



מגנטי הענק של אטלס חשופים בשלב הרכבתם. הם נראים כשמונה רפסודות גדולות. גובהו של הגלאי כבניין בן שש קומות.

## בדרך אל הפיזיקה החדשה הקשר הישראלי לתגליות ב־CERN

לפני כמה חודשים התבררנו על גילוי סימנים ראשונים לחלקיק חדש במאיץ החלקיקים האירופי הענקי. לגילוי הייתה תרומה ישראלית ניכרת.

ראש הוועדה הלאומית לאנרגיות גבוהות פרופ' אליעזר רבינוביץ, מהאוניברסיטה העברית בירושלים, סוקר את השותפות הישראלית במאיץ החלקיקים, על היבטיה המדעיים והמדיניים.

להכנת הכתבה תרמו: פרופ' אלינה אברמוביץ, ד"ר גדעון בלה, ד"ר יאן בן חמו, ד"ר שקמה ברסלר, פרופ' עילם גרוס, פרופ' אהוד דוכובני, פרופ' שלומית טרם, ד"ר דניאל ללוש, ד"ר לורן לוינסון, פרופ' גיורא מיקנברג, פרופ' אבי סופר, ד"ר ולדימיר סמחטין, פרופ' ארז עציון, פרופ' אליעזר רבינוביץ, פרופ' יורם רוזן, מר מאיר שועה.

המבנה הבסיסי של החומר עם החול של יציקת הקשרים בין ישראל כמדינה לבין CERN, היהלום שבכתר המחקר האירופי.

לקשרים שבין ישראל ל־CERN היסטוריה מורכבת, שלא נוכל לעשות לה צדק מלא במסגרת זו. מדענים רבים עבדו במשך שנים כיחידים בניסויים שונים ב־CERN. עם הגידול בהיקף הניסויים גדל מאוד חלקה של ישראל בבניית חמרה במסגרת הגלאי OPAL, ששימש

ספרם של כותבי מאמר זה מחד גדול בהרבה מזה של כותבי המאמרים שמתפרסמים באיגרת של האקדמיה ומאידך קטן עשרות מונים ממספר המשתתפים בניסויים המתוארים, אך הוא משקף נאמנה את מספרם הרב של הגופים והאנשים בישראל שתרמו לקשרים שבין ישראל לארגון האירופי למחקר גרעיני – CERN. במאמר נערב את הקודש של החיפוש המדעי אחר

שגיבשה החליטה ישראל להשתתף רק באחד מארבעת הגלמים במאיץ, והבחירה הייתה בגלאי אטלס (ATLAS). בתוכו בנתה הקבוצה הישראלית את תת-המערכת הנקראת TGC. המערכת והקמתה מתוארות באיגרת כסלו תשמ"ט של האקדמיה.

בד בבד עם גידול התרומה המדעית הישראלית ב-CERN הפכה ישראל במהלך מדיני למדינה הראשונה במעמד משקיף תורם בארגון. למהלך זה הצטרף משרד המסחר, התעשייה והתעסוקה (תמ"ת), שנשא ברוב עלות השדרוג של המעמד הישראלי לצד משרד המדע כשותף שני במימון. ההסכם שבמסגרתו שודרג מעמדה של ישראל הוביל להשקעות של CERN ביותר מ-30 מיליון פרנקים שווייצריים בתעשייה הישראלית. כמה מפעלים בישראל אף זכו בפרסי הצטיינות מטעם CERN. הישג זה היה פרי שיתוף פעולה פורה עם סגן המדען הראשי במשרד התמ"ת ד"ר שאול פרייריך.


ב-1997 קיים הארגון האירופי לפיזיקה את ועידתו הדו-שנתית בירושלים, בתמיכת האקדמיה, וזו הייתה הפעם הראשונה שהוועידה התקיימה מחוץ למדינות האיחוד האירופי.

כדי להעריך את השותפות המורכבת הזו החליטה האקדמיה להזמין מדי כמה שנים ועדה בין-לאומית ממיטב המומחים בתחום, חלקם שותפים בשימוש ב-CERN וחלקם משקיפים מן החוץ. ב-2006 ביקרה בארץ משלחת כזו מטעם המועצה האירופית למאיצים עתידיים (RECFA), שכללה את המנכ"לים של כל המאיצים הגדולים באירופה, ובהם מנכ"ל CERN רוברט איימר. המשלחת כתבה דוח חיובי ביותר על פעילותה של ישראל ב-CERN ושלחה אותו בין היתר לראש הממשלה אריאל שרון.

