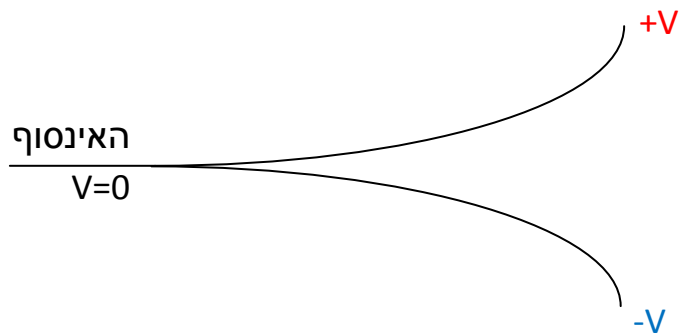


הפוט' החשמלי V בנקודה A כלשהי במרחב (V_A), משמעו העבודה (אנרגיה) הנדרשת בכדי להביא **יחידת** מטען ממרחק אינסופי אל הנקודה A. הפוט' נמדד בוולטים (V), ולאור האמור לעיל משמעו של הוולט הוא: כמה ג'אולים נדרשים **פר קולון** בכדי להביא מטען q כלשהו מהאינסוף אל נקודה A. מתמטית נבטא זאת כך: $W_{\infty \rightarrow A} = q \cdot V_A$ ז"א, הכפלת המטען המועמד להבאה מהאינסוף (q) בפוט' השורר בנקודת היעד (V_A), מניבה את העבודה (W) הנדרשת לתהליך ההבאה.

הפוט' החשמלי V הינו סקלר (יש לו גודל אך לא כיוון), בניגוד לשדה החשמלי \vec{E} שהינו ווקטור (יש לו גם גודל וגם כיוון). הפוט' החשמלי בנקודה כלשהי במרחב יכול אם כן להיות חיובי או שלילי, אך אין לו כיוון. מהנוסחה שלעיל אנו רואים כי:

- אם הפוט' חיובי וגם המטען המועמד להבאה חיובי תהיה העבודה הנדרשת חיובית, ז"א **עבודה מושקעת**.
- אם הפוט' שלילי וגם המטען המועמד להבאה שלילי, כנ"ל.
- אם הפוט' שלילי והמטען המועמד להבאה חיובי תהיה העבודה הנדרשת שלילית, ז"א **עבודה מתקבלת**.
- אם הפוט' חיובי והמטען המועמד להבאה שלילי, כנ"ל.

את הפוט' בנקודה כלשהי במרחב ניתן לדמיין כמתואר באיור הבא: באינסוף (קצה היקום) הפוט' הוא 0. אם הפוט' בנקודה הנדונה הינו חיובי, נדמיין עלייה מהאינסוף, ואם הוא שלילי, נדמיין ירידה מהאינסוף. במקום מטען חיובי המובא מהאינסוף נדמיין כעת מסה המובאת מהאינסוף: כדי להעלותה בעלייה יש להשקיע עבודה ומהורדתה בירידה מתקבלת עבודה. ומה נדמיין במקום מטען שלילי המובא מהאינסוף? נדמיין מסה "שלילית" המתנהגת הפוך ממה שאנו מכירים: מתגלגלת מעצמה בעלייה ונזקקת לדחיפה בירידה.



הפרש פוטנציאלים (מתח חשמלי, מפל מתח)

