

"מאיץ ההדרונים הגדול" (LHC) - מסע אל ארץ לא נודעת

שמואל אליצור, האוניברסיטה העברית¹

העשרה



בחודשים האחרונים - לאחר כעשרים שנות תכנון ובנייה, שנה וחצי של תקלות והשקעה של כ-5 מיליארדי דולרים - החל המאיץ הגדול בז'נבה לפעול. הקהילייה המדעית של הפיזיקה של אנרגיות גבוהות וחלקיקים אלמנטריים מצפה בדריכות לתגליות חדשות העשויות לחשוף לפנינו תחום בטבע שלא נצפה עדיין על ידי בני אנוש. ננסה כאן לסקור בקצרה את טיבו של אותו מאיץ ואת השאלות שהוא עשוי לענות.



איור 1: תרשים מנהרת המאיץ הגדול למיקומו הגיאוגרפי - מקור CERN

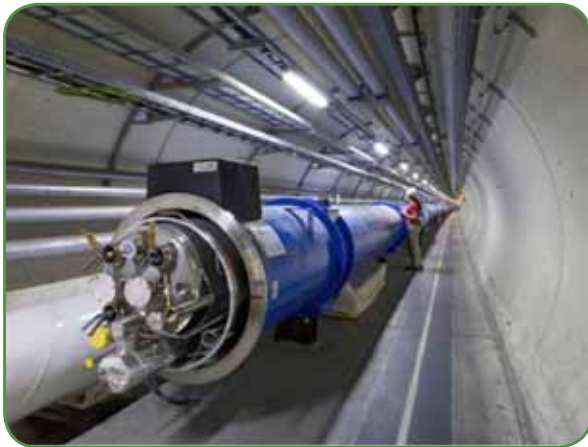
מעשה המאיץ

המאיץ מייצר התנגשויות בין שתי אלומות של פרוטונים הנעות זו מול זו באנרגיה גבוהה. כל אלומה נעה בתוך שפופרת ואקום מעגלית, שתי השפופרות נתונות במנהרה שהיקפה כ-27 קילומטרים, בעומק ממוצע של כ-100 מטרים מתחת לפני הקרקע, על הגבול בין שוויץ לצרפת בסמוך לז'נבה. שתי השפופרות נחתכות זו עם זו בארבע נקודות על המסלול המעגלי. בנקודות אלה מתנגשים הפרוטונים שבשתי האלומות זה בזה. סביב כל נקודת התנגשות נבנה "ניסוי": מערכת מסועפת ובה גלאים מסוגים שונים המזהים את טיבם של החלקיקים הטעונים הרבים הנפלטים מן ההתנגשות ומוודדים את האנרגיות שלהם. תנועתם המעגלית של הפרוטונים מאפשרת להם לעבור שוב ושוב דרך אותם מתקני האצה, מתקנים המייצרים שדות חשמליים בתדירות רדיו, ולהגדיל את האנרגיה שלהם בכל מעבה. שדות מגנטיים חזקים שומרים על תנועתם המעגלית של הפרוטונים. הגורם המגביל את האנרגיה שאליה ניתן להביא את הפרוטונים, הוא

1 שמואל אליצור הוא פרופסור במכון רקח לפיזיקה באוניברסיטה העברית בירושלים ועומד כעת בראשו. תחומי העניין של פרופ' אליצור הם פיזיקה עיונית של אנרגיות גבוהות, תורת השדות ותורת המיתר.

עוצמת השדה המגנטי הנדרשת כדי לשמור על תנועתם המעגלית. במאיץ ההדרונים הגדול, השדות המגנטיים הנדרשים הם כה חזקים (כ- 8.5 טסלה) עד שמגנטיים רגילים הנוצרים על ידי זרמים חשמליים במוליכים אינם מספיקים. יש צורך בזרמים חזקים מאוד המושגים על ידי שימוש בחומרים סופר-מוליכים חסרי התנגדות חשמלית. (חומרים אלה נמצאים במצב סופר-מוליך רק בטמפרטורות נמוכות מאוד של מעלות קלווין בודדות. זה מחייב מערכת קירור גדולה ויקרה.) כ- 1600 מגנטיים סופר-מוליכים מצויים במנהרת המאיץ, הנשמרים בטמפרטורה של 1.9 מעלות קלווין על ידי שרייתם בהליום נוזלי. הואיל ובכל אחת משתי השפופרות נעים פרוטונים, השדות המגנטיים בשפופרת האחת הפוכים בכיונם לאלה שבשפופרת השנייה שבה על הפרוטונים לנוע בכיוון הפוך. הפרוטונים הם גרעיני אטומים של מימן שהאלקטרון "נקלף" מהם. הם מואצים בשלבים במתקני האצה של מאיצים קודמים, קטנים יותר, המצויים באתר: תחילה מואצים

הפרוטונים לאנרגיה של 750 אלף אלקטרון-וולט (750 KeV), משם דרך מאיץ קווי לאנרגיה של 50 מיליון אלקטרון-וולט (50 MeV). לאחר מכן הם עוברים דרך מערכת של מנהרות טבעתיות קטנות יותר ששימשו מאיצים ישנים, שם מוגברת האנרגיה שלהם ל 450,000 MeV (450 GeV). ואז הם מוזרקים לתוך המנהרה הגדולה, שם יואצו לאנרגיה המתוכננת של 7000 GeV (7 TeV). בתוך המאיץ מקובצים הפרוטונים ב"חבילות" (bunches) שבכל אחת כמאה מיליארד חלקיקים. בתנאים אופטימליים מכילה מנהרת המאיץ כשלושת אלפים חבילות כאלה. למעשה, כרגע עובד המאיץ באנרגיה שהיא חצי מן הערך המתוכנן, 3.5 TeV לקרן, ומספר החבילות בטבעת המאיץ קטן בינתיים בהרבה מהמתוכנן ועומד על 12 חבילות לקרן.



איור 2: מנהרת המאיץ במבט מבפנים - מקור CERN

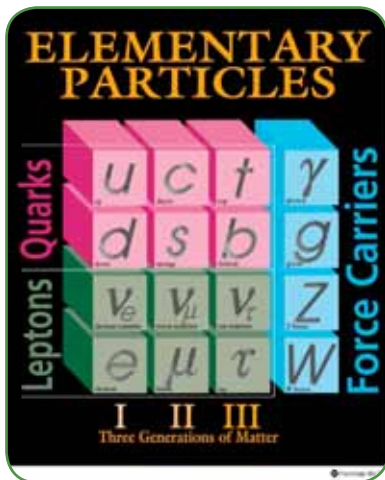
שאלות למענה

המאיץ משול לספינותיו של קולומבוס המפליגות מערבה לארץ לא נודעת. איש עדיין לא הביט במבנה החומר בתחום האנרגיות מעבר ל-TeV.

