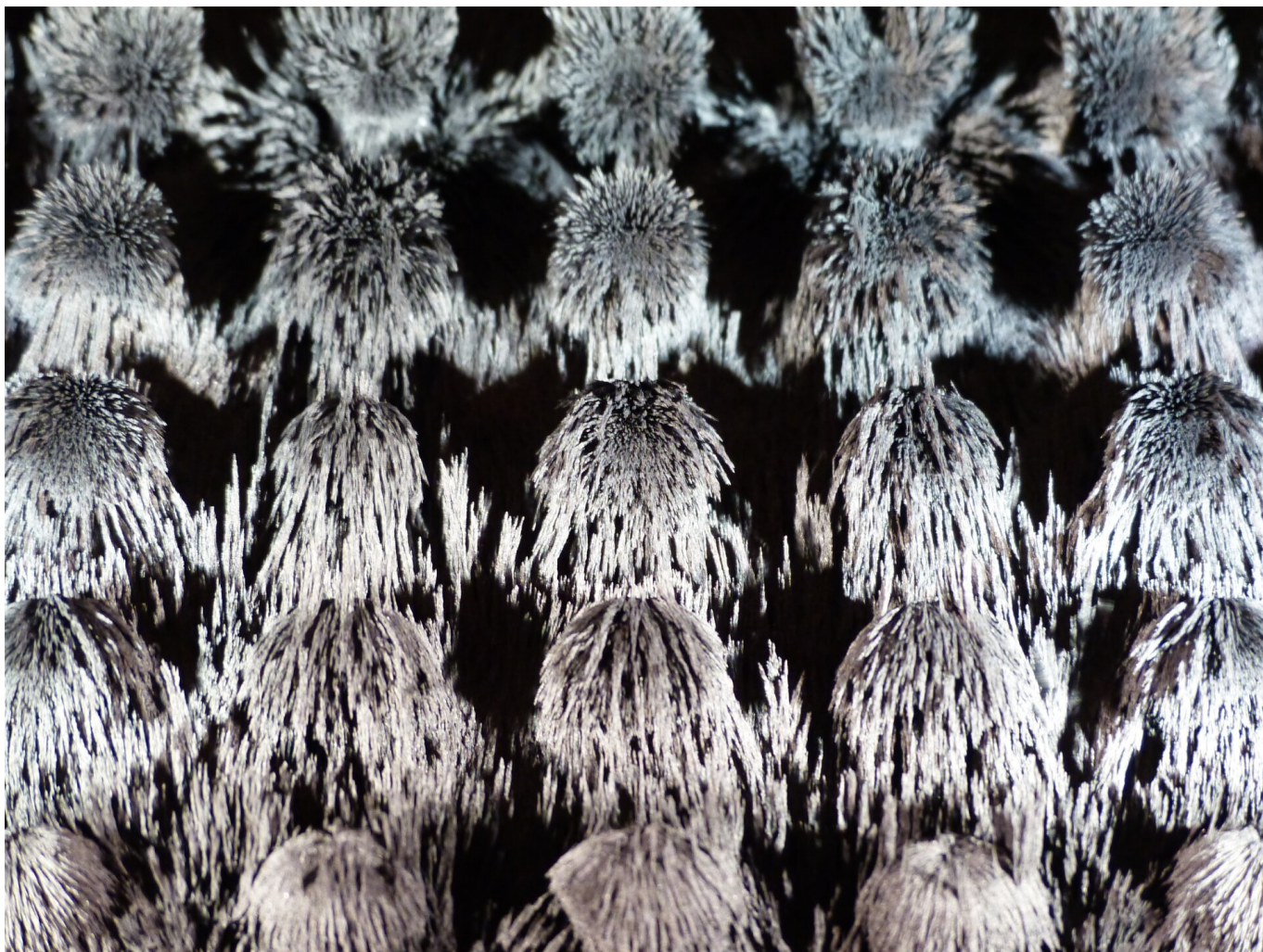




Ruch naładowanej cząstki w skrzyżowanych polach

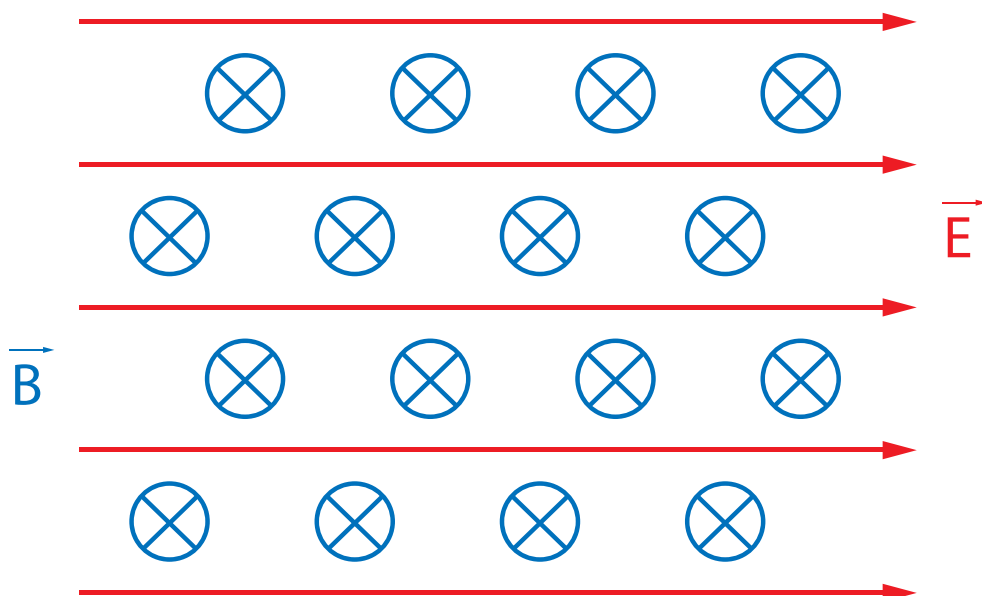
- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Symulacja interaktywna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Ruch naładowanej cząstki w skrzyżowanych polach

Czy to nie ciekawe?

Pewnie zaintrygował Cię tytuł tego e-materiału... No tak, brzmi enigmatycznie. Jakie skrzyżowane pola? Rozszyfrujmy to pojęcie. Chodzi o pola elektryczne i magnetyczne, oba jednorodne, o liniach wzajemnie do siebie prostopadłych. Przykład takiej sytuacji przedstawiono na rysunku.



Rys. a. Skrzyżowane pola: elektryczne (czerwone) i magnetyczne (niebieskie - zwrot za płaszczyznę rysunku).

Zobaczysz, co taki układ pól „robi” z naładowaną cząstką, która do niego „wpada” z pewną prędkością. Naprawdę trudno przewidzieć, jak będzie wyglądał tor ruchu tej cząstki. Z pomocą przychodzą tu obliczenia numeryczne.