בביקור משלחת RECFA הציע מנכ"ל CERN שישראל תיהפך חברה מלאה ב-CERN. נאמר לו כי ניסיונות של ישראל למסד את הקשרים נענו בעבר בתגובה קרירה מכמה מחברות CERN, והמנכ"ל השיב: "התבגרנו מאז". בפגישה עם שר התמ"ת אהוד אולמרט חזר המנכ"ל איימר על ההצעה, ובעקבות זאת התקיימו

למדידת תוצרי האינטראקציה במאיץ הקודם – מאיץ האלקטרונים והפוזיטרונים LEP. הרחבת הפעילות הישראלית חייבה גידול בתקציבי העבודה, ונוצר צורך לגבש מדיניות לאומית באשר לפעילות ישראל במה שמכונה "מדע גדול". לפעילות כזאת דרושים מימון מיוחד לתשלום דמי השתתפות בניסויים ומימון מדעי לקבוצה גדולה ולא אחידה של חוקרים, לתקופות זמן ממושכות. האתגר בעיצוב מדיניות לאומית בנושא היה ליצור את התנאים הטובים ביותר שיאפשרו לחוקרים הישראליים לתרום תרומה רבה וייחודית גם לניסויים שאלפי חוקרים מעורבים בהם. לשם כך גיבשו פרופ' יובל נאמן ז"ל, פרופ' דוד הורן ופרופ' פאול זינגר ז"ל מדיניות שהתנתה את המימון הלאומי בעבודת המדענים הישראליים כולם בגלאי אחד במאיץ, ובמידת האפשר שכולם יעבדו באותה תת-מערכת בתוך הגלאי. בתהליך היו שותפים האקדמיה הישראלית הלאומית למדעים, הוועדה לתכנון ותקצוב של המועצה להשכלה גבוהה (ות"ת), הקרן הלאומית למדע ומשרד המדע. בהחלטת ממשלה הוקמה הוועדה הישראלית לאנרגיות גבוהות באקדמיה למדעים ובתיאום עם משרד המדע. מאז מלווה האקדמיה ברציפות את פעילות ישראל ב-CERN.

## מדע גדול - תקציבים גדולים

אלה חשובה שעמדה בפני הוועדה הייתה  אם להשתתף במאיץ האמריקני הענקי, SSC, שהקמתו החלה בטקסס, או להמשיך את הפעילות ב-CERN אף על פי שהמדיניות הישראלית מעדיפה לרוב את ארצות הברית כשותף מדעי. ההחלטה להמשיך את הפעילות ב-CERN הצדיקה עצמה בדיעבד, מאחר שארצות הברית ויתרה על הקמת מאיץ והחלה לעבוד בעצמה ב-CERN, ואילו ישראל נמנתה עם מייסדי הגלמים ב-CERN. גיבוש המדיניות הזו הניח את התשתית להשתתפות ישראל בניסויים שהיו מתוכננים להיערך לאחר הקמת מאיץ ההדרונים הגדול – LHC. על פי המדיניות

כשהגיעו סימנים מעודדים על הצלחה במאמציו של המשרד, התחילה בניית התקציב שיידרש לתשלום דמי החבר ל-CERN. נציין כי לו הייתה ישראל חברה בארגון כיום, ב-2012, היה סך התשלום כ-13 מיליון פרנק שווייצרי. פריצת הדרך בשריון התקציב הושגה לאחר שיו"ר ות"ת פרופ' מנואל טרכטנברג הכיר בחשיבות העניין, וות"ת החליטה לשאת בחלק מרכזי של העומס התקציבי, נוסף על כספים שכבר שילמה אז ישירות כדמי חבר ולפעילות המדעית ב-CERN. לאחר דיונים ממושכים נבנתה נוסחה תקציבית, ולפיה ות"ת היא השותף הראשי. השותף הבכיר השני הוא משרד התמ"ת, ולאחריהם שותפים שווים: משרד האוצר, משרד החוץ, משרד המדע ומשרד ראש הממשלה. לאחר כשנתיים של דיונים הסכימה מועצת CERN פה אחד להכיר בזכאותה של ישראל להציג את מועמדותה לחברות בארגון. בעקבות ישראל הגישו עוד ארבע מדינות בקשה לחברות: סלובניה, סרביה, קפריסין וטורקיה. באוקטובר 2011 הייתה ישראל המדינה הראשונה שחתמה על הסכם הצטרפות ל-CERN במעמד חדש, של עמית (associate) בארגון, והייתה הראשונה שהצטרפה אליו במעמד הזה. ישראל בחרה במסלול מהיר לחברות מלאה, שאורכו כשנתיים, ולכן שנת 2013 מיועדת להיות שנת ההכרעה בנושא.

