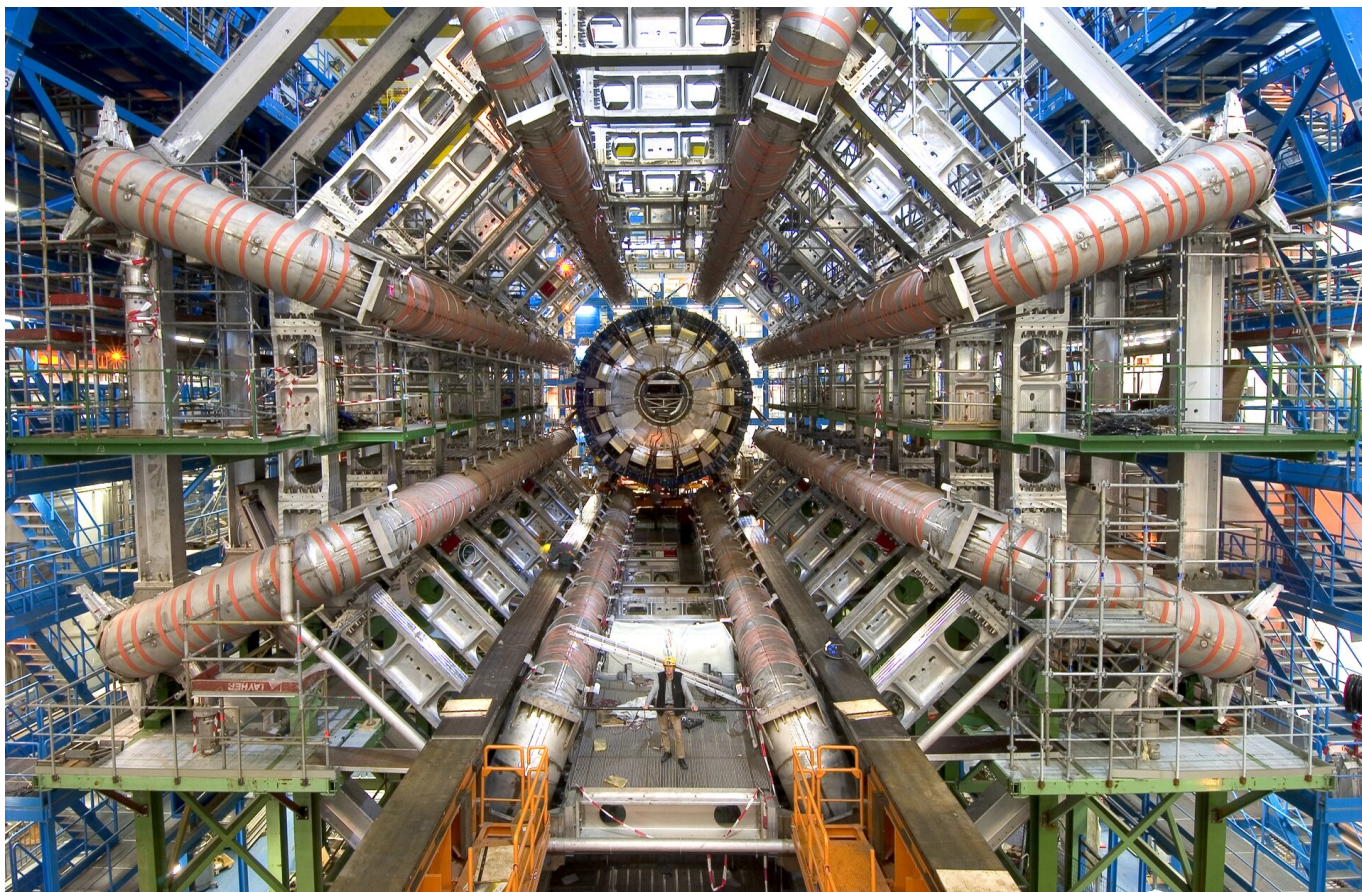




Badanie reakcji jądrowych

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



Źródło: dostępny w internecie: <http://cds.cern.ch/record/910381> [dostęp 21.04.2022 r.], licencja: CC BY 4.0.

Czy to nie ciekawe?