תהליכים באנרגיות כאלה אינם מתרחשים בטבע אף בליבותיהם של הכוכבים החמים ביותר. תהליכים כאלה התרחשו כנראה כשהיה היקום בן כ- 10^{-10} שניות לאחר המפץ הגדול. מכאן הביטויים הרווחים בתעמולה סביב המאיץ על כך שהוא מביא אותנו לתקופת הזמן הנושקת למפץ הגדול. יש להסתייג ולומר שאין כאן שחזור של התנאים ההם, הואיל והמאיץ יוצר התנגשויות מבוקרות של קרן פרוטונים באנרגיות אלה של TeV, ואילו היקום המוקדם בתקופה המדוברת מתואר על ידי אוכלוסייה בלתי סדירה של כל סוגי החלקיקים השרויה **בטמפרטורה של TeV**.

תורת הקוונטים מייחסת לאלומת חלקיקים אורך גל שהוא פרופורציוני הפוך לתנע שלהם, הקשור לאנרגיה שלהם. במהירויות הקרובות למהירות האור, האנרגיה E מתאימה לאורך גל λ לפי הקשר $E=hc/\lambda$. אנרגיה של TeV אחד שקולה לאורך גל בסדר גודל של 10^{-16} cm. ידוע שכושר ההפרדה של מיקרוסקופ מוגבל על ידי אורך הגל של האור: כאשר מאירים דגם באורך גל מסוים, לא ניתן להבחין בין נקודות שהמרחק ביניהן קטן מאורך הגל של האור - או של קרן החלקיקים - שבו מואר הדגם. המאיץ הוא אפוא מיקרוסקופ המאפשר להתבונן בחומר בסקלות מרחק הקטנות מ- 10^{-16} cm, תחום מרחקים שלא נבדק מעולם. אף על פי כן, הניסיון שנצבר במחקר החומר באנרגיות נמוכות יותר ובסקאלות מרחק גדולות יותר, מצביע על אפשרויות שונות ומקנה לנו שפה לנתח בה את התוצאות.

המודל הסטנדרטי



איור 3: חלקיקי היסוד בטבע לפי המודל הסטנדרטי, מקור Fermilab

במשך המאה העשרים התגבשה תאוריה המתארת בצורה מדויקת את התנהגות החומר עד לאנרגיות של מאות GeV. תאוריה זו ידועה בשם לא אינפורמטיבי במיוחד: "המודל הסטנדרטי". מודל זה הוא מקרה פרטי מתוך מסגרת תאורטית רחבה הנקראת "תורת שדות (יחסותית) קוונטית". נסקור כאן את תוכנו בקיצור ובאופן איכותי. לפי המודל הסטנדרטי בנוי החומר מחלקיקים אלמנטריים המתחלקים לשתי קבוצות: קוורקים ולפטונים. (האלקטרון למשל שייך לקבוצת הלפטונים). אלה הם חלקיקים בעלי ספין 1/2. במרחקים קצרים הם חסרי מסה (כפי שיוסבר בהמשך, במרחקים גדולים אינטראקציות עם חלקיקים אחרים הופכות אותם לבעלי מסה), והתנהגותם נשלטת על ידי שלושה כוחות: הכוח החזק, הכוח האלקטרומגנטי והכוח החלש. הקוורקים מגיבים לכל שלושת הכוחות, ואילו הלפטונים אינם חשים בכוח החזק אלא בכוח האלקטרומגנטי ו\או החלש בלבד. הכוחות עצמם מועברים על ידי חלקיקים בעלי ספין 1 שבמרחקים קצרים, גם הם חסרי מסה. הכוח האלקטרומגנטי מועבר על ידי הפוטון, כלומר הפוטון הוא קוונטום התנע-אנרגיה של השדה האלקטרומגנטי. הכוח החזק מועבר על ידי הגלואונים, שהם הקוונטה של תנע ואנרגיה של שדה הכוח החזק, ואילו הכוח החלש מועבר על ידי החלקיקים W^- , W^+ ו- Z , קוונטות התנע-אנרגיה של השדה החלש.



איור 4: המודל הסטנדרטי - מרכיבי החומר - מקור CERN

לפי המודל הסטנדרטי, במרחקים ארוכים יותר, כ- 10^{-15} cm, משתנה התנהגותם של הקוורקים והלפטונים, והם מתנהגים כחלקיקים בעלי מסה. בתהליך זה נוצרת גם לחלקיקי W ו- Z מסה של כ-90-80 GeV. פירוש העובדה שחלקיקי W ו- Z המעבירים את הכוח החלש נעשים בעלי מסה, הוא שהכוח החלש נעשה קצר טווח. כדי ששני חלקיקים יפעילו כוח חלש זה על זה, עליהם להתקרב למרחק הקטן מאורך הגל המתאים לאנרגיה של 90-80 GeV, היינו למרחק הקטן מ- 10^{-15} cm. מיסוך זה של הכוח הוא למעשה הגורם להיותו חלש. כדי להסביר תופעה זו של מיסוך הכוח החלש, מניח המודל הסטנדרטי, בנוסף לקוורקים, ללפטונים ולקוונטה של שדות הכח, את קיומם של

חלקיקים נוספים, בעלי ספין 0, הנקראים חלקיקי Higgs. בתהליך המוכר משטחים אחרים בפיזיקה, עובר אחד מחלקיקי Higgs תהליך של "עיבוי", שבו הווקום מתמלא במספר לא מוגדר של חלקיקים בעלי תנע 0. הואיל וחלקיקים אלה טעונים במטען חלש, הרי הם ממסכים כל מטען חלש חיצוני על ידי הקפתו בחלקיקים בעלי מטען חלש הפוך הזמניים בווקום. התופעה אנלוגית אך לא זהה למיסוך של מטען חשמלי חיצוני המוכנס לתוך מתכת על ידי האלקטרונים החופשיים שבה. בנוסף למטען החלש של חלקיקי Higgs מניח המודל אינטראקציה ישירה בינם לבין הקוורקים והלפטונים הקרויה אינטראקציית Yukawa. עקב אינטראקציה זו מקנה תופעת העיבוי מסה לקוורקים וללפטונים. בווקום ריק הם מתנהגים כחלקיקים חסרי מסה הנעים במהירות האור. אולם בווקום רווי בחלקיקי Higgs הקוורקים והלפטונים

מתנגשים תוך כדי תנועה בחלקיקי Higgs הנוכחים בווקום, אינם מגיעים למהירות האור ומתנהגים כחלקיקים בעלי מסה שגודלה פרופורציוני לעוצמת אינטראקציית Yukawa שלהם עם חלקיקי Higgs.