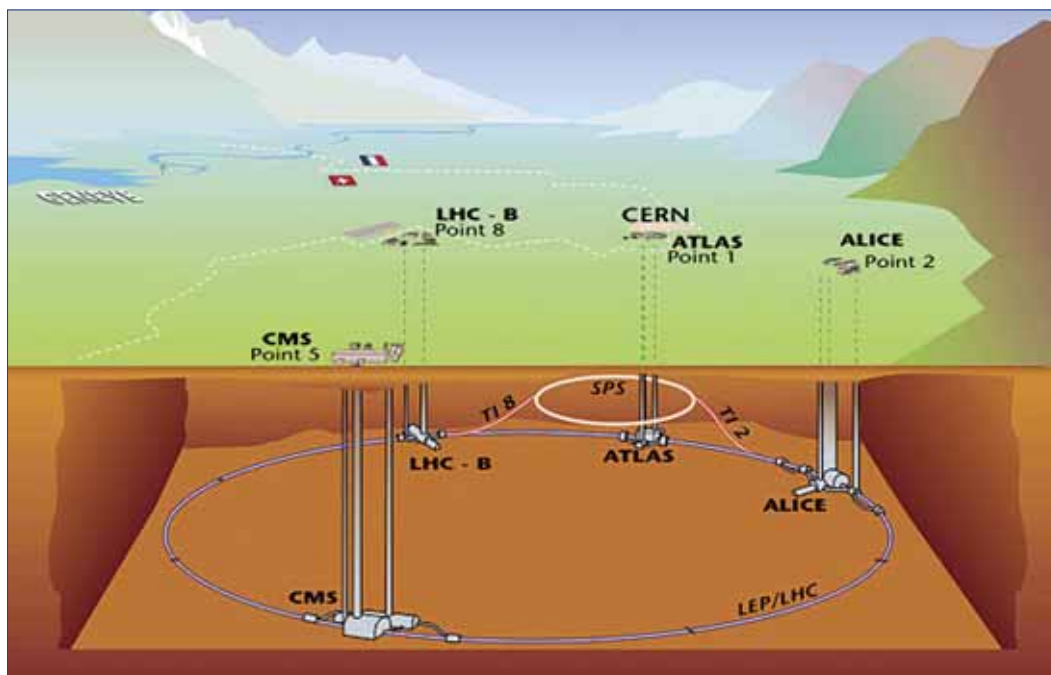
## אנחנו על המפה - באטלס

תקופת מאמצי של ישראל להכשיר את קבלתה ל-CERN נמשכה ביתר שאת עבודתו המדעית של הארגון. רבות נכתב על מה שהתרחש במאיץ בשנים 2008–2012. לאחר עיכובים רבים החל המאיץ בפעולתו, וזמן קצר לאחר מכן אירעה תקלה שהשביתה את פעילותו ליותר משנה. לעיכובים היו גם צדדים חיוביים: הם אפשרו לניסיונאים להביא את הגלאים לידי מוכנות לפעולה כמעט ללא "מחלות הילדות" המאפיינות ראשיתה של פעילות טכנולוגית, וכך יכלו המאיץ והגלאים לעבוד בקצב מוגבר מרגע חידוש הפעילות, ברמות אנרגייה גבוהות מאי פעם.

◀ בארץ דיונים מפורטים. בתמיכת האקדמיה דנו בנושא ות"ת ומשרד החוץ. הוסכם שישאל תשגר מכתב לא רשמי למנכ"ל CERN, ובו תודיע כי היא פותחת בבירור רציני של האפשרות לבקש להצטרף לשורות הארגון. ראש ות"ת פרופ' שלמה גרוסמן שלח את המכתב מטעם ישראל לאחר דיון שהתקיים בפורום תל"מ בראשות נשיא האקדמיה פרופ' יעקב זיו. למכתב הייתה שותפה שרת החינוך יולי תמיר. מנכ"ל CERN בחן, על סמך המכתב, את הסכמת המדינות החברות לצירוף ישראל, והתברר שלא מעט מדינות אינן רואות בעין יפה את הצטרפות ישראל כחברה מן המניין לארגון, כל אחת מסיבותיה שלה. מנכ"ל CERN אמר שהוא אמנם ממשיך לתמוך ביזמה, אך לא יוכל לעשות זאת בכוחות עצמו. בעקבות זאת הקימה שרת החוץ ציפי לבני צוות שכלל את נציגי האקדמיה למדעים, משרד המדע, משרד התמ"ת, ות"ת, משרד החוץ, הוועדה לאנרגיות גבוהות ומדענים ישראליים המשתתפים בפעילות ב-CERN. משרד החוץ קבע ברורות שיש לישראל עניין בהצטרפות ל-CERN כחברה מן המניין, והשאלה המרכזית הייתה מה לעשות קודם - לעגן את התקציבים שיידרשו או לפתוח במאמץ מדיני שיסלול את הדרך לארגון. לכל המשתתפים היה ברור שהצלחה המדעית הישראלית ב-CERN וההערכה שרוחשים שם לתרומת מדעניה הן שסללו את האפשרות לפתיחת דיון ב-CERN על צירופה של ישראל לארגון כחברה מלאה. שרת החוץ החליטה לארח דיונים ממצים בעניין, ותיק CERN הופקד בידי רפי ברק, כיום מנכ"ל משרד החוץ. משרד החוץ פתח במאמץ מדיני שיטתי לשכנע את כל חברות CERN לתמוך בבקשה הישראלית, כשתוגש.

הוועדה הלאומית לאנרגיות גבוהות מילאה בשנים האלה תפקיד מרכזי בכל הפעילויות המתוארות כאן. חבריה: פרופ' אלינה אברמוביץ', פרופ' אהוד דוכובני, פרופ' שלומית טרם, פרופ' גיורא מיקנברג, פרופ' יוסף ניר, פרופ' ירון עוז, פרופ' מרק קרלינר ופרופ' אליעזר רבינוביץ' (יו"ר).





תיאור סכמטי של המערכת התת־קרקעית של המאיצים ב־CERN. מעבדת CERN שעל גבול צרפת ושווייץ, שבה המאיץ וארבעת גלאי, נמצאת מסיבות גאולוגיות בעומק של כ־100 מטר. מדענים ישראליים השתתפו בתכנונו ובבנייתו של הגלאי אטלס.

