בדרך כלל מספר קטן של אלקטרונים חופשיים בגז, ייתכנו מאורעות בהם מתקבל גם יינון מאסיבי. בתנאים אלה, תהליך ההכפלה עלול להתדרדר לפריצה חשמלית (discharge). מאחר שהן ההגבר (ולכן יעילות הגילוי) והן הסיכוי לפריצה חשמלית גדלים עם המתח על הגלאי, לא פשוט לשמור על יעילות גילוי גבוהה מבלי שיהיו פריצות חשמליות. פריצה חשמלית בגלאי משביתה את פעולתו לזמן קצר (עד לחזרת המתחים לערכם הנומינלי) ויוצרת "זמן מת" ("dead time") ביכולת הגילוי. במקרים קיצוניים, פריצה חשמלית עלולה אף לגרום לפגיעה בלתי הפיכה באלקטרוניקת קריאת הסיגנל. בשל חשיבות הנושא, עיקר המיקוד היה בפיתוח קונפיגורציה המבטלת או מפחיתה את תופעת הפריצות החשמליות על ידי הוספת שכבה התנגדותית (רזיסטיבית) על פני האנודה. שכבה כזו, על אף שאינה מונעת פריצות חשמליות, יכולה להקטין באופן משמעותי את עוצמתן. שיכוך הפריצות החשמליות נובע מכך שאלקטרונים העוברים תוך כדי הפריצה בגז אל האנודה הרזיסטיבית, נשארים על פניה זמן ארוך מספיק כדי ליצור שדה חשמלי נגדי המקטין את השדה החשמלי החיצוני, ובכך בולם את המשך הפריצה ומעבר המטען בגז.

במסגרת המחקר (שקדם לעבודה זו) פותחה משפחה של גלאי THGEM מסוג WELL - אלו גלאים אשר בהם ה-THGEM מוצמד ישירות לאנודה ללא מרווח ביניהם, בשונה מקונפיגורציות "סטנדרטיות" בהן יש מרווח של לפחות 2 מ"מ בין ה-THGEM לאנודה (מרווח זה מכונה "induction gap" ונחוץ לצורת קבלת סיגנלים מהירים). היתרון של קונפיגורציית ה-WELL הוא שהיא מאפשרת יצירת גלאי דק יותר, המותאם לדרישות הגיאומטריות של ה-DHCAL. מבין גלאי ה-WELL, הגרסה המתאימה ביותר ל-DHCAL נקראת SRWELL (Segmented Resistive WELL). קונפיגורציה זו משלבת אנודה רזיסטיבית לשיכוך פריצות חשמליות עם רשת של מוליכים דקים המונעים cross-talk בין פיקסלים שכנים.

להלן ביצועי ה-SRWELL כפי שנמדדו בניסוי ב-CERN, עבור אלומות פיונים ומיאונים באנרגיה של 150 GeV [16]:

- יעילות הגילוי (detection efficiency) 97%-98%
- זיהוי מיקומי (pad multiplicity) 1.1

- הסתברות של פריצות חשמליות (discharge probabilities) $\sim 10^{-6}$ פריצות/חלקיק פוגע עבור מיואונים ו- $\sim 10^{-5}$ עבור פאיונים בשטפי קרינה בסדר גודל של kHz/cm^2 .
 - עובי הגלאי הכולל (ללא אלקטרוניקת קריאת הסיגנל) הוא 5-6 מ"מ.
- מאפיינים אלו עושים את SRWELL למועמד מבטיח לשמש כאלמנט גילוי ב-DHCAL של ניסוי ה-SiD.

חלק שני – העבודה הניסויית

חלק 1 - מטרת העבודה

על אף ביצועי המרשימים של ה-SRWELL כפי שתואר לעיל, מתברר כי ההגבר שלו יורד בשטפי קרינה גבוהים. על פניו, נראה כי זו אינה מגבלה קריטית ב-DHCAL, אך התופעה מחייבת בדיקה יסודית, כבסיס לשיפור אפשרי בביצועי הגלאי ע"י שינויים מושכלים בגיאומטריה, בחומרי המבנה או בגז עצמו. עבודה זו התמקדה בחקירה השוואתית של תלות של הגבר הגלאי בשטף הקרינה, במספר קונפיגורציות שונות של גלאים מבוססי THGEM. הניסויים בוצעו בשלושה מבנים שונים של גלאים בעלי שלב הגבר אחד בהם האלקטרודות מוצמדות ישירות לאנודה רזיסטיבית או מטאלית לשם יצירת קונפיגורציה של WELLS-Type. שלושת המבנים שנחקרו בהשוואה זה לזה הם: ה-THWELL, RWELL ו-SRWELL. מדידה נוספת בוצעה בקונפיגורציה סטנדרטית של THGEM עם induction gap, כ-'reference' למבנים האחרים שהוזכרו לעיל. המחקר התמקד בבדיקת תלות הגבר הגלאי בשטף החלקיקים הפוגע בו. מתוך השוואת התוצאות במבנים השונים ניתן לגזור מסקנות לגבי התהליכים המעורבים בירידת ההגבר.

חלק 2 הניסויים

2.1 – מבני ה-THGEM השונים

האלקטרודות בהם השתמשנו היו בעלות שטח פעיל של 30×30 מ"מ. קוטר החורים היה 0.5 מ"מ ועובי האלקטרודה 0.4 מ"מ, רוחב הטבעות המבודדות סביב שפת החורים היה 0.1 מ"מ והמרחק בין מרכזי החורים 1.0 מ"מ. ה-THGEM בקונפיגורציה ה-WELL היה מצופה נחושת בצידו האחד בלבד. החורים היו מסודרים במערך ריבועי. כאמור, לשם השוואה נעשה שימוש גם באלקטרודת THGEM רגילה, בעלת ציפוי נחושת בשני צדדיה ומערך משושה של חורים (בעל אותם פרמטרים גיאומטריים).

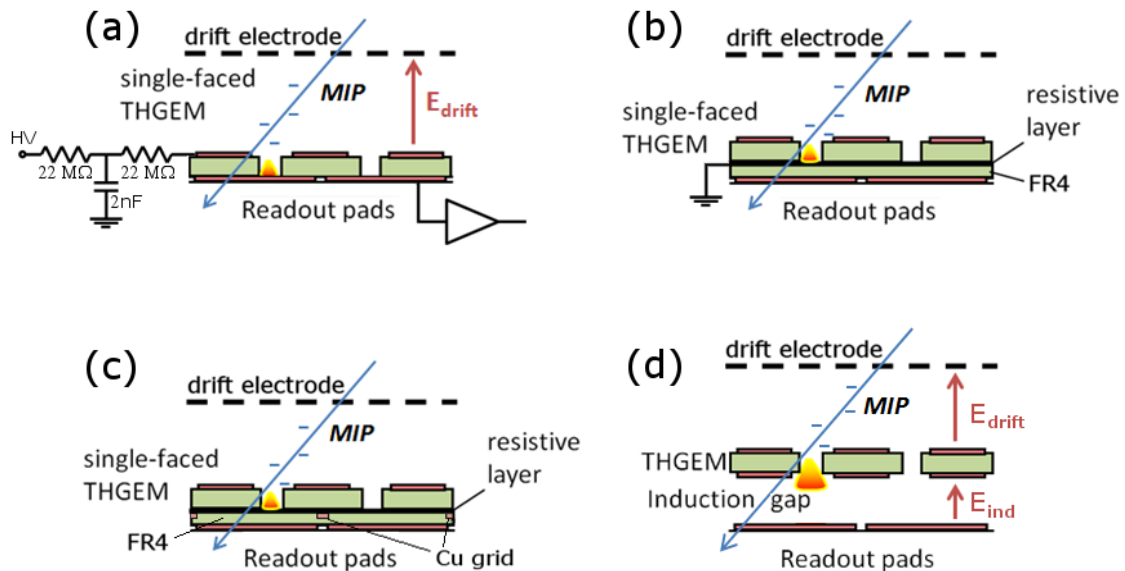
המבנה הראשון - THWELL (Thick WELL)

