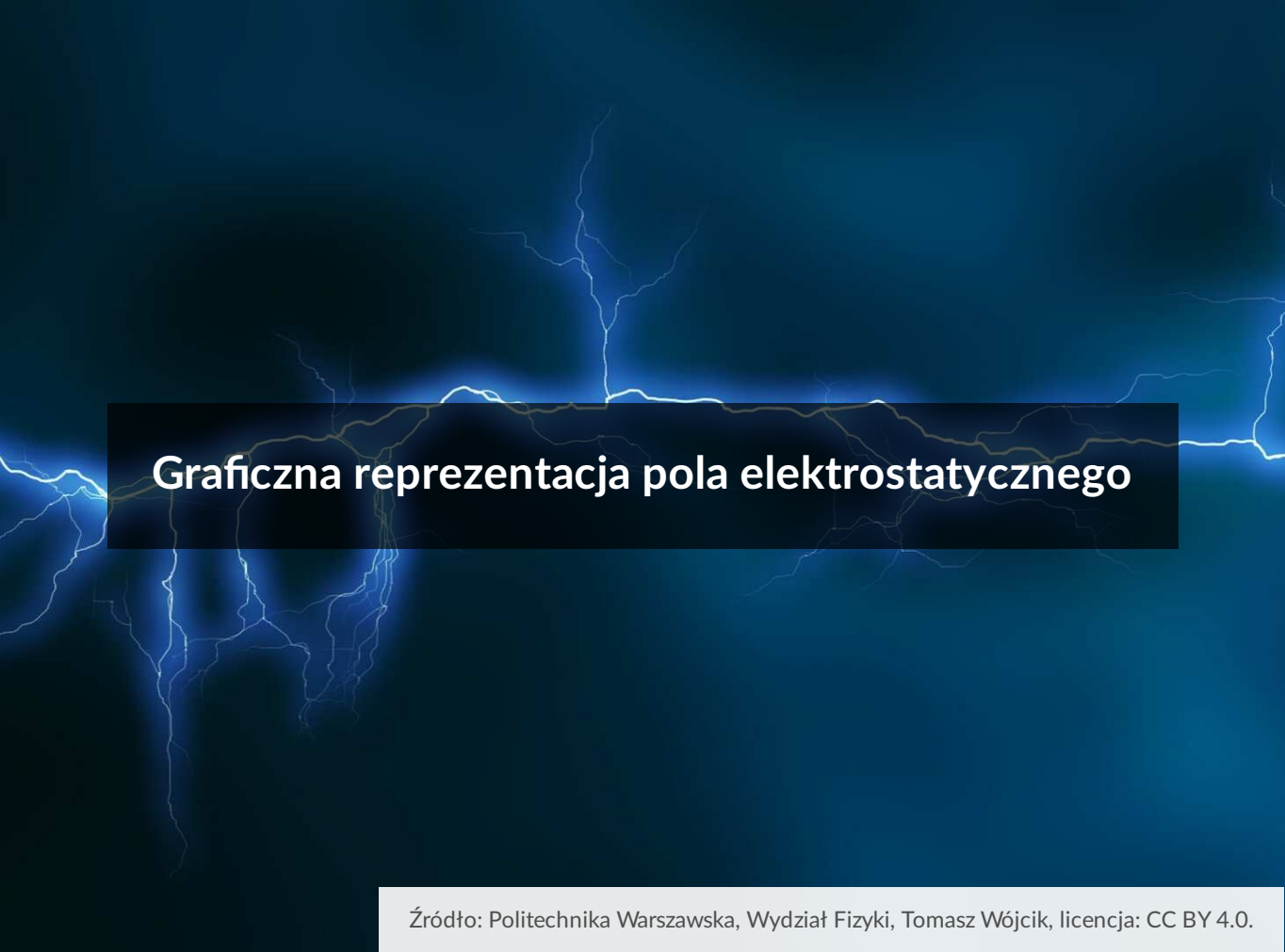




Graficzna reprezentacja pola elektrostatycznego

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

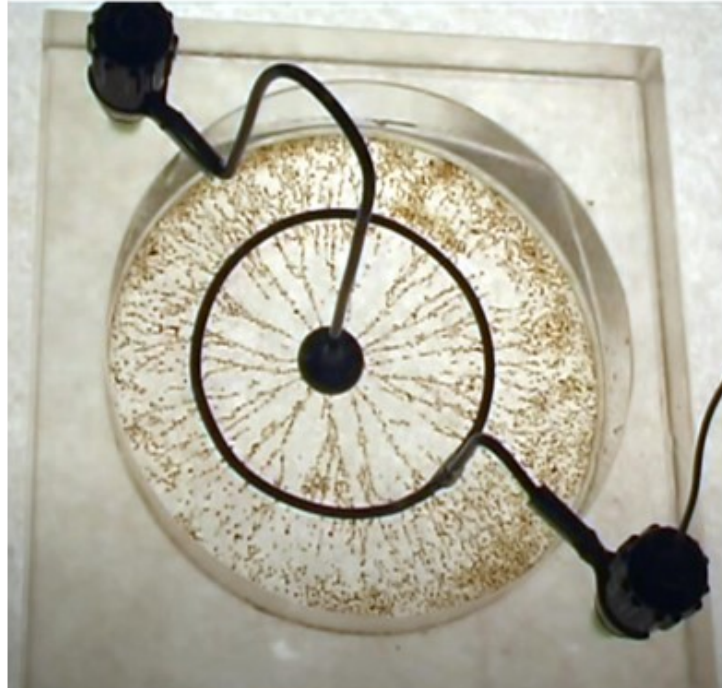


Graficzna reprezentacja pola elektrostatycznego

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

Czy to nie ciekawe?