Miarą prawdopodobieństwa zajścia reakcji jądrowej jest wielkość zwana przekrojem czynnym. Wiele wyników doświadczalnych, jak i przewidywań teoretycznych może być sprowadzone do tego pojęcia, dlatego przekrój czynny stał się jedną z podstawowych wielkości używanych w fizyce reakcji jądrowych. W tych e-materiałach dowiesz się, jak definiujemy przekrój czynny oraz poznasz jednostkę, wymyśloną w trakcie projektu Manhattan, w której się go wyraża.

Twoje cele

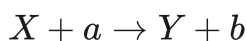
W tym e-materiale:

- dowiesz się, jak definiujemy całkowity przekrój czynny;
- poznasz jednostkę przekroju czynnego (barn);
- zrozumiesz, dlaczego barn jest wygodną jednostką do stosowania w fizyce reakcji jądrowych;
- oszacujesz przekroje czynne dla wybranych reakcji jądrowych.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Reakcjami jądrowymi nazywamy procesy, w których w wyniku oddziaływania jądrowego pomiędzy pojedynczymi jądrami atomowymi lub cząstkami następuje przemiana tych obiektów w inne. Schemat typowej reakcji jądrowej można zapisać jako



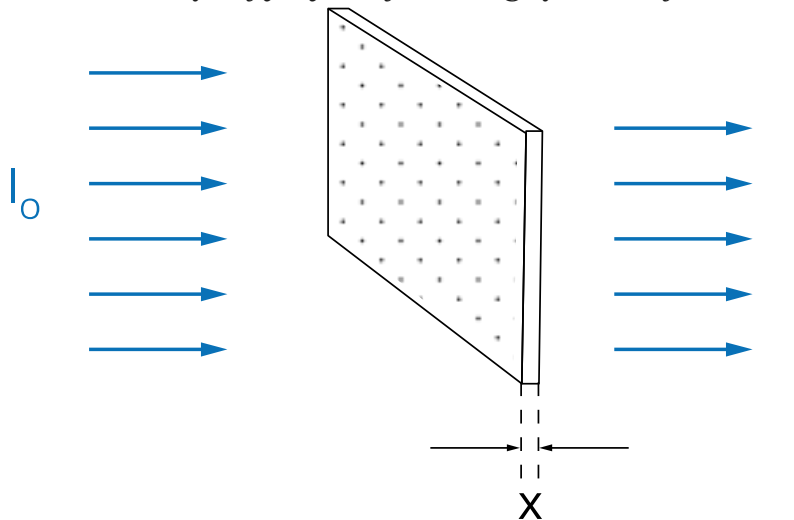
gdzie X to tzw. jądro początkowe, które w wyniku zderzenia z cząstką a wywołującą reakcję, ulega przemianie w jądro końcowe Y , emitując przy tym cząstkę b . Typowy eksperyment z fizyki reakcji jądrowych polega na bombardowaniu, np. przyspieszonymi w akceleratorze, cząstkami a (tzw. pociskami) cienkiej tarczy zawierającej atomy o jądrach X .

Prawdopodobieństwo zajścia reakcji zależy od koncentracji jąder (atomów) w materiale tarczy, energii pocisku, rozmiarów zderzanych obiektów, czy w końcu mechanizmu samego procesu. Zanim przejdziemy do bardziej szczegółowych rozważań, zastanówmy się, w jaki sposób moglibyśmy w ogóle zmierzyć doświadczalnie prawdopodobieństwo zajścia reakcji.

Zacznijmy od obliczenia, ile atomów znajduje się w 1 gramie materiału tarczy. Jeden mol dowolnej substancji zawiera dokładnie liczbę Avogadro $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$ obiektów danego typu, np. atomów, czy cząsteczek. Do obliczeń potrzebujemy zatem znać masę molową substancji. W większości eksperymentów tarcza składa się z atomów jednego pierwiastka lub nawet atomów jednego izotopu. Masa molowa pierwiastka jest liczbowo równa jego masie atomowej. Dla przykładu masa molowa glinu (aluminium), który składa się z jednego izotopu, ^{27}Al , jest równa $26,98 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, a masa molowa miedzi, która jest mieszaniną dwóch izotopów, ^{63}Cu i ^{65}Cu , to $63,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$. W obliczeniach szacunkowych można przyjąć, że masa molowa danego izotopu, wyrażona w $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$, jest liczbowo równa jego liczbie masowej A . Zatem, w przypadku ^{27}Al masa molowa wynosi $27 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, a w jednym gramie aluminium znajduje się $\frac{N_A}{A} \approx \frac{6 \cdot 10^{23}}{27}$ atomów.