המספר המינימלי של חלקיקי Higgs הדרוש במודל הסטנדרטי הוא ארבעה: חלקיק אחד בעל מטען חשמלי חיובי, האנטי-חלקיק שלו בעל מטען שלילי ועוד שני חלקיקים ניטרליים חשמלית שאחד מהם הוא המתעבה בווקום. לאחר העיבוי תוך כדי תופעת המיסוך, מקבל החלקיק W^+ מסה ו"בולע" את חלקיק Higgs הטעון חיובית. חלקיק W^- מקבל מסה ובולע את חלקיק Higgs הטעון שלילית. חלקיק Z הניטרלי מקבל אף הוא מסה ובולע אחד מחלקיקי Higgs הניטרליים. נותר במודל חלקיק Higgs ניטרלי אחד שאינו נבלע על ידי הקוונטות של השדה החלש.

במרחקים ארוכים עוד יותר, כ- 10^{-13} cm, הכוח החזק כולא את הקוורקים והגלואונים במצבים קשורים חסרי מטען חזק הקרויים "הדרונים". הקוורקים והגלואונים אינם מופיעים בטבע כחלקיקים חופשיים - הם מהווים אבני בניין של הדרונים. הדרון הוא מצב קשור של קוורקים, אנטי קוורקים וגלואונים, שהמטענים החזקים שלהם מבטלים זה את זה (כדרך שהמטענים החשמליים של האלקטרון והפרוטון שבאטום המימן מבטלים זה את זה). אבני הקוורקים והגלואונים כלואים בתוך הדרון שממדיו מסדר גודל של 10^{-13} cm. באורכי גל הקטנים מאורך זה נעים הקוורקים והגלואונים שבהדרון באופן כמעט חופשי, אולם הכוח ביניהם נעשה חזק בסקלה של 10^{-13} cm ואינו מאפשר להם לצאת מן הדרון. הפרוטון הוא דוגמה טיפוסית להדרון; הוא מצב קשור של שלושה קוורקים יחד עם מספר לא מוגדר של גלואונים ושל זוגות קוורק-אנטיקוורק.

מאיץ ההדרונים הגדול נבנה כדי לגלות את חוקי הטבע בתחום האנרגיות מסדר גודל של TeV, אנרגיות גבוהות יותר (ומרחקים קצרים יותר) מאלה שבהן נמצא המודל הסטנדרטי תקף.

ציפיות מן המאיץ

חלקיק Higgs החסר

במשך השנים עבר המודל הסטנדרטי בדיקות כמותיות רבות ועמד בכל האתגרים שהתוצאות הניסיוניות הציבו בפניו עד כה. בין היתר התגלו חלקיקי W ו- Z מסיביים במאיץ הישן באותו מקום - ב-CERN, ז'נבה - בתחילת שנות השמונים. כפי שצוין, חלקיקים אלו כוללים גם חלקיקי Higgs המקנים להם את אופיים המסיבי. ניתן לומר אפוא כי שלושה מתוך ארבעת חלקיקי Higgs כבר נצפו. תכונה מרכזית אחת של המודל עדיין לא אומתה בניסוי, והיא קיומו של חלקיק Higgs הניטרלי הנותר. מסתו של חלקיק זה אינה ניתנת לחישוב מתכונות המודל הידועות עד כה. אילו הייתה מסת חלקיק זה קטנה מ-114 GeV - הוא היה נצפה במאיצים הקודמים, עוד ב-CERN וב-Fermilab באזור שיקגו. מחד, העובדה שלא נתגלה בהם מצביעה בוודאות גבוהה יחסית על כך שמסתו גבוהה מערך זה. מאידך, המודל קושר את מסת חלקיק Higgs זה לעוצמת האינטראקציה של החלקיק עם עצמו. שיקולים עיוניים מראים כי מסת חלקיק הגבוהה מ-1 TeV מתאימה לאינטראקציה עצמית כה חזקה, שחישובים קודמים שלא הביאו אותה בחשבון - אבל הביאו להתאמה מוצלחת לניסויים - יהיו טעונים תיקון, וההתאמה לניסוי תופה. לפיכך האתגר שעדיין עומד בפני המודל הסטנדרטי בעימות עם הניסוי הוא גילוי של חלקיק Higgs החסר במסה שהיא בין 114 GeV לבין 1 TeV. זהו תחום אנרגיות המתאים למאיץ החדש. אם יימצא חלקיק Higgs בעל התכונות הנדרשות בתחום אנרגיות זה - תוכל הקהילייה להירגע ולאמץ את המודל הסטנדרטי בשלווה. אם לא יימצא שם - תהיה זו תוצאה מעניינת יותר, נצטרך לשוב ולבדוק את תפיסותינו גם בתחום האנרגיות שאנו חושבים שאנו מבינים היטב. אף על פי שבאופן לוגי השאלה על גילוי חלקיק Higgs היא הראשונה שנבקש תשובה עליה מניסויי המאיץ, אפשר להעריך מתוך המודל עצמו כי מאורעות שבהם נוצר חלקיק זה הם נדירים יחסית, ונצטרך להמתין שנים מספר עד שתיציבר סטטיסטיקה מספיקה כדי לזהות אותו.

מעבר למודל הסטנדרטי

שיקולים שונים, תאורטיים וניסיוניים, מצביעים על כך שהמודל הסטנדרטי, עם כל הצלחותיו בתחום האנרגיות שנבדק עד כה, חייב להיות חלק מתאוריה רחבה יותר. נזכיר כמה משיקולים אלה.

