

Cząstki identyczne

Wykład 22

Karol Kołodziej

Instytut Fizyki
Uniwersytet Śląski, Katowice
<http://kk.us.edu.pl>

- L.I. Schiff, *Mechanika Kwantowa*
- K. Zalewski, *Mały Wykład z Mechaniki Kwantowej*

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu,

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuwamy przegrodę

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuwamy przegrodę \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuwanie przegrody \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają
 \Rightarrow entropia wzrasta o $2k_B N \ln 2$, (k_B stała Boltzmannna).

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuamy przegrodę \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają
 \Rightarrow entropia wzrasta o $2k_B N \ln 2$, (k_B stała Boltzmannna).

Gdyby po obu stronach przegrody znajdował się tlen

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuamy przegrodę \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają
 \Rightarrow entropia wzrasta o $2k_B N \ln 2$, (k_B stała Boltzmannna).

Gdyby po obu stronach przegrody znajdował się tlen \Rightarrow po usunięciu przegrody makroskopowo nic by się nie stało

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuamy przegrodę \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają
 \Rightarrow entropia wzrasta o $2k_B N \ln 2$, (k_B stała Boltzmannna).

Gdyby po obu stronach przegrody znajdował się tlen \Rightarrow po usunięciu przegrody makroskopowo nic by się nie stało \Rightarrow nie byłoby wzrostu entropii.

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuamy przegrodę \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają
 \Rightarrow entropia wzrasta o $2k_B N \ln 2$, (k_B stała Boltzmannna).

Gdyby po obu stronach przegrody znajdował się tlen \Rightarrow po usunięciu przegrody makroskopowo nic by się nie stało \Rightarrow nie byłoby wzrostu entropii.

Jak interpolować między tymi dwoma sytuacjami?

W fizyce klasycznej znany był tzw. paradoks Gibbsa.

Rozważmy naczynie rozdzielone przegrodą na dwie części o takiej samej objętości.

W jednej części znajduje się N cząsteczek tlenu, a w drugiej N cząsteczek azotu.

Usuamy przegrodę \Rightarrow gazy nieodwracalnie się mieszają
 \Rightarrow entropia wzrasta o $2k_B N \ln 2$, (k_B stała Boltzmanna).

Gdyby po obu stronach przegrody znajdował się tlen \Rightarrow po usunięciu przegrody makroskopowo nic by się nie stało \Rightarrow nie byłoby wzrostu entropii.

Jak interpolować między tymi dwoma sytuacjami?

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Mechanika kwantowa dała zaskakujące rozwiązanie tego paradoksu.

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Mechanika kwantowa dała zaskakujące rozwiązanie tego paradoksu. Jest zasadnicza różnica między cząstkami **identycznymi** a **nieidentycznymi**, choćby bardzo podobnymi do siebie.

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Mechanika kwantowa dała zaskakujące rozwiązanie tego paradoksu. Jest zasadnicza różnica między cząstkami **identycznymi** a **nieidentycznymi**, choćby bardzo podobnymi do siebie. \Rightarrow Nie należy spodziewać się ciągłego przejścia, kiedy cząsteczki zmieniają się z bardzo podobnych do siebie w identyczne.

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Mechanika kwantowa dała zaskakujące rozwiązanie tego paradoksu. Jest zasadnicza różnica między cząstkami **identycznymi** a **nieidentycznymi**, choćby bardzo podobnymi do siebie. \Rightarrow Nie należy spodziewać się ciągłego przejścia, kiedy cząsteczki zmieniają się z bardzo podobnych do siebie w identyczne.

Identyczne cząstki nie mogą się różnić żadną wewnętrzną cechą.

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Mechanika kwantowa dała zaskakujące rozwiązanie tego paradoksu. Jest zasadnicza różnica między cząstkami **identycznymi a nieidentycznymi**, choćby bardzo podobnymi do siebie. \Rightarrow Nie należy spodziewać się ciągłego przejścia, kiedy cząsteczki zmieniają się z bardzo podobnych do siebie w identyczne.