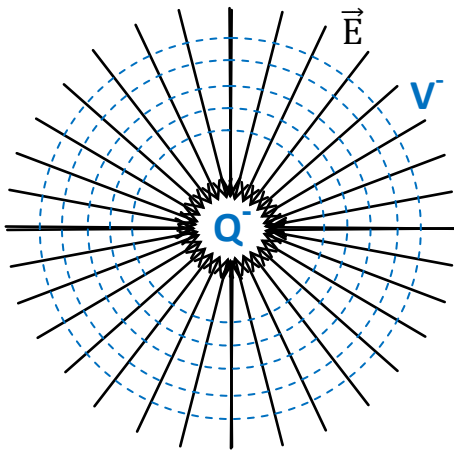
בהרבה מקרים אנו מתעניינים **בהפרש** הפוט' שבין שתי נקודות במרחב ($V_{BA} = V_B - V_A$), ולא בפוט' בנקודה A כלשהי (שגם הוא למעשה הפרש פוט': $V_A = V_A - V_\infty$). במקרה זה הנוסחה שלעיל תיכתב כך: $W_{A \rightarrow B} = q \cdot V_{BA}$ ז"א, הכפלת המטען המועמד להעברה בין שתי נקודות בהפרש הפוט' שביניהן, מניבה את העבודה הנדרשת לתהליך ההעברה. הפרש הפוט' V_{BA} הינו בהגדרה הפוט' שבנקודת היעד מינוס הפוט' שבנקודת המוצא (במקרה דן B היא נקודת היעד ו-A המוצא), ולעיתים נסמנו פשוט כ- ΔV כאשר נתעניין רק בערכו המוחלט. במקום "הפרש פוט'" נוהג לומר לעיתים קרובות "מתח חשמלי" או "מפל מתח".

מבט אחר על יחידותיו של השדה החשמלי

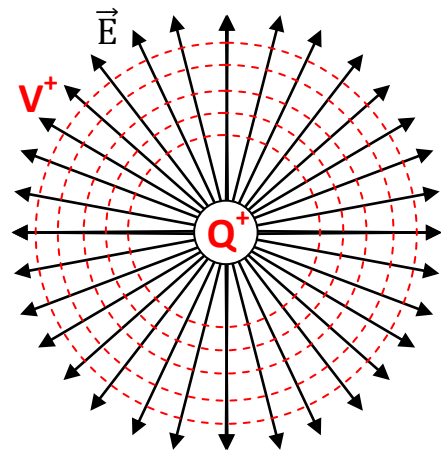
עד כה, מדדנו את השדה החשמלי ביח' ניוטון לקולון (N/C) שמשמעו, כמה ניוטון כוח יפעלו על כל קולון מטען באם יושם בשדה החשמלי. ניתן למדוד את השדה החשמלי גם ביח' וולט למטר (V/m) שמשמעו, כמה וולטים "נופלים" על כל מטר התקדמות בכיוון קווי השדה, אם עוצמתו לאורך ציר ההתקדמות תיוותר כפי שהייתה בנקודת המדידה. היחידות הינן בנות המרה, לדוגמה, אם בנקודה כלשהי במרחב שורר שדה חשמלי המפעיל 7 ניוטון כוח על כל קולון מטען, **והשדה הינו אחיד**, אזי מפל המתח (הפרש הפוט') על פני כל מטר התקדמות בכיוון קווי השדה יהיה 7 וולט. ההפך גם הוא נכון: אם נמדד הפרש פוט' של 7 וולט בין שתי נקודות לאורך קווי שדה אחיד שמרחקן זו מזו הוא מטר אחד, אזי הכוח החשמלי שיפעל על כל קולון מטען שיונח בניהן יהיה 7 ניוטון. מהאמור לעיל נובע כי:

- א. אם הפרש הפוט' (ΔV) בין שתי נקודות A ו-B שונה מאפס, אזי קיים רכיב שדה חשמלי ($E_{||}$) לאורך המרחק (d) שביניהן.
- ב. **אם רכיב השדה החשמלי הנ"ל הינו אחיד**, הפרש הפוט' שבין שתי הנקודות יתקבל מהנוסחה: $\Delta V = E_{||} \cdot d$
- ג. **הפוט' החשמלי פוחת כאשר מתקדמים בכיוון השדה החשמלי**, ומכך נובע כי לאורכם של קווי שדה קיים תמיד מפל מתח. לרוחבם של קווי שדה אין מפל מתח, ולכן משטח שקווי השדה מאונכים לו נקרא "משטח שווה פוטנציאל".

כפי שבוודאי הובן לעיל, פוט' חשמלי יכול להתהוות רק הודות לקיומו של שדה חשמלי, וזה האחרון, כידוע, נובע ממטען חשמלי. במילים אחרות, כדי שישורר בנקודה כלשהי במרחב פוט' שונה מאפס, חייבים להימצא מטענים/ים חשמליים איפה שהוא במרחב. אם נניח מטען נקודתי Q בודד ביקום, הפוט' בכל נקודה במרחב שסביבו יתקבל מהנוסחה: $V(r) = \frac{k \cdot Q}{r}$, כאשר r הוא המרחק שבין המטען Q לנקודה הנדונה. שימו לב כי הפוט' פוחת (בערכו המוחלט) ככל שמתרחקים מהמטען. במרחק אינסופי (קצה היקום) הפוט' המתקבל הינו 0V. כמו כן שימו לב לכך שאם המטען Q הינו שלילי, מתקבל במרחב פוט' שלילי. בקרבת המטען הפוט' הינו שלילי "חזק", והוא הולך ומתקרב ל-0 (מהכיוון השלילי) ככל שמתרחקים אל האינסוף (ראה גרף למטה). נזכור שכאשר המטען שלילי קווי השדה "נשאבים" לתוכו, והרי שהכול מסתדר עם שנאמר קודם לכן, **הפוט' החשמלי פוחת כאשר מתקדמים בכיוון השדה החשמלי, או עולה כאשר מתקדמים בכיוון ההפוך.**



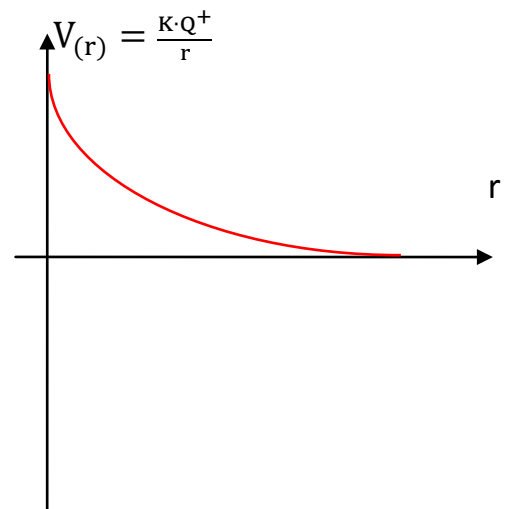
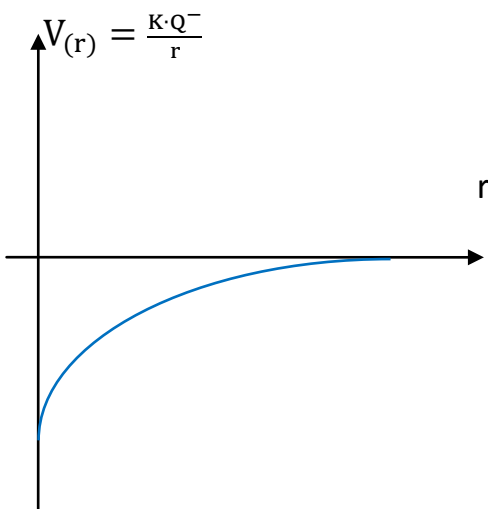
באינסוף
 $V=0$



כל משטח כדורי (דמיוני) העוטף מטען נקודתי Q שבמרכזו הוא משטח שווה פוטנציאל, כי קווי השדה מאונכים לו. בין כל שתי נקודות על משטח כזה הפרש הפוט' הוא 0, ז"א הנקודות נמצאות באותו פוטנציאל חשמלי.

מטען שלילי Q^- יוצר סביבו פוט' שלילי. ככל שמתרחקים ממנו הפוט' עולה, מכיוון שנעים נגד כיוון השדה. באינסוף הפוט' אפס.

מטען חיובי Q^+ יוצר סביבו פוט' חיובי. ככל שמתרחקים ממנו הפוט' פוחת, מכיוון שנעים בכיוון השדה. באינסוף הפוט' אפס.



כאשר ישנם במרחב מספר מטענים (כפי שקורה במציאות), הפוט' בנקודה כלשהי במרחב יתקבל מחיבורן ה**סקלרי** של תרומות כל המטענים. מטענים חיוביים יתרמו פוט' חיובי ומטענים שליליים יתרמו פוט' שלילי. מטען גדול וקרוב יתרום יותר ממטען קטן ורחוק.

כדי לדעת מהו הפוט' (V) בנקודה כלשהי במרחב, חייב להיות נתון פיזורם במרחב של מטענים נקודתיים (או כדוריים), וכן גודלם וסימנם. **שימו לב כי במקרה של תיל אינסופי/לוח אינסופי טעון, הפוט' בכל נקודה במרחב יהיה אינסופי!**

כדי לדעת מהו הפרש הפוט' (ΔV) בין שתי נקודות שמרחקן זו מזו (d) נתון, **מספיק** שיהיה נתון גודל וכיוון השדה (האחיד) השורר במרחב שבניהן. נשתמש אז בנוסחה $\Delta V = E_{\parallel} \cdot d$ כאשר E_{\parallel} הוא רכיב השדה המקביל לישר המחבר בין שתי הנקודות.

כדי לדעת מהי האנרגיה הפוט' החשמלית U של מערכת מטענים, נשאל כמה עבודה נדרשה בכדי להביאם מהאינסוף אל מיקומם הנוכחי. עבודה זו תחושב באמצעות הנוסחה $W_{\infty \rightarrow A} = q \cdot V_A$

$$W_{\infty \rightarrow A} = q \cdot V_A$$

נניח שמערכת כזו מורכבת מ-N מטענים. כדי להביא את המטען הראשון (q_1) מהאינסוף למיקומו המיועד (A) לא נדרשת כל עבודה, מפני שהפוט' במקום זה היה $V_A=0V$ מלכתחילה. כעת, משהובא q_1 למיקומו, הוא מייצר פוט' בנקודה B שאליה מיועד המטען השני

(q_2) להיות מובא. גודלו של פוט' זה הוא $V_B = \frac{K \cdot q_1}{d_{AB}}$, כאשר d_{AB} הוא המרחק שבין הנקודות A ו-B. העבודה הנדרשת להבאתו של

q_2 מהאינסוף אל נקודה B תהיה איפה $W_{\infty \rightarrow B} = q_2 \cdot V_B = q_2 \cdot \frac{K \cdot q_1}{d_{AB}}$. כעת, משהובא גם q_2 למיקומו, הוא מייצר פוט' בנקודה C

שאליה מיועד המטען השלישי (q_3) להיות מובא. גודלו של פוט' זה הוא $V_{C2} = \frac{K \cdot q_2}{d_{BC}}$, אך עלינו לזכור שגם q_1 מייצר פוט' בנקודה C

שגודלו הוא $V_{C1} = \frac{K \cdot q_1}{d_{AC}}$. הפוט' בנקודה C מתקבל מחיבור שני התרומות הנ"ל: $V_C = V_{C1} + V_{C2} = \frac{K \cdot q_1}{d_{AC}} + \frac{K \cdot q_2}{d_{BC}}$

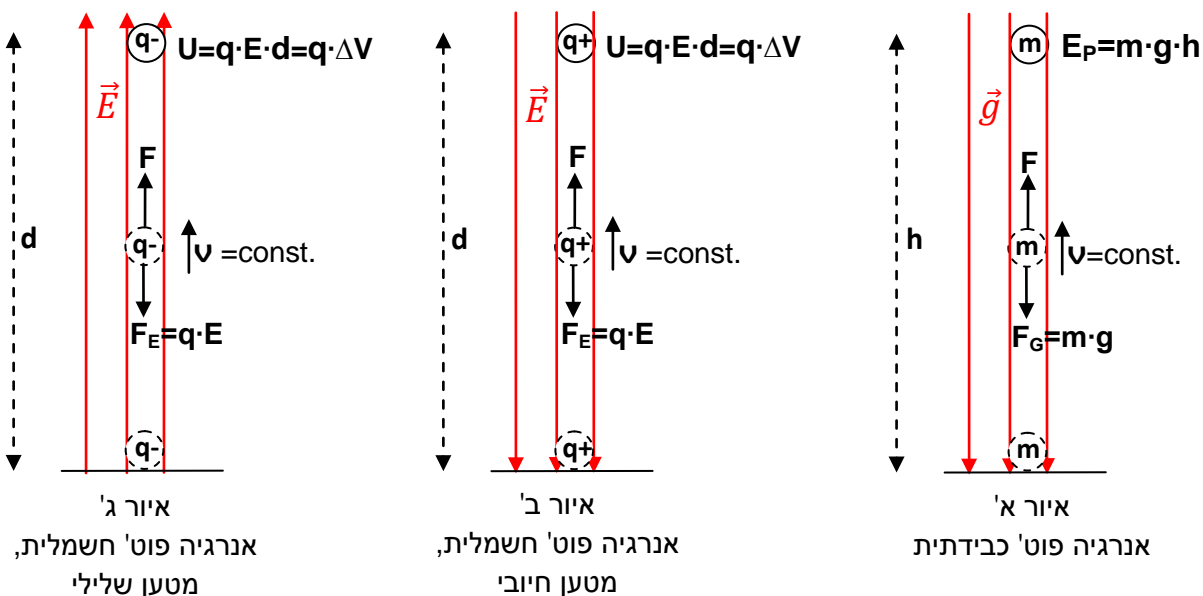
העבודה הנדרשת להבאתו של q_3 מהאינסוף אל נקודה C תהיה איפה $W_{\infty \rightarrow C} = q_3 \cdot V_C = q_3 \cdot K \left(\frac{q_1}{d_{AC}} + \frac{q_2}{d_{BC}} \right)$

באופן זה תימשך הבאתם מהאינסוף של כל מטעני המערכת, כאשר הפוט' בנקודה K שאליה מיועד המטען ה-n ("חי" (q_n)) להיות מובא נקבע ע"י n-1 המטענים שהובאו קודם לכן ונמצאים כבר במקומם. הכפלתו של q_n בפוט' זה אשר שורר בנקודת היעד שלו, תניב את העבודה הנדרשת להבאתו. לבסוף, כל שנותר לעשות הוא לסכום את N העבודות שנדרשו להבאתם של N המטענים. העבודה הכוללת שהתקבלה היא העבודה הנדרשת לבניית מערכת המטענים, והיא גם **האנרגיה הפוט' של מערכת המטענים**. אם ישוחררו ממקומם, תהפוך בהדרגה אנרגיה פוט' זו לאנרגיה קינטית, עת ינועו המטענים במהירות גוברת אל האינסוף שממנו הובאו. אז נוכל לחזור על התהליך מתחילתו: להביאם שוב מהאינסוף, לקבצם לכדי מערכת מטענים, ושוב לשחררם אל האינסוף...

אנאלוגיה בין אנרגיה פוט' חשמלית לאנרגיה פוט' כבידתית

בדיון שלהלן נניח ששדה הכבידה והשדה החשמלי אחידים, כדי לפשט את ההסבר.

כאשר אנו מרימים מסה m אט אט כנגד שדה הכבידה, אנו מפעילים עליה כוח F כלפי מעלה (בכיוון התנועה) **השווה בגודלו** לכוח הכובד $F_G = (mg)$ שמפעיל עליה שדה הכבידה g כלפי מטה (נגד כיוון התנועה). שני כוחות אלה השווים בגודלם פועלים לאורך אותה דרך (h) ולכן מבצעים אותה עבודה ($W_F = W_G = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$), אך הכוח F מבצע עבודה חיובית (נותן אנרגיה) ואילו כוח הכובד F_G מבצע עבודה שלילית (לוקח אנרגיה). בשל היות כוח הכובד כוח משמר, האנרגיה שהוא לוקח אינה מתבזזת אלא נאגרת כאנרגיה פוט' כבידתית (E_p) של המסה המורמת. אם נשחרר כעת את המסה שהורמנו, תהפוך בהדרגה אנרגיה פוט' זו לאנרגיה קינטית שעה שהמסה נופלת במהירות הולכת וגדלה. משהגיעה המסה ל"גובה הקרקע", הפכה כבר כל האנרגיה הפוט' שהייתה לה בשיא הגובה לאנרגיה קינטית, ולכן מהירותה מרבית. שימו לב לתהליך שתואר לעיל: אנחנו השקענו עבודה אשר "נלקחה" כולה ע"י כוח הכובד, אך בהיותו כוח משמר הוא "הפקיד אותה למשמורת" כאנרגיה פוטנציאלית במקום לצרוך אותה. כשאנו אומרים "העבודה שהשקענו בהרמת המסה הפכה לאנרגיה פוט' שלה" אנו צודקים לגמרי אבל חוסכים קצת במילים. בנוסף, בשל היות כוח הכובד כוח משמר, העבודה שהוא מבצע אינה תלויה כלל בצורת המסלול שבו מועתקת המסה, אלא רק בגובה הסופי h שאליו הורמנו. יתרה מזאת, נקודת הסיום של המסלול אינה חייבת בכלל להיות מעל נקודת ההתחלה שלו. רק הפרש הגובה h משנה כאן, או במילים אחרות, **רק רכיב ההעתק אשר מקביל לקווי שדה הכבידה**. כאשר מסלול ההעתק של המסה מאונך לקווי השדה (מקביל לקרקע), אנו אומרים שהוא נמצא על "משטח שווה פוטנציאל".



איור ג'

אנרגיה פוט' חשמלית, מטען שלילי

איור ב'

אנרגיה פוט' חשמלית, מטען חיובי

איור א'

אנרגיה פוט' כבידתית

קעת קראו שוב את הפסקה הקודמת, אך החליפו את המסה m במטען $q+$, את כוח הכובד F_g בכוח החשמלי F_E , את שדה הכבידה g בשדה החשמלי E , ואת האנרגיה הפוט' הכבידתית E_p באנרגיה הפוט' החשמלית U . לבסוף החליפו גם את כינויה של הדרך מ- h ל- d , רק לשם נוחיות. במילים אחרות, עברו מאיור א' לאיור ב'. שימו לב לכך שהשתמשנו בשוויון $E \cdot d = \Delta V$ אשר תקף רק כאשר השדה החשמלי אחיד (באותו אופן יכולנו לעשות באיור א' שימוש בשוויון $g \cdot h = \Delta V_g$ כאשר ΔV_g מייצג הפרש פוט' כבידתי, אך השימוש בשוויון זה אינו נפוץ) ודרך מקרה פרטי זה הגענו לנוסחת האנרגיה הפוט' החשמלית $U = q \cdot \Delta V$ הנכונה תמיד, גם כאשר השדה החשמלי אינו אחיד. בסעיף הקודם, כשחישבנו את האנרגיה הפוט' של מערכת מטענים, עשינו שימוש בנוסחה זו מבלי לומר זאת במפורש: אמרנו שהכפלתו של מטען q המיועד להבאה מהאינסוף בפוט' V אשר שורר בנקודת היעד שלו, מניבה את העבודה W הנדרשת להבאתו, ושעבודה זו שווה לאנרגיה הפוט' החשמלית U שהוא רכש עם הגיעו לנקודת היעד. השדה החשמלי במקרה זה לבטח אינו אחיד, מפני שהוא בעצם סכום ווקטורי של השדות הלא אחידים המיוצרים ע"י אותם מטענים שכבר הובאו למקומם. כנגד שדה לא אחיד זה אשר "ממלא את היקום" מובא המטען הבא מהאינסוף, ועם זאת הקשר $W_F = U = q \cdot \Delta V = q \cdot V$

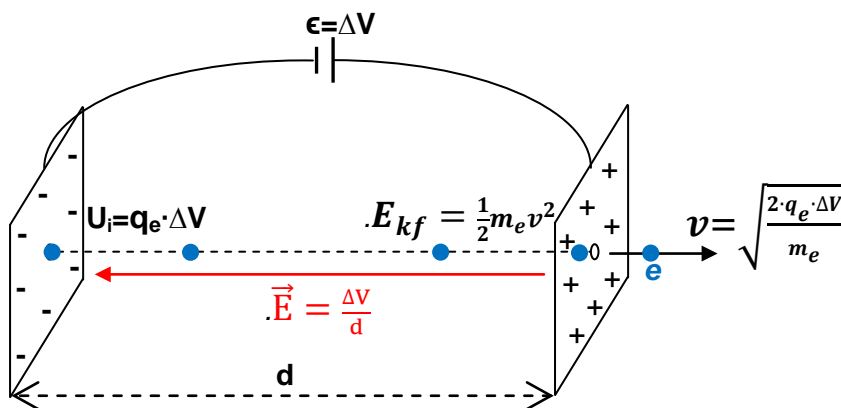
עדיין שריר וקיים. כנגד שדה לא אחיד זה אשר "ממלא את היקום" מובא המטען הבא מהאינסוף, ועם זאת הקשר $W_F = U = q \cdot \Delta V = q \cdot V$ עדיין שריר וקיים. כנגד שדה לא אחיד זה אשר "ממלא את היקום" מובא המטען הבא מהאינסוף, ועם זאת הקשר $W_F = U = q \cdot \Delta V = q \cdot V$ עדיין שריר וקיים.

איור ג' נועד להשלמת התמונה כאשר המטען המועתק הינו שלילי. במקרה זה פועל עליו כוח חשמלי F_E נגד כיוון השדה, ומשום כך מכון השדה החשמלי E כלפי מעלה.

מאיץ אלקטרוני

לניסויים רבים נדרשים אלקטרוני שמהירותם גבוהה. כדי להאיצם למהירות גבוהה זו, נעשה שימוש במאיץ אלקטרוני אשר בנוי כדלקמן: בין שני לוחות מתכת המחוברים למקור מתח ϵ מתהווה הפרש פוט' ΔV ולכן גם שדה חשמלי E . אם שטח הלוחות גדול בהשוואה למרחק שביניהם, השדה החשמלי אחיד למדי. חוט להט דק הנעוץ במרכז הלוח השלילי (שמאלי באיור) משחרר אלקטרוני, ואלה מואצים נגד כיוון השדה אל הלוח החיובי (ימני באיור). בלוח החיובי ישנו נקב זעיר המאפשר לאלקטרוני לעבור דרכו ולצאת מהמאיץ כשמהירותם גבוהה. כשהאלקטרון משוחרר במרכז הלוח השלילי יש לו אנרגיה פוט' בלבד. אנרגיה פוט' זו הופכת בהדרגה לאנרגיה קינטית שעה שהאלקטרון "נופל" אל הלוח החיובי. עם הגיע האלקטרון אל החור שבמרכז הלוח החיובי, הפכה כבר כל האנרגיה הפוט' שהייתה לו בתחילת "נפילתו" לאנרגיה קינטית:

$$U_i = E_{kf} \Rightarrow q_e \cdot \Delta V = \frac{1}{2} m_e v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_e \cdot \Delta V}{m_e}}$$



אם השדה באמת אחיד אז תאוצת האלקטרון קבועה, ואז אפשר גם דרך קינמאטיקה:

$$\sum F = ma \Rightarrow F_E = m_e \cdot a \Rightarrow q_e \cdot E = m_e \cdot a \Rightarrow q_e \cdot \frac{\Delta V}{d} = m_e \cdot a \Rightarrow a = \frac{q_e}{m_e} \cdot \frac{\Delta V}{d}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta X \Rightarrow v^2 = 0^2 + 2 \cdot \frac{q_e}{m_e} \cdot \frac{\Delta V}{d} \cdot d \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_e \cdot \Delta V}{m_e}}$$

שימו לב לכך שהמרחק d בין הלוחות אינו משפיע על התוצאה. הכיצד? תשובה: אם המרחק d גדול יותר השדה החשמלי E אומנם חלש יותר, ועימו גם הכוח החשמלי F_E והתאוצה a , אך משך התנועה מתארך ומפצה על כך.