במבנה זה, האלקטרודה ממוקמת ישירות על גבי האנודה המתכתית, ממנה מתקבלת קריאת האותות לשם המשך עיבוד אלקטרוני (איור 4a). ה-THWELL מתאים ליצירת גלאים דקים (הודות להיעדר ה-induction gap). יתרון נוסף של מבנה זה הוא בקבלת הגבר גבוה יותר במתח נתון ביחס למבנה הסטנדרטי של THGEM, דבר הנובע מכך שהשדה החשמלי בתוך החור הסגור גבוה יותר מאשר בחור הפתוח. מאחר שמבנה זה אינו כולל אנודה רזיסטיבית, הוא אינו מתאים לשיכוך פריצות חשמליות (אלא אם מוסיפים לו נגד חיצוני גדול), ולכן שימש כאן לצורך השוואתי בלבד.

המבנה השני - RWELL (Resistive WELL)

ב-RWELL (איור 4b) הצד התחתון של ה-THGEM מונח ע"ג אנודה רזיסטיבית. אנודה זו מורכבת מדף

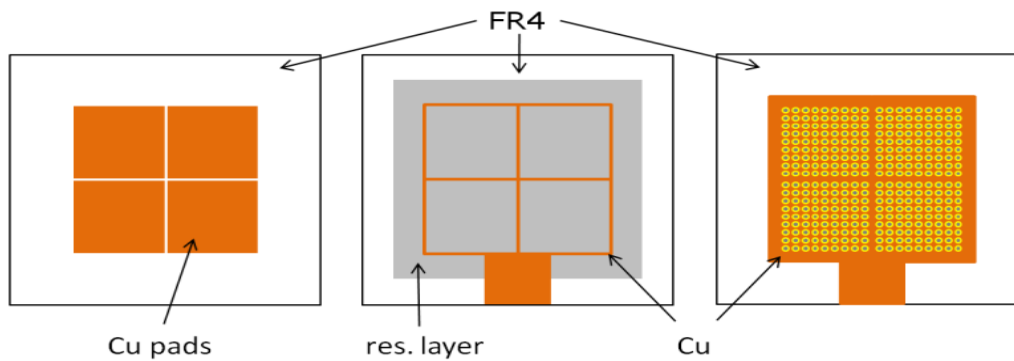
מבודד בעובי 0.1 מ"מ (עשוי FR4) אשר עליו מותזת שכבה מיקרונית של תערובת חלקיקי גרפיט ואפוקסי. האלקטרונים הנוצרים בתהליך ההכפלה מגיעים אל פני השכבה הרזיסטיבית ונעים על גביה באיטיות כלפי יציאה המוליכה לאדמה. הסיגנל עצמו מושרה, תוך כדי תנועת האלקטרונים בגז, על readout pads הממוקמים מאחורי המשטח המבודד. ה-RWELL משלב את תכונות ה-THWELL עם יכולת שיכוך מצוינת של פריצות חשמליות. החיסרון שבמבנה זה הוא תופעת cross talk הנובעת מתנועת אלקטרוני ה-avalanche על גבי השכבה הרזיסטיבית מעל פיקסלים שכנים, תופעה שאינה רצויה ב-DHCAL.



איור 4: ציור סכמתי של ארבע הקונפיגורציות השונות של גלאי THGEM שנבחנו במסגרת המחקר הכולל: (a) THWELL, (b) RWELL, (c) SRWELL ו-(d) THGEM+induction gap. ה-drift electrode היא רשת מתכתית המשמשת ליצירת שדה הסחיפה המוליך את האלקטרונים החופשיים אל תוך החורים. העבודה שלנו התמקדה בביצוע ניסויים ב-SRWELL.

המבנה השלישי - SRWELL (Segmented Resistive WELL)

תופעת ה-cross talk ניתנת לפתרון על ידי הוספת רשת (grid) של פסים מוליכים דקים ישירות מתחת לשכבת הגרפיט הרזיסטיבית, במקביל לגבולות הפיקסלים (**איור 5**) כך שכאשר אלקטרוני ה-avalanche נוחתים על גבי השכבה הרזיסטיבית הם נעים עליה עד הגיעם לפסים המוליכים, ומשם הם מסולקים מיידית לאדמה. המבנה החדש נקרא SRWELL (**איור 4c**). ה-SRWELL משלב את כל התכונות הטובות של המבנים הקודמים (עובי מינימאלי, הגבר גבוה, שיכוך פריצות חשמליות) עם מניעת cross-talk בין פיקסלים, ולכן יכול להתאים לשימוש ב-DHCAL.



איור 5 : תיאור סכמתי של 3 השכבות המרכיבות את ה-SRWELL

2.2 המערכת הניסיונית

המדידות נעשו כאשר הגלאי (כל פעם במבנה אחר) מתוקן בתוך תא מאלומיניום בקוטר 15 ס"מ ואורך 7 ס"מ עם חלון (דרכו עברה הקרינה) בעובי 50 מיקרון עשוי קפטון¹. שדה הסחיפה נוצר באמצעות רשת (drift electrode) במרחק 5 מ"מ מאלקטרודת ההכפלה (WELL או THGEM). הגז בו השתמשנו היה תערובת של 95% ניאון (גז אציל) ו-5% מתאן בלחץ אטמוספרי, שהוזרם דרך התא בספיקה של 100 סמ"ק/דקה (השיקולים בבחירת הגז לגלאי גזי מתוארים בנספח 3).

מקור הקרינה העיקרי בו השתמשנו היה גנרטור קרינת X בעל מטרת נחושת. ספקטרום הקרינה הנפלטת מן המקור כלל קו ב-8 keV הנקרא "קרינה אופיינית" ורקע רציף של קרינת עצירה² (Bremsstrahlung) המכונה "קרינה רציפה", אופן יצירת קרינת x מופיע בנספח 5 וספקטרום הקרינה הנפלט מהשפופרת הקתודית מופיעה בנספח 2. מעקב אחרי מיקום קו ה-8 keV בספקטרום הנמדד של השטפים השונים היה הבסיס למדידת תלות הגבר הגלאי בשטף הקרינה, כפי שיתואר בהמשך. בניסויים מוקדמים השתמשנו גם במקור ברזל-55, הפולט קרינת X באנרגיה של 5.9 keV, כחלק מתהליך הלימוד וההתנסות האישית.

