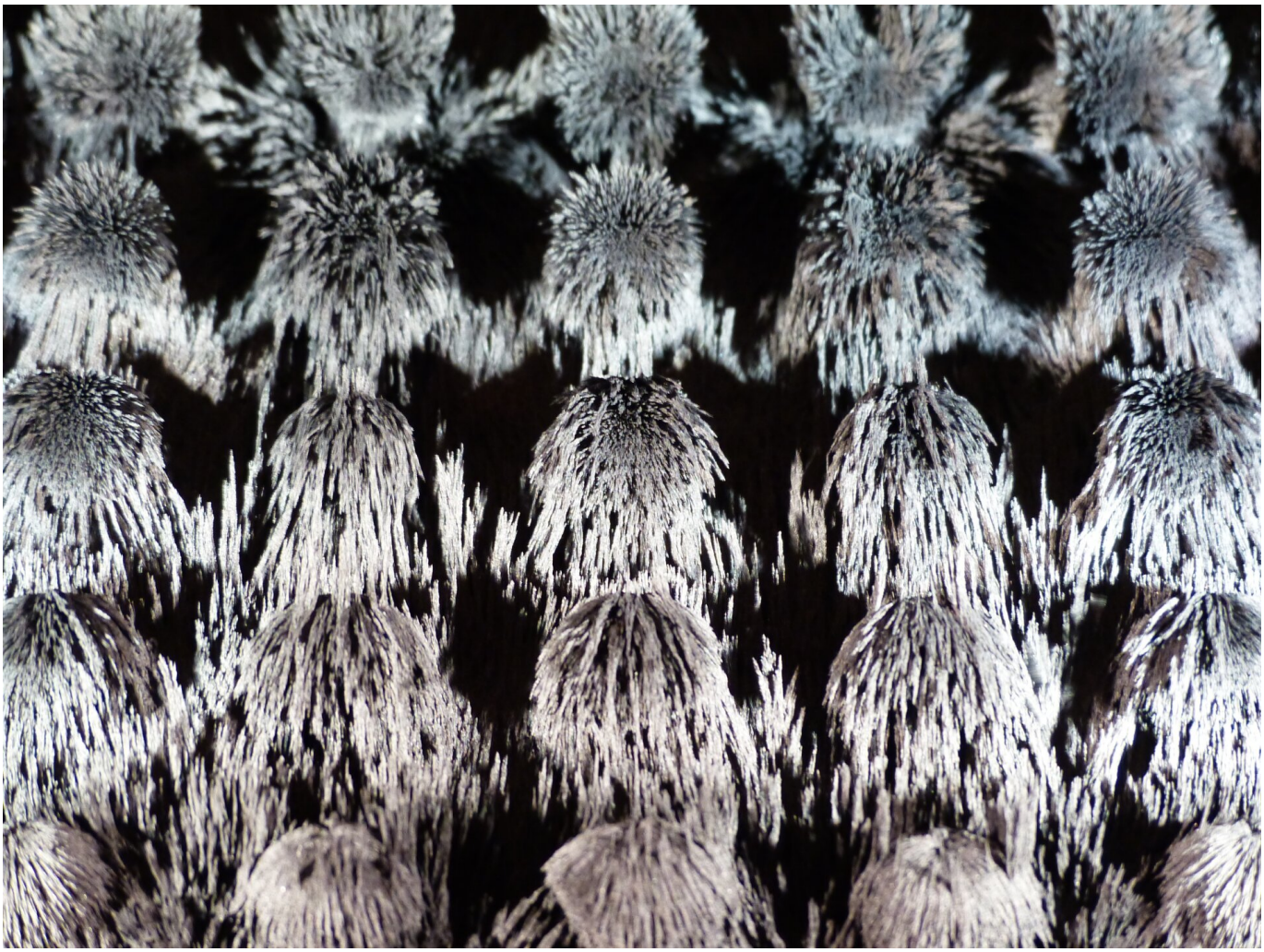


# Jak działa i do czego służy spektrometr masowy?

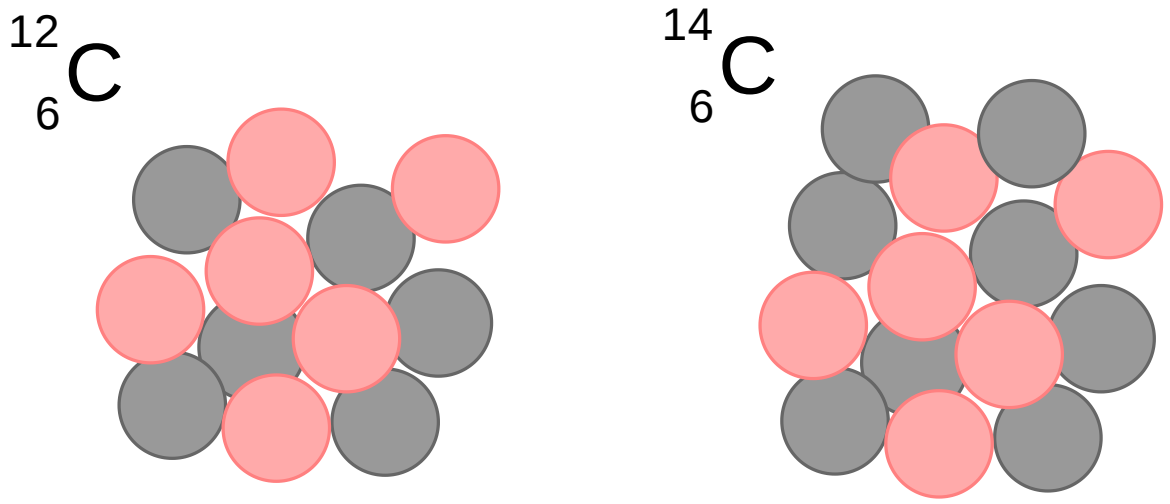

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Źródło: dostępny w internecie: https://pxhere.com/en/photo/1351845 [dostęp 14.05.2022 r.].

# Czy to nie ciekawe?

Wiesz zapewne, że izotopy to odmiany atomów tego samego pierwiastka. Różnią się liczbą neutronów w jądrze. Liczba protonów (oznaczona przez $Z$ – liczba atomowa) decyduje o tym, z jakim pierwiastkiem mamy do czynienia, a w szczególności jakie są jego właściwości chemiczne.

Umówiono się, że atom pierwiastka **X** oznaczamy w następujący sposób: $^{A}_{Z}X$, gdzie $A$ jest całkowitą liczbą nukleonów w jądrze, czyli sumą liczby protonów i neutronów. Możemy więc mieć dwa izotopy węgla: najczęściej występujący $^{12}C$ i beta promieniotwórczy $^{14}C$ (Rys. a.).




Rys. a. Dwa izotopy węgla: najczęściej występujący $^{12}C$ i beta promieniotwórczy $^{14}C$
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Rekordzistką jeśli chodzi o liczbę izotopów trwałych jest cyna – ma ich aż 10.

