Doświadczenie Rutherforda

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Grafika interaktywna (schemat)
- Symulacja interaktywna
- Dla nauczyciela

Czy to nie ciekawe?

Co tam jest w środku? Każdy zadawał sobie to pytanie. Jest ono jednym z objawów naturalnej ludzkiej ciekawości.

Zaspokajamy tę ciekawość począwszy od wieku niemowlęcego. Im kto dłużej potrafi stawiać sobie to pytanie (także inne, jemu podobne), najlepiej aż do późnej starości, tym ma bogatsze życie.

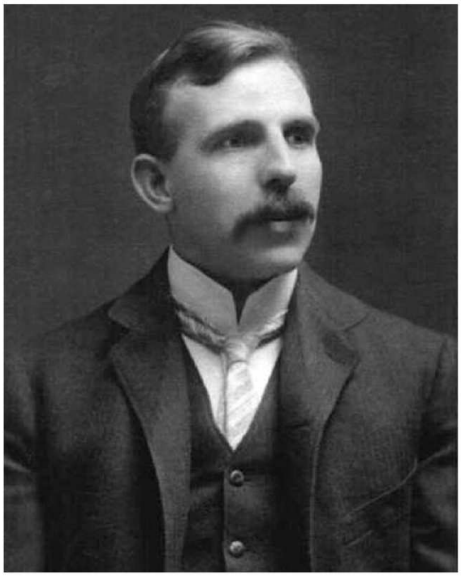
Ale o co tak naprawdę pytamy? Dziecko zaglądające do wnętrza zabawki szuka przede wszystkim jakiejś nowej materialnej struktury. Młody człowiek zaglądający do książki, do Internetu szuka przede wszystkim informacji – mniej interesuje go, z czego to jest zrobione. Archeolog zaglądający do odkopywanej właśnie zabytkowej budowli, szuka zarówno informacji, jak i materialnej struktury – tę ostatnią także zamieni na informację. Podobnie geolog, zaglądający (za pomocą młotka i dłuta, lupy, promieni X) do wnętrza skały, szuka tam minerału i ... symetrii oraz piękna.

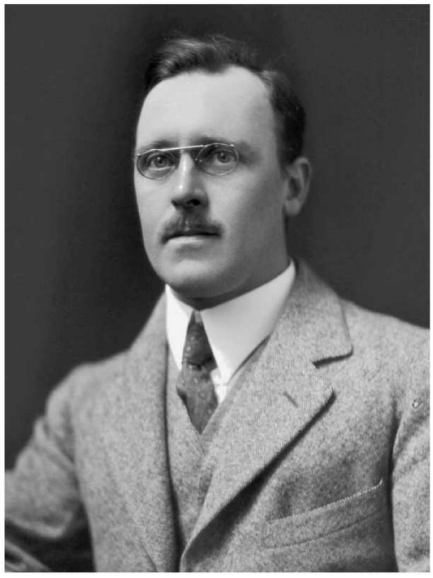
Rys. a. Geoda ametystowa w skale macierzystej.

Czy koniecznie trzeba zmienić zewnętrzną strukturę lub wręcz zniszczyć to, co chcemy obejrzeć w środku? Na szczęście, nie! Lekarz zagląda przecież, za pomocą całego arsenału środków i narzędzi, do wnętrza ludzkiego organizmu. Cenimy współczesną medycynę za zaglądanie mało inwazyjne lub niemal bezinwazyjne. Zaglądanie do wnętrza nie musi odbywać się za pomocą ludzkich zmysłów – potrafimy patrzeć za pomocą ultradźwięków, promieni X, fal radiowych i wielu innych technik.

Czy zawsze jesteśmy przygotowani na wynik zaglądania? Na pewno nie, pomyśl choćby o zajrzeniu do nieświeżego jajka. Alchemicy często zaglądali do swoich mieszanek za pomocą ognia – czasami wybuchało, bo w środku, prócz struktury i informacji była zmagazynowana energia. Zajrzenie do wnętrza jądra atomowego wręcz pozwoliło przewidzieć, choć nie od razu, że „z tego będzie energia".

Ernst Rutherford, wespół ze współpracownikami Hansem Geigerem i Ernestem Marsdenem, pod koniec pierwszej dekady XX w., zajrzeli do wnętrza atomu. Obiektu, którego istnienie sto lat wcześniej było jedynie hipotezą, ciekawostką odziedziczoną po Demokrycie i kilku jeszcze starożytnych myślicielach. Obiektu, o którym jeszcze w połowie XIX w. uważano, że nie ma niczego w środku. Obiektu wreszcie tak małego, że nie dało się go dojrzeć – wiadomo było tylko, że atomy raczej są. Czym zajrzeli do atomu? Czego tam szukali? Co zobaczyli? Czy to, czego się spodziewali, czy coś zupełnie innego? Na pewno warto o tym wszystkim poczytać…





Rys. b. (od lewej) Ernest Rutherford, Hans Geiger i Ernest Marsden zaprojektowali i przeprowadzili w latach 1908-1911 serię eksperymentów, w których badali rozkład materii we wnętrzu atomu. Po zinterpretowaniu wyników opracowali planetarny model atomu.

Twoje cele

Pracując z tym e-matriałem:

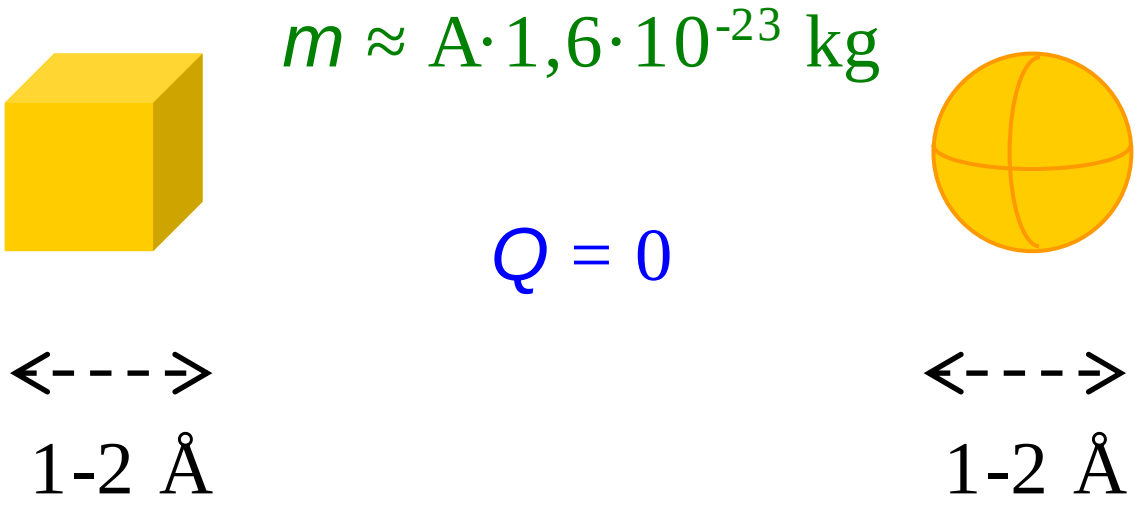
- opiszesz stan wiedzy o budowie atomu z przełomu XIX i XX wieku,
- przedstawisz założenia i cel doświadczenia Rutherforda, w tym problematykę rozmiarów tzw. rdzenia atomowego,
- przeanalizujesz warunki rozpraszania cząstek α wstecz z punktu widzenia sił na nie działających oraz przemian energii,
- przeprowadzisz symulacje różnych wariantów doświadczenia Rutherforda i zinterpretujesz ich wyniki.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Co wiedziano o atomie?