Istnieje jednak jeden szczególny przypadek, który jest łatwy w analizie i można go w sprytny sposób wykorzystać do stworzenia swego „filtru”, pozwalającego na odseparowanie cząstek o określonej prędkości. Taki filtr można wykorzystać, na przykład, w spektrometrze masowym.

Twoje cele

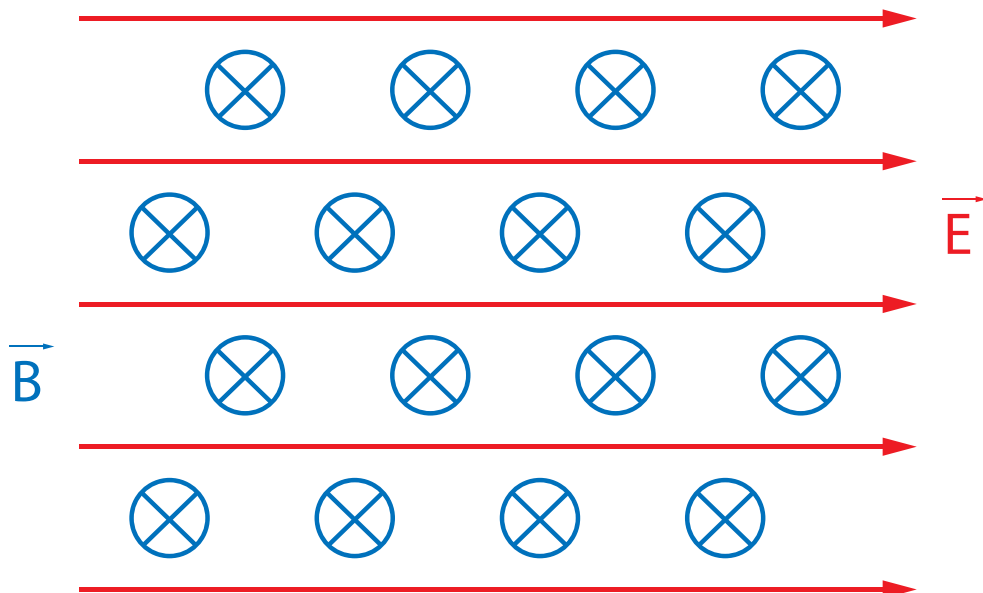
- Zastosujesz wiedzę o sile elektrycznej i magnetycznej, które działają na naładowaną, poruszającą się cząstkę;
- Dowiesz się, jak poruszają się naładowane cząstki, gdy wpadają prostopadle w obszar skrzyżowanych pól elektrycznego i magnetycznego;
- Zrozumiesz, jak działa separator prędkości naładowanych cząstek.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Wyobraźmy sobie skrzyżowane **jednorodne pola** elektryczne i magnetyczne. Na przykład takie, jak na Rys. 1.