Identyczne cząstki nie mogą się różnić żadną wewnętrzną cechą. W przeciwnym razie nie byłyby identyczne.

Co się dzieje, kiedy cząsteczki po obu stronach przegrody stają się coraz bardziej podobne do siebie? Czy zmiana przyrostu entropii, kiedy różnica między cząsteczkami dąży do zera, zmienia się nagle w jakimś punkcie czy przebiega stopniowo?

Mechanika kwantowa dała zaskakujące rozwiązanie tego paradoksu. Jest zasadnicza różnica między cząstkami **identycznymi a nieidentycznymi**, choćby bardzo podobnymi do siebie. \Rightarrow Nie należy spodziewać się ciągłego przejścia, kiedy cząsteczki zmieniają się z bardzo podobnych do siebie w identyczne.

Identyczne cząstki nie mogą się różnić żadną wewnętrzną cechą. W przeciwnym razie nie byłyby identyczne.

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

⇒ każdą cząstkę można zasadniczo śledzić przez cały czas trwania eksperymentu

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

⇒ każdą cząstkę można zasadniczo śledzić przez cały czas trwania eksperymentu ⇒ możliwe jest rozróżnienie cząstek o identycznych cechach.

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

⇒ każdą cząstkę można zasadniczo śledzić przez cały czas trwania eksperymentu ⇒ możliwe jest rozróżnienie cząstek o identycznych cechach.

W mechanice kwantowej jest inaczej.

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

⇒ każdą cząstkę można zasadniczo śledzić przez cały czas trwania eksperymentu ⇒ możliwe jest rozróżnienie cząstek o identycznych cechach.

W mechanice kwantowej jest inaczej.

Rozmiary i rozmycie paczek falowych reprezentujących poszczególne cząstki często uniemożliwiają rozróżnienie identycznych cząstek na podstawie ich położeń,

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

⇒ każdą cząstkę można zasadniczo śledzić przez cały czas trwania eksperymentu ⇒ możliwe jest rozróżnienie cząstek o identycznych cechach.

W mechanice kwantowej jest inaczej.

Rozmiary i rozmycie paczek falowych reprezentujących poszczególne cząstki często uniemożliwiają rozróżnienie identycznych cząstek na podstawie ich położeń, zwłaszcza gdy oddziałują one ze sobą.

Np., każde dwa elektrony są identyczne, gdyż mają takie same masy, spiny, ładunki i inne parametry.

W mechanice klasycznej trajektorie cząstek są ściśle określone

⇒ każdą cząstkę można zasadniczo śledzić przez cały czas trwania eksperymentu ⇒ możliwe jest rozróżnienie cząstek o identycznych cechach.

W mechanice kwantowej jest inaczej.

Rozmiary i rozmycie paczek falowych reprezentujących poszczególne cząstki często uniemożliwiają rozróżnienie identycznych cząstek na podstawie ich położeń, zwłaszcza gdy oddziałują one ze sobą.

Przykładowo, elektrony związane w tym samym atomie należy traktować jako identyczne. Natomiast elektrony związane w dwóch odległych atomach można z dobrym przybliżeniem traktować jako rozróżnialne.

Przykładowo, elektrony związane w tym samym atomie należy traktować jako identyczne. Natomiast elektrony związane w dwóch odległych atomach można z dobrym przybliżeniem traktować jako rozróżnialne.

Cząstki identyczne niekiedy dają się odróżnić od siebie.

Przykładowo, elektrony związane w tym samym atomie należy traktować jako identyczne. Natomiast elektrony związane w dwóch odległych atomach można z dobrym przybliżeniem traktować jako rozróżnialne.

Cząstki identyczne niekiedy dają się odróżnić od siebie. Np. jeśli ich paczki falowe nie nakładają się na siebie,

Przykładowo, elektrony związane w tym samym atomie należy traktować jako identyczne. Natomiast elektrony związane w dwóch odległych atomach można z dobrym przybliżeniem traktować jako rozróżnialne.