XIX wiek przyniósł wiele dociekań naukowych z pogranicza chemii i fizyki. Były to badania nad problematyką pierwiastek a związek chemiczny, nad ilościowym aspektem reakcji chemicznych, w tym zjawiska elektrolizy, także z zakresu termodynamiki i optyki. Pojawiła się koncepcja liczby Avogadro. Objaśnienie zachowania się materii w stanie skupienia lotnym było ogromnym sukcesem teorii kinetyczno-molekularnej. Zakładała ona ziarnistą strukturę materii, czyli istnienie najmniejszych jej porcji: atomów lub ich ściśle określonych grup – cząsteczek. To najczęściej podawany przykład; wiele innych zjawisk także zostało wyjaśnionych w oparciu o podobne założenia. Z kolei badania nad materią w stanie skupienia stałym pozwoliły oszacować rozmiary poszczególnych atomów (Rys. 1.). Okazało się, że niezależnie od pierwiastka, rozmiary te były rzędu jednego-dwóch angstremów. Potrafiono oszacować także masy różnych atomów – te okazały się być związane z liczbą masową ***A*** pierwiastka. Wiadomo było, że atomy są elektrycznie obojętne.



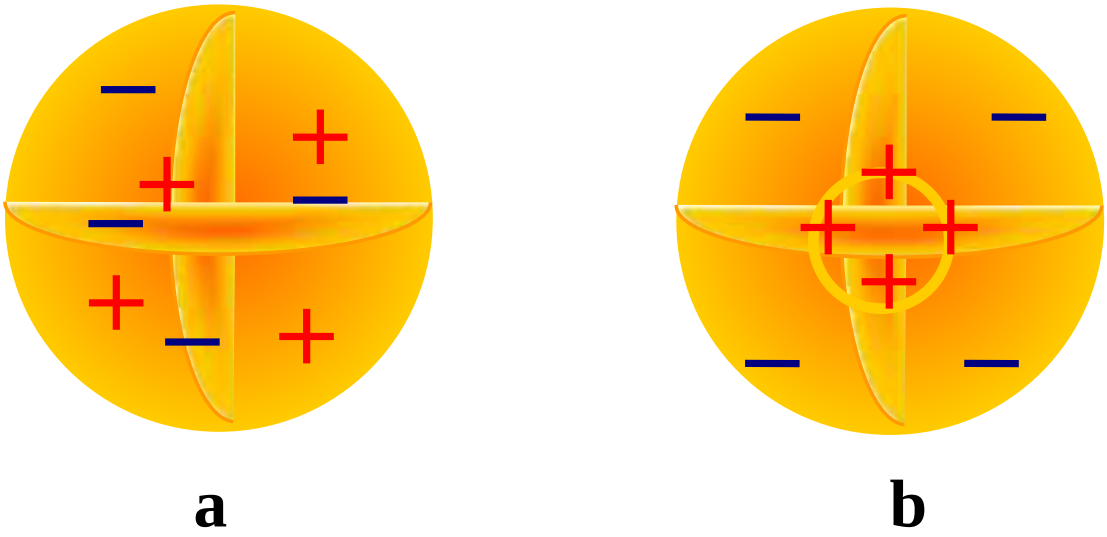
Rys. 1. Niezależnie od tego, czy wyobrażano sobie atomy jako kulki, sześcianiki czy obiekty innego kształtu, to znano ich orientacyjne rozmiary, liczbę atomową Z i masową A oraz wiedziano o ich elektrycznej obojętności.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Polecenie 1

Wykorzystaj wartości stałej Avogadro N_A masy molowej złota $M_{Au} \approx 0,2 \frac{kg}{mol}$ oraz gęstości złota $d_{Au} \approx 2 \cdot 10^4 \frac{kg}{m^3}$ i oszacuj masę pojedynczego atomu złota oraz jego rozmiar.

Co jest w środku?

Nieoczekiwanym wynikiem tychże badań było ujawnienie wewnętrznej struktury atomów. Znane od kilku dekad promienie katodowe rozpoznano w pierwszej dekadzie XX w. jako wiązki „atomów elektryczności" (dziś wiemy: elektronów) o właściwościach niezależnych od materiału, z którego były emitowane. Wniosek mógł być tylko jeden: elektrony są częścią składową każdego atomu. Jednak zarówno ich niezerowy ładunek elektryczny (dziś wiemy, że ujemny) jak i znana wtedy ich masa (o trzy – cztery rzędy wielkości mniejsza od masy atomu) wskazywały, że atomy muszą mieć jeszcze jakieś składniki (Rys. 2.).



Rys. 2. Na przełomie XIX i XX wieku powstało kilka modeli opisujących przestrzenny rozkład materii i ładunku. Niektóre (rys. 2a) przewidywały równomierny rozkład materii i ładunku we wnętrzu atomu.
Dominował jednak pogląd o istnieniu rdzenia atomu (Rys. 2b) – dodatnio naładowanej, masywnej wewnętrznej podstruktury, z którą w ten czy inny sposób, niekoniecznie symetryczny, związane są elektrony.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Problem dotyczył sposobu rozmieszczenia składników wewnątrz atomu, także charakteru ich ewentualnego ruchu. Stawiano różne hipotezy, choć dominowało przekonanie, że:

- masa atomu powiązana jest z tym, co w jego wnętrzu jest naładowane dodatnio (Rutherford nazywał to rdzeniem atomowym);
- ta masa jest mniej lub bardziej równomiernie rozłożona w obszarze mniejszym od rozmiaru atomu o rząd wielkości, może o dwa, czyli od 0,01 Å do 0,1 Å;
- w atomie musi być niemało pustego miejsca lub materia atomowa nie wywołuje oporu ruchu – wiązka elektronów, także wiązka promieni X, swobodnie przechodziły przez odpowiednio cienkie obszary materii, np. przez metalowe folie o kilkumikronowej grubości.