Domyślasz się zapewne, że masa atomu węgla $^{14}C$ jest większa niż węgla $^{12}C$. Co więcej, udało się udowodnić to eksperymentalnie a nawet „zważyć” poszczególne atomy, ściślej – jony. Udało się ustalić skład izotopowy każdego pierwiastka. Jak tego dokonano? Opiszemy to w tym e-materiale.

**Twoje cele**

W tym e-materiale:

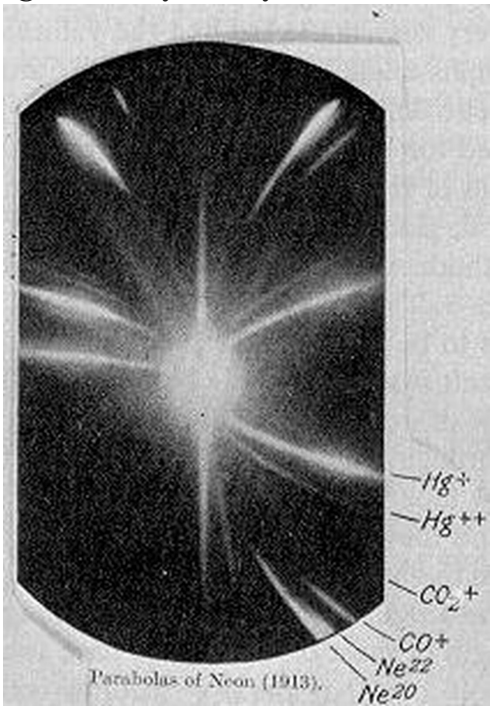
- Dowiesz się, jak jest zbudowany najprostszy spektrograf masowy;
- Zrozumiesz, w jaki sposób wykorzystuje się pola elektryczne i magnetyczne w spektrografie do pomiaru masy jonu;
- Dowiesz się, co to jest spektrogram pierwiastka.

# Przeczytaj

## Warto przeczytać

W 1910 roku angielski chemik Frederic Soddy na drodze rozważań teoretycznych, analizując szeregi promieniotwórcze i przekształcenia wzajemne pierwiastków, doszedł do wniosku, że istnieją ich różne odmiany. Chemiczne właściwości tych odmian atomów są identyczne, stąd jako pierwiastek zajmują to samo miejsce w tablicy Mendelejewa. Różnią się jedynie masą.

