

ד"ר חזי יצחק  
בי"ס תיכון לחינוך סביבתי, מדרשת שדה בוקר  
המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון

"Our goal, with the help of teachers, is to bring a little of the magic of CERN into the classroom"

כאשר הגעתי לשער הקריה המדעית של צרן CERN, שהוא האיגוד האירופי למחקר גרעיני, דמיינתי לעצמי מתקן שמור ומסווג שהכניסה אליו מחייבת בדיקה ביטחונית קפדנית, משהו בסגנון קמ"ג בדימונה, אבל להפתעתי הרבה השומר בשער לא התעניין בי בכלל ונכנסתי בלי בעיה לתוך מבוך המבנים. שמות הרחובות, שכולם היו של פיזיקאים מפורסמים, כמו איינשטיין, פאולי ושרדינגר, העידו שנותנים כאן כבוד לפיזיקאים. הגענו לכאן 49 מורים לפיזיקה מ-27 מדינות (ביניהם שני מורים ממרוקו) לסדנה של שלושה שבועות בנושא של פיזיקת החלקיקים, אבל מהר למדנו שהמטרה העיקרית היא ליצור קשרים בין המורים, אבל על כך ארחיב בהמשך. התוכנית נקראת HST2011 כאשר HST הם ראשי תיבות של High School Teachers. זוהי אחת ממגוון של תוכניות למורים וייחודה שהיא תוכנית בינלאומית שמתקיימת החל מ-1998. האיש שעומד מאחורי ההפקה הזו הוא ד"ר מיק סטור, פיזיקאי בריטי שעבר לעבוד במשרה מלאה בניהול כל תוכניות המבקרים בצרן (ויש 80,000 מבקרים כאלו בשנה). המשימה הראשונה הייתה להגיע למפגש הפתיחה ע"פ מפת המבנים של צרן. והתברר שזו אכן משימה לא פשוטה להבין את המפה הזו ובייחוד את שיטת מספור המבנים בצרן שבמבט ראשון (וגם במבט שני) נראה לגמרי אקראי. קשה להבין איך פיזיקאים שאמורים להיות אמונים על ההיגיון יצרו כאוס כזה במספרי המבנים.

לאחר היכרות ראשונית יצאנו לסיור בתוך המבנים והיכרות עם חדרי ההרצאות שבהן נבלה במשך שלושת השבועות הבאים. מבוך של מסדרונות ארוכים והרבה פוסטרים של כינוסים מדעיים במקומות אקזוטיים ברחבי העולם. בדרך עברנו ליד החדר שבו הומצאה רשת האינטרנט, וזוהי אחת הגאוות הגדולות כאן. המדיניות הרשמית היא שאין כאן מה להסתיר ומותר לצלם בכל מקום, הם אפילו מעודדים זאת - המטרה היא כמובן לשפר את התדמית של צרן בעיני הציבור וזה נושא חשוב מאוד באג'נדה שלהם. הרי צריך להצדיק את התקציב הענקי המושקע כאן במחקר יסודי במדע ולא בפתרון הבעיות הבסיסיות של היקום.

צרן הוקמה ב-1954 ומאז הלכה והתפתחה והמטרה הייתה ליצור מעין תשובה אירופית להגמוניה האמריקאית במדע. כיום עם תקציב של מיליארד פרנקים שווייצריים (כ-4 מיליארד שקלים), 2300 אנשי סגל, קבועים, שמתוכם רק 70 פיזיקאים תיאורטיים והשאר פיזיקאים ניסיוניים, מהנדסי חומרים, אלקטרוניקה, מחשבים ואנשי מקצוע אחרים שמנהלים את הקומפלקס המורכב הזה שיש לו שלוש מטרות מוצהרות: חדשנות מדעית וטכנולוגית, אימון דור העתיד של המדענים והמהנדסים וחינוך. כן, הם לא מתביישים לחרות על דגלם את המילה חינוך וזה מאוד מצא חן בעיניי. המורים ובעיקר מורי מדעים ופיזיקה מקבלים כאן חשיבות גדולה משום שהם מעין "מכפיל כוח", כל מורה פוגש במשך חייו מאות תלמידים, ומורה שהקסם של צרן דבק בו, יעביר את זה הלאה, ומי יודע, בעתיד תלמידים אלו ישתלבו בעבודה בצרן ואולי אחד מהם יהיה חתן פרס נובל בפיזיקה. פרס נובל הוא מטרה לגיטימית כאן בצרן ולא שוכחים בכל הרצאה לציין אילו מדענים שעבדו כאן זכו בפרס נובל בפיזיקה. המטרות המדעיות המוצהרות, כפי ששמענו אותן מפי המנהל הכללי של צרן רולף הויר (Rolf Heuer), הן אלה:

1. למצוא את המקור למסה (אותו חלקיק היגס המפורסם)
2. למצוא את המקור לשבירת הסימטריה של הכוח האלקטרו-חלש
3. לחקור את הסימטריה היסודית בין חומר לכוחות
4. תעלומת האנטי חומר (מדוע אין ביקום אנטי חומר?)
5. איחוד בין תורת הקוונטים לתורת היחסות הכללית (משאת נפשו של איינשטיין שלא צלחה)
6. מספר הממדים של מרחב זמן (קשור לתורת המיתרים)
7. מהו חומר אפל?
8. מהי אנרגיה אפלה? (התעלומה הגדולה ביותר בפיזיקה שגורמת להאצת התפשטות היקום)

אבל יש מטרה נוספת והיא לא פחות חשובה – לחבר בין אנשים ממדינות ותרבויות שונות כאשר השפה המשותפת היא המדע. צרן היא מעין מגדל בבל מודרני, עובדים ומבקרים כאן אנשים מכל העולם וכולם חיים כאן בשלום ובהרמוניה. מגדל בבל עצום שראשו בשמים ורגליו בתוך נבכי החומר הקטנים. בצרן מנסים לסייע בקידום המדע במדינות מתפתחות ובעיקר באפריקה. בקבוצה שלנו היו שלושה מורים מרואנדה, שניים מגאנה, שניים ממרוקו, אחד מקמרון ואחד מקניה. לשם השוואה: מורה לפיזיקה ברואנדה מרוויח 200 דולר לחודש, והתשתית המדעית במדינות אלו דלה מאוד. בשיחת הסיכום של הסדנה התקיים דיון בשאלה כיצד ניתן לסייע למדינות אלו לקדם את החינוך המדעי, וכמו הפערים החברתיים בארץ, נראה שגם הפערים בין מדינות אפריקה לשאר העולם רק הולכים וגדלים עם הזמן. האג'נדה הגלובלית הזו של צרן היא חלק מהניסיונות שלהם להצדיק את קיומם ואת המשאבים האדירים שמושקעים בבניית המאיצים והגלאים. כאשר מנסים להסביר לאדם ממוצע מה בדיוק חוקרים במאיץ החלקיקים, הוא בדרך כלל יטען שיש לאנושות בעיות הרבה יותר חשובות לפתור, כמו רעב ומחלות. אנשי צרן מדגישים את ההיבטים היישומיים של המחקר התיאורטי, כמו שימוש בפרוטונים לטיפול בסרטן, בעולם יש 17000 מאיצי חלקיקים בשירות הרפואה. כמו כן הטכנולוגיה שפותחה בגלאים מיושמת במכשירי אבחון רפואיים. וכמובן הפיתוח של טכנולוגיית המידע וה-Grid שהיא מערכת המחשבים האדירה שמנתחת את הנתונים המועברים מהגלאים.

