

מביאים את פיזיקת החלקיקים לכיתה - בניית תא ערפל¹

קובי שורצבורד, מרכז חינוך ליאו באק, חיפה

מה חדש
במעבדה?



ביולי 2012 השתתפתי עם כ-40 מורים נוספים מכל העולם בתוכנית בינלאומית למורים לפיזיקה במרכז למחקר פיזיקת חלקיקים - CERN. ההשתלמות ארכה שלושה שבועות. במסגרת זו שמענו הרצאות, ביקרנו במתקני המקום, עברנו פעילויות שונות שמטרתן העיקרית הייתה להביאן לכיתות הלימוד שלנו ובכך לחשוף את התלמידים לנושא פיזיקת חלקיקים ול-CERN. בחזרתי לארץ ותודות להשראה שקיבלתי מתוכנית זו, אני כיום מבצע עם התלמידים בכיתה פעילויות שונות ואף מוציא משלחות של תלמידים לביקור במאיץ החלקיקים. אחת הפעילויות שאני מבצע בכיתה היא בנייה של דגם של גלאי החלקיקים הראשון שהומצא בהיסטוריה של הפיזיקה - "תא וילסון" הנקרא גם "תא ערפל". גלאי זה הוצג במפורט במאמרו של ד"ר מרק גלר בגיליון הקודם של "תהודה".

במאמר זה אציג את הציוד הנדרש ואת שלבי הבנייה של הגלאי וכיצד ניתן לשלב אותו בפעילות של תלמידים בכיתה.

מבוא

פיזיקת חלקיקים עוסקת באלמנטים הבסיסיים המהווים את אבני הבניין של החומר. נושא זה הוא אחד מהאתגרים של הפיזיקה הנחקרים בימים אלו. אומנם נושא זה אינו נכלל בתוכנית הלימודים בלימודי הפיזיקה, אבל לדעתי ניתן לבצע פעילות זו עם התלמידים כאשר משלבים בין הנושאים הנמצאים בתוכנית הלימודים לבין נושאי העשרה כגון פיזיקת חלקיקים. במאמר זה אני מציע פעילות חווייתית לתלמידים אשר בעזרתה ניתן להביא לכיתה את פיזיקת החלקיקים ולנסוק במגוון נושאים נלווים, לדוגמה: האם ניתן לראות חלקיקים? מהו גלאי, ואילו מרכיבים נדרשים עבורו? תורת היחסות של אינשטיין והמודל הסטנדרטי.

בפעילות זו התלמידים בונים תא ערפל באמצעים פשוטים, גשישים וזולים ומצליחים לצפות במסלולי תנועה של חלקיק הנקרא מיואון - אחד מהחלקיקים האלמנטריים במודל הסטנדרטי, אשר נוצר בעקבות פגיעת קרינה קוסמית באטמוספירה של כדה"א. בנוסף, בעזרת פעילות זו ניתן להביא לכיתה את סיפור ההתפתחות ההיסטורית של פיזיקת חלקיקים, החל מגילוי הקרינה הקוסמית על ידי ויקטור הס ועד לשימוש במאיצים וגלאים במכון למחקר פיזיקת חלקיקים CERN.

רקע תאורטי

בתחילת שנות ה-20 היו פיזיקאים ערים לקיומה של קרינה אשר נמדדה על פני כדה"א, אך לא ידעו את מקורה. ההשערה הרווחת באותם ימים הייתה כי קרינה זו נובעת מתהליכים רדיואקטיביים בקרקע של כדה"א. השערה זו הופרכה על ידי ויקטור הס בשנת 1911. הס חקר תופעה זו בעזרת כדור פורח ומדד את הקרינה בגבהים שונים. הוא גילה כי רמת הקרינה דווקא עולה ככל שעולים

1. להוראות לבניית תא ערפל והשימוש בו ראו גם את המאמר של מרק גלר: זיהוי של חלקיק טעון בתא ערפל בעזרת עיבוד תמונה של מסלולו, תהודה כרך 35, חוברת 1-2

