

יום טיפון בפיסיקה גרעינית-ניסוי רתרפורד

מאת: אהוד דפני ורוברט קיים, המחלקה לפיסיקה גרעינית,
ותמר וייסמן, היחידה לפעולות נוער,
מכון ויצמן למדע.

1. מבוא

היחידה לפעולות נוער במכון ויצמן למדע מקיימת זו השנה השלישית פרויקט הקרוי "בית ספר שדה למדע". במסגרת זו התקיימו בשנת הלימודים תש"מ 25 ימי עיון לתלמידי כיתות י"א-י"ב מבתי ספר שונים בארץ.

ימי עיון אלו עסקו בנושאים שונים בתחומי הפיסיקה, הכימיה והביולוגיה וכללו הרצאות, עבודה מעבדתית, הדגמות, תרגילים וסיורים במחלקות ובמעבדות. הימים נועדו לכיתות שלמות (ולאו דווקא לתלמידים מחוננים) ונבחרו ע"י התלמידים ומוריהם בהתאם למגמת לימודיהם. לדוגמא, כיתה הלומדת פיסיקה מורחבת, בחרה באחד משני נושאים בפיסיקה: לייזרים והולוגרפיה או פיסיקה גרעינית וניסוי רתרפורד.

במאמר זה נזוין בהרחבה ביום העיון שעסק בפיסיקה גרעינית, אך לפני שנעבור לכך, ברצוננו לסקור את מטרות יום העיון.

ביסוד בית ספר שדה למדע עומד הרצון לנצל את המשאבים בצידוד וכח-אדם הקיימים במכון ויצמן, וזאת על מנת להעשיר את תוכנית הלימודים בתחומים בהם מוגבל ביה"ס התיכון. כמו כן, ביקשנו ליצור קשר והיכרות בין התלמידים לבין מדענים במכון ולהמחיש לתלמידים את העניין והריגוש שבבליצוע מחקר מדעי. המחשה כזו עשויה ליצור אצל התלמידים מוטיבציה חיובית לבעיות המחקר בכלל והמחקר הטהור בפרט.

לכן נבחרו נושאי ימי-העיון כך, שלא יהוו חלק מתוכנית הלימודים הרגילה, אלא יתנו לתלמידים אפשרות להפגש עם עולם חדש ובלתי ידוע המוצג על-ידי מדענים העוסקים במחקר בסיסי יום יום.

בנוסף ליעדים כלליים אלו, היו לנו מטרות ייחודיות ליום העיון - שנושאו "פיסיקה גרעינית - ניסוי רתרפורד". במסגרת הזמן המצומצם ניסינו לסקור ולתאר את מצב המחקר בתחום הפיסיקה הגרעינית, לערוך היכרות עם מאיץ הפלטרון (שהוא מהמשוכללים מסוגו בעולם) ולהדגים את הטכנולוגיה המודרנית המשמשת כמחקר גרעיני.

ניסוי רתרפורד המתבצע ביום העיון, משמש כדוגמא לניסוי בסיסי וחשוב שבאמצעותו אנו מכירים לתלמידים את הפיסיקה הגרעינית בפרט, אך גם את נושא המדע הניסויי בכלל. למשל, אנו מדגימים כיצד משפיעות שגיאות סטטיסטיות וסיסטמיות על תוצאות המדידה.

2. מבנה יום העיון

בהרצאת המבוא אנו מנסים להמחיש את הבעיות הכרוכות בחקר גרעין האטום, כאנלוגיה בין מחקר מבנה הגרעין החבוי באטום, לבין חיפוש אחר אוצר זהב החבוי בערמת קש. לפי "חוקי המשחק", לא ניתן לפזר את הקש בידיים על מנת למצוא את האוצר, כשם שלא ניתן להרחיק את האלקטרונים על מנת לבודד את הגרעין. במקום זאת "יורים קליעים" להוך "הערימה" ומזהים "פיזורים מהאוצר".

תוך דיון עם התלמידים נבנית האנלוגיה המוסברת בטבלה 1.

טבלה 1 : אנלוגיה בין מחקר הגרעין לבין חיפוש אוצר זהב בקש.

מחקר הגרעין	חיפוש האוצר בקש
גרעין האטום	אוצר הזהב
מאיץ או מקור רדיואקטיבי	רובה
קרן חלקיקים	קליעים
קרינה נפלטת אחרי ריאקציה גרעינית	קליעים חוזרים ושכבים
מונים לזיהוי גרעינים	מערכת לזיהוי הקליעים החוזרים

אנו מדגימים זהוי של חלקיקי- α הנפלטים ממקור ^{241}Am בעזרת מונה מצב מוצק.

בהדגמה אנו מודדים את תלות קצב המנייה והאנרגיה של חלקיקי- α במרחק שבין המונה למקור. מודגשת העובדה שתלות זו נובעת מעצירת הקרינה באוויר.

הרצאת הפתיחה מסתיימת בהדגמת פעולתו של מודל קטן של מאיץ ואן-דה-גראף, המשמשת להסברת מערכת הטעינה של המאיץ. (כשלב מאוחר יותר תעזור ההדגמה להבנת פעולתו של מאיץ הפלטרון).

ממעבדת היחידה לפעולות נוער בה התקימה הרצאת הפתיחה אנו עוברים למעבדת מאיץ הפלטרון. תמונה כללית על מבנה המאיץ מתקבלת מסקירת דגם של המאיץ. לאחר מכן מבקרים התלמידים בחדר הבקרה, בחדר המטרה ובשאר חלקי המאיץ ושומעים על אופן יצירת הקרן, האצתה, ביצוע הניסויים ורישום התוצאות באמצעות המחשב.

הביקור במאיץ מסתיים בחדר ההרצאות שבקומה השביעית של מגדל המאיץ. בשלב זה ניתנת לתלמידים האפשרות לשאול ולהעלות נושאים ובעיות הקשורים לחומר אותו למדו עד כה או בהקשרים אחרים.

אנו משתדלים להפנות את הדיון לנושאים כגון מעמד הפיסיקה הגרעינית במסגרת הפיסיקה המודרנית, חשיבות המחקר הבסיסי בהשוואה למחקר שימושי, וכד'.

כמו כן אנו סוקרים את פעילות המחלקה לפיסיקה גרעינית במכון, ואת השתלבותה בפעילות המדעית והכללית בארץ ובעולם. חלק זה של יום העיון מסתיים בדרבי מבוא לניסוי ותרפורד העומד להתבצע בשלב הבא.

ניסוי ותרפורד מתבצע במעבדת מאיץ הואן-דה-גראף שבמחלקה לפיסיקה גרעינית. מאיץ זה הוא הישן ביותר מבין שלושת מאיצי היונים הכבדים שבמכון. הוא עדיין במצב עבודה מצויין ומשמש למחקר בתחומים בהם ניתן להסתפק בקרן בעלת אנרגיה נמוכה יחסית (כגון בפיסיקה אטומית). בעזרת מאיץ זה אנו מבצעים עם התלמידים את הניסוי המפורסם של ותרפורד שלאחריו אנו חוזרים ונפגשים לשיחת סיכום. ניסוי ותרפורד ושיחת הסיכום יתוארו בפרוט להלן.

3. ניסוי ותרפורד

הניסוי המכונה "ניסוי ותרפורד" בוצע למעשה בפעם הראשונה על ידי גייגר ומרסדן ב-1909. בכל זאת זכה ותרפורד ושמו הוענק לניסוי מכיוון שהוא היה זה שבמאמר משנת 1911, הסביר את תוצאות הניסוי ואת השיבותו.

בניסוי המקורי השתמשו במקור הפולט חלקיקי α . אלומת החלקיקים כוונה בעזרת צמצמים לעבר עלה זהב דק. מונה נצנוץ שימש בעזרת העין לזיהוי חלקיקים שפוזרו אל מחוץ לכיוון המקורי של האלומה. גייגר ומרסדן מצאו שחלק קטן מהחלקיקים פוזר בזוויות גדולות מאוד, וזאת למרות שהיה ידוע כי עלה זהב הוא כה דק שמרבית חלקיקי ה- α עברו דרכו בלי לאבד אנרגיה ובלי להיות כלל מוסטים בכיוונם המקורי. תוצאה ניסיונית מפתיעה זאת גרמה לרתפורד שלא להאמין יותר במודלים אטומיים מוקדמים לפיהם המסה האטומית מפורזת באופן אחיד בכל נפח האטום (דהיינו מודל "עוגת הצימוקים" של תומסון). במקום מודלים אילו הציע ותרפורד מודל בו קיים "גרעין" אטומי בעל נפח קטן שבו מרוכזת כמעט כל המסה האטומית.

באותו זמן היה ידוע שקיימים חלקיקים תת-אטומיים קלים, בעלי מטען שלילי - אלקטרונים. ותרפורד הציע כי המטען החיובי הדרוש כמשקל נגד למטען האלקטרונים ביצירת אטומים נייטרליים, נמצא כולו בגרעין. לפי ותרפורד, פיזור חלקיקי ה- α על ידי גרעיני זהב הוא תוצאה של הדחיה החשמלית שבין חלקיקים בעלי מטען שווה בסימנו. כוח זה מבוטא בנוסחה: $F \propto \frac{1}{r^2}$ כאשר r הוא המרחק בין המטענים.

בעזרת הנחות אילו פיתח ותרפורד נוסחאות המתארות תלות בין מספר החלקיקים המפוזרים לבין: א. זווית פיזור. ב. מהירות החלקיקים באלומה. ג. עובי עלה זהב. ד. המסה והמטען של החלקיקים בקרן ובמטרה.

ב-1913 פרסמו גייגר ומרסדן תוצאות של ניסויים מפורטים בהם אישרו את התחזיות הנובעות מנוסחאות רתרפורד. על-ידי כך הוכח קיומו של גרעין קטן אך מסיבי בתוך האטום. ניסוי רתרפורד, אם כן, היה המפתח ששינה את חקר מבנה האטום מעבודת ניחוש למסגרת של מדע אנליטי. בתור שכזה, מקומו של ניסוי רתרפורד שמור לו כאחד המשמעותיים ביותר בפיסיקה המודרנית.

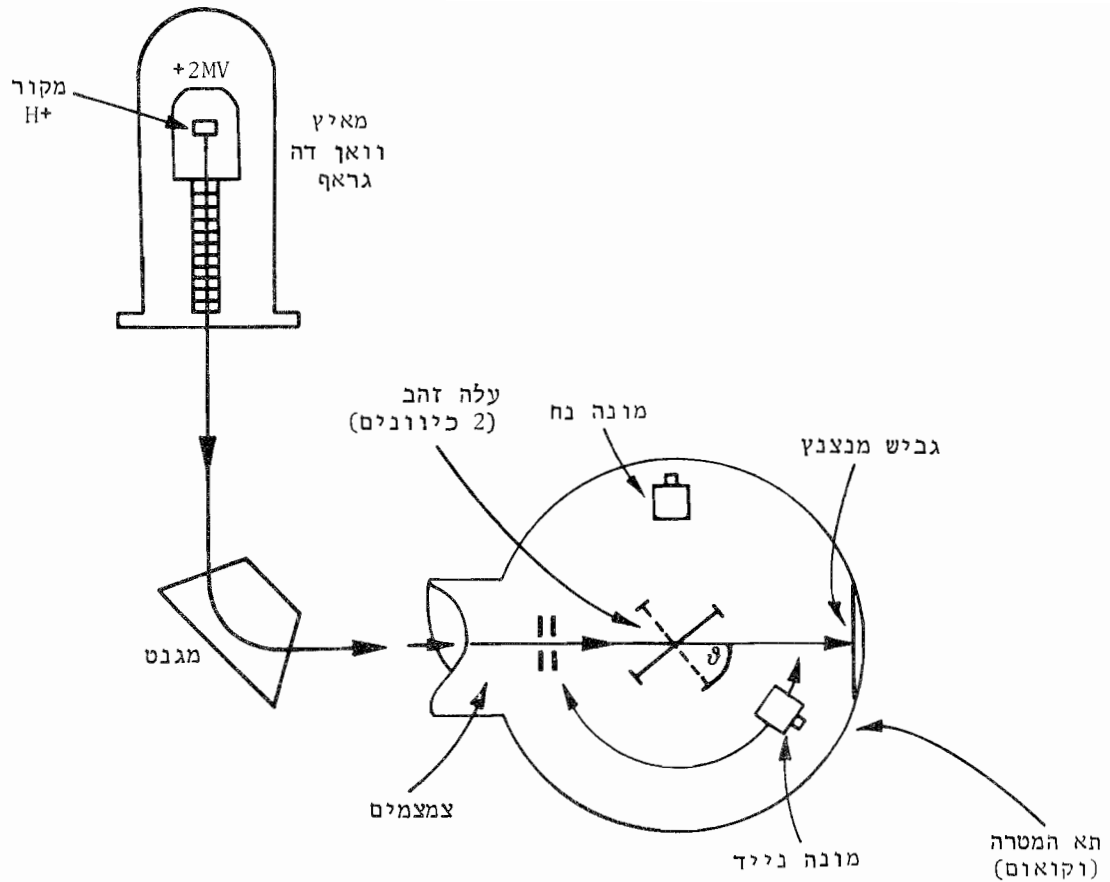
ביום העיון אנו חוזרים על ניסוי רתרפורד בעזרת ציוד המשמש למחקר בפיסיקה גרעינית מודרנית. כמקור לאלומת חלקיקים השתמשנו במאיץ הואן-דה-גראף, ולזיהוי החלקיקים המפוזרים השתמשנו במונה מצב מוצק עם אלקטרוניקה חדישה. עוצמת הקרן מהמאיץ והיעילות הגבוהה של המונים מאפשרים את ביצוע הניסוי בזמן סביר (פחות משעה) במקום בזמן ארוך (מספר שבועות), כפי שהיה בזמנו של רתרפורד. בתרשים 1 נתון סרטוט סכימתי של המערכת הניסויית. מצאנו לנכון להתרכז בשני צדדים של הבעיה:

א. בעובדה שחלקיקים מפוזרים אף לזוויות פיזור גדולות (עד 180°) למרות שרוב הקרן עוברת דרך המטרה (שהיא עלה זהב דק). לוח נצנוץ מוכנס למסלול הקרן אחרי המטרה ועל-ידי כך אנו מדגימים שרוב חלקיקי הקרן אמנם עוברים דרך המטרה - פוגעים בלוח וגורמים לנצנוצים.

ב. לימוד שיטתי של עוצמת הפיזור כפונקציה של זווית הפיזור. לצורך זה עלינו לנרמל מדידות המתבצעות בזוויות שונות. השיטה של גייגר ומרסדן - מנייה בזוויות שונות למשך זמן קצוב - אינה מתאימה לנו היות ועוצמת הקרן הבאה מהמאיץ אינה קבועה. אנו בחרנו להשתמש במונה קבוע נוסף למונה הנייד. בכל מדידה הצבנו את המונה הנייד בזווית מסויימת, ומדדנו את מספר המניות במונה הנייד עבור מספר קבוע של מניות במונה הקבוע.

תוצאות אופייניות לניסוי מופיעות בטבלה 1. מבחינה אירגונית, איפשרנו לתלמידים להיכנס לחדר המטרה ולראות מקרוב את פריטי המערכת ובכללם את פנים תא המטרה (בעזרת חלון גדול שתחתן בו). הניסוי עצמו מתבצע על-ידי שני המדריכים בעזרת טכנאי שהכין את המאיץ מראש, אך התלמידים משתתפים בצורה פעילה: הם רושמים את התוצאות על דפי העבודה, מנסים לבא את מספר המניות במדידה הבאה, ודנים בניסוי תוך כדי ביצועו. סה"כ נמשך הניסוי (כולל הצגת המערכת) כ-45 דקות.

עם סיום הניסוי אנו עוברים לדיון המסכם.



תרשים 1: תיאור סכמטי של המערכת הניסויית.

קרן פרוטונים ממאיץ הוואן-דה-גראף מוכנסת לתא המטרה (מוגדל בתרשים). רוב חלקיקי הקרן עוברים דרך עלה הזהב ופוגעים בגביש המנצנץ אך מיעוטם מפוזרים פיזור רתרפורד. המונה הנייד משמש למניית מספר הפיזורים בזוויות שונות עבור מספר פיזורים קבוע לתוך המונה הנח.

עלה הזהב מתוח על מסגרת. כדי למנוע הסתרת המונים ע"י המסגרת, משנים את כיוון העלה כשעוברים מזוויות קדמיות ($\theta \leq 90^\circ$) לזוויות אחוריות ($\theta \geq 90^\circ$) הניסוי כולו מתבצע בוקואום.

4. הרצאות סיכום

בפתיחת הדיון אנו מציגים את הנוסחה $N \propto 1/\sin^4(\frac{\theta}{2})$ שפותחה על-ידי רתרפורד עבור ההתפלגות הזוויתית של החלקיקים המפוזרים. בגלל קוצר הזמן איננו מפתחים את הנוסחה, אלא מציגים אותה כתיאוריה הדורשת הוכחה נסיונית. טבלה כדוגמת טבלה 2 נרשמת על הלוח בהשתתפות התלמידים.

טבלה 2: תוצאות הניסוי וחישובים על פי נוסחת רתרפורד

θ מעלות	$N =$ מס' מניות	$\sin^4(\frac{\theta}{2})$	$N\sin^4(\frac{\theta}{2})$
30°	94000	0.0045	423
45°	20654	0.0214	442
60°	7536	0.0625	471
75°	3386	0.1373	465
90°	1912	0.250	478
90°	1968	0.250	492
105°	1222	0.396	484
120°	854	0.562	480
135°	644	0.728	469
150°	576	0.870	501

} קצב מנייה גבוה - למונה יש "זמן מת"

← החלפת כיוון המטרה

בהתאם לנוסחה היינו מצפים שהמספרים בעמודה האחרונה יהיו זהים. מכיוון שתחזית זאת אינה מתממשת אף פעם, עולה השאלה: האם רתרפורד טעה, או שמא היו לנו שגיאות נסיוניות באופן זה מתאפשר לנו להרחיב את הדיון בנושא שגיאות המדידה, נושא שהוא חלק מהותי ביותר במסר שאנו מנסים להעביר בנוגע לטבעם של ניסויים בפיסיקה.

השגיאות הנסיוניות נובעות מהסבות כדלקמן:

א. שגיאה סטטיסטית (מדוע חיכינו בכל מדידה עד שהיו לפחות 500 מניות?)

ב. מבנה המערכת; במקרה שלנו, לדוגמה, חלקיקים המפוזרים מהצמצמים עלולים להגיע ישירות למונה.

ג. מיגבלות המיכשור. זמן מת של המונים, לדוגמה.

השינוי שבמספרים בעמודה האחרונה קטן ביחס לשינוי בין התוצאות שבעמודה השניה ולכן בהתחשב בשגיאות המדידה, התוצאות שלנו אינן בסתירה לנוסחאות רתרפורד.

בשלב זה של הדיון אנו נותנים סקירה היסטורית קצרה של הניסוי המקורי ומספרים על ההפתעה שהיתה לרתרפורד כמו שהיא מתבטאת בדבריו מ 1937 (תרגום חפשי): "זה היה כאילו שירית פצצת תותח בחתיכת נייר והיא ניתזה בחזרה ופגעה בך".

אנו שואלים מה היתה צורת הפיזור של חלקיקי ה- α לו מודל תומסון היה נכון, ומראים שנית איך קיום הגרעין מוכח על ידי תוצאות הניסוי שלנו. נוסחאות רתרפורד (ובפרט חוק ה- $1/\sin^4 \frac{\theta}{2}$) נראות אולי מסובכות, אך הן מבוססות על שתי הנחות בלבד: א. קיום גרעין קטן וכבד בעל מטען חיובי בתוך האטום.

ב. חוק דחיה חשמלי ($F \propto 1/r^2$) בין החלקיקים המפוזרים לבין הגרעינים במטרה.

המרחקים בין הגרעינים במטרה הם בסדר גודל אטומי (10^{-8} ס"מ) בעוד שגודל הגרעינים הוא כ- 10^{-13} ס"מ. לכן, רוב המטרה ריקה מחומר ורוב חלקיקי הקרן עוברים דרכה בלא הפרעה.

הדיון מסתיים בהדגשת חשיבותו ההיסטורית של ניסוי רתרפורד והשפעתו על המשך המחקר בפסיקה גרעינית.

5. תגובות התלמידים: שאלונים והתרשמות אישית

בסופו של יום העיון מעבירים התלמידים ביקורת באמצעות שאלון. במסגרת זו הם מתבקשים לדרג את מידת העניין ואת רמת הקושי של כל אחד ממרכיבי יום העיון וכן - להביע דעתם על משך הזמן של מרכיבים אלו. תגובות 87 התלמידים שהשתתפו ב-4 ימי העיון מסוכמות בטבלות 3, 4, ו-5, כאשר בראש כל טבלה מופיעה השאלה עליה השיבו התלמידים.

טבלה מס' 3:

ציון את מידת העניין שעורר בכך כל אחד ממרכיבי יום העיון:

מעיין 1 מאוד	2 מעיין	3 סתמי	לא מעניין 4	משעמם 5	ממוצע משוקלל	סטית תקן
44	39	4	0	0	1.54	0.58
44	35	6	1	1	1.58	0.67
50	23	12	1	1	1.62	0.85
41	38	8	0	0	1.62	0.65
32	30	16	7	1	2.01	0.99

קרינה גרעינית

גילוי הקרינה

ביקור במאיץ הפלטרון

ניסוי רתרפורד

דיון וסיכום יום העיון

טבלה מס' 4:

הבע דעתך לגבי רמת הקושי בה ניתן כל אחד ממרכיבי יום העיון

קשה מדי 1	2 סביר	קל מדי (רמה נמוכה) 3	ממוצע משוקלל	סטית תקן
9	58	18	2.1	0.55
3	68	15	2.13	0.43
8	57	21	2.15	0.56
3	68	14	2.13	0.42
4	67	14	2.11	0.44

קרינה גרעינית

גילוי הקרינה

ביקור במאיץ הפלטרון

ניסוי רתרפורד

דיון וסיכום יום העיון

טבלה מס' 5:

הבע דעתך לגבי משך הזמן של כל אחד ממרכיבי יום העיון

קצר מדי 1	2 סביר	ארוך מדי 3	ממוצע משוקלל	סטית תקן
27	59	1	1.70	0.48
18	66	3	1.82	0.46
36	46	4	1.63	0.57
12	66	8	1.95	0.48
6	64	17	2.12	0.50

קרינה גרעינית

גילוי הקרינה

ביקור במאיץ הפלטרון

ניסוי רתרפורד

דיון וסיכום יום העיון

במשך היום שוחחנו עם התלמידים כדי להתרשם באופן ישיר מהרגשתם וממידת העניין והסקרנות שעורר בהם יום העיון. הערותיהם ותגובותיהם של התלמידים נרשמו, ולהלן מספר דוגמאות:

- א. "רצוי לערוך ימי עיון נוספים בנושא זה כי אין אפשרות ללמוד אותו במסגרת בית הספר".
- ב. "כדאי להאריך את משך הזמן של יום העיון".
- אך לעומת זאת קיבלנו גם תגובות כאלו:
 - ג. "חסר לנו ידע מוקדם שהיה עוזר בהבנת הנושא".
 - ד. "לא השתכנעתי בצורך לבנות מאיץ חלקיקים ואיבני בטוח בצורך במחקר טהור".

לסיכום, התרשמנו כי בטווח הקצר השיג יום העיון את מטרותיו: הגביר את העניין בתחומי המדע, יצר קשר בלתי אמצעי עם מדענים, עורר מוטיבציה ללימוד נושאים חדשים שאינם במסגרת בית הספר ועודד את התלמידים להעביר ביקורת על תוצאות ניסויים מדעיים. את הישגיו ארוכי הטווח של בית-הספר שדה למדע יהיה צורך לבדוק במשך השנים ולשם כך נערכת היהידה לפעולות נוער לבניית תכנית הערכה ארוכת טווח.

לקריאה נוספת:

1. Geiger & Marsden, Proc. Roy. Soc. A82, 495 (1909).
2. E. Rutherford , Phil. Mag. 21, 669 (1911).
3. Geiger & Marsden, Phil. Mag. 27, 604 (1913).
4. ג. גולדרנינג מדע, י"ט, 284, 1974/75
פיסיקה - מאמרים נבחרים מתוך "מדע", עמ' 165,
המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.
5. פיסיקה - פרקים בפיסיקה מודרנית פרק ג',
המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

לידיעת המעוניינים להזמין יום עיון
בבית ספר שדה למדע



ההרשמה לשנת הלימודים תשמ"מ/תשמ"א מלאה. לגבי שנת הלימודים תשמ"א/תשמ"ב משך כל מפגש יהיה יום אחד בלבד, ולכן ההשתתפות מומלצת לבתי הספר הנמצאים במרחקים לא גדולים מדי ממכון ויצמן. בדבר פרטים נוספים והרשמה גא לפנות לבית ספר שדה למדע, מכון ויצמן למדע רחובות, טל' 054-73935.