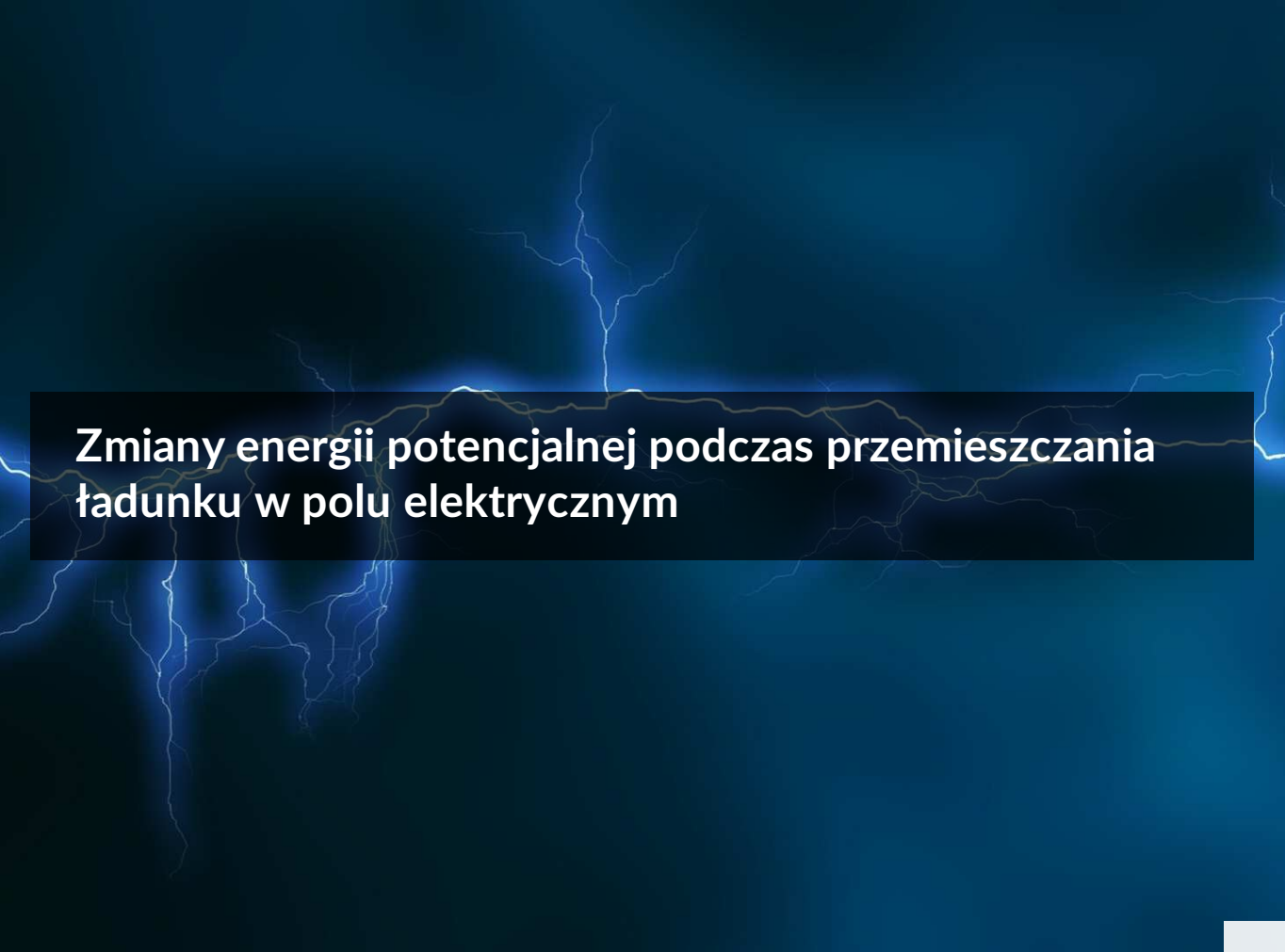




Zmiany energii potencjalnej podczas przemieszczania ładunku w polu elektrycznym

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Symulacja interaktywna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Zmiany energii potencjalnej podczas przemieszczania ładunku w polu elektrycznym

Czy to nie ciekawe?