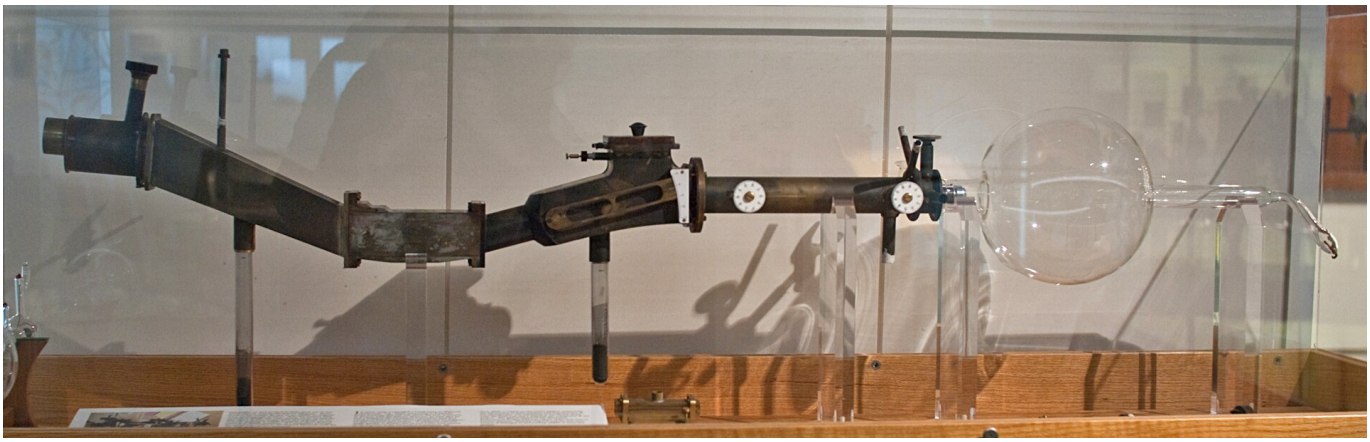
Pierwszy dowód doświadczalny na istnienie izotopów został dostarczony przez przez Josepha Johna Thomsona (znanego także jako J.J. Thomson). Używając pierwszego, prymitywnego jeszcze spektrografu masy, odkrył w 1913 roku dwa izotopy neonu (Rys. 1.).




Rys. 1. Zdjęcie płyty fotograficznej, na której w 1913 r. podczas badań nad budową lampy wyładowczej, J.J. Thomson zarejestrował ślady odchylonych w polu magnetycznym i elektrycznym izotopów zjonizowanego neonu $^{20}Ne$ i $^{22}Ne$.

Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Discovery_of_neon_isotopes.JPG [dostęp 14.05.2022 r.], domena publiczna.

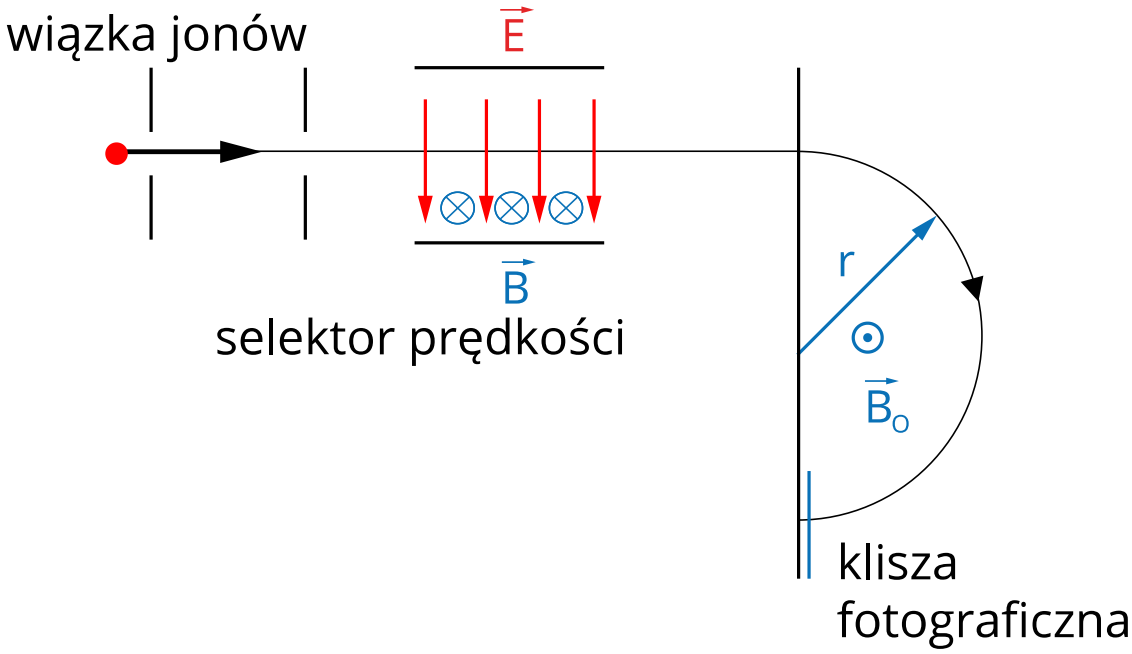
Uczeń J.J. Thomsona Francis William Aston zbudował pierwszy spektrograf masowy (Rys. 2.), czyli przyrząd, za pomocą którego mógł odseparować izotopy danego pierwiastka i nawet wyznaczyć ich masy. Jego badania zostały w 1922 roku uwieńczone nagrodą Nobla z chemii.