אספקת המתח הגבוה לאלקטרודות של הגלאי נעשה באמצעות ספק מתח מסוג CAEN N471A. על הקו בין הספק לגלאי הותקנו מסנני תדר נמוך (Low Pass Filter) למניעת רעשים ($C=2nF, R=22M\Omega$). שדה הסחיפה בין ה-drift mesh לגלאי היה תמיד 0.5 kV/cm. המדידות התבצעו ב-pulse mode (דהיינו – טיפול נפרד בסיגנלים מופרדים בזמן). עיבוד האות נעשה בשרשרת רכיבים סטנדרטיים שכללה קדם מגבר (charge sensitive pre-amplifier, דגם Canberra 2006), מגבר לינארי (shaping amplifier, דגם Ortec 572A) ומנתח רב ערוצי (MCA, multi channel analyzer, דגם Amptek 8000A). הסבר לגבי תפקידם של רכיבים אלה מופיע בנספח 4.

שרשרת הכיול

לאחר הגבר האות וביטול הרעשים המתווספים לו, האות המוגבר "הנקי" נכנס ל-MCA לשם עיבוד האותות וניתוחם.

לשם קריאה נכונה של המידע המתקבל ב-MCA יש בתחילה לכייל את הצירים כך שהערוצים של ה-

¹ קפטון (Kapton), או Polyimide הוא חומר פלסטי בעל תכונות מכניות מצוינות המאפשר, בהקשר שלנו, הכנת חלונות דקים ואטומים שקופים לקרינת x.

² קרינת עצירה זו היא קרינה רציפה שבה התפלגות עוצמת הקרינה אינה אחידה וכוללת עליות חדות כקווים ספקטראליים של אורכי גל שונים.

MCA (histogram bins) הנעים מ-0-1024 יהיו מקושרים לערכי המטען המתקבלים מהאותות הנכנסים. אופן הכיול נעשה על ידי הזרקת מטענים ידועים למערכת ומציאת המשוואה הליניארית הקושרת בין המטען לערוץ הדגימה בו הוא מקבל את המקסימום כך שנקבל התאמה חד-חד ערכית בין 2 המשתנים (הב"ת והתלוי). הסבר על אופן העבודה בביצוע שרשרת הכיול מופיע **בנספח 6**.

2.3 התלות של ההגבר בשטף

מטרת המחקר הייתה לבדוק האם בהוספת השכבה הרזיסטיבית בגלאי ממשפחת WELL יש ייעול במערכת הגילוי כך שנקבל הגברים גבוהים גם בשטפים גבוהים. הרעיון הבסיסי בניסוי:

מגדילים בהדרגה את שטף הקרינה ומתעדים את השינוי במיקום קו ה-8 keV. הגדלת השטף נעשית ע"י הגדלת זרם גנרטור קרינת ה-X (החל מ-0.5v עד ל-4.5v המהוות arbitrary units לזרם) והסרה הדרגתית של פילטרים המנחיתים את הקרן (החל מ-5 פילטרים עד הפילטר הבודד). לייצוג השינוי בהגבר מציגים את היחס בין מיקום הקו בספקטרום במדרגת שטף נתונה למיקומו בספקטרום במדרגת השטף הנמוכה ביותר.

כפי שהוסבר לעיל, שינוי עוצמת הקרינה במתח קבוע נעשה ע"י הוספת/הסרת פילטרים של Cu על גבי מקור הקרינה, כאשר עובי כל שכבה היא כ-30 מיקרומטר כך שלבסוף קבלנו טווח רחב של קצבים החל מ-0.1 הרץ לממ"ר עד ל- 10^5 הרץ לממ"ר, כאשר הוספה של כל פילטר על גבי המקור מהווה בעצם הפחתה של שטף הקרינה בפקטור 3 בכל שלב של מדידה עבור מתח קבוע. מספר המדידות הבלתי תלויות היה כ-5 כאשר כל אחת מהם ארכה כ-10 דקות (הזמן המשוער עד ייצוב המערכת), כל אחת מהקריאות נשמרה באופן אוטומטי במחשב בקובץ המיוחד לה. לשם קבלת שטפים גבוהים יותר, הורדנו בהדרגה את מספר הפילטרים, תוך קביעת זרם הגנרטור כך שכל מדרגה תייצג עליה של כחצי סדר גודל (בערך פקטור 3) בשטף.

מדידת שטף

לשם חישוב השטף הקרינתי שמהווה בהגדרה כמות האירועים המתקבלים ליחידת זמן ליחידת שטח יש למצוא את סך האירועים המתקבלים בתמונת ההיסטוגרמה (בטווח הרלוונטי) ולחלק אותו במכפלת משך הזמן בו המערכת פעלה בשטח ההארה של המקור.

שטח מקור ההארה ידוע והינו 20 מ"מ רבוע, משך המדידה 10 דקות המהווים 600 שניות ובעזרת מדידת סך האירועים בעזרת חישוב ה-gross area ניתן לקבל את סך הקריאות המתקבלות לאורך כל המדידה (בגבולות הגזרה הרלוונטיים) במתחים השונים.

$$Rate = \frac{\text{number of recorded events}}{\text{measurement duration} \times \text{irradiated area}}$$

מדידת הגבר

הגבר הגלאי הוא היחס בין מספר האלקטרונים ב-avalanche בסוף תהליך ההכפלה למספר האלקטרונים הראשוניים שהתחילו את התהליך. לשם מציאת ההגבר במתח קבוע חילקנו את הערך שבו ממוקם קו ה-8 keV המתקבל בספקטרום (בפמטו-קולון) במטען הממוצע של האלקטרונים החופשיים הנוצרים בגז בעקבות בליעה של פוטון באנרגיה 8 keV. מאחר שבממוצע דרושה השקעה של 36 אלקטרון וולט בגז ניאון כדי לקבל אלקטרון חופשי אחד, בליעת פוטון של 8 keV נותנת בממוצע $8000/36 = 220$ אלקטרונים חופשיים, כך שהמטען הראשוני הוא:

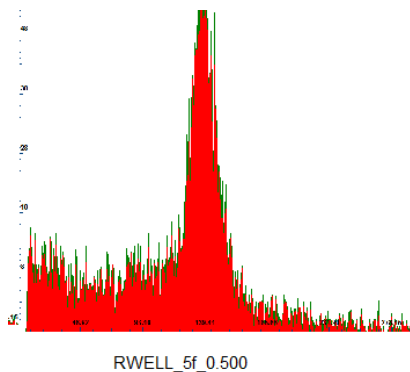
$$primary\ charge = 220 \times 1.6 \cdot 10^{-4} fC = 0.0352 fC$$

וההגבר:

$$Gain = \frac{avalanche\ charge}{primary\ charge} = \frac{8\ keV\ peak\ position\ (fC)}{0.0352\ fC}$$