Cząstki identyczne niekiedy dają się odróżnić od siebie. Np. jeśli ich paczki falowe nie nakładają się na siebie, albo jeśli cząstki obdarzone spinem różnią się od siebie rzutem spinu na wybraną oś w eksperymencie, w którym spin jest zachowany.

Przykładowo, elektrony związane w tym samym atomie należy traktować jako identyczne. Natomiast elektrony związane w dwóch odległych atomach można z dobrym przybliżeniem traktować jako rozróżnialne.

Cząstki identyczne niekiedy dają się odróżnić od siebie. Np. jeśli ich paczki falowe nie nakładają się na siebie, albo jeśli cząstki obdarzone spinem różnią się od siebie rzutem spinu na wybraną oś w eksperymencie, w którym spin jest zachowany.

Równanie Schrödingera dla n identycznych cząstek ma postać

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(1, 2, \dots, n, t) = H(1, 2, \dots, n) \psi(1, 2, \dots, n, t),$$

gdzie liczby reprezentują składowe położenia i spinu poszczególnych cząstek.

Identyczność cząstek oznacza, że Hamiltonian H jest symetryczny ze względu na przestawienia argumentów.

Równanie Schrödingera dla n identycznych cząstek ma postać

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(1, 2, \dots, n, t) = H(1, 2, \dots, n) \psi(1, 2, \dots, n, t),$$

gdzie liczby reprezentują składowe położenia i spinu poszczególnych cząstek.

Identyczność cząstek oznacza, że Hamiltonian H jest symetryczny ze względu na przestawienia argumentów.

Podobnie, symetryczne ze względu na przestawienia argumentów powinny być wszystkie inne obserwable.

Równanie Schrödingera dla n identycznych cząstek ma postać

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(1, 2, \dots, n, t) = H(1, 2, \dots, n) \psi(1, 2, \dots, n, t),$$

gdzie liczby reprezentują składowe położenia i spinu poszczególnych cząstek.

Identyczność cząstek oznacza, że Hamiltonian H jest symetryczny ze względu na przestawienia argumentów.

Podobnie, symetryczne ze względu na przestawienia argumentów powinny być wszystkie inne obserwable.

Przestawienie dwóch cząstek identycznych nie prowadzi do innego stanu n -cząstkowego.

Równanie Schrödingera dla n identycznych cząstek ma postać

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(1, 2, \dots, n, t) = H(1, 2, \dots, n) \psi(1, 2, \dots, n, t),$$

gdzie liczby reprezentują składowe położenia i spinu poszczególnych cząstek.

Identyczność cząstek oznacza, że Hamiltonian H jest symetryczny ze względu na przestawienia argumentów.

Podobnie, symetryczne ze względu na przestawienia argumentów powinny być wszystkie inne obserwable.

Przestawienie dwóch cząstek identycznych nie prowadzi do innego stanu n -cząstkowego.

Ponieważ interpretację fizyczną ma kwadrat modułu funkcji falowej, który przy takiej operacji nie może się zmienić, to funkcja falowa może się zmienić tylko o stały czynnik ε o module 1.

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \varepsilon \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t), \quad |\varepsilon| = 1.$$

Ponieważ interpretację fizyczną ma kwadrat modułu funkcji falowej, który przy takiej operacji nie może się zmienić, to funkcja falowa może się zmienić tylko o stały czynnik ε o module 1.

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \varepsilon \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t), \quad |\varepsilon| = 1.$$

W kwantowej teorii pola, zakładając odpowiednie reguły kwantyzacji pól, dowodzi się, że $\varepsilon = \pm 1$, a więc

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \pm \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t),$$

Ponieważ interpretację fizyczną ma kwadrat modułu funkcji falowej, który przy takiej operacji nie może się zmienić, **to funkcja falowa może się zmienić tylko o stały czynnik ε o module 1.**

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \varepsilon \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t), \quad |\varepsilon| = 1.$$

W kwantowej teorii pola, zakładając odpowiednie reguły kwantyzacji pól, dowodzi się, że $\varepsilon = \pm 1$, a więc

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \pm \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t),$$

co oznacza, że funkcja falowa może być albo **symetryczna**, albo **antysymetryczna** przy przestawieniach cząstek.