Liczba atomów w 1 cm^3 tarczy jest równa $\frac{N_A}{A} \cdot \rho$, gdzie ρ to gęstość materiału tarczy w jednostkach $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Cienka folia o grubości $x \text{ cm}$, wykonana z jednorodnego materiału będzie zawierała zatem $n = \frac{N_A \rho x}{A}$ atomów na cm^2 powierzchni. Dla przykładu folia wykonana z aluminium o grubości $0,02 \text{ cm}$ i gęstości $2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ będzie zawierała $n = \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 2,7 \cdot 0,02}{27} = 1,2 \cdot 10^{21} \frac{\text{atomów}}{\text{cm}^2}$. Do czego może przydać się ta wielkość? Na rysunku 1 przedstawiono cienką folię o powierzchni $S = 1 \text{ cm}^2$. Jeżeli folia jest cienka, to możemy wyobrazić sobie, że jądra wszystkich atomów tarczy są równomiernie rozłożone wyłącznie na powierzchni S , czyli, że folia ma tak jakby grubość jednej warstwy atomowej. Rozmiary

jąder atomowych są około czterech rzędów wielkości mniejsze od rozmiarów atomów i można założyć, że nie zakrywają się wzajemnie, gdy tarcza jest cienka.



Rys. 1. Cienka folia o grubości x i powierzchni 1 cm^2 . Intensywność wiązki po przejściu przez tarczę maleje, z I_0 do I .

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

Wyobraźmy sobie teraz, że folia jest bombardowana przez przyspieszone w akceleratorze cząstki. Mogą to być dowolne cząstki. Strumień padających cząstek, czyli liczbę padających pocisków na każdy cm^2 powierzchni tarczy w zadany czas, oznaczmy przez I_0 . Niektóre z padających cząstek ulegną oddziaływaniu z jądrami atomów tarczy (np. „zderzą się” z nimi) i w rezultacie zostaną usunięte z pierwotnego strumienia. Jeżeli za tarczą ustawimy detektor zliczający padające na niego cząstki, które przeszły przez tarczę, okaże się, że mierzony strumień I będzie mniejszy od I_0 . Różnica $\Delta I = I_0 - I$ reprezentuje zatem liczbę cząstek, które w pewnym sensie „zderzyły się” z jądrami atomów tarczy, a stosunek $\frac{\Delta I}{I_0}$ wyraża prawdopodobieństwo wystąpienia takiego „zderzenia”. Założenie takie implikuje, że jądra atomowe mają pewne rozmiary geometryczne i że możemy traktować je jak tarcze, w które mogą trafić nadlatujące cząstki. Możemy zatem każdemu jądru atomowemu przypisać pewien **przekrój czynny** σ , który można rozumieć jako powierzchnię tarczy „widzianą” przez nadlatującą cząstkę, w którą musi trafić, aby wywołać określony efekt. Przy takiej interpretacji iloczyn $n\sigma$ określa, jaką część 1 cm^2 powierzchni tarczy pokrywa „aktywna” powierzchnia wszystkich jąder atomowych w niej zawartych. Zatem iloczyn $n\sigma$ możemy interpretować jako prawdopodobieństwo tego, że nadlatująca cząstka „zderzy się” z którymś z jąder atomów tarczy. Prowadzi to do wniosku, że

$$\frac{\Delta I}{I_0} = n\sigma$$

a przekrój czynny musi mieć wymiar cm^2 .

