עבודת גמר במקצוע פיזיקה

נושא העבודה: חיפוש אחר עדות לקיומו של חלקיק ההיגס במאורעות בהם זוהו שני פוטונים בגלאי ATLAS במאיץ ה-LHC על ידי ניתוח התפלגות המסה האינווריאנטית של שני הפוטונים.

בוצע במסגרת תכנית "אלפא" באוניברסיטת תל אביב

מוגש ע"י קרן שאוס

דוא"ל: kerenschoss369@gmail.com

ביה"ס: מקיף י"ב המעיין

סמל ביה"ס: 444257

כיתה: י"א

העבודה בוצעה באוניברסיטת ת"א בהנחיית:

עדי אשכנזי

ראש המעבדה:

פרופסור ארז עציון

הפקולטה למדעים מדוייקים ע"ש ריימונד ובברלי סאקלר
המחלקה לאנרגיות גבוהות

תודות

ראשית ארצה להודות להורי על כך שטיפחו וגידלו אותי ומגיל צעיר החדירו בי את החשיבות הרבה של הלימודים. אלו עשו זאת בצורה טובה שגרמה לי לרצות ללמוד ולהעשיר רק יותר ויותר בכל התחומים ובעיקר בתחום המדעים אליו התחברתי כבר מגיל צעיר מאוד.

שנית, ארצה להוקיר תודה לאדם ששמו לא ידוע לי, אך בזכותו התאפשר לי לחוות כבר בגיל תיכון את עבודתו של חוקר, בזכותו נפרסה בפני קשת רחבה של אופקים למחקר אפשר בסופה בחרתי בפיזיקת החלקיקים כמקצוע אשר עסקתי בו רבות בשנתיים האחרונות. לולא המחשבה שלו על הקמת תכנית זו ומימונו, לא הייתי מכירה או מתקרבת לתחום המדהים שנקרא פיזיקה - תכנית "אלפא" הפכה את המילה "פיזיקה" ממילה ששנאתי מאוד למילה שמעלה בי רגשות של גאווה והתעניינות.

הצוות החברתי של התכנית, בראשה של המדהימה מכולן - אסנת גלים ובהדרכת המדריכים החברתיים, צעירים ומבוגרים כאחד, ראוי לקבל את מיטב התשבחות, והוא היה אחת הסיבות העיקריות שבגינן ציפיתי בקוצר רוח לכל מפגש של התכנית. אסנת - הפכה למעין אמא שניה אליה יכולתי לפנות בכל זמן ולשתף בכל הבעיות שישבו על ליבי .

גם הצוות המנהלי, בהנהגת דורית, טל כץ ויסמין, תמך בי לאורך כל הדרך והיה לאוזן קשבת לכל דבר שרק עלה על דעתי ועל כן ארצה להודות לכן רבות.

ארצה להודות גם לצוות האקדמאי של תכנית אלפא, שליווה אותי מהרגע הראשון של התכנית - בו קיבלתי מעטפה ובה מאמר באנגלית ושם המעבדה בה אחקור בשנתיים הקרובות ועד ליום בו סיימתי את המחקר במלואו. הכישורים הרבים, הידע שעזרתם לי לצבור, והמוטיבציה היו רבים ויהיו לי ככלי עזר לכל החיים. עשיתם את הבלתי אפשרי, ובזכותכם הצלחתי לעבור על עשרות מאמרים של מאות עמודים כאשר חודש לפני לא ידעתי כיצד להתמודד עם מאמר אחד של חמישה עמודים. ד"ר תומר כהן תמיד עמד בראש ודאג להקנות לנו את כל הכלים בכדי שעבודת המחקר שלנו תהיה ברמה הגבוהה ביותר, תמיד השגיח מלמעלה ודאג באופן פרטני לכל תלמיד ותלמיד. ד"ר אדר גרינברג - המנחה הקבוצתית הייתה שם תמיד – לתקן, לעזור ולתמוך. תכתובת המיילים איתה קידמה רבות את עבודתי.

בתחום הפיזיקה, המחשבים והמתמטיקה עמדה בראש עדי אשכנזי, שהייתה למנחה האישית שלי בעבודה, וזו, מעבר לכך שלימדה אותי - תלמידת תיכון - חומר ברמה אקדמאית, עדי עשתה את מה שרבים לפניה ניסו ולא הצליחו - לגרום לי לאהוב פיזיקה. עדי אהבה לאתגר אותי המון, ואני נעניתי לאתגריה בהצלחה מרובה. החיבור איתה תרם לי כלים לחיים - כיצד להתמודד עם אתגרים, כיצד ללמוד לבד וכו'.

בנוסף, ארצה להודות לכל הצוות של הצריף לאנרגיות גבוהות שקיבל את פניי בחיוך מידי בוקר כאשר הייתי מגיעה למעבדה וגרם לי להרגיש ממש כחלק ממנו ולא כאורחת, הפכתם את המחקר לחוויה, ואת המעבדה - למקום שכיף לבקר בה.

כמו בכל עבודת מחקר נתקלתי בקשיים רבים - קטנים כגדולים, ובשבילם היה הראשון לעזור שותפי למעבדה - אדר מלמד. אדר לא הרפה עד שלא הצלחתי, ודאג למחקר שלי לפעמים יותר מלמחקר שלו - אני מעריכה אותך רבות על כך ומקווה שתהיה לשם גדול בכל תחום שרק תבחר.

תודה אחרונה היא לחברתי מאי לאור, אשר שכנעה אותי להירשם לתכנית "אלפא". בזכותך, סיימתי שנתיים של מחקר ברמה אקדמאית והגעתי לתחום שלעולם לא הייתי מגיעה אליו בלעדי התכנית.

תוכן עניינים

תודות..... עמ' 2

תוכן עניינים..... עמ' 4

הקדמה אישית..... עמ' 6

תקציר..... עמ' 7

מבוא..... עמ' 8

שאלות והשערות המחקר..... עמ' 9

1. סקירת ספרות..... עמ' 10-19

1.1. חלקיקים אלמנטרים..... עמ' 10

1.1.1 מהם חלקיקים אלמנטרים?..... עמ' 10

1.1.1.1 מסה ..... עמ' 10

1.1.1.2 אנרגיה ..... עמ' 10

1.1.1.3 תנע..... עמ' 10

1.1.1.4. מטען חשמלי ..... עמ' 11

1.1.2 סיווג חלקיקי יסוד-המודל הסטנדרטי..... עמ' 11

1.1.2.1 פרמיונים..... עמ' 11

1.1.2.1.1 קווארקים..... עמ' 12

1.1.2.1.1.1 הדרון..... עמ' 12

1.1.2.1.2 לפטונים..... עמ' 12

1.1.2.2. בוזונים..... עמ' 12

1.1.2.2.1 בוזון ההיגס..... עמ' 12

1.2 מאיץ חלקיקים..... עמ' 12

1.2.1 מהו מאיץ חלקיקים..... עמ' 12

1.2.2 המאיץ בסרן (מאיץ הLHC)..... עמ' 13

1.2.2.1 גלאי ה-ATLAS..... עמ' 14

.1.3 המחקר..... עמ' 18

1.3.1 המחקר של פרופ' ארז עציון..... עמ' 18

1.3.2 המחקר של עדי אשכנזי..... עמ' 18

1.3.3 המחקר שלי..... עמ' 19

.2 שיטות וחומרים..... עמ' 20-22

.3 תוצאות..... עמ' 23-34

.4 דיון..... עמ' 35-36

.5 ביבליוגרפיה..... עמ' 37

.6 נספחים..... עמ' 38

6.1 הקוד שנכתב ליצירת הגרפים בעבודה ולבדיקת החלון..... עמ' 38

6.2 היסטוגרמות שאינן חלק מהמחקר הראשי..... עמ' 55

הקדמה אישית

בשלהי כיתה ט׳, בין בחירת מגמות לתיכון ומחשבות על השנה הבאה, נודע לי על תוכנית בשם ״אלפא״ שמטרתה היא לאפשר לתלמידי תיכון מחוננים לחקור בתחומים מדעיים שונים. את המכתב על התוכנית השארתי בצד בכדי לשים דגש על בחירת המגמות לשנה הבאה, עד שיום אחד פנתה אליי חברתי הטובה מאי ואמרה לי ״שמעת על תוכנית אלפא? אנחנו חייבות ללכת!״ ואכן, אחרי שנתיים של עבודות חקר עם מאי שזכו להצלחה רבה, שוכנעתי ויחד נרשמנו לתוכנית. לאחר מספר עבודות ומבחנים עברתי את המיונים והתקבלתי לתוכנית וחברתי מאי, שלא צלח מזלה, פרגנה לי ותמכה בי מאוד.

בקיץ בין כיתה ט׳ ל-י׳ לקחתי חלק בסמינר הראשון שלי באלפא שהיווה גם את שלב המיון האחרון לתוכנית. זו הייתה הפעם הראשונה שבה שהיתי מחוץ לבית לתקופה של שבועיים. מלבד הידע האינסופי שרכשתי בהרצאות הרבות, נוכחתי לראות שיפור כמעט בלתי יאומן בכישוריי החברתיים - היכולת שלי להתחבר לאנשים זרים ולעבוד בקבוצה הפכו לטובים הרבה יותר מבעבר, הביטחון העצמי שלי עלה והרגשתי בפעם הראשונה את החוויה של להיות בחברה מקבלת, תומכת ולא שיפוטית.

לאחר הסמינר המפרך הגענו לשלב בו היינו צריכים לבחור את המעבדה בה נרצה לעבוד ואת התחום שבו נרצה לעסוק. לאחר קבלת הרשימה הארוכה של המעבדות החלטתי שארצה לחקור בתחום של מדעי המחשב ומילאתי את הטופס כך ששלושת האופציות למחקר היו מתחום זה. במפגש שלאחר הסמינר קיבלנו כל אחד מעטפה ובה מאמר מראש המעבדה ודף בו רשום התחום שבו נחקור. פתחתי את המעבדה נרגשת מאי פעם לראות באיזה משלוש המעבדות למדעי המחשב בחרו עבורי, אך נוכחתי לגלות כי התשובה הייתה – לאף אחת מהן! על הדף היה רשום ״חקר ניסיוני בחלקיקי יסוד״, ואני, שהייתי מעט המומה כי אין ולו קשר קטן בין המעבדות שבחרתי למעבדה שקיבלתי, רצתי למנחה הקבוצתית ושאלתי אותה אם לא חלה טעות במעטפה. היא השיבה לי בביטחון שצוות אלפא החליטו שזה התחום שמתאים לי מההיכרות הקצרה שלהם איתי. הייתי מעט מאוכזבת כששמעתי שאני הולכת לחקור בפיזיקה - שהיה אז המקצוע השנוא עלי בבית הספר.

החלטתי לקבל את הנושא ללא ויכוחים ולבוא בראש פתוח. את המאמר הראשון שמנה כחמישה עמודים לקח לי כמעט חודש להבין וגם זו בעזרתם של לא מעט אנשים. חששתי מעט מהאתגר שלקחתי על עצמי אך היה חשוב לי לנסות דברים חדשים. ואכן אחרי שנתיים של מחקר, פיזיקה הפך מהמקצוע השנוא עליי לאחד המקצועות האהובים עליי.

נוכחתי לראות שינוי חד ברמת האנגלית שלי ובמיומנות שלי לקריאת מאמרים. עם הזמן, פיתחתי מיומנויות רבות של מחקר, כתיבה, קריאה וסיכום. עברתי על מאמרים של מאות ואף אלפי עמודים בקלות, למדתי המון גם בתחום המתמטיקה ומדעי המחשב וכמובן שגם בפיזיקה. אני אסירת תודה לצוות אלפא שבחר בעבורי את המעבדה המדהימה הזו וחשף אותי לתחום המדהים שנקרא ״פיזיקת חלקיקים״ וכמובן על כך שסיפק לי כלים כה רבים בתחום החברתי והלימודי בו בזמן.

תקציר

במהלך השנים ניסו בני האדם לגלות את אבני היסוד של היקום, הרי הם החלקיקים האלמנטריים, ולשם כך בנו את מאיצי החלקיקים. בעזרת פענוח של רגע ההתנגשות ניתן ללמוד על תכונות החלקיקים האלמנטאריים. אחד מחלקיקי היסוד, והאחרון שהתגלה, הוא בוזון היגס. בשנת 2012 נערך ניסוי בגלאי ה- ATLAS שבמאיץ ההדרונים הגדול ה-LHC, בו נמדדו המשתנים הקינמטיים של זוגות בוזוני Z, אשר נוצרו מהתנגשויות של פרוטונים זה בזה. כאשר הפרוטונים מתנגשים ישנה סבירות מסויימת שיווצר חלקיק היגס וידעך לזוג בוזוני Z. המסה האיוריאנטית של זוגות הבוזונים היא שנמדדה והיות ונמצאו מאורעות רבים בהם המסה האינוריאנטית הזו היתה סביב הערך של 125 GeV אושש קיומו של בוזון ההיגס בעל מסה זו, ואוששה סופית נכונותו של המודל הסטנדרטי, אשר חזה את קיום ההיגס. חלקיק ההיגס אינו יציב והוא דועך זמן קצר לאחר היווצרותו לחלקיקים אחרים, למשל - שני בוזוני Z או שני פוטונים.

המחקר שלי, בודק האם במאורעות שנבדקים (אלפי מאורעות שבכל אחד מהם תיעדו התנגשות של שני פרוטונים שדעכו לשני פוטונים בגלאי ה-ATLAS במאיץ ה-LHC) נוצר חלקיק היגס ע״י חיפוש "bump" בגרף מסה אינוריאנטית של שני הפוטונים שדעכו מההיגס. את הגרף אצור מאלפי מאורעות שונים שנצפו בגלאי ה-ATLAS במאיץ ה-LHC שבכל אחד מהם תיעדו התנגשות של שני פרוטונים בהן המצב הסופי הוא שני פוטונים. בהעדר חלקיק ההיגס, נצפה שהתפלגות המסה האינוריאנטית תהיה חלקה ולכן תמצא מעין סטייה/ חלק שאינו תואם להתפלגות הכללית (bump). באזורים בגרף בהם אמצא את ה-"bump"באזור של כ- 125 GeV אוכל לדעת כי נוצר חלקיק היגס במאורעות.

על כן ניתן להגיד כי השערת המחקר אוששה, ובעזרת שיטה זו ניתן למצוא האם נוצרו חלקיקי היגס במאורעות שונים.

מבוא

המחקר שלי עוסק בחיפוש אחר עדות לקיומו של חלקיק ההיגס במאורעות בהם זוהו שני פוטונים בגלאי ATLAS במאיץ ה-LHC על ידי ניתוח התפלגות המסה האינווריאנטית של שני הפוטונים. חלקיק ההיגס התגלה בשנת 2014 לאחר שנחזה כבר בשנות השישים של המאה הקודמת ובעזרת מאיץ החלקיקים LHC אשר הוקם בז'נבה בשנת 2008 אוששו את קיומו.

על מנת לחקור את חלקיקי היסוד, נעשה שימוש במאיץ ה-LHC במעבדת CERN שבז'נבה. המאיץ מורכב משתי טבעות - הגדולה באורך של כ-27 ק"מ בעוד הקצרה באורך של כ-14 ק"מ. במאיץ מתנגשים שני פרוטונים שהואצו בטבעות, וכתוצאה מההתנגשות נוצרים חלקיקים חדשים. החלקיקים החדשים פוגעים בגלאים הרבים המותקנים במאיץ ואלו מספקים לחוקרים מידע אשר עוזר להם לאפיין את החלקיקים שנוצרו. במאיץ ארבעה גלאים מרכזיים - ATLAS, ALICE, CMS, LHCb. במחקר שלי התמקדתי בגלאי ה-ATLAS אשר הוא עצמו מורכב מגלאים רבים אשר נחלקים לארבע שכבות עיקריות אשר עוטפות זו את זו והן הגלאי הפנימי, הקלורימטר האלקטרומגנטי, הקלורימטר ההדרוני וגלאי המיואונים.

חלקיקי יסוד הינם 24 חלקיקים שונים המאוגדים תחת השם הכולל - "המודל הסטנדרטי". החלקיקים ממוינים לקבוצות שונות – בהן הגדולות ביותר הן פרמיונים ובוזונים, המכילות כל אחת מהן 12 חלקיקי יסוד. הפרמיונים מתאפיינים בספין שאינו שלם (חצי, שני שליש ...) אך לעומתם, הבוזונים מתאפיינים בספין שלם. הבוזונים הם אבני הבניין של הכוחות הבסיסיים בטבע. בקבוצה זו נכלל בוזון ההיגס, החלקיק האחרון שהתגלה ומסת המנוחה שלו היא כ-126 קילו אלקטרון וולט) ובשנים האחרונות הוא החלקיק הנחקר ביותר. חלקיקי היסוד מתאפיינים בתכונות שונות כדי להבדיל ביניהם: ספין, מסת מנוחה, מטען חשמלי, אנרגיה ותנע.

בעזרת הידע שנצבר על המודל הסטנדרטי והמחקר במאיץ ה-LHC התגלה החלקיק האחרון שחיפשו החוקרים המשתייך למודל הסטנדרטי והוא חלקיק ההיגס - מאחר שזמן החיים שלו קצר כל כך - אף גלאי לא הצליח לקלוט אותו ולא היה ניתן למדוד את תכונותיו באופן ישיר ולכן בחרו לאפיין את בוזוני ה-Z שהתפרקו לארבעה לפטונים. בעזרת המחקר והאפיון של חלקיקים אלו והסתמכות על חוקים פיזיקליים (כגון חוק שימור המסה) הוכיחו החוקרים את קיומו של חלקיק ההיגס. התגלית, שנחשבת לפורצת דרך וחדשנית ביותר הביאה אותי לחקור עוד את החלקיק החדש שהתגלה כדי ללמוד יותר על תכונותיו ולהבין כיצד ניתן לאפיין חלקיק מסוג זה - אשר לא ניתן לאפיין באופן ישיר כמו שאר החלקיקים אשר מספיקים להיקלט בגלאי.

שאלת המחקר

כיצד ניתן להבחין בקיומו של חלקיק היגס במאורעות בהם זוהו שני פוטונים בגלאי ATLAS במאיץ ה-LHC ?