Rys. 2. Replika spektrografu masowego Astona.

Źródło: Jeff Dahl, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Early_Mass_Spectrometer_(replica).jpg [dostęp 14.05.2022 r.], licencja: CC BY-SA 3.0.

Wczesne spektrografy masowe z podwójnym ogniskowaniem zostały niezależnie opracowane w połowie lat trzydziestych XX wieku przez Dempstera (1935), Bainbridge'a i Jordana (1936) oraz Mattaucha i Herzoga (1934). Przyrządy te są oparte na teorii ogniskowania pierwszego rzędu. W tym miejscu omówimy nieco prostszy w budowie spektrograf masowy Bainbridge'a (Rys. 3.). Oto schemat jego budowy:




Rys. 3. Schemat budowy spektrografu masowego Bainbridge'a

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

Wiązka jonów trafia do selektora prędkości, którym jest komora ze skrzyżowanymi polami: magnetycznym o indukcji B i elektrycznym o natężeniu E. Tutaj dokonuje się selekcja cząstek - z komory wyjdą tylko te cząstki, które poruszają się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Aby tak się stało, oba pola muszą być skorelowane. Prześledźmy, jaki warunek musi być spełniony, aby cząstka opuściła selektor.

Na dodatni jon poruszający się w selektorze prędkości na Rys. 3. w prawo działa siła magnetyczna skierowana w górę. Przeciwnie działa na ten jon siła elektryczna. Zatem,

warunkiem ruchu jednostajnego prostoliniowego jest równowaga tych sił. Zapiszmy:

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

$$F_{mag} = qvB \sin \sphericalangle\left(\overrightarrow{v}, \overrightarrow{B}\right)$$

$$\sphericalangle\left(\overrightarrow{v}, \overrightarrow{B}\right) = 90^{\circ} \text{ więc } F_{mag} = qvB$$

Zatem $qvB = qE$, gdzie $qE$ jest wartością siły elektrycznej działającej na jon. Widać więc, że warunkiem ruchu jednostajnego prostoliniowego jest równość:

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

Jeśli jon będzie poruszał się z większą prędkością, to jej tor ulegnie odchyleniu do góry (większą wartość będzie miała siła magnetyczna). Jeśli będzie poruszał się z mniejszą prędkością, tor odchyli się w dół. Tory cząstek o prędkościach niespełniających tego warunku ulegną zakrzywieniu i cząstki nie wydostaną się z selektora.

Po opuszczeniu selektora, jon dodatni wpada w obszar jednorodnego pola magnetycznego o indukcji $B_0$. Cząstka wpada dokładnie prostopadle do linii tego pola, a więc siła magnetyczna pełni rolę siły dośrodkowej i zakrzywia tor cząstki, która ostatecznie trafia na kliszę fotograficzną, pozostawiając swój ślad. Siła magnetyczna jest tutaj siłą dośrodkową, co możemy wyrazić następującą równością:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB_0$$