Wykonując prosty eksperyment, polegający na zanurzeniu naładowanego przewodnika w płynie z drobinkami np. kaszy, możemy zaobserwować zjawisko polaryzacji, które ujawni strukturę pola elektrycznego. Eksperyment taki przywodzi na myśl metodę, stosowaną w matematyce i fizyce, polegającą na graficznej prezentacji pól wektorowych za pomocą linii pola.



Rys. a. Obserwacja zjawiska polaryzacji

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

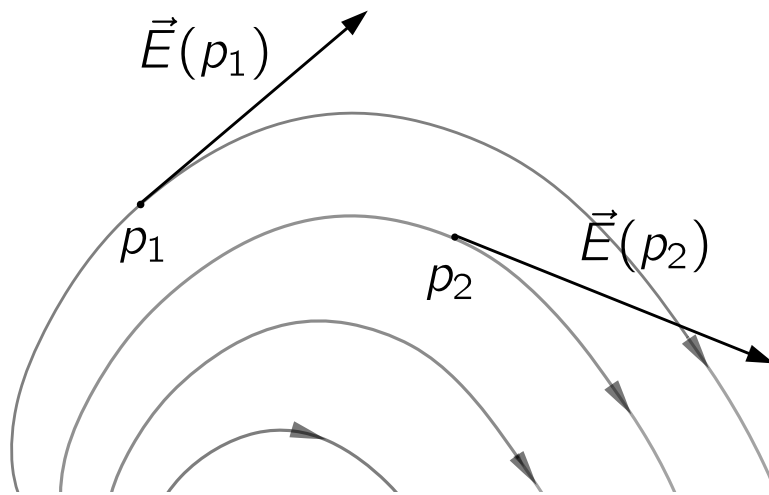
Twoje cele

- dowiesz się, czym są linie pola,
- zobaczysz kształt linii pola centralnego, jednorodnego i pola generowanego przez dipol elektryczny,
- poznasz interpretację gęstości linii pola,
- wykorzystasz zdobytą wiedzę do rozwiązania problemów i zadań.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Pole elektrostatyczne jest polem wektorowym, czyli każdemu punktowi przestrzeni przyporządkowuje wektor charakteryzujący to pole - w tym wypadku wektor natężenia pola elektrycznego. Pole takie można więc sobie wyobrazić jako zbiór nieskończenie wielu wektorów o wszystkich możliwych punktach zaczepienia, różniących się długością, kierunkiem i zwrotem. By zobrazować pole wektorowe w sposób znacznie bardziej intuicyjny niż zbiór nieskończenie wielu wektorów, stosujemy linie pola (Rys. 1.). Oto założenia takiej graficznej reprezentacji:



Rys. 1. Linie pola wektorowego i styczne do nich wektory natężenia pola

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

- **całą przestrzeń wypełniają** ciągłe linie, ale **rysujemy tylko niektóre z nich**.
- w każdym punkcie przestrzeni wektor natężenia $\vec{E}$ jest styczny do linii pola elektrycznego; linie mają więc określony zwrot, który oznaczamy odpowiednio skierowanym grotem na linii,
- ładunki dodatnie są początkami linii pola, ładunki ujemne są ich końcami,
- liczba rysowanych linii pola wychodzących z (bądź wchodzących do) ładunku jest wprost proporcjonalna do wartości tego ładunku.

Uwaga!

1. Pierwsza z powyższych reguł nakłada od razu silne ograniczenie na zakres opisywalnych w ten sposób (w pełni) układów - do takich, które mają pewną symetrię i wyróżniają pewną płaszczyznę. **To na niej rysujemy linie, z góry wiedząc, że się w niej**

zawierają. Nie jest prawdą, że dowolny układ np. ładunków punktowych wytwarza pole, którego linie spełniają ten warunek.

Dopóki jesteśmy w stanie zapewnić, że płaszczyzna ta będzie zawierała zestaw linii pola i będzie on dla naszego układu ładunków „reprezentatywny” – opis będzie pełny. Jeśli natomiast grozi nam konieczność rzutowania pola, musimy się liczyć ze stratą istotnej informacji i sięgnąć po inne środki wizualizacji. Rysowanie pól wektorowych w wersji trójwymiarowej jest swego rodzaju sztuką, często lepiej jest stworzyć animację pola zamiast kilkunastu rysunków.

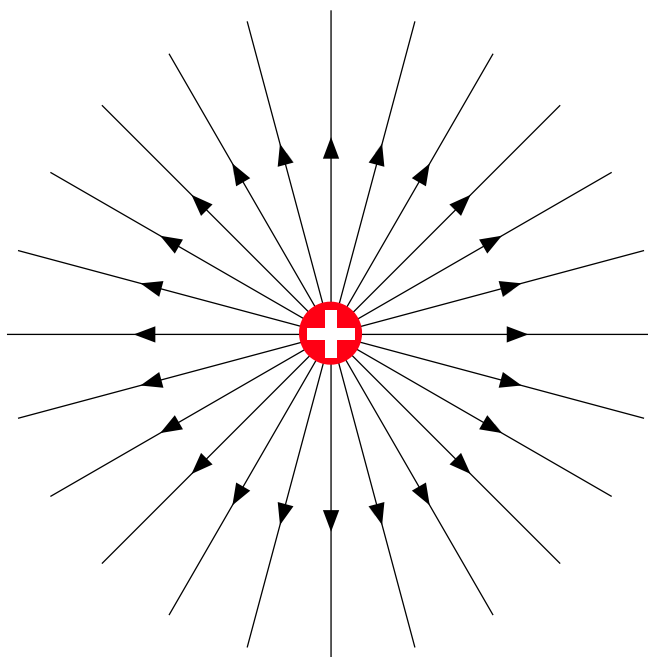
2. Ostatni z punktów oznacza, że tzw. „zagęszczenie” czy „gęstość” linii pola mówi nam o względnych zmianach natężenia pola na różnych obszarach. Zauważmy, że wybranie zbyt małego obszaru i stwierdzenie, że nie ma narysowanych linii pola przezeń przechodzących, wcale nie oznacza, że na obszarze tym pole jest zerowe.