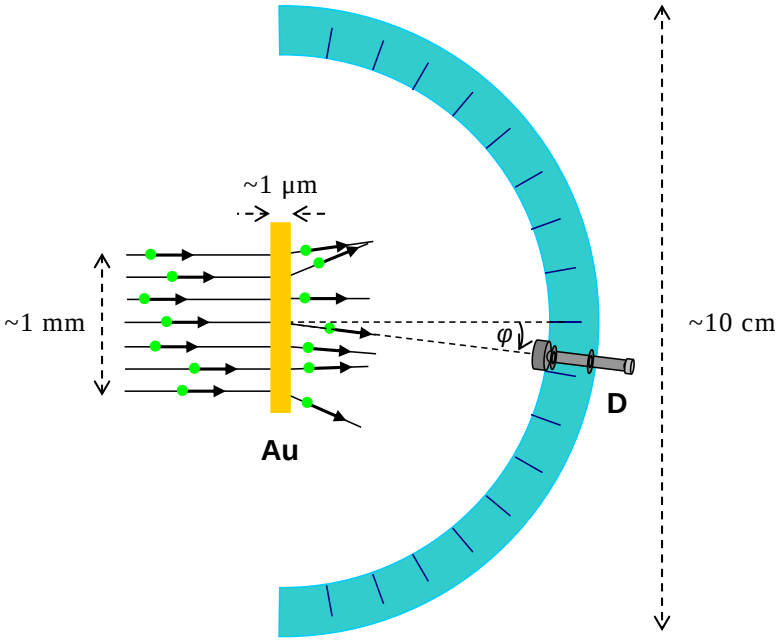
Ważne!

> Dla potrzeb opisu doświadczenia Rutherforda będziemy posługiwać się pojęciem *rdzenia atomowego*. Należy jednak pamiętać, że pojęcie to zniknęło z fizyki i od 1915 roku zostało zastąpione bardziej jednoznacznym pojęciem jądra atomowego. Dwie zasadnicze różnice pomiędzy *rdzeniem* atomu a jego jądrem to:
>
> - rozmiar – jądro atomu ma promień do 10^{-14} m, czyli o dwa-trzy rzędy wielkości mniej niż hipotetyczny jego rdzeń;
> - zawartość – jądro atomu nie zawiera elektronów, rdzeń zaś, zależnie od modelu, dopuszczał ich obecność w swoim obrębie.

Jak zajrzeć do środka atomu?

Każdy fizyk powie dziś, że to proste. Wystarczy skierować w atom odpowiednio dobrane cząstki, pełniące rolę pocisków i zbadać skutki oddziaływania tych pocisków ze składnikami atomu. By uniknąć skutków oddziaływania z elektronami, pociski muszą mieć znacznie większą od nich masę. Ale powinny też mieć masę mniejszą od masy tego, co w atomie chcemy zbadać. By uniknąć mało czytelnego rezultatu, pociski muszą też mieć odpowiednio dużą energię. W czasach Rutherforda nie było akceleratorów – wybór pocisku był więc niewielki: cząstki α, odkryte przezeń dziesięć lat wcześniej, dobrze spełniały te warunki. Celem (fizycy czasami używają określenia „tarcza") dla cząstek α były atomy złota w cieniutkiej folii. Rutherford i współpracownicy badali także inne metale, ale złoto, metal kowalny i ciągliwy, pozwalało uformować folię o grubości nawet pół mikrometra ($0{,}5 \cdot 10^{-6}$ m).

Mierzalnym skutkiem oddziaływania z atomem złota był kąt rozproszenia φ cząstki α (Rys. 3.).



Rys. 3. Schemat doświadczenia Rutherforda (widok z góry).
Cząstki α nadlatują w postaci wiązki o szerokości rzędu milimetra i ulegają rozproszeniu w metalowej folii

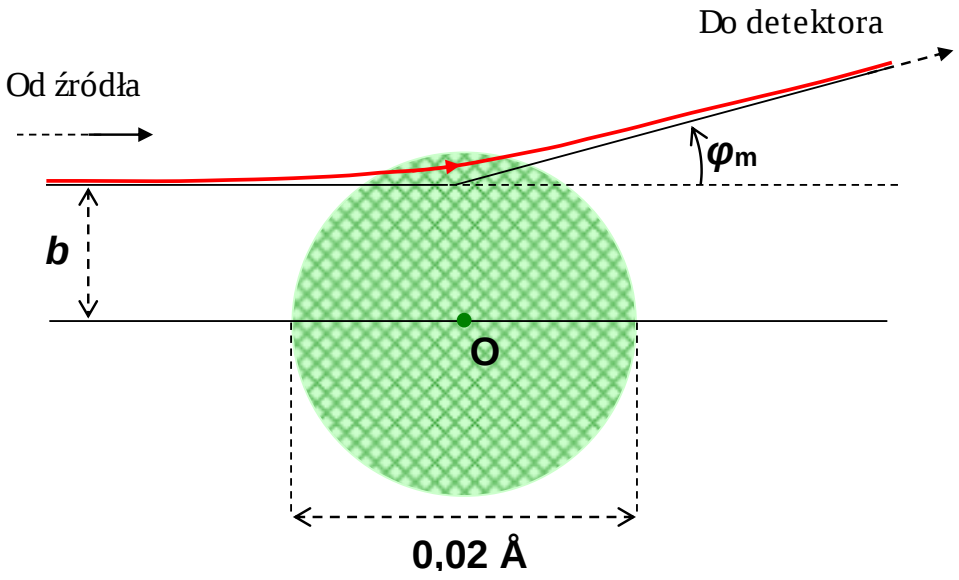
o grubości rzędu mikrona. Detektor cząstek α ustawiany jest, kolejno, pod różnymi kątami do oryginalnego kierunku wiązki, na półokrągłej prowadnicy o rozmiarze rzędu decymetra.
Eksperymentator patrzy w okular i zlicza, przez umówiony czas, liczbę błysków wywołanych cząstkami α rozproszonymi pod zadanym kątem. Czas zliczania jest jednakowy dla wszystkich kątów.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Kąt rozpraszania φ zależy od kilku czynników:

- od energii kinetycznej E_k cząstki α,
- od jej ładunku, $q_a = +2e$,
- od ładunku jądra (złota lub innego pierwiastka użytego w doświadczeniu), czyli od liczby atomowej Z tego pierwiastka: $Q = +Ze$,
- od założonego promienia rdzenia atomowego R_j,
- od parametru zderzenia b cząstki α z jądrem.

Czego się spodziewano?

Rutherford i współpracownicy badali, jak często zdarza się rozproszenie pod określonym kątem φ w stosunku do oryginalnego kierunku lotu. Oczekiwali, zgodnie z ówczesnymi wyobrażeniami o rozmiarach rdzenia atomowego, że kąty te zawarte będą w ograniczonym, stosunkowo niewielkim przedziale. Maksymalna wartość φ_m kąta rozproszenia zależy od przyjętego promienia r_j i dla każdej jego wartości jest osiągana przy różnych wartościach parametru zderzenia b_m. Na rys. 4. pokazano tor cząstki α o energii 1 MeV rozproszonej pod maksymalnym kątem przy założeniu wartości R_j = 0,01 Å. Tak się składa, że cząstka α przechodzi wtedy przez niewielką warstwę rdzenia.