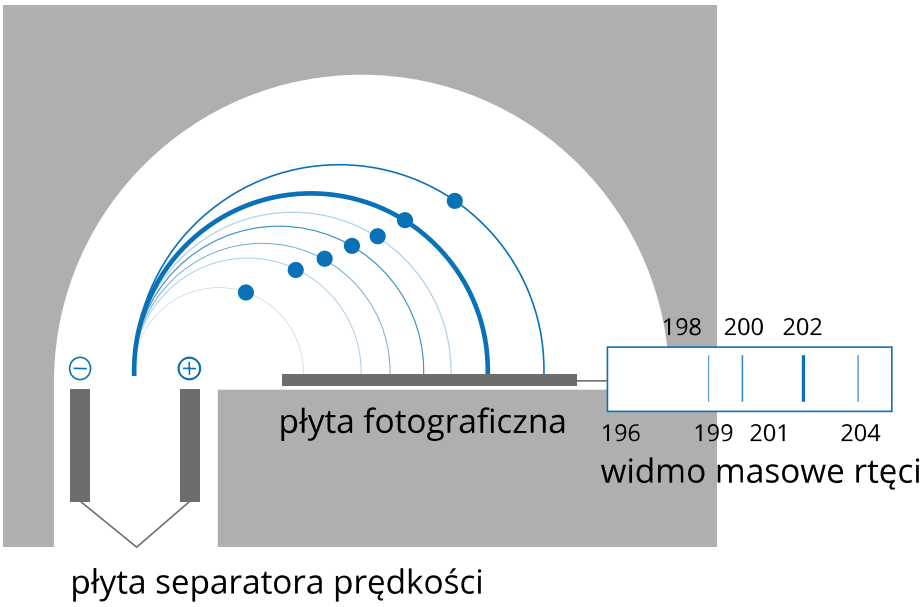
Wykorzystując warunek $v = \frac{E}{B}$, wyznaczamy masę jonu.

$$m = \frac{qrB_0B}{E}$$

Źródłem jonów jest tzw. komora jonizacyjna, w której badana substancja w fazie gazowej poddana jest zderzeniom ze strumieniem elektronów przyspieszonych do wysokich energii. Podczas zderzenia zostaje przekazana atomowi część energii kinetycznej elektronu i elektron z powłoki walencyjnej odrywa się od atomu – powstaje jon dodatni o ładunku +$e$. I to są najczęstsze przypadki. Czasem może dojść do podwójnej jonizacji i wtedy ładunek jonu wynosi +2$e$. Zajmijmy się jednak jonami o ładunku najczęściej występującym.

Wystarczy zmierzyć promień półokręgu, po którym porusza się jon, aby wyznaczyć jego masę. Korzystamy wtedy ze związku: $m = \frac{erB_0B}{E}$. Widać z wyprowadzonego powyżej wzoru, że wystarczy zmierzyć promień półokręgu zakreślonego przez cząstkę, aby wyznaczyć jej masę. A promień ten jest jednocześnie połową odległości między miejscem wlotu cząstki, a jej śladem na kliszy.

Zastanówmy się, co dostaniemy, gdy na kliszę trafią izotopy tego samego pierwiastka, np. jony, pochodzące z gazowej próbki rtęci. Rtęć ma 7 izotopów o różnych masach, a obraz jaki dostaniemy jest przedstawiony na Rys. 4.



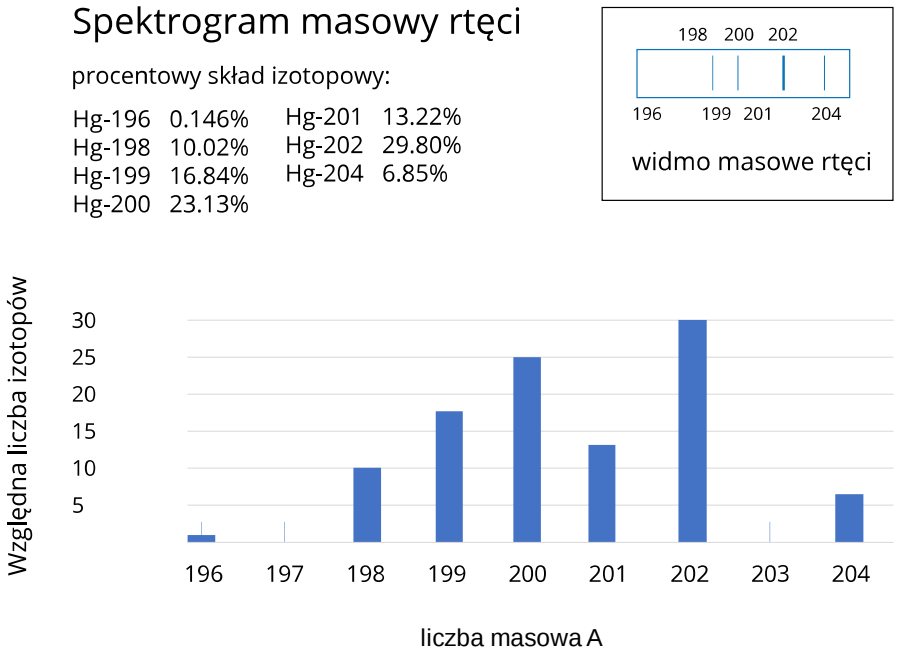

Rys. 4. Schemat pokazujący ślady po jonach na płycie fotograficznej. Liczby $^{196}$Hg, $^{198}$Hg, $^{199}$Hg, $^{200}$Hg, $^{201}$Hg, $^{202}$Hg, $^{204}$Hg oznaczają siedem stabilnych izotopów rtęci.