Ponieważ interpretację fizyczną ma kwadrat modułu funkcji falowej, który przy takiej operacji nie może się zmienić, to funkcja falowa może się zmienić tylko o stały czynnik ε o module 1.

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \varepsilon \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t), \quad |\varepsilon| = 1.$$

W kwantowej teorii pola, zakładając odpowiednie reguły kwantyzacji pól, dowodzi się, że $\varepsilon = \pm 1$, a więc

$$\psi(1, 2, \dots, j, \dots, i, \dots, n, t) = \pm \psi(1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n, t),$$

co oznacza, że funkcja falowa może być albo **symetryczna**, albo **antysymetryczna** przy przestawieniach cząstek.

Cząstki, dla których stosuje się znak plus, nazywamy bozonami, a cząstki, dla których stosuje się znak minus - fermionami.

Własności fermionów istotnie różnią się od własności bozonów.

Cząstki, dla których stosuje się znak plus, nazywamy bozonami, a cząstki, dla których stosuje się znak minus - fermionami.

Własności fermionów istotnie różnią się od własności bozonów.

Podział cząstek na fermiony i bozony ściśle wiąże się z ich spinem.

Cząstki, dla których stosuje się znak plus, nazywamy bozonami, a cząstki, dla których stosuje się znak minus - fermionami.

Własności fermionów istotnie różnią się od własności bozonów.

Podział cząstek na fermiony i bozony ściśle wiąże się z ich spinem.

Cząstki o spinie (w jednostkach \hbar)

- całkowitym, $s = 0, 1, 2, \dots$, są bozonami
- połówkowym, $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$, są fermionami

Cząstki, dla których stosuje się znak plus, nazywamy bozonami, a cząstki, dla których stosuje się znak minus - fermionami.

Własności fermionów istotnie różnią się od własności bozonów.

Podział cząstek na fermiony i bozony ściśle wiąże się z ich spinem.

Cząstki o spinie (w jednostkach \hbar)

- całkowitym, $s = 0, 1, 2, \dots$, są bozonami
- połówkowym, $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$, są fermionami

Bozony mogą powstawać i znikać pojedynczo, a fermiony tylko i wyłącznie parami.

Cząstki, dla których stosuje się znak plus, nazywamy bozonami, a cząstki, dla których stosuje się znak minus - fermionami.

Własności fermionów istotnie różnią się od własności bozonów.

Podział cząstek na fermiony i bozony ściśle wiąże się z ich spinem.

Cząstki o spinie (w jednostkach \hbar)

- całkowitym, $s = 0, 1, 2, \dots$, są bozonami
- połówkowym, $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$, są fermionami

Bozony mogą powstawać i znikać pojedynczo, a fermiony tylko i wyłącznie parami. Reguła ta jest przydatna w przypadku tzw. quasicząstek, takich jak fonony, rotony, czy magnony.

Cząstki, dla których stosuje się znak plus, nazywamy bozonami, a cząstki, dla których stosuje się znak minus - fermionami.

Własności fermionów istotnie różnią się od własności bozonów.

Podział cząstek na fermiony i bozony ściśle wiąże się z ich spinem.

Cząstki o spinie (w jednostkach \hbar)

- całkowitym, $s = 0, 1, 2, \dots$, są bozonami
- połówkowym, $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$, są fermionami

Bozony mogą powstawać i znikać pojedynczo, a fermiony tylko i wyłącznie parami. Reguła ta jest przydatna w przypadku tzw. quasicząstek, takich jak fonony, rotony, czy magnony.

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów.