Rozpatrzmy wiązkę protonów o strumieniu $I_0 = 10^{10}$ (w odpowiednich jednostkach) padającą na tarczę wykonaną z aluminium o grubości $0,02 \text{ cm}$, dla której koncentracja atomów wynosi $1,2 \cdot 10^{21} \frac{\text{atomów}}{\text{cm}^3}$. Zmierzony za tarczą strumień protonów jest mniejszy od

padającego o $\Delta I = 5 \cdot 10^6$. Wynika stąd, że przekrój czynny na „zderzenie” (oddziaływanie) protonu z jądrem ^{27}Al wynosi

$$\sigma = \frac{\Delta I}{nI_0} = \frac{5 \cdot 10^6}{\frac{1,2 \cdot 10^{21}}{\text{cm}^2} \cdot 10^{10}} = 0,42 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2$$

Spróbujmy zinterpretować powyższy wynik. Aby proton został usunięty z wiązki, musi dojść do jego oddziaływania (np. zderzenia) z jądrem atomu aluminium. Trzymając się interpretacji geometrycznej, możemy założyć, że proton musi trafić w jądro, czyli w tarczę o powierzchni $\sigma = \pi r^2$, gdzie r to promień jądra ^{27}Al . Promień jądra możemy oszacować, korzystając ze wzoru $r = r_0 A^{1/3}$, gdzie $r_0 = 1,2 \text{ fm}$ (femtometra, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Promień jądra aluminium wynosi zatem $1,2 \cdot 27^{1/3} \text{ fm}$, czyli $3,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}$, a przekrój czynny $\sigma = \pi(3,6 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2 = 0,4 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$. Tak obliczony przekrój czynny nazywamy **geometrycznym**. Geometryczny przekrój czynny nie mówi nam, w wyniku jakiego procesu proton jest usuwany z wiązki lub jaki proces proton wywołuje. W tym przypadku geometryczny przekrój czynny można rozumieć jako całkowity przekrój czynny na usunięcie protonu z wiązki w wyniku jego kontaktu z jądrem tarczy. Jest to więc przekrój czynny na zajście reakcji jądrowej. Fizycy jądrowi starają się mierzyć w eksperymentach przekroje czynne na wybrane procesy, np. zderzenie protonu z jądrem aluminium, które prowadzi do wybicia z niego neutronu.

W fizyce jądrowej przyjęło się używać jednostki **barn** o symbolu b do wyrażania przekroji czynnych, przy czym $1b = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$. Barn w języku angielskim oznacza stodołę. Jednostka ta została zaproponowana podczas prac nad pierwszą bombą atomową w trakcie projektu Manhattan. Fizycy mierzący przekroje czynne potrzebowali jednostki do posługiwania się w tajnych wiadomościach i raportach. Nazwa została zaczerpnięta z angielskiego idiomu „as big as barn” (wielki jak stodoła). W tym przypadku chodziło o rozmiar jądra uranu, którego przekrój poprzeczny jest właśnie rzędu 10^{-24} cm^2 , czyli rzędu jednego barna.

Przekrój czynny zależy od wielu czynników i może znacząco różnić się od geometrycznego przekroju czynnego. Są reakcje, dla których zmierzony przekrój czynny wielokrotnie przekracza geometryczny przekrój czynny, są również takie, dla których przekrój czynny, jest wielokrotnie mniejszy, niż by to wynikało z rozważań czysto geometrycznych. Przekrój czynny zależy zarówno od rozmiarów pocisku, jak i jądra tarczy, od dostępnej w reakcji energii oraz samego mechanizmu badanego procesu.

Słowniczek

barn (b)

jednostka przekroju czynnego, $1b = 10^{-28} \text{ m}^2$.

1 fm

czyt. femtometr, jednostka długości równa 10^{-15} m .

Symulacja interaktywna

Badanie reakcji jądrowych

Masz przed sobą symulację, która pokazuje, jaki jest spadek intensywności wiązki protonów w wyniku przejścia przez tarczę. Możesz zmieniać grubość tej tarczy, materiał, z którego jest wykonana oraz intensywność wiązki pocisków. Spadek intensywności (ΔI) odczytasz w prawym dolnym rogu ekranu.

Uwaga! Uruchom symulację w widoku pełnoekranowym.