גרואיטציה

ברור שמודל המתאר את הכוח החזק, הכוח האלקטרומגנטי והכוח החלש ומתעלם מן הגרואיטציה אינו תיאור שלם של הטבע. מאידך, הזנחתה של הגרואיטציה בעולם החלקיקים היא קירוב טוב מאוד. בתחום אנרגיות רחב מאוד כוח הגרואיטציה זניח לחלוטין לעומת שלושת הכוחות האחרים. הגרואיטציה נעשית רלוונטית רק כשמתקרבים לאנרגיה הקרויה אנרגיית פלנק או מסת פלנק. זו מוגדרת על ידי הדרישה כי אנרגיית המשיכה הגרואיטציונית של שני חלקיקים בעלי מסת פלנק שהמרחק ביניהם הוא אורך הגל המתאים למסה זו, שווה לאנרגיית פלנק. כלומר: אם M היא מסת פלנק, אז: $GM^2/(h/Mc) = Mc^2$, או $M^2 = hc/G$ (h הוא קבוע פלנק, c מהירות האור ו- G קבוע הגרואיטציה של ניוטון). ערכה של מסת פלנק הוא כ- 10^{19} GeV, כלומר גדולה בכ-16 סדרי גודל מן האנרגיה של המאיצים שלנו. חוקי הטבע באנרגיות הקרובות למסת פלנק שונים בוודאי באופן רדיקלי מן המודל הסטנדרטי וכוללים השפעה חזקה של גרואיטציה, אולם השפעת הגרואיטציה על ניסויים במאיצים היום - ובכל עתיד הנראה לעין - היא זניחה לחלוטין. בהמשך נראה כי מסקנה זו עשויה להשתנות אם מספר ממדי היקום משתנה במרחקים קצרים.

חומר אפל

תצפיות קוסמולוגיות מראות כי השדה הגרואיטציוני סביב גלקסיות גדול בהרבה ממה שניתן לייחס לאוסף הכוכבים הנראים המרכיבים את הגלקסיה. מוסכם על הרוב הגדול של החוקרים כי כ-80% מן החומר המרכיב את היקום הוא חומר אפל שאינו פולט קרינה אלקטרומגנטית ואינו מגיב לה. הואיל והדרך היחידה שבה אנו חשים בחומר זה היא דרך השפעתו הגרואיטציונית, איננו יודעים הרבה על הרכבו ומהותו. המודל המתאים ביותר להתנהגותו הנצפית של החומר האפל הוא תיאורו כאוסף של חלקיקים שהאינטראקציה ביניהם חלשה מאוד; שהאינטראקציה שלהם עם מרכיבי המודל הסטנדרטי חלשה מאוד ושהמסה שלהם היא מסדר גודל של TeV. חלקיקים כאלה, אם הם קיימים, נמצאים בוודאי מחוץ למודל הסטנדרטי, אבל הם - או תוצרי התפרקויותיהם - עשויים להימצא בתחום המדידה של המאיץ החדש.

התחזקות האינטראקציות במרחקים קצרים

חלק מן האינטראקציות במודל הסטנדרטי הן בעלות התכונה שלפיה ככל שהמרחקים מתקצרים, כך האינטראקציה הולכת ומתחזקת. כאלה הן האינטראקציות החשמליות והאינטראקציה העצמית של חלקיק Higgs. עבור אנרגיות גבוהות מספיק, ייעשו אלה לאינטראקציות חזקות כל כך שהן ישנו לגמרי את אופיו של המודל.

"שאלת ההיררכיה"

כאמור, סקאלת האנרגיה של עיבוי חלקיק Higgs היא סקלת מרחק של כ- 10^{-15} cm או אנרגיה של כמה מאות GeV. גם מסת חלקיק Higgs הניטרלי צפויה להיות מסדר גודל של TeV. לו היה המודל הסטנדרטי שומר על צורתו לכל תחום אנרגיה עד לסקלת פלנק, הרי היה לפנינו מודל שבו יש תפקיד לשתי סקלות: סקלת פלנק שבה משתנה המודל עקב אפקטים גרואיטציוניים חזקים, וסקלת העיבוי והמסה של חלקיקי Higgs. שתי סקלות אלה שונות זו מזו ב-16 סדרי גודל. יחס ענק כזה בין סקלות במערכת אחת הוא בלתי טבעי ודורש הסבר. העובדה שמסות הקוורקים והלפטונים - שהם חלקיקים בעלי ספין - קטנות בהרבה ממסת פלנק, ניתנת להסבר על סמך הסימטריה הגבוהה יותר של חלקיקים בעלי ספין וחסרי מסה לעומת חלקיקים בעלי ספין ובעלי מסה. סימטריה של מערכת היא קבוצת הטרנספורמציות שניתן

להפעיל על מרכיביה אגב שמירה על הדינמיקה שלה. לחלקיק חסר מסה בעל ספין יש סימטריה גבוהה יותר, הואיל וחלקיק זה עשוי להיות "ימני" - היטל הספין על התנע חיובי; או "שמאלי" - היטל שלילי. טרנספורמציות בלתי תלויות המופעלות על החלקיק הימני ועל השמאלי עשויות לשמור על הדינמיקה של המערכת. לחלקיק מסיבי בעל ספין, ההפרדה בין החלקיק הימני לחלקיק השמאלי אינה מוחלטת, שהרי חלקיק מסיבי הנראה ימני במערכת ייחוס אחת יראה שמאלי במערכת אחרת. כדי לשמור על הדינמיקה של המערכת, יש להפעיל אותה טרנספורמציה על החלקיק הימני והשמאלי, ולפיכך הסימטריה של המערכת נמוכה מזו של מערכת חלקיקים חסרי מסה. גם במערכת המוגדרת בסקלת פלנק עשויים חלקיקים בעלי ספין להיות בעלי מסה 0 - הסימטריה הגבוהה שלהם מונעת מהם מלקבל מסה. שונה הדבר לחלקיק Higgs חסרי ספין. הסימטריה של החלקיק הקל אינה גבוהה מזו של החלקיק הכבד, הואיל ועבור חלקיק חסר ספין אין משמעות להבחנה בין חלקיק ימני לחלקיק שמאלי. קשה אפוא להבין איזה עקרון דינמי גורם לכך שמסתו תהיה קטנה ב-16 סדרי גודל ממסת פלנק המגדירה את הסקלה של המערכת. קושי (אולי אסתטי) זה ידוע בשם "בעיית ההיררכיה של הסקלות".

המסות של הנייטרינו

חלקיקי הנייטרינו, לפטונים חסרי מטען חשמלי, הם חסרי מסה במסגרת המודל הסטנדרטי בצורתו המצומצמת. הניסוי מגלה מבנה של מסות של נייטרינו שאינו מוסבר במסגרת המודל וקשור כנראה לפיזיקה בתחום של אנרגיות גבוהות מאוד, כ- 10^{14} GeV.