Liczba rysowanych linii jest – dosłownie – kwestią umowy i wygody. Narysowanie ich np. dwukrotnie więcej niż poprzednio wcale nie oznacza, że natężenie pola w rzeczywistości wzrosło dwukrotnie, być może autor rysunku uznał, że zawrze w ten sposób więcej informacji, nie tracąc na czytelności rysunku.

Jeśli chcesz polepszyć swoją intuicję związaną z zagęszczeniem linii pola, przeczytaj e-materiał *O czym mówi prawo Gaussa?*

Przeanalizujmy kilka przykładów pola elektrostatycznego wraz z ich graficzną reprezentacją.

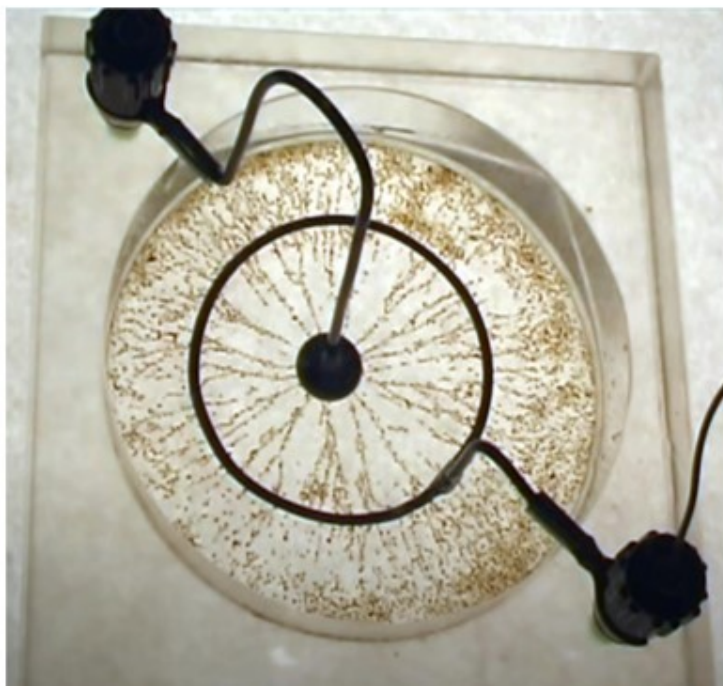
Przykład 1. – ładunek punktowy



Rys. 2. Linie pola elektrycznego wokół pojedynczego ładunku dodatniego

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

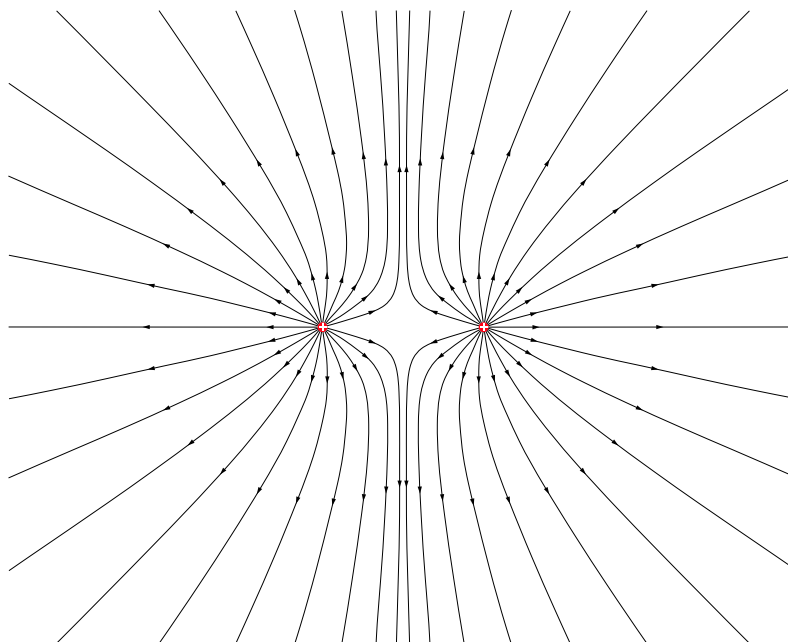
Jest to przykład **pola centralnego**, jego linie są półprostymi (Rys. 2.). Mają jeden wspólny punkt, w którym znajduje się ładunek – źródło pola. Przykład ten obrazuje, jaką interpretację ma gęstość linii pola: natężenie pola jest wprost proporcjonalne do gęstości linii. Linie pola zawierają więc niemal pełną informację na temat natężenia pola. Pokazują jego kierunek, zwrot i względną wartość (Rys. 3.).