אופן מציאת הפיק

בתחילה מציאת ערך הפיק נעשה באופן ממוחשב, על ידי קביעת גבולות הגזרה המעניינים אותנו (רוחב הפולס בחצי הגובה) כך שהמחשב עצמו חישב את הפיק (ה-centroid) אך בהמשך הגענו למסקנה שקביעת מיקום הפיק בעין תהיה מדויקת באותה מידה. דוגמא לספקטרום המתקבל במערכת:

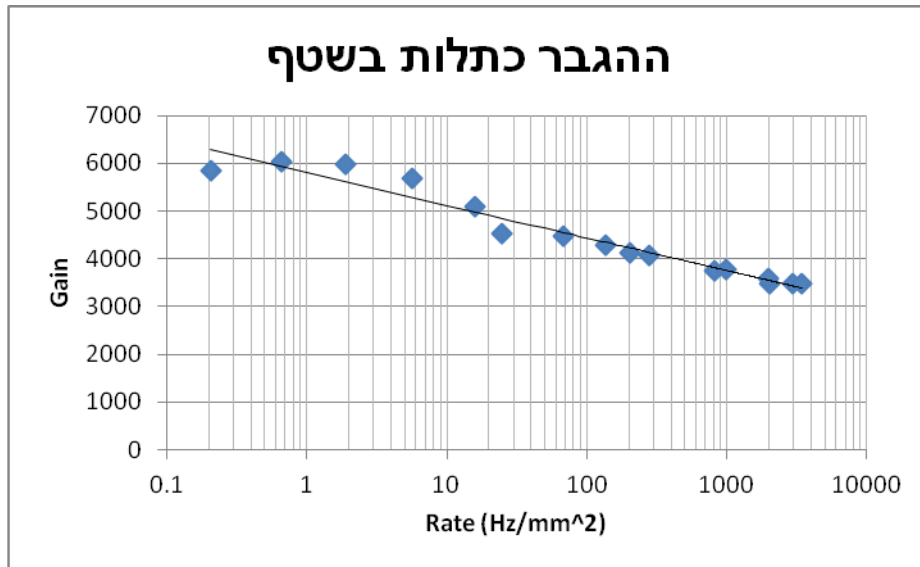


תנאי מקדים למדידת קצב קבוע במערכת – הגבר קבוע למשך שעה

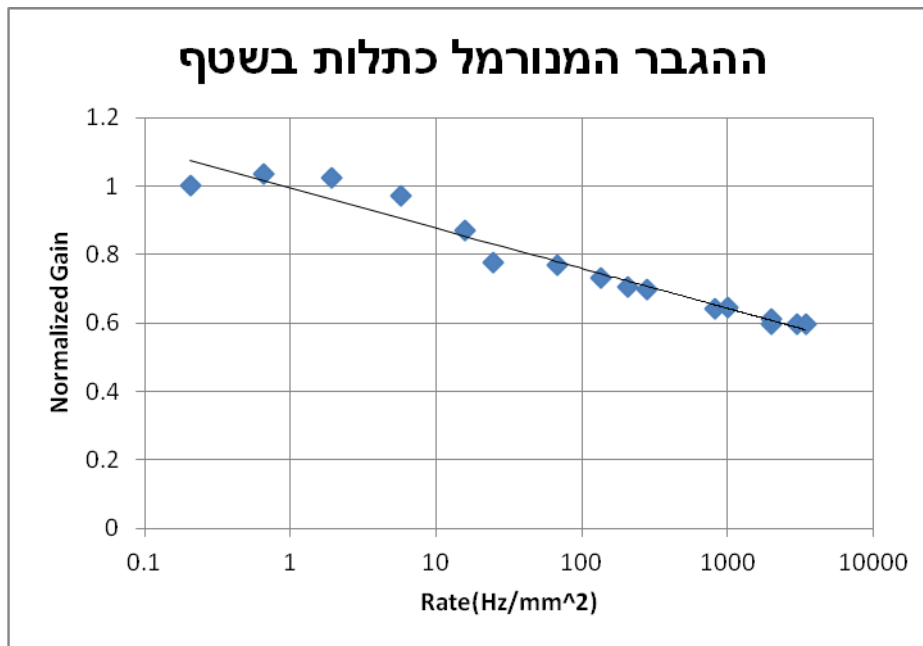
לשם ייצוב המערכת, הגלאי הוקרן במשך לילה שלם בקצבי קרינה נמוכים (כך שההגבר התחילי היה קבוע ויציב שלא משתנה עם הזמן) פעולה זו אפשרה לנו לקבוע תנאי התחלה קבועים הזהים בכל מדידה ומדידה בניסוי.

להלן מדידות השונות שבוצעו במהלך העבודה הניסויית עבור גלאי SRWELL

I (A.U)	n. filters	Peak Ch. (fC)	RATE (Hz/sec*mm^2)	Range	Gross A.	Gain	normalized Gain
0.1	5	205.6	0.205612	20-384	2418	5840.909	1
0.2	5	212.7	0.656548	20-384	7721	6042.614	1.034533
0.6	5	210.7	1.910374	20-384	22466	5985.795	1.024805
1.8	5	200.1	5.710459	20-384	67155	5684.659	0.973249
5	5	179.06	15.75944	20-384	185331	5086.932	0.870914
1.8	4	159.3	24.6335	20-384	289690	4525.568	0.774805
5	4	157.9	68.28776	20-384	803064	4485.795	0.767996
1.8	3	150.7	134.9687	20-384	793616	4281.25	0.732977
2.7	3	145.08	205.2991	20-384	1207159	4121.591	0.705642
3.6	3	143.41	278.3745	20-384	1636842	4074.148	0.697519
2	2	131.95	814.3806	20-384	4788558	3748.58	0.64178
5	2	122.7	2015.084	20-384	11848693	3485.795	0.59679
0.4	1	132.8	995.6791	20-384	1951531	3772.727	0.645914
0.8	1	126	1983.343	20-384	3887352	3579.545	0.61284
1.2	1	122.3	2964.94	20-384	5811283	3474.432	0.594844
1.4	1	122.6	3445.866	20-284	2026169	3482.955	0.596304