Na całkowitą energię cząstki składa się energia kinetyczna i energia potencjalna. Energia kinetyczna zależy od prędkości, natomiast energia potencjalna zależy od położenia cząstki. Zatem podczas przesuwania cząstki wartość jej energii potencjalnej będzie się zmieniać. Postać energii potencjalnej zależy od charakteru oddziaływań cząstki z otoczeniem. I choć jest ona inna dla oddziaływań elektrostatycznych (Rys. a.) niż dla grawitacyjnych, jest wiele analogii pomiędzy tymi dwoma rodzajami układów, które ułatwiają zrozumienie związków pomiędzy zmianą energii potencjalnej a pracą.



Rys. a. Elektryzujące się włosy

Twoje cele

Pracując z tym e-materiałem:

- zbadasz związek między natężeniem pola elektrycznego, a potencjałem elektrycznym,
- dowiesz się, jak zmienia się energia potencjalna ładunku podczas przesuwania,
- poznasz analogię między oddziaływaniami elektrostatycznymi i grawitacyjnymi,
- zbadasz przy pomocy symulacji interaktywnej zależność energii potencjalnej ładunku od położenia.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Natężenie pola elektrycznego a potencjał elektryczny

Do opisu pola elektrycznego zwykle używamy dwóch wielkości fizycznych: natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ oraz potencjału elektrycznego V . Te dwie wielkości są ze sobą ściśle związane i od charakteru badanego problemu zależy, którą wielkością się posługujemy (Rys. 1.). Podobnego wyboru dokonujemy rozważając np. zachowanie masywnej cząstki w polu grawitacyjnym. Jeśli interesuje nas zależność położenia od czasu, wyznaczamy siły działające na cząstkę i rozwiązujemy odpowiednie równanie ruchu, wynikające z drugiej zasady dynamiki Newtona. Jeśli jednak interesuje nas prędkość, z jaką spadająca swobodnie cząstka uderzy w Ziemię, posługujemy się pojęciem energii i stosujemy zasadę zachowania energii.



Rys. 1. Komora iskrowa – detektor promieniowania stosowany w fizyce cząstek elementarnych do badania cząstek subatomowych o wysokiej energii. Do dwóch układów naprzemiennych płytek przykładają się silny spadek potencjału lub napięcie w postaci krótkiego impulsu. Wzdłuż drogi pokonywanej przez naładowaną cząstkę, która wpada do komory lub w niej powstaje, przeskakują iskry między płytkami. Przyczyną tego są wytworzone przez jonizowane cząsteczki gazu, będące nośnikami prądu. Ścieżka jonizacji pozostaje widoczna w komorze przez milionową część sekundy.

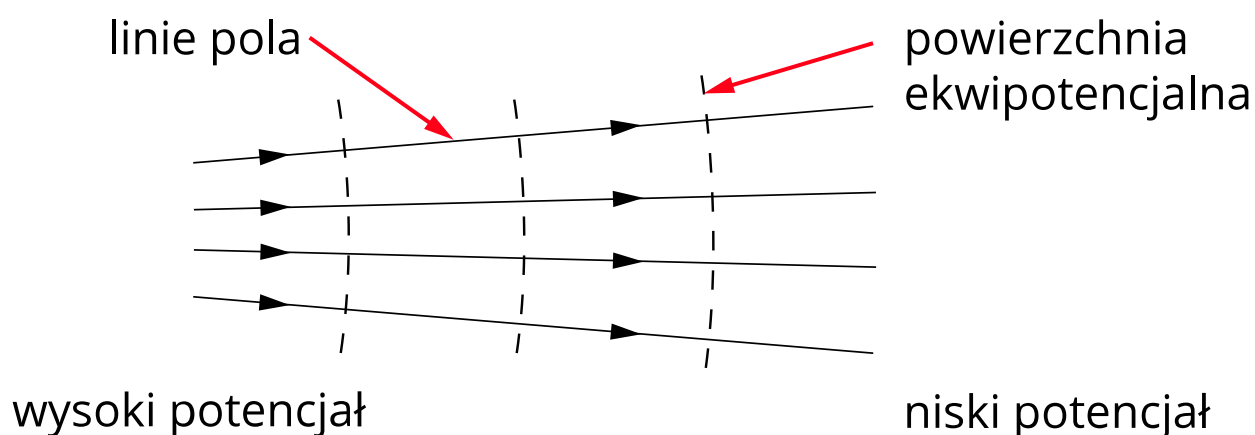
Natężenie pola elektrycznego jest wielkością wektorową, równą stosunkowi siły działającej na próbny ładunek do wartości tego ładunku:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Zatem natężenie pola elektrycznego będzie odpowiednią wielkością do rozważania, jeżeli to właśnie siła, z jaką pole elektryczne działa na ładunek, interesuje nas najbardziej. Natomiast jeśli chcemy skupić się na **pracy potrzebnej do przesunięcia ładunku**, to właśnie potencjał elektryczny będzie najbardziej odpowiedni do takich rozważań.