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

Jak sądzisz, dlaczego niektóre linie widmowe są wyraźne, a niektórych prawie nie widać?

Na płycie fotograficznej zobaczymy aż siedem śladów po jonach, gdyż rtęć ma 7 izotopów o różnych masach. Co więcej, zauważ, że pewne linie (ślady) są słabsze, a pewne mocniejsze. Zależy to od natężenia wiązki jonów danego izotopu. Tak więc badając powstałe widmo masowe rtęci możemy dowiedzieć się nie tylko, jakie są masy izotopów, ale także jaki jest skład izotopowy tego pierwiastka.

Ilościowy wynik tej obserwacji przedstawiony jest na wykresie (Rys. 5.). Przedstawia on zależność względnej liczby danego izotopu rtęci (w stosunku do wszystkich występujących) od liczby masowej $A$.




Rys. 5. Spektrogram masowy rtęci

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

## Słowniczek

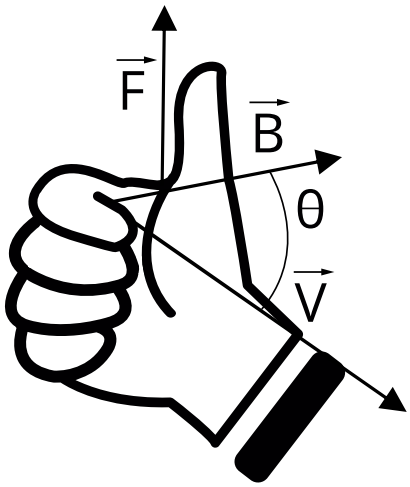
**Siła elektryczna (ang. electric force)**

siła działająca na ładunek znajdujący się w polu elektrycznym opisana równaniem wektorowym: $\overrightarrow{F}_{el} = q \cdot \overrightarrow{E}$, gdzie $q$ jest ładunkiem (z uwzględnieniem znaku) a $\overrightarrow{E}$ jest wektorem natężenia pola elektrycznego w punkcie, w którym znajduje się ładunek.

**Siła magnetyczna (ang. magnetic force)**

inaczej zwana siłą Lorentza (ściślej jej częścią magnetyczną) jest siłą działającą na poruszający się ładunek w polu magnetycznym; opisana jest równaniem $\overrightarrow{F}_{mag} = q \cdot \left(\overrightarrow{v} \times \overrightarrow{B}\right)$, gdzie $q$ jest ładunkiem (z uwzględnieniem znaku), $\overrightarrow{v}$ jest wektorem prędkości ładunku a $\overrightarrow{B}$ jest wektorem indukcji magnetycznej w punkcie, w którym znajduje się ładunek.

Wartość tej siły obliczana jest w następujący sposób: $F_{mag} = \left|q\right| vB \sin \sphericalangle\left(\overrightarrow{v}, \overrightarrow{B}\right)$, a kierunek wyznaczamy stosując regułę śruby prawoskrętnej, co symbolicznie pokazano na rysunku.




**Pole jednorodne (ang. uniform field)**

pole elektryczne, magnetyczne bądź grawitacyjne o liniach równoległych; w każdym punkcie przestrzeni wektory opisujące pole są takie same – o tej samej wartości, kierunku i zwrocie.

**Liczba masowa $A$ (ang. mass number)**

liczba nukleonów (czyli protonów i neutronów) w jądrze atomu danego izotopu danego pierwiastka.

**Masa atomowa (ang. atomic mass)**

masa atomu wyrażona w jednostkach masy atomowej $u$ (unit).

**Jednostka masy atomowej $u$ (ang. atomic mass constant)**

zdefiniowana jako 1/12 masy atomu węgla $^{12}C$

$$1u = 1,660538921(73) \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

# Film samouczek

## Jak działa i do czego służy spektrometr masowy?

W samouczku przedstawiamy rachunek dotyczący spektrogramu chloru, który posiada dwa izotopy trwałe. Wyobrazimy sobie pewne realia doświadczalne, które pozwolą uzmysłowić sobie, jak daleko od siebie będą położone ślady jonów izotopowych na płycie fotograficznej.

Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Zapoznaj się z audiodeskrypcją samouczka.

**Polecenie 1**

Różnica promieni $r_2$ i $r_1$ wynosi 2,1 cm. Czy to jest odległość między śladami na płycie fotograficznej?