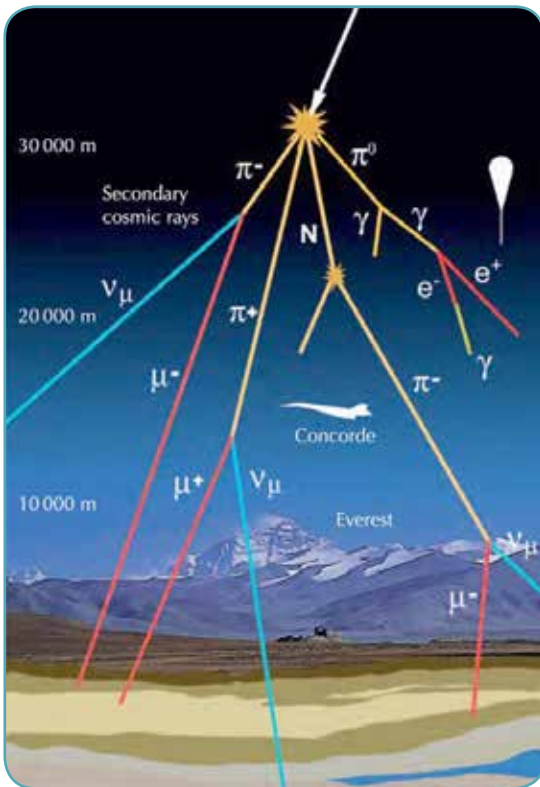
בגובה, דבר המרמז על כך שמקור הקרינה אינו בקרקע אלא בחלל החיצון. תגליותיו של הס זיכו אותו בפרס נובל לפיזיקה בשנת 1936, וקרינה זו קיבלה את השם "קרינה קוסמית".²

היום יודעים שקרינה קוסמית מורכבת ברובה מחלקיקים טעונים, כמו פרוטונים, חלקיקי אלפא ואלקטרונים, ולה מספר מקורות - השמש, גלקסיות וסופרנובות. מאחר שחלקיקים אלו מושפעים מהשדות המגנטיים בתנועתם ביקום, אין אנו יכולים לעקוב אחר המקור המדויק שלהם.

קרינה קוסמית מורכבת ברובה מחלקיקים המגיעים אל כדור הארץ כשהם טעונים באנרגיה רבה מאוד. בעקבות ההתנגשות של מרכיבי הקרינה הקוסמית בחלקיקים שבשכבות העליונות של אטמוספירת כדה"א, נוצרים חלקיקים חדשים אשר מתפרקים לחלקיקים אחרים, תופעה שגורמת לאנרגיית הקרינה לדעוך, וכך אטמוספירת כדה"א מגנה עלינו מפני קרינה זו.



תמונה 1: ויקטור הס בכדור פורח באחד מניסוייו, שנת 1912
 התמונה באדיבות CERN באתר המציין 100 שנה לגילוי הקרינה הקוסמית.



תמונה 2: הקרינה הקוסמית ותוצריה. מקור: Science at School - לאתר

אם בתחילת שנות ה-20 חשבו הפיזיקאים שהחומר ביקום מורכב ממספר מצומצם של חלקיקים - אלקטרונים, פרוטונים, נייטרונים ופוטונים, הרי לאחר גילוי הקרינה הקוסמית התגלו מאות סוגים חדשים של חלקיקים. גילויים אלו עוררו את הפיזיקאים לחקור את התכונות של החלקיקים, למיין ולארגן אותם. ניסיונות אלה הביאו את מארי גל-מאן לפתח את מודל ה"קווארקים" ולזכות בפרס נובל בפיזיקה לשנת 1969. אין ספק שגילוי הקרינה הקוסמית פתח צוהר להבנת פיזיקת החלקיקים והיה אבן דרך לקראת פיתוחו של המודל הסטנדרטי של החלקיקים האלמנטריים שאנו מכירים היום ולהקמתם של מאיצי החלקיקים והגלאים שבהם משתמשים היום במחקר הפיזיקלי.

2. יש להבחין בין קרינה זו לבין קרינת הרקע הקוסמית שהתגלתה מאוחר יותר.

תיאור הפעילות ומטרותיה

בפעילות זו התלמידים בונים בקבוצות תא ערפל וצופים בשובלים הנוצרים בו בעקבות מעברם של חלקיקים טעונים דרך אדי האלכוהול שבתוכו. המטרות העיקריות של הפעילות היא לחשוף את התלמידים לנושא פיזיקת חלקיקים ולעסוק בשאלה כיצד ניתן ל"ראות" חלקיקים.