Jeśli wprowadzimy poruszającą się, naładowaną cząstkę w obszar takich pól, jej tor ruchu na ogół będzie skomplikowaną krzywą. W jednym tylko, szczególnym przypadku, cząstka będzie się poruszała w sposób najprostszy z możliwych – jednostajnie po linii prostej. Jak powinien być skierowany wektor prędkości takiej cząstki? Nietrudno na to pytanie odpowiedzieć, jeśli rozważymy działające na nią siły.

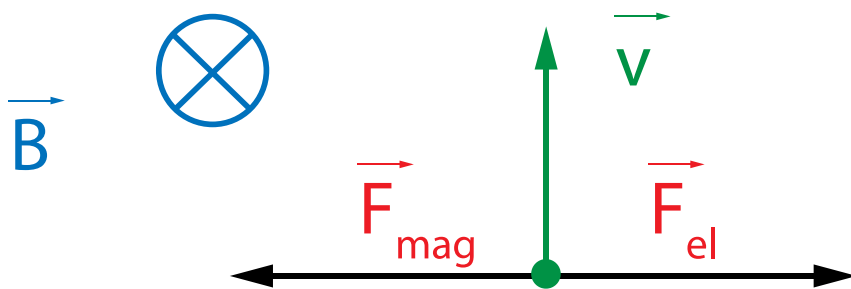


Rys. 1. Skrzyżowane jednorodne pola elektryczne i magnetyczne.

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

Jasne jest, że jeśli cząstka porusza się ze stałą prędkością po prostej, to te siły równoważą się.

Łatwo przewidzieć, jak działa **siła elektryczna**. Dla ładunku dodatniego, jej wektor jest równoległy do linii pola i skierowany zgodnie z nimi. Wektor **siły magnetycznej** musi być więc skierowany przeciwnie. Wobec tego, wektor prędkości cząstki powinien być prostopadły do linii pola magnetycznego, a jego zwrot – wyznaczony zgodnie z regułą śruby prawoskrętnej (zobacz na Rys. 2.).



Rys. 2. Równoważące się siły elektryczna i magnetyczna oraz wektor prędkości poruszającej się cząstki.

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

Zastanów się, czy wartość prędkości ma w tym przypadku znaczenie? Oczywiście, ponieważ zależy od niej wartość siły magnetycznej. Skoro obie siły działające na cząstkę mają się równoważyć, ich wartości muszą być równe. Zapiszmy to:

$$F_{mag} = F_{el}$$

$$F_{mag} = qvB \sin \angle(\vec{v}, \vec{B}), \text{ ale } \angle(\vec{v}, \vec{B}) = 90^\circ, \text{ więc } \sin(90^\circ) = 1. \text{ Zatem}$$

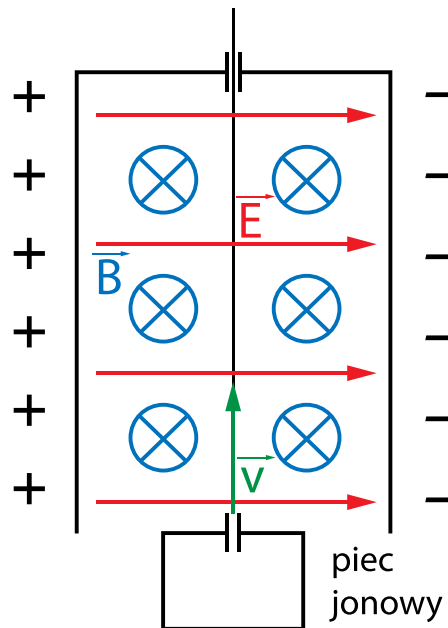
$$qvB = qE$$

gdzie qE jest wartością siły elektrycznej działającej na cząstkę. Widzimy więc, że aby cząstka poruszała się po prostej ruchem jednostajnym, jej prędkość powinna spełniać równość:

$$v = \frac{E}{B}$$

Jeśli cząstka będzie poruszała się z większą prędkością, jej tor ulegnie odchyleniu (na Rys. 2. w lewo, gdyż siła magnetyczna będzie miała większą wartość). Gdy prędkość będzie mniejsza, odchylenie toru ruchu cząstki będzie przeciwne.