Potencjał elektryczny to wielkość skalarna, wyrażana w woltach. Potencjał elektryczny równy jest stosunkowi energii potencjalnej ładunku próbnego do jego wartości:

$$V = \frac{E_p}{q}$$

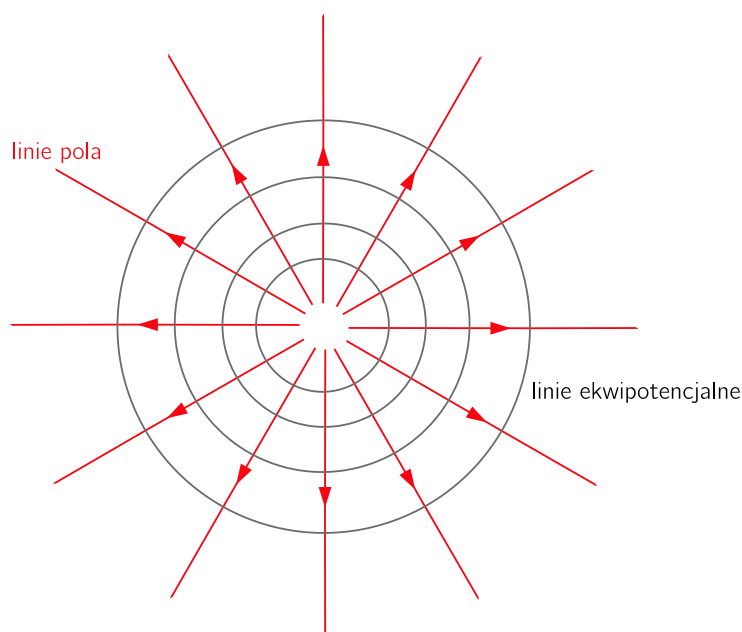


Rys. 2. Związek między natężeniem pola elektrycznego, obrazowanym przez linie pola, a potencjałem.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Aby zrozumieć związek pomiędzy natężeniem pola elektrycznego, a potencjałem, przeanalizujemy powyższy rysunek (Rys. 2.). Linie pola są graficzną reprezentacją

natężenia pola elektrycznego. Wektor $\vec{E}$, w każdym punkcie przestrzeni, jest styczny do linii pola, a ich gęstość jest proporcjonalna do wartości natężenia. Zwrot linii pola pokrywa się ze zwrotem wektora $\vec{E}$. Linie te zawsze są skierowane od wyższego do niższego potencjału. Czyli przesuając punktowy ładunek dodatni wzdłuż linii pola, zgodnie z ich zwrotem, potencjał może wyłącznie maleć. Tym szybciej, im większa jest gęstość linii pola. Jednocześnie oznacza to, że przesuując się prostopadłe do linii pola, potencjał elektryczny nie zmienia się (Rys. 3.). Linie pola elektrycznego są zawsze prostopadłe do [powierzchni ekwipotencjalnej](#), w każdym jej punkcie. Powierzchnie ekwipotencjalne na omawianym rysunku mają postać przerywanych krzywych, które w rzeczywistości są częścią wspólną przecięcia powierzchni ekwipotencjalnej z płaszczyzną rysunku.