השערת המחקר

השערתי היא שנוכל למצוא את חלקיק ההיגס ע״י חיפוש "bump"בגרף מסה אינווריאנטית של שני הפוטונים שדעכו מההיגס. את הגרף אצור מאלפי מאורעות שונים שנצפו בגלאי הATLAS במאיץ הLHC שבכל אחד מהם תיעדו התנגשות של שני פרוטונים בהן המצב הסופי הוא שני פוטונים . ההתפלגות של המסה האינווריאנטית היא בדרך כלל חלקה ואני משערת שאמצא מעין סטייה/ חלק שאינו תואם להתפלגות הכללית (bump). באזורים בגרף בהם אמצא את ה-"bump"באזור של כ- 125 GeV אוכל לדעת כי נוצר חלקיק היגס במאורעות. בעזרת שיטה זו בדקו נוכחות של חלקיק היגס גם בניסויים אחרים שנעשו בעבר ולכן אפעל באותה השיטה בה אוששו את קיומו של החלקיק לפני מספר שנים. (8)

1. סקירת ספרות

1.1. חלקיקים אלמנטרים

1.1.1. מהם חלקיקים אלמנטרים?

אבני הבניין של כל הכוחות והחומרים המוכרים למדע (לא ידוע על חלקיק קטן יותר) לכל חלקיק יסוד יש מספר תכונות המאפיינות אותו, באמצעותן אפשר להבדיל בין סוגים שונים של חלקיקים. נכון להיום, אנו יודעים על קיומם של 24 סוגים שונים של חלקיקי יסוד הממוינים בטבלה (איור 1). המודל הסטנדרטי הוא המודל התאורטי המקובל כיום בקהילה המדעית. התכונות המאפיינות הינן: מסה (m), אנרגיה (E), תנע$(\underset{p}{\rightarrow})$ ומטען חשמלי(Q). המסה, האנרגיה והתנע קשורות זו בזו.

1.1.1.1 מסה –

גודל הפרופורציונאלי לעוצמה שבה גוף מתנגד לשינוי ע"י כוחות שפועלים עליו. מסה של חלקיקי יסוד נמדדת ביחידה בשם אלקטרון-וולט או מגה אלקטרון וולט (מיליון פעמים אלקטרון-וולט). ניתן לחשב אותה כך:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} * m_0$$

כאשר m היא מסת הגוף, m_0היא מסת המנוחה של הגוף, u היא מהירות הגוף ו-c היא מהירות האור בריק, גודל קבוע ומהירות שלא ניתן לעלות עליה. הביטוי $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$ נקרא פקטור לורנץ ומסומן בקיצור באות γ.

1.1.1.2 אנרגיה –

ככל שלגוף יש יותר אנרגיה כמות העבודה שהוא יכול לבצע גדולה יותר. אנרגיה נמדדת ביחידות של אלקטרון-וולט כשאנו מתעסקים בחלקיקי יסוד. ניתן לחשב אותה כך:

$$E = \gamma * m_0 * c^2$$

כאשר E שווה לאנרגיה, γ הוא פקטור לורנץ.

1.1.1.3 תנע –

מסת הגוף כפול המהירות שלו במערכת ייחוס שנקבעה מראש.תנע של חלקיקי יסוד כמעט שווה למסה שלהם כיון שמהירותם שואפת למהירות האור. תנע מחושב ביחידות של אלקטרון-וולט גם כן. ניתן לחשב אותו ע"י הנוסחא:

$$E^2 = P^2c^2 + {m_0}^2c^4$$

חשוב לציין כי ביחידות טבעיות מהירות האור שווה ל-1.

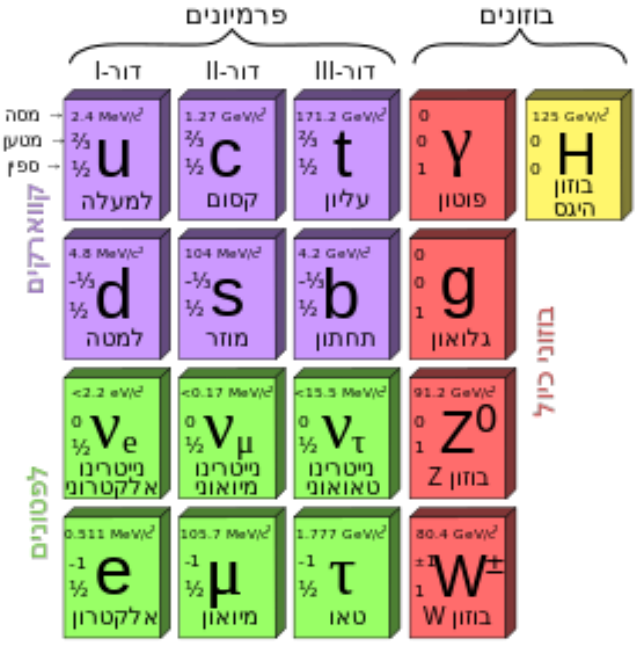
ניתן לראות ששאר יחידות המידה במשוואה (מלבד תנע) הן מכפלות של המספר אחד באלקטרון וולט בריבוע.על מנת שהמשוואה תוכל להתקיים. שתנע נמדד ביחידות של eV/C או Kg*m/sec .בטבע קיים חוק שימור התנע, לפיו תנע מעולם לא נוצר יש מאין או נעלם.

1.1.1.4 *מטען חשמלי* –

גודל פיזיקלי המשפיע על אינטראקציות אלקטרומגנטיות שהחלקיק מקיים. מטען חשמלי יכול להיות שלילי או חיובי. חלקיקים בעלי מטען חשמלי דוחים חלקיקים בעל מטען חשמלי זהה, ומטענים מנוגדים ימשכו זה את זה.

1.1.2 סיווג חלקיקי יסוד-המודל הסטנדרטי (2,7)

נכון למרץ 2016 נתגלו 24 סוגים שונים של חלקיקי יסוד, כולם מוינו לפי התכונות שלהם לטבלה המכונה המודל הסטנדרטי, המאגדת תחתיה את אבני היסוד של כל כוח טבע או חומר שאי פעם נצפה, מסבירה ע״י התכונות הללו מושגים כגון: חומר, מסה וכוחות, ולא הופרכה עד עתה. מודל זה, במקורו תאורטי. המודל הסטנדרטי מפריד את 24 חלקיקי היסוד לשתי קבוצות עיקריות, בכל אחת 12 חלקיקים: בוזונים ופרמיונים. ישנם שני הבדלים גדולים בין הפרמיונים לבוזונים: ראשית, בוזונים הינם אבני הבניין של הכוחות, והאינטראקציה בינם לבין חלקיקים אחרים היא המניעה את היקום. לעומת זאת, פרמיונים הינם אבני הבניין של החומר. ההבדל הגדול השני נוגע לתוכנת הספין: בעוד הספין של כל הפרמיונים חצי-שלם (סכום של חצי ומספר שלם), הספין של כל הבוזונים שלם. ניתן לראות באיור 1 רק 17 חלקיקים וזאת כיון שתחת האות g המייצגת גלואון- מיוצגים שמונה סוגים שונים של גלואונים יחד הם יוצרים את 24 חלקיקי היסוד.



איור 1: טבלת המודל הסטנדרטי (10)

1.1.2.1 פרמיונים

אבני הבניין של החומר. הספין של פרמיונים אינו שלם אלא ״חצי שלם״ - 1/2 או 3/2 וכו׳. מתחלקים ל-6 קוורקים (פרמיונים שמקיימים אינטראקציה עם חלקיקים מקבוצה בתוך הבוזונים, המכונים גלואונים) ול-6 לפטונים (פרמיונים שאינם מקיימים אינטראקציה זו).

1.1.2.1.1 קווארקים

הינם פרמיונים, שמקיימים אינטראקציה עם גלואונים (מקבוצת הבוזונים). האינטרציה גם גלואונים היא האינטראקציה החזקה. קווארקים יוצרים אינטראקציות חזקות עם פרמיונים בעלי ספין שערכו 1/2. (2)

1.1.2.1.1.1 הדרון

חלקיק תת-אטומי המורכב מקווארקים ואנטי חלקיקים. הקווארקים מוחזקים בשדות גלואונים הנושאים את הכוח הגרעיני החזק. (2)

1.1.2.1.2 לפטונים

פרמיונים שאינם מקיימים אינטראקציה עם גלואונים. ביניהם נמנים האלקטרונים והמיואונים.(2)

1.1.2.2 בוזונים

אבני הבניין של הכוחות, והאינטראקציה בינם לבין חלקיקים אחרים היא המניעה את היקום. לבוזונים יש ספין שלם. ישנם 12 סוגים של בוזונים המחולקים לארבע קבוצות לפי הכוח המתקשר לכל אחד מהקבוצות: שמונה מהסוגים משתייכים לקבוצת הגלואונים, המתקשרת לכוח הגרעיני החזק המלכד את ההדרונים ואת גרעין האטום. שני סוגים אחרים, בוזוני *W* ו-*Z*, אחראים על הכוח הגרעיני החלש, המתקשר לרדיואקטיביות, חלקיק הנקרא פוטון אחראי על הכוח האלקטרומגנטי, האחראי בין השאר לתופעות מוכרות של חשמל, מגנטיות ואור, ואף חלקיק הקשור לכוח הכבידה לא התגלה עד היום. (2)

1.1.2.2.1 בוזון ההיגס

בוזון ההיגס שהתגלה בניסוי *ATLAS* ב- *CERN* לראשונה בשנת 2012 ואושש ביולי 2014 סגר מצוד של שנים רבות אחר הנדבך האחרון במודל הסטנדרטי של חלקיקים. בוזון ההיגס נמצא בקבוצה נפרדת תחת הבוזונים כיוון שתכונותיו שונות מאוד מאלו של השאר. ההיגס, מאפשר וגורם לקיומה של המסה, כלומר האינטראקציה בינו לבין פרמיונים ובוזונים מאפשרת את קיומה של מסות החלקיק הללו במודל הסטנדרטי. הספין שלו שווה ל-0 והוא בצורתו הטבעית נטול מטען חשמלי. בוזון ההיגס יכול לדעוך לשני פוטונים או ארבעה אלקטרונים. אם הוא בכל מסה או אנרגיה גדולה יותר מהמצופה הוא יכול להתפרק לארבעה מיואונים (2). מסת המנוחה של הבוזון (השווה גם לשורש הפרש הריבועים של האנרגיה והתנע שלו) נמדדה כ $125 \pm 0.21 \ \frac{GeV}{c^2}$.

1.2 מאיץ חלקיקים

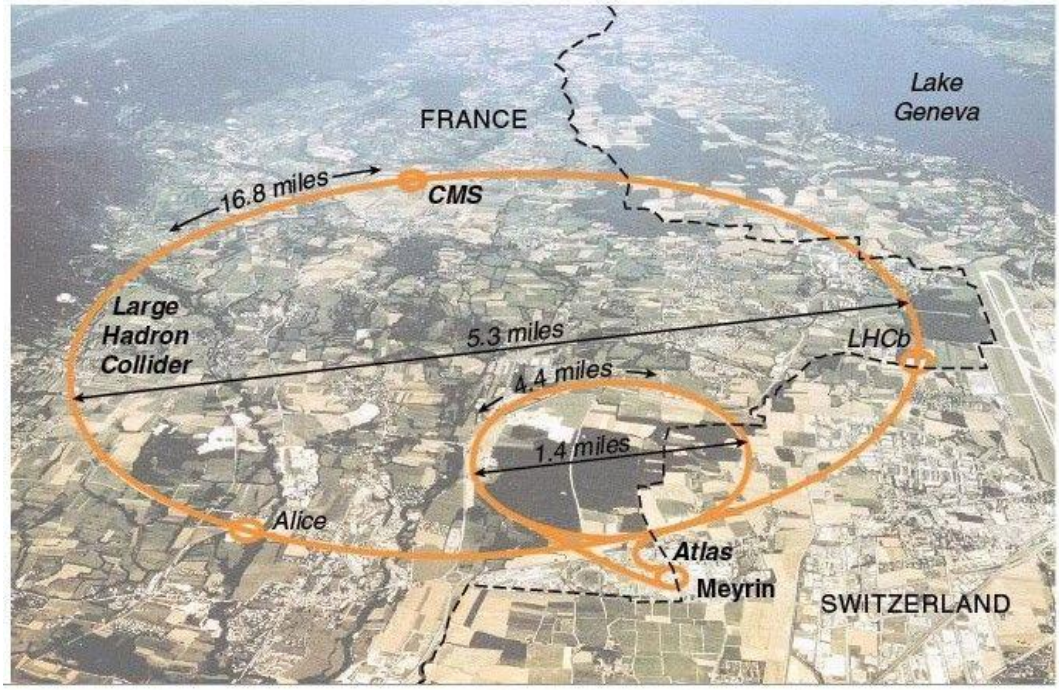
1.2.1 מהו מאיץ חלקיקים

מתקנים אשר מגבירים את המהירות של חלקיקים שונים בעזרת כוחות חשמליים ומגנטיים למהירויות ששואפות למהירות האור, בכדי לגרום בסופו של דבר להתנגשות של החלקיקים במטרה

מסויימת או בחלקיקים נוספים. כיון שהמאיצים מגבירים את מהירותם של החלקיקים בעזרת כוחות חשמליים ומגנטיים הם מאיצים רק חלקיקים עם מטען שאינו שווה לאפס.(1,2)

1.2.2 המאיץ בסרן (מאיץ הLHC)

CERN הינה מעבדת מחקר גרעיני שנוסדה בשנת 1954, היא בעצם המועצה האירופאית למחקר גרעיני ולכן מרכזו של ארגון *CERN* באירופה, אך מדינות רבות משתתפות ותומכות בניסויים שהוא מבצע, אחת מהן היא ישראל. מוקד המחקר העיקרי של *CERN* הוא מאיץ ה-*LHC*, שהחל לפעול בשנת 2009. זהו מאיץ חלקיקים ענק, צינור בצורת טבעת שאורכו 27 קילומטרים. אורך המאיץ ענק כל כך בגלל הצורך להאיץ את ההדרונים במהירות גבוהה מאוד (שואפת למהירות האור). הצינור ממוקם מתחת לאדמת שוויץ וצרפת (באיור 2). משמעות שם המאיץ היא *Large Hadron Collider*, כלומר גורם להתנגשויות הדרונים הגדול-מאיץ חלקיקים שמואצים בו. מאיץ *LHC* (הוא מאיץ הדרונים. (פרוטונים בלבד), המאיץ פתח חזית חדשה בפיזיקת החלקיקים, בעזרת האצה מרובה יותר לקראת ההתנגשות לעומת המאיצים הקיימים, האצה זו אפשרה גילוי פענוח ותוצאות מדוייקות יותר לעומת המאיצים הקודמים. בעקבות ההתנגשויות בין הפרוטונים נוצרים חלקיקים חדשים, אשר נצפים במעבדות *CERN* ותכונותיהם השונות (כגון מסה, מטען וכו') נמדדות. העיקרון המנחה באופטימיזציה של ניסוי האטלס היא מקסום הפוטנציאל לגילוי תכונות של חלקיקים אלמנטאריים וחלקיקים חדשים, תוך שמירה על היכולת של מדידה בדיוק הגבוה ביותר המתאפשר ב *LHC* של אובייקטים מוכרים כגון קווארקים כבדים (*heavy quarks*) ובוזונים (כמו בוזון ההיגס, פוטון וגלואון).(3) מאיץ החלקיקים LHC שובר שיאים באנרגיות בהן הוא מנגיש אלומות של פרוטונים. אנרגיות גבוהות אלו, המחקות את צפיפות האנרגיה סמוך למפץ הגדול, פותחות צוהר לחיפוש תופעות כגון יצירת חורים שחורים במעבדה, כוחות נוספים וחלקיקים אקזוטיים. דברים אלו חשובים כדי להסביר לנו מאין באנו ומה מקור הכוחות הבסיסיים כל כך שאנו מכירים, וזה יאפשר לנו ליצור טכנולוגיות חדשות ולשלוט יותר בכוחות וחלקיקים. כבר היום בזכות הידע שצברנו, ישנם למשל, מאיצי חלקיקים קטנים בבתי חולים מתקדמים בעולם אשר משמשים לטיפול בסרטן (וגם בארץ) .



איור 2 : מבט על- מאיץ ה*LHC*–

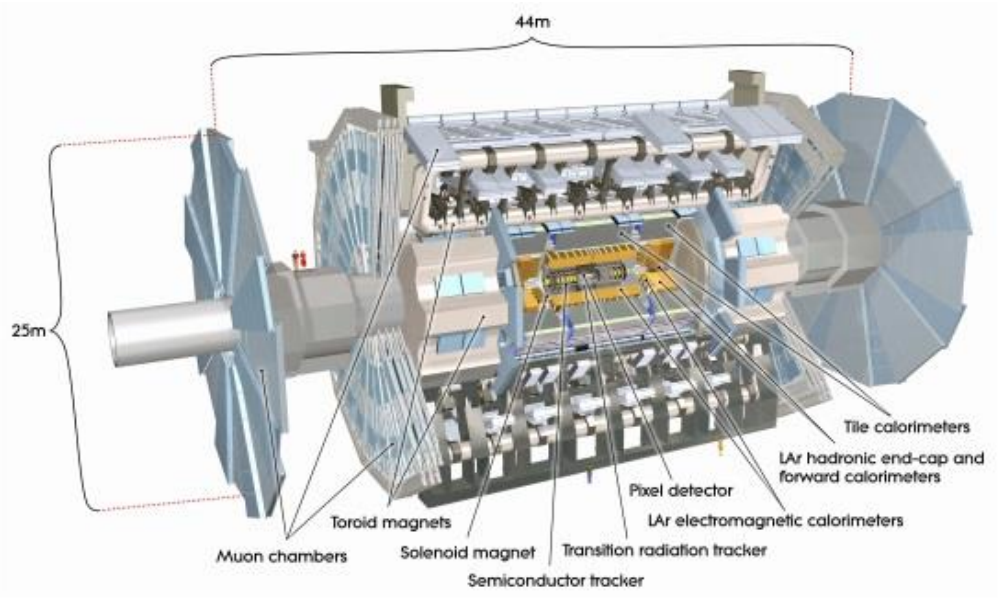
הטבעת הגדולה היא בקוטר של כ- 8529 מטרים ובאורך של 27000 מטרים בעוד הטבעת הקטנה היא בקוטר של כ-2253 מטרים ובאורך 7000 של מטרים (12)

1.2.2.1 גלאי ה-ATLAS (8,9)

אחד הניסויים העיקריים ב-*LHC* נקרא ניסוי *A Tutorial LHC ApparatuS-ATLAS* ניסוי זה ממוקם בחלק במאיץ בו מתבצעות ההתנגשויות בין הפרוטונים. מטרתו של ניסוי *ATLAS* הינה לחקור את הפיזיקה הנובעת מהתנגשויות באנרגיות גבוהות שמיוצרות ע״י מאיץ החלקיקים, לזהות חלקיקים ותכונות של חלקיקים.