Zobaczmy teraz, w jaki sposób można wykorzystać opisany układ do wyodrębnienia z grupy naładowanych poruszających się cząstek tych, które mają określoną prędkość. Taki układ nazywamy **selektorem prędkości**. Jego budowa pokazana jest na Rys. 3.



Rys. 3. Selektor prędkości.

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

Z pieca jonowego wylatują cząstki (jony dodatnie), które mają różne prędkości. Naprzeciw wyjścia z pieca znajduje się mały otworek, przez który będą mogły przejść tylko te jony, które poruszają się po prostej. A więc jony, które mają odpowiednią prędkość, równą – jak to wykazaliśmy powyżej – stosunkowi wartości natężenia pola elektrycznego do wartości indukcji magnetycznej. Jony o innych prędkościach zostaną skierowane w bok i zatrzymane przez barierę. W ten sposób dokonujemy selekcji jonów ze względu na wartość ich prędkości. W dodatku, przy okazji dokonujemy pomiaru tej prędkości.

Słowniczek

Pole jednorodne

(ang.: *uniform field*) – pole fizyczne (na przykład grawitacyjne, elektryczne, magnetyczne), którego natężenie jest takie samo w każdym punkcie, (to znaczy, ma taką samą wartość, kierunek i zwrot). Linie pola jednorodnego są prostymi równoległymi do siebie.

Siła elektryczna

(ang.: *electric force*) – inaczej zwana częścią elektryczną siły Lorentza – siła działająca na ładunek znajdujący się w polu elektrycznym, opisana równaniem wektorowym:

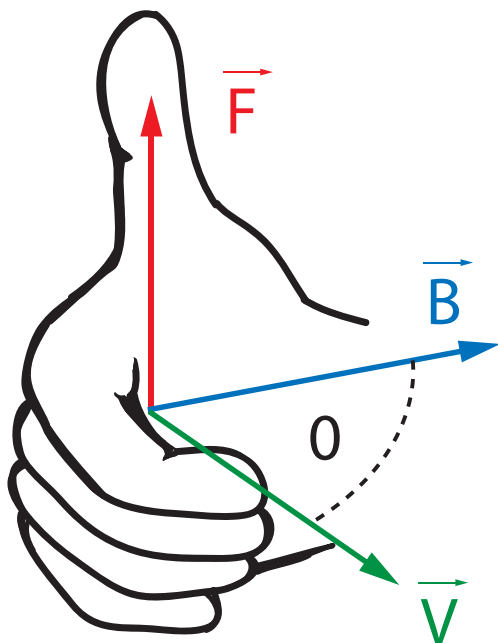
$\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$, gdzie q jest ładunkiem elektrycznym (z uwzględnieniem znaku) a $\vec{E}$ – wektorem natężenia pola elektrycznego w punkcie, w którym znajduje się ładunek.

Siła magnetyczna

(ang.: *magnetic force*) – inaczej zwana częścią magnetyczną siły Lorentza – siła działająca na poruszający się ładunek znajdujący się w polu magnetycznym, opisana równaniem

wektorowym $\vec{F}_{mag} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$, gdzie q jest ładunkiem elektrycznym (z uwzględnieniem znaku), $\vec{v}$ - wektorem prędkości ładunku a $\vec{B}$ - wektorem indukcji magnetycznej w punkcie, w którym znajduje się ładunek.

Wartość tej siły jest równa: $F_{mag} = |q|vB \sin \angle(\vec{v}, \vec{B})$, a jej kierunek i zwrot wyznacza reguła śruby prawoskrętnej, zwana także regułą prawej dłoni, symbolicznie pokazaną na rysunku.