איור 6 : הגבר המערכת כתלות בשטף



איור 7 : ההגבר המנורמל כתלות בשטף

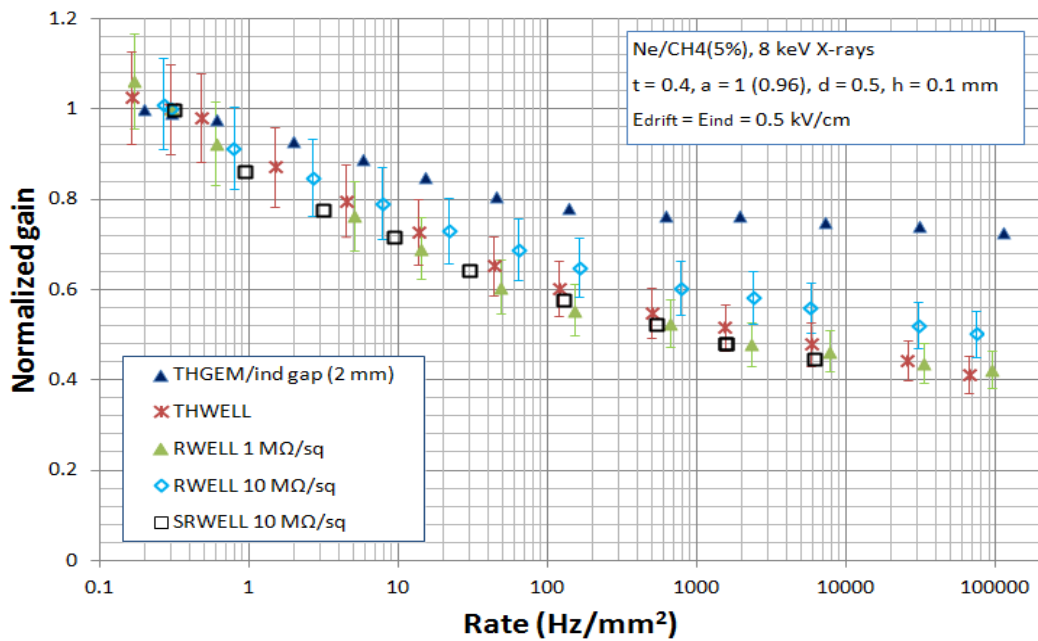
לפי תוצאות המדידות מתקבלת המסקנה הבאה:

בשטפים נמוכים, המערכת מגבירה היטב את האותות הנכנסים בשל זמן ההיענות הגבוה שלה מאשר קצב המאורעות המתרחשים אך ככל שהשטפים הולכים וגדלים, הגלאי לא מסוגל לעמוד בלחץ ובטרם פינוי המטען של המאורעות הקודמים מסביבת איזור ההכפלה מתקבלים אותות חדשים, המתפתחים לכן בשדה חשמלי מופחת – ולכן בהגבר נמוך יותר.

קבלת התנהגות דומה עבור כל המבנים – ירידה מונוטונית של ההגבר בקצבי קרינה גבוהים

בהמשך למדידה זו, בוצעה במעבדה סדרה נרחבת של מדידות דומות על קונפיגורציות שונות של גלאים, שמטרתן הייתה להבין איזה אלמנט במבנה הגלאי גורם לירידה בהגבר [20]. בפרט, רצינו לבדוק האם הירידה בהגבר נובעת מסילוק איטי של האלקטרונים מפני השכבה הרזיסטיבית, או מכך שאלקטרונים "נתקעים" לזמן ממושך על גבי הדופן המבודדת של החור.

תוצאות סדרת המדידות (לה היינו שותפים) מוצגות באיור 8. נראה שכל המבנים מטיפוס WELL מציגים ירידה דומה של ההגבר כפונקציה של השטף. בפרט – ירידה כזו ניכרת גם ב- THWELL, בו אין שכבה רזיסטיבית. לעומת זאת, ירידת ההגבר ב- THGEM עם מרווח induction אחריו מתונה בהרבה. המסקנה ממדידות אלה היא שהשכבה הרזיסטיבית אינה אחראית לירידה בהגבר. ככל הנראה, הירידה בהגבר נובעת מהצטברות אלקטרונים על הדופן המבודדת של החור. ההבדל בין מבני ה-WELL הסגורים למבנה הפתוח של ה-THGEM הרגיל יכול לנבוע מהצורה השונה של השדה החשמלי הנוצר בהם.



איור 8 : ההגבר המנורמל כתלות בשטף עבור המבנים השונים

חלק 3 - סיכום ודיון

הפרויקט הניסיוני שביצענו היה חלק מעבודה רחבה לפיתוח גלאים מבוססי THGEM כאלמנטי דגימה בקלורומטר ההדרוני של ניסוי ה-SiD המתוכנן למאיץ הקווי העתידי. הפרויקט התמקד בחקירת תלות הגבר הגלאי, מדגם SRWELL, בשטף הקרינה הפוגע בו. המדידות שביצענו אישרו ממצאים ראשוניים קודמים לכך שהגבר ה-SRWELL יורד עם שטף הקרינה. השוואת התוצאות שלנו לתוצאות מחקרים משלימים על קונפיגורציות גילוי נוספות – ה-THWELL, RWELL וה-THGEM בעל מרווח ההשראה (induction gap), מביאה למסקנה כי – בניגוד למה שניתן היה לשער מראש – השימוש בשכבה הרזיסטיבית לשיכוך פריצות חשמליות אינו אחראי לירידה הנצפית בהגבר בשטפי קרינה גדלים. ההשערה הסבירה ביותר היא שהירידה בהגבר נובעת מהצטברות אלקטרונים על הדופן המבודדת של החורים – תופעה משותפת לכל הגלאים מטיפוס WELL. הירידה בהגבר מצטברת לכ-50% בשטפים של 105 Hz/mm². שטפים אלה גבוהים ב-1-2 סדרי גודל מאלה הצפויים בקלורומטר ההדרוני של ה-SiD, ולכן נראה שתופעה זו אינה מהווה בעייה משמעותית. ה-SRWELL נותר, לפיכך, מועמד מבטיח לשמש כאלמנט גילוי בקלורומטר, על בסיס תכונותיו האחרות: עובי דק, יעילות גילוי גבוהה, העדר cross-talk בין פיקסלים שכנים ועמידות גבוהה בפני פריצות חשמליות.

נספח 1 – תמונות של המערכת

להלן מספר תמונות מהמערכת שנבנתה ותוכננה:



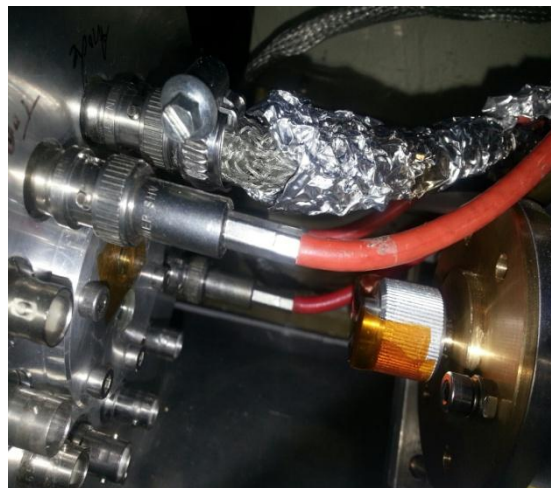
מבט מלמעלה (מצד ימין מקור הקרינה ומצד שמאל מערכת הגלאי)



מבט מלפנים לעבר מערכת הגלאי



מבט מקרוב לעבר מערכת הגלאי



מבט מקרוב (מצד ימין מקור הקרינה ומצד שמאל מערכת הגלאי)

נספח 2 – ספקטרום הקרינה הנפלט משפורפרת קתודית

על פי התורה הקלאסית של האלקטרומגנטיות כל מטען מואץ מקרין קרינה א"מ, אופי הקרינה הרציפה הנפלטת ממנו תלויה אך ורק בהפרש הפוטנציאלים המאיץ V שבין הקתודה לאנודה ולא בסוג החומר ממנו עשויה האנודה [21]. על פי התרשים המצורף מתקבל שספקטרום הקרינה הנפלטת מורכב מ-2 קרינות: האחת נקראת הקרינה הרציפה הנחתכת באופן חד באורך גל מינימאלי λ_{\min} והאחרת הנקראת הקרינה האופיינית בה נקבל קווי קרינה (המתאימים לאורכי גל מסוימים) אשר נקבעים לפי החומר ממנו עשויה האנודה.