1.2.2.1.1 מבנה

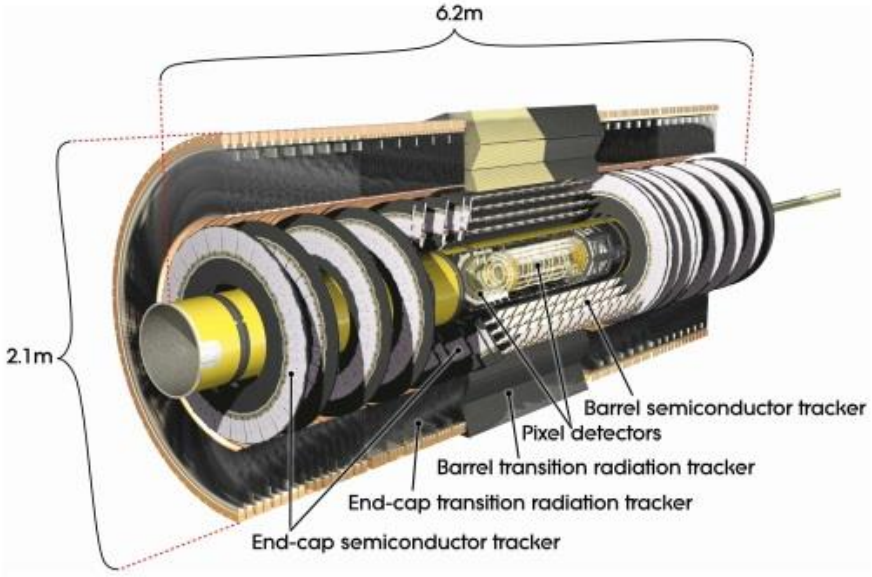
גלאי הATLAS מורכב ממספר חלקים ראשיים המכילים מיליוני גלאים, תת גלאים וחיישנים האחראים לקלוט ולתעד את המאורעות. חלקיו הראשיים של הגלאי הם הגלאי הפנימי, הקלורימטרים (ישנו קלורימטר פנימי וקלורימטר חיצוני) וגלאי מיואונים. בכל אחד מהחלקים קיים תת גלאי trigger (איור 3).



איור 3 : גלאי ה *ATLAS* (3)

1.2.2.1.1.1 גלאי פנימי

משטח בצורה דמוית חבית שרדיוס בסיסיו 1.15 מטרים ואורכו 7 מטרים, ובתוכו ההדרונים מתנגשים זה בזה. מודד באמצעות חיישנים את התנע של כל אחד ואחד מהחלקיקים הטעונים העוברים דרכו. הגלאי הפנימי מורכב גם הוא מתתי גלאים. זהו "גלאי פיקסלי" דיגיטלי (מייצר מידע באמצעות מוליכים למחצה) המורכב מרצועות של סיליקון. (3,4) (איור 4)



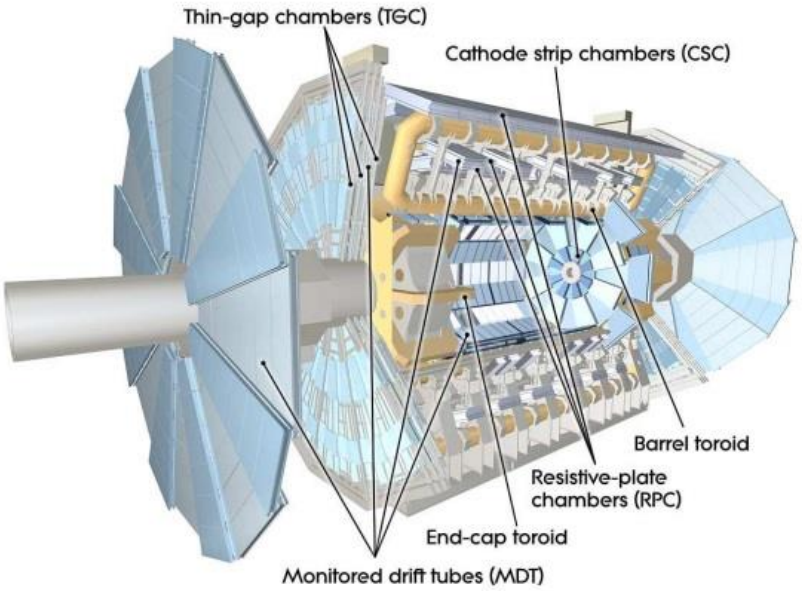
איור 4 : הגלאי הפנימי- מבנה (3)

1.2.2.1.1.1.1 גלאי פיקסלי וגלאי SCT

גלאי זה מכסה את כל 443 המילימטרים הראשונים מסביב לזירת ההתנגשות של הפרוטונים. החלק ה"פיקסלי" שלו מורכב מ-47232 מלבנים קטנים (90 על 400 מילימטרים) ורגישים מסיליקון, הקולטים תנועה של חלקיקים דרכם. גלאי ה-*SCT* מורכב מרצועות קטנות רבות (נקראות בלעז *micro-strips*), גם הן עשויות סיליקון ובעלות רגישות לחלקיקים העוברים דרכן. כל פיקסל מחובר לרשת החשמלית בחיבור של זרם ישר (*DC*), למרות שבזרימת חשמל בשיעור קרינה גבוה נעשה שימוש בזרם חילופין (*AC*).

1.2.2.1.1.2 גלאי מיואונים

השכבה החיצונית באטלס והמרחק בינו לבין אזור ההתנגדות הוא מעל 12 מטרים, הגלאי מורכב מארבע שכבות של אריחים רבים הממוקמים במרווחים גדולים האחד מהשני ויש בו אלפי חיישנים הטעונים במטען חשמלי עוצמתי, ומודדים את התנע של חלקיקים טעונים חשמלית המגיעים אליהם ועוברים דרכם, למשל: מיואונים . באמצעות זיהוי התנע ניתן להבדיל ביניהם. הדרך לדעת שחלקיק שהגיע לגלאי המיואונים הוא מיואון, מפני, שכל שאר החלקיקים לא יצליחו להגיע לחלק זה של הגלאי מפני, שיעצרו בקלורימטרים, או אינם יכולים להיות מזוהים בו. (איור 6) (3,4)



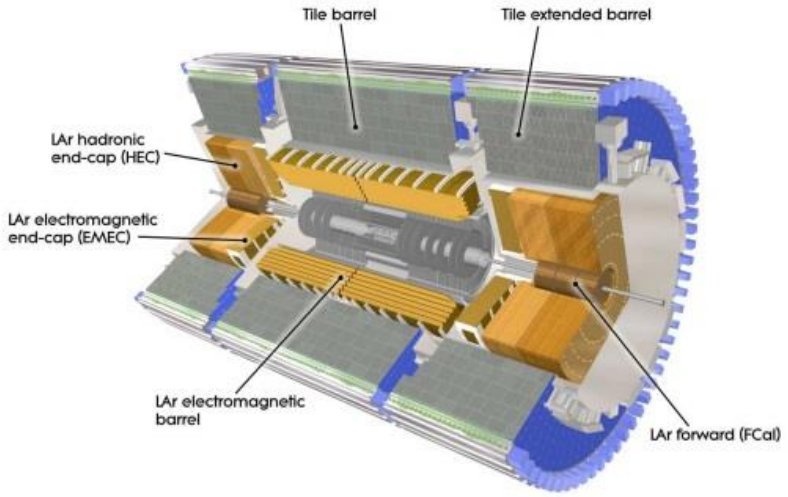
איור 5: גלאי מיואונים– מבנה (3)

trigger 1.2.2.1.1.3

בכל אחד מהחלקים קיימת מערכת האחראית על trigger התראה על מאורע בעל עניין לצורך שמירתו. המערכת מורכבת משני חלקיקים, ובשבריר שנייה מנפה חלק גדול מהנתונים של החלקיקים המתנגשים, כך שמערכת המחשבים בCERN קולטת 100 נתונים חדשים בשנייה במקום 1.000.000.000 בשנייה. מספר הנתונים שהמערכת הייתה קולטת ללא ניפוי היא מאסיבית הרבה יותר. הנתונים נבחרים בקפידה כך שייצגו נאמנה את כל סוגי החלקיקים הנוצרים מהתנגשות בין הדרונים כך שיכילו את המאורעות המעניינים ביותר ואלו הנתונים בעלי רמת הדיוק הגבוהה ביותר ואלו עם השינויים הניכרים והברורים ביותר. (3,4)

קלורימטרים 1.2.2.1.1.4

משמעות המושג "קלורימטריה" היא מדידת אנרגיה של חלקיק. מערך הקלורימטרים ב ATLAS בנוי משני גלאים, פנימי יותר (EM calorimeter) וחיצוני יותר (hadronic calorimeter), המורכבים משכבות בהן החלקיקים מאבדים את האנרגיה ובינהן שכבות בו נמדדת האנרגיה של החלקיקים כך למשל, החלק הפנימי בקלורימטר מכיל בין המתכות ארגון נוזלי, או סינטילטורים עשויים פרספרקס – אלו הם אריחי הפלסטיק המסוגלים להחזיר אור ברגע שנלכדים בהם חלקיקים הדרוניים (פרוטונים וניוטרונים). שמייצגים את האנרגיה שהחלקיקים איבדו בשכבות של הקלורימטרים, והם מעבירים את המידע למכשיר מדידה. הקלורימטר מודד את האנרגיה של החלקיקים הנלכדים בו ובאמצעות כך ניתן להבדיל בין פרוטונים, נויטרונים ואלקטרונים. (איור 5) (3,4)



איור 6 : מערכת הקלורימטרים- מבנה (3)

1.2.2.1.1.4.1 קלורימטר פנימי

הקלורימטר הפנימי נקרא גם קלורימטר אלקטרומגנטי- הוא פועל על בסיס אלקטרומגנטי ומורכב משלוש שכבות עיקריות, בכל שכבה קיימות עוד שכבות רבות, העשויות מארגון נוזלי ומפלטות דקות ומעוקמות של פלדה מצופה בזכוכית מחוזקת ונחושת. כאשר החלקיקים נכנסים לקלורימטר, הם מתנגשים עם חלקיקי הארגון הנוזלי. הדבר גורם להיחלשות האנרגיה של החלקיקים השונים לצורכי מדידה. התופעה הנ"ל נקראת מקלחת (*shower*) . החלקיקים המתפרקים והנוצרים בתהליך זה נמדדים, ומחושבת בנוסף ה"אנרגיה שאבדה" בתהליך (ההפרש בין האנרגיה האצורה בחלקיק לאנרגיה של החלקיקים שהתגלו בהתפרקות), וכך מזוהים חלקיקים הדרוניים בקלורימטר כאנרגיה חסרה.

1.2.2.1.1.4.2 קלורימטר חיצוני

הקלורימטר החיצוני נקרא גם קלורימטר הדרוני - בדומה לקלורימטר האלקטרומגנטי, הקלורימטר ההדרוני הוא מתקן, שתפקידו למדוד את האנרגיה של החלקיקים העוברים דרכו. הקלורי מטר ההדרוני מורכב מכמה קלורימטרים. בדומה לקלורימטר האלקטרומגנטי, גם הקלורימטרים ההדרוניים מורכבים משכבות דקות רבות, העשויות מפלדה ומחומר מיוחד : פרפקס. זהו סוג של פלסטיק, המסוגל להחזיר אור ברגע שפוגעים בו הדרונים. לאריחי הפרפקס הללו קוראים סקינטילטורים. הקלורימטר מורכב משלושה חלקים עיקריים :

- <u>קלורימטר הדרוני אריחי-</u>

  הקלורימטר ההדרוני המרכזי מבין השלושה. מכיל בתוכו שכבות שונות מפלדה ומסקינטילטורים מפרפקס. האריחים מסודרים כך שהם מוטים על הצד.

- <u>קלורימטרים הדרוניים צדדיים-</u>

  שני קלורימטרים הסוגרים משני צדי הקלורימטר האריחי דמוי הגליל. קלורימטרים אלו מתפקדים בצורה זהה לקלורימטר ההדרוני האריחי, והאריחים השונים מסודרים כך שכל חלקיק יעבור דרך מספר שכבות של סינטילטורים. הסינטילטורים בגלאי זה וגם בגלאי האריחי מעבירים אות אופטי (ע"י הארה) למערכת הבקרה של *CERN* וכך מזוהים החלקיקים השונים העוברים דרך הגלאי ונלכדים בו.

1.3 המחקר

1.3.1 המחקר של פרופ' ארז עציון

פרופ' ארז עציון, ראש הקבוצה, מהמובילים ב-ATLAS את החיפוש אחר פיזיקה שמעבר למודל הסטנדרטי עוסק במחקר ניסיוני בחלקיקי יסוד להבנת אבני הבניין וכוחות הבסיסיות טבע. בנוסף היה שותף בגילוי חלקיק ההיגס בניסוי ATLAS ב- CERN. מכאן הופנה המאמץ מחד ללימוד של תכונות החלקיק שהתגלה, ומאידך לחיפוש של הכללות למודל הקיים. בנוסף עוסק פרופ' עציון בפיתוח גלאי קרינה בטכנולוגיות חדשניות.

1.3.2 המחקר של עדי אשכנזי

עדי אשכנזי, הדוקטורנטית והמנחה האישית שלי בתכנית אלפא חוקרת יחד עם פרופ׳ ארז עציון את החיפוש אחר הפיזיקה שמעבר למודל הסטנדרטי ועובדת באופן שוטף ב-ATLAS.

1.3.3 המחקר שלי

במסגרת המחקר שלי השתלבתי במחקרם של פרופ׳ עציון ועדי אשכנזי תוך שימת דגש על חלקיק ההיגס, אשר התגלה ביולי 2014 – חיפשתי עדות לקיומו במאורעות בהם זוהו שני פוטונים בגלאי ATLAS במאיץ ה-LHC על ידי ניתוח התפלגות המסה האינווריאנטית ופונקציה מתקבלת.

2. שיטות וחומרים

תחילת העבודה וההכנה למחקר האישי שלי הייתה איתור חלקיק ההיגס באמצעות תכנות ב$C++$ ושימוש בחבילת "ROOT", בכדי לעשות זאת עבדתי בסביבת עבודה הנקראת UNIX. בתחילה אגרתי לתוך תיקייה קבצי מידע שהגיעו היישר מגלאי האטלס ועוד 4 סימולציות שבהן נמצא חלקיק היגס (בכלל סימולציה נמצא היגס במסה שונה). בעזרת הסימולציות התנסיתי בעיקר בפענוח גרפים והבנתם לעומק. למעשה יצרתי 12 גרפים, היסטוגרמות המחולקות ל-2 קבוצות של 6 היסטוגרמות למדידה. בכל קבוצה קיבלתי -

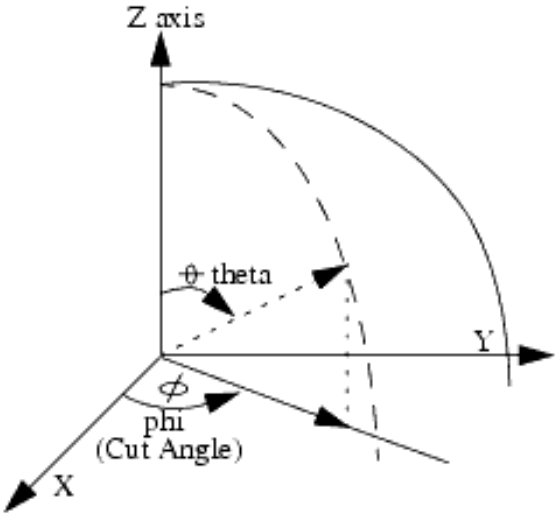
1. 2 היסטוגרמות (*2D*) של האנרגיה הרוחבית [האנרגיה שנמדדת רק על ציר ה-X (מנקודת ההתנגשות לכיוון מרכז צורת הטבעת שהמאיץ יוצר) וה-Y (מנקודת ההתנגשות כלפי מעלה)].

   סימון: Et.
2. 2 היסטוגרמות (*2D*) של הזווית בין ההיטל הרוחבי של האנרגיה לכיוון החיובי של ציר האיקס.

   סימון: φ.
3. 2 היסטוגרמות (*2D*) של ה"פסאודו-מהירות" ($pseudorapidity$) של החלקיק שנוצר. גודל זה תלוי אך ורק בזווית בין כיוון החלקיק לחלק החיובי של ציר הזד (מנקודת ההתנגשות לכאחד הכיוונים של המאיץ)-θ.
4. סימון: η.

באמצעות הנתונים שקיבלתי מהגלאי, כתבתי קוד שבו הגדרתי משתנים חדשים, וכך יצרתי עוד 11 היסטוגרמות חדשות לכל מדידה:

1. 2 היסטוגרמות (*2D*) של זווית θ, לכל היסטוגרמה של η.



איור 7: זויות θ ו-η על ציר תלת מימדי (11)

2. היסטוגרמות (*2D*) של $\Delta\theta$ ו-$\Delta\Phi$, כאשר הכוונה ב-Δ היא להפרשים בין כל שני נתונים מקבלים שיש בהיסטוגרמות.
3. היסטוגרמה (*2D*) של האנרגיה הכוללת מההתנגשות, לפי חוק שימור האנרגיה היא סכום של שתי האנרגיות מכל מדידה מקבילה.
4. היסטוגרמה (*2D*) של מסת החלקיק המקורי (ממנו התפצלו שני החלקיקים, שכל אחד נמדד במדידה מקבילה בגלאי).
5. היסטוגרמה (*2D*) של תנע החלקיק המקורי.
6. היסטוגרמה (*3D*) שמשווה בין $\Delta\theta$ ל$\Delta\Phi$.
7. היסטוגרמה (*3D*) שמשווה בין שני הנתונים המקבילים של θ.
8. היסטוגרמה (*3D*) שמשווה בין שני הנתונים המקבילים של Φ.
9. היסטוגרמה (*3D*) שמשווה בין שני הנתונים המקבילים של Et.