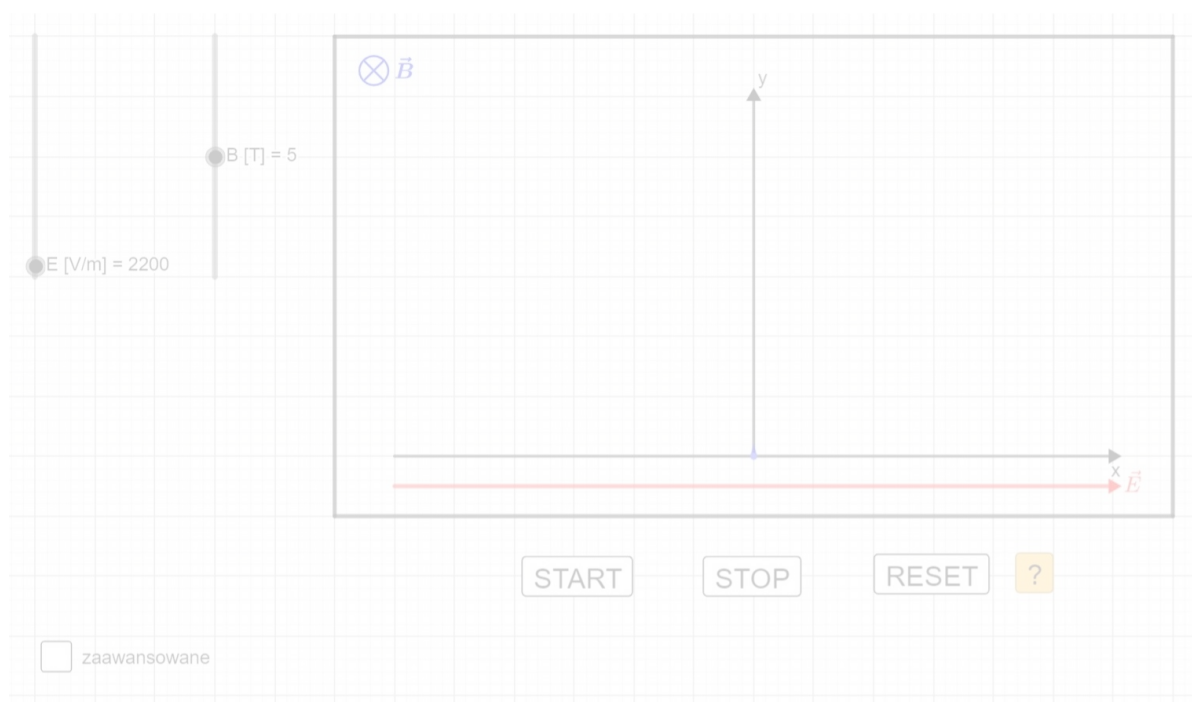
Symulacja interaktywna

Ruch naładowanej cząstki w skrzyżowanych polach

Symulacja pozwoli Ci na badanie ruchu naładowanej dodatnio cząstki w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym. Wektor prędkości początkowej cząstki leży w płaszczyźnie XY . Siła elektryczna działa na nią w dodatnim kierunku osi X . Siła magnetyczna (zawsze prostopadła zarówno do wektora indukcji magnetycznej, jak i prędkości) działa na cząstkę w ujemnym kierunku osi X . Ruch odbywa się więc wyłącznie w płaszczyźnie XY .

W symulacji można zmieniać wartość indukcji magnetycznej B , natężenia pola elektrycznego E oraz obie składowe prędkości początkowej cząstki, w kierunkach X i Y . Po ustawieniu tych parametrów, postaraj się najpierw przewidzieć tor ruchu cząstki, a potem uruchomić symulację, by zweryfikować swoją hipotezę.

Uwaga: Praca z symulacją jest wygodniejsza po przełączeniu na widok pełnoekranowy. Zawsze po zmianie parametrów kliknij na przycisk RESET.



Zasób interaktywny dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/DGjbXBVj0>

Polecenie 1

Dobierz takie parametry początkowe, by ruch naładowanej cząstki był prostoliniowy. Sprawdź, czy spełniają one warunek wyprowadzony w części „Warto przeczytać”.

Polecenie 2

Gdyby prędkość początkowa cząstki była równa zero, to czy pozostawałaby ona w spoczynku, czy poruszałaby się?

Sprawdź się

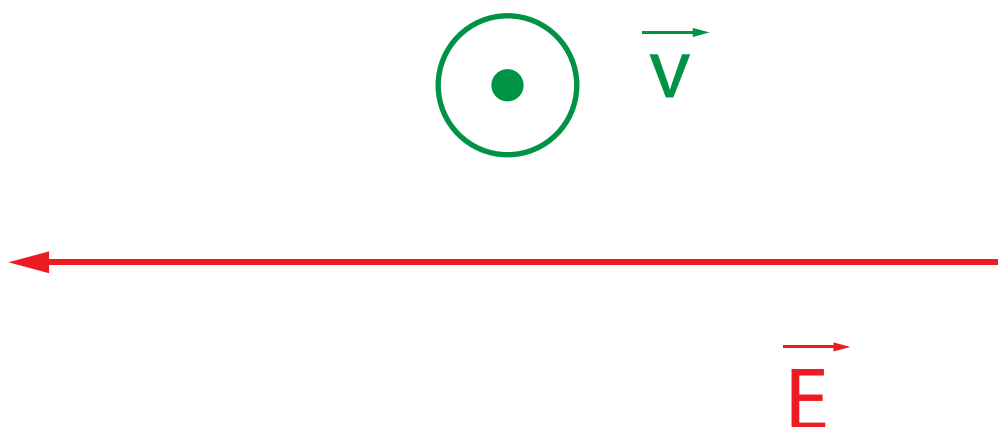
Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Dodatnio naładowana cząstka porusza się z prędkością $v = 100 \text{ m/s}$ w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym. Zwrot wektora prędkości pokazano na rysunku. Natężenie pola elektrycznego $E = 200 \text{ V/m}$. Jak powinien być skierowany wektor indukcji magnetycznej B i jaka musi być jego wartość, aby cząstka poruszała się po prostej?