ההסבר להימצאות קווים אלה בספקטרום ולגבול התחתון בקרינה הרציפה סופק בידי מודל האטום כפי שהוצע על ידי נילס בוהר, מודל אשר היווה מבוא לתיאוריה החדשה של מבנה האטום. קיום הגבול התחתון בקרינה הרציפה נובע מכך שמרבית האנרגיה של האלקטרונים הפוגעים באנודה הופכת לחום, כאשר המעט שנשאר אכן עובר לקרינה כך שהאנרגיה הגדולה ביותר שיכול לקבל פוטון ה-x הנפלט תהא שווה לכל האנרגיה הקינטית שיכול האלקטרון לצבור כאשר הוא הואץ בהפרש הפוטנציאלים V , ערך

$$\lambda_{\min}^0 [A] = \frac{12400}{E[eV]} \text{ לפי:}$$

קיום הקווים הספקטראליים בספקטרום (המכונה "קרינה אופיינית") נובעת מהעובדה שכאשר אנרגיית האלקטרונים הפוגעים מספיק גבוהה, אזי בהתנגשותם באלקטרונים הפנימיים שבאטומים של האנודה נקבל את עקירתם החוצה ("יינון") מחד והערכות מחדשת של המבנה האלקטרוני שנשאר מאידך, הערכות זו מלווה בפליטת הקרינה האופיינית.

נספח 3 – הסיבה לשימוש בתערובת של גז אציל וגז מולקולרי (פולי-אטומי) בגלאים גזיים מקובל להשתמש בתערובת של גז אציל וגז מולקולרי (פולי-אטומי).

בגז אציל (מונו-אטומי) האטומים אינם יוצרים מולקולות. השקעת אנרגיה בגז אציל (בזמן מעבר חלקיק טעון דרך הגז, או כחלק מתהליך ההאצה של אלקטרונים ב-avalanche) יכולה לגרום אך ורק ליינון או עירור של אטומים (לעומת גז פולי-אטומי – בו חלק גדול מהאנרגיה עובר לתנודות וסיבוב של המולקולות). לכן, גז אציל מאפשר קבלת הגבר גבוה במתח נמוך (כי הסיכוי ליינון גבוה יותר). מצד שני, שימוש בגז אציל ללא תוספת גז פולי-אטומי, כרוך באי יציבות בהגבר בשל הסיכוי הגבוה לפריצות חשמליות הנגרמות מגידול לא מבוקר של ה-avalanche.

בזמן פריצה חשמלית הגז נהיה מוליך (פלזמה) כך שמטען המואץ דרכו עלול ליצור התפרקות רגעית ("spark") - תהליך לא רצוי שעלול לגרום ל-"הרג" של הגלאים שנמצאים מסביב במקרה הרע, ובמקרה הפחות רע לזמן החלמה ארוך בה מערכת צריכה להתאושש כך שבזמן ה-"החזרה לחיים" נפסיד מידע לגבי התנגשויות העתידיות אשר עבורם לא נקבל קריאות מהגלאי ("dead time").

כפי שהזכרנו לעיל, תוך כדי ההגברה האלקטרונית פוגעים באטומי הגז ומייננים אותו ומעלים את האלקטרונים שברמות היסוד לרמות אנרגיה גבוהות יותר (עירור), אותם אלקטרונים מעוררים חוזרים בחזרה לרמת היסוד כחלק מהפליטה הספונטנית ובמעבר אנרגטי – נפלטת קרינה (השווה בערכה להפרשי רמות האנרגיה) בצורת פוטונים. פוטונים אלו בעלי אנרגיית uv מסוגלים לפגוע באטומי המתכת ולשחרר מהם אלקטרונים חופשיים אשר "לא קשורים" כלל לעצם תהליך ההגברה כך שלשם ביטול/הפחתת התוספות אלקטרוניים לא רצויים אלו לאות הנמדד מוסיפים לגז האציל גז פולי אטומי (במינון מסוים) אשר "יבלע" את אנרגיית הפוטון ה- uv הלא-רצויה לטובת ויברציה או רוטציה של המולקולה הדו-אטומית.

היחס בין ריכוזי הגזים (הגז האציל לבין הגז הפולי-אטומי) הוא משחק עדין (tradeoff) בין יציבות לבין ההגברה הרצויה : אם נרצה יציבות גבוהה (ע"י הפחתת ריכוז הגז האציל בתערובת) – תהיינה פחות הגברה

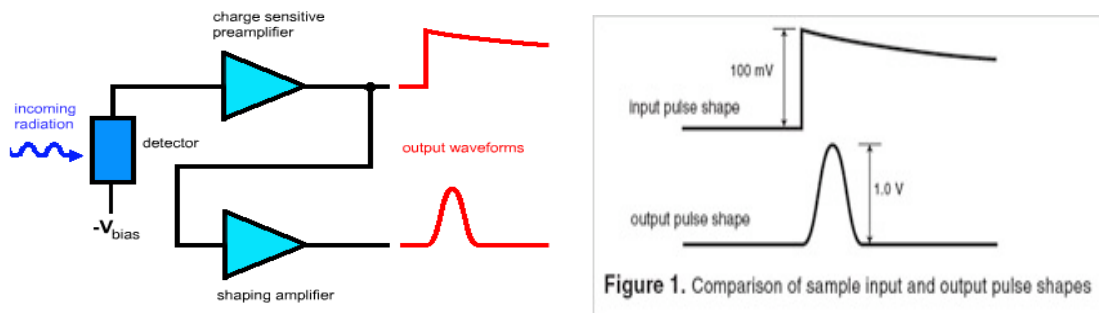
כי המולקולות תבלענה את האנרגיה לשם רטט וסיבוב ואם נרצה הגברה גבוהה (ע"י הוספת ריכוז של גז אציל בתערובת) – תהיינה פחות יציבות במערכת [22]

נספח 4 – הסבר לגבי המערכת האלקטרונית ורכיביה

שלב 1 - קדם מגבר (Charge Sensitive Preamplifier) הוא רכיב אלקטרוני הממוקם בקרבת הגלאי (להפחתת הרעשים החיצוניים שבמערכת) ומטרתו היא בחיזוק עוצמת האות הגולמי החלש והרגעי המתקבל מהמערכת לשם עיבוד המשך. חיזוק עוצמת האות נעשה ע"י היצמדות לאות הרגיש מאוד לרעש הרקע המתקבל מהאנודה ובהארכתו למשך זמן רב יותר כך שלבסוף במוצא האות יהיה סינגל מדרגה בעל זמן דעיכה ארוך יותר ובגובה מתכונתי למטען ה-avalanche. הסוג בו השתמשנו היה Canberra 2006.