עבור היסטוגרמת המסה האינווריאנטית הגדרנו "חלון" (*bump*) שהוא אזור נבחר בגרף מנקודה מסויימת ועד נקודה אחרת, ה"חלון" המינימאלי הוא ברוחב שלושה *bins* והמקסימאלי ברוחב של חצי מהגרף. השימוש ב"חלונות" אפשר להשוות אזור מסוים נבחר לשאר הגרף (את ה"חלון" לכל מה שמחוצה לו) וכל רוחב נבדק לאורך כל הגרף (ז"א אם הרוחב היה שלושה *bins* אז נבדקו כל האופציות האפשריות של שלושה *bins* בגרף). ניתן לראות את הקוד שנכתב בנספחים 6.1 וגרפים נוספים שיצרתי בהיסטוגרמות 6-11.

בכדי למצוא את הBump במסה האינווריאנטית השתמשתי בנוסחא הבאה בה אנו מחשבים את מדד ההתאמה (x^2):

$$x^2 = \frac{\sqrt{\sum(f_i(x_i) - x_i)^2}}{i}$$

על מנת לאתר את האזור בו ההפרש בין ה"חלון" הנבדק לבין כל מה שמחוץ ל"חלון" הוא הגדול ביותר. נעשה שימוש בנוסחא זו פעמיים: ל"חלון" ומחוץ ל"חלון". על ידי חיסור תתאפשר מציאת ההפרש ביניהם. בין ההפרשים השונים תיערך השוואה על מנת למצוא את האזור שהכי פחות מתאים להתפלגות של הפונקציה המתקבלת, שהיא הקרובה ביותר לפונקצית המסה האינווריאנטית שנוצרה מגרף המאורעות, משמע האזור בו הכי בריבוע מחוץ ל"חלון" ובתוכו היא השונה ביותר, כאשר מחוץ ל"חלון" ההתאמה לפונקציה המתקבלת היא המרבית.

בעזרת קוד שנכתב שבו נלקחו מגלאי הATLAS במאיץ הLHC מיליוני מאורעות בהם התנגשו שני פוטונים (זה בזה) ואלו פגעו בגלאי הATLAS, נוצרו גרפים (1,2) של מסה אינווריאנטית, ובעזרת הנוסחא הנ"ל הקוד חילק את הגרף לכל תחום אפשרי של "חלון" ומחוץ ל"חלון" (כלומר יצר בכל

פעם "חלון" ברוחב שונה ובמיקום שונה בגרף בכדי להשוות את כל ההפרשים ולמצוא את ה"חלון" בו ההפרש היה הגדול ביותר). בעזרת הנוסחא הנ"ל היה ניתן להבחין מאיזה חלקיק נוצר ההיגס. (כיוון שיש להיגס מסה זהה למסת החלקיקים שהוא נוצר מהם ודועך אליהם, כי מסה אינווריאנטית אינה משתנה).

3. תוצאות

3.1. המחקר התמקד בהשוואה של גרף המסה האינווריאנטית לפונקציה, שהתקבלה ע״י שותפי למעבדה- אדר מלמד. את הפונקציה הנ״ל השוויתי לגרף בעזרת קוד שנכתב ב++C וחבילת ROOT- יצרתי ״חלונות״ - מעין אזורי בדיקה ברוחבים שונים בכל הגרף – כלומר, כל טווח איזורים אפשרי נבדק, וזאת על מנת לחפש את האזור בו ההפרש בין הפונקציה שהתקבלה לגרף הוא הגדול ביותר - ז״א למצוא bump- אזור בו ההפרש בין המרחקים בין הגרף לפונקציה בערכי X זהים הוא הגדול ביותר בין המצב בתחום החלון למצב מחוץ לחלון. בכדי למצוא את החלון המתאים ביותר חושבו בכל פעם ערכי x^2 בתוך החלון ומחוצה לו ונמדד ההפרש. את ההפרש השוויתי למשתנה max - משתנה שהגדרתי על מנת להכניס בתוכו את ההפרש המקסימלי בין כל חלון למחוץ לחלון, הגדרתי אותו בהתחלה לאפס ומשם עדכנתי. בכל פעם שהגיע הפרש גדול מ-max, עדכנתי את ערכו של max לערך ההפרש החדש ושמרתי את נקודת ההתחלה והסיום של החלון וזאת על מנת לדעת מאיפה החלון מתחיל ומהו רוחבו- שיטת הסריקה הייתה כזו בה מדדתי רוחב מסויים על כל הגרף ולאחר סיום הסריקה של אותו רוחב הגדלתי אותו מעט וסרקתי שוב וכך הלאה וכל בדיקה השוותה את ההפרש בין החלונות למשתנה max. לחלון שנמצא בסוף הרצת הקוד קראתי bump. אם ה-bump יהיה באזור של 125 GeV אוכל להגיד, שבמאורעות שנבדקו נוצר חלקיק היגס - המתאפיין במסה של כ-125 GeV.

יצאתי מנקודת הנחה כי כל עוד לא קיים חשד להיגס בנתונים השונים, שכיחות המסות תהיה גרף יורד כמעט ליניארי בטווח מסות אפשרי מסוים. הסיבה להשערה זו הינה מאחר וסכום המסות בכל אחד מזוגות הפוטונים קטן מסכום המסות של הפרוטונים, ניתן להסיק, שחלקיקים אחרים בעלי מסה נוצרו או ששוחררה אנרגיה. מאחר והסיכוי ששיעור של אנרגיה ומסה לא יומר בסופו של דבר משני פרוטונים לשני פוטונים גבוה, ניתן להסיק שרוב סכומי המסות בזוגות השונים קטנים יחסית לשאר.

הנתונים אשר התקבלו באופן ישיר על הפוטונים היה האנרגיות הרוחביות שלהן, המהירות המדומה שלהם וזוויות ה-θ שלהם. בעזרת שימוש בנוסחאות הללו נערכו החישובים ליצירת הגרפים בקוד.

<u>מקרא:</u>

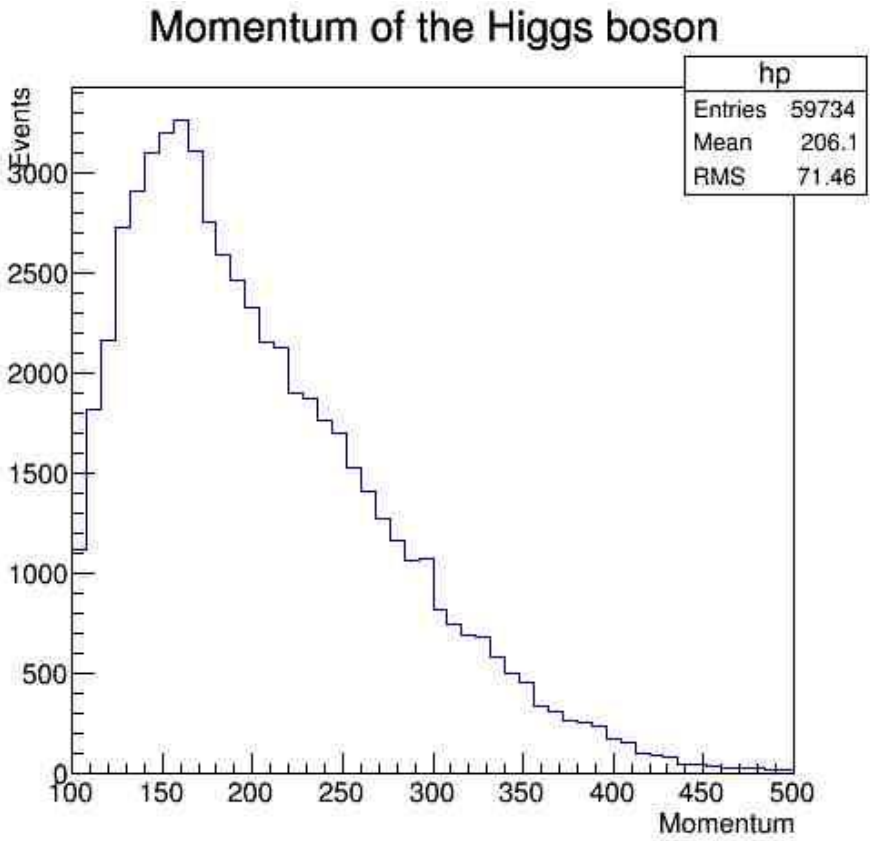
- m– מסה
- E - אנרגיה
- Et– אנרגיה רוחבית
- c -מהירות האור

$$\eta = -\ln\left[tg\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$$

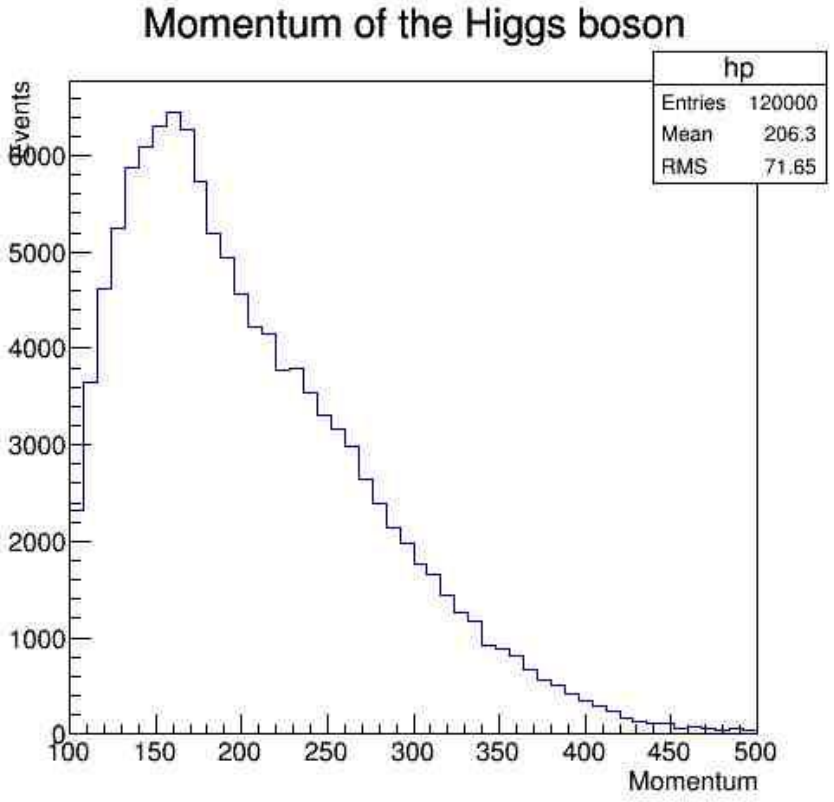
$$E = \frac{Et}{\sin(\theta)}$$

$$m = \sqrt{\begin{matrix} E/c^2 - [E_1/c * \sin(\theta_1) * \cos(\phi_1) + E_2/c * \sin(\theta_2) * \cos(\phi_2)]^2 - \\ [E_1/c * \sin(\theta_1) * sin(\phi_1) + E_2/c * \sin(\theta_2) * sin(\phi_2)]^2 \end{matrix}}$$

3.2. בשתי ההיסטוגרמות המתארות את השכיחות של התנע של החלקיק המקורי בכל סוג התנגשות (גרפים 1,2), ניתן לראות, שיש עליה דרסטית בין 100 לכ-GeV 160, זהו גם הנתון השכיח ביותר של תנע החלקיק המקורי בשתי ההיסטוגרמות. לאחר מכן ניתן לראות שיש ירידה מתונה בשכיחות של התנעים הגבוהים מ-GeV 160.



גרף 1- תנע בbackground



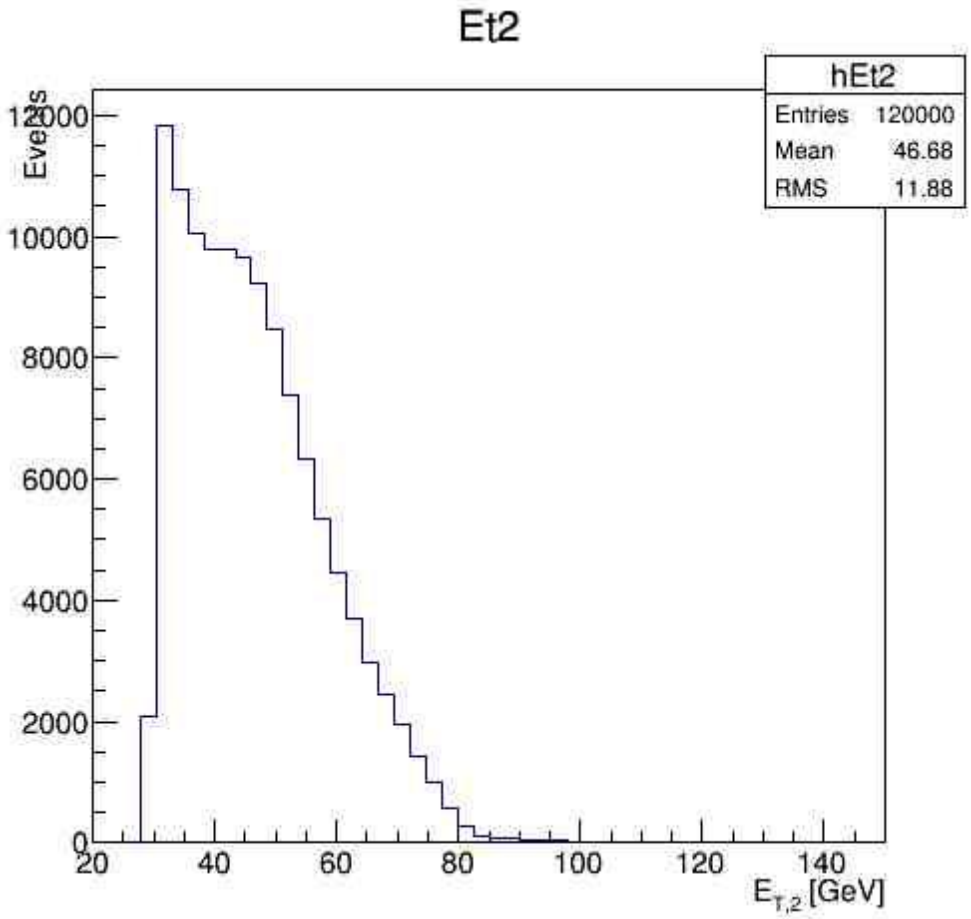
גרף 2- תנע בdata

3.2. בהיסטוגרמות (3,4,5,6), אשר מודדות את האנרגיה הרוחבית עבור כל אחד מסוגי ההתנגשויות שנבדקו, ניתן לראות עלייה דרסטית בשכיחות הנתונים בין 0 לכ-40 GeV. ניתן להבחין גם בירידה דרסטית בשיפוע (שהולך ונהיה מתון יותר ככל שהאנרגיה גדולה יותר מכ-40 GeV). אפשר להבחין, שנוצרה מעין גבעה באזור של כ-50 ג׳יגה אלקטרון בשנייה. בשתיים מההיסטוגרמות (אחת שנמצא בהיגס ואחת שלא נמצא בהיגס), כלומר השיפוע ירד בצורה דרסטית באנרגיות גבוהות מהאנרגיה השכיחה ביותר. בהמשך הוא הלך והתמתן עד שכמעט התאפס עבור אנרגיה של כ-50 GeV, ולבסוף חזר לרדת בצורה דרסטית ההולכת ומתמתנת ככל שמתקדמים.

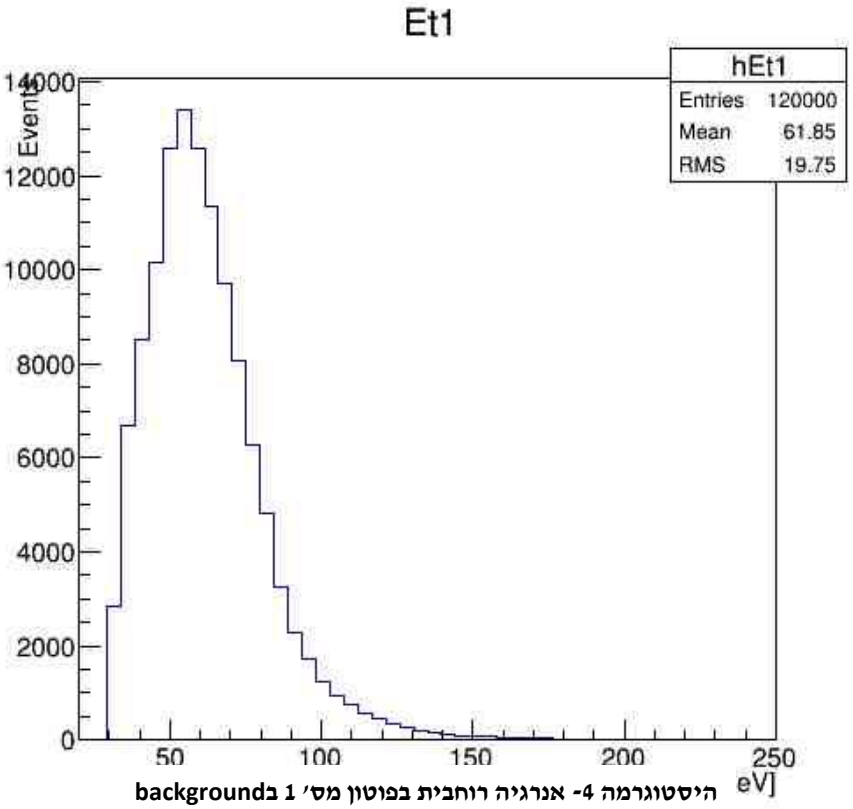
את הירידה הדרסטית נוכל להסביר בעזרת חוק שימור האנרגיה. אנרגיית הפוטונים תלויה באנרגיית הפרוטונים מהם הם נוצרים - אם לפרוטון הראשון הייתה אנרגיה מסויימת, לא יתכן שלפוטון שנוצר ממנו תהיה אנרגיה אינסופית. האנרגיה תהיה מוגבלת לפי האנרגיה של הפרוטונים מהם הוא נוצר. אם הפוטון לקח את כל האנרגיה- ציפינו לראות כי האנרגיה של הפוטון תהיה מקסימלית. אם אינה מקסימלית- כפי שניתן לראות בגרפים ישנה הנחה שאולי נוצרו עוד חלקיקים מלבד הפוטונים, ואלו, לקחו מן האנרגיה גם כן. עובדה זו מראה לנו מדוע בגרף ישנם הרבה יותר מקרים בהם לפוטונים יש מעט אנרגיה (האנרגיה שלהם אינה מקסימלית).