Rys. 4. Tor cząstki α o E_k = 1 MeV, rozproszonej w wyniku oddziaływania z rdzeniem atomu złota. Przyjęto hipotetyczny promień rdzenia R_j = 0,01 Å (10^{-12} m). To o ponad dwa rzędy wielkości więcej, niż rzeczywisty promień jądra atomu złota. Byłoby ono na tym rysunku mniejsze od kropki oznaczającej środek

atomu
Parametr zderzenia $b \approx 8 \cdot 10^{-13}$ m zapewnia przy tych warunkach maksymalny kąt rozproszenia $\varphi_m \approx 15°$.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Cząstki α padające z parametrami większymi niż b_m i omijające hipotetyczny rdzeń zostają zawsze rozproszone pod mniejszym kątem – przelatują one dalej od środka ładunku dodatniego i są słabiej odchylane. Podobnie jest z cząstkami padającymi bliżej kierunku centralnego **($b < b_m$)** i przechodzącymi przez dużą część rdzenia. Są one także słabiej odchylane, bo we wnętrzu rdzenia pole elektryczne też jest słabsze, niż przy jego brzegu.

Wyniki obliczeń kątów φ_m dla kilku wartości promienia rdzenia atomowego, prowadzonych zgodnie z wiedzą o strukturze atomu z początku XX wieku, przedstawia tabela 1. Warto pamiętać, że wartości R_j mniejszych niż 0,01 Å dla rdzenia atomowego nie brano wówczas pod uwagę.

Promień rdzenia atomowego R_j	**maksymalny kąt rozproszenia φ_m**	**maksymalny kąt przy parametrze zderzenia b_m**
0,1 Å	1,4°	0,09 Å
0,05 Å	2,7°	0,046 Å
0,01 Å	15°	0,008 Å
0,005 Å	37°	0,003 Å

Tabela 1. Wartości maksymalnych kątów rozproszenia cząstki α o energii 1 MeV na atomach złota. Wartość R_j w ostatnim wierszu była zdecydowanie mniejsza od wyobrażeń eksperymentatorów co do możliwych rozmiarów rdzenia atomowego atomów złota.

Wniosek: Ówczesna wiedza dopuszczała maksymalne kąty rozproszenia rzędu kilkunastu stopni.

Szok poznawczy eksperymentatora

Okazało się – zgodnie z oczekiwaniami – że ogromna większość cząstek α była rozpraszana pod niewielkimi kątami, rzędu kilku stopni. Okazało się także – zupełnie **niezgodnie z oczekiwaniami** – że w pojedynczych przypadkach cząstki α były rozpraszane pod kątem większym niż 90°, a nawet były odbijane niemal dokładnie wstecz! Geiger i Marsden sprawdzali to wielokrotnie, za pomocą różnych nieco zestawów doświadczalnych, zanim donieśli o tym Rutherfordowi. Takiego wyniku nie spodziewał się nikt.

> **Ciekawostka**
>
> Rutherford wielokrotnie wspominał, że był skrajnie zdumiony tym wynikiem. Podczas jednego ze swych wykładów w Uniwersytecie Cambridge wypowiedział słynne słowa,

> których dramatyzmu nie odda żadne tłumaczenie: „*It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a* 15-inch shell *at a piece of tissue paper and it came back and hit you.*”

Znamienny jest ciąg dalszy przytoczonej wyżej wypowiedzi: „Po zastanowieniu się doszedłem do wniosku, że rozproszenie pod takim kątem to zapewne efekt pojedynczego zderzenia. Przeprowadziłem odpowiednie obliczenia; przekonały mnie one, że możliwe jest jedno tylko wyjaśnienie: atom to układ, którego praktycznie cała masa skoncentrowana była w mikroskopijnym jądrze, naładowanym dodatnio.”
Oto wnioskowanie godne fizyka: gdy prawidłowo przeprowadzony eksperyment nie zgadza się z wcześniejszymi przekonaniami, a nawet z dobrze ugruntowaną teorią, to odrzucamy przekonania a teorię opracowujemy ponownie.

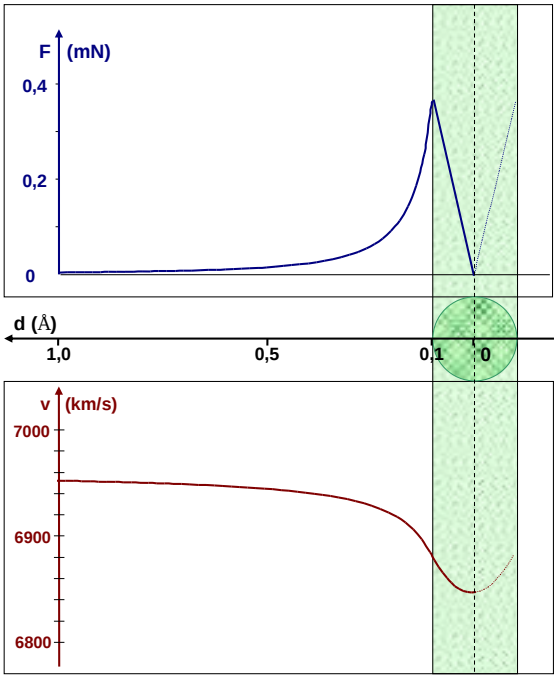
Interpretacja Rutherforda

Prześledźmy, za pomocą trzech wykresów przedstawionych na rysunkach 5., 6. i 7., co zobaczył Rutherford we wnętrzu atomu. Na wszystkich wykresach cząstka α o energii 1 MeV (odpowiada to prędkości niemal 7000 $\frac{km}{s}$), zbliża się centralnie do atomu – parametr zderzenia wynosi zero. Ładunek rdzenia atomu przyjmujemy taki, jak jądra złota – 79 ładunków elementarnych. Siła odpychania elektrostatycznego rdzenia ma zwrot przeciwny do prędkości cząstki α. Przyjmujemy, że atom pozostaje nieruchomy i pytamy, czy siła Coulomba zdoła zatrzymać cząstkę α i skierować ją wstecz, zanim ta minie środek rdzenia. Jeśli tak, cząstka α zostanie następnie przyspieszona przez siłę Coulomba i powróci skąd przyleciała, a kąt jej rozproszenia wynosić będzie 180°. Jeśli zaś nie, to cząstka α poleci dalej, a kąt rozproszenia będzie równy zero. Okazuje się, że rozmiar rdzenia atomowego ma tu znaczenie rozstrzygające.