ציוד



תמונה 3 - הציוד הנדרש לבניית תא ערפל

1. קופסת פלסטיק ועל בסיסה לוח קלקר,
 2. אלכוהול - isopropanol - בריכוז של 99.5%³
 3. כוס פלסטיק שקופה (שקוטרה מתאים לקוטר מכסה המתכת, ראו פריט 6),
 4. מטלית סופגת,
 5. סרט הדבקה,
 6. מכסה מתכת (למשל, מכסה של קופסת קפה נמס) צבועה בחלק הפנימי בצבע שחור,
 7. פנס,
 8. קרח יבש⁴.
- תפקידו של הקרח היבש הוא יצירת הפרש טמפרטורות בין תחתית התא והחלק העליון שלו ובכך ליצור עיבוי של אדי האלכוהול בתא.
9. כפפות מגן (כפפות עבודה) מבודדות ומשקפי מגן להגנה מפני הקרח היבש.

בניית תא ערפל - שלב אחר שלב



תמונה 4 - תא הערפל בגמר בנייתו

1. גוזרים שני ריבועים מהמטלית הסופגת, מניחים את הריבועים זה על זה ומצמידים אותם לקרקעית הכוס. חשוב שגודל הריבוע יתאים לגודל קרקעית הכוס. את הצמדת המטלית אפשר לבצע בעזרת יצירת שני חורים זעירים ככל שניתן בקרקעית הכוס והידוק המטלית בעזרת תיל דק.
 2. שופכים את האלכוהול לתוך הכוס כך שהמטלית תהיה ספוגה לגמרי, אך נזהרים שהאלכוהול לא יטפף ממנה. (שימו לב שהאלכוהול עשוי לטפף דרך הנקבים הקטנים שעשינו לחיזוק המטליות בקרקעית הכוס, דבר שאינו משפיע על איכות המערכת).
 3. מצמידים את מכסה המתכת לשפת הכוס ומקבעים אותו בעזרת סרט ההדבקה כך שהמערכת תהיה אטומה ככל שניתן. חשוב להקפיד על איטום המערכת.
 4. הופכים את הכוס כמתואר בתמונה.
- בשלב זה הסתיימה בניית התא, ונותר להתחיל את הפעילות.

3. חשוב מאוד להקפיד על ריכוז גבוה זה של אלכוהול לפעולה טובה של המערכת. עלות של בקבוק בנפח של ליטר עולה עשרות בודדות של שקלים.

4. ניתן להשיג במקומות ייעודים למכירת קרח יבש (למשל, סוכנות ש.ק.י שבה ניתן לבצע הזמנה ומשלוח), ועלותו כ-12 ש"ח לקילוגרם קרח יבש.

ביצוע הניסוי

5. ממלאים בקרח יבש את קופסת הפלסטיק שעל בסיסה מונח לוח הקלקה.
6. מניחים על הקרח היבש את תא הערפל כך שהחלק החיצוני של המכסה נוגע בקרח היבש והוא במצב אופקי, ומכים מספר דקות (5-8 דק').
7. מכבים את האור ובעזרת הפנס מתבוננים לעבר תחתית המכסה הצבוע שחור (ראו תמונה 5).
8. בשלב זה ניתן לזהות טיפות קטנות מאוד שנופלות מטה ומנסים לזהות את השובלים של החלקיקים העוברים דרך התא (ראו תמונה 6).



תמונה 6 - ניתן להבחין במרכז התא בשובל המעיד על מעבר של מיאון, הגורם לעיבי אדי האלכוהול, וכך אנו יכולים להבחין במסלול התנועה שלו.



תמונה 5 - תלמידות במגמת הפיזיקה בבית הספר ליאו באק בחיפה צופות בתא ערפל לאחר שסיימו לבנות אותו.

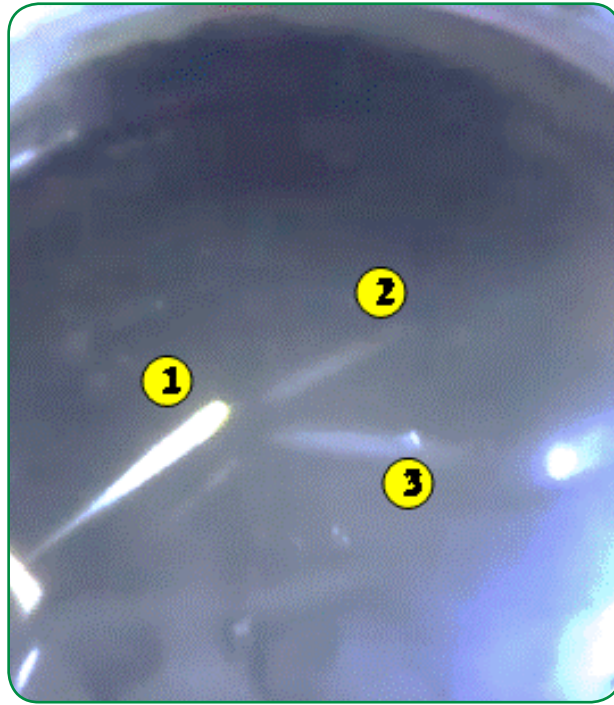
מהם השובלים הנראים בתא?

כאשר חלקיק טעון חשמלית עובר בתא שבנינו, נוצר שובל כפי שתואר קודם לכן והוצג בתמונה 6. לכן בכל פעם שאנו רואים שובל בתא, הדבר הוא עדות למעבר של חלקיק בעל מטען חשמלי. השאלה שאנו צריכים לשאול היא: מהיכן מגיעים מטענים אלו? כאשר קרינה קוסמית פוגעת בשכבות העליונות של האטמוספירה של כדה"א נוצרים חלקיקים בשם פאיונים. חלקיקים אלו אינם יציבים ומתפרקים בזמן קצר מאוד (מיקרו שניות בודדות) ויוצרים חלקיקים אחרים. אחד מתוצרי ההתפרקות של הפאיון הוא חלקיק הנקרא מיאון. המיאון הוא חלקיק אלמנטרי מסוג לפטון, והוא בעל תכונות זהות לאלו של האלקטרון, פרט למסתו הגדולה יותר - פי 200 מזו של האלקטרון.

בעת הצפייה בתא לאורך פרק זמן של מספר דקות (עד כרבע שעה), ניתן להבחין במספר שובלים אשר מגיעים מכיוונים שונים. הסיבה לכך היא שהחלקיקים הנוצרים על ידי הבליעה של הקרינה הקוסמית באטמוספירה מגיעים אל התא מכיוונים שונים.

העשרת הפעילות

- ניתן להשתמש במקורות של חלקיקי אלפא שניתן לרכוש אצל חברות המספקות ציוד מדעי. בעזרת מקור קרינה זו ניתן להבחין בצורה ברורה מאוד בשובלים הנוצרים בתא הערפל ובקצב פליטת החלקיקים מהמקור, כפי שניתן לראות בתמונה 7. עם זאת, יש משמעות לכך שהתלמידים מבחינים בקרינה ללא מקור חלקיקים בכיתה ובכך מתעמתים עם העובדה שהם חשופים לקרינה בכל מקום ובכל שעות היממה.



תמונה 7 - תא ערפל ובו מחט שבראשה חומר רדיואטיבי. (1) קצה המחט, (2) + (3) שובלי מעבר חלקיקים בתא.

- זמן ההתפרקות של מיואונים הוא 2.2 מיקרו-שניות. מאחר שהמיואונים נעים בקירוב במהירות האור, היה עליהם להתפרק לאחר שעברו מרחק של 660 מטר. מרחק זה קצר בהרבה מהמרחק בין השכבות העליונות של האטמוספירה (כ-11 ק"מ) לקרקע. השאלה שאנו יכולים להציג לתלמידים במקרה זה היא: "כיצד אם כך אנו יכולים לצפות בחלקיקים אלו על הקרקע של כדה"א?". התשובה לכך היא תורת היחסות של איינשטיין. זמן ההתפרקות במערכת החלקיק הוא אומנם 2.2 מיקרו-שניות, אך במערכת של הצופה על כדה"א זמן זה ארוך יותר, ולכן ניתן להבחין במעבר החלקיקים בתא.
- הפעילות יכולה לתת חשיפה לתחום של חלקיקים אלמנטריים ושל המודל הסטנדרטי, והיקף החשיפה, אם בכלל, תלוי במורה.

סיכום

לפעילות זו נחשפתי לראשונה בעת שהשתתפתי בהשתלמות בינלאומית למורים במרכז לחקר פיזיקת חלקיקים CERN. במסגרת ההשתלמות שמענו הרצאות, ביקרנו במתקני CERN, ביצענו ופיתחנו פעילויות לכיתה העוסקות בפיזיקת חלקיקים ובענשה במאיץ החלקיקים.

תא הערפל בפעילות זו אומנם גדול יותר, אך התוצאות במערכת המוצעת במאמר זה זהות ומרשימות לא פחות.

אני זוכר עד היום את ההתרשמות ואת החוויה הגדולה שעברתי בזמן ביצוע הפעילות ובניית תא הערפל. הבנתי שבעזרתה ניתן להמחיש לתלמידים למה מתכוונים כשאומרים "לראות" חלקיקים, מה האפיונים של גלאי חלקיקים



בתמונה - בניית תא ערפל בהשתלמות מורים ב-CERN. המורים מימין לשמאל: מאסקי צומאסו (יפן), קובי שורצבורד (ישראל), אירנה סטואמביץ (סרביה), רנו רדר (אסטוניה), גושה מסלאוסקה (פולין).

כמו כן אני זוכר את החששות שלי מביצוע הפעילות. לא ידעתי היכן ניתן להשיג קרח יבש ואלכוהול בריכוז המבוקש ולא ידעתי מהן העלויות. גיליתי כי הדבר פשוט וזול ממה שחשבתי. הציוד הדרוש זמין מאוד וזול ואינו עולה על עשרות שקלים בודדים. הייתי צריך רק את האומץ הראשוני ואת ההחלטה לבצע את הפעילות.

בבית הספר ביצעתי את הפעילות כפעילות העשרה במסגרת הלימודים במגוון כיתות (מכיתה ח' ועד כיתה י"ב במסגרות שונות). כיוונתי לפעילות חווייתית ולפעילות החושפת בפני התלמידים את משמעות המונחים "גלאי" ו"לראות חלקיקים". זו פעילות שוברת שגרה, והתלמידים התלהבו מאוד ושיתפו פעולה הן במהלך הפעילות והן בסופה. הם צילמו זה את זה, דבר שמבחינתי העיד על החוויה החיובית שעברו, חוויה שגרמה להם להנאה מהפיזיקה ועוררה את הסקרנות להמשיך וללמוד את הנושא. עד עתה יצא לי להעביר את הפעילות הן לתלמידים והן למורים במסגרות שונות, וניכר היה שבכל פעילות כזו נהנו המשתתפים עד מאוד מהחוויה ומההבנה שהם עוסקים בתכנים מתקדמים בפיזיקה.



בתמונה - התלמידים שלי במהלך הפעילות. התמונה באה להמחיש את החוויה שהתלמידים עוברים.

בכל שלבי הפעילות צילמו התלמידים זה את זה והתרגשו מאוד.

הוראות בטיחות⁵

מאחר שיש שימוש בקרח יבש ובאלכוהול בריכוז גבוה, יש להקפיד מאוד על הוראות הבטיחות לטיפול בחומרים אלו.

• טיפול בקרח יבש

קרח יבש הוא המצב המוצק של פחמן דו-חמצני, והוא בעל טמפרטורה של -780°C .

בשימוש בקרח יבש יש להקפיד על ההוראות הבאות:

- יש להשתמש בכפפות מגן מבודדות, ולא - עשויות להיווצר על הידיים כוויות קור.
- יש לאחסן קרח יבש ולהשתמש בו במקום מאוורר, שכן בריכוז גבוה הוא יכול לגרום להפרעות נשימה וחנק.
- אסור לאחסן את הקרח היבש במכל אטום וסגור, שכן הוא עלול לגרום ללחץ ולביקוע המכל.

• שימוש ואחסון של אלכוהול בריכוז גבוה - isopropanol

- יש לאחסן את האלכוהול הרחק ממקורות חום או להבה.
- יש לעבוד רק במקום מאוורר היטב ובכפפות.
- יש סכנה להרעלה אפשרית בבליעה, בשאיפת אדים או בספיחה.

מקורות

אתר CERN - <http://public.web.cern.ch/public/en/Research/Detector-en.html>

"Bringing particle physics to life: build your own cloud chamber", Science in School, Issue 14, spring 2010"

5. יש לוודא שהוראות הבטיחות ידועות ומיושמות. יש לקבל הנחיות מספק המוצרים בבטיחות. כל מה שרשום בקובץ זה הוא בגדר המלצה, ואין לראות בו הוראות מדויקות.