את העליה הקיצונית אפשר להסביר בעזרת העובדה שלמאורעות שנבדקו נבחר trigger – פוטונים שהאנרגיה שלהם גדולה מערך מסויים. אחרת, נקבל מספר גדול מאוד של

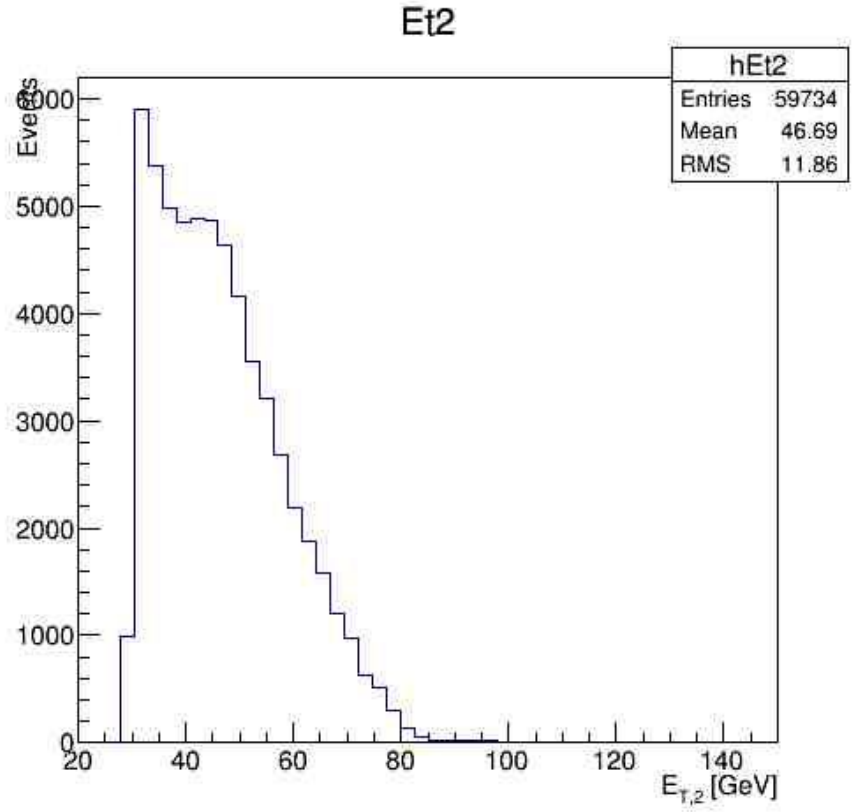
אירועים של האנרגיות הנמוכות ביותר, לכן מראש בקובץ המאורעות שעל פיו נוצרו הגרפים, לא היו אירועים אלו.



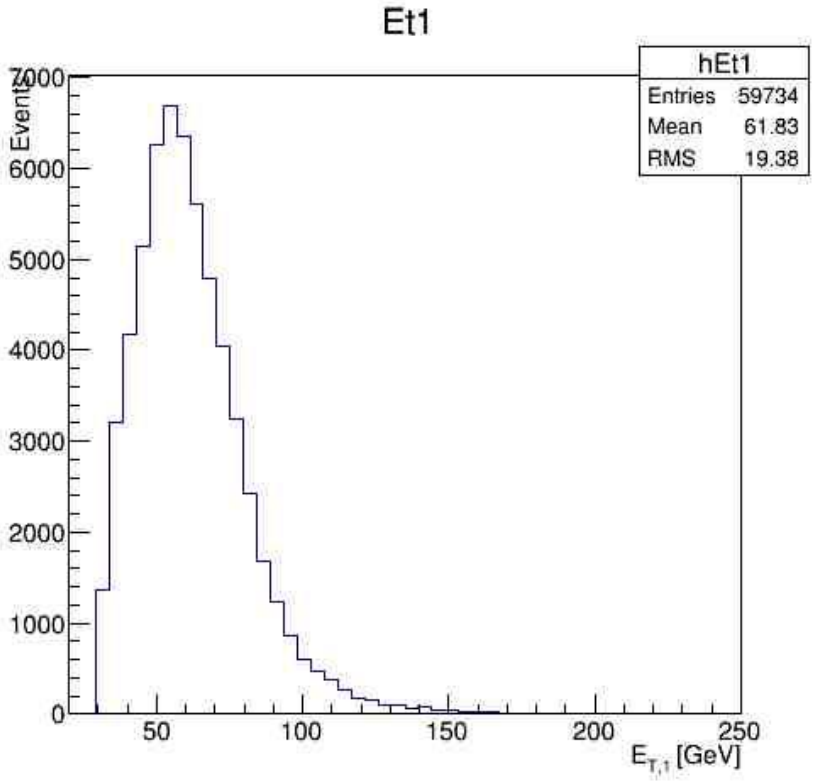
היסטוגרמה 3- אנרגיה רוחבית בפוטון מס׳ 2 בbackground



היסטוגרמה 4- אנרגיה רוחבית בפוטון מס׳ 1 בbackground



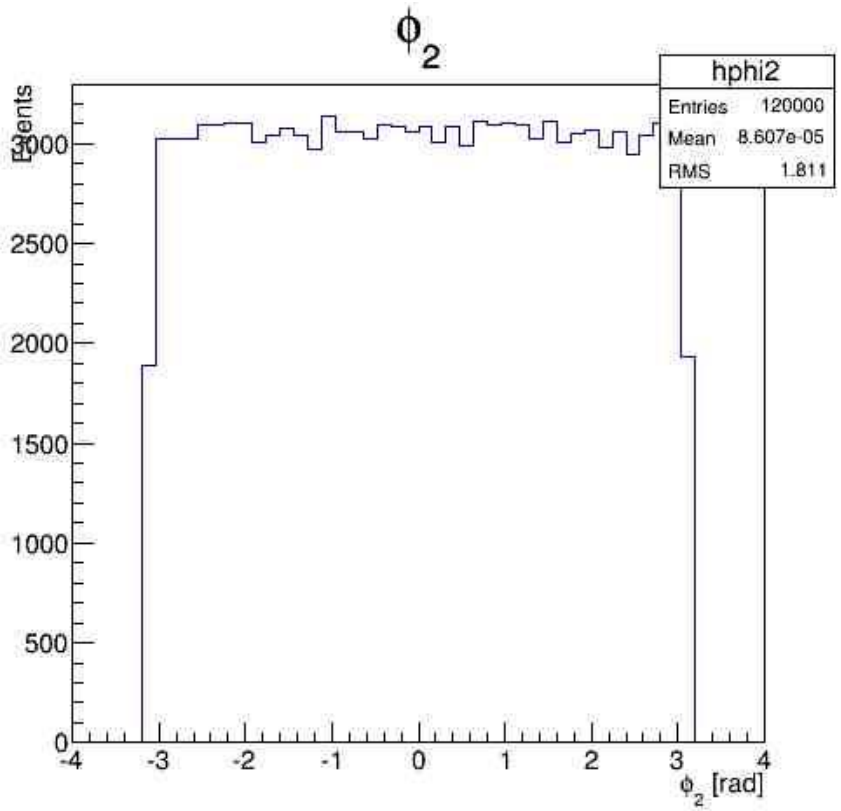
היסטוגרמה 5- אנרגיה רוחבית בפוטון מס׳ 2 בdata



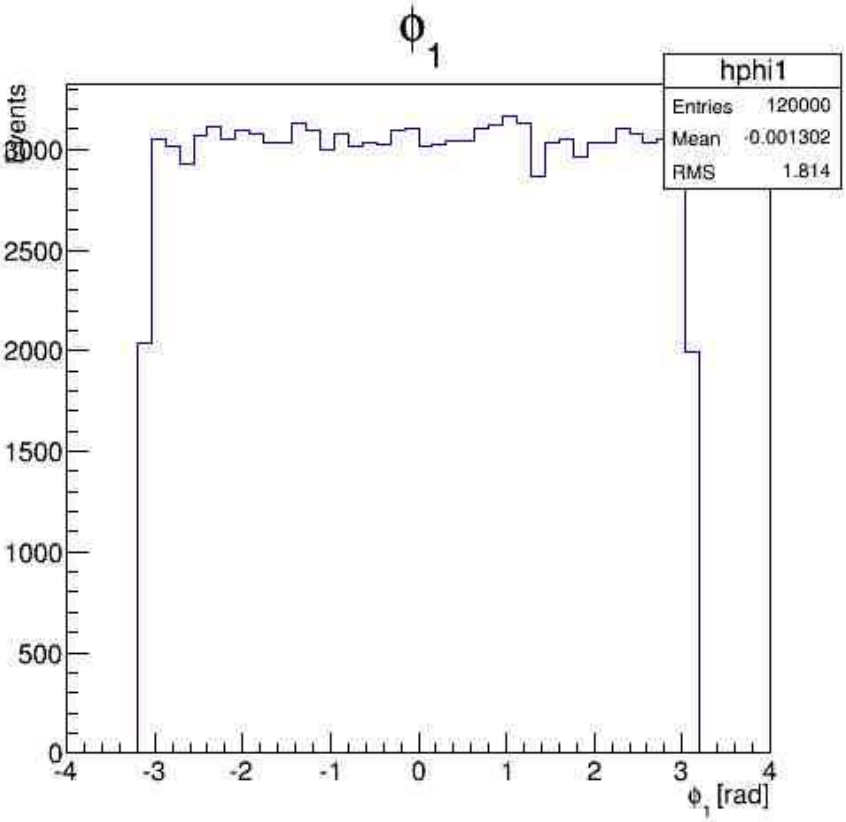
היסטוגרמה 6-אנרגיה רוחבית בפוטון מס׳ 1 בdata

3.3. מספר ההתנגשויות דומה עד זהה עבור כל זווית Φ שנמדדה בהיסטוגרמות אשר נוגעות לזווית זו (בשני סוגי ההתנגשויות), ההתפלגות שטוחה ולכן מספר ההתנגשויות אינו תלוי בזוית - בכל פוטון (ישנם שניים בכל סוג התנגשות), מספר ההתנגשויות בעבור כל ערך של Φאינו משתנה בהתאם לסוג ההתנגשות (data/ background). ניתן לראות זאת בהיסטוגרמות 7,8,9,10.

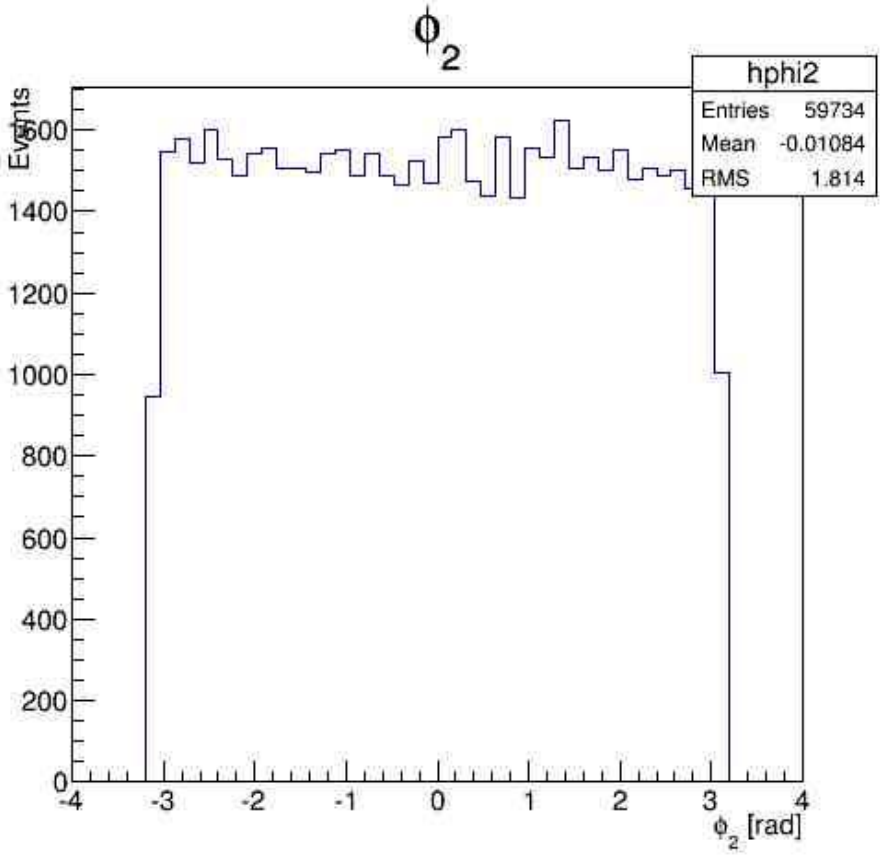
הזוית לא אמורה להשתנות כי יש סימטריה לסיבוב ואין העדפה לזוית מסויימת.



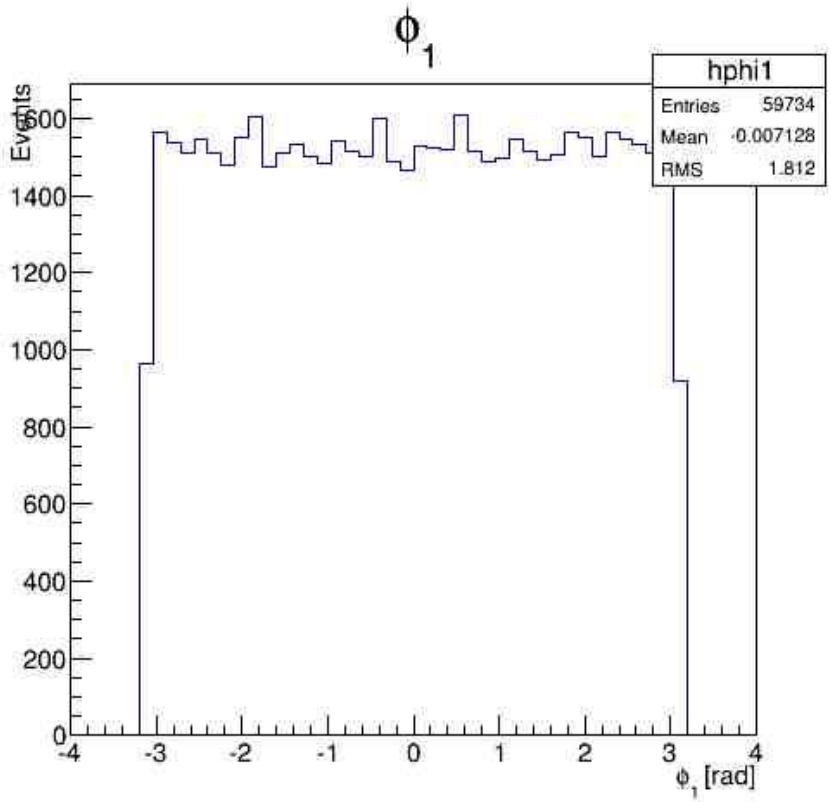
היסטוגרמה 7- זוית Φ בפוטון מס׳ 2 בbackground