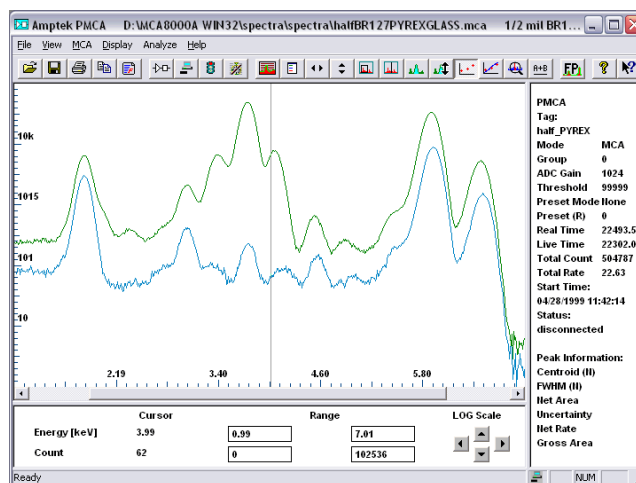
שלב 2 - Shaping Amplifier בשלב הגברה זה, אות המדרגה הנכנס מוגבר מאחדות/מעשרות מילי-וולטים לאות גיאוסייני בעל ערכי וולטים בודדים. אופן הצגת האות נטול רעשים באופן הנ"ל מאפשר את כניסתו לשלב ה-3. הסוג שבו השתמשנו היה Ortec 572A

אופן פעולת שלבים 1 ו-2 על אות הנכנס :



שלב 3 – Multi Channel Analyzer מטרת מנתח רב ערוצי היא בניית היסטוגרמה של גובה הפולסים המוזנים אליו כקלט. הסוג שבו השתמשנו היה Amptek MCA 8000A

דוגמא להיסטוגרמה הנוצרת בעזרת MCA



נספח 5 – מקור פליטת קרינת x

לשם שליטה על השטף הפוטוני שייפלט נשתמש במקור קרינה המייצר x-ray . מקור זה מחובר ב-2 הדקיו למקור מתח של 20kV (מתוצרת Oxford Instruments model XTF5011) היוצר קרינת x בסדר ג' 8keV.

בשלב הראשון – הקתודה מחוממת ע"י מעגל חימום כך שנפליטים אלקטרוניים בפלטה תרמיונית.

בשלב השני – האלקטרוניים הנפליטים מהקתודה מואצים בהשפעת מתח גבוה.

בשלב השלישי - האלקטרוניים מתנגשים במטרה עשויה אטומים כבדים

בשלב הרביעי - חלק קטן מהאלקטרוניים המתנגשים במטרה, גורמים לפליטת פוטונים אנרגטיים, פליטה המכונה קרינת X

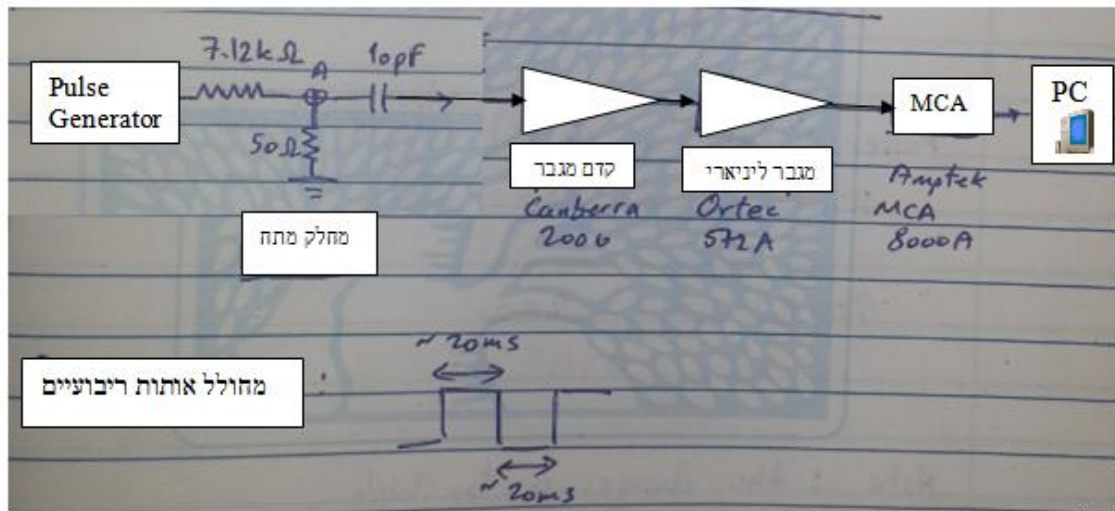
בשלב החמישי - רוב האלקטרוניים הפוגעים במטרה לא ייצרו קרינת X. הם פשוט יחממו אותה. לכן משתמשים למטרה במתכת בעלת טמפרטורת התכה גבוהה, ולרוב מקיפים אותה במערכת מקררת.

בין הקתודה (המחוברת להדק שלילי של מקור המתח) לאנודה (המחוברת להדק החיובי) שורר שדה חשמלי חזק כך שבחימום הקתודה (ע"י הזרמת זרם דרכה), ייפלטו החוצה אלקטרוני הערכיות שבאטומיה והם יואצו לכיוון האנודה (בעלת ההדק החיובי) לעבר מטרת נחושת בה הם יפגעו וייננו את האטומים שבה עד לתלישת אלקטרוני הערכיות שבה. המקומות הריקים שבקליפות הפנימיות, יאוכלסו ע"י אלקטרוניים מרוחקים כך שמעברי אנרגיה אלו תיפלט קרינת x בעלת אנרגיה 8000 אלקטרון-וולט [23].

נספח 6 – אופן פעולת שרשרת הכיול

כפי שהזכרנו, פעולת הכיול נעשית ע"י הזרקת כמות ידועה של מטען לקדם מגבר ע"י טעינת קבל במחולל אותות במתח ידוע (לפי $Q = C \cdot V$) ורואים מהו הערוץ מבין 1024 הערוצים הקיימים המקבל את מספר הקריאות הגדול ביותר. הערוץ בו תתקבלנה מספר הקריאות הגבוה ביותר הוא בעל ערך המטען המוזרק למערכת - בתיאוריה צריך לקבל פונקציה דלתא, אך בפועל נקבל גיאוסיאן צר בעל קצוות מ-2 צידיו וזאת בשל רעש הרקע שהתווסף למערכת. בפועל, בכל שלב של מדידת הגבר כתלות בשטף ביצענו שרשרת כיול ע"י מתן פולס קבוע מראש וקיבולו ע"י קבל של $10 pF$.