Opis kierunku wybierz z zamieszczonych poniżej możliwości.



☐ w lewo

☐ w górę

☐ w prawo

☐ przed rysunek

☐ za rysunek

☐ w dół

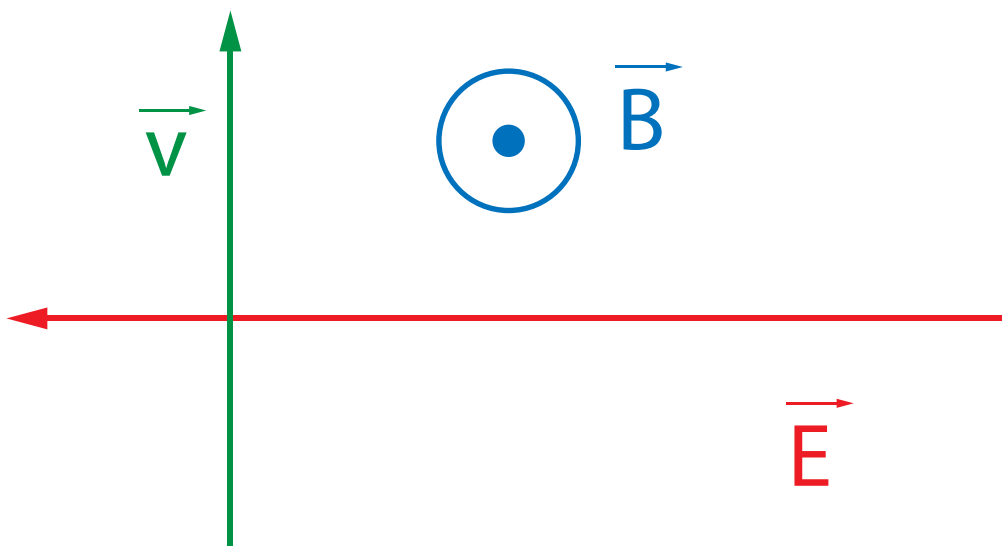
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Odp.: Wartość $B =$ T

Ćwiczenie 2



Dodatnio naładowana cząstka porusza się w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym po prostej tak, jak jest to pokazano na rysunku.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Jeśli zwiększymy natężenie pola elektrycznego E , to cząstka skręci w / .

Jeśli zwiększymy indukcję magnetyczną B , to cząstka skręci w / .

Jeśli zwiększymy prędkość cząstki v , to cząstka skręci w / .

Ćwiczenie 3



W skrzyżowane pola elektryczne i magnetyczne wprowadzamy cząstkę o ładunku q , nie nadając jej żadnej prędkości. Zaznacz prawidłową odpowiedź.

- ☐ Cząstka pozostanie w spoczynku.
- ☐ Cząstka będzie się poruszała po krzywej.
- ☐ Cząstka będzie się poruszała po prostej.

Ćwiczenie 4



Cząstka alfa porusza się w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym po prostej.

- a) Oblicz, przyspieszenie, z jakim będzie poruszała się cząstka, gdy w pewnej chwili wyłączymy pole elektryczne;
- b) Oblicz, przyspieszenie, z jakim będzie poruszała się cząstka, gdy w pewnej chwili wyłączymy pole magnetyczne.

Wyniki podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Dane liczbowe: $E = 500 \text{ V/m}$, $B = 0,2 \text{ T}$, masa cząstki $m_\alpha = 4u$, ładunek $q_\alpha = 2e$, gdzie: ładunek elementarny $1e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, jednostka masy atomowej $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Odpowiedzi:

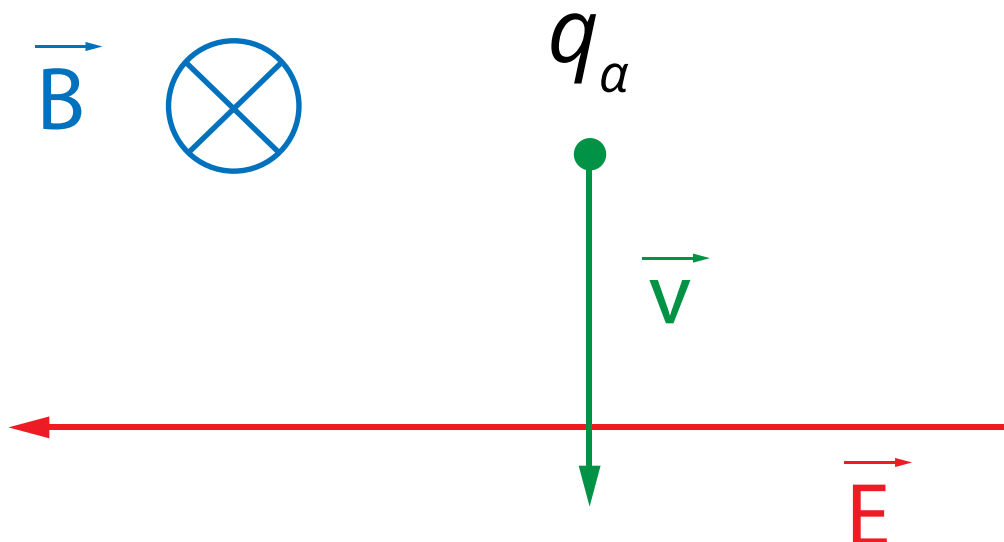
$$a_a = \boxed{} \cdot 10^{10} \text{ m/s}^2,$$

$$a_b = \boxed{} \cdot 10^{10} \text{ m/s}^2.$$

Ćwiczenie 5



Cząstka alfa porusza się po prostej w skrzyżowanych jednorodnych polach elektrycznym i magnetycznym. Sytuację przedstawiono na rysunku.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Przerysuj rysunek na kartkę i naszkicuj tor, po którym będzie poruszała się cząstka, gdy wyłączymy nagle pole magnetyczne. Po jakim torze będzie poruszała się cząstka, gdy zamiast magnetycznego, wyłączymy pole elektryczne?

Ćwiczenie 6

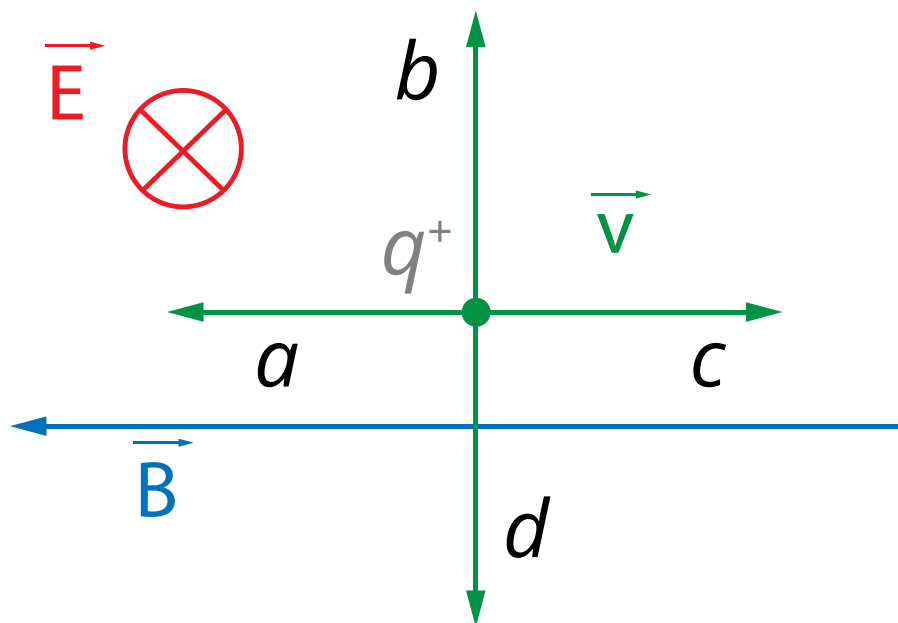


Proton porusza się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 0,01 \text{ T}$ po okręgu o promieniu $r = 1 \text{ m}$. Oblicz natężenie pola elektrycznego skrzyżowanego z polem magnetycznym, jakie należałoby włączyć, aby proton poruszał się po prostej.

Ćwiczenie 7



Rozważmy pola magnetyczne i elektryczne skrzyżowane tak, jak na rysunku, na którym zaznaczono też cztery kierunki wektora prędkości dodatnio naładowanej cząstki (zielone strzałki).