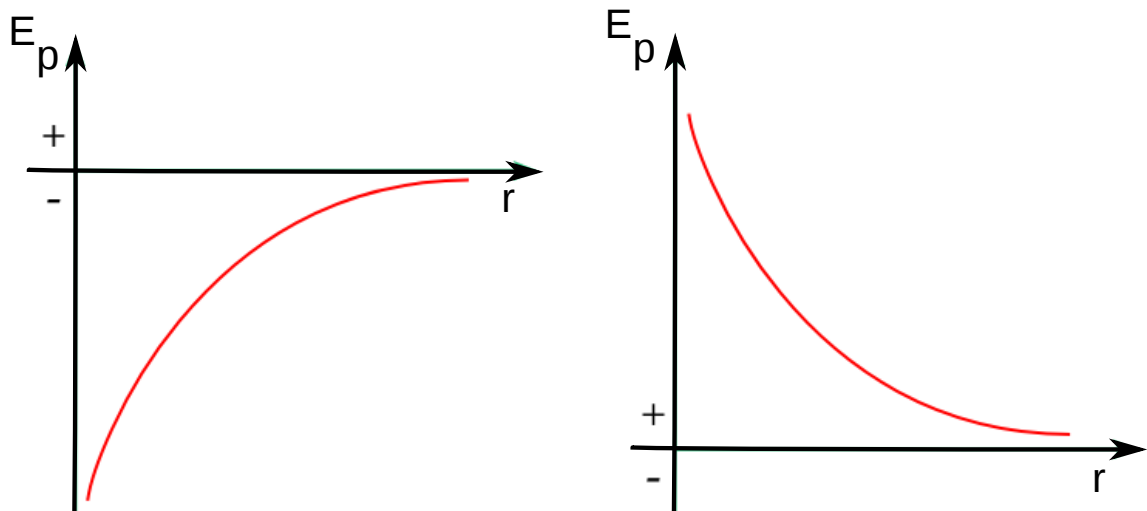


Rys. 3. Izolowany ładunek punktowy z zaznaczonymi na czerwono liniami pola i na czarno liniami ekwipotencjalnymi. Potencjał jest taki sam wszędzie wzdłuż linii ekwipotencjalnych, co oznacza, że praca wykonana przy przeniesieniu ładunku próbnego wzdłuż tych linii jest zerowa. Należy wykonać pracę, aby przenieść ładunek między liniami ekwipotencjalnymi. Linie stałego potencjału są zawsze prostopadłe do linii pola.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Jeśli w polu elektrycznym umieścimy swobodny ładunek dodatni, bez prędkości początkowej, będzie on poruszać się wzdłuż linii pola. Oznacza to, że potencjał elektryczny, w jakim się znajduje ładunek, będzie stale malał, aż do momentu, w którym ładunek znajdzie się w minimum potencjału. Jeśli umieścimy ładunek dodatni

w minimum potencjału, ładunek ten pozostanie nieruchomy. Ładunek będzie mógł opuścić minimum potencjału tylko wtedy, gdy nadamy mu odpowiednią prędkość (Rys. 4.).



Rys. 4. W przypadku ładunków różnoimiennych, których iloczyn jest ujemny, energia jest ujemna. Jest to zrozumiałe, gdyż w tym przypadku pracę przy przesunięciu ładunku z nieskończoności do danego punktu wykonują siły pola i energia potencjalna maleje od zera w nieskończoności do określonej wartości ujemnej w danym punkcie.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Analogiczną sytuacją do opisaną, jest spadek swobodny ciała w polu grawitacyjnym. W trakcie spadku energia potencjalna ciała może tylko maleć. Wzrost energii potencjalnej jest możliwy wyłącznie kosztem energii kinetycznej, np. przy podrzucaniu ciała.

Energia potencjalna ładunku jest iloczynem jego wartości i potencjału elektrycznego: $E_p = q \cdot V$. Jeśli więc ładunek dodatni przemieszcza się ku mniejszemu potencjałowi elektrycznemu, również jego energia potencjalna maleje. Swobodny ładunek ujemny dozna przemieszczenia w polu elektrycznym w stronę przeciwną, czyli ku rosnącemu potencjałowi elektrycznemu, jednak nadal jego energia potencjalna będzie maleć.

Zmiana energii potencjalnej

Pole elektryczne, podobnie jak pole grawitacyjne, jest polem zachowawczym. Oznacza to, że praca przeniesienia ładunku w polu nie zależy od drogi, a jedynie od położenia początkowego i końcowego. Korzystając ze związku pomiędzy energią potencjalną ładunku, a wartością potencjału elektrycznego, w jakim znajduje się ładunek, możemy zapisać równanie na zmianę energii potencjalnej ładunku:

$$\Delta E_p = q \cdot \Delta V$$

Czyli zmiana energii potencjalnej jest wprost proporcjonalna do zmiany potencjału elektrycznego. Wielkość ΔV to różnica wartości potencjału elektrycznego między wartością końcową (V_B), a początkową (V_A). Różnicę tę nazywamy napięciem elektrycznym i oznaczamy U :

$$\Delta V = V_B - V_A = U_{AB}$$

Zwróć uwagę na kolejność indeksów w powyższym równaniu.