**Polecenie 2**

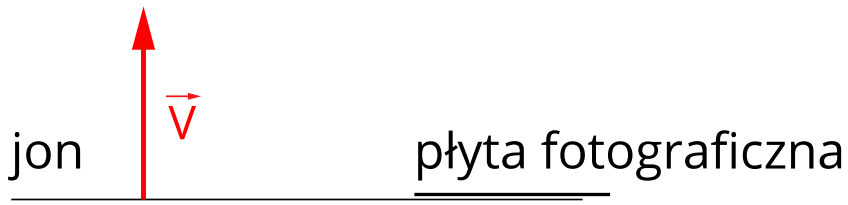
Który ślad powinien w rzeczywistym pomiarze być wyraźniejszy: jonu $Cl^{35}$ czy $Cl^{37}$?

# Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

## Ćwiczenie 1

Do obszaru zasadniczego w spektrografie wpada jon dodatni, tak jak jest to pokazane na rysunku.




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

Aby jony mogły zaznaczyć swój ślad na płycie fotograficznej wektor indukcji magnetycznej powinien być skierowany

- przed rysunek.
- za rysunek.

## Ćwiczenie 2

W okienko wpisz odpowiednie słowo.

Odpowiedź:

Za pomocą spektrografu masowego udowodniono istnienie _____ pierwiastków.

## Ćwiczenie 3

W jakiej odległości $d_2$ od otworu wejściowego do spektrografu pozostawi swój ślad podwójnie zjonizowany jon $+2e$, jeśli pojedynczo zjonizowany zostawia ślad znajduje się w odległości $d_1$ od otworu wejściowego.

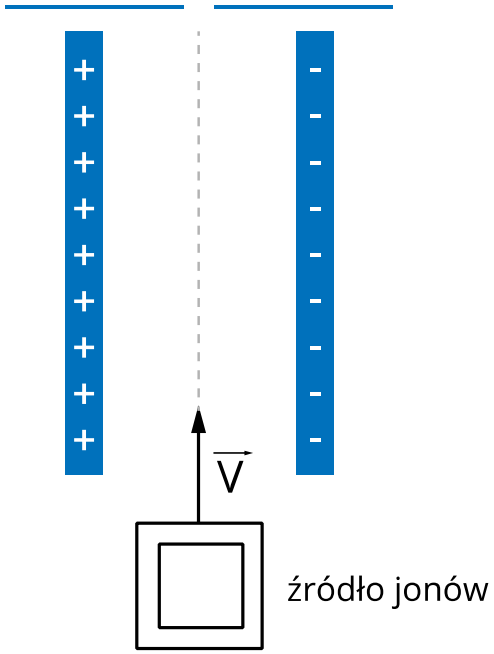
## Ćwiczenie 4

Wstaw poprawne zakończenie zdania.

Różne izotopy tego samego pierwiastka dają w spektrometrze ślady w różnych miejscach płyty fotograficznej, ponieważ jony tych izotopów mają różne _____.

## Ćwiczenie 5

Płyty elektryczne separatora prędkości wykorzystane w spektrometrze masowym są naładowane w sposób przedstawiony na rysunku.




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

Wybierz prawdziwe dokończenie zdania, jeżeli wiesz, że źródło zawiera dodatnie jony izotopów.

Odpowiedź:

Wektor indukcji magnetycznej powinien być skierowany [ w głąb rysunku ☐ / od rysunku do nas ☐ ].

## Ćwiczenie 6

W pewnym spektrometrze uzyskano w odległości $d_1$ od wlotu ślad jonu rtęci $^{200}$Hg. W jakiej odległości od tego śladu należy spodziewać się śladu jonu rtęci $^{201}$Hg? Czy ślad znajdzie się bliżej wlotu, czy dalej?

Odpowiedź:

$\Delta d = d_1 \cdot ($ _____ / _____ );

Ślad znajdzie się _____ wlotu.

## Ćwiczenie 7

W spektrometrze masowym zastosowano pole magnetyczne o indukcji $B_0$ = 1 T, a w separatorze prędkości indukcja magnetyczna miała wartość $B$ = 0,1 T. Oblicz wartość natężenia pola elektrycznego zastosowanego w separatorze prędkości, jeśli jon chloru $^{35}$Cl pozostawił ślad na płycie fotograficznej w odległości $d$ = 20 cm od wlotu do spektrometru. Przyjmij, że masa jonu chloru wynosi 35$u$, gdzie $1u \approx 1,66(73) \cdot 10^{-27}$ kg. Przyjmij, że $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Odpowiedź podaj w kV/m z dokładnością do dziesiątych.