היסטוגרמה 8- זויתΦבפוטון מס׳ 1 בbackground



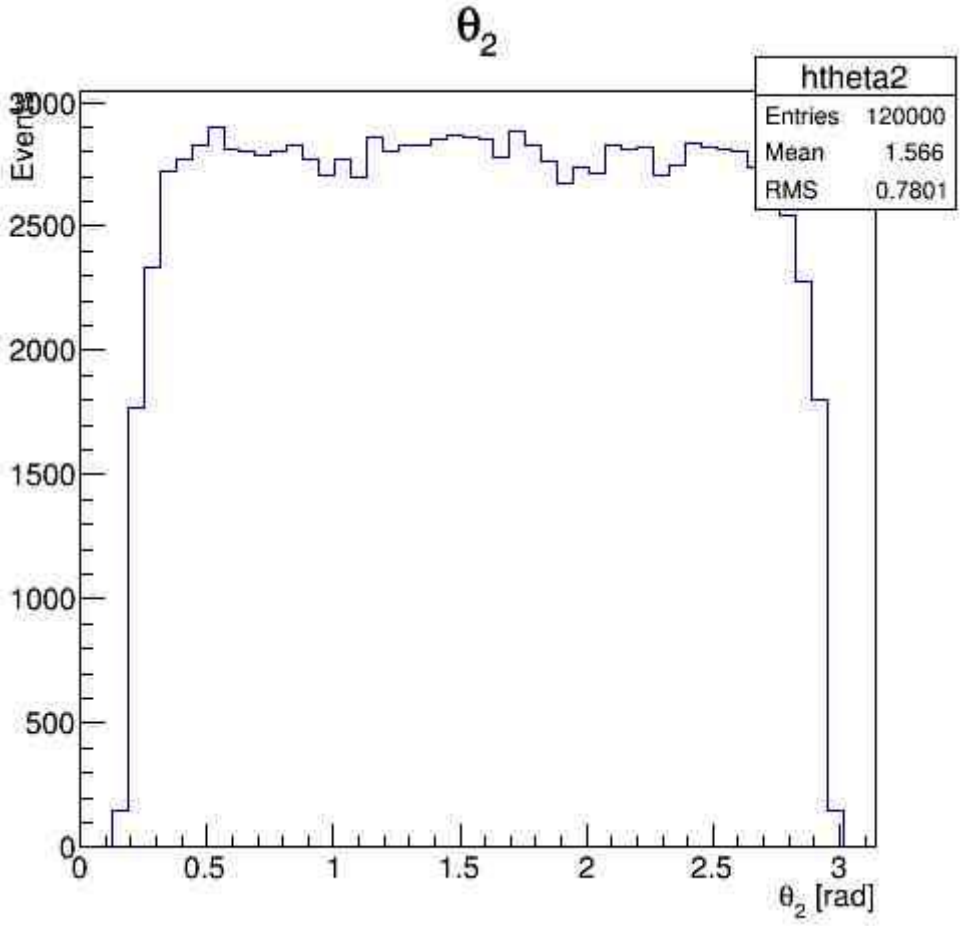
היסטוגרמה9- זויתΦבפוטון מס׳ 2 בdata



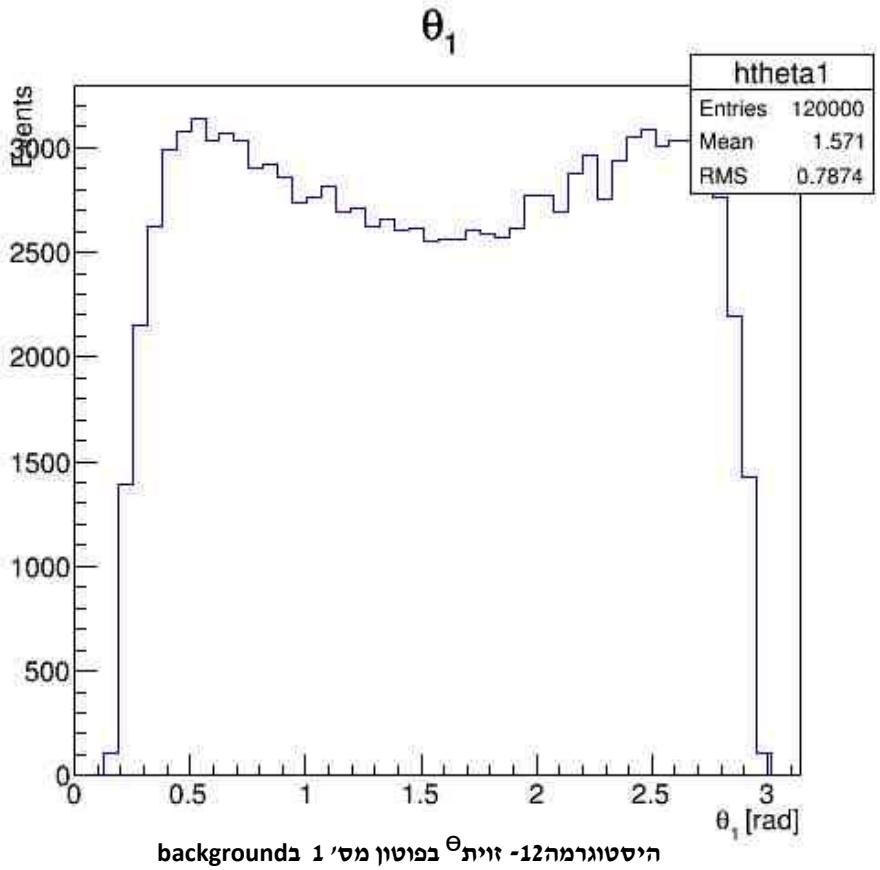
היסטוגרמה10- זויתΦ בפוטון מס׳ 1 בdata

3.4. בהיסטוגרמות (11,12,13,14), אשר נוגעות לזווית θ בשני סוגי ההתנגשויות, ניתן לזהות שני שיאים ברורים של שכיחויות (באזור הערכים 0.5 ו-2.7), וביניהם הירידה והעלייה מתונים. בין שני קצוות ההיסטוגרמה יש ירידה ועלייה תלולים בשתי ההיסטוגרמות המקבילות האחרות כל ערכי θ שנמדדו נרשמו עבור מספר התנגשויות דומה עד זהה.

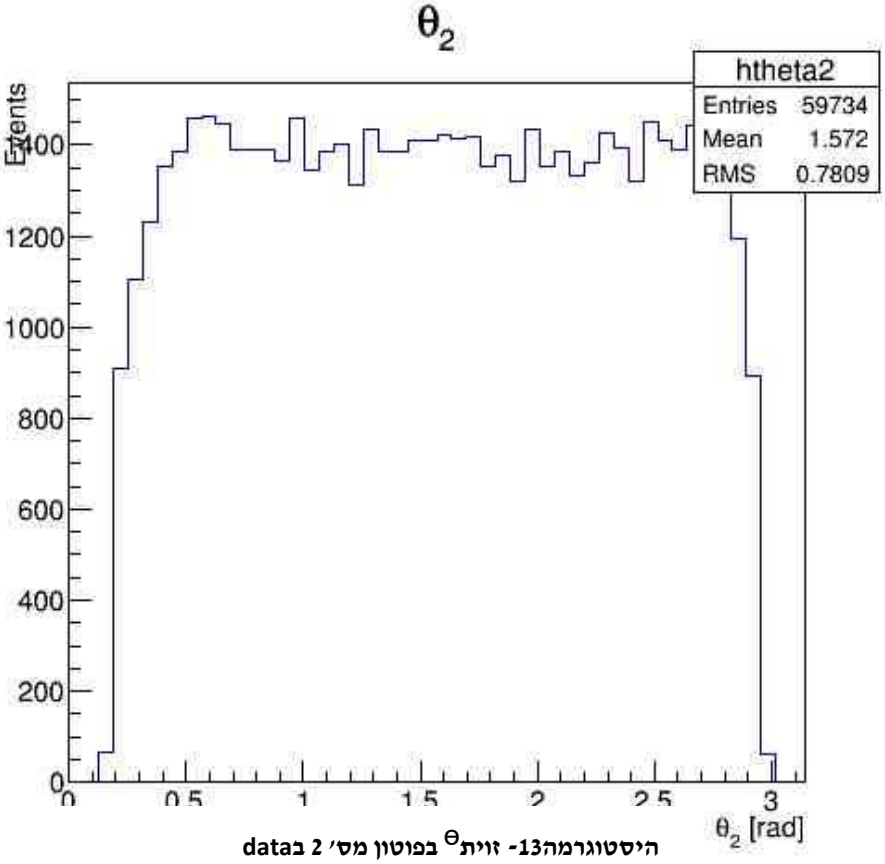
פרט טכני חשוב שנלקח בחשבון הוא שאנו מצפים לראות שינוי באזור של מרכז הגלאי כיון שבאזור זה במאיץ עוברים כל הכבלים המעבירים את המידע מהגלאים, לכן באזור זה הכיסוי של הגלאי פחות טוב ונקבל פחות מאורעות. כיון שה-trigger נמצא על פוטון 1, הכיסוי באזור זה יהיה פחות טוב לעומת פוטון 2 עליו לא עשינו trigger והזווית אינה משתנה גם באזור של מרכז הגלאי.



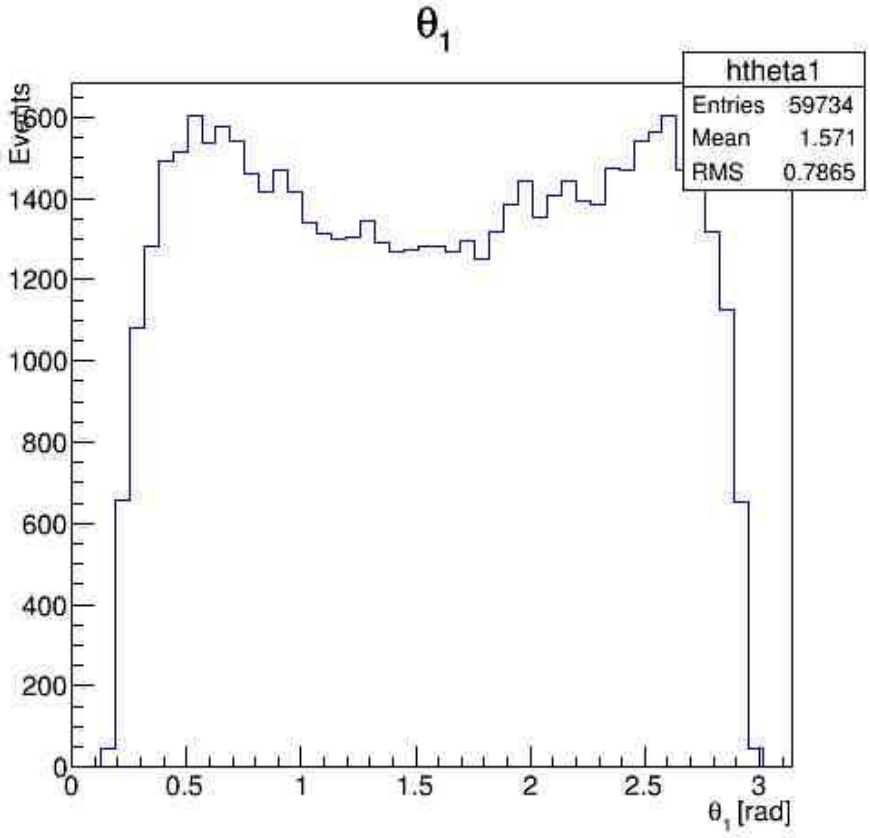
היסטוגרמה11- זויתθ בפוטון מס׳ 2 בbackground



היסטוגרמה12- זוית Θ בפוטון מס׳ 1 בbackground



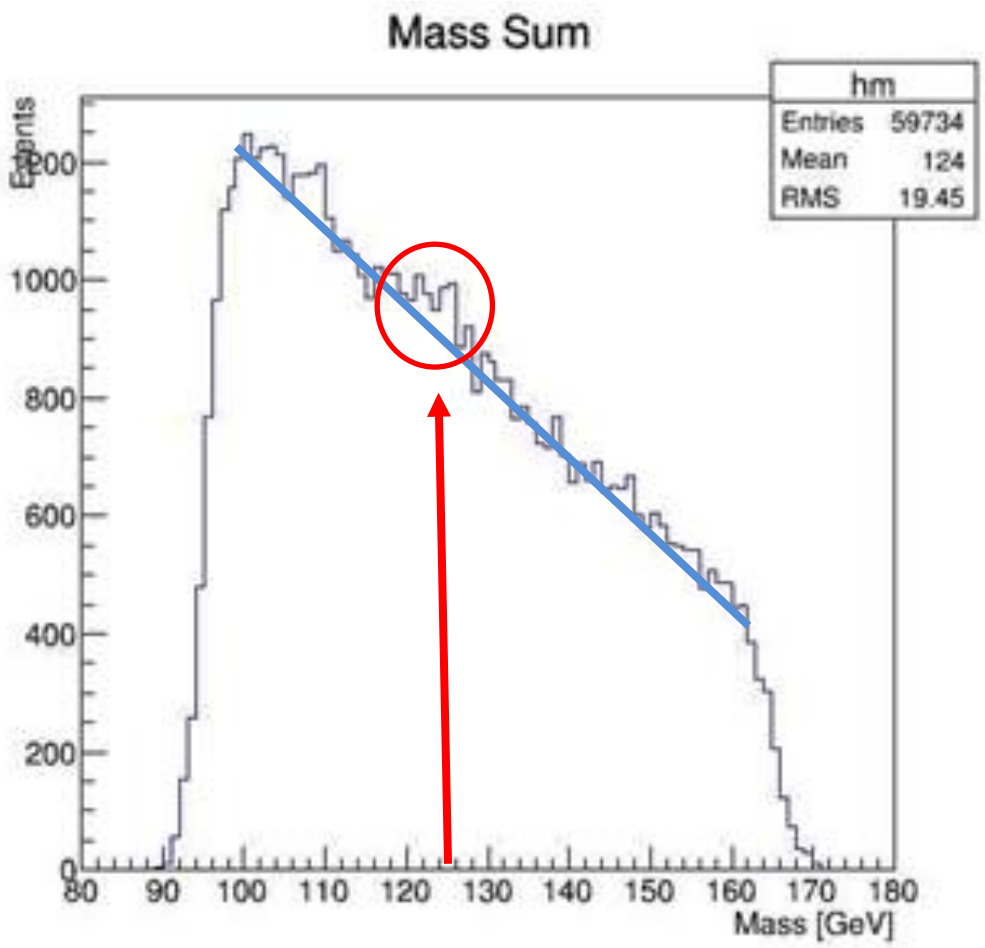
היסטוגרמה13- זוית Θ בפוטון מס׳ 2 בdata



היסטוגרמה14- זוית Θ בפוטון מס׳ 1 בdata

3.5. בהיסטוגרמה המתארת את מסת החלקיק המקורי עבור נתוני data (15), קיימת ירידה מונוטומית בשיפוע בטווח המסות, שבין כ-120 לכ-GeV 150. באזור, שבו המסה שווה לכ-GeV 125 בקירוב, השיפוע מתמתן וכמעט הופך לאפסי: יצירת 'מדרגה' בפונקציה. השיפוע באזור הקרוב למדרגה משני הצדדים, הוא ירידה דרסטית חריגה בגרף הליניארי. ניתן לראות פונקציה ליניארית המתאימה בצורה המירבית לצורתה של פונקציית המסה: (הפונקציה)- אשר זו נמצאה במחקרו של אדר מלמד- שותף למעבדה בה חקרתי אשר חיפש את הפונקציה שתתאים למאורעות בצורה הטובה ביותר. בעזרת פונקציה זו באיזה איזור (באיזו מסה – ציר X) ישנה סטייה של גרף המסה האינווריאנטית. ניתן לראות בהיסטוגרמה כי באזור של GeV 123 ישנה סטייה של גרף המסה מהפונקציה אשר תמה באזור GeV 127 ומשם הפונקציה וגרף המסה חוזרות להיות דיי תואמות. ניתן להסביר את התפלגות המסה בעזרת כך שהפוטונים מתפרקים לחלקיקים רבים והסבירות שיווצרו חלקיקים קטנים היא הגדולה ביותר ולכן טווח המסות הנמוך גדול בשכיחותו מטווח המסות הגדולות והפונקציה נמצאת במגמת ירידה. בנוסף במאורעות שנבדקו נעשה שימוש בtrigger על מנת– פוטונים שהאנרגיה שלהם גדולה מערך מסויים. אחרת, נקבל מספר גדול מאוד של אירועים של האנרגיות הנמוכות ביותר, לכן מראש בקובץ המאורעות שעל פיו נוצרו הגרפים, לא היו אירועים אלו. בקוד שנכתב השוויתי את ערכי ה-x^2 בעבור כל תחום החלון וכל התחום שמחוץ

לחלון והחסרתי ביניהם על מנת לגלות את ההפרש של x^2 בין התחום שבתוך החלון ובין התחום שמחוצה לו. את ההפרשים השוויתי כל פעם אחד לשני בעזרת עדכון ערך מקסימום של ההפרש של x^2 ושמרתי את כל הנתונים הקשורים להפרש המקסימלי (כלומר רוחב החלון, נק' התחלה ונק' סיום, ערך x^2). בסופו של דבר החלון שנמצא בdata היה אכן באזור של כ-125 GeV ולכן אוששתי את קיום ההיגס במאורעות אלו.



היסטוגרמה 15- מסה אינווריאנטית בdata . בשחור- התפלגות המסה האינווריאנטית במאורעות שנבדקו. בכחול- מגמת הירידה הממוצעת בעבור המאורעות שנבדקו. באדום- האיזור בו נמצא הbump.

4. דיון

חלקיק ההיגס נחזה לראשונה בשנות השישים על ידי הפיזיקאי פיטר היגס במטרה להסביר את קיומם של המסה ושל חוקי השימור הידועים לעולם הפיזיקה על פי המודל הסטנדרטי, שהיה חדש באותו הזמן. קיומו של החלקיק שמר על המודל שלם ומתפקד, על כן גילויו וניתוחו כבוזון בעל מסה הקרובה למסה המשוערת. גילוי החלקיק נעשה לראשונה ב-2012 בגלאי ה-ATLAS בשיטה זהה לזו שבה אני השתמשתי במחקר שלי - היסטוגרמה אשר שיקללה את סכום המסות האינווריאנטיות של התוצרים מההתנגשויות השונות והצביעה על בליטה ברורה עבור מסה של כ-126 GeV- המסה של חלקיק ההיגס בקירוב. במיקום זה נמצא החלון בתוכו הסטייה בין הdata לפונקציה המותאמת לdata שמחוץ לחלון היא הגדולה ביותר. ההבדל בין הניסוי ב-2012 לבין הניסוי שלי הוא שבעוד אני בדקתי מקרים של $2p \rightarrow 2\gamma$, ב-2012 נבדקו שלושת המקרים הבאים: p) $2p \rightarrow 4e$, $2p \rightarrow 2e2\mu$, $2p \rightarrow 4\mu$ מסמלת פרוטון, e אלקטרון ו-μ מיואון), ועל כן ניתן לומר שאוששתי את קיומו של חלקיק ההיגס בדרך מקבילה לזו שבה הוכח קיומו לראשונה, ואישרתי כי תוצאותיו של הניסוי הנ"ל רלוונטיות לא רק עבור המקרים שנבדקו ב-2012.

אמנם המשמעות של הניסוי הינה תיאורטית ונובעת כדי לספק את הסקרנות האנושית ולתת לו נקודת מבט טובה יותר על הטבע, אך אין זה אומר שאין לה השלכות עקיפות על החיים שלנו. בתחום הפיזיקה הניסויית של חלקיקים אלמנטאריים, מומצאות טכנולוגיות רבות. בטכנולוגיות אלו משתמשים בין השאר בטיפולים חדשניים בסרטן, אך משמעות זו היא נלווה בלבד של חקר החלקיק. על מנת לאושש פעמים נוספות את קיומו של חלקיק ההיגס, ניתן לחזור על הניסוי פעמים נוספות, או להשתמש באותן הטכניקות עבור התנגשויות שונות, כגון: $2p \rightarrow 4\mu$, במטרה לבצע אובזרביציה של חלקיק ההיגס או חלקיקים אחרים, ולאושש את המודל הסטנדרטי או להפריכו בהתאם לנתונים.

במחקר "חיפוש אחר עדות לקיומו של חלקיק ההיגס במאורעות בהם זוהו שני פוטונים בגלאי ATLAS במאיץ ה-LHC על ידי ניתוח התפלגות המסה האינווריאנטית של שני הפוטונים" התקבלו נתונים מגלאי ה-ATLAS, שבמאיץ ההדרונים הגדול, ה-LHC, אודות התנגשויות רבות של שני פרוטונים, שבסופן נוצרו שני פוטונים. המטרה הייתה לזהות נוכחות של חלקיקי היגס בהתנגשויות בהן הוא נוצר ולנתח את החלקיקים מהם הוא נוצר: מהם המסה, התנע והאנרגיה שלהם.

בקוד שנכתב לשם המחקר נבדקו החלונות על מנת למצוא את החלון בו נמצא ה-bump. כלומר, האזור בו הפרש ה-x^2 בתוך החלון ומחוצה לו הוא הגדול ביותר. במאורעות בהם התגלה החלון בטווח של כ-GeV 125 יכולנו להסיק על גילויו של חלקיק ההיגס במסה המדוברת.