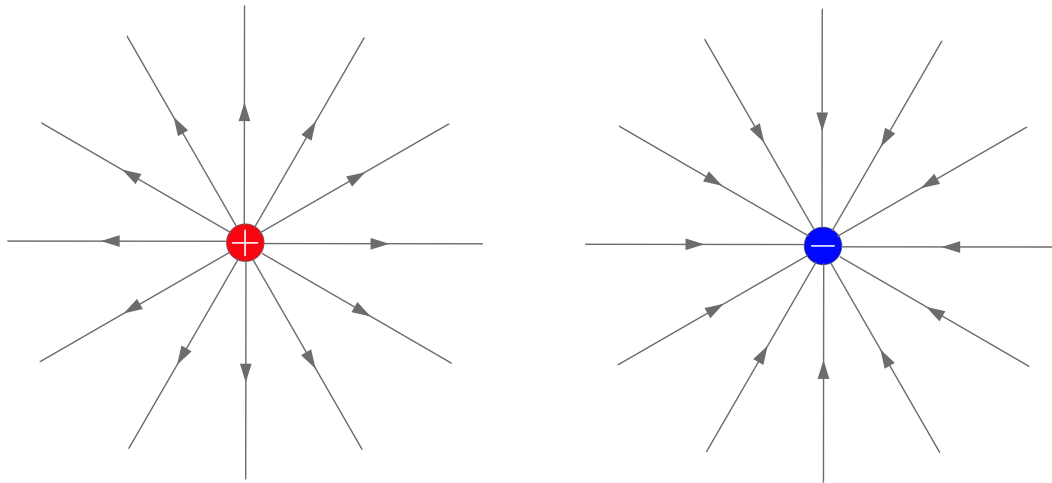
Zatem przesuując ładunek elektryczny z punktu A do punktu B jego energia potencjalna zmieni się o:

$$\Delta E_p = q \cdot U_{AB}$$

Jednocześnie będzie to wartość pracy, jaką musiała wykonać zewnętrzna siła, by dokonać tego przesunięcia.

Pole centralne

Pole centralne obserwujemy wokół ładunków punktowych, jak również wokół naładowanych kul, naładowanych zarówno powierzchniowo, jak i objętościowo (Rys. 5.). Więcej na ten temat w e-materiale „Co to jest pole centralne?”.



Rys. 5. Rysunek przedstawia linie pola wychodzące z punkowego ładunku. Strzałki na liniach skierowane są na zewnątrz lub do wewnątrz w zależności od znaku ładunku.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Charakterystyczną cechą pola centralnego jest zmniejszanie wartości potencjału wraz z odległością r od centrum pola według zależności $\frac{1}{r}$. Zależność potencjału elektrycznego od odległości od punkowego ładunku Q ma postać:

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

Zatem powierzchnie ekwipotencjalne pola centralnego są sferami.

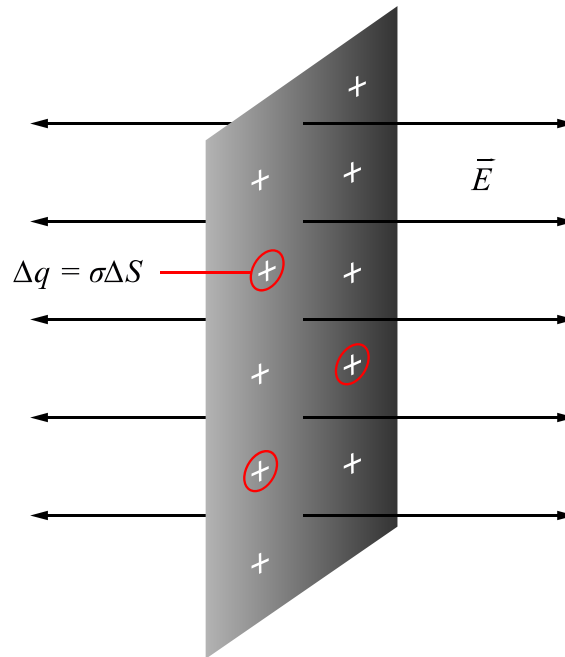
Zmiana energii potencjalnej ładunku próbnego q przy przesuwaniu w polu centralnym z punktu A do punktu B zależy wyłącznie od początkowej i końcowej odległości tych punktów od centrum pola (więcej na ten temat w e-materiale „Jak definiuje się potencjał pola i jaka jest jego jednostka?”):

$$\Delta E_p = \frac{q \cdot Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Pole jednorodne