Rys. 3. Eksperyment obrazujący linie pola centralnego

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

Przykład 2. – dwa ładunki punktowe tego samego znaku



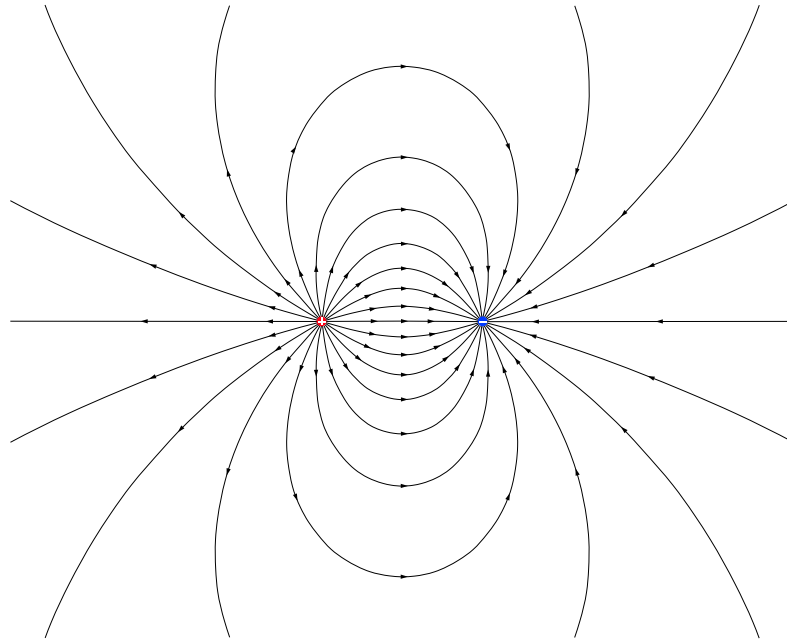
Rys. 4. Linie pola elektrycznego wokół dwóch ładunków dodatnich

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

Jest to przykład pola, będącego superpozycją dwóch pól centralnych. Tutaj linie pola są w ogólności zakrzywione (Rys. 4.). Widać również rozrzedzenie linii pola w obszarze

po między ładunkami. Tam natężenie pola jest względnie małe, a w połowie odcinka łączącego ładunki – wynosi zero.

Przykład 3. – dipol elektryczny

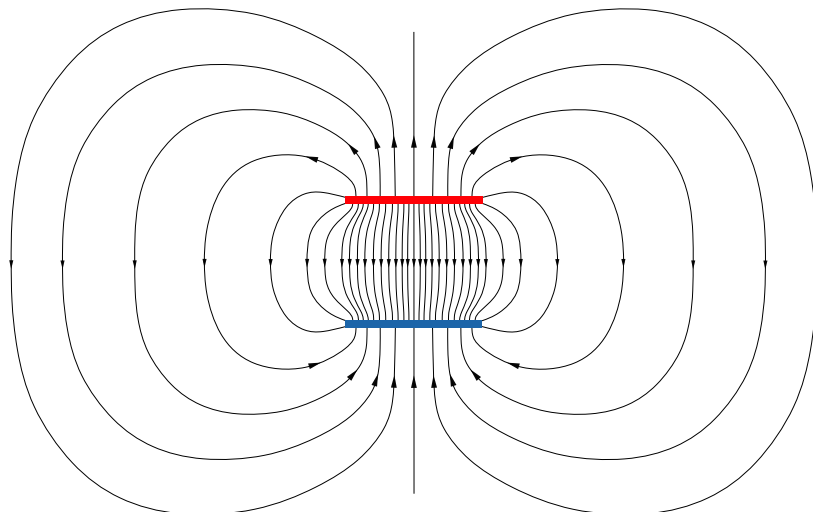


Rys. 5. Linie pola elektrycznego wokół dipola

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

Dipol elektryczny to układ dwóch ładunków różnoimiennych (Rys. 5.), natężenie w dowolnym punkcie (poza źródłami!) także wyznaczamy poprzez odwołanie się do zasady superpozycji, dodając pola od każdego z ładunków. Linie pola przebiegają tutaj od ładunku dodatniego do ładunku ujemnego, czyli ładunek dodatni stanowi początek linii pola, ładunek ujemny jest jej końcem.

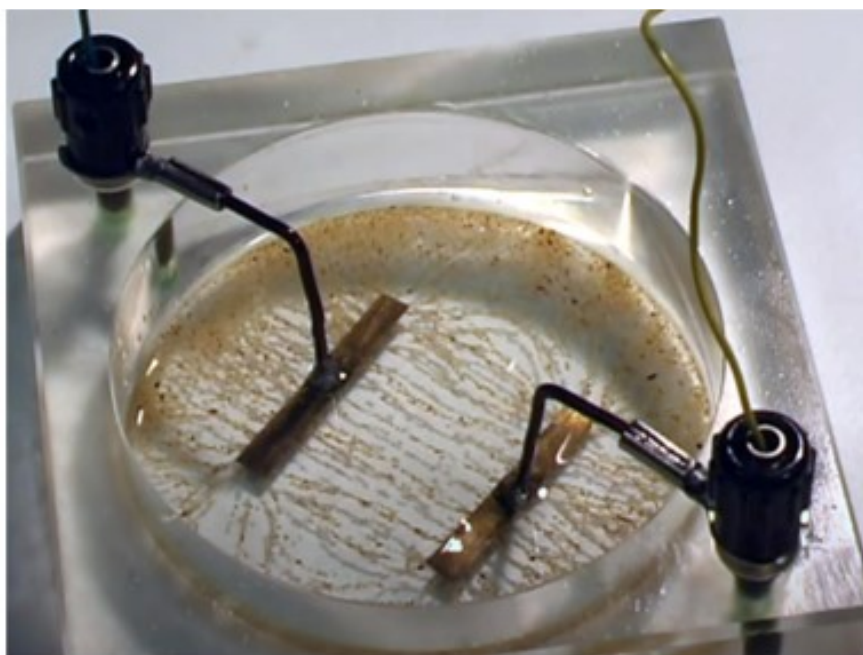
Przykład 4. – kondensator płaski



Rys. 6. Linie pola elektrycznego wewnątrz i na zewnątrz płaskiego kondensatora

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

Kondensator płaski jest układem dwóch równoległych, przewodzących płytek naładowanych ładunkami równymi do co wartości i o przeciwnym znaku (Rys. 6.). Pole elektryczne wewnątrz płaskiego kondensatora jest w przybliżeniu **polem jednorodnym**, czyli takim, w którym wektor natężenia nie zależy od położenia (Rys. 7.). Linie pola jednorodnego są do siebie równoległe i mają stałą gęstość. Widać, że na „wewnętrznych” powierzchniach płytek jest więcej ładunku niż na „zewnętrznych”.