להלן התיאור הסכמתי של שרשרת הכיול:



להלן דוגמא להזרקה מטענים שונים וקבלת הערוץ המייצג אותם ב-MCA:

V(Volt)	Q(fC)	MCA Channel
11	118	70.8
19.6	196	127
30	300	198.2

כך שהמשוואה המקשרת ביניהם (בין המטען המוזרק Q לערוץ Channel בכפמטו-קולון) היא:

$$Q(fC) = 1.49 \cdot Channel + 5.31$$

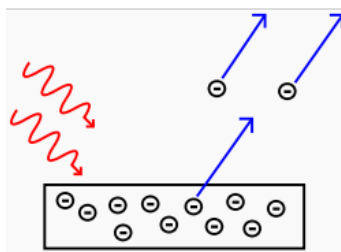
נספח 7 – 3 התופעות המתרחשות בין אור לחומר

1. אם הפוטון בעל אנרגיה נמוכה (מתחת ל-0.5 MeV) אזי התופעה שתיווצר היא האפקט הפוטו-אלקטרי תופעה אשר במהלכה ייעלם הפוטון הפוגע והאלקטרון המקבל את האנרגיה שלו ישתחרר מן האטום כך שיווצר יינון של אלקטרוני הערכיות (השוכנים בקליפות הקרובות ביותר לגרעין). בכדי לעקור אלקטרון ממתכת, יש לבצע עבודה בגודל המאפיין את המתכת הנקרא "פונקצית העבודה של המתכת" המסומנת כ-B כך שאם:

- (1) אנרגיית הפוטון תהא קטנה יותר מפונקצית העבודה, אזי לא ייעקרו אלקטרונים כלל מהמתכת.
- (2) אנרגיית הפוטון תהא שווה מפונקצית העבודה, אזי ייעקר האלקטרון מהמתכת אך ללא אנרגיה קינטית.
- (3) אנרגיית הפוטון תהא גדולה יותר מפונקצית העבודה, אזי ייעקר אלקטרון מהמתכת ואף תישאר לו אנרגיה קינטית מסוימת.

איינשטיין סיכם את המודל שלו לאפקט הפוטו-אלקטרי במשוואה הבאה:

$$E_{\text{photon}} = B + E_K$$



2. אם הפוטון הפוגע הינו בעל אנרגיה קצת יותר גבוהה ממקודם אזי התופעה תהיה **פיזור קומפטון**, אשר במהלכו הפוטון הפוגע יתנגש אלסטית באלקטרון החיצוני וישנה הן את האנרגיה של עצמו והן את האנרגיה של האלקטרון, ובלבד ששינוי זה ישמור על חוק שימור האנרגיה והתנע של הזוג ביחד, כך ש:

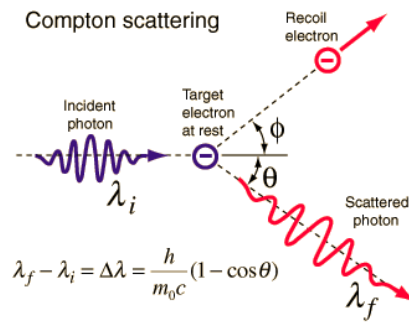
before the collision $E_{\text{photon}} = h\nu, p = \frac{h}{\lambda}$

after the collision $E'_{\text{photon}} = h\nu', p' = \frac{h}{\lambda'}$

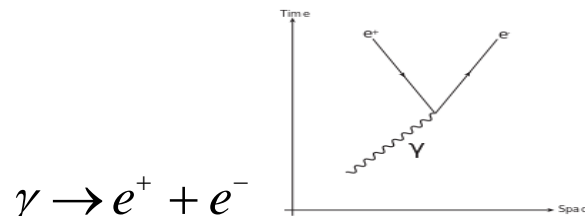
so:

$$E_{\text{kinetic}} = h\nu - h\nu'$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e$$



3. אם האנרגיה של הפוטון היא ממש גבוהה (יותר מ- 1.022 MeV) אזי בפגיעת פוטון זה בעל אנרגיה העולה על סכום מסות המנוחה של החלקיק והאנטי-חלקיק נקבל זוג של חלקיק ואנטי-חלקיק, תופעה זו נקראת **pair-production (יצירת יון-אלקטרון)** ובמהלכה האנרגיה תישמר אך לא המסה [24].



$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

- [1] <http://home.web.cern.ch/topics/higgs-boson>
- [2] <http://home.web.cern.ch/about/physics/standard-model>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Physics_beyond_the_Standard_Model
- [4] <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>
- [5] <http://home.web.cern.ch/about/experiments/atlas>
- [6] <http://home.web.cern.ch/about/experiments/cms>
- [7] <https://www.linearcollider.org/ILC/What-is-the-ILC>
- [8] The International Large Detector: Letter of Intent, arXiv:1006.3396
- [9] SiD Letter of Intent, arXiv:0911.0006
- [10] http://www.clab.edc.uoc.gr/materials/pc/surf/detectors_intro.html
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_\(particle_physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_(particle_physics))
- [12] J. Repond, Overview of the DHCAL Project, arXiv10050412.
- [13] C. Adloff et al., MICROMEAS chambers for hadronic calorimetry at a future linear collider, *JINST* 4 (2009) P11023. arXiv:0909.3197.
- [14] J. Yu et al., Application of Large Scale GEM for Digital Hadron Calorimetry, *Phys. Procedia*. 37 (2012) 393–401. arXiv:1110.4326
- [15] L. Arazi et al., THGEM-based detectors for sampling elements in DHCAL: laboratory and beam evaluation, *JINST* 7 (2011) C05011. arXiv:1112.1915
- [16] L. Arazi et al., Beam studies of the segmented resistive WELL: A potential thin sampling element for digital hadron calorimetry, *Nucl. Instrum. Meth. A* 732 (2013) 199–202. arXiv:1305.1585.
- [17] S. Bressler et al., Beam studies of novel THGEM-based potential sampling elements for Digital Hadron Calorimetry, *JINST*. 8 (2013) P07017. arXiv:1305.4657.
- [18] R. Chechik, A. Breskin, C. Shalem, D. Mörmann, Thick GEM-like hole multipliers: properties and possible applications, *Nucl. Instrum. Meth. A* 535 (2004) 303–308.
- [19] A. Breskin, R. Alon, M. Cortesi, R. Chechik, J. Miyamoto, V. Dangendorf, et al., A concise review on THGEM detectors, *Nucl. Instrum. Meth. A* 598 (2009) 107–111.
- [20] L. Arazi, et al., Laboratory studies of THGEM-based WELL structures with resistive anodes, *JINST* 9 P04011. arXiv:1310.6183

- [21] קרינה וחומר – מבוא לפיזיקה מודרנית מאת דני עובדיה ויגאל גלילי עמודים 38-39
- [22] Radiation Detection and Measurement - Glenn F. Knoll pages 204-206
- [23] קרינה וחומר – מבוא לפיזיקה מודרנית מאת דני עובדיה ויגאל גלילי עמודים 36-37
- [24] מבוא לפיזיקה מודרנית מאת דני עובדיה ויגאל גלילי עמודים 204-206,15-16,32-33