### אז מה למדנו?

השבועיים הראשונים של התוכנית הוקדשו להרצאות של פיזיקאים בנושא של פיזיקת החלקיקים, הרצאות על הגלאים, על הטכנולוגיה של המאיץ והרצאות בקוסמולוגיה. מה שהרשים אותי מאוד הוא הגאווה של המרצים בעבודתם. המהנדס הראשי של גלאי ה-CMS (אחד הגלאים החשובים במאיץ ההדרונים הגדול) לא חדל להתפעל מהדיוק המדהים שבו הגלאי הורכב והורד למנהרה בעומק של 100 מטר. לכולם הייתה מעין גאווה יחידה שהם נמצאים במקום החשוב ביותר בעולם. הדבר השני שהפליא אותי הוא הקשר בין עולם החלקיקים האלמנטריים לבין הקוסמולוגיה, המדע שעוסק בחקר היקום כולו. כיצד הקטן והזעיר ביותר נקשר לגדול ביותר ביקום? כדי להבין את היווצרות היקום וגם את מצבו הנוכחי חייבים להבין את מבנה החומר עד לרמת הקווארקים. האנרגיות הגדולות שבהן מאיצים את הפרוטונים (בקירוב 3.5 TeV) מדמות את האנרגיות של היקום מיד לאחר המפץ הגדול. אבל השיא היה הביקורים בגלאים. מתחת לשדות חיטה וחמניות על רקע הרי היורא נמצאת המנהרה הראשית של ה-LHC שאורכה 27 ק"מ. כדי לרדת לגלאי ה-CMS יש לרדת במעלית לעומק של 100 מטר ולעבור סדרה של שערים אלקטרוניים חכמים שהכניסה אליהם היא כמו בסרטי מדע בדיוני. בתוך אולם גדול ניצב לו הגלאי שיחד עם הגלאי אטלס הם שני הגלאים העיקריים במאיץ ההדרונים. הגלאי שאורכו כ-25 מטר וגובהו כ-15 מטר נבנה במשך כ-7 שנים. הגלאי אמור לקלוט את האינפורמציה מההתנגשות של שתי אלומות הפרוטונים שנעות במאיץ. בכל אלומה יש  $10^{11}$  פרוטונים שממוקדים לעובי של שיערה. התנגשות מתרחשת כל 25 ns וכל שנייה מתרחשות כ- מיליארד אינטראקציות בין הפרוטונים. כל אלומת פרוטונים נעה במאיץ כ-10 שעות שבמהלך היא מבצעת 400 מיליון הקפות במאיץ. כמות המידע היא אדירה והיא מועברת למחשבים שמסננים רק את ההתנגשויות שקיים סיכוי שהן מכילות מידע מעניין. זהו אתגר עצום לטפל ולאחסן את כל המידע הזה שאחר עובר ניתוח מדוקדק יותר כדי למצוא את חלקיק ההיגס או חלקיקים חדשים אחרים. ביקרנו גם בגלאי ה-LHCb שמיועד לחקור קווארקים מסוג b. הגלאי הישן היה פתוח ואפשר להתרשם מסבך בלתי ייאמן של כבלים וחוטי חשמל שבן תמותה לא מסוגל לתפוס. רק המחשבה שמישהו עמל וחיבר את כל החוטים הללו וחזר ובדק שכל אחד אכן מחובר למקומו - מעוררת הערצה. ביקרנו גם בסופר מגנטים הבנויים מסופר מוליכים ומקוררים ע"י הליום נוזלי ( $-271.3^{\circ}\text{C}$ ). 1232 מגנטי דיפול כאלו בונים את הטבעת בה נעות אלומות האלקטרונים. עוצמת הזרם שיוצרת את המגנטים היא 12,500 אמפר! תפקיד המגנטים הללו הוא לגרום לפרוטונים לנוע במעגל לפי כלל יד ימין (חוק פיזיקלי שכל תלמיד תיכון לומד במסגרת לימודי פיזיקה בהיקף של 5 יח"ל). בכלל, זו הייתה הבדיחה האהובה על המרצים שלנו, שהם אף לא זוכרים את כלל יד ימין וכדי לגלות לאיזה כיוון יפעל הכוח של השדה המגנטי על החלקיק הטוען הם מביאים מורה לפיזיקה שיראה להם כיצד להשתמש בכלל יד ימין... מלבד מגנטי הדיפול, ממוקמים לאורך הטבעת של המאיץ קוואדרו-