שמאיצי החלקיקים הופכים חזקים, מתוחכמים ויעילים יותר, כך גדלה עלות הקמתם ותפעולם, והגופים המממנים מצפים שהמאיץ יביא לגילוי של לפחות חלקיק אחד חדש. בישראל אין בוני מאיצים, אבל יש תאורטיקנים וניסיונאים התורמים לתחום. זה כמה עשורים שניסיונאים בארץ בונים גלאים למאיצים, ויש לעשות הכול כדי לשמר את הידע הזה. ישראל תרמה תרומה חלוצית ניכרת לגלאים מסוג TGC (Thin Gap Chamber). הגלאי מבוסס על הטכנולוגיה של תאי גז דקיקים, והוא פיתוח נוסף של מערכת שפותחה בישראל ושימשה בהצלחה במשך 11 שנה בגלאי OPAL שבמאיץ החלקיקים הקודם LEP (ב־CERN). פיתוחו דרש מאמץ משותף מהקבוצות הישראליות והיפניות, השותפות העיקריות במיזם. האתגר המרכזי בגלאי כזה הוא ההתמודדות עם קצב ההתנגשויות הגבוה ב־LHC, המחייב זיהוי בזמן אמת של התנגשויות שיכולות להתגלות כרלוונטיות,»

במאיץ נעות ב־2012 שתי אלומות של פרוטונים בכיוונים מנוגדים, כל אחת באנרגייה של 4 TEV – האנרגייה הגדולה ביותר שיוצרה בידי אדם. בארבעה מקומות לאורך 27 הקילומטרים של מנהרת המאיץ מוצבים גלאים, ובתוכם מתנגשות האלומות זו בזו. תפקיד הגלאים הוא לתעד את תוצאות התנגשות החלקיקים ולברור מתוכן את אותם אירועים שהם בעלי עניין פיזיקלי מיוחד. זאת כדי לאשר שהתוצאות שנרשמו בגלאים אמינות, ובעיקר כדי לגלות "פיזיקה חדשה".

אחד הגלאים הוא אטלס, שבו משתתפת הקבוצה הישראלית. הניסיונאים מחפשים בין השאר חלקיק המכונה "בוזון היגס", ויש הקוראים לו "סקלר BEH" (רוברט בראוט, פרנסואה אנגרט ופיטר היגס, זוכי פרס וולף בפיזיקה בשנת 2004 ופרס ה־EPS בשנת 1997, שהוענקו שניהם בירושלים). הם גם מחפשים חלקיקים חדשים, שאינם במודל הסטנדרטי. ככל

בוצעו בניסיונות משותפים ביפן וב-CERN במשך חמש שנים, בשיתוף סטודנטים יפנים רבים, שהשלימו חלק גדול מהבדיקות הדרושות לאישור המיזם. ואולם, הנוכחות הישראלית בכל שלב ושלב היא שאפשרה לגלות את הבעיות הקטנות ולפתרן באב-טיפוס הבא, שאפשר את קבלת המיזם ב-1998.

3,000 גלאי קרינה מסוג TGC נבנו בארץ. בנייתם דרשה תשתית מתאימה, שהתאפשרה עם הקמת בניין מקסיקו במכון ויצמן, ותשתית זו משמשת כיום דוגמה לכמה מעבדות בעולם. בניית אלפי גלאי קרינה שיפעלו בתנאי קרינה קשים במשך יותר מ-25 שנה, כמעט בלי אפשרות לתחזקם, מצריכה מערכת בדיקות קפדנית מאוד. מערכת הבדיקה הראשונה שהשתמשה בקרינה קוסמית למיפוי הגלאים פותחה בארץ. בד בבד פותחה בישראל גם מערכת לגילוי מיאונים (חלקיקים דומים לאלקטרונים, אך כבדים מהם בערך פי 200) – Muon Endcap Trigger – הנחשבת לאחת המערכות המוצלחות במיזם אטלס. בשנים 2005–2008 התבטאה הפעילות הישראלית בבניית הניסוי במעבדת CERN. תחילה היה צורך לבדוק את הגלאים לפני הרכבתם במבני תמיכה שהורכבו בניסוי. נבנתה מערכת רישום מאוחדת למעקב אחרי כל גלאי, והיא בשימוש עד היום. מבני התמיכה, שהוכנו בתעשייה הישראלית, היו מדויקים מאוד, והם הורכבו על שבלונות שנבנו בידי צוות ישראלי-פקיסטני במשך שלוש שנים.

ארבע שנים עברו מאז הפעם הראשונה שהאלומות עברו במאיץ, ולמערכת Muon Endcap Trigger תפקיד מרכזי באנליזה הפיזיקלית של הניסוי ובתגליות שהתגלו בו. פעולתה בלי דופי של המערכת ב-98.5% היא תעודת כבוד למדע הישראלי. להצלחה המשותפת של עבודת קבוצות ישראליות ויפניות היה תפקיד חשוב בהחלטת CERN לאחורונה – לקבל את ההצעה הישראלית לשרוג העתידי של הגלאי אטלס.

מערכת ה-Muon Endcap Trigger, המבוססת על גלאי TGC, וסדרה של פיתוחים ובדיקות ב-CERN ובנחל שורק הוכיחו שלגלאים דיוק רב במדידת

◀ כלומר להניב את החלקיק שמחפשים אחריו. פיתוח זה, שתחילתו ב-1994, הצליח הודות לשיתוף הפעולה בין הטכניון, אוניברסיטת תל-אביב ומכון ויצמן למדע, שעבדו בקבוצה אחת ושילבו יחדיו את הידע והתשתית הטכנולוגית של שלושת המוסדות. ישראל הייתה בסיס טכנולוגי ואנושי משלים לחמש קבוצות יפניות, והתשתית הישראלית אפשרה לבחון רעיונות רבים של החוקרים מיפן. בדיקת הרעיונות והפיתוחים



בחינת גלאים במתקן סריקת הקרינה הקוסמי.