Wybierz materiał tarczy:

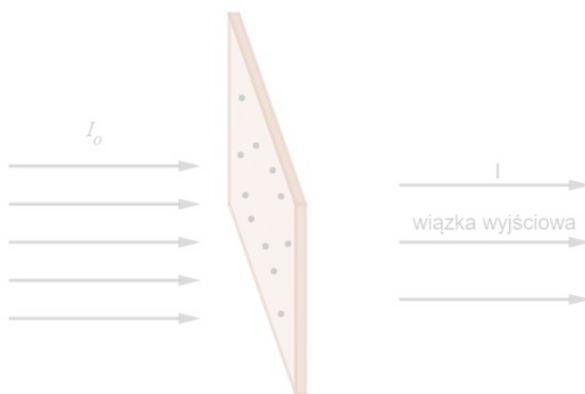
☒ ^{208}Pb ☐ ^{197}Au ☐ ^{107}Ag ☐ ^{56}Fe ☐ ^{27}Al

Wybierz grubość tarczy:

☒ 1 μm ☐ 2 μm ☐ 5 μm ☐ 10 μm ☐ 20 μm ☐ 50 μm ☐ 100 μm

Wybierz intensywność wiązki początkowej (I_0):

☒ 10^9 pocisków/s
☐ 10^{10} pocisków/s
☐ 10^{11} pocisków/s



$$\Delta I = I_0 - I = 5195.04 \text{ pocisków/s}$$

Zasób interaktywny dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/DTxf0p26V>

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

Polecenie 1

W eksperymencie ma zostać użyta tarcza wykonana z ołowiu ^{208}Pb o grubości 10 μm . Oblicz, ile jąder atomów ołowiu przypada na 1 cm^2 takiej folii. Gęstość ołowiu wynosi 11,34 g/cm^3 . Przyjmij, że stała Avogadro $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol, a masa molowa ołowiu-208 wynosi 208 g/mol.

Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Na 1 cm^2 powierzchni tarczy przypada · 10 jąder atomowych.

Polecenie 2

Korzystając z wyników symulacji i poprzedniego zadania, oblicz przekrój czynny na „zderzenie” protonu z jądrem ołowiu-208 ^{208}Pb .

Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Przekrój czynny na badany proces wynosi b.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



W brakujące miejsca, wstaw odpowiednie liczby (-15, -24, -28, 100)

$$1 \text{ fm} = 10 \text{ } \boxed{} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = \boxed{} \text{ fm}^2$$

$$1 \text{ b} = 10 \boxed{} \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ b} = 10 \boxed{} \text{ m}^2$$

Ćwiczenie 2



Uzupełnij poniższy tekst używając zaproponowanych wyrażeń.

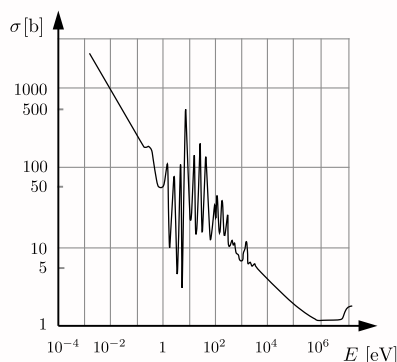
Promień jądra atomowego, r , można oszacować, korzystając ze wzoru $r = r_0 A^{1/3}$, gdzie A to liczba jądra, a $r_0 = 1,2 \text{ fm}$. Obliczony w ten sposób promień jądra jodu- (^{125}I) wynosi .

Ćwiczenie 3

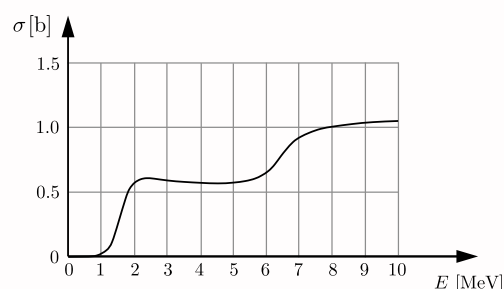


Oblicz geometryczny przekrój czynny na wychwyt neutronu przez jądro plutonu-239 ^{239}Pu . Przyjmij, że neutron jest cząstką punktową. Wynik podaj w barnach.