"איחוד גדול"

כאמור, במרחקים הקצרים מסקלת העיבוי שהיא כ- 10^{-15} cm או באנרגיות הגבוהות מסקלת האנרגיה המתאימה לאורך גל זה, הנמדד בכמה מאות GeV, מתנהגים כל החלקיקים במודל הסטנדרטי כחסרי מסה. המודל מלמד כי עוצמות הכוחות השונים משתנות עם האנרגיה או בהתאם לסקלת המרחק. כאמור למעלה, הכוח האלקטרומגנטי נעשה גדול יותר באנרגיות גבוהות, עוצמת הכוח החלש קטנה עם הגדלת האנרגיה ועוצמת הכוח החזק קטנה עם האנרגיה בקצב מהיר יותר. בסקלה מסוימת של אנרגיות, בסביבת 10^{15} GeV, מתקרבות זו לזו העוצמות של שלוש האינטראקציות וכמעט (אבל לא לגמרי) מתלכדות. עובדה זו מעלה את ההשערה שבאנרגיה זו המודל האמיתי הוא של כוח אחד וכשהאנרגיות נמוכות יותר - הן מתפצלות כתוצאה מתהליכי עיבוי הדומים לזה שתואר למעלה, לשלושה כוחות שונים. מודל זה נקרא "האיחוד הגדול" (Grand Unification), והוא בודאי הרחבה של המודל הסטנדרטי.

אסימטריה בין חומר לאנטי-חומר

היקום המוכר לנו בנוי קוורקים (בתוך הפרוטונים והנייטרונים המרכיבים את גרעיני האטומים) ולפטונים-האלקטרונים. אנטי-פרוטונים, אנטי-נייטרונים ופוזיטרונים מתקיימים רק זמן קצר מאוד עד שהם פוגשים באנטי חלקיקים שלהם (חלקיקים זהים בעלי מטען הפוך). היקום אינו סימטרי להיפוך חומר לאנטי-חומר. בפרספקטיבה של היקום המוקדם זו אינה אסימטריה גדולה. היקום המוקדם היה חם מאוד והכיל "מרק" של חלקיקים ואנטי-חלקיקים בכמויות כמעט שוות. על כל מיליארד חלקיקי אנטי-חומר היו מיליארד אחד חלקיקי חומר. עם התקררות היקום הפכו מיליארד הזוגות של חלקיק-אנטי-חלקיק לפוטונים של קרינת הרקע הקוסמולוגית, חלקיק החומר האחד העודף נותר ללא בן זוג וזהו החומר המרכיב את הגלקסיות שביקום בימינו. על פי ההערכה, בטמפרטורות הגבוהות מאוד ששררו בראשית היקום, הייתה צפיפות החומר שווה לצפיפות האנטי-חומר בשווי משקל תרמי. האסימטריה נוצרה על פי המשוער במשך שבריר השנייה הראשון, כאשר תהליך ההתקררות הפר במקצת את שיווי המשקל התרמי. אסימטריה כזאת יכולה להיווצר רק אם חוקי הטבע אינם סימטריים לגמרי להיפוך חומר לאנטי-חומר. חוקי הטבע המוכרים לנו במודל הסטנדרטי מכילים אמנם שבירה זעירה של הסימטריה חומר - אנטי-חומר, אולם חישוב כמותי מראה שאין די בה כדי להסביר את האסימטריה

הקיימת ביקום. זהו עוד רמז לכך שבאנרגיות הגבוהות הרלוונטיות לתהליך זה נשלט היקום על ידי תאוריה רחבה יותר מן המודל הסטנדרטי העשויה להכיל שבירה גדולה יותר של סימטריה זו.

כל הנקודות שהועלו מרמזות על כך שבאנרגיות גבוהות מספיק יש לצפות לפיזיקה חדשה מעבר למודל הסטנדרטי. השינויים הנדרשים בשל מסת הנייטרינו, האיחוד הגדול ובוודאי הגרוויטציה, עשויים לחול באנרגיות הגבוהות בהרבה סדרי גודל מהישג ידו של כל מאיץ שהוא. לעומתם, החומר האפל, התחזקות האינטראקציה ושאלת ההיררכיה רומזים שסטיות מהמודל הסטנדרטי צפויות כבר בסקלות אנרגיה לא רחוקות מדיי מאלו שבהן שולט המודל הסטנדרטי, ולפיכך המאיץ החדש עשוי לגלותן. נימוקים אלה הספיקו כדי לשכנע את הקהיליה להשקיע את המאמץ והמשאבים הדרושים לבנייתו.

כיוונים תאורטיים

קיימות השערות תאורטיות רבות ומגוונות על מה שעשוי להתגלות מעבר למודל הסטנדרטי, ואנו נתאר אותן כאן.

מודלים מורכבים

הוצעו מודלים רבים שלפיהם הקוורקים והלפטונים יתגלו כמורכבים מאבני בניין יסודיות יותר (composite models). לפי משפחת מודלים אחרת, חלקיקי Higgs יתגלו כמורכבים מ"תת קוורקים" הקשורים זה לזה על ידי כוח "על חזק" (technicolor models). מודלים רבים מסוג זה כרוכים באילוצים ובכיוונונים לא לגמרי טבעיים של הפרמטרים שלהם, אבל הם עדיין אפשרויות פתוחות.

"סופר סימטריה"