Pole jednorodne może być wytwarzane przez nieskończenie dużą naładowaną jednorodnie płaszczyznę (Rys. 6.). Więcej na ten temat w e-materiale „Co to jest pole

jednorodne?”. Jednak możemy pole uznać w przybliżeniu za jednorodne w pobliżu skończonej płaszczyzny, pod warunkiem, że rozważamy punkty w niedużej odległości od jej powierzchni, w porównaniu z jej rozmiarem (np. wewnątrz płaskiego kondensatora).



Rys. 6. Nieskończenie duża i nieskończenie cienka przewodząca płyta naładowana dodatnio.

Czerwone kółka oznaczają przykładowe fragmenty powierzchni ΔS , na których zgromadzony jest ładunek Δq .

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Linie pola jednorodnego są równoległe, zatem ich gęstość jest stała. Oznacza to, że spadek potencjału wzdłuż linii pola następuje jednostajnie. Nie możemy więc powiedzieć, że w nieskończoności potencjał elektryczny znika, jak ma to miejsce w przypadku pola centralnego. Podobnie jak nie ma od góry ustalonego położenia w jednorodnym polu grawitacyjnym, dla którego wartość energii potencjalnej jest zerowa. Nie ma to jednak znaczenia, ponieważ fizyczną interpretację ma nie bezwzględna wartość potencjału elektrycznego, a jedynie jego zmiana podczas przesuwania ładunku.

Wprowadzając układ odniesienia, w którym oś x pokrywa się z kierunkiem pola jednorodnego (czyli $\vec{E} = [E, 0, 0]$), możemy zapisać równanie na zmianę energii potencjalnej podczas przesuwania ładunku q w polu jednorodnym:

$$\Delta E_p = q \cdot E \cdot (x_A - x_B)$$

Zmiana energii potencjalnej, a praca

Zmiana energii potencjalnej ładunku równa jest całkowitej pracy wykonanej nad układem przez pewną zewnętrzną siłę. Wzrost energii potencjalnej oznacza, że wykonano dodatnią pracę. By wykonać dodatnią pracę, zewnętrzna siła musi przeciwdziałać sile, z jaką pole elektryczne oddziałuje na ładunek.

Należy pamiętać, że praca zewnętrznej siły nie jest tożsama z pracą pola. Pole elektryczne może przesunąć swobodny ładunek elektryczny wyłącznie zmniejszając energię potencjalną ładunku. Pole elektryczne, przesuując ładunek, wykona taką samą pracę, co do wartości bezwzględnej, jaką wykonałaby siła zewnętrzna. Praca ta, przy analogicznym przesunięciu, będzie miała znak przeciwny.

Słowniczek

powierzchnia ekwipotencjalna

(*ang.: equipotential surface*) powierzchnia, na której wartość potencjału elektrycznego jest stała. Przesunięcie ładunku po powierzchni ekwipotencjalnej nie wymaga pracy. W każdym punkcie powierzchni ekwipotencjalnej linie pola elektrycznego są do niej prostopadłe.

siła zachowawcza

(*ang.: conservative force*) siła, której praca nie zależy od drogi, po której praca jest wykonywana, a jedynie od położenia punktów początkowego i końcowego. Przykłady sił zachowawczych to siła grawitacji, siła Coulomba, siła sprężystości.

Symulacja interaktywna

Pobaw się przesuwaniem ładunku w polu elektrostatycznym

Polecenie 1

Symulacja pozwala zbadać zmianę energii potencjalnej punkowego ładunku podczas przesuwania w polu elektrostatycznym. Kliknij myszką na ładunek i przesuń go z miejsca na miejsce. Sprawdź, jak zmienia się jego energia potencjalna podczas przesuwania wzdłuż linii pola i prostopadle do linii pola. Kliknij podwójnie na ładunek, by zmienić jego znak. Zaobserwuj, jaki wpływ na zmianę energii podczas przesuwania ma znak ładunku. Eksperyment powtórz dla pola jednorodnego.