מגנטים שתפקידם למקד את אלומת האלקטרונים. צריך להבין ששתי אלומות הפרוטונים נעות בשני צינורות נפרדים ובכיוונים מנוגדים ורק באזור הגלאים הן נפגשות, זה קורה בארבעה מקומות לאורך המנהרה הראשית. בתוך הצינורות הללו שורר ואקום טוב יותר מזה שעל הירח. את המגנטים מקררים במשך חודשים בטרם מורידים אותם למנהרת המאיץ. צריך להבין שצדן כוללת מספר מאיצי חלקיקים שמחברים ביניהם והם מהווים תחנות ביניים להאצת אלומת הפרוטונים (ראה טבלה 1). אלומת הפרוטונים עוברת ממאיץ אחד לשני וצוברת אנרגיה גדולה יותר. בשל היותם מטענים חשמליים שנעים בתאוצה הם פולטים אנרגיה ע"י קרינה שנקראת קרינת סינכטרון ולכן יש להשקיע כל הזמן אנרגיה כדי לשמור על מהירות הפרוטונים. המאיצים בשרשרת נבנו במשך השנים שבהן טכנולוגיית בניית המאיצים התפתחה. השרשרת מתחילה מבקבוק מימן קטן (שנראה כמו מטף כיבוי). אטומי המימן עוברים יוניזציה שמותירה רק את הפרוטונים שנכנסים למאיץ קווי שמתחיל את תהליך ההאצה באמצעות שדות חשמליים. הפרוטונים יוצאים מהמאיץ הקווי במהירות של 94,200 ק"מ לשנייה!

מאיץ	מהירות (%) ממהירות האור	אנרגיה קינטית של הפרוטון
Linac 2	31.4	50 MeV
PS Booster	91.6	1.4 GeV
PS	99.93	25 GeV
SPS	99.9998	450 GeV
LHC	99.9999991	7 TeV

כל תהליך ההאצה מבוקר מחדר בקרה אחד ששולט על כל המאיצים ומאויש ללא הפסקה. אלומת הפרוטונים הללו מסתחררות במאיץ וכדי להגדיל את ההסתברות להתנגשות הן מרוכזות לצרורות שכל צרור מכיל  $10^{11}$  פרוטונים וקוטרם 16 מקרון והפרש הזמנים בין צרור אחד למשנהו הוא 25 ננו שניות. כל אלומה מכילה 2808 צרורות כך שבכל שנייה יש עד ל-600 מיליון התנגשויות. ככל שמספר ההתנגשויות לשנייה הוא גדול יותר, כך עולה ההסתברות לגלות חלקיקים ותהליכים חדשים ובייחוד עולה הסיכוי לגלות את חלקיק ההיגס ששמו מוזכר בהערצה בצרן. אלומת פרוטונים היא בעלת אורך חיים של 10 שעות שבמהלכן הפרוטון מבצע 11245 הקפות של המאיץ כל שנייה (בתור תרגיל ניתן לחשב את המרחק הכולל שהוא עובר במהלך ההקפות במאיץ).

### לא על הפיזיקה לבדו יחיה האדם

במהלך הסדנה נוצר הווי קבוצתי וקשרים חברתיים בין המורים ומקום המפגש הפופולרי הוא המסעדה המרכזית, שם ממשיכים לשבת ולשתות בירה (הרבה בירה) עד השעות המאוחרות. בבקרים ההרצאות היו מתחילות בדרך כלל ב-9 והדיוק השוויצרי חייב אותנו להגיע לפני הזמן - חידוש מרענן בשבילי. הקשרים החברתיים הנרקמים בין המורים במהלך שלושת השבועות הם הגאווה של המארגנים וזו אחת מהמטרות המוצהרות של תוכנית HST. קשרים אלו נמשכים גם לאחר סיום הסדנה. אני לדוגמה התחברתי למורה לפיזיקה מאסטוניה שהוא רץ מרתונים ובאחד מסופי השבוע נסענו יחד להשתתף במרתון הרים באלפים בצרפת שכלל 32 ק"מ ריצה בשבילים הרריים לגובה של 3000 מטר. לאורך כל זמן הריצה שנמשכה 6 שעות ירד גשם שוטף שגרם לנו להירטב מכף רגל ועד ראש. השיא של הפעילויות החברתיות הוא בערב הבינלאומי, שבו כל אחד מהמשתתפים היה צריך להכין משהו שמייצג את מדינתו, וזה כלל מאכלים לאומיים, שירים וריקודים. אז למדנו לרקוד ריקוד פורטוגזי וריקוד שוויצרי והמורה הטורקי מאיסטנבול הגיע בתלבושת לאומית מושלמת. היה מעניין להיווכח, שעל אף ההבדלים הגדולים בין המדינות, למורי הפיזיקה יש בעיות משותפות שמעסיקות אותם, אותם לבטים על תוכניות הלימודים וציוד, כיצד להעביר שיעורי פיזיקה מעניינים יותר כדי למשוך עוד תלמידים. וכמובן התלבטנו כיצד לשלב תכנים שלמדנו על פיזיקת החלקיקים במסגרת לימודי הפיזיקה בתיכון ולשם כך הוקדש השבוע האחרון של הסדנה שבו עבדנו בקבוצות על פיתוח נושאים שונים להוראה בכיתה. במהלך העבודה נעזרנו בספרייה המצוינת שבצדן שפתוחה 24 שעות ביממה ואפשרה לנו לשאול ספרים ללא שום בעיות. דרך אגב, שמת' לב שהאורות בחלק מהחדרים בבניינים אינם כבים במשך הלילה, וגם בסופי שבוע -