הרכבת גלאי TGC במסגרות מכניות ב-CERN.



גישה נוחה לתיקון מהיר של ה-TGC על ידי חבר בצוות הישראלי.

עבודת החישוב שב"בקשה" בין מאות חוות מחשבים ברחבי העולם. לדוגמה, אפשר שעבודתו של מדען ישראלי תיעשה מקצתה בסיאול (קוריאה), מקצתה בוונקובר (קנדה), ומקצתה בהלסינקי (פינלנד). עם סיום החישובים אוספת התוכנה את כל חלקי החישוב, מחברת אותם ושולחת את התוצאה הסופית למדען שביקש אותה. באופן זה מדען המשתתף בניתוח נתוני הניסוי מפעיל אלפי מחשבים במקומות שונים בעולם, בלי שיהיה טרוד בניהול מבצע מורכב שכזה. המערכת הזו היא שאפשרה לנתח את נתוני הניסוי ולבשר על גילוי ה"היגס" תוך שימוש בנתונים שנאספו ימים ספורים בלבד לפני ההודעה על הגילוי.

ישראל, שחלקה הוא מעט יותר מאחוז אחד במיזם אטלס, התבקשה לתרום גם בתחום החישובי. הקמת חוות מחשבים שכזו דורשת השקעת כסף רב וכוח אדם, אך בה בעת מזמנת טכנולוגיה חדשה זו למדענים מתחומים אחרים. לפיכך הוחלט לבזר את החווה הישראלית ולהציבה בחלקים במוסדות אקדמיים שונים: בטכניון, במכון ויצמן למדע ובאוניברסיטת תל-אביב. הוקמו צוותים לניהול המערכת ולתפעולה, והוקמה קבוצת משתמשים המונה כ-50 מדענים וסטודנטים. המערכת הישראלית פועלת היטב, וביצועיה גבוהים בכ-50% מהצפוי, אף שתקשורת המחשבים מישראל לאירופה אטית בהרבה מהמקובל כעת בעולם. הידע והמיומנות שנצברו זמינותם של משאבים אפשרו כאמור למדענים ישראליים נוספים – פיזיקאים, ביולוגים ואחרים – להצטרף לחוות המקומיות ולסיפור ההצלחה של הרשת. מערכת זו, שהיא המחשב הגדול והחזק ביותר שנבנה אי פעם, תאפשר, אנו מקווים, גילויים נוספים באטלס.

## לראות את ההתפרקות

חיפוש אחר חלקיקים חדשים, ככל שנערמו ומוינו הנתונים, התברר שכדי לגלות אם נוצרו חלקיקים שאינם מוכרים תידרש עבודה רבה מאוד. מוקד המאמץ הוסט לגילוי החלקיק סקלר BEH. זיהוי

מיקום, גם בתנאים שישררו בעתיד במאיץ LHC. הצלחה זו הביאה לידי שיתוף פעולה עם קבוצות מקנדה, ארצות הברית, סין, איטליה, רוסיה וצ'ילה, שיעבדו יחד במיזם השדרוג העתידי של אטלס, שיתקיים בניהול ישראלי.

## נתונים חובקי עולם

אחר שהגלאי מבצע את עבודתו הניסיונאים עומדים נבוכים. עליהם להתמודד עם נתונים רבים מאוד. להמחשת מבוכתם הנה שאלה: מה הייתם עושים לו הייתה שיירה ארוכה של משאיות פורקת לפני דלתכם אלפי ארגזים ובתוכם כעשרה מיליון תקליטורי מידע שעליהם הכיתוב: "מצורפות תוצאות של כמה מיליארדי התנגשויות ב-LHC. ייתכן שבכמה מהמאורעות נוצרו חלקיקים חדשים. אנא עברו על הנתונים ומצאו מאורעות אלו?" האתגר הזה, שניצב לפני פיזיקאי החלקיקים במיזם אטלס – לאחסן כמות אדירה כזאת של נתונים ולנתחם מתמטית – הרתיע אפילו את מדעני המחשבים.

במקום לרכוש מחשבי-על לניתוח הנתונים, הפתרון שאומץ היה איגום מחשבים רגילים וחלוקת המטלה ביניהם. אולם לעיבוד כמות כזו של מידע דרושים כמיליון מחשבי PC. מימון והתקנה של מערך כזה, כולל הספקת חשמל, קירור ותחזוקה, הם משימה שהיא מעבר ליכולתו של מוסד המחקר הגדול בעולם. לפיכך הוחלט לפזר את המחשבים בכ-200 מוסדות המשתתפים בניסוי. במרכז המערכת ב-CERN עוברים הנתונים עיבוד ראשוני, ומשם נשלחים לכעשרה מוסדות גדולים, המאחסנים את הנתונים ומרכזים את עבודתן של כ-200 חוות מחשבים המוצבות במוסדות השונים ברחבי העולם ומספקות את עיקר כוח החישוב. כל מוסד מספק חווה ובה כמה אלפי מחשבים ומערכת מקומית לאחסון נתונים, והמערכת כולה מכונה "גריד" – רשת.