R_j = 0,1 Å, czyli rdzeń 10-krotnie mniejszy od atomu

Rys. 5. przedstawia sytuację w skali całego atomu, który ma promień 1 Å. Promień rdzenia to R_j = 0,1 Å. Na górnej części wykresu pokazano zależność wartości siły Coulomba od odległości od środka rdzenia. Siła ta osiąga maksymalną wartość niecałych 0,4 mN, gdy cząstka α wnika w rdzeń. Od tego momentu, siła Coulomba maleje liniowo, osiągając wartość zero w środku rdzenia. W dolnej części wykresu odłożony jest przebieg zależności prędkości cząstki α od tej samej odległości. Prędkość ta maleje wraz ze zbliżaniem się do brzegu rdzenia. Po wniknięciu w obszar rdzenia to zmniejszanie się jest mniej wyraziste – odpowiada to malejącej wartości siły Coulomba. W sumie prędkość zmalała o niecałe 2%. Po minięciu środka rdzenia cząstka α jest przyspieszana, wskutek czego opuści ona rdzeń a następnie cały atom.

Wniosek: obecność cząstek α o energiach rzędu 1 MeV i więcej (takich używali Geiger i Marsden) odbitych wstecz wyklucza tak duży rozmiar rdzenia - rzędu 0,1 Å.

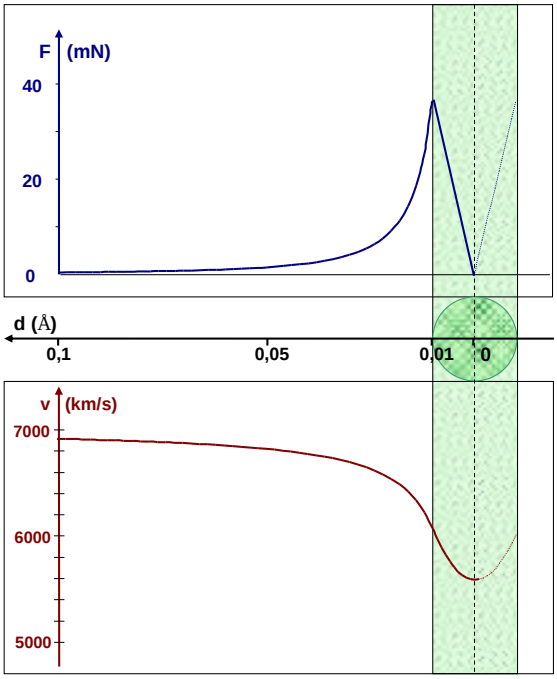


Rys. 5. Wykresy zależności wartości siły Coulomba oraz prędkości cząstki α w funkcji odległości ***d*** od środka rdzenia atomowego.
Pozioma oś, wspólna dla obu wykresów, umieszczona jest pomiędzy nimi. Rdzeń o promieniu **0,1** Å (oznaczony kolorem zielonym) umieszczono po prawej stronie wykresu, dlatego oś odległości ma nietypowy zwrot: w lewo.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

R_j = 0,01 Å, czyli rdzeń 100-krotnie mniejszy od atomu

Zmniejszmy więc, w kolejnej rundzie obliczeń, promień rdzenia dziesięciokrotnie, do 0,01 Å. Rys. 6. przedstawia tę sytuację, choć nie mieści się na nim już atom, którego orientacyjny promień wynosi 1 Å. Zwróć uwagę na skalę na osi odległości – wykres obejmuje teraz obszar od 0,1 Å do środka rdzenia. Jego przebieg jest bardzo podobny do poprzedniego. Różnica dotyczy skali. Siła Coulomba osiąga na brzegu mniejszego rdzenia wartość 40 mN, czyli sto razy większą niż w przypadku rdzenia większego. Jest to zrozumiałe: stosunek promieni 1:10 oznacza stosunek sił 100:1. Skutkiem tego jest zmalenie prędkości cząstki α o ok. 18%. Jednak nie maleje ona do zera, więc cząstka α mija środek rdzenia i przelatuje przez atom.

Wniosek: Rdzeń atomowy musi mieć promień mniejszy, niż nawet 0,01 Å, bo inaczej nie odbijałby cząstek α wstecz.

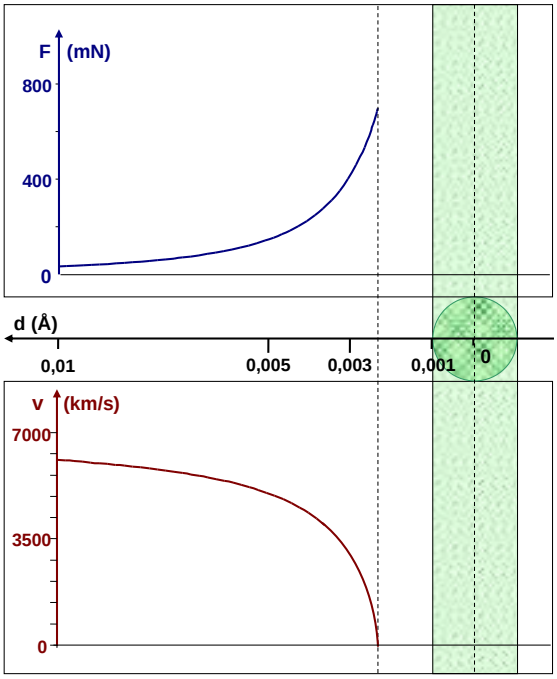


Rys. 6. Wykresy zależności wartości siły Coulomba oraz prędkości cząstki α w funkcji odległości ***d*** od środka rdzenia atomowego o promieniu **0,01** Å.
Maksymalna wartość siły jest stukrotnie większa niż w przypadku przedstawionym na rys. 5., co pociąga za sobą większy spadek prędkości cząstki α.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

R_j = 0,001 Å, czyli rdzeń 1000-krotnie mniejszy od atomu

Kolejny raz zmniejszmy dziesięciokrotnie promień rdzenia – do jednej tysięcznej angstrema – nie zmieniając pozostałych parametrów. Zauważamy (Rys. 7.) coś nowego na wykresie prędkości: jej wartość spadła do zera, gdy cząstka α była w odległości około 0,0023 Å od środka rdzenia, czyli 0,0013 Å od jego brzegu. W tym położeniu cząstka α została rozpędzona w kierunku, z którego nadleciała – kąt jej rozproszenia ma wartość 180°. Warto zwrócić uwagę, że siła Coulomba osiągnęła wartość około 700 mN.

Wniosek: „małe jest silne” - rdzeń atomowy o promieniu 0,001 Å jest w stanie zatrzymać cząstkę α o energii 1 MeV i rozproszyć ją wstecz. Jest na to nawet pewien „zapas”, gdyż cząstka zatrzymuje się nieco ponad 0,001 Å od brzegu takiego rdzenia.



Rys. 7. Wykresy zależności wartości siły Coulomba oraz prędkości cząstki α w funkcji odległości ***d*** od środka rdzenia atomowego o promieniu 0,001 Å. W odległości ok. 0,0013 Å od jego brzegu cząstka α zostaje zatrzymana i przyspieszona w kierunku, z którego nadleciała.