אחד הכיוונים התאורטיים הפופולריים במיוחד בנוי על מושג ה"סופר-סימטריה". סופר-סימטריה היא סימטריה המקשרת חלקיקים בעלי ספינים שונים. לכל בוזון (חלקיק בעל ספין שלם) מתאים פרמיון (בעל ספין חצי שלם). ערבוב הספינים מקנה לסופר-סימטריה אופי גאומטרי, שתי סופר-סימטריות עוקבות שקולות לטרנספורמציה הזוהי. הדינמיקה של תורות סופר-סימטריות ניתנת לשליטה והבנה טובה הרבה יותר מזו של תורות ללא סופר-סימטריה, וידע תאורטי רב נצבר על תורות כאלה. סופר-סימטריה היא פתרון טבעי לבעיית ההיררכיה שנזכרה למעלה. אם לשדה Higgs חסר הספין יש בן זוג בעל ספין $1/2$, שיקולי סימטריה יכולים לאלץ אותו להיות חסר מסה, ואז הסופר-סימטריה תשמור גם על חלקיק Higgs הבוזוני כחסר מסה. אפשר להראות כי ההנחה שלכל חלקיק במודל הסטנדרטי יש בן זוג תחת סופר-סימטריה משפרת את תופעת האיחוד הגדול. עוצמות שלוש האינטראקציות מתלכדות בצורה מדויקת הרבה יותר אם מניחים בני זוג כאלה. מובן שאי אפשר להניח שיש בטבע סופר-סימטריה מדויקת. המודל הסטנדרטי בפירוש איננו סופר-סימטרי, הוא אינו מכיל בן זוג בוזוני לכל פרמיון ולא בן זוג פרמיוני לכל בוזון. ההנחה היא שסופר-סימטריה מתקיימת באנרגיות גבוהות ונשברת באנרגיות נמוכות. בעיית ההיררכיה תיפתר רק אם נניח כי סקלת השבירה של סופר-סימטריה אינה רחוקה מדיי מסקלת העיבוי ומהמסה של חלקיק Higgs ונמצאת באזור של TeV, בהישג ידו של המאיץ הגדול. מודלים רבים של סופר-סימטריה מספקים מועמדים טבעיים למרכיבי החומר האפל. בן הזוג הסופר סימטרי הקל ביותר של המודל הסטנדרטי הוא חלקיק יציב במודלים אלה והוא מועמד אידאלי לחומר האפל בתנאי ששבירת סופר-סימטריה אכן חלה בסדר גודל של TeV. אם אמנם זהו המצב, הרי יש סיכוי שהמאיץ החדש יניב יכול עשיר של חלקיקים חדשים, בני זוגם הסופר-סימטריים של מרכיבי המודל הסטנדרטי. מאמץ תאורטי וניסיוני רב מושקע בבחינת אפשרויות אלה. יש לציין כי סופר-סימטריה היא מרכיב מרכזי בתורות מיתר - מודלים החורגים מתורת השדות ואמורים לטפל גם בגרוויטציה קוונטית. אלה מכילים כמעט תמיד סופר-סימטריה, אולם בדרך כלל אינם מחייבים שבירה של סופר-סימטריה דווקא באנרגיות נמוכות.

בכיוון אקזוטי יותר ישנן תאוריות המציעות כי עשויים להתגלות ממדים נוספים של המרחב. ככל הידוע לנו, אנו חיים ביקום ארבע-ממדי. אנו יכולים להזיז עצמים מקרוסקופיים וגם חלקיקים מיקרוסקופיים בשלושה כיוונים ניצבים, ימין-שמאל, קדימה-אחורנית ומעלה-מטה, זאת בנוסף לכיוון זרימת הזמן. זה אינו מוציא מכלל אפשרות את קיומם של ממדים נוספים וקומפקטיים, למשל, מעגלים קטנים. אם המעגלים קטנים מדי, איננו מסוגלים למקם בתוכם חלקיקים בגלל עקרון אי הודאות שלפיו כדי למקם חלקיק בתחום קטן R , יש לתת לו תנע מסדר גודל של h/R ואנרגיה hc/R . הואיל והאנרגיות שאנו מסוגלים לתת לחלקיק לא עברו עד עתה את הערך של TeV , כל שנוכל לומר הוא שאם יש ממדים קומפקטיים, הרי גודלם R קטן מ- hc/TeV , ונאמד בכ- 10^{-16} cm. ייתכן שברגע שהמאיץ יעבור אנרגיה זו יתחילו להתגלות ממדים קומפקטיים שהיו נסתרים מאתנו עד כה. נציין כי ממדים קומפקטיים נוספים ביקום הם חלק בלתי נפרד מתורות מיתר (String Theoris). ברוב המודלים הבנויים על תורת המיתר גודל הממדים הקומפקטיים קטן בהרבה מתחום המרחקים הניתן לצפייה במאיץ החדש, אולם סוג מסוים של מודלים כאלה מאפשר ממדים קומפקטיים שהם בסדר גודל של אורך הגל המתאים לאנרגיות בסביבת TeV , תחומו של המאיץ.

גרוויטציה חזקה וחורים שחורים

במסגרת זו של ממדים נוספים נפתחת אפשרות נוספת, אקזוטית אף יותר. הגדרנו למעלה את אנרגיית פלנק כסקלת האנרגיה שבה כוח הגרוויטציה נעשה חזק ושקול למסת החלקיק. הערכנו סקלה זו כ- 10^{19} GeV. אולם הערכה זו הייתה כרוכה בהנחה שהמרחב הוא תלת-ממדי, ולכן האנרגיה הגרוויטציונית של שתי מסות במרחק r זו מזו היא פרופורציונית ל- $1/r$. ב- d ממדי מרחב, האנרגיה הגרוויטציונית פרופורציונית ל- $(1/r)^{(d-2)}$. ככל שמספר הממדים גדול יותר, מתקבלת סקלת פלנק שבה האנרגיה הגרוויטציונית משתווה למסה, באנרגיה נמוכה יותר. תורת המיתר מציעה $d=9$. אם כל ששת הממדים הקומפקטיים הם מסדר גודל של TeV , גם סקלת פלנק לא תהיה רחוקה מערך זה. לא רק שהמאיץ יוכל לחוש בממדים הפנימיים אלא שהוא עשוי להגיע לאנרגיות שבהן הגרוויטציה היא חזקה ויש צורך להביא בחשבון היווצרותם של חורים שחורים קטנים המתאדים מיד ופולטים קרינה המכונה ”קרינת הוקינג”.

לפינו אפוא ספקטרום של ציפיות תאורטיות לאשר עשוי להתגלות במאיץ, המשתרע החל בקצה השמרני של גילוי חלקיק Higgs, דרך גילוי אבני בניין המרכיבות את החלקיקים האלמנטריים של המודל הסטנדרטי, ציפיות לגילוי סופר-סימטריה המרחיבה את הסימטריות הגאומטריות של הזזות וסיבובים וכלה בקצה הקרוב למדע בדיוני של ממדים נוספים וגרוויטציה חזקה. חוץ מחלקיק Higgs, אף אחת מציפיות אלה אינה מבוססת על נימוקים כבדי משקל. זהו כאמור מסע אל ארץ לא נודעת. אפשר שתתגלה אחת האפשרויות האלה, אפשר שתתגלינה תופעות שהתאורטיקנים לא צפו. קיימת גם האפשרות המתסכלת שמלבד חלקיק Higgs לא יתגלה דבר חדש בתחום האנרגיות של המאיץ. ספינותיו של קולומבוס עשויות לצלוח את האוקיינוס ולשוב עמוסות זהב ויהלומים, אבל אפשר גם שהרוח תאזל ממפרשיהן באמצע האוקיינוס השומם.