Rys. 7. Eksperyment obrazujący linie pola jednorodnego

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

Warto na koniec dodać, że pole elektryczne nie jest jedynym polem wektorowym, które obrazujemy za pomocą linii pola. Innym przykładem jest pole magnetyczne, które – w odróżnieniu od elektrostatycznego – jest polem bezźródłowym (nie istnieją pojedyncze ładunki magnetyczne). Wynika stąd, że linie pola magnetycznego są zamknięte (nie mają początków ani końców).

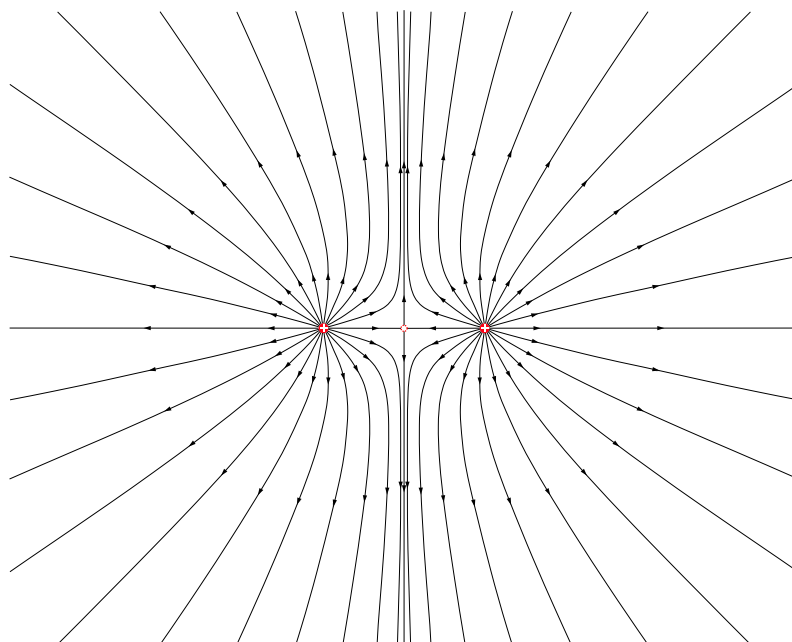
Dla zainteresowanych

1. Uzupełnienie opisu układu z Rys. 4.

Wróćmy do Rys. 4. Problem – po części dotyczący tylko nazewnictwa – pojawia się dla części linii, których tam nie umieszczono, a o których odruchowo myślimy jako o przechodzących przez wyróżniony punkt w połowie odcinka łączącego ładunki. Warto jednak zadać sobie pytanie: czy przez ten punkt przechodzą linie pola? Jeśli tak, to ile i jakie są ich zwroty?

W oderwaniu od interpretacji „gęstości linii” jako natężenia, może to wyglądać jak na Rys. 4a. poniżej. Postaramy się wyjaśnić rolę czerwonego kółka między ładunkami – jest to

dość specyficzny punkt. Oznaczmy go (w myślach, żeby nie psuć rysunku) przez s .



Rys. 4a. Modyfikacja Rys. 4 - dodano cztery "brakujące" linie pola.

Przede wszystkim zauważmy, że na odcinku łączącym ładunki oraz na jego symetralnej pole elektryczne zmienia zwrot. Np. „idąc” w prawo od ładunku po lewej stronie, mamy coraz słabsze pole skierowane w prawo. W punkcie s natężenie wynosi zero, a podczas zbliżania się do ładunku po prawej - obserwujemy coraz silniejsze pole skierowane w lewo. Natomiast jeśli pójdziemy „od dołu, z daleka” po symetralnej, stwierdzimy, że wektory pola są skierowane „w dół”, a wartość natężenia osiąga maksimum (jest to widoczne na Rys. 4., ale wymaga dość wnikliwego spojrzenia). Następnie, przecinając odcinek łączący ładunki, stwierdzimy, że natężenie pola wynosi zero. Kontynuując ruch „do góry”, obserwujemy pole skierowane „do góry”, a po maksimum natężenia zaobserwujemy jego zanik - spowodowany rosnącą odległością od źródeł.

Hipotetyczna (jedna) linia pola łącząca ładunki sugerowałaby, że w jej środku jest ładunek ujemny. Gdyby z kolei całej symetralnej nadać sens jednej linii pola, musielibyśmy uznać, że w punkcie s jest ładunek dodatni. Tymczasem w punkcie tym nie istnieje wektor styczny do żadnej linii pola, po prostu dlatego, że $\vec{E}(s) = 0$. Skoro ma zerową wartość, jego kierunek jest nieokreślony i mówienie o jego styczności do czegokolwiek nie ma sensu. Gdyby taki wektor styczny istniał, oznaczałoby to, że linie się krzyżują, co prowadziłoby do pytań o jednoznaczność definicji pola wektorowego i jego linii. Pole wektorowe jest funkcją - jej argumentami są punkty przestrzeni, wartościami - wektory. Jak wiesz z lekcji matematyki, funkcja w każdym punkcie, w którym jest określona, ma dokładnie jedną wartość.