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

Podsumowanie

Obecność cząstek α o energii 1 MeV rozproszonych wstecz wyklucza promień rdzenia atomowego większy niż około 0,002 Å. Geiger i Marsden dysponowali cząstkami α o energiach w zakresie od ponad 1 MeV do około 5 MeV, z kilku różnych preparatów promieniotwórczych. Wszystkie one bywały rozpraszane wstecz. Analogiczne rozumowanie i obliczenia pozwoliły Rutherfordowi określić maksymalny możliwy promień rdzenia atomowego na około 0,001 Å. Spowodowało to zarzucenie określenia „rdzeń atomowy” na rzecz znanego dziś „jądra atomowego”.

Dalsze badania nad strukturą atomu, w których wykorzystywano różne cząstki, w tym protony, przyspieszane w akceleratorach do coraz większych energii, pozwoliły zbadać rozmiary jąder różnych atomów. Okazało się, że promień jądra wzrasta wraz z jego liczbą masową A, nie osiągając jednak 0,0001 Å, czyli 10^{-14} m.

Równoległe badania składu atomu pozwoliły, około ćwierci wieku po doświadczeniach prowadzonych pod kierunkiem Rutherforda i po odkryciu w 1932 r. neutronu, ustalić skład jąder atomowych różnych pierwiastków i ich izotopów.

Słowniczek

liczba Avogadro

(*ang.: Avogadro constant*)
Historycznie: **liczba** Avogadro to liczba cząstek (atomów lub cząsteczek) w jednym molu substancji. Przy takiej definicji, należy jeszcze dodać, że mol substancji to liczba atomów w (dokładnie) 12 gramach węgla.
Obecnie: **stała** Avogadro jest stałą fizyczną równą dokładnie $6.02214076 \times 10^{23}$ mol^{-1}. Tę jednostkę można sobie przepowiadać jako „sztuk (cząstek) na mol (substancji)". Natomiast mol substancji jest zdefiniowany jako ilość substancji zawierającej dokładnie tyle cząstek, ile wynosi stała Avogadro.

angstrem

(*ang.: angstrom, ångström*) jednostka długości stosowana w fizyce atomowej do opisywania rozmiarów obiektów oraz w optyce do wyrażania długości fal światła widzialnego, nadfioletu oraz promieni X. Jest ona oznaczana symbolem Å, literą szwedzkiego alfabetu odpowiadającą dźwiękowi zbliżonemu do polskiego 'o' oraz 'ą'; 1 Å – 10^{-10} m. Oznaczenie to pochodzi od nazwiska Andersa Ångströma, szwedzkiego fizyka i astronoma drugiej połowy XIX w.

promienie katodowe

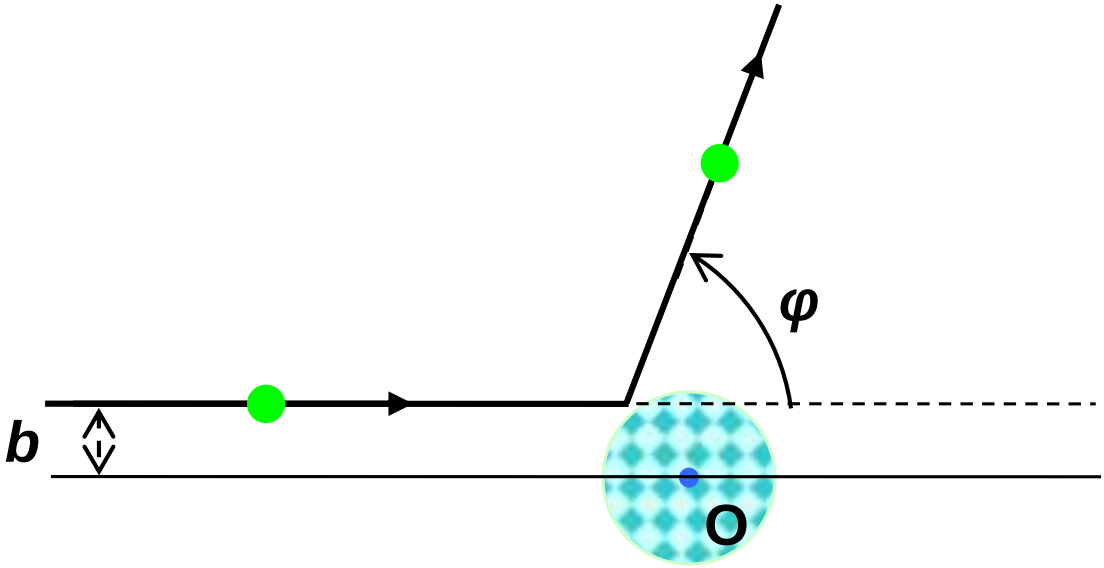
(*ang.: cathode rays*) wiązka elektronów uzyskiwana we wnętrzu szklanej rury, z której odpompowano powietrze. W końcach rury wtopione są elektrody, do których przykłada się napięcie rzędu tysięcy czy dziesiątków tysięcy woltów. Pozostałości powietrza (lub innego gazu) są pobudzane do świecenia przez przyspieszane tym napięciem elektrony.

elektronowolt

(*ang.: electron volt*) skrót: eV, jednostka energii stosowana w fizyce atomowej i subatomowej: 1 eV ≈ $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J. Używane są też wielokrotności elektronowolta, w tym megaelektronowolt: 1 MeV = 10^6 eV.

rozpraszanie

(*ang.: scattering*) w fizyce jądrowej i cząstek elementarnych: zmiana kierunku lotu cząstki padającej, inicjującej reakcję, wskutek oddziaływania z inną cząstką. Możliwą miarą rozpraszania jest kąt rozproszenia, zawarty pomiędzy kierunkiem, z którego nadlatuje cząstka a kierunkiem, w którym odlatuje po oddziaływaniu.