מדען הרוצה לעבד נתונים שולח "בקשה". תכנה מיוחדת ומורכבת המפעילה את הרשת הענקית מחלקת את

ברור. תוצרים של שתי ההתפרקות זוהו במאיץ במובהקות סטטיסטית גבוהה, וב-4 ביולי 2012 הכריזו שתי קבוצות הניסוי ב-CERN, ניסוי אטלס וניסוי CMS (כל אחת בנפרד), כי ראו חלקיק חדש במסה של בערך 126 ג'יגה אלקטרון-וולט (GeV) וברמת חריגה סטטיסטית של חמש סטיות תקן מהמוצע. כעת מתמקדים החוקרים במאיץ בשתי חזיתות: האחת אשרור של הגילוי, בין השאר באמצעות זיהוי התפרקות שטרם נצפו. אחת מהן חשובה במיוחד לאשרור הגילוי – ההתפרקות הצפויה של בוזון היגס לקוורק b ולחלקיק טאו. בחזית האחרת מנסים החוקרים לקבוע ברמת דיוק גבוהה את המסה של החלקיק ולעמוד על עוד תכונות קוונטיות שלו, כמו הספין (מעין סיבוב סביב עצמו) ואולי גם הזוגיות שלו.

## הפלזמה של ראשית היקום

וסף על התכנית הנרחבת בתחום האנרגיות הגבוהות פועל מאיץ LHC במשך כחודש בשנה באופן אחר ויוצר התנגשות גרעינים של יסודות כבדים, כמו עופרת, כדי להבין את מאפייניה של פלזמת קוורק-גלואון (QGP), הנוצרת בהתנגשויות כאלה. לפלזמה הזו כמה תכונות ייחודיות – היא אינה נשלטת בידי כוחות אלקטרומגנטיים, ובמצב הזה הקוורקים אינם נקשרים בשלוש ליצירת החלקיקים הכבדים המוכרים לנו (פרוטונים, נטרונים ובריונים אחרים) אלא נשארים כקוורקים וגלואונים חופשיים למדי. הטמפרטורה של פלזמה כזו גבוהה פי מיליון מהטמפרטורה שבליבת השמש, והתגלה שהיא מתנהגת כמו "נוזל-על" בעל צמיגות השואפת לאפס. חוקרים מעריכים כי היקום כולו היה במצב של QGP בחלקיקי השנייה הראשונים לאחר המפץ הגדול, ואפשר כי המצב הזה עדיין מתקיים בתוך כוכבי נטרונים. בהתנגשויות של גרעיני עופרת ב-LHC נוצרות טיפות זעירות של המרק הקדמוני והן נחקרות במסגרת מיזם אטלס. יתרונו של מנגנון אטלס הוא ביכולתו למדוד סילונים, אשכולות של חלקיקים שנגעים יחד

◀ חלקיק כזה מאשש את הדרך שגילו בראוט, אנגלרט והיגס, המאפשרת לנשאי כוח, הנקראים חלקיקי כיול, לקבל מסה. הכוח החלש, האחראי בין היתר לדעיכות רדיואקטיביות, הוא קצר טווח, ונשאיו בעלי המסה נקראים W ו-Z. הכוח האלקטרומגנטי הוא ארוך טווח ונישא על ידי פוטונים, שככל הידוע הם בעלי מסה אפס. בדיעבד התברר שאותו חלקיק יכול בתנאים מסוימים להעניק מסה גם לחלקיקים אחרים, פרמיונים, הכוללים בין היתר גם את האלקטרון. קיימים עוד מנגנונים שיכלו להעניק מסה לפרמיונים, אולם זהו המנגון הפשוט ביותר. למסה של החלקיקים האלמנטריים תפקיד מכריע בקיומנו. מסת האלקטרון קובעת את גודל אטום המימן, ולו היה גודלו שונה, לא הייתה הכימיה מאפשרת חיים כפי שהן מוכרים לנו. המסה של הקוורקים משפיעה על מבנה האטומים בהפכה את הפרוטון לקל מהניטרון (בהבדל מזערי). לכן לשדה היגס, המעניק את המסה לחלקיקים, תפקיד מכריע בקיומו של היקום כולו. מכאן גם חשיבותו של גילוי החלקיק, הפיסה האחרונה החסרה בתצפץ (פאזל) של המודל הסטנדרטי.