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

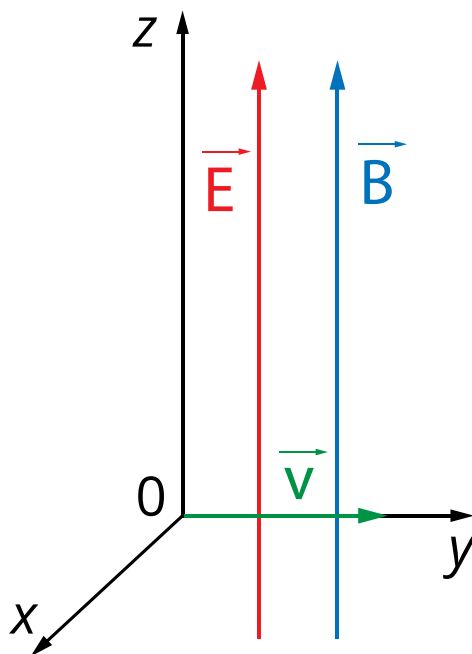
Uzereguj kierunki a, b, c, d pod względem wartości siły wypadkowej działającej na cząstkę, poczynając od najmniejszej wartości. (Uwaga: dwie z tych wartości są sobie równe - wprowadź je w kolejności alfabetycznej.)

Odp.: , = ,

Ćwiczenie 8



W jednorodnych polach elektrycznym i magnetycznym o liniach równoległych do siebie porusza się w kierunku prostopadłym do linii pól dodatnio naładowana cząstka. Sytuacja przedstawiona jest na rysunku. Cząstka w chwili początkowej znajduje się w początku układu współrzędnych.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Jaki będzie tor ruchu cząstki? Narysuj go na kartce.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Nina Tomaszewska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Ruch naładowanej cząstki w skrzyżowanych polach
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa	Cele kształcenia – wymagania ogólne II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 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; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. VII. Elektrostatyka. Uczeń: 7) analizuje ruch cząstek naładowanych w polu elektrycznym. IX. Magnetyzm. Uczeń: 3) analizuje tor cząstki naładowanej w jednorodnym polu magnetycznym.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r. • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. zastosuje wiedzę o sile elektrycznej i magnetycznej, które działają na naładowaną, poruszającą się cząstkę do wyznaczania wartości, kierunku i zwrotu tej siły oraz do analizowania ruchu cząstki; 2. przeanalizuje ruch naładowanej cząstki w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym wtedy, gdy jej prędkość początkowa leży w płaszczyźnie prostopadłej do wektora indukcji magnetycznej; 3. wyjaśni zasadę działa separatora prędkości naładowanych cząstek.
Strategie nauczania	blended-learning
Metody nauczania	wykład informacyjny wspomagany pokazem multimedialnym
Formy zajęć:	praca w zespole klasowym
Środki dydaktyczne:	niniejszy e-materiał + komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
Materiały pomocnicze:	-
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Już sam enigmatycznie sformułowany tytuł e-materiału prawdopodobnie zaciekawi uczniów. Nauczyciel wyjaśnia, co oznacza sformułowanie „skrzyżowane pola”. Mimo, że układ pól jest stosunkowo prosty (pola jednorodne o liniach wzajemnie prostopadłych), to tor ruchu, poza jednym szczególnym przypadkiem, nie jest łatwy do przewidzenia.	
Faza realizacyjna:	
Nauczyciel, wspólnie z uczniami, omawia sytuację szczególną – ruch ładunku po prostej. Stawia uczniom pytania: jak musi być skierowana prędkość, aby to było możliwe? Czy dla każdej wartości prędkości jest to możliwe. Przy okazji, to dobre ćwiczenie przypominające, jak oblicza się wartość sił magnetycznej i elektrycznej oraz wyznacza ich kierunki. Następnie nauczyciel omawia działanie selektora prędkości, co nie powinno sprawić uczniom trudności. Potem uczniowie, pod kierunkiem nauczyciela, rozpoczynają pracę z symulacją. Działają wspólnie lub samodzielnie, wypełniając polecenia zawarte w e-materiale.	
Faza podsumowująca:	
W fazie podsumowującej nauczyciel wraz z uczniami rozwiązuje następujące zadania: 5, 6 i 9 z zestawu ćwiczeń.	

Praca domowa:

Zadania: 1, 2, 3, 4, 7 i 8 z zestawu ćwiczeń.

**Wskazówki
metodyczne
opisujące różne
zastosowania
danego
multimedium**

Ponieważ podczas lekcji w symulacji (zgodnie z zaleceniami) zmieniano tylko jeden parametr, w domu uczniowie mogą zbadać różne inne możliwości. Nauczyciel mógłby ogłosić konkurs na „najciekawszy tor” cząstki.