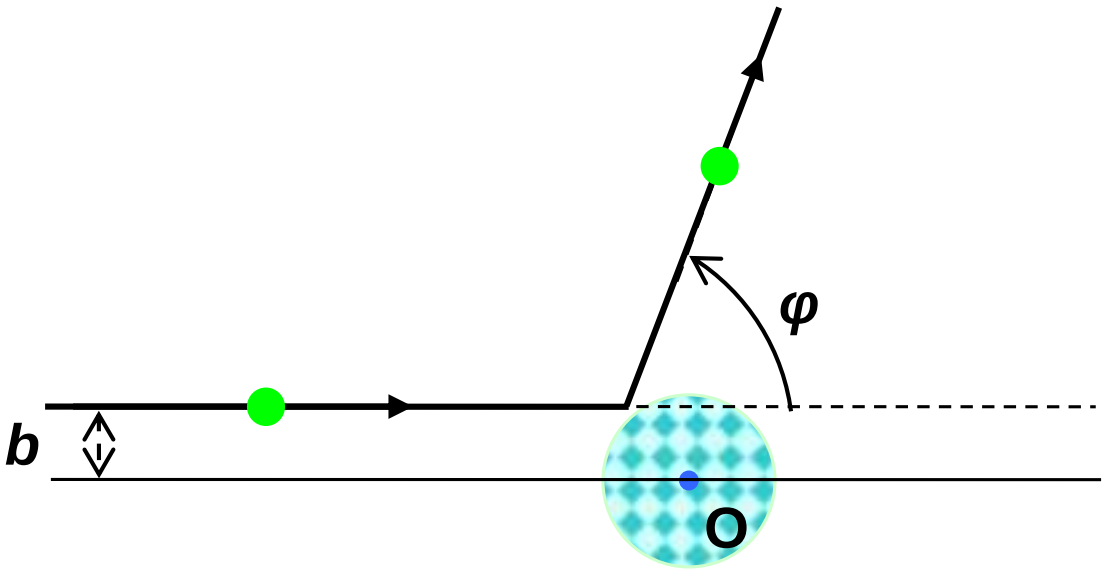


b – parametr zderzenia, φ – kąt rozproszenia

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

parametr zderzenia

(*ang.: collision parameter*) odległość pomiędzy linią prostą, po której porusza się jeden obiekt zanim zacznie oddziaływać z drugim a linią równoległą do niej, przechodzącą przez środek drugiego obiektu.



b – parametr zderzenia, φ – kąt rozproszenia

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

rdzeń atomowy

(*ang.: atomic core*) wprowadzona na początku XX wieku hipotetyczna struktura we wnętrzu atomu, mająca zawierać praktycznie całą masę atomu i cały jego ładunek dodatni. Zależnie od przyjętego modelu budowy atomu, we wnętrzu rdzenia mogły

przebywać także elektrony, a jego rozmiar mógł się zmieniać w zakresie dwóch rzędów wielkości – od 1 Å do 0,01 Å.
Po wynikach uzyskanych przez Rutherforda i jego zespół fizycy zaprzestali używania tego terminu na rzecz współczesnej nazwy „jądro atomowe” (*ang: atomic nucleus*).

ładunek elementarny

(*ang.: elementary charge*) oznaczany symbolem ‘e’ ładunek protonu; 1 e ≈ $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C. Elektron ma ładunek -1 e.

15-inch shell

pocisk kalibru 15 cali (381 mm). Kaliber pocisku to, w przybliżeniu, średnica poprzecznego przekroju tego pocisku w najszerszym jego miejscu. Tu chodzi zapewne o pocisk do armaty morskiej typu Mark I, produkowanej i używanej w brytyjskiej marynarce jako działo okrętowe oraz nabrzeżne. Pocisk miał masę ponad 850 kg, był wyrzucany z lufy z prędkością niemal 800 m/s i miał maksymalny zasięg od 21 km do 40 km, zależnie od wersji działa.

Dwa działa typu Mark I, wystawione przed Imperial War Museum w Londynie.

Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:15inchGunsIWMSideView1.jpg [dostęp 24.06.2022], licencja: CC BY-SA 2.0.

Grafika interaktywna (schemat)

Bariera elektrycznej energii potencjalnej w oddziaływaniu cząstki α z jądrem złota.

Polecenie 1

Na tablicy Ernesta Rutherforda panował od rana straszny bałagan. To niedobrze, gdyż dziś Rutherford miał przedstawić wybitnym profesorom na swoim uniwersytecie wnioski płynące ze swojego najnowszego eksperymentu. Ponieważ był zdenerwowany nadchodzącym spotkaniem, bał się, że zagubi się w szczegółach i zostanie źle zrozumiany. Przez całą noc przygotowywał zatem karteczki z krótkimi notatkami, dzięki którym miał płynnie i obrazowo przedstawić swoje wyniki. Niestety, nad ranem całkiem się pogubił. Czy Ty, jako jego asystent, jesteś w stanie mu pomóc? Spróbuj uporządkować notatki tak, by stanowiły spójną całość.
W jakiej kolejności powinny być ułożone opisy i rysunki?
Który opis pasuje do każdego z rysunków?

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

Polecenie 2

Oblicz wysokości obu barier energii potencjalnej: E_j i E_m dla układu jądro złota – cząstka α. Wyniki wyraź w megaelektronowoltach. Przyjmij współczesną wartość promienia jądra złota $R_j = 7{,}0 \cdot 10^{-15}$ m. Przyjmij do obliczeń wartość $K = 9 \cdot 10^{9}$ N·m^2/C^2 oraz $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Pozostałe niezbędne informacje odszukaj w grafice.

Polecenie 3

Przyjmij, że cząstka α o energii kinetycznej 4,8 MeV, pochodząca z przemiany jądra radu ^{226}Ra, została odbita wstecz od złotej folii. Oszacuj na tej podstawie maksymalną wartość R_j promienia jądra złota.

Przyjmij do obliczeń wartość $K = 9 \cdot 10^9$ N·m^2/C^2 oraz **e** = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Pozostałe niezbędne informacje odszukaj w grafice.

Symulacja interaktywna

Symulacja rozpraszania cząstek α

Polecenie

Uruchom symulację i zbadaj wpływ różnych czynników na kąt rozproszenia φ cząstki α, padającej na jądro atomowe zawarte w cienkiej metalowej folii.

1. Wybierz materiał, z którego wykonana jest folia.
Liczba atomowa $\boldsymbol{Z}$ i liczba masowa $\boldsymbol{A}$ jądra atomowego każdego dostępnego pierwiastka oraz $\boldsymbol{R_j}$ - promień tego jądra ujęte są w tabeli. Ten ostatni podany jest w femtometrach, czyli w jednostkach 10^{-15} m.

pierwiastek	Z	A	R_j (fm)
Al	**13**	**27**	**3,6**
Ti	**22**	**48**	**4,4**
Fe	**26**	**56**	**4,6**
Cu	**29**	**63**	**4,8**
Ag	**47**	**107**	**5,7**
Au	**79**	**197**	**7,0**

2. Wybierz parametr zderzenia $\boldsymbol{b}$ pomiędzy cząstką α a jądrem w dostępnym zakresie od 1 fm do 100 fm.

3. W wersji zaawansowanej – wybierz energię kinetyczną cząstki α w zakresie dostępnym w pierwszej dekadzie XX wieku.

4. Obejrzyj tor lotu cząstki α i zanotuj wartość kąta rozproszenia φ.

5. Postępuj zgodnie z zasadą „zmieniaj tylko jedną wielkość na raz” i zbadaj wpływ tej wielkości na kąt rozproszenia.

Do dzieła!

Praca z symulacją jest wygodniejsza po przełączeniu na widok pełnoekranowy.

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

Polecenie 1

Wybierz metal, z którego wykonana jest folia. Zbadaj zależność kąta rozproszenia od parametru zderzenia – wybierz w tym celu co najmniej 8-10 różnych wartości parametru i przeprowadź symulację dla każdej z nich. Wynikiem symulacji będzie sporządzony przez Ciebie wykres badanej zależności.