בכל התנגשות במאיץ נוצרים חלקיקים רבים מאוד. חישוב מראה שהסיכוי לקבל בהתנגשות את החלקיק האמור הוא כה קטן, שבמשך שנה תמימה לא נוכל לראות אלא כמה מאות אירועים כאלה. בנוסף, קשה מאוד לזהותו בוודאות מבין חלקיקים רבים הדומים לו מאוד. אנו יכולים להכריז על גילוי החלקיק בזכות היכרותנו עם החלקיקים האחרים, הדומים לו, ויודעים כמה מהם אנו מצפים לראות בהתנגשויות. אם מספר החלקיקים בהתנגשות גבוה בהרבה מהצפוי (יותר מחמש סטיות תקן), מקובל להכריז על גילוי. גם כשהחלקיק נוצר בהתנגשות במאיץ, הוא מתפרק מיד, ומה שהניסיונאים מצליחים "לראות" הם תוצרי ההתפרקות, וזה יכול לקרות בכמה דרכים: אחת היא התפרקות לא ישירה לשני פוטונים, וההיגס נצמד אליהם בצמוד חלש; דרך אחרת היא פירוק של היגס לשני בוזוני Z, ואלה מתפרקים בתורם לצמדים של אלקטרונים ומיאונים. להתפרקות הזו חותם ניסיוני





השלמת הרכבת הגלגלים הגדולים במיזם אטלס. הגלגלים בנויים מאלפי גלאים שהם פרי תכנון ובנייה ישראליים ברובם.

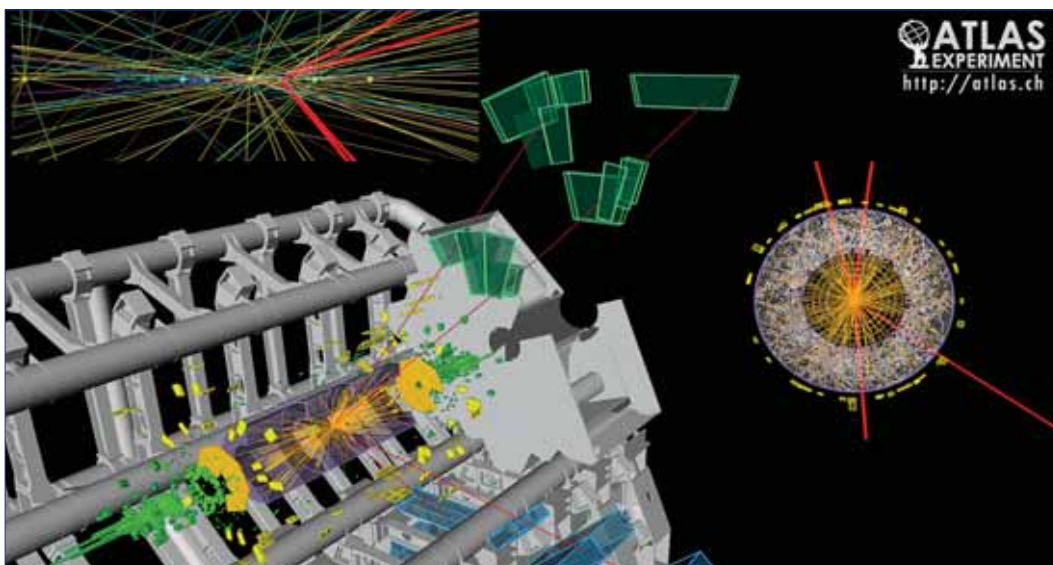
הנראה עוד הצלחה מרשימה של מודל זה. למרות זאת קיימות סיבות לחשוד שהמודל הסטנדרטי הוא קירוב בלבד, ומאחוריו ניצב מודל רחב ועמוק יותר, המתאר תיאור מלא יותר את מבנה החומר. בשנים האחרונות הועלו הצעות רבות ל"הרחבה" של המודל הסטנדרטי. השם הכולל להצעות אלו הוא "פיזיקה שמעבר למודל הסטנדרטי" או "פיזיקה אקזוטית". יש המציעים קיומם של ממדים נוספים שלא נחשפו עד כה בשל גודלם הקטן. אחרים מוסיפים אינטראקציות חדשות בין החלקיקים, וקיימות גרסאות של המודל הסטנדרטי המכלילות את הכוח החשמלי, את הכוח החלש והכוח החזק. בעיית ההבדלים העצומים בין חוזקם של הכוחות

באותו כיוון ומקורם בחלקיקים כמו קוורק או גלואון הטעונים באנרגייה רבה. סילונים כאלה יכולים לשמש כלי מחקר של QGP, והבנת האופן שבו הם משחררים אנרגייה מאפשרת ללמוד על תכונות החומר עצמו. המחקר המרתק בכיוון הזה רק החל, וגם כאן מקווים החוקרים לגלות חלקיקים מטיפוס חדש.

### עולם חדש ממתין לגילוי

ב עשרות השנים האחרונות נמצאה התאמה מדהימה בין תחזיות המודל הסטנדרטי לבין עשרות, ואולי מאות, מדידות ניסיוניות. גילוי החלקיק החדש, שדבר קיומו נחזה לפני כ-40 שנה, מסמל כפי





איור של מועמדי התנגשויות שייצרו את חלקיק ה"היגס" שנקלטו על ידי הגלאים שפותחו ונבנו על ידי הצוותים הישראליים.