Geometryczny przekrój czynny na wychwyt neutronu wynosi b.



a)



b)

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

Na powyższym rysunku przedstawiono zależność przekroju czynnego na rozszczepienie uranu-235 (rys. a) i uranu-238 (rys. b) od energii bombardujących je neutronów. Lewy wykres, w zakresie energii 1eV - 1keV, ma strukturę, którą nazywamy rezonansową, a prawy ma charakter progowy, to znaczy, że rozszczepienie zachodzi, gdy energia neutronu jest większa od pewnej wielkości.

Na podstawie tych wykresów wskaż stwierdzenia, które są poprawne.

☐

Do rozszczepienia U-238 potrzeba energii o kilka rzędów wielkości większych, niż w przypadku U-235

☐

Neutron o energii 1 MeV z większym prawdopodobieństwem zostanie wychwycony przez jądro U-238, niż przez U-235.

☐

Przekrój czynny na rozczepienie przez bombardujące neutrony dla U-238 jest znacznie mniejszy, niż dla U-235.

☐

U-238 jest materiałem o wiele bardziej rozszczepialnym niż U-235.

☐

Przekrój czynny na wychwyt neutronów o energii 8 meV przez U-238 wynosi 1 b

☐

Zakładając geometryczną interpretację przekroju czynnego, na podstawie poprzedniego stwierdzenia można obliczyć, że promień jądra U-238 wynosi 31,8 fm.

Ćwiczenie 5



Złoto-197 jest jedynym stabilnym i jedynym naturalnie występującym w przyrodzie izotopem złota. Złoto jest najbardziej kowalnym ze wszystkich metali, 1 gram złota można rozbić na arkusz o powierzchni 1 m^2 . Oblicz z ilu warstw atomowych składa się taki arkusz złota. Przyjmij, że promień atomu złota wynosi $0,15 \text{ nm}$, a atomy w arkuszu znajdują się obok siebie. Gęstość złota wynosi $19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Wynik podaj, jako liczbę całkowitą.

Arkusz złota składa się ze warstw atomowych.

Ćwiczenie 6



W eksperymencie ma zostać użyta tarcza wykonana z folii złota, ^{197}Au , o grubości $5 \mu\text{m}$. Oblicz, ile jąder atomów złota przypada na 1 cm^2 tej folii. Gęstość złota wynosi $19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Przyjmij, że stała Avogadro $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$. Wynik podaj z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.

Na 1 cm^2 powierzchni tarczy przypada $\cdot 10^{19}$ jąder atomowych.

Ćwiczenie 7



Wiązka protonów o strumieniu $I_0 = 10^{10}$ (w odpowiednich jednostkach) pada na tarczę wykonaną z żelaza-56 ^{56}Fe . Zmierzony za tarczą strumień protonów jest mniejszy od padającego o $\Delta I = 1,5 \cdot 10^7$. Oblicz przekrój czynny na "zderzenie" protonu z jądrem ^{56}Fe . Przyjmij, że na 1 cm^2 powierzchni tarczy przypada $1,7 \cdot 10^{21}$ jąder atomów żelaza. Wynik podaj z dokładnością do dziesiątych części barna.

Przekrój czynny na badany proces wynosi b.

Ćwiczenie 8



W zderzeniach ciężkich jonów (jonów pierwiastków cięższych od helu) w obliczeniach geometrycznego przekroju czynnego na zajście reakcji jądrowej należy wziąć pod uwagę zarówno rozmiary jądra-pocisku (P), jak i jądra tarczy (T). Jeżeli założymy, że do oddziaływania jądrowego pomiędzy dwoma obiektami dochodzi tylko w momencie ich kontaktu, to graniczną odległością pomiędzy środkami obu jąder, przy której może zajść reakcja, będzie suma ich promieni $r_P + r_T$, a geometryczny przekrój czynny będzie równy $\sigma = \pi(r_P + r_T)^2$.

Oblicz geometryczny przekrój czynny na zajście reakcji jądrowej pomiędzy jądrami tytanu-48, ^{48}Ti , i niklu-64, ^{64}Ni .