Polecenie 2

Czy zmiana znaku ładunku podczas przesuwania go wzdłuż linii ekwipotencjalnej ma znaczenie dla wartości zmiany energii potencjalnej?

Polecenie 3

Sprawdź, posługując się symulacją, że zmiana energii podczas przesuwania dowolnego ładunku po drodze zamkniętej w jednorodnym polu elektrostatycznym jest równa zero.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Zaznacz poprawne odpowiedzi w tekście.

Powierzchnia ekwipotencjalna to powierzchnia, na której wartość potencjału elektrycznego jest ☐ stała ☐ / ☐ maksymalna ☐ / ☐ prostopadła do linii pola elektrostatycznego ☐ / ☐ styczna do linii pola elektrycznego ☐.

Ćwiczenie 2



Wstaw właściwe wyrażenie:

Przesuwając się wzdłuż linii pola, zgodnie z ich zwrotem, może wyłącznie maleć.

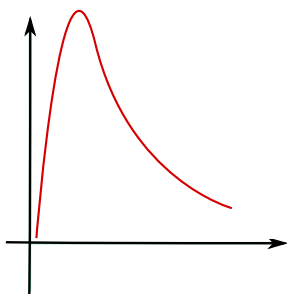
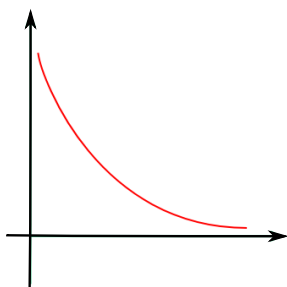
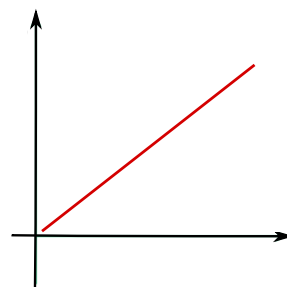
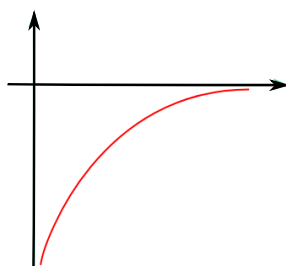
energia elektryczna

potencjał elektryczny

Ćwiczenie 3



Zaznacz wykres, który przedstawia energię potencjalną ładunku próbnego w polu o źródle punktowym.

☐☐☐☐

Ćwiczenie 4



Ujemny ładunek porusza się wzdłuż linii pola, podczas gdy jego energia potencjalna zmniejsza się wprost proporcjonalnie do jego położenia. Które zdanie jest prawdziwe? Ładunek porusza się w polu...

☐ jednorodnym przeciwnie do zwrotu linii pola.

☐ jednorodnym zgodnie ze zwrotem linii pola.

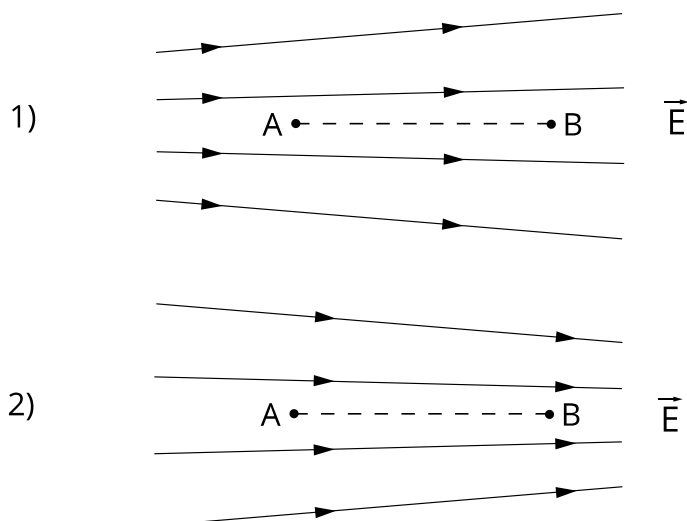
☐ centralnym zgodnie ze zwrotem linii pola.

☐ centralnym przeciwnie do zwrotu linii pola.

Ćwiczenie 5



Ujemny ładunek zostaje przesunięty z punktu A do punktu B. W której z dwóch przedstawionych na rysunku sytuacji energia potencjalna bardziej wzrośnie?



☐ 1.

☐ 2.

Ćwiczenie 6



Dodatni ładunek q zbliżamy do ładunku ujemnego $-Q$ z odległości $2R$ na odległość R . Ile wyniesie zmiana energii potencjalnej przesuwanego ładunku?