האם ההשקעה ראויה?

פרויקט גדול ויקר המיועד למחקר של תחום מרוחק מחיי יום יום מעלה את השאלה הלגיטימית של כדאיות ההשקעה. ואמנם מאיץ מסדר גודל כזה ואף גדול ממנו עמד על הפרק לפני כעשרים שנה בארצות הברית. אז הוצע לבנות במדינת טקסס מאיץ פרטונים במנהרה שארכה כ-90 ק”מ שיגיע לאנרגיה של $20 TeV$ לקרן. הצעה זו עמדה במרכזו של פולמוס פוליטי בראשית שנות התשעים סביב שאלת כדאיות ההשקעה לעומת כיוונים אחרים של מאמץ מדעי. לבסוף לאחר גמר התכנון, בתחילת בניית המנהרה, כשנתברר שהמחיר חורג מן ההערכה הראשונית, החליט הקונגרס בשנת 1993 לבטל את הפרויקט. בכך ויתרה ארצות הברית על ההזדמנות להוביל מחקר ניסויי בפיזיקה של אנרגיות גבוהות ונתנה את הבכורה לאירופה. בניגוד לקונגרס האמריקני פסקו מדינות CERN לטובת פרויקט LHC.

כל דיון בשאלת הכדאיות של מתקן מסוג זה נוגע בהשקפת עולמם של המתדיינים בכל הנוגע להערכת התועלת שבידע המדעי. ראשית, ישנה התועלת הישירה לרווחת האדם ולרמת חייו העשויה לצמוח מתוצאות המחקר. כאן יש להודות כי מטרת המחקר הנידון עוסקת בסקלות אנרגיה ואורך הרחוקות מאוד מן הסקלה האנושית. בשלב זה קשה מאוד לחשוב על שמושים טכנולוגיים בחלקיק Higgs, בחלקיקים הסופר-סימטריים הכבדים העשויים להתגלות או בממדים נוספים פנימיים שגודלם אלפית מגודל הפרוטון. גם בנושא זה תיתכנה, כמובן, הפתעות. ההיסטוריה מלאה דוגמאות לתגליות שנחשבו תאורטיות מאוד והפכו לימים לבסיס לטכנולוגיות מסועפות. אולם התפתחויות כאלה הן ודאי עניין לעתיד רחוק יחסית. תועלת לטווח הקצר יותר עשויה בהחלט לצמוח, אך לאו דוקא ממטרות המחקר ומסקנותיו, אלא מן המיומנות הטכנולוגית הנרכשת תוך כדי בניית פרויקט חלוצי חסר תקדים. בקשר לכך מרבים להזכיר את העובדה שרשת המידע WWW העומדת ביסוד מהפכת האינטרנט הומצאה למעשה ב-CERN לצורך הטיפול באינפורמציה הזורמת מן המאיץ. קשה לתאר התפתחות טכנולוגית שהשפיעה יותר על האנושות בחצי השני של המאה העשרים.

מעבר לשאלת התועלת הישירה לרווחת האנושות עומדת ההשקפה שהידע עצמו, הבנת העולם הסובב אותנו, הוא מותר האדם מן הבהמה. השאיפה לגלות ארץ לא נודעת ולפרוץ אופקים חדשים מניעה את האנושות מראשיתה. אפשר להשוות את פרויקט המאיץ למאמץ להנחית אדם על הירח או על פלנטות אחרות. פריצות הדרך הטכנולוגיות הנדרשות דומות בשני המקרים. בשני המקרים התועלת לרווחת האנושות תתגלה רק בעתיד הרחוק. כמות הידע החדש שנרכוש כתוצאה מפרויקט המאיץ היא גדולה לאין שיעור מן הידיעות שנרכוש כתוצאה מפרויקט האדם בחלל. מדובר כאן בהצצה לחוקי הטבע הבסיסיים ביותר ובהעמקה משמעותית של הבנתנו את היקום.

בנוסף לכל זה יש לזכור כי בקנה מידה גלובלי ההשקעה במאיץ אינה בלתי סבירה; היא ודאי קטנה בהרבה מתקציב הביטחון של מדינה בינונית.

הניסויים שבמאיץ

כאמור, קרני הפרוטונים מתנגשות בארבע נקודות לאורך המסלול. סביב כל נקודת התנגשות כזאת נבנה "ניסוי", מערכת גלאים מסועפת הקולטת את מאות אלפי החלקיקים הנוצרים בהתנגשות כזאת. שניים מן הניסויים האלה מתמקדים בשאלות שנסקרו למעלה, בחקר התנהגות החומר בתחום האנרגיות של TeV.

אחד מהם קרוי ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), שבו שותפה גם קבוצת חוקרים ישראלים; והשני קרוי CMS (Compact Muon Solenoid). שני הגלאים הללו דומים במבנה הכללי שלהם אך שונים בפרטים רבים, וכמובן, נוצרת תחרות בריאה בין החוקרים בשתי הקבוצות השואפים להקדים אלה את אלה בתגליות חדשות. אף על פי ששני ניסויים אלה מכוונים לאותן המטרות, מקפידה הקהילייה לבחון כל תגלית לפחות בשתי דרכים בלתי תלויות כדי למנוע טעויות ותגליות שווא, שהרי "על פי שני עדים יקום דבר".

ההתנגשויות שאליהן מכוונים ניסויים אלה הן מאורעות נדירים מאוד בהם קוורקים מהירים מתקרבים זה לזה למרחקים קטנים מ- 10^{-16} cm ומגלים לנו את החוקים השוררים בסקלת מרחק זו. ברוב רובן של ההתנגשויות עוברים הפרוטונים זה דרך זה כשהמרחקים בין הקוורקים גדולים מערך זה. מאורעות כאלה נשלטים על ידי המודל הסטנדרטי המוכר לנו, ואין בהם משום חידוש. אחד האתגרים של הניסוי הוא לפתח יכולת לסנן את השטף העצום של המאורעות ולברור מתוכם רק את המאורעות הבודדים הרלוונטיים. זה מחייב להתחיל את הסינון עוד בתוך הגלאי עצמו, כך שהמחשבים המעבדים את האינפורמציה כבר מקבלים חומר שסונון סינון ראשוני. על מחשבים אלה להוסיף ולעבד את הכמות הגדולה של מידע ולשם כך נבנות רשתות בינלאומיות גדולות של מחשבים העובדים יחד כדי לעמוד במשימה זו.