מהמודל הסטנדרטי. גילוי סימנים כאלה יפתח דף חדש במחקר של פיזיקת החלקיקים. עד כה עובד כל המידע שנאסף על ידי גלאי אטלס בשנים 2010–2011, השנתיים הראשונות להפעלת מאיץ ה-LHC. המידע נמצא מתאים להפליא לניבוי המודל הסטנדרטי. לכן תורגם לחסמים השוללים קיומה של פיזיקה חדשה שבה יש חלקיקים שמסתם של נמוכה מכטרה אלקטרון-וולט – דהיינו ממסתם של כ-1,000 פרוטונים או של כ-4 אטומי אורניום. בעת הזאת מנותחים הנתונים שנאספו ב-2012. עקב הפעולה המרשימה של המאיץ והגלאי יאפשרו נתונים אלו לחדור עמוק יותר אל נבכי החומר: הטבע עשוי להפתיע, ולכן המתח רב והציפיות גבוהות. גם אם הנתונים הללו יאכזבו המאמץ יימשך. ב-2013 ייסגר המאיץ לכ-20 חודש לשם שיפוץ ושדרוג. כשתחודש פעילותו בשלהי 2014, תהיה עצמתו כמעט כפולה מהנוכחית, והוא יישא אותנו שוב אל ארץ לא נודעת. זמן סגירתו של המאיץ ינוצל גם לתחזוקת הגלאי הנוכחי ולשדרוגו. בעקבות ההצלחה הישראלית בבניית מערכת ה-TGC ובתפעולה נבחרה טכנולוגיה זו כאמצעי עיקרי בבנייה מחדש של חלק חשוב מהגלאי הקרוי Small

◀ השונים אפשר שתפתר בעזרת תורה המכונה "סופר-סימטרייה" (SUSY) הצופה קיומם של חלקיקים נוספים, אך למרות יופייה המתמטי עדיין לא נחשף כל אישוש ניסיוני לקיומה. מאיץ ה-LHC חזק דיו כדי לייצר חלקיקים סופר-סימטריים וכדי לכסות את רוב התחום שבו הם אמורים להיות, ולכן יש בו כדי לאשש את המודל או לחלופין כמעט להפריך אותו. בעשור האחרון הוכיחו חברינו האסטרופיזיקאים שהחומר שאנו מכירים שיעורו כ-4% בלבד ממסתו של היקום. כרבע ממסת היקום עשוי מסוג חדש ובלתי מוכר של חומר הקרוי "חומר אפל", והיתרה ממהות מסתורית עוד יותר, הידועה בשם "אנרגייה אפלה". כדי להסביר מהויות חדשות אלו יש להרחיב את המודל הסטנדרטי ולכלול בו רכיבים נוספים. המודל הסטנדרטי אינו מרמז על קיומו של חומר אפל. לפיכך עדיין אין לנו כל רמז לאופייה ולעקרונותיה של הפיזיקה החדשה המצפה לגילוי מעבר לפינה. אחת הסיבות העיקריות לבניית מאיץ חדש היא המירוץ אחר הפיזיקה החדשה. קבוצת המחקר של הפיזיקה האקזוטית, שישראל תופסת בה מקום נכבד ביותר, עוסקת בחיזוי ובמרדף אחר סימנים לסטיות

## שלמי תודה

משך השנים תרמו מדענים וסטודנטים רבים לפעילות הישראלית ב-CERN, אולם אי אפשר היה לממש דבר בלא תמיכתה הרבה הראויה לכל שבח של המערכת הטכנית. אנחנו אסירי תודה לבנימין פסמנטירר, נחמן לופו, יורם גרניצקי, מני בן משה, בוריס ינקובקי, ד"ר עמית קליר, דרור ברזילי, חנה גולשטיין, ענת שייבין ואלכס דוין.

אנו מודים לכל הגופים שתמכו בנו (חלקם מנינו בכתבה זו) ובהם הקרן הלאומית למדע בראשותם של פרופ' פאול זינגר ז"ל, פרופ' יוסף קלפטר ופרופ' בינימין גיגר; ובמיוחד לארבעת נשיאי האקדמיה פרופ' יעקב זיו, פרופ' יהושע יורנטר, פרופ' מנחם יערי ופרופ' רות ארנון, ולצוות – המנכ"ל מאיר צדוק, ד"ר יוסי סגל, הסמנכ"ל יוסי לנץ ורבקה גבריאלי, שנתנו לנו אכסניה חמה ותומכת.

Wheel. הניסיונאים הישראליים מבקשים להמשיך ולהוביל את השדרוג, דבר הכרוך בהוצאה ניכרת, ומערכת התקצוב הישראלית נדרשת שוב להתמודד עם השאלה כיצד לתקצב מדע גדול ולאפשר לניסיונאים לנצל את הצלחתם ולשמר את החותם שהטביעו על הניסוי. בימים אלו מתגבש מודל התקצוב. אנו מקווים שבאחת מהאיגרות הבאות נוכל לתאר את בניית הגלאי החדש.

במאמר הזה הצגנו את קצה הקרחון של המאמצים השיטתיים הרבים שנעשו במשך יותר מעשור שנים רק כדי להתחיל ולקבל את התוצאות המדעיות וללמוד דברים חדשים על היקום. היו אלה שנים רבות של עבודה מאומצת ומסורה של מדענים רבים, חלקה הגדול במעמקי האדמה, הרחק הרחק מאור הזרקורים של ועדות אוניברסיטאיות ומעיניהם של כלי התקשורת. אנחנו אסירי תודה על שהתאפשר לנו כמדענים ישראליים לתרום תרומה חשובה למדי למאמץ כלל-עולמי להרחבת ההבנה את מבנה היקום.



צילום קבוצתי של הצוותים מרחבי העולם, ובהם הצוות הישראלי, עם סיום שלב הבנייה.