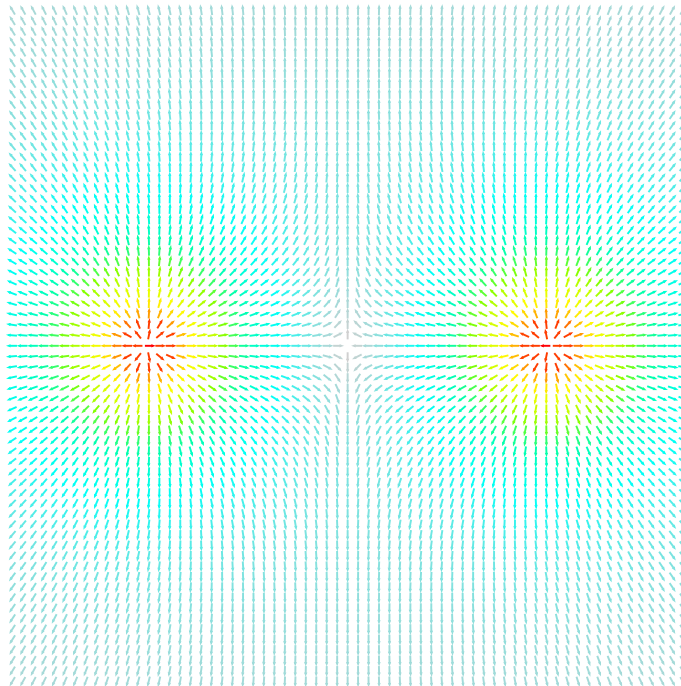
Oznacza to, że oprócz zakrzywionych linii z Rys. 4. (początkiem każdej z nich jest jeden z ładunków, końce nie istnieją, chyba że zgodzimy się na stwierdzenie, że są „w

nieskończoności”, co ma swój sens), istnieje też sześć linii prostych, w tym cztery „specjalne”:

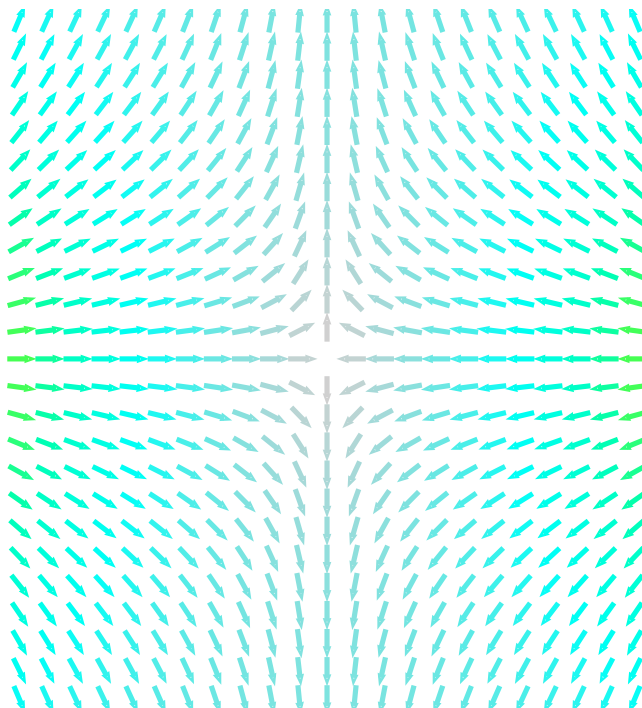
- dwie poziome półproste – od każdego z ładunków do nieskończoności.
- dwa otwarte (tj. pozbawione obu punktów końcowych) odcinki – łączące s z ładunkami,
- dwie pionowe półproste, które można opisać jako symetralną odcinka łączącego ładunki z usuniętym punktem s ,

2. Alternatywne graficzne przedstawienie natężenia pola elektrostatycznego

Na Rys. 4b. i 4c. przedstawiamy – w dwóch skalach – zestaw strzałek, symbolizujących natężenie pola elektrostatycznego od dwóch ładunków dodatnich, czyli modyfikację Rys. 4. Natężenie jest tu oddane za pomocą kolorów – od czerwonego (najwyższe), przez żółty, zielony, jasnoniebieski aż do szergo (najniższe, czyt. praktycznie zerowe). „Zagęszczenie” strzałek (ani odruchowo „rysowanych” w myślach linii) nie ma tu nic wspólnego z natężeniem pola – narysowano ich tyle, żeby było to w miarę czytelne.



Rys. 4b. Pole elektrostatyczne od dwóch ładunków dodatnich - wizualizacja za pomocą skończonego zestawu wektorów o ustalonej długości. Miarą wartości natężenia pola jest kolor strzałek.



Rys. 4c. Powiększenie Rys. 4b. - okolice punktu s . Szare strzałki wskazują, że w pobliżu s pole ma bardzo małe natężenie.

Być może masz odruch „poprowadzenia” linii pola przez kolejne strzałki, zwłaszcza jeśli zwroty zmieniają się niewiele i przy grocie „poprzedniej” strzałki pojawia się początek „następnej”. Postępowanie to zawsze obarczone jest pewnym błędem, wynikającym ze skończonej odległości punktów, w których rysujemy strzałki. Ale im gęstsza taka siatka punktów, tym bliższa byłaby tak skonstruowana krzywa rzeczywistej (i tym mniej czytelny rysunek). Czym jest ta „prawdziwa” krzywa? Matematycy nazywają ją *krzywą całkową pola wektorowego*. Można więc (i należy) powiedzieć, że linie pola elektrostatycznego z definicji są jego krzywymi całkowymi. Znalezienie ich - ściśle rzecz biorąc - wymaga rozwiązania pewnego równania, rysunkowe wersje na podstawie skończonego zestawu wektorów są tylko przybliżeniami. Równanie to nie jest algebraiczne, ale jego interpretacja geometryczna nie jest niczym nowym - równanie to jest żądaniem, by w każdym punkcie poszukiwanej krzywej jej kierunek styczny pokrywał się z kierunkiem pola wektorowego w tym punkcie. Opisane wyżej dwa odcinki i cztery półproste to także rozwiązania tego równania, ale w przypadkach w pewnym sensie „zdegenerowanych” - ma to miejsce, gdy kąt nachylenia pola względem kierunku poziomego jest całkowitą wielokrotnością kąta prostego - oczekujemy zatem pojawienia się linii prostych, pionowych albo poziomych, z różnymi zwrotami. Wtedy jedno z wyrażeń w równaniu wynosi zero bądź jest nieskończone i wymaga osobnego potraktowania.