המחויבות לעבודה בצרן היא גבוהה מאוד וחלק מהעובדים נשאר לעבוד גם בשעות הקטנות של הלילה. לעובדים יש גאוות יחידה גדולה שמבוססת על השותפות לחקר הסודות הגדולים של היקום. חשוב לציין שעלות ההשתתפות בסדנה היא 2500 פרנקים שווייצריים שהם כ- 10,000 ₪ (שכוללת את מחיר הטיסה, שהייה במלון וכלכלה). רוב המורים זכו למימון ממקורות שונים, אך היו מורים שכיסו את העלות מכיסם הפרטי, וכמובן, ההרשמה פתוחה לכל מורי הפיזיקה בעולם<sup>1</sup>.

הנושא שאני עבדתי עליו היה החומר האפל ביקום. בקבוצה היו שתי מורות מאיטליה ואסטוניה ועוד שני מורים מארה"ב ופורטוגל. עם ג'ורג מפורטוגל שהוא גם חובב אסטרונומיה קבענו להיפגש בליקוי חמה המלא בפורטוגל ב-12 באוגוסט 2026<sup>2</sup>.

יש למה לחכות 15 שנים, בתקווה שהזיכרון שלנו יעמוד במבחן הזמן. תעלומת החומר האפל ביקום מקשרת בין הסקאלות הגדולות של היקום - גלקסיות וצבירי גלקסיות - לבין הסקאלות הקטנות ביותר של החומר ולניסויים במאיץ החלקיקים במאמץ לגלות חלקיקים חדשים שיכולים להוות את החומר האפל, ויש כמה תיאוריות לקיומם של חלקיקים<sup>3</sup>.

לאחר שלושה שבועות אינטנסיביים בצרן הרגשתי שאכן משהו מן הקסם של צרן דבק בי וחזרתי לבית הספר עם אנרגיות חדשות ותוכניות חדשות להביא חלק מן הגילויים החדשים במדע ולהציג את השאלות הפתוחות. כמו כן אני חושב שיש לעשות מאמץ גדול ולארגן ביקורים קצרים של תלמידי תיכון מהארץ בצרן כדי לעודד אותם להמשיך בלימודי מדע ולחשוף אותם לנעשה בחזית המחקר המדעי וכן ביקורים של מורים נוספים שיביאו באמתחתם עוד מהקסם של צרן. בימים אלו שישראל מבודדת בעולם אנו חייבים להגדיל את הנוכחות שלנו בבירת המדע העולמי.

1. <http://teachers.web.cern.ch/teachers>

2. <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEgoogle/SEgoogle2001/SE2026Aug12Tgoogle.htm>

3. מידע נוסף על התוכנית על החומר האפל בקישור

[http://www.boker.org.il/meida/negev/desert\\_biking/school/dark\\_matter/dark-matter-003.htm](http://www.boker.org.il/meida/negev/desert_biking/school/dark_matter/dark-matter-003.htm)

**תודות:** לוועדת הפרס של המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע. להשתתפות הישראלית ב-CERN, משרד המדע והטכנולוגיה, המדען הראשי - משרד התעשייה, המסחר והתעסוקה.