Ćwiczenie 7



Dwa ładunki tego samego znaku były umieszczone blisko siebie, lecz nie mogły się swobodnie poruszać. W pewnej chwili jeden z ładunków uwolniono, dzięki czemu zaczął się poruszać. Po przebyciu bardzo dużej odległości jego energia kinetyczna wyniosła E_k . Co możemy powiedzieć o jego energii potencjalnej na początku i na końcu eksperymentu?

Ćwiczenie 8



W której z jednostek nie możemy wyrazić zmiany energii potencjalnej ładunku?

☐ J

☐ V

☐ $A \cdot V \cdot s$

☐ $V \cdot C$

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Tomasz Gradowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Zmiany energii potencjalnej podczas przemieszczania ładunku w polu elektrycznym
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	Cele kształcenia – wymagania ogólne II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji lub doświadczeń oraz wnioskowanie na podstawie ich wyników. Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 11) opisuje przebieg doświadczenia lub pokazu; wyróżnia kluczowe kroki i sposób postępowania oraz wskazuje rolę użytych przyrządów i uwzględnia ich rozdzielczość; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. VII. Elektrostatyka. Uczeń: 8) analizuje pracę jako zmianę energii potencjalnej podczas przemieszczenia ładunku w polu elektrycznym; posługuje się pojęciem potencjału pola i jego jednostką.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. stosuje związek między natężeniem pola elektrycznego, a potencjałem elektrycznym, 2. tłumaczy, jak zmienia się energia potencjalna ładunku podczas przesuwania, 3. opisuje analogię między oddziaływaniami elektrostatycznymi i grawitacyjnymi, 4. bada przy pomocy symulacji interaktywnej zależność energii potencjalnej ładunku od położenia.
Strategie nauczania	IBSE
Metody nauczania	wykład informacyjny, eksperyment naukowy
Formy zajęć:	praca w parach, praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	Generator Van de Graaffa (ew. maszyna elektrostatyczna), podłużna świetlówka neonowa
Materiały pomocnicze:	-
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel przypomina różnicę pomiędzy energią potencjalną i kinetyczną, np. na przykładzie pola grawitacyjnego.	
Faza realizacyjna:	

Nauczyciel przeprowadza eksperyment: podłużna świetlówka zbliżana jest do naładowanej czaszy generatora. Zapala się przy ustawieniu prostopadłym do powierzchni, gaśnie, gdy ustawiona stycznie (inny wariant przy niewielkiej świetlówce: zawieszamy świetlówkę na nitce tak, by mogła się swobodnie obracać wokół środka. Trzymając na „wędce”, zbliżamy do naładowanej czaszy. Obracająca się świetlówka zapala się i gaśnie.)

Uczniowie próbują wyjaśnić zaobserwowane zjawisko. Rozpoczyna się dyskusja, każdy zespół szuka wyjaśnienia tego zjawiska rodem z „Gwiezdnych Wojen”. Ponieważ potencjał Ziemi wynosi zero, linie pola elektrycznego w jej pobliżu biegą prostopadle do jej powierzchni. Jeśli w polu elektrycznym umieścimy świetlówkę (najlepiej wzdłuż linii pola elektrycznego, tzn. prostopadle do powierzchni ziemi) możemy pobudzić ją do świecenia. Zachodzą wówczas zjawiska takie jak po podłączeniu lampy do prądu – naładowane cząstki będą poruszały się w polu elektrycznym, zderzając się z atomami rtęci i wzbudzając je.

Nauczyciel wyjaśnia związek pomiędzy kierunkiem linii pola elektrycznego, a różnicą potencjałów elektrycznych.

Posługując się przykładami rachunkowymi, nauczyciel demonstruje wyznaczanie zmiany energii potencjalnej przy przesuwaniu ładunku w polu jednorodnym i centralnym.

Faza podsumowująca:

Uczniowie w parach rozwiązują zadania 1-4.

Praca domowa:

Uczniowie samodzielnie próbują rozwiązać zagadnienia 5-8.

**Wskazówki
metodyczne opisujące
różne zastosowania
danego multimedium**

Multimedium może być wykorzystane jako wspomaganie rozwiązywania zadań rachunkowych. Może służyć uczniom nieobecnym na lekcji do samodzielnego zapoznania się z tematem.