Słowniczek

Pole centralne

(ang. *central field*) – pole, dla którego wartość natężenia zależy wyłącznie od odległości od pewnego punktu (centrum pola), a jego kierunek pokrywa się z kierunkiem wektora

położenia punktu, w którym mierzymy pole względem centrum. Przykładem pola centralnego jest pole elektrostatyczne od punktowego ładunku czy jednorodnie naładowanej kuli.

Zasada superpozycji

(ang. *superposition principle*) – w fizyce najczęściej oznacza możliwość dodawania do siebie pól, opisujących oddziaływania. Z matematycznego punktu widzenia jest to efekt liniowości równań spełnianych przez te pola. Np. omawiane tu pole elektrostatyczne spełnia pewne liniowe równanie, a jego rozwiązaniem jest znane Ci prawo Coulomba.

Pole jednorodne

(ang. *uniform field*) – pole, którego natężenie nie zależy od położenia, czyli jest takie samo dla wszystkich punktów w przestrzeni. Przykładem jest pole elektrostatyczne wokół naładowanej płaszczyzny (podkreślamy: całej).

Kondensator

(ang. *capacitor*) – układ dwóch przewodników, mogący zmagazynować energię pola elektrycznego. Wielkością opisującą część własności kondensatora jest pojemność elektryczna (wyrażana w faradach).

Animacja

Graficzna reprezentacja pola elektrostatycznego

Obejrzyj animację z wizualizacją pola elektrostatycznego, a następnie wykonaj polecenia.

Polecenie 1

Czy linie pola mogą się przecinać?

Polecenie 2

Wyobraź sobie swobodny ładunek punktowy umieszczony w dowolnym punkcie w polu elektrostatycznym, czyli wytworzonym przez ładunki nieruchome. Jaki będzie tor ruchu ładunku swobodnego?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Jakie pole możemy przedstawić graficznie za pomocą linii pola?

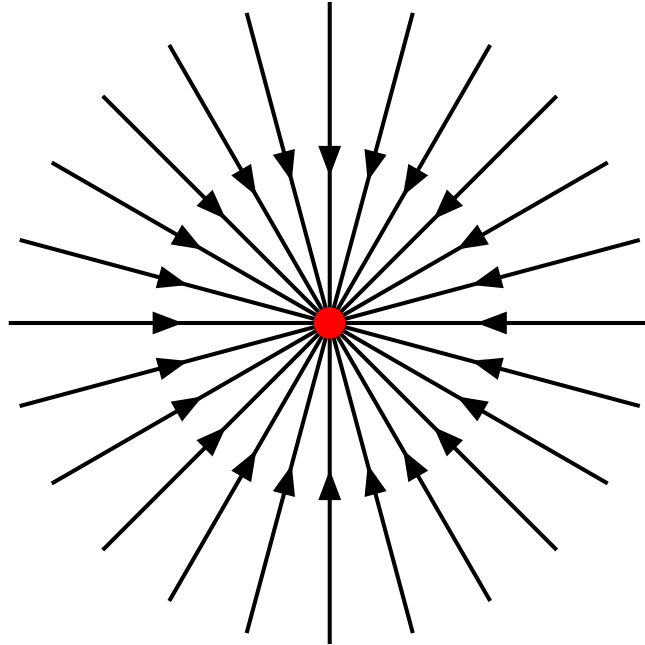
☐ pole skalarne

☐ pole wektorowe

Ćwiczenie 2



Jaki znak ma ładunek na rysunku? Linie obrazują pole elektrostatyczne.



☐ ujemny

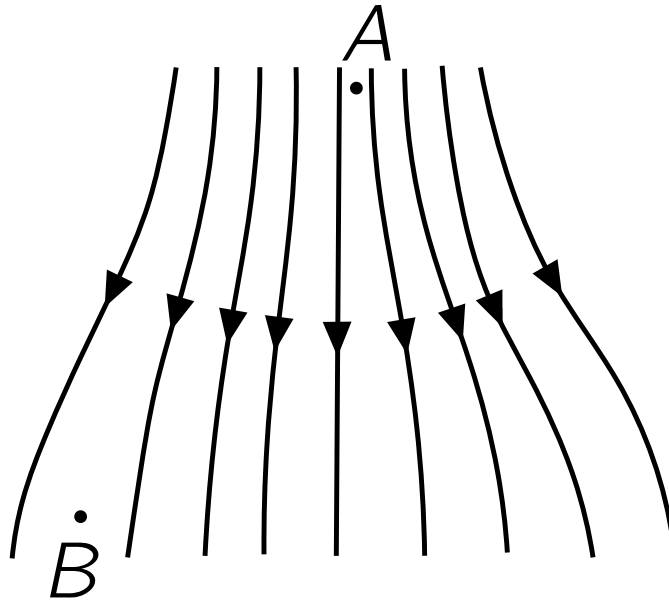
☐ dodatni

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

Ćwiczenie 3



W którym punkcie natężenie pola jest większe?