Wynik podaj w barnach, z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

Przekrój czynny wynosi b.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Tomasz Cap
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Przekrój czynny
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	Cele kształcenia – wymagania ogólne Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe
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. uczeń wie, jak definiuje się przekrój czynny; 2. stosuje jednostkę barn; 3. potrafi obliczyć przekrój czynny na podstawie podanych informacji; 4. rozumie pojęcie przekroju czynnego dla zderzeń obiektów makroskopowych, np. kul bilardowych.
Strategie nauczania:	IBSE
Metody nauczania:	wykład informacyjny, rozwiązywanie zadań problemowych i rachunkowych
Formy zajęć:	praca indywidualna, praca w parach
Środki dydaktyczne:	rzutnik lub ekran do wyświetlania multimedium
Materiały pomocnicze:	–

PRZEBIEG LEKCJI

Faza wprowadzająca:

Nauczyciel organizuje krótki quiz w parach, dzięki któremu uczniowie przypominają sobie zapis reakcji jądrowej, $X + a \rightarrow Y + b$, oraz jej definicję (reakcja zachodzi, gdy dojdzie do oddziaływania jądrowego pomiędzy pojedynczymi jądrami atomowymi lub cząstkami, w wyniku którego nastąpi przemiana tych obiektów w inne) a także wzór na promień jądra atomowego i jednostkę fm.

Nauczyciel organizuje burzę mózgów: „Jak możemy zdefiniować pojęcie „reakcji” dla nieoddziałujących obiektów, np. kul bilardowych”. Uczniowie powinni dojść do wniosku, że warunkiem koniecznym jest kontakt (zderzenie) dwóch obiektów.

Nauczyciel wprowadza pojęcie geometrycznego przekroju czynnego i prosi uczniów, by w parach wyprowadzili odpowiedni wzór dla zderzenia dwóch kul bilardowych.

Następnie przed uczniami staje problem: „Jak zastosować podobne rozumowanie w opisie reakcji jądrowych?” Szukając odpowiedzi, uczniowie powinni wykonać następujące polecenia pomocnicze:

- Jakich rozmiarów jest „tarcza” widziana przez nadlatujący proton, który ma uderzyć w jądro atomowe?
- Obliczcie pole przekroju poprzecznego dla wybranych jąder atomowych, np. ^{16}O , ^{27}Al , ^{64}Ni , ^{208}Pb .
- Co to jest barn (b)? – uczniowie mogą znaleźć odpowiedź w Internecie lub e-podręczniku
- Rozwiążcie zadanie 8 z zestawu ćwiczeń dotyczące zderzenia dwóch ciężkich jonów, stosując analogię do kul bilardowych.
- Czy w mikroświecie pojęcie toru cząstki nie jest dobrze określone? (nie, musimy posługiwać się opisem statystycznym).

Faza realizacyjna:

Nauczyciel opisuje typowy eksperyment z fizyki reakcji jądrowych, w którym wiązka cząstek, np. protonów, bombarduje cienką tarczę, a następnie wprowadza pojęcie strumienia lub natężenia cząstek padających (I_0) oraz wyjaśnia, w jaki sposób można określić prawdopodobieństwo zajścia reakcji badając, jaka część strumienia padającego nie przechodzi przez tarczę (ΔI).

Uczniowie pracują indywidualnie z symulacją interaktywną i wykonują umieszczone pod nią polecenia.

Nauczyciel prosi, by uczniowie w parach poszukali związku pomiędzy prawdopodobieństwem zajścia reakcji ($\frac{\Delta I}{I_0}$), przekrojem czynnym (σ) i koncentracją jąder atomów tarczy (n).

Uczniowie rozwiązują w parach zadania 5, 7, 2 i 4 z zestawu ćwiczeń, a następnie wybrane pary prezentują rozwiązania na forum klasy.

Faza podsumowująca:

Nauczyciel prosi, by uczniowie wyszukali typowe wartości przekrojów czynnych na różne procesy, np. rozpraszanie, fuzję, fuzję-ewaporację i porównali je ze sobą. Na koniec uczniowie dokonują podsumowania tego, czego nauczyli się na lekcji i co zaniekaowało ich w niej najbardziej.

Praca domowa:

Zadania 1, 3 i 6 z zestawu ćwiczeń.

**Wskazówki metodyczne
opisujące różne zastosowania
danego multimediu**

Multimediu bazowe może być użyte jako materiał wprowadzający, gdy nauczyciel chciałby zastosować strategię odwróconej klasy.