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów. To powoduje, na przykład, że widmo rotacyjne cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ jest zupełnie inne od widma rotacyjnego cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O}$.

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów. To powoduje, na przykład, że widmo rotacyjne cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ jest zupełnie inne od widma rotacyjnego cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O}$.

Funkcja falowa opisująca układ identycznych fermionów jest antysymetryczna.

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów. To powoduje, na przykład, że widmo rotacyjne cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ jest zupełnie inne od widma rotacyjnego cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O}$.

Funkcja falowa opisująca układ identycznych fermionów jest antysymetryczna. Załóżmy, że dwa identyczne fermiony są w tym samym stanie kwantowym i

$$\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = -\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t)$$

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów. To powoduje, na przykład, że widmo rotacyjne cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ jest zupełnie inne od widma rotacyjnego cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O}$.

Funkcja falowa opisująca układ identycznych fermionów jest antysymetryczna. Załóżmy, że dwa identyczne fermiony są w tym samym stanie kwantowym i

$$\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = -\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = 0,$$

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów. To powoduje, na przykład, że widmo rotacyjne cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ jest zupełnie inne od widma rotacyjnego cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O}$.

Funkcja falowa opisująca układ identycznych fermionów jest antysymetryczna. Załóżmy, że dwa identyczne fermiony są w tym samym stanie kwantowym i

$$\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = -\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = 0,$$

a więc funkcja falowa musi zniknąć.

Jądra atomowe, jeśli odległości między nimi są dużo większe od ich rozmiarów, często można traktować jako cząstki.

Jądro jest fermionem, jeśli składa się z nieparzystej liczby nukleonów, a bozonem, jeśli składa się z parzystej liczby nukleonów. To powoduje, na przykład, że widmo rotacyjne cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ jest zupełnie inne od widma rotacyjnego cząsteczki $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O}$.

Funkcja falowa opisująca układ identycznych fermionów jest antysymetryczna. Załóżmy, że dwa identyczne fermiony są w tym samym stanie kwantowym i

$$\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = -\psi(1, 2, \dots, i, \dots, i, \dots, n, t) = 0,$$

a więc funkcja falowa musi zniknąć.

Jest to tzw. zakaz Pauliego.

Dwa identyczne fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie.

Jest to tzw. zakaz Pauliego.

Dwa identyczne fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie.

Zakaz Pauliego ma podstawowe znaczenie przy opisie układów złożonych z wielu identycznych fermionów, jak atomy, cząsteczki czy jądra atomowe. W roku 1945 Pauli dostał nagrodę Nobla “za odkrycie zasady wykluczania zwanej także zakazem Pauliego”.

Jest to tzw. zakaz Pauliego.

Dwa identyczne fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie.

Zakaz Pauliego ma podstawowe znaczenie przy opisie układów złożonych z wielu identycznych fermionów, jak atomy, cząsteczki czy jądra atomowe. W roku 1945 Pauli dostał nagrodę Nobla “za odkrycie zasady wykluczania zwanej także zakazem Pauliego”.

Zakaz Pauliego jest tylko jednym z wniosków z bardziej ogólnego twierdzenia o antysymetrii funkcji falowej wielu identycznych fermionów. To uogólnienie wprowadził Dirac.

Jest to tzw. zakaz Pauliego.

Dwa identyczne fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie.

Zakaz Pauliego ma podstawowe znaczenie przy opisie układów złożonych z wielu identycznych fermionów, jak atomy, cząsteczki czy jądra atomowe. W roku 1945 Pauli dostał nagrodę Nobla “za odkrycie zasady wykluczania zwanej także zakazem Pauliego”.

Zakaz Pauliego jest tylko jednym z wniosków z bardziej ogólnego twierdzenia o antysymetrii funkcji falowej wielu identycznych fermionów. To uogólnienie wprowadził Dirac.

Przykładem zastosowania zakazu Pauliego jest układ okresowy pierwiastków, czyli tzw. tablica Mendelejewa.

Dokładna teