



העשרה



יונים במלכודת האם כוח קולון בין שני מטענים חיוביים הוא תמיד דוחה?

דניאל זייפמן, המחלקה לפיסיקה של חלקיקים, מכון ויצמן למדע, רחובות

כמו כן יש תגובות כימיות איטיות כל כך שדרוש פרק זמן ארוך לפני שאפשר לזהות את התוצאה.

כהכללה ניתן לומר כי בידוד החלקיקים הנחקרים מאפשר שליטה מלאה תוך מניעת ההשפעה של הפרעות חיצוניות מחד, ומאידך מאפשר שליטה במידת הצורך בחלקיקים הלכודים על ידי הפרעה יזומה מבוקרת (לדוגמה, הפעלת קרן לייזר).

ב-40 השנים האחרונות נעשתה עבודה רבה מאוד תוך שימוש במלכודות לחלקיקים טעונים והתוצאות השפיעו כמעט על כל תחומי הפיסיקה, החל במחשבים קוונטיים וכלה באסטרופיסיקה.

קיימים סוגים שונים של מלכודות יונים ובכולן משתמשים בצרופים שונים של שדות אלקטרומגנטיים לכליאת חלקיקים בתוך נפח נתון.

שתי המלכודות החשובות ביותר הן של פאול ופנינג (Paul and Penning).

בשתי המלכודות האלה לוכדים את החלקיקים ב"מנוחה". לפני כחמש שנים החלטנו, כאן במכון ויצמן, לתכנן טיפוס חדש של מלכודת לאלומת יונים, כלומר ליונים הנעים במהירות מוגדרת היטב. הרעיון הבסיסי הוא פשוט: רצינו ללכוד יונים בדומה לאופן בו לוכדים אור בין שתי מראות. ברור שאנו מודעים להבדלים - האור מורכב מפוטונים חסרי מסה והחלקיקים הטעונים הם מסיביים. מהירות הפוטונים 300,000 ק"מ/שני ואילו החלקיקים הטעונים נעים במהירות הרבה יותר נמוכה, במקרה שלנו כ-140 ק"מ/שני. אולם יש קווי דמיון בין תנועת פוטונים בהשפעת אלמנטים ממקדים (בעיקרון חומר בעל מקדם שבירה שונה) לבין תנועת חלקיקים טעונים בהשפעת שדות חשמליים.

מצוידים בידע זה, יצאנו להרפתקה בשדה הפיסיקה הניסויית וגילינו, במקרה, אוצרות גנוזים. הליכה בכיוון זה מראה שרעיונות פשוטים ביותר עשויים להוביל לתוצאות מדהימות, לחלוטין בלתי צפויות מראש.

מדוע ואיך לוכדים יונים?

מדוע אנו מעוניינים ללכוד יונים? - אפשר להבין את הסיבה לכך אם נזכור שככל שזמן התצפית ארוך יותר כך גדל הדיוק. עקרון אי הוודאות של הייזנברג: $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$ (כאשר ΔE מציין את אי הוודאות במדידת האנרגיה, Δt הוא זמן האינטראקציה או זמן התצפית ו- h הוא קבוע פלנק), פשוט מבטא את הטענה שמדידות מדויקות דורשות זמן מדידה ארוך. אולם, ברור שאין צורך להעמיק בעולם מכניקת הקוואנטים כדי להבין שככל שמרבים במדידת גודל כן גדל דיוק המדידה. דבר חשוב נוסף עבור מדידות בדיוק רב מאוד הוא שרצוי שהמערכת הנחקרת תהיה מבודדת ותהיה חופשית מהפרעות חיצוניות. זו בעצם הסיבה שאיתגרה את דהמלט (H. Dehmelt) להשקיע מאמץ במחקר השימוש במלכודת יונים לשם ביצוע מדידות מדויקות מאוד עם "חלקיקים יחידים המרחפים בחלל".

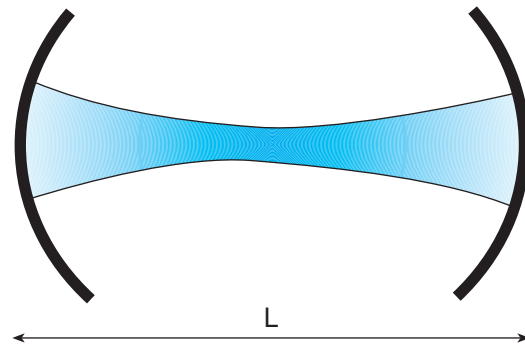
פרס נובל לשנת 1989 הוענק לשלושה מדענים: Wolfgang Paul ו-Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt על "תרומותיהם החשובות בפיתוח ספקטרוסקופיה אטומית בדיוק גבוה מאוד". חלומו של כל ספקטרוסקופיסט הוא ללמוד ולחקור אטום או יון בודד בתנאים קבועים ומבוקרים בפרק זמן ארוך יחסית. חלום זה התגשם במידה רבה תודות למלכודת יונים, שהופעלה לראשונה בשנות החמישים על ידי חתן הפרס וולפגנג פאול מאוניברסיטת בון בגרמניה, וזמן קצר לאחר מכן שופרה הטכניקה על ידי הנס דהמלט באוניברסיטת ואשינגטון בסיאטל שבארזה"ב. דהמלט וקבוצתו חקרו בעיקר אלקטרונים, וב-1973 הצליחו לראשונה לצפות באלקטרון בודד שנלכד במלכודת יונים במשך מספר שבועות, ולמדוד את היחס הגירומגנטי של האלקטרון עד לדיוק של 12 ספרות.

ישנן סיבות נוספות להידרש לימני כליאה ארוכים מאוד: אם צריך למדוד את זמן החיים של מערכת, לדוגמה, זמן החיים של מצב מטה-סטבילי של אטום או של איזוטופ רדיואקטיבי.



לכידת יונים בתנועה המהוד האלקטרוסטטי

ידוע מהאופטיקה הקלאסית (לפי חוק סנל) שמסלולה של קרן אור, העוברת מתווך אחד למשנהו, נקבע על ידי מקדמי השבירה המתאימים. אלומת אור משנה את מסלולה בעוברת דרך עדשה כי מהירות האור השתנתה בתווך העדשה. בדומה, אלומת יונים הנעים במהירות נתונה (שונה מזו של האור), ניתנת לניווט בעזרת שדות חשמליים; אפשר להאיץ או להאט אותם ולמקד אותם בדומה למיקוד אור העובר בעדשה. בליבתו של כל לייזר נמצא מהוד. המהוד, בדרך כלל, מורכב משתי מראות המאפשרות לאור לנוע ביניהן הלוך וחזור (ראה **תרשים 1**). בתוך המהוד מתרחשת ההגברה המביאה לליזר. למטרותינו נעסוק רק בתכונות הגיאומטריות של המערכת ונתעלם מתהליך הליזר. אם ברצוננו לשמור על תנועת ה"הלוך וחזור" של הפוטונים בין המראות למשך זמן בלתי מוגבל (בהנחה שהמראות מושלמות ואין הפסדים), צריך להתקיים התנאי שאורכי המוקד של המראות יאפשרו למקד מחדש את הפוטונים אחרי כל החזרה ממשטח המראה. מהוד המקיים תנאים אלה הוא מהוד יציב, וקל לקבל את תנאי היציבות. לדוגמה, מהוד אופטי הבנוי משתי מראות סימטריות הנמצאות במרחק L זו מזו יהיה מהוד יציב (בהנחה שהתווך שבין המראות אינו מפזר) אם מרחק המוקד f של המראות מקיים את התנאי: $L/4 \leq f \leq \infty$.

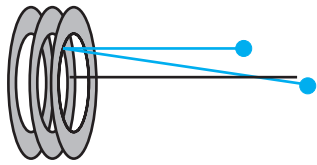


תרשים 1: מהוד אופטי הבנוי משתי מראות שהמרחק ביניהן L

אפשר להראות שאותו תנאי יציבות מתקיים גם עבור אלומת יונים. אפשר לכלוא יונים בין שתי "מראות" שאורכי המוקד שלהן מקיימים את התנאי הרשום לעיל.

כיצד בונים "מראות" אלקטרוסטטיות? - אפשר לפתור זאת במספר דרכים. אחת מהן היא השימוש בקבוצה של אלקטרודות גליליות אחדות, אשר הפוטנציאל שלהן הולך וגדל (**תרשים 2**), באופן שיון הנכנס ל"מראה" מוחזר בהתאם

לאורך מוקד נתון. בדומה למהוד האופטי ניתן ליצור "מהוד חלקיקים", אם נציב את שתי ה"מראות" האלקטרוסטטיות זו מול זו (**תרשים 3**).



תרשים 2: סרטוט סכמטי של מראה אלקטרוסטטית פשוטה הממקדת חלקיקים טעונים.



תרשים 3: סרטוט סכמטי של מהוד אלקטרוסטטי

בסרטוט הסכמטי של תרשים 3 נראים היונים כ"ענן" המתנדד בין שתי ה"מראות". האלקטרודות הפנימיות משני צידי המלכודת הן בפוטנציאל הנמוך ביותר והחיצוניות הן בפוטנציאל הגבוה ביותר. מספר האלקטרודות אינו חשוב, כל עוד הפוטנציאל החשמלי גדול דיו כדי לדחות את היונים. במערכת המתוארת, נכנסים היונים דרך אחת ה"מראות" (קבוצת אלקטרודות). בזמן כניסתם האלקטרודות מוארות, **אין שדה חשמלי**. היונים נכנסים למלכודת ונתפסים בה כאשר הם שומרים על מהירותם המקורית. ברגע שהיונים נמצאים בין שתי ה"מראות" מגדילים במהירות את הפוטנציאל החשמלי. כאשר היונים מגיעים לקצה הרחוק של המלכודת הם נתקלים במחסום הפוטנציאל החיובי ומוחזרים. בדרכם חזרה אל ה"מראה" הראשונה הם שוב מגיעים למחסום הפוטנציאל החיובי ומוחזרים שוב וכך הלוך וחזור. אם השדה החשמלי בתוך כל מראה הוא כזה שמרחק המיקוד שלה מקיים את תנאי המהוד היציב, ינועו היונים הלוך וחזור בין המראות בדומה לתנועת הפוטונים בין מראות המהוד האופטי (נזכור שהיונים נעים במהירות של כ-150 ק"מ/שני ואילו הפוטונים נעים במהירות של 300,000 ק"מ/שני). **תרשים 4** הוא תצלום של מלכודת היונים. המלכודת מוצבת בכיוון מאונך. קבוצות האלקטרודות - ה"מראות" נמצאות בקצה העליון והתחתון. המרחק בין המראות הוא כ-40 ס"מ והזמן הדרוש ליונים לבצע תנועה הלוך וחזור הוא מספר מיקרושניות. המלכודת כולה נתונה בדרך כלל בואקואום, כדי לצמצם עד למינימום את מספר ההתנגשויות בין היונים לבין מולקולות הגז השיורי באופן שמסלול היונים לא יופרע.



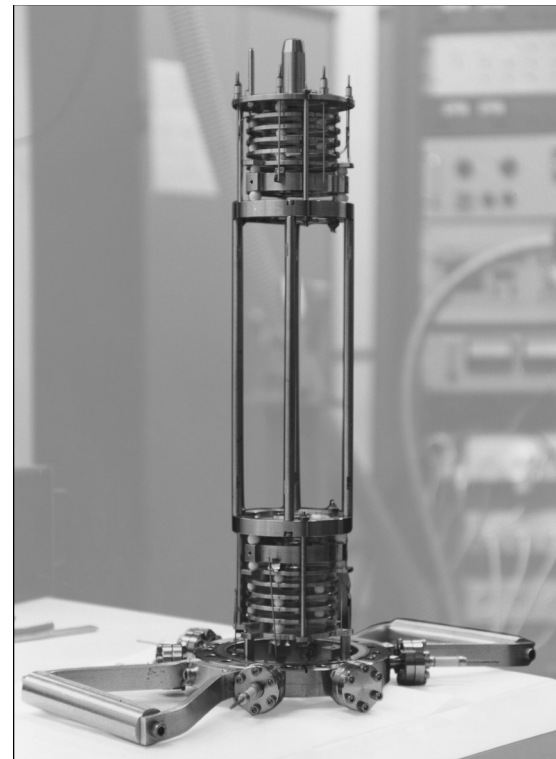
יונים הטעונים במטענים שווים נצמדים זה לזה!!
 אחד הניסויים המעניינים ביותר שביצענו, עם מלכודת יונים זו, הוא ניסוי שמלכתחילה חשבנו שיהיה כמעט טריוויאלי. החלטנו לשגר קבוצה קטנה (bunch) של יונים (קבוצה כזו מכילה כמה אלפי יונים) אל תוך המלכודת, ולבחון את תהליך פריסת הקבוצה לאורך המלכודת, במשך תנודותיה בין ה"מראות". היה ברור לנו שהקבוצה הזאת תתפרס לאורך כל המלכודת כי לא כל היונים בעלי בדיוק אותה מהירות וכמובן כוח הדחייה הקולומבית בין היונים ישאף להרחיקם זה מזה. כדי למדוד את האורך של קבוצת היונים בזמן תנודותיהם, הצבנו טבעת קטנה במרכז המלכודת (תרשים 5).



תרשים 5: המהוד האלקטרוסטטי עם אלקטרודות הטבעת קולטת האותות

בכול פעם שקבוצת היונים עוברת דרך הטבעת היא משרה זרם בטבעת אותו מגבירים ומודדים. צורת הזרם המושרה קשורה ישירות למספר היונים בקבוצה ולאורכה. אות כזה נראה לדוגמה **בתרשים 6א** עבור קבוצה של כ- 10^5 יוני Ar^+ בעלי אנרגיה של 4.2 keV (המתאימה למהירות של 142 km/s). במהירות זו משך הזמן של 1/2 תנודה, הלוך או חזור, הוא כמה מיקרושניות. האות המושרה בטבעת נראה כפולס שלילי החוזר על עצמו כל 3.3 μs (בכל פעם שקבוצת היונים עוברת דרך הטבעת). את התפרסות הקבוצה לאלומה ניתן להסיק מארבעת הרישומים **בתרשים 6.**

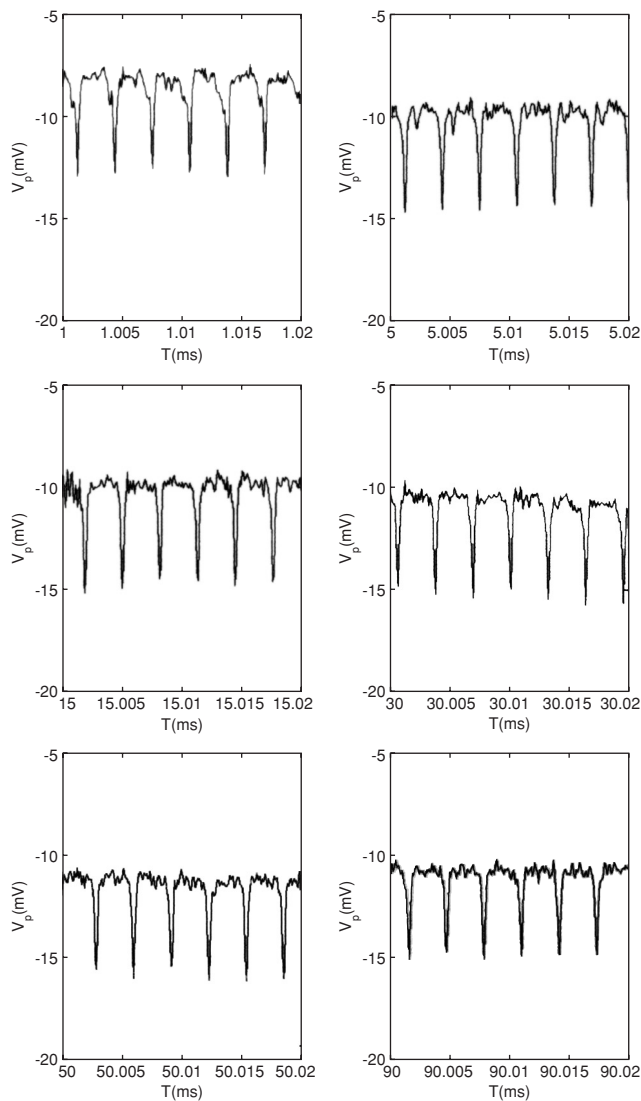
בתרשים 6א נראים השיאים (השליליים) במרווח זמן בין 200-220 מיקרושניות. האותות מתרחבים עם הזמן (תרשימים 6ב-6ד) עד אשר הקבוצה מתפרסת למלוא אורך המלכודת ואין יותר אותות. תהליך התפרסות קבוצת היונים עד לאלומה הממלאת את מלוא אורך המלכודת מתרחש בפחות ממילישנייה (שהוא הזמן ל-300 מעברים של קבוצת היונים דרך הטבעת). תיאור גרפי של פריסת קבוצת היונים המתנודדים מוצג בחלקו השמאלי של **תרשים 8** (ראה עמוד 8). אולם, להפתעתנו, בזמן ששינינו את המתחים בין האלקטרודות בכל מראה (עדיין בתנאי המהוד היציב) הבחנו בהתנהגות **שונה** לחלוטין. בתנאים מסוימים **לא השתנה** אורך הפריסה של קבוצת היונים.



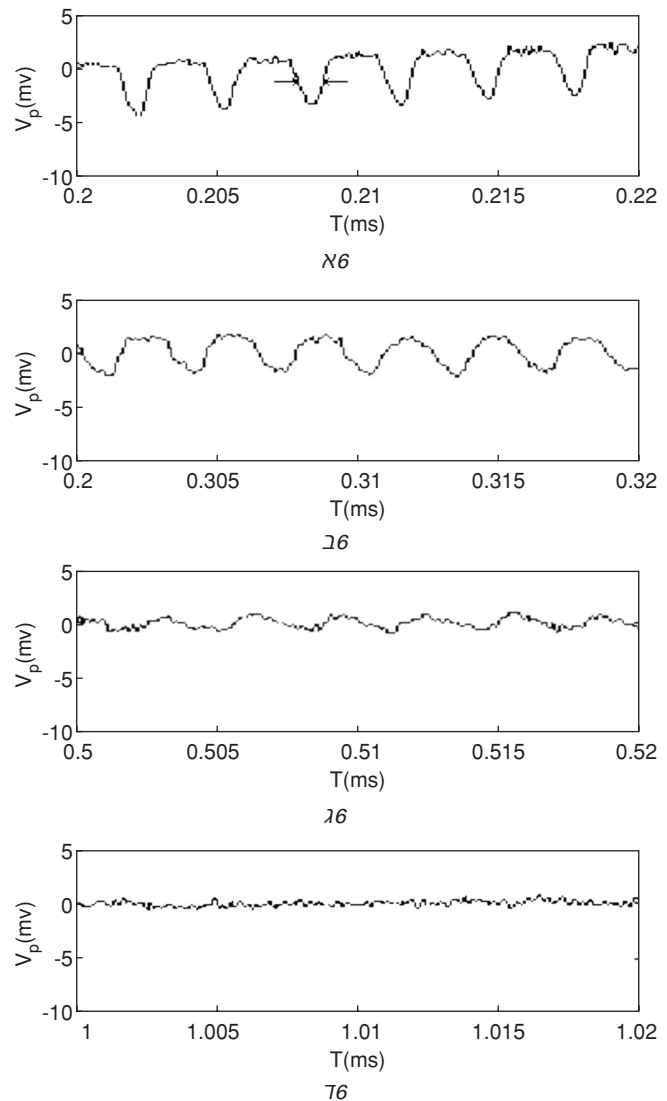
תרשים 4: תצלום של מלכודת יונים ליניארית מחוץ לתא הוואקואום

באופן אידיאלי מלכודת יונים הוא מערך של מספר אלקטרודות בפורטנציאלים מתאימים באופן שהפוטנציאל במרכז מערך האלקטרודות יהיה מינימום והיונים ייכדו בתחתית בור הפוטנציאל. לדאבונו העניין אינו כה פשוט: ממשוואות מכסוול/ חוק גאוס נובע שבאזור שאין בו מטענים חשמליים לא יכול להיות מינימום (או מקסימום) של פוטנציאל. מסקנה זו ידועה גם בשם משפט ארנשו (Earnshaw). ממשוואות מכסוול/ חוק גאוס אנו למדים שבחלק המרחב בו אין מטענים דיברגנס השדה החשמלי הוא אפס ($\text{div } E = 0$) כלומר לא ניתן ליצור מלכודת יונים בעזרת שדות חשמליים אלקטרוסטטיים בלבד. אפשר להתגבר על קושי זה והפתרונות השונים מביאים אותנו לסוגים שונים של מלכודות יונים בהתאם לדרישות המחקר המסוים.

במלכודת הראשונה, של פאול, מפעילים, בנוסף לפוטנציאלים האלקטרוסטטיים, מתח חילופין בתדירות רדיו ובעזרתו מקבלים מצב של שיווי משקל דינמי (אין כאן סתירה למשפט ארנשו (Earnshaw) כי השדה החשמלי הכולל הוא תלוי זמן). במלכודת המתוארת בעבודה זו, השדה הוא אמנם אלקטרוסטטי, אך הכוח הפועל על חלקיק הנע בתוך בור הפוטנציאל תלוי בזמן, כך שגם פה אין סתירה למשפט Earnshaw. הכנסת שינויים נוספים במלכודת פאול מאפשרת כליאת מספר יונים **במצב מנוחה**. עצירת יונים לכודים נעשית על ידי קירור.



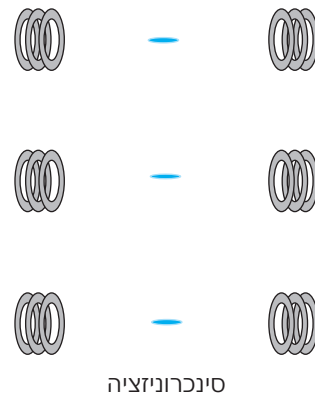
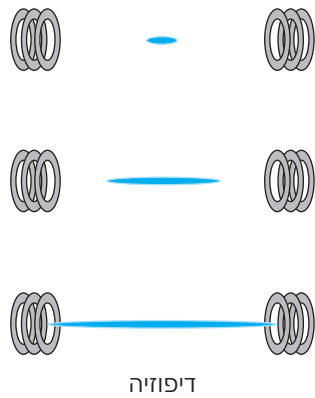
תרשים 7: רישום האותות שנקלטו בתנאי סינכרוניזציה. רוחב האות לא השתנה גם אחרי תצפית של 90 מילישניות



תרשים 6: אותות שנקלטו באלקטרודת הטבעת במשך ארבעה מרווחי זמן שונים

תרשים 7 מראה את האותות שהתקבלו מהטבעת. האותות לא שינו את מידותיהם ולא נעלמו גם אחרי 90 מילישניות של כליאה. יתר על כן, המצב נשאר קבוע אפילו עד משך 1 שנייה (למעשה לכל אורך זמן) שפירושו שהחלקיקים התנוודו במלכודת, בעוברם דרך הטבעת, מאות אלפי פעמים מבלי שאורך פריסת קבוצת היונים גדלה. תופעה זו היא כמובן בניגוד לכל "שיקול דעת" מקובל. היינו מצפים שקבוצה של אלפי יונים תתפרס לאורך המלכודת אחרי מאות אחדות של תנוודות בלבד ולו רק בשל דחיית קולון ביניהם, כפי שראינו בתרשים 6. חשוב לציין שהמערכת היא קלאסית לחלוטין. אין לצפות לאפקטים קוואנטיים בקנה מידה כזה. (המרחק הממוצע בין יון ליון הוא מסדר גודל של 10 מיקרון ואורך המלכודת כ-40 ס"מ). מה קורה כאן? כיצד יתכן שקבוצה של 10,000 עד 100,000 יונים, כולם בעלי אותו מטען חשמלי תישאר בפריסה קטנה וקבועה ולא "תתפוצץ"?

ניתן להסביר את התופעה בעזרת טיעונים קינמטיים המושתתים על תנועת שני יונים בבור פוטנציאל חד ממדי.



תרשים 8: שני אופני התנהגות שונים של קבוצת יונים המתנוודים בין שתי מראות אלקטרוסטטיות. בחלק השמאלי הקבוצה מתפרסת, ואילו בחלק הימני גודל הקבוצה אינו משתנה **למרות דחיית קולון** בין כל שני חלקיקים בקבוצה.

כוח חשמלי קבוע בגודל: $qE = qV/d$. ייצוג טוב של מערכת זו ניתן על ידי בור פוטנציאל חד ממדי כמתואר בחלק התחתון של **תרשים 9**.

חלקיק טעון נע במהירות התחלתית v אל דופן בור הפוטנציאל ומואט שם, נעצר, הופך כיוון ומתנווד בין שני קירות הפוטנציאל עם זמן תנודה מוגדר T . קל לחשב את זמן התנודה במערכת כזו: אם מהירותו ההתחלתית של החלקיק (בה הוא נכנס אל תוך המלכודת) היא v , מסתו m , ומטענו q , אזי זמן

תנודה אחת (הלך חזור) הוא: $T = 4 \left(\frac{L}{2v} + \frac{mv}{qE} \right)$ (כאשר

E הוא השדה החשמלי בין האלקטרודות של כל מראה **(תרשים 9)**).

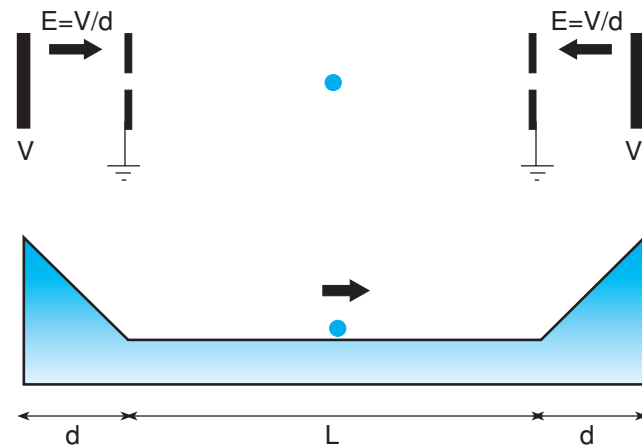
מעניין לציין שנוסחת זמן המחזור T מצביעה על כך **שלא תמיד החלקיק המהיר ביותר הוא גם בעל זמן המחזור הקצר ביותר**. **תרשים 10** מראה את זמן המחזור T כפונקציה של המהירות v בשדה חשמלי נתון. לעקום יש מינימום - כלומר, זמן המחזור T הוא מינימום עבור מהירות מסוימת v_0 . כאשר המהירות v גדולה מהמהירות v_0 ($v > v_0$) זמן המחזור של חלקיק מהיר יותר הוא ארוך יותר מזה של חלקיק איטי יותר.

הסיבה לכך היא שהחלקיק המהיר יותר נכנס יותר לעומק ה"מראה" האלקטרוסטטית ששם השדה E שונה מאפס, או יעלה גבוה יותר בדופן של בור הפוטנציאל, ולכן יתעכב באזור זה יותר זמן, וזמן המחזור שלו יהיה ארוך יותר מזה של החלקיק האיטי יותר. המהירות v_0 , עבורה זמן המחזור הוא מינימום, ניתנת לשינוי על ידי שינוי הפוטנציאל. שינוי הפוטנציאל V מתאים לשינוי שיפוע דופן בור הפוטנציאל, כפי שמתואר **בתרשים 9**.

קינמטיקה של יונים מתנוודים

הדרך הפשוטה ביותר להבנת התנועה של חלקיק טעון המתנווד בין שתי "מראות אלקטרוסטטיות" היא שימוש באנלוגיה החד-ממדית המתוארת **בתרשים 9**.

נניח שכל "מראה" בנויה משתי אלקטרודות בלבד, המרוחקות מרחק d זו מזו. האלקטרודה החיצונית היא בפוטנציאל $+V$ ואילו האלקטרודה הפנימית מוארקה. השדה החשמלי בין שתי האלקטרודות נתון, בקירוב טוב, על ידי הקשר $E = V/d$ (השדה החשמלי, V הפרש הפוטנציאלים, d המרחק בין שתי האלקטרודות). חור קטן ננקב במרכז האלקטרודה הפנימית באופן שחלקיק טעון במטען $+q$ יוכל לחדור אל בין שתי האלקטרודות. באזור שבין שתי המראות, כלומר בין שתי האלקטרודות הפנימיות אין שדה חשמלי (שתי האלקטרודות הפנימיות מוארקות), כך שלא פועלים כוחות על חלקיק טעון הנע באזור זה. ברגע שהחלקיק חודר למרחב שבין שתי אלקטרודות של מראה אלקטרוסטטית, פועל עליו

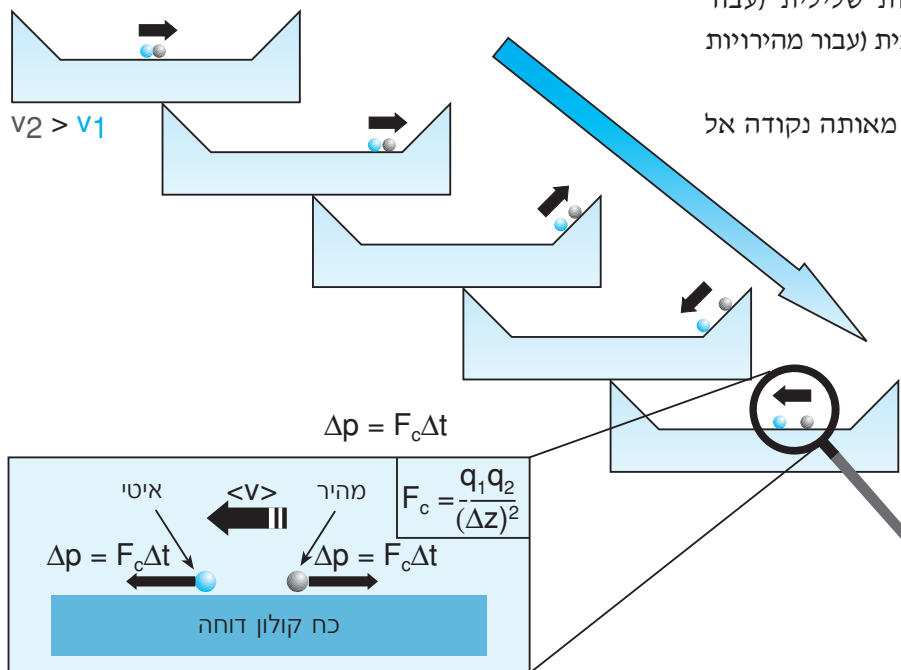


תרשים 9: האנלוגיה החד-ממדית של מלכודת היונים



בתרשים 11). החלקיק האיטי (הכחול) הוא "הראשון" (ביחס לכיוון התנועה) ואילו המהיר (האפור) הוא "האחרון". נראה כעת מה תהיה השפעת דחיית קולון הפועלת בין שני החלקיקים הטעונים: על החלקיק האיטי ה"ראשון" פועל כוח בכיוון תנועתו, ואילו על החלקיק המהיר ה"אחרון" פועל קולון פועל כמצמצם פער המהירויות של החלקיקים (מאט את המהיר ומאיץ את האיטי). אם דבר זה יקרה לאורך כל התנודות, יתנוודדו מהירויות החלקיקים סביב ערכיהם הממוצעים והמרחק היחסי בין החלקיקים יהיה מוגבל. זו בדיוק הסיבה להופעת האפקט המוזר בו צפינו במלכודת היונים שלנו.

כוח קולון מביא לשינויים במהירויות היונים במגמה של השוואתן, והיונים נעים ביחד.



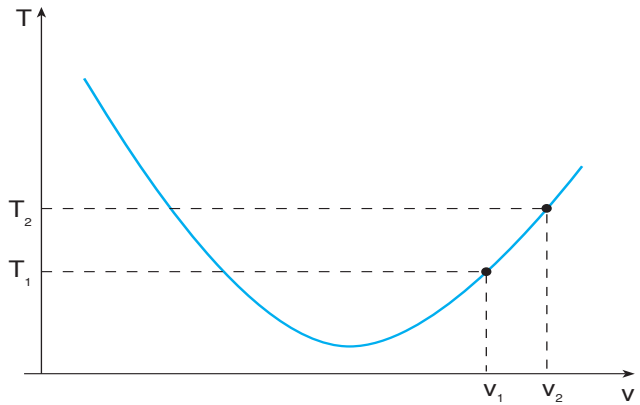
תרשים 11: התנועה הקלאסית של שני חלקיקים בבור פוטנציאל חד-ממדי. למרות שהחלקיק האפור מהיר מן הכחול, הוא חוזר מן הדופן אחרון. זכוכית המגדלת מראה את השפעת כוח קולון המאיץ את החלקיק האיטי (הכחול) ומאט את המהיר (האפור).

כוח הדחייה הקולומבי הוא המצמיד את היונים זה לזה.

לפנינו דוגמה טובה שגם פיסיקה קלאסית, במקרה זה של תנועת שני חלקיקים טעונים בבור פוטנציאל חד ממדי, מביאה לעיתים להתנהגות שהיא בניגוד לאינטואיציה.

למעשה, מלכודות יונים הן בדרך כלל כלים יעילים לבדיקת רעיונות פיסיקליים פשוטים. במיוחד, הדינמיקה של גופים רבים, שיכולה להוביל לקבלת סדר (כפי שהראינו לעיל) או של תופעות כאוטיות שניתן לחוקרן בפירוט הודות להיעדר הפרעות מן העולם ה"חיצוני": מלכודות היונים הן כלים המאפשרים (כמעט) ביצוע של ניסויים מחשבתיים (Gedanken experiments).

תהודה



תרשים 10: זמן התנועה T כפונקציה של המהירות v.

כללית, ניתן לומר כי תנועת יון בבור פוטנציאל, כמתואר בתרשים 9, ניתנת לאפיון על ידי הנגזרת dT/dv של זמן המחזור T לפי המהירות v. הנגזרת יכולה להיות שלילית (עבור מהירויות v הקטנות מ- v_0 , $v < v_0$) או חיובית (עבור מהירויות v הגדולות מ- v_0 , $v > v_0$).

נניח שאנו שולחים שני חלקיקים טעונים מאותה נקודה אל הדופן הימני של בור הפוטנציאל. מהירויות החלקיקים v_1 ו- v_2 שונות מעט זו מזו: $v_2 > v_1$ (ראה תרשים 11). שני החלקיקים יעלו בדופן ויחזרו ויתחילו להתנוודד עם זמן מחזור כפי שנתון בנוסחה. נתבונן במקרה שהחלקיק האיטי יותר הוא בעל זמן המחזור הקצר יותר ($dT/dv > 0$). היות שהאיטי הוא בעל זמן המחזור הקצר יותר הוא יגיע ראשון חזרה למרכז המלכודת. נקפיד לרגע את התנועה ונתבונן במצבם היחסי של שני החלקיקים, בהיותם בדרכם חזרה מהקיר הימני (ראה התיאור התחתון