יש לציין כי גם כאשר הפרוטונים נעים בשפופרת באנרגיה של 7 TeV כמתוכנן, האנרגיה הרלוונטית להתנגשויות, האנרגיה של הקוורקים המתנגשים, היא קטנה בהרבה, שכן קוורק בודד נושא רק חלק קטן מן האנרגיה של הפרוטון כולו. מבחינה זו

כדאי היה לבנות מאיץ לאלקטרונים ופוזיטרונים שהם חלקיקים נקודתיים כמו הקוורקים, במקום להאיץ פרוטונים שהם מצבים קשורים של קוורקים וגלואונים, והאנרגיה מתחלקת ביניהם. הסיבה לכך שבשלב זה מוזרקים פרוטונים, ולא אלקטרונים, למאיץ הגדול נובעת מן התופעה הנקראת "קרינת סינכרוטרון". חלקיק טעון הנע במעגל מהווה אנטינה הפולטת קרינה אלקטרומגנטית. עוצמת קרינה זו תלויה במסת החלקיק ועבור אלקטרונים או פוזיטרונים היא עזה מאוד. מעבר למהירות מסוימת האנרגיה המושקעת בדחירת האלקטרונים במסלולם המעגלי אינה מאיצה אותם, אלא רק מפצה על ההפסדים הנובעים מקרינת הסינכרוטרון. עבור פרוטונים, שהם כבדים אלפי מונים, עוצמת קרינת הסינכרוטרון זעומה, ואפשר להאיץ במעגל באופן יעיל. בעלי החזון החושבים כבר על המאיץ הגדול הבא מדברים על מאיץ עתידי לאלקטרונים ופוזיטרונים שמן הטעם שהוסבר לא יוכל להיות מעגלי, אלא יהיה מאיץ קווי. כרגע מחשבות אלה הן עדיין לפני שלב התכנון.

בנוסף לשני ניסויים אלה מכילה שפופרת המאיץ עוד שני ניסויים. האחד מהם נקרא ALICE (A Large Ion Collider Experiment). מטרתו של ניסוי זה היא חקר הכוח החזק בטמפרטורות גבוהות. הזכרנו למעלה כי באנרגיות נמוכות כלואים הקוורקים והגלואונים במצבים קשורים הנקראים הדרונים. מצפים כי בחומר הדרוני המחומם לטמפרטורה גבוהה (מאות MeV), יחול מעבר פאזה ממצב של אוסף הדרונים למצב של פלסמה של קוורקים וגלואונים. כדי לבדוק את מעבר הפאזה ואת תכונותיה של פלסמה זו יאיץ המאיץ בחלק מן הזמן, במקום פרוטונים, יונים כבדים של עופרת. כאשר שני יונים כאלה שכל אחד מהם מכיל מאות נוקליאונים (פרוטונים ונייטרונים) מתנגשים באנרגיה גבוהה מתנהגת אוכלוסיית נוקליאונים זו כגז הדרוני בטמפרטורה גבוהה. הטמפרטורה נקבעת על ידי אנרגיית ההאצה. המאיץ הגדול יביא את היונים המתנגשים לטמפרטורות גבוהות מן הטמפרטורה הקריטית ויאפשר לצפות בפאזה של פלסמת קוורקים וגלואונים.

הניסוי הרביעי קרוי LHCb. הוא מתמקד בבעיית האסימטריה בין חומר לאנטי-חומר. מסתבר כי אחת הדרכים הראשיות לחקר תופעות אלה היא ניתוח התנהגותם של הדרונים המכילים את הקוורק b (שמסתו כ-5 GeV). ניסוי זה אוסף את הדרונים מסוג זה הנוצרים במאיץ וחוקר את תכונותיהם ואת אופני התפרקותם.

תלאות המאיץ

המאיץ אושר על ידי מועצת CERN בשנת 1994. המנהרה הגדולה כבר הייתה קיימת. היא אכסנה קודם לכן את המאיץ הישן LEP שהאיץ אלקטרונים ופוזיטרונים באנרגיה של כ-50 GeV לקרן. בניית המאיץ LHC הושלמה ב-2008. ב-10 בספטמבר 2008 הושק המאיץ בטקס חגיגי, קרן פרוטונים אחת נשלחה לתוך המאיץ והתנהגותה השביעה רצון. אולם לאחר תשעה ימים, ב-19 בספטמבר 2008 קרתה תקלה רצינית במגנטים הסופר-מוליכים בקטע מסוים של המאיץ. אזור מסוים לא היה בפאזה הסופר-מוליכה הנדרשת; ההתנגדות החשמלית גרמה להתחממות רבה עקב עצמת הזרם הגבוהה במגנטים, נוצרה דליפה של ההליום, המשמש לקירור המגנטים, לתוך המערכת. פעולת המאיץ נעצרה מיד, והיה צורך לתקן חלק מן המגנטים. כל פעילות בתוך המאיץ אינה אפשרית לפני שכל המערכת עוברת חימום מבוקר (הטמפרטורה בחלקים רבים של המאיץ קרובה מאוד לאפס מעלות קלווין). התיקונים הנדרשים ארכו למעלה משנה, והמאיץ חזר לפעול ב-21 בנובמבר 2009. למודי ניסיון נזהרים עתה מפעילי המאיץ מלהעמיס עומס רב מדיי על המגנטים. הוחלט אפוא כי בשלב הראשון יופעל המאיץ רק בחצי האנרגיה שתוכננה מתחילה, כלומר, אנרגיה של 3.5 TeV לקרן. ב-2012 מתוכנן כיבוי זמני של המאיץ. לאחר הטיפול במשך תקופת הכיבוי מקווים בוני המאיץ להגיע לאנרגיה המתוכננת של 7 TeV לקרן בקצב של כ-3000 חבילות פרוטונים החגים במנהרה כשכל אחת מהחבילות מכילה 10^{11} פרוטונים.

כאמור, כרגע פועל המאיץ באנרגיה של 3.5 TeV לקרן בעוצמה של 12 חבילות פרוטונים במנהרה. גם בעוצמה מופחתת זו הצליחו כבר הניסויים לשחזר את כל התוצאות הידועות של המודל הסטנדרטי. העוצמה מתוכננת להגיע עד סוף 2010 ל-800 חבילות במנהרה. יידרשו זמן וסבלנות כדי לחזות במאורעות הנדירים באמת שיסירו את הלוט מתעלומת התנהגות החומר בתחום האנרגיות של TeV החורג מעבר למודל הסטנדרטי.