Odpowiedź: $E \approx$ _____ kV/m

## Ćwiczenie 8

Zdolność rozdzielcza spektrometru jest tym większa, im większe są odstępy między śladami jonów – nie „zlewają się” one. Załóż, że prędkość jonów i wartość zastosowanej indukcji magnetycznej w spektrometrze jest stała. Zdecyduj, czy w tej sytuacji zdolność rozdzielcza zależy od masy (liczby masowej jonów), czy nie zależy. W zdaniu poniżej wybierz właściwą odpowiedź.

Odpowiedź: Przy stałym stosunku $\frac{v}{B_0}$ zdolność rozdzielcza spektroskopu [ nie zależy ☐ ] / [ zależy ☐ ] od masy jonu.

# Dla nauczyciela

**Konspekt (scenariusz) lekcji**

| | |
|---|---|
| **Imię i nazwisko autora:** | Nina Tomaszewska |
| **Przedmiot:** | Fizyka |
| **Temat zajęć:** | **Jak działa i do czego służy spektrometr masowy** |
| **Grupa docelowa:** | III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzający zapis podstawy programowej dla kształcenia rozszerzonego |
| **Podstawa programowa:** | **Cele kształcenia – wymagania ogólne**<br><br>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.<br><br>**Zakres rozszerzony**<br>**Treści nauczania – wymagania szczegółowe**<br><br>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:<br><br>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;<br><br>19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu;<br><br>VII. Elektrostatyka. Uczeń:<br><br>7) analizuje ruch cząstek naładowanych w polu elektrycznym;<br><br>IX. Magnetyzm. Uczeń:<br><br>3) analizuje tor cząstki naładowanej w jednorodnym polu magnetycznym;<br><br>**Zakres rozszerzający zapis podstawy programowej dla kształcenia rozszerzonego**. |

| | |
|---|---|
| **Kształtowane kompetencje kluczowe:** | **Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:**<br>• kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji,<br>• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,<br>• kompetencje cyfrowe,<br>• kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się. |
| **Cele operacyjne:** | Uczeń:<br>1. potrafi omówić budowę spektrografu masowego;<br>2. wyjaśnia rolę pola magnetycznego i elektrycznego w spektrografie;<br>3. wyjaśnia pojęcie- spektrogram. |
| **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:** | brak |
| **PRZEBIEG LEKCJI** | |
| **Faza wprowadzająca:** | |
| Nauczyciel pyta uczniów o pojęcie izotopu pierwiastka. Może zapoznali się z tym pojęciem już wcześniej na chemii, albo pamiętają z wcześniejszych etapów kształcenia. Jeśli nie, to nauczyciel wyjaśnia to pojęcie. Mówi pobieżnie o historii odkrycia izotopów i doświadczalnego potwierdzenia ich istnienia poprzez wyodrębnienie izotopów danego pierwiastka za pomocą pola magnetycznego. | |
| **Faza realizacyjna:** | |

| | |
|---|---|
| Nauczyciel opowiada o idei spektrometru masowego na przykładzie spektrometru Bainbridge'a. Omawia budowę i zasadę działania poszczególnych elementów spektrometru, w tym - selektor prędkości. Wyprowadza wzór opisujący promień półokręgu, po którym poruszają się jony. Zwraca uwagę na zależność masy od promienia, co daje możliwość badania za pomocą spektrografu różnych jonów. Tak więc następuje rozdzielenie jonów o różnych masach występujących w składzie pierwiastka. W obrazie śladów jonów – widmie jonowym widać linie o różnych natężeniach, świadczących o proporcjach między ilościami jonów uderzających w płytę fotograficzną. Stąd można wyciągnąć wnioski o składzie procentowym poszczególnych izotopów danego pierwiastka. Warto zaprezentować uczniom spektrogram rtęci (Rys. 5. w części „Warto przeczytać"), jako wynik badań składu izotopowego pierwiastka wykrytego za pomocą spektrometru masowego. Samouczek, jako przykład rachunków dotyczących konkretnego przypadku dwóch izotopów chloru uczniowie powinni przestudiować samodzielnie, tym bardziej, że ułatwi im to późniejsze rozwiązywanie zadań. | |
| **Faza podsumowująca:** | |
| W fazie podsumowującej nauczyciel wraz z uczniami powinien rozwiązać następujące zadania: 5., 6. i 7. z zestawu ćwiczeń. | |
| **Praca domowa:** | |
| Jako pracę domową można zadać zadania: 1., 2., 3., 4. i 8. z zestawu ćwiczeń. | |
| **Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:** | Symulacja, jako pewne ćwiczenie rachunkowe, (ale zawierająca też pytania aktywizujące) może być równie dobrze użyta jako praca domowa. |