מגבלות המחקר:

אחד הקשיים המרכזיים בגילוי ההיגס הוא זמן מחצית החיים הממוצע של ההיגס, שהינו קצר מאוד (כ-$1.6*10^{-22}$ שניות) זמן קצר כל כך עד ששום גלאי מתוך מיליוני הגלאים ב ATLAS לא יכול לצפות בו ולמדוד אותו באופן ישיר. לשם כך בוצע את הניסוי כולו- בעצם בעזרת פיזיקה תיאורטית והנוסחאות הנ"ל שאפשרו לנו לגלות האם במאורעות נצפה היגס מבלי לצפות בו דרך הגלאים. מגבלות נוספות של המחקר היו רזולוציה נמוכה יחסית, כלומר כל קבוצה של מספר מסות קרובות שונות שנמדדו (כ-40) נמדדה כמסה אחת. אמנם הסיבה לכך הייתה למנע חריגות מיותרות ורבות בהיסטוגרמה, חלקן הגדול מטעויות חישוב של הגלאי, אך לא נעשתה התחשבות מעמיקה מספיק בהבדלים בין המסות השונות, גם אלו שקרובות זו לזו. מגבלה נוספת הייתה הגלאים- טובים, מהירים ומדויקים שיהיו, גם הם עדיין עושים טעויות ועובדה זו נכללה והיוותה למכשול קל אך התוצאות היו ברורות. אמנם מגבלה זו נראית שולית, אך בתחום פיזיקת החלקיקים גם טעויות במדידה מזעריות ביותר עלולות להשפיע על טיב התוצאות. כמות התוצאות היוותה לבעיה לא קטנה-על מנת לאושש קיום של חלקיק, צריך לבדוק מספר אסטרונומי של התנגשויות פוטונים, בעוד במחקר שלי נמדדו אלפים ספורים של התנגשויות בלבד. ככל שנמדד מספר גדול יותר של התנגשויות, אמינות התוצאות גדלה ואישוש החלקיק הופך למדוייק ונכון יותר.

לסיכום, בניסוי זה ניתחתי נתונים שונים מגלאי ה-ATLAS באמצעות c++ וחבילת root, ולגלות נוכחות של חלקיק היגס בעל מסה של כ-125-126 GeV ולנתח את תכונותיו הפיזיקליות. ההשערה הייתה שבעת קבלת היסטוגרמת המסות, כפי שנעשה בניסוי בו התגלה ההיגס ב-2012 (עבור מקרים שונים של התנגשויות), יהיה מיתון פתאומי בקצב ירידת השכיחות עבור מסה כבת 125 GeV (bump). התוצאות איששו את ההשערה: ההיגס אכן קיים, גם במקרים של $2p \to 2\gamma$, ומסתו זהה לזו שנצפתה ונמדדה במחקרים קודמים, החלון שנמצא כפלט הקוד בעת ההיגס תמיד תאם את מסתו. בעזרת המחקר שלי ומחקרים נוספים בתחום ניתן לאושש את קיומו למעשה את קיומו של המודל הסטנדרטי המוכר לנו, המתאר את האינטראקציות השונות בין כל 24 חלקיקי היסוד המוכרים למדע, ולהשתמש בטכנולוגיות השונות למען תרומה לאנושות גם בתחומים אחרים. ניתן להשתמש בטכניקות של מחקר זה בתור בסיס לגילוי וניתוח של חלקיק ההיגס בהתנגשויות אחרות ושל חלקיקים נוספים, במטרה לבדוק את נכונותו של המודל הסטנדרטי. בהמשך, ניתן להשתמש בשיטות ובחומרים, שבהם השתמשתי, עבור גילוי של חלקיקי יסוד נוספים, במטרה לאושש את נכונותו של המודל הסטנדרטי. על ידי בדיקה של התנגשויות רבות של שני פרוטונים זה בזה, ניתן למצוא בטווח הרחוק חריגות מהמודל הסטנדרטי, ולשנות את הניסוח של חוקי הפיזיקה בהתאם לתוצאות שנבדקו.

אמנם היו מגבלות רבות למחקר: רזולוציה נמוכה יחסית, מספר תוצאות קטן יחסית, זמן עבודה קצר וחוסר דיוק במדידה שבגלאי ובקוד שתכנתי, אך ניתן לקבוע, שנצפו חלקיקי היגס לפי תוצאות המחקר שלי מתאימות בשיעור סטייה נמוך לאלו ששוערו על סמך ניסויים קודמים, והן מראות על סבירות גבוהה לנוכחות של חלקיקי היגס בבדיקות שנערכו. על כן, ניתן לומר שהמחקר שלי מאושש את נכונותו של המודל הסטנדרטי המקובל בקהילה המדעית.

5. ביבליוגרפיה

1. גרוס, ע',2008, החיפוש אחר החלקיק האלוהי, אודיסאה גליון 1.

2. K.A. Olive *et al.* (Particle Data Group),2015, The Review of Particle Physics, Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014) and 2015 update.

3. ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE Technical Design Report Volume 1 ,1999,CERN/LHCC 99-14(p.17-43)

4. ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE Technical Design Report Volume 2 ,1999,CERN/LHCC 99-15(p.15-24)

5. Francis Halzen&Alan D. Martin, 1984 ,QUARKS AND LEPTONS: An Introductory Course In Modern Particle PhysicsJOHN WILEY&SONS, Inc,(p.17-20)

6. Nucl.Instrum.Meth.A628: 177-181,2011 ,Position resolution and efficiency measurements with large scale Thin Gap Chambers for the super LHC , NirAmram ,Gideon Bella ,Yan Benhammou,ErezEtzion

7. Particle Data Group, http://pdg.lbl.gov/

8. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, ScienceDirect, ATLAS experiment, 2012, (p. 2-21)

9. Glenn F.Knoll, Radiation Detection and Measurement Fourth Edition, 2010, (p. 365-594)

10. איור 1- המודל הסטנדרטי : ויקיפדיה -
https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%9E%D7%95%D7%93%D7%9C_%D7%94%D7%A1%D7%98%D7%A0%D7%93%D7%A8%D7%98%D7%99

11. איור 7- זויות טתא ופי : Advanced Design System 2008 Documentation -

http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads2008/emds/ads2008/Radiation_Patterns_and_Antenna_Characteristics.html

12. איור 2 – מפת המאיץ : ExtremeTech- How does the Large Hadron Collider work?

https://www.extremetech.com/extreme/210215-extremetech-explains-what-is-the-large-hadron-collider

6. נספחים

6.1. הקוד שנכתב ליצירת הגרפים בעבודה ולבדיקת החלון:

```
void readTree} ()
gStyle->SetPalette(1;(
Char_t *filename = "Data.root;"



gStyle->SetPalette(1;(
Char_t *filename = "Data.root;"

 //  Retrieve the TTree
TFile* myFile = TFile::Open(filename;(
TTree* tree = (TTree*)(myFile->Get("tree;(("

Double_t Et1, eta1, phi1, Et2, eta2, phi2, theta1;

tree->SetBranchAddress("Et1" ,&Et1;(
tree->SetBranchAddress("eta1",&eta1;(
tree->SetBranchAddress("phi1",&phi1;(
tree->SetBranchAddress("Et2" ,&Et2;(
tree->SetBranchAddress("eta2",&eta2;(
tree->SetBranchAddress("phi2",&phi2;(

//  for the histograms
Double_t theta2;
Double_t del;
Double_t del2;
Double_t del3;
Double_t del4;
Double_t del5;
Double_t del6;
Double_t E;
```

```
Double_t m;
Double_t p;

int maxstart=0, maxstop=0;
int nbins=30 , bin=0 , binw=0;// num of all bins, bins out of the
window, in the window
int stoploop=1 , startloop=1 , width = 3;
double sum=0, sumw=0, dis, disw, yh, yf, yhw, yfw, er,erw;
Double_t x, xw, max=0.;// x out of the window & in the window
int start= 120, end=150;

 //  Book histograms
TH1F* hEt1 = new TH1F("hEt1", "Et1; E_{T,1} [GeV]; Events",
20,0.,200;(.

TH1F* hEt2 = new TH1F("hEt2", "Et2", 20,0.,200;(.
//  hEt2->GetXaxis()->SetTitle("E_{T,1} [GeV;("[
//  hEt2->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* heta1 = new TH1F("heta1", "eta1", 20,-3.,3;(.
//  heta1->GetXaxis()->SetTitle("E_{T,1} [GeV;("[
//  heta1->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* heta2 = new TH1F("heta2", "eta2", 20,-3.,3;(.
//  heta2->GetXaxis()->SetTitle("E_{T,1} [GeV;("[
//  heta2->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* hphi1 = new TH1F("hphi1", "phi1", 20, -4.,4;(.
//  hphi1->GetXaxis()->SetTitle("E_{T,1} [GeV;("[
//  hphi1->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* hphi2 = new TH1F("hphi2", "phi2", 20,-4.,4;(.
//  hphi2->GetXaxis()->SetTitle("E_{T,1} [GeV;("[
//  hphi2->GetYaxis()->SetTitle("Events;("
```

```
TH1F* htheta1 = new TH1F("htheta1", "theta1", 50,-4.,4;(.

TH1F* htheta2 = new TH1F("htheta2", "theta2", 50,-4.,4;(.

TH2F* hall = new TH2F("hall", "#phi_{1} vs. #phi_{2} ; #phi_{1} ;
#phi_{2}", 50,-3.3.,3.3, 50,-3.3.,3.3;(

TH2F* hall2 = new TH2F("hall2", "#theta_{1} vs. #theta_{2} ;
#theta_{1} ; #theta_{2}", 50,0.,3.3, 50,0.,3.3;(

TH2F* hall3 = new TH2F("hall3", "#theta_{1} vs. #phi_{1} ;
#theta_{1} ; #phi_{1}", 50,0,3.3, 50,-3.3.,3.3;(

TH2F* hall4 = new TH2F("hall4", "#theta_{2} vs. #phi_{2} ;
#theta_{2} ; #phi_{2}", 50,0,3.3, 50,-3.3,3.3;(

TH2F* hall5 = new TH2F("hall5", "Et1 vs. Et2; Et1 ; Et2",
50,0,200, 50,0,200;(

TH1F* hp = new TH1F("hp", "Momentum of the Higgs boson",
50.,100.,500;(.
hp->GetXaxis()->SetTitle("Momentum;("
hp->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* hE = new TH1F("hE", "Energy Sum", 50,100.,400;(.
hE->GetXaxis()->SetTitle("Energy_{GeV;("{
hE->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* hm = new TH1F("hm", "Mass Sum", nbins ,start,end;(
hm->GetXaxis()->SetTitle("Mass_{GeV;("{
hm->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH1F* hdel = new TH1F("hdel", "#Delta#phi", 50,-6.,6;(.
```

```
hdel->GetXaxis()->SetTitle("#Delta#phi;("
hdel->GetYaxis()->SetTitle("Events;("

TH2F* hdel5 = new TH2F("hdel5", "#Delta#theta and#Delta
#phi", 50,-6.,6., 50,-4.,4;(.
hdel5->GetXaxis()->SetTitle("#Delta#phi;("
hdel5->GetYaxis()->SetTitle("#Delta#theta;("

TH1F* hmcp = new TH1F("hmcp", "Mass Sum With Window",
nbins ,start,end;(
hmcp->GetXaxis()->SetTitle("Mass_{GeV;("{
hmcp->GetYaxis()->SetTitle("Events;("


 //  Loop over the events
Long64_t events = tree->GetEntries;()

TF1* myF = new TF1("myF","[0]*exp(-x/[1])",100.,160.);
myF->SetParameter(0,1000.);
myF->SetParameter(1,30.);

for (int i=0; i<events; i(++
}
                tree->GetEntry(i;(
                Double_t theta1 = 2*atan(pow(2.718281828,-
eta1;((
                Double_t theta2 = 2*atan(pow(2.718281828,-
eta2;((
                Double_t del = phi1-phi2;
                Double_t del2 = theta1-theta2;
                Double_t e1 = Et1/sin(theta1;(
                Double_t e2 = Et2/sin(theta2;(
                Double_t E = e1 + e2;
```

```
                Double_t p1 = e1*sin(theta1)*cos(phi1) +
e2*sin(theta2)*cos(phi2;(
                Double_t p2 = e1*sin(theta1)*sin(phi1) +
e2*sin(theta2)*sin(phi2;(
                Double_t p3 = e1*cos(theta1) + e2*cos(theta2;(
                Double_t pall = pow(p1,2) + pow(p2,2) + pow(p3,2)
+ pow(E,2;(
                Double_t p = pow(pall,0.5;(
                Double_t msquare = pow(E,2)-pow(p1,2)-
pow(p2,2)-pow(p3,2;(
                Double_t m = sqrt(msquare;(
                //cout<<Et1<<endl;
        hEt1->Fill(Et1;(

                //cout<<Et2<<endl;
hEt2->Fill(Et2;(

                //cout<<eta1<<endl;
heta1->Fill(eta1;(

        //      cout<<eta2<<endl;
heta2->Fill(eta2;(

//              cout<<phi1<<endl;
hphi1->Fill(phi1;(
                //cout << phi1 << endl;

//              cout<<phi2<<endl;
hphi2->Fill(phi2;(
                //cout << phi2<< endl;

        //      cout<<theta1<<endl;
htheta1->Fill(theta1;(
```

```
                htheta2->Fill(theta2;(

                hall-> Fill (phi1,phi2;(

                hall2-> Fill (theta1,theta2;(

                hall3-> Fill (theta1,phi1;(

hall4-> Fill (theta2,phi2;(

        hall5-> Fill (Et1,Et2;(

                hdel->Fill(del;(

                hdel5-> Fill (del,del2;(

                hE->Fill(E;(

                hm->Fill(m;(

                hp->Fill(p;(

{

for (int i=1;i<nbins ;i(++
}
if (i>=1&& i<=stoploop || i>=startloop && i<=nbins(
}
value = hm-> GetBinContent (i;(
hmcp-> SetBinContent (i,value;(
{
{
```

```
TCanvas* c1 = new TCanvas("c1","c1",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c1->cd;()
hEt1-> Draw;()
c1->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/Et12.jpg;("

TCanvas* c2 = new TCanvas("c2","c2",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c2->cd;()
hEt2-> Draw;()
c2->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/Et22.jpg;("

TCanvas* c3 = new TCanvas("c3","c3",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c3->cd;()
heta1-> Draw;()
c3->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/eta12.jpg;("

TCanvas* c4 = new TCanvas("c4","c4",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c4->cd;()
heta2-> Draw;()
c4->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/eta22.jpg;("

TCanvas* c5 = new TCanvas("c5","c5",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c5->cd;()
hphi1-> Draw;()
c5->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/phi12.jpg;("

TCanvas* c6 = new TCanvas("c6","c6",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c6->cd;()
hphi2-> Draw;()
```

```
c6->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/phi22.jpg;("

TCanvas* c7 = new TCanvas("c7","c7",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c7->cd;()
htheta1-> Draw;()
c7->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/theta12.jpg;("

TCanvas* c8 = new TCanvas("c8","c8",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c8->cd;()
htheta2-> Draw;()
c8->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/theta22.jpg;("

TCanvas* c9 = new TCanvas("c9","c9",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c9->cd;()
hall->SetStats(0); // to remove the cube on the right up side
hall-> Draw("colz;("
c9->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/all.jpg;("

TCanvas* c10 = new TCanvas("c10","c10",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c10->cd;()
hall2->SetStats(0); // to remove the cube on the right up side
hall2-> Draw("colz;("
c10->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/all2.jpg;("

TCanvas* c11 = new TCanvas("c11","c11",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c11->cd;()

hall3-> Draw("colz;("
c11->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/all3.jpg;("
```

```
TCanvas* c12 = new TCanvas("c12","c12",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c12->cd;()
hall4-> Draw("colz;("
c12->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/all4.jpg;("

TCanvas* c13 = new TCanvas("c13","c13",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c13->cd;()
hall5->SetStats(0 ;(
hall5-> Draw("colz;("
c13->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/all5.jpg;("

TCanvas* c14 = new TCanvas("c14","c14",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c14->cd;()
hall5-> Draw;()
c14->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/del.jpg;("

TCanvas* c15 = new TCanvas("c15","c15",500,500); //
TCanvas("name","title",sizex,sizey(
c15->cd;()
hdel5-> Draw;()
c15->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/del5.jpg;("

TCanvas* c16 = new TCanvas("c16","c16",500,500;(
c16->cd;()
hE-> Draw;()
c16->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/E.jpg;("

TCanvas* c17 = new TCanvas("c17","c17",500,500;(
c17->cd;()
hm-> Draw;()
c17->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/m.jpg;("
```

```
TCanvas* c18 = new TCanvas("c18","c18",500,500;(
c18->cd;()
hp-> Draw;()
c18->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/p.jpg;("


*/  for the fit
int nbins=30 , bin=26 , binw=4;// num of all bins, bins out of the
window, in the window
//  float start=120;
//  float end=150;
int stoploop = 13 , startloop = 17;
double sum=0, sumw=0, dis, disw, yh, yf, yhw, yfw, er,erw;
Double_t x, xw/*;

//  fit
TF1 *f1 = new TF1("fitMass","[0]*x+[1]",0,10;(
hm->Fit("fitMass;("
cout<<"hey i am here inside FIT"<<endl;

TF1 *f2 = new TF1("fitMassWithWindow","[0]*x+[1]",0,10;(
hm->Fit("fitMassWithWindow;("
cout<<"hey i am here inside FIT2"<<endl;


        //check the fit for the window & for the information out of
the window



for ( ; width < nbins/2 ;width(++
}
        startloop = 1;
```

```
        stoploop=startloop+width;//check that stoploop changes
when you want it to
        //width;++
        cout << "im in the first loop" << "the width is: " << width
<< endl;
        for( ;startloop+width<=nbins ; startloop(++
        }
        cout << "im in the second  loop" << "the width is: " <<
width << endl;




for (int j=1 ; j<nbins ; j (++
}


                cout<<"j "<<j<<" stoploop "<<stoploop<<" startloop
"<<startloop<<endl;
if (j>0 && j<startloop || j>stoploop && j<nbins)//the bin is outside
the window
}
x= hm->GetBinCenter (j;(
yf = f1->Eval (x;(
yh = hm->GetBinContent (j;(
er = yf ;
dis= (pow ((yf-yh),2;((
                        if (er>0.) dis = dis/er;
sum+=dis;
                        sum = pow (sum, 0.5;(
                {
if (j>0 && j>=startloop && j<=stoploop && j<nbins)//the bin is in
the window
}
```

```
xw= hm->GetBinCenter(j;(
yfw = f1->Eval(xw;(
yhw = hm->GetBinContent(j;(
erw = yfw;
                        cout << "im here in window check" <<endl;
disw= pow((yfw-yhw),2;(
                        if (erw>0.) disw= disw/erw;
sumw+=disw;
                        sumw = pow (sumw, 0.5;(



{
{

        sum= pow (sum,0.5;(
        sumw= pow (sumw,0.5;(
        binw=startloop- stoploop;
        bin= nbins- binw;
cout<<" bin = "<<bin <<" and binw = "<<binw<<endl ;
if (bin>0 && binw>0)// if the bins in & outside the window bigger
from zero
        }
        cout << "chi in: " << sumw/binw << " chi out: "<<  sum/bin
<< " dif: " <<(sum/bin)-(sumw/binw) << endl ;
 //             if the diff between outdine and in is the biggest
 //             change max
 //             check it with Adi
if (((sum/bin)-(sumw/binw)) > max(
}
max= ((sumw/binw)-(sum/bin;((
maxstart=startloop;
maxstop=stoploop;
cout<< "the bump is from "<<startloop<< " to " << stoploop <<
endl;
```

```
        {
{

        cout << "startloop in the dif for is: " << startloop << endl;
        {

        cout << "end of the first for " << endl;
cout << "the bump is from " <<maxstart<< " to " << maxstop <<
endl;

        //startloop= stoploop+width;
{

        */for (int j=1 ; j<nbins ; j(++
        }
                if (j>=1 && j<=stoploop || j>=startloop &&
j<nbins)//out of the window
                }
                        x= hm->GetBinCenter (j;(
yf = f1->Eval (x;(
yh = hm->GetBinContent (j;(
er = yf;// pow 0.5 and after pow 2
dis= (pow ((yf-yh),2))/er;
sum+=dis;

                {
                if (j>stoploop && j<startloop)// in the window
                }
                        xw= hm->GetBinCenter(j;(
yfw = f1->Eval(xw;(
yhw = hm->GetBinContent(j;(
erw = yfw;
disw= (pow((yf-yh),2))/erw;
sumw+=disw;
```

```
                {
        {

        sum= pow (sum,0.5;(
        sumw= pow (sumw,0.5;(
        cout << "not in  window: " << (sum/bin) << endl;
cout <<" in window: " << (sumw/binw) << endl/*;


*/          TCanvas* c19 = new TCanvas("c19","c19",500,500;(
       *   c19->cd;()
             *   hm-> Draw;()
                  *   c19-
>SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mhFromFit.jpg/*;("



hm->Fit(myF);
TCanvas* c20 = new TCanvas("c20","c20",500,500;(
c20 -> cd;()
hm -> Draw;()
fitMass -> Draw("same;("
c20 -> SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mfFromFit.jpg;("

TCanvas* c21 = new TCanvas("c21","c21",500,500;(
c21 -> cd;()
hmcp -> Draw;()
fitMassWithWindow -> Draw("same;("
c21-
>SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mfFromFitWithWin.jpg
;("
```

```
//  int ret =Fit(hm;(

{
*/int Fit(TH1F hm(
}
        TF1 *f1 = new TF1("fitMass",[0]*x+[1],0,10;(
        hm->Fit("fitMass;("
        cout<<"hey i am here inside FIT"<<endl;
        //TCanvas* c19 = new TCanvas("c19","c19",500,500;(
        c19->cd;()
        hm-> Draw;()
        c19-
>SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mhFromFit.jpg;("

        TCanvas* c20 = new TCanvas("c20","c20",500,500;(
c20->cd;()
        hm->Draw;()
fitMass-> Draw("same;("
c20->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mfFromFit.jpg;("
/*
um= pow (sum,0.5;(
sumw= pow (sumw,0.5;(
cout << "not in  window: " << (sum/bin) << endl;
cout <<" in window: " << (sumw/binw) << endl;


*/          TCanvas* c19 = new TCanvas("c19","c19",500,500;(
        *    * c19->cd;()
               *       * hm-> Draw;()
                      *          * c19-
>SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mhFromFit.jpg/*;("
```

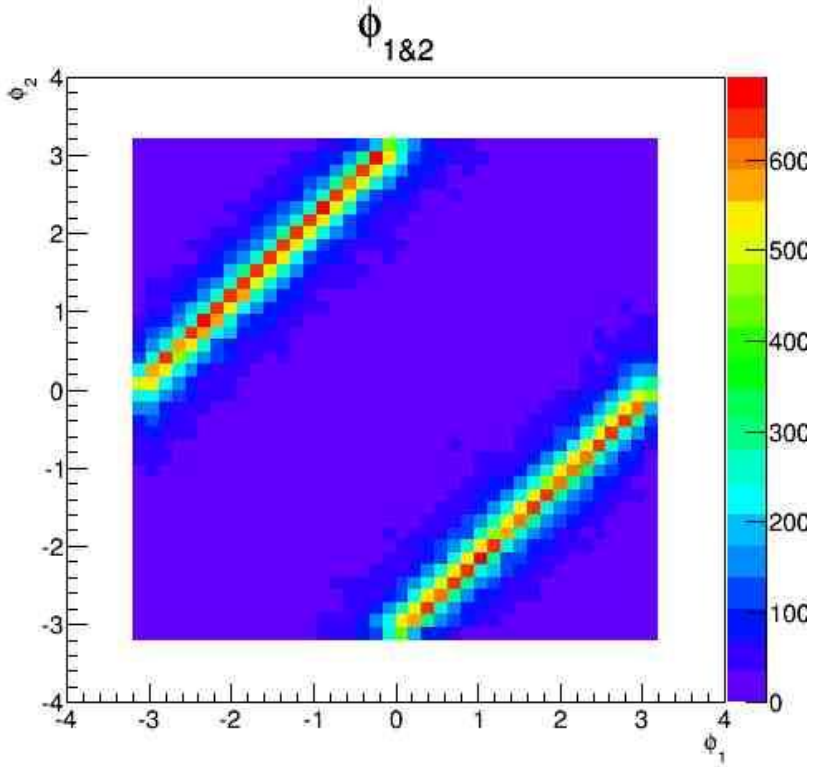
```
TCanvas* c20 = new TCanvas("c20","c20",500,500;(
c20 -> cd;()
hm -> Draw;()
fitMass -> Draw("same;("
c20 -> SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mfFromFit.jpg;("

TCanvas* c21 = new TCanvas("c21","c21",500,500;(
c21 -> cd;()
hmcp -> Draw;()
fitMassWithWindow -> Draw("same;("
c21-
>SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mfFromFitWithWin.jpg
;("

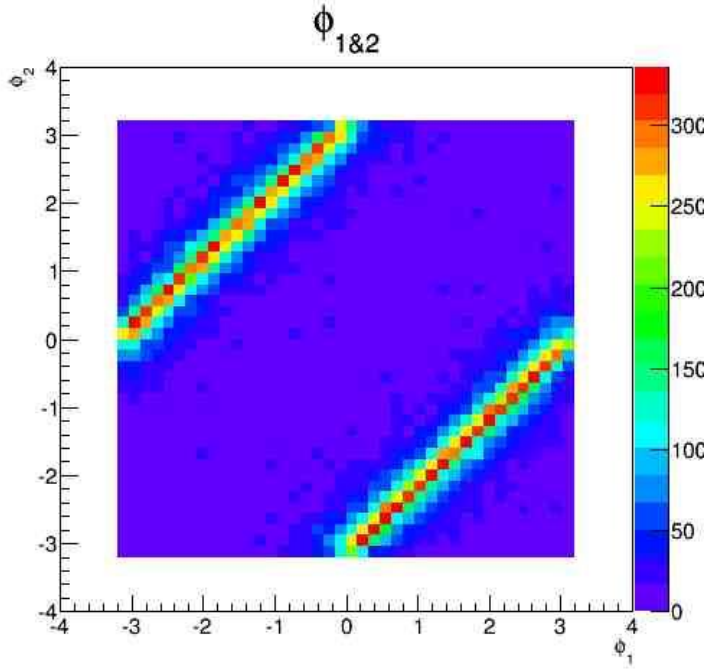
//  int ret =Fit(hm;(
//
{//
*///  int Fit(TH1F hm(
}//
        //  TF1 *f1 = new TF1("fitMass",[0]*x+[1],0,10;(
                //  hm->Fit("fitMass;("
                        //  cout<<"hey i am here inside FIT"<<endl;
//                              //  TCanvas* c19 = new
TCanvas("c19","c19",500,500;(
                                        //  c19->cd;()
                                                //  hm-> Draw;()
                                                        //  c19-
>SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mhFromFit.jpg;("
//
                                                                //  TCanvas* c20 = new
TCanvas("c20","c20",500,500;(
```

```
                                                    //  c20->cd;()
                                                        //  hm-
>Draw;()
//
fitMass-> Draw("same;("
//
c20->SaveAs("/srv01/tau/keren/higgsAnalysis/mfFromFit.jpg;("
/*                                                                  //
            //
```

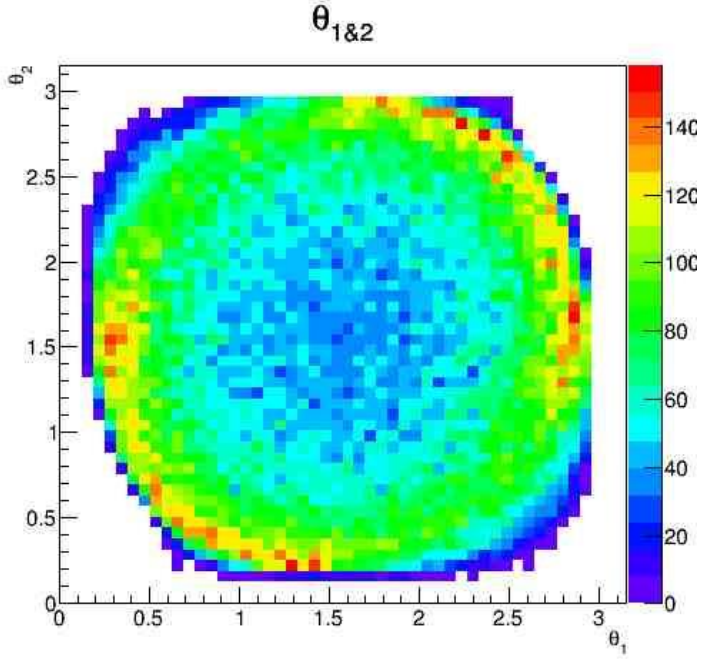
6.2. היסטוגרמות שאינן חלק מהמחקר הראשי



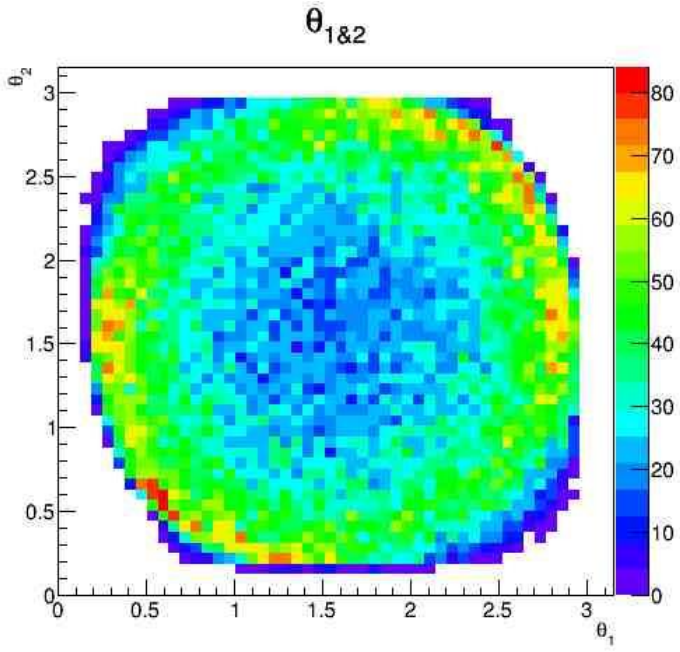
היסטוגרמה 16- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של φ עבור כל אחד מהפוטונים בזוג, נתוני background



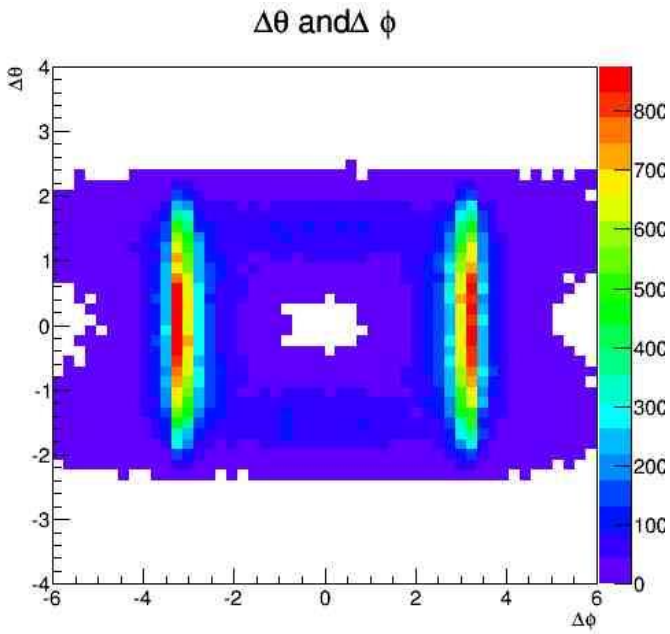
היסטוגרמה 17- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של φ עבור כל אחד מהפוטונים בזוג, נתוני data



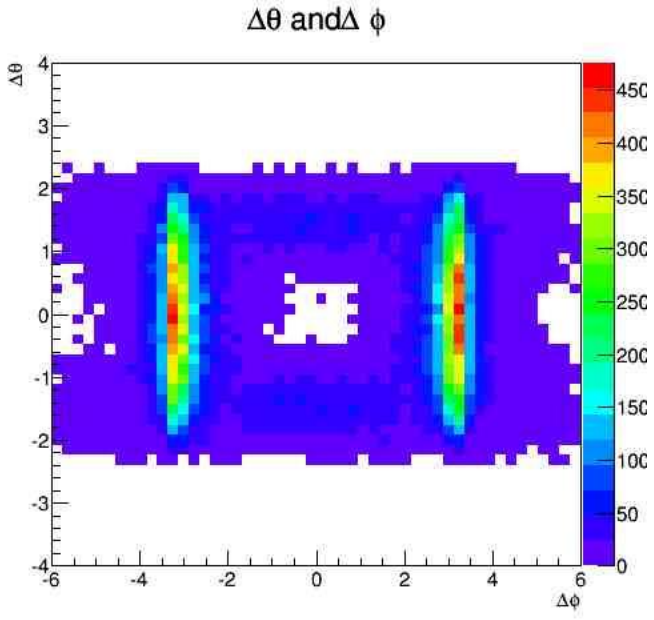
היסטוגרמה 18- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של θ עבור כל אחד מהפוטונים בזוג, נתוני background



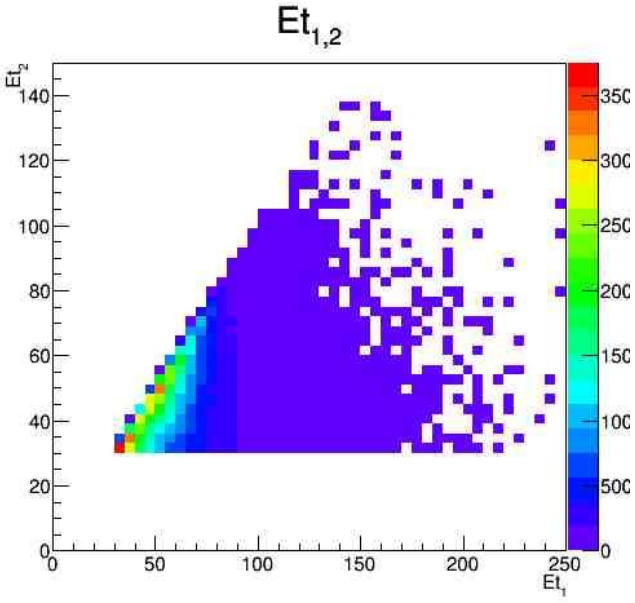
היסטוגרמה 19- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של θ עבור כל אחד מהפוטונים בזוג, נתוני data



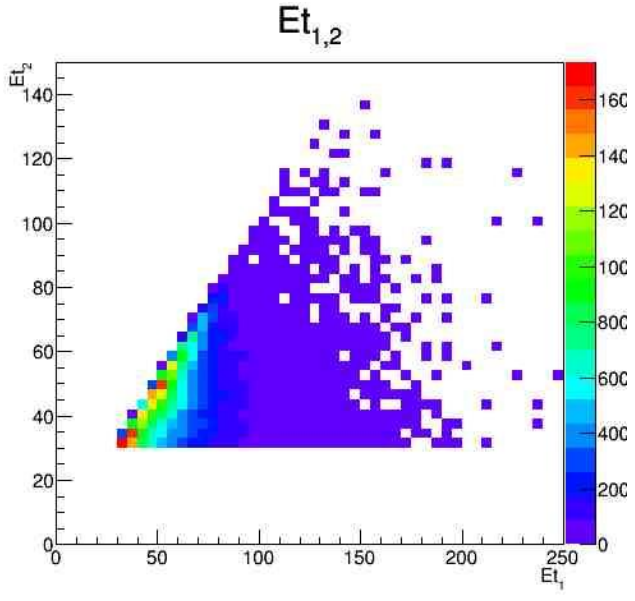
היסטוגרמה 20- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של הפרשי הθ והφ בין שני הפוטונים בכל זוג, נתוני background



היסטוגרמה 21- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של הפרשי הθ והφ בין שני הפוטונים בכל זוג, נתוני data



היסטוגרמה 22- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של Et עבור כל אחד מהפוטונים בזוג, נתוני background



היסטוגרמה 23- היסטוגרמה דו ממדית הבודקת שכיחות של Etעבור כל אחד מהפוטונים בזוג, נתוני data