Polecenie 2

Wybierz metal, z którego wykonana jest folia oraz parametr zderzenia rzędu promienia jądra R_j wybranego metalu. Zbadaj zależność kąta rozproszenia od początkowej energii kinetycznej cząstki α. Wybierz w tym celu wszystkie dostępne wartości tej energii i przeprowadź symulację dla każdej z nich. Sporządź wykres badanej zależności – będzie on wynikiem symulacji.

Polecenie 3

Zbadaj zależność kąta rozproszenia od właściwości jądra, z którego wykonana jest folia. Wybierz dowolny parametr zderzenia w zakresie 4-8 fm oraz dowolną początkową energię kinetyczną cząstki α. Przeprowadź symulację dla wszystkich dostępnych pierwiastków. Wynikiem symulacji będzie wykres zależności parametru zderzenia od liczby atomowej Z jądra. Rozstrzygnij następującą hipotezę: Uzyskana zależność nie odzwierciedla wpływu promienia jądra na kąt rozproszenia. Uzasadnij swoje rozstrzygnięcie.

Polecenie 4

Przygotuj prezentację (czas trwania maksymalnie 3-4 minuty), w której ujmiesz wyniki któregokolwiek z trzech symulowanych eksperymentów, zaproponowanych powyżej. Prezentacja powinna zawierać, w swym podsumowaniu, interpretację uzyskanych wyników.

Dla zainteresowanych

Wyliczany i pokazywany w symulacji kąt rozproszenia φ jest dany wzorem:

$$tg\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{Z \cdot e^2}{4\pi\varepsilon_0 \cdot E_k \cdot b}$$

w którym:

e to ładunek elementarny
ε_0 to stała dielektryczna próżni
Z to liczba atomowa wybranego pierwiastka
E_k to początkowa energia kinetyczna cząstki α
b to parametr zderzenia.

Polecenie 5

Wstaw każdą z trzech wielkości do jednej z dwóch kategorii.

b E_k Z

Wzrost tej wielkości powoduje wzrost kąta rozproszenia φ

Wzrost tej wielkości powoduje spadek kąta rozproszenia φ

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Włodzimierz Natorf
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Doświadczenie Rutherforda jego interpretacja**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy, zakres podstawowy i rozszerzony; rozszerzenie zapisów podstawy programowej
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 podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 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; 15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu; 17) przedstawia wybrane informacje z historii odkryć kluczowych dla rozwoju fizyki. VI. Elektrostatyka. Uczeń: 2) oblicza wartość siły wzajemnego oddziaływania ładunków, stosując prawo Coulomba. XI. Fizyka jądrowa. Uczeń: 1) posługuje się pojęciami pierwiastek, jądro atomowe, izotop, proton, neutron, elektron do opisu składu materii; opisuje skład jądra atomowego na podstawie liczb masowej i atomowej. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 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; 17) przedstawia wybrane informacje z historii odkryć kluczowych dla rozwoju fizyki; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. VII. Elektrostatyka. Uczeń: 2) oblicza wartość siły wzajemnego oddziaływania ładunków stosując prawo Coulomba; 5) opisuje pole na zewnątrz sferycznie symetrycznego układu ładunków; 7) analizuje ruch cząstek naładowanych w polu elektrycznym; 9) oblicza zmianę energii ładunku w polu centralnym i jednorodnym. XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 5) posługuje się pojęciami pierwiastek, jądro atomowe, izotop, proton, neutron, elektron; opisuje skład jądra atomowego na podstawie liczb masowej i atomowej.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia 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. opisze stan wiedzy o budowie atomu z przełomu XIX i XX wieku; 2. przedstawi założenia i cel doświadczenia Rutherforda, w tym problematykę rozmiarów tzw. rdzenia atomowego; 3. przeanalizuje warunki rozpraszania cząstek α wstecz z punktu widzenia sił na nie działających; 4. przeanalizuje warunki rozpraszania cząstek α wstecz z punktu widzenia przemian energii; 5. zinterpretuje wyniki symulacji różnych wariantów doświadczenia Rutherforda.
Strategie nauczania:	strategia odwróconej klasy
Metody nauczania:	wykład nauczyciela, wystąpienia uczniów

Formy zajęć:	wspólna praca całego zespołu klasowego
Środki dydaktyczne:	szkolna tablica, komputer z rzutnikiem, dostęp do Internetu
Materiały pomocnicze:	Niniejszy e-materiał, przygotowane prezentacje uczniowskie; dowolne źródło prezentujące rozwój poglądów na budowę atomu – np. „Historia Fizyki" Andrzej K. Wróblewski, PWN

PRZEBIEG LEKCJI

Faza wprowadzająca:

Na poprzedniej lekcji nauczyciel zlecił wszystkim uczniom zapoznanie się z e-materiałem, ze szczególnym uwzględnieniem *Wprowadzenia* i *Przeczytaj* oraz polecenia zawartego w tej ostatniej części. Wybranym trzem uczniom (lub dwuosobowym grupom) nauczyciel zlecił przygotowanie prezentacji, zgodnie z poleceniami powiązanymi z symulacją.
Nauczyciel rozpoczyna lekcję zaprezentowaniem (z wykorzystaniem informacji zawartych we *Wprowadzeniu* i *Przeczytaj* oraz innych źródłach) stanu wiedzy fizyków o budowie atomu z przełomu XIX i XX wieku oraz wybranych modeli budowy atomu z tego czasu. Podkreśla historyczne znaczenie pojęcia rdzeń atomowy.
Uczniowie przeprowadzają obliczenia masy oraz rozmiaru pojedynczego atomu złota.

Faza realizacyjna:

Uczniowie objaśniają, jakich wyników rozpraszania cząstek α spodziewano się przy założeniu, że rdzeń atomowy ma rozmiar rzędu od 0,01 Å do 0,1 Å.
Wybrani uczniowie (lub grupy) prezentują przygotowane wyniki symulacji zależności kąta rozproszenia od trzech zmiennych.
Pozostali uczniowie zadają pytania związane z prezentacjami. W razie potrzeby nauczyciel wspomaga uczniów prowadzących przy udzielaniu odpowiedzi.

Faza podsumowująca:

Na podstawie grafiki interaktywnej (schematu), poprzez dobór ilustracji do opisów, uczniowie zapoznają się z energetyczną interpretacją doświadczenia Rutherforda. Procedurę doboru może prowadzić i nadzorować nauczyciel bądź chętny uczeń.
Uczniowie wskazują związek pomiędzy zasadą zachowania energii mechanicznej w układzie cząstka α - jądro a pojawianiem się cząstek α rozproszonych pod kątami znacznie większymi od 90°.

Praca domowa:

Uczniowie mają za zadanie wykonać polecenia powiązane z grafiką (schematem).

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium	Oba multimedia mogą być wykorzystane jako wstęp do lekcji o właściwościach atomów, np. o widmach, o zjawisku jonizacji itp.