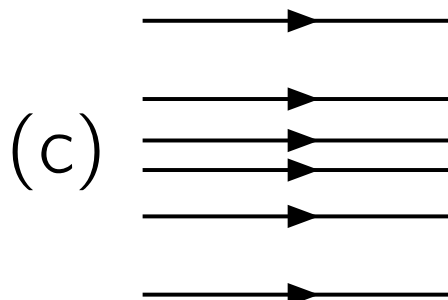
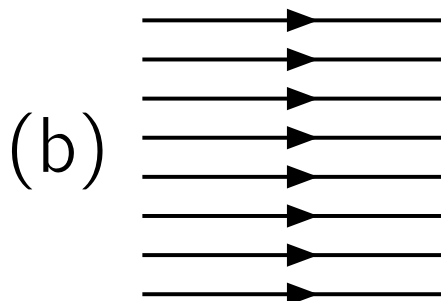
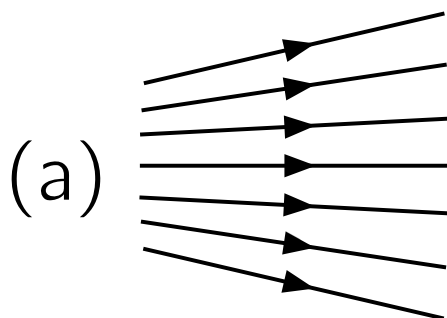
☐ A

☐ B

Ćwiczenie 4



Który rysunek przedstawia pole jednorodne?



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

Ćwiczenie 5



Czy linie pola elektrostatycznego mogą być zamknięte?

Odp: tak ☐ / nie ☐

Ćwiczenie 6



Jaka informacja dotycząca natężenia pola elektrostatycznego zawarta jest w liniach pola?

☐ zwrot

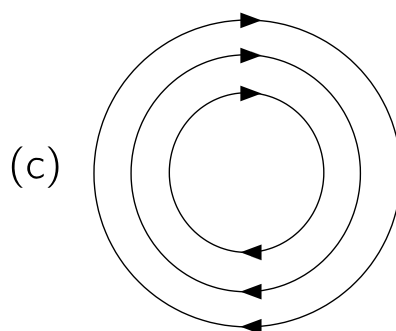
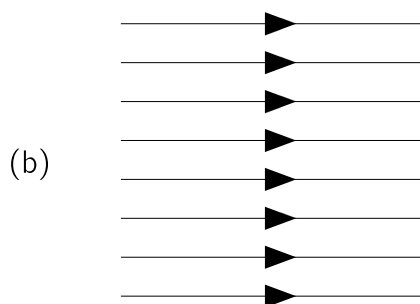
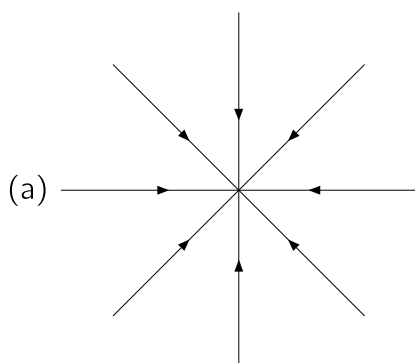
☐ względna wartość

☐ kierunek

Ćwiczenie 7



Który z rysunków na pewno nie przedstawia pola elektrostatycznego?



Ćwiczenie 8



Wyobraź sobie trójwymiarowe pole wektorowe, którego wszystkie linie są prostopadłe do pewnej prostej. Jaki układ rzeczywisty może wytworzyć pole elektrostatyczne o tej postaci?

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Tomasz Gradowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Graficzna reprezentacja pola elektrostatycznego
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: 6) tworzy teksty, tabele, diagramy lub wykresy, rysunki schematyczne lub blokowe dla zilustrowania zjawisk bądź problemu; właściwie skaluje, oznacza i dobiera zakresy osi; 7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach; 11) opisuje przebieg doświadczenia lub pokazu; wyróżnia kluczowe kroki i sposób postępowania oraz wskazuje rolę użytych przyrządów i uwzględnia ich rozdzielczość. VII. Elektrostatyka. Uczeń: 3) posługuje się wektorem natężenia pola elektrycznego wraz z jego jednostką; ilustruje graficznie pole elektryczne za pomocą linii pola; interpretuje zagęszczenie linii pola jako miarę natężenia pola; rozróżnia pole centralne i pole jednorodne.

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. poznaje własności pola elektrostatycznego, 2. obserwuje kształt linii pola centralnego i jednorodnego w eksperymencie, 3. analizuje kształt linii pól dla różnych układów ładunków (punktowy, dwa punktowe, dipol, kondensator płaski).
Strategie nauczania:	IBSE
Metody nauczania:	wykład informacyjny, eksperyment
Formy zajęć:	praca w parach, praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	maszyna elektrostatyczna, zestawy elektrod, spodek z olejem i kaszką manną, tablica
Materiały pomocnicze:	–
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel prosi uczniów o przypomnienie, czym jest pole wektorowe oraz na czym polega źródłowość pola elektrostatycznego.	
Faza realizacyjna:	

Nauczyciel przeprowadza eksperyment, w którym dwie elektrody – zewnętrzna kolistą i wewnętrzną punktową, zanurzone w zawieszynie np. kaszy w oleju – są ładowane elektrycznie za pomocą maszyny elektrostatycznej.

Nauczyciel powtarza eksperyment dla dwóch równoległych, podłużnych elektrod.

Uczniowie analizują otrzymane kształty linii, wzdłuż których ustawiają się drobiny kaszy.

Nauczyciel omawia zasady, według których przedstawiamy graficznie pole elektrostatyczne.

Nauczyciel – wspólnie z uczniami – omawia kształt linii pola centralnego, pola od dwóch ładunków tego samego znaku, pola od dipola oraz pola wewnątrz kondensatora płaskiego. Uczniowie przedstawiają te pola graficznie.

Faza podsumowująca:

Uczniowie, wykorzystując zdobytą wiedzę, rozwiązują w parach zadania 1-4 z zestawu ćwiczeń.

Praca domowa:

Uczniowie powtarzają i utrwalają wiedzę i zdobyte umiejętności przez rozwiązanie w domu zadań, których nie rozwiązywali na lekcji (5-8).

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium

Multimedium może być wykorzystane przez uczniów jako praca domowa przed lekcją i być wprowadzeniem do tematu.