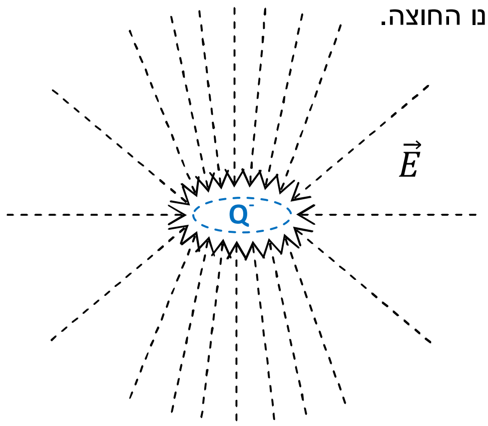
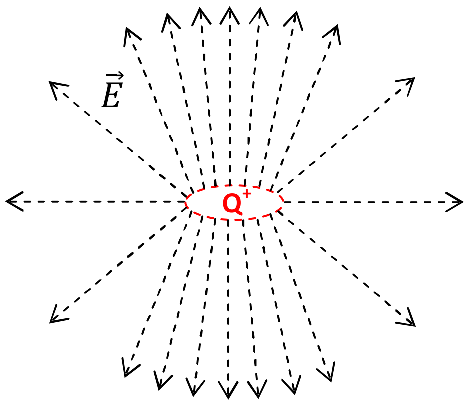
<u>שדה חשמלי</u>

שדה חשמלי $\vec{E}$ נוצר ממטען חשמלי Q. אם המטען חיובי, מתואר השדה כקווים הבוקעים ממנו, בדומה לקרני אור הבוקעות ממנורה. אם המטען שלילי, כיוונו של השדה הפוך – כלפי המטען במקום ממנו החוצה.

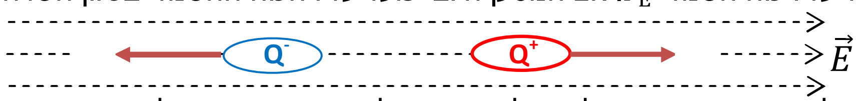




השדה הוא ווקטור, יש לו גודל וכיוון. כיוונו הובהר לעיל, ומה באשר לגודלו? ובכן, גודלו של השדה מתבטא בצפיפות הקווים. קל לראות שבקרבת המטען הקווים צפופים יותר, והם הולכים ומתרווחים ככל שגדל המרחק מהמטען, ז"א השדה נחלש.

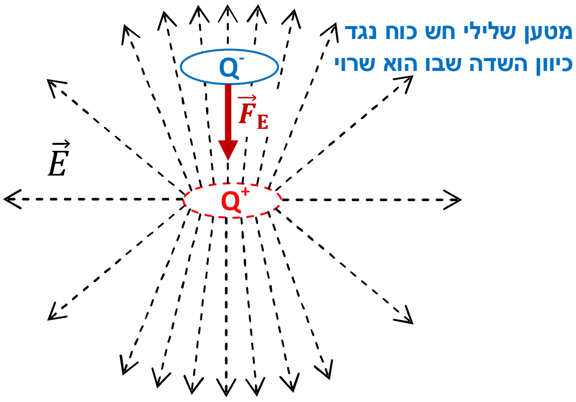
<u>כוח חשמלי</u>

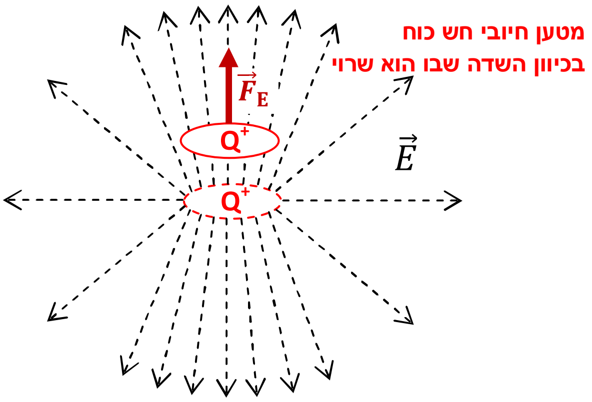
כשמטען חשמלי Q מושם בשדה חשמלי $\vec{E}$ פועל עליו כוח חשמלי $\vec{F}_E$. אם המטען חיובי פועל עליו הכוח החשמלי בכיוון השדה, ואם הוא שלילי אז להיפך – נגד כיוון השדה.

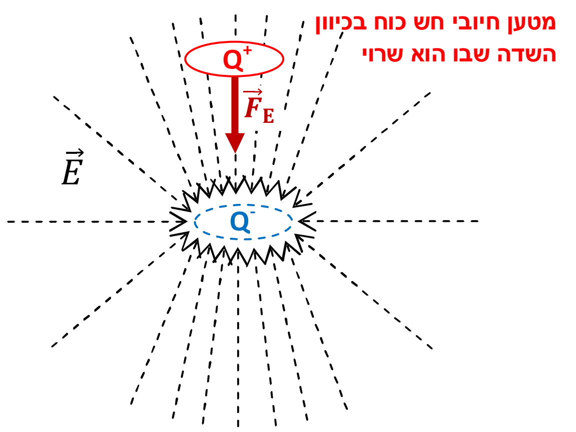


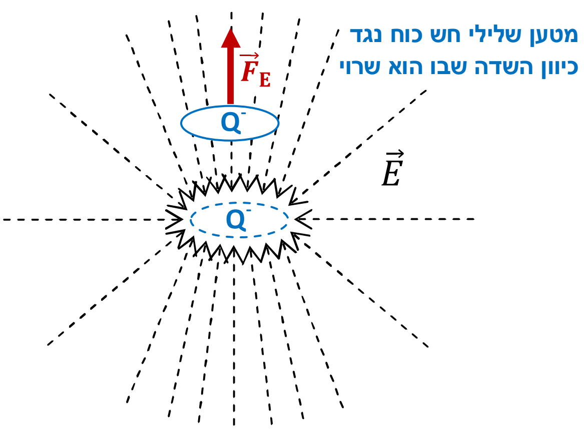
גודל הכוח החשמלי הוא $\mathbf{F_E = Q \cdot E}$

הערה: המטען Q מייצר אומנם בעצמו שדה חשמלי, אך שדה זה אינו רלוונטי לכוח החשמלי **שהוא עצמו חש** ולכן אינו מצויר כאן. כדי להבין מדוע מטענים מנוגדים "נמשכים זה לזה" ומטענים דומים "נדחים זה מזה" נתבונן באיורים הבאים:







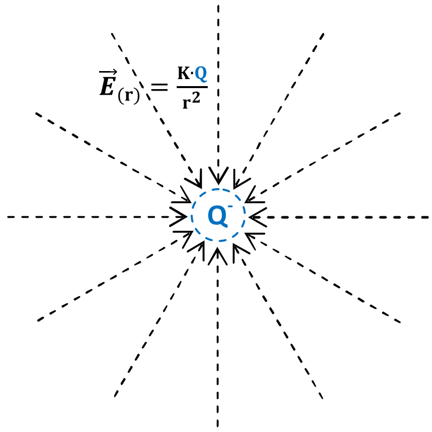


בחרנו להתייחס כאן לכוח החשמלי אשר פועל על המטען **העליון** בגין היותו שרוי בשדה החשמלי שמייצר המטען התחתון. יכולנו לעשות גם את ההפך – לצייר את השדה החשמלי שמייצר המטען העליון ואז להתייחס לכוח החשמלי אשר פועל בגינו על המטען **התחתון**. התוצאה הייתה יוצאת זהה בגודלה והפוכה בכיוונה, כצפוי מחוקו השלישי של ניוטון - "פעולה ותגובה".

לסיכום, על מטען חשמלי Q אשר שרוי בשדה חשמלי $\vec{E}$ פועל כוח חשמלי $\vec{F}_E$. המטען אינו "יודע" מהו מקורו של שדה זה אף על פי שלנו נדמה כי הוא "נמשך" אל מטען זה או "נדחה" ממטען אחר.

שדה חשמלי ממטען נקודתי

ממטען נקודתי (או כדורי), בוקעים קווי השדה החשמלי בכיוון רדיאלי. צפיפותם פוחתת לפי **ריבוע** המרחק מהמטען: הוכפל המרחק - פוחתת צפיפות הקווים פי ארבעה. שולש המרחק - פוחתת צפיפות הקווים פי תשעה, וכך הלאה.

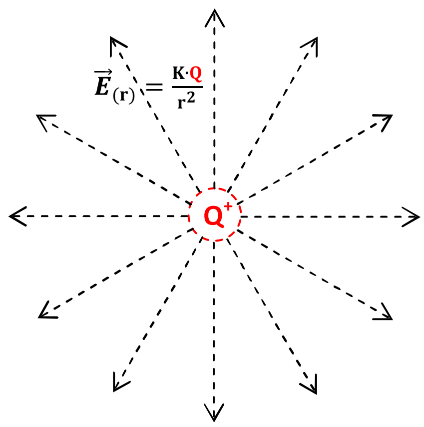


צפיפות קווי השדה החשמלי שמייצר מטען נקודתי/כדורי במרחב שסביבו, פוחתת לפי ריבוע המרחק ממנו. בהתאם לכך, הנוסחה לעוצמת (גודל) השדה החשמלי שמסביב למטען נקודתי/כדורי היא:

$$E_{(r)}=\frac{K\cdot Q}{r^2}$$

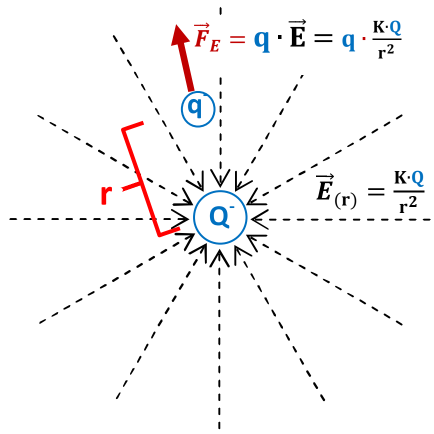
אכן, המרחק (**r**) מהמטען מופיע במכנה כשהוא בחזקה ריבועית, כצפוי.

$$K=9\cdot 10^9$$



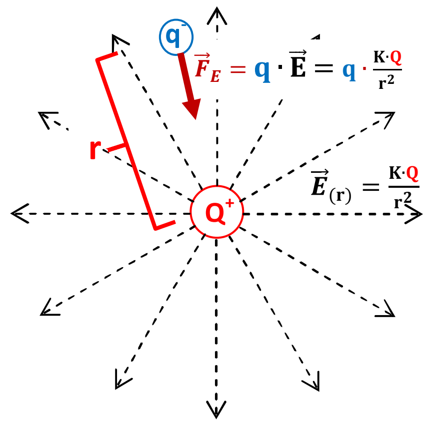
הכוח החשמלי הפועל על מטען אשר שרוי בשדה החשמלי של מטען נקודתי/כדורי

אמרנו קודם ש**גודלו** של הכוח החשמלי $\vec{F}_E$ אשר פועל על מטען חשמלי **q** השרוי בשדה חשמלי $\vec{E}$ הוא: $F_E=q\cdot E$.
לאור זאת, גודלו של הכוח החשמלי אשר פועל על מטען **q** השרוי בשדה החשמלי של מטען נקודתי/כדורי **Q** הינו $F_E=q\cdot\frac{K\cdot Q}{r^2}$

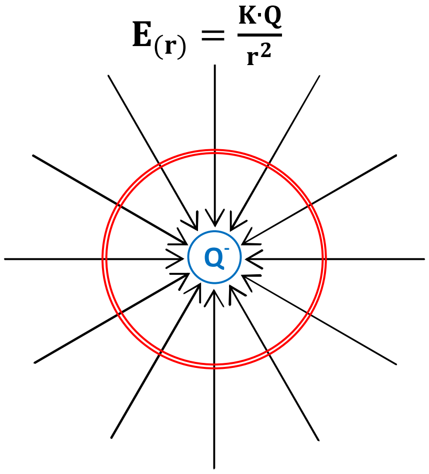


כאשר מטען חשמלי **q** שרוי בשדה החשמלי $\vec{E}$ של מטען נקודתי/כדורי **Q**, הכוח החשמלי הפועל עליו הינו: $F_E=q\cdot E=q\cdot\frac{K\cdot Q}{r^2}$

מתקבל במקרה זה חוק קולון המפורסם.
שימו לב לכך שהכוח החשמלי הפועל על המטען **q** נחלש/מתחזק ככל שהוא מתרחק/מתקרב למטען **Q**. לפיכך תאוצתו של **q** אינה קבועה, ואי אפשר להשתמש בנוסחאות הקינמטיקה לצורך חישובים.

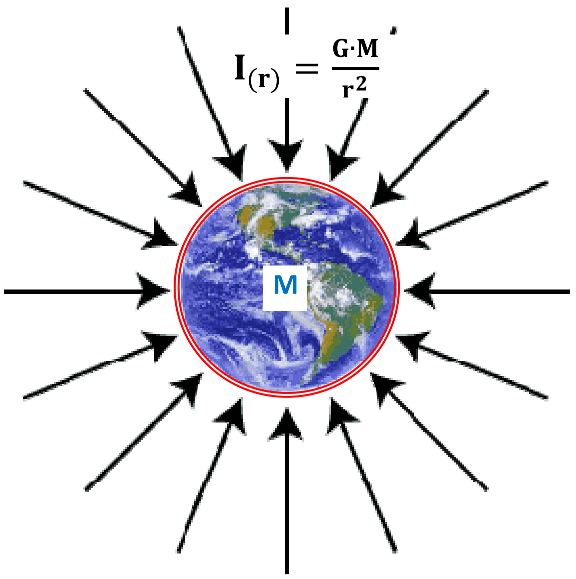


אנאלוגיה בין השדה החשמלי ($\vec{E}$) שמייצר סביבו מטען נקודתי/כדורי לבין שדה הכבידה ($\vec{I}$) שמייצרת סביבה מסה כדורית



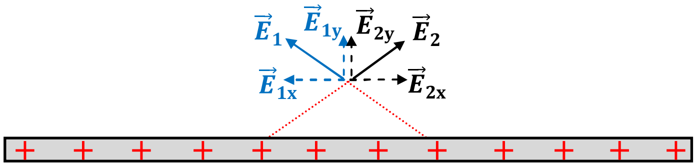
קל להבחין בדמיון שבין שני המקרים ולהסיק שכאשר מתרחקים מכדה"א נחלש שדה הכבידה **I** (ז"א תאוצת הכובד g) באותו האופן שבו נחלש השדה החשמלי כאשר מתרחקים מהמטען שמייצר אותו.

אנו מתייחסים אל g כאל קבוע רק כאשר המרחק ממרכז כדה"א גדול **והשינוי** במרחק קטן יחסית.
באותו האופן נוכל להתייחס לשדה החשמלי של מטען נקודתי/כדורי כקבוע רק כאשר המרחק ממרכז המטען גדול **והשינוי** במרחק קטן.

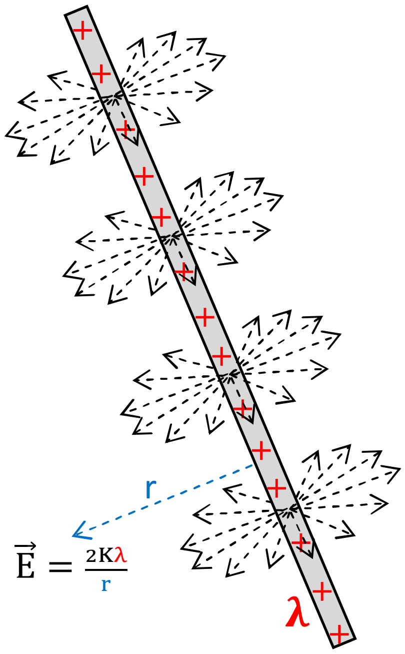


שדה חשמלי ממטען אורכי

מטען אורכי הינו שורה של מטענים נקודתיים. כ"א מהם מקרין קווי שדה לכל הכיוונים, אולם רק רכיבו המאונך לשורה של קו כזה בא לידי ביטוי. רכיבו המקביל לשורה מקוזז בהכרח ע"י רכיבו המקביל לשורה של קו אחר שמקורו במטען אחר:



באיור מוצגת נקודה שרירותית במרחב, וצמד רלוונטי (אחד מני רבים) של קווי שדה. קל להבין מדוע רכיביהם המקבילים לשורה מתקזזים בעוד רכיביהם המאונכים לשורה מתגברים זה את זה.



התוצאה היא קווי שדה **מאונכים לשורה** המתפשטים **בדו-מימד** (ז"א לאט), לעומת קווי השדה הרדיאליים של **מטען נקודתי/כדורי** אשר מתפשטים **בתלת-מימד** (ז"א מהר).
"מתפשטים לאט" פירושו שצפיפותם פוחתת **ביחס ישר** למרחק מהשורה ולא ביחס ריבועי.
הגיוני אם כן שבנוסחה לגודלו של השדה החשמלי ממטען אורכי, יופיע המרחק (**r**) במכנה כשהוא בחזקה ראשונה, ואכן כך הוא:

$$E = \frac{2K\lambda}{r}$$

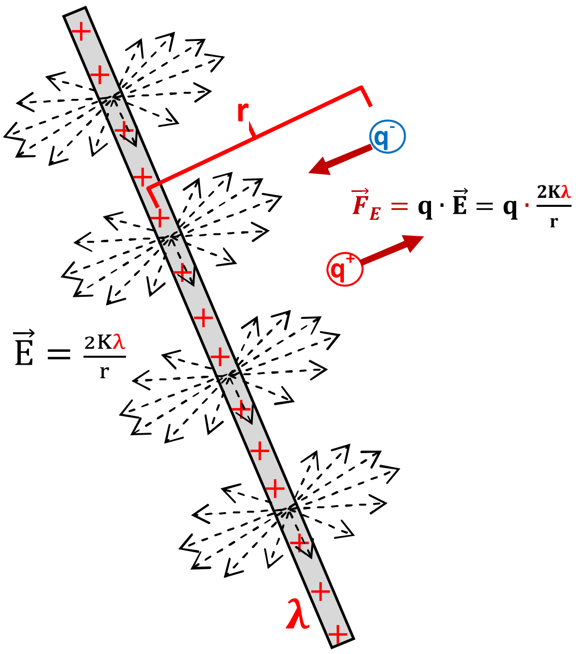
המרחק (**r**) מופיע אכן במכנה כשהוא בחזקה ראשונה, כצפוי.

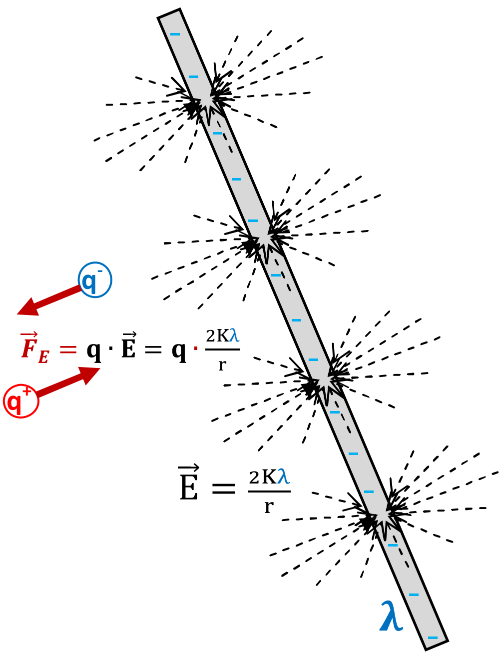
הניתוח שלעיל מניח שורת מטענים בעלת אורך אינסופי, כי רק בתנאי זה מקוזזים **כל** רכיבי השדה המקבילים לשורה. אם יש לשורה קצוות, אין הנוסחה תקפה בקרבתם.

מהי **λ** (למבדא)?
מאחר ומדובר בשורה אינסופית של מטענים, מדובר בכמות אינסופית של מטען.
ניתן רק לשאול "כמה קולונים מטען ישנם בכל מטר אורך?" והתשובה לכך היא λ.
λ נמדדת אם כן ב"קולון למטר" (C/m) ומכונה "צפיפות מטען אורכית".

הכוח החשמלי הפועל על מטען אשר שרוי בשדה החשמלי של מטען אורכי

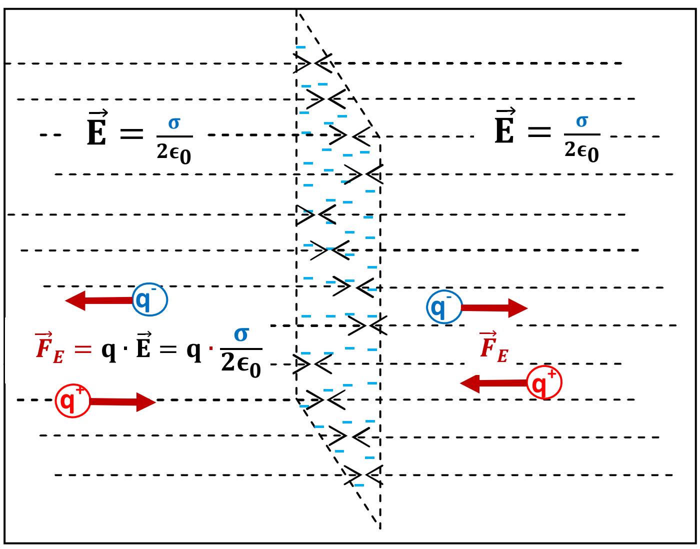
כתמיד, גודלו של הכוח החשמלי הינו $\mathbf{F_E = q \cdot E}$, כך שבמקרה דנן הנוסחה תהיה $\mathbf{F_E = q \cdot \frac{2K\lambda}{r}}$



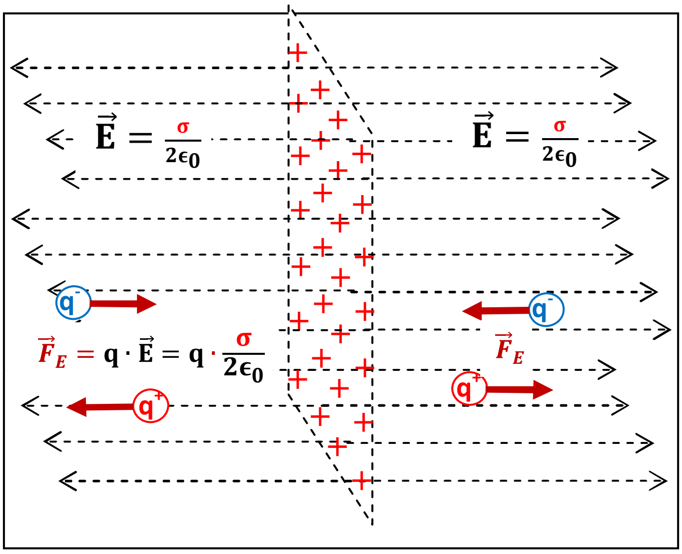


שדה חשמלי ממטען משטחי

מטען משטחי הינו משטח של מטענים נקודתיים. כ"א מהם מקרין קווי שדה לכל הכיוונים, אולם רק רכיבו המאונך למשטח של קו כזה בא לידי ביטוי. רכיבו המקביל למשטח מקוזז בהכרח ע"י רכיבו המקביל למשטח של קו אחר שמקורו במטען אחר. קל להבין מדוע אם מדמיינים את המשטח כשורות מקבילות של מטענים. הקיזוז של רכיבי השדה המקבילים לשורה אשר תואר בסעיף הקודם מתרחש כעת בכל כיוון מקביל למשטח, והתוצאה היא קווי שדה מאונכים למשטח ומקבילים זה לזה.



איור א': מטען משטחי שלילי "מושך" קווי שדה במאונך לו משני צדדיו. בהתאם לכך נמשכים אליו מטענים חיוביים ונדחים ממנו מטענים שליליים.



איור ב': מטען משטחי חיובי "דוחף" קווי שדה במאונך לו משני צדדיו. בהתאם לכך נמשכים אליו מטענים שליליים ונדחים ממנו מטענים חיוביים.

היותם של הקווים מקבילים משמעו צפיפות אחידה שלהם, אשר אינה משתנה כשמתרחקים מהמשטח או מתקרבים אליו. נובע מכך שעוצמת השדה החשמלי קבועה עבור כל נקודה במרחב, ואינה תלויה במרחקה של הנקודה מהמשטח.

אנו מצפים אם כך שבנוסחה לגודלו של השדה החשמלי ממטען משטחי המרחק (**r**) לא יופיע כלל, ואכן כך הוא: $\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

הניתוח שלעיל מניח משטח מטענים בעל גודל אינסופי, כי רק בתנאי זה מקוזזים **כל** רכיבי השדה המקבילים למשטח. אם יש למשטח קצוות, אין הנוסחה תקפה בקרבתם.

מהי σ (סיגמה) ?

מאחר ומדובר במשטח אינסופי של מטענים, מדובר בכמות אינסופית של מטען. ניתן רק לשאול "כמה קולונים מטען ישנם בכל מטר רבוע של שטח?" והתשובה לכך היא σ. σ נמדדת אם כן ב"קולון למ"ר" (C/m^2) ומכונה "צפיפות מטען משטחית".

מהו ϵ_0 (אפסילון 0) ?

ϵ_0 הינו הקבוע הדיאלקטרי של הריק. הוא מייצג את המידה שבה מתנגד מרחב ריק לבנייה של שדה חשמלי בתוכו, ומהווה אומדן למספר קווי השדה אשר נוצרים במרחב כזה **מכל יחידת מטען**. יחידותיו הן פאראד למטר: $\epsilon_0=8.854\cdot10^{-12}$ (F/m) .

אם נמלא את המרחב הריק בחומר, יגדל הקבוע הדיאלקטרי שלו, ז"א תגדל התנגדותו לבנייה של שדה חשמלי בתוכו.

מהו K (קיי) ?

$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9$, ז"א קיצור לצורך נוחות.

ניתן אם כן לרשום את הנוסחה לשדה החשמלי ממטען משטחי גם כך: $\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 2\pi K\sigma$

הכוח החשמלי הפועל על מטען אשר שרוי בשדה החשמלי של מטען משטחי

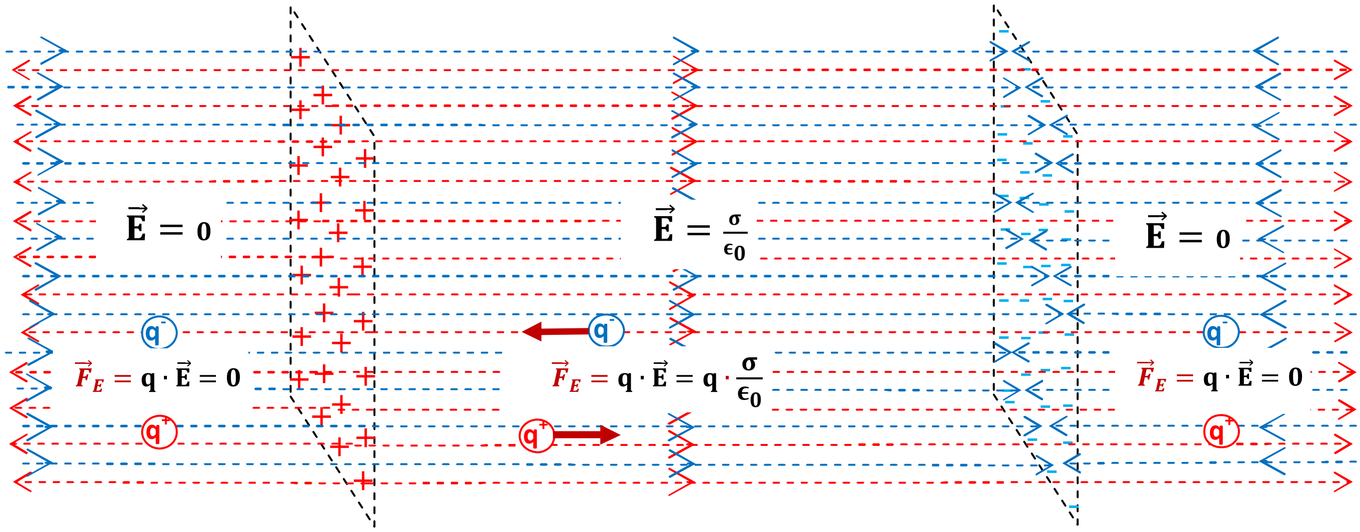
נאמר קודם כי גודלו של השדה החשמלי הנובע ממטען משטחי הינו קבוע, ז"א אינו משתנה מנקודה לנקודה במרחב.

נובע מכך שגם **הכוח החשמלי** הפועל על מטען אשר שרוי בשדה זה אינו משתנה מנקודה לנקודה במרחב, ושווה תמיד ל- $\vec{F}_E = \mathbf{q} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{q} \cdot \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$. אנו רשאים אם כן להשתמש כאן בנוסחאות הקינמאטיקה לצורך חישובים, מפני שתאוצת המטען קבועה:

$$\boxed{a = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{F_E}{m} = \frac{q \cdot E}{m} = \frac{q \cdot \sigma}{2m\epsilon_0}}$$

שדה חשמלי בין שני מטענים משטחיים

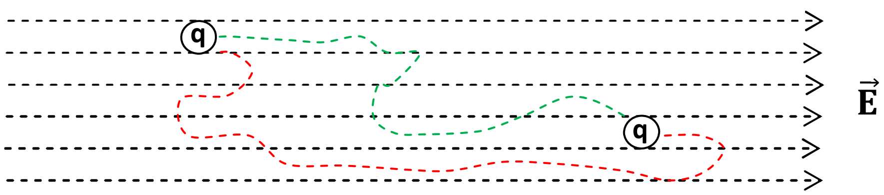
נבחן כעת את המקרה בו שני מטענים משטחיים שווי צפיפות אך הפוכי סימן נמצאים במקביל זה לזה:



במרחב שבין שני המשטחים מכוונים השדות של שניהם ימינה ומתקבל שדה חשמלי חזק (כפול מזה שהתקבל בסעיף הקודם). מחוצה להם מכוונים שדותיהם האחד כנגד השני כך שהשדה הכולל מתאפס.

שדה חשמלי הינו שדה משמר

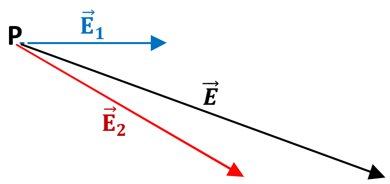
משמעות הדבר היא שהעבודה שמבצע הכוח החשמלי לאורך מסלול כלשהו תלויה אך ורק בנקודות ההתחלה והסוף של אותו מסלול ולא במסלול עצמו. בדוגמה שלהלן מבצע הכוח החשמלי את אותה העבודה בין אם המטען מובל במסלול הירוק ובין הוא מובל במסלול האדום. האנלוגיה לשדה כבידה שאף הוא שדה משמר ברורה כאן: כשגוף מועתק בשדה כבידה אין למסלול ההעתקה כל השפעה על העבודה המושקעת או המתקבלת בתהליך. רק נקודות ההתחלה והסוף של המסלול קובעות זאת.



האנאלוגיה לשדה כבידה מזכירה לנו השלכה נוספת של תכונת השימור:
כל עבודה אשר מושקעת בהעתקתו של מטען בשדה חשמלי אינה "מתבזבזת" אלא הופכת לאנרגיה פוטנציאלית.
העתקת מטען כנגד הכוח החשמלי משולה להרמת גוף כנגד שדה הכבידה. אם נרפה מהמטען הוא "ייפול" בחזרה והאנרגיה הפוטנציאלית שלו תומר לאנרגיה קינטית. בפרק הבא אשר עוסק בפוטנציאל חשמלי נרחיב על כך.

הצגה וקטורית של השדה החשמלי ועיקרון ההרכבה (סופרפוזיציה)

אמרנו קודם שהשדה החשמלי הוא וקטור אשר גודלו שקול לצפיפותם של קווי השדה.
אם נרצה לתאר את השדה החשמלי בנקודה P כלשהי, נצייר חץ היוצא ממנה ואשר אורכו מתאר את צפיפות קווי השדה בה.
אותו שדה חשמלי יכול להיות מיוצר ע"י מטען אחד, או ע"י מספר מטענים. במקרה השני ניתן לחשב את תרומתו לשדה של כל מטען בנפרד, ואז לחבר **וקטורית** את התרומות לקבלת השדה הכולל בנקודה. תהליך זה מכונה "הרכבה" או "סופרפוזיציה".
בדוגמה לעיל אשר דנה בשדה החשמלי שבין שני מטענים משטחיים, נקטנו בגישה זו מבלי לקרוא לה בשמה:
ראשית חישבנו את תרומתו של המשטח החיובי לשדה החשמלי בכל נקודה במרחב, אח"כ חישבנו את זו של המשטח השלילי, ואז חיברנו וקטורית את התרומות לקבלת 0 מחוץ למשטחים ו"כפל" שדה ביניהם.



באיור מוצגת נקודה P שבמרחב ושני וקטורי שדה $\vec{E}_1$ ו- $\vec{E}_2$ שבה. כ"א מהם מייצג צפיפות של קווי שדה בנקודה, קווים אשר נובעים בהתאמה ממטענים q_1 ו- q_2.
$\vec{E}_1$ מייצג צפיפות נמוכה של קווים המכוונים ימינה (מזרחה).
$\vec{E}_2$ מייצג צפיפות גבוהה של קווים המכוונים "ימינה למטה" (דרום-מזרח).
חיבור הווקטורי של $\vec{E}_1$ ו- $\vec{E}_2$ מניב את $\vec{E}$ - השדה השקול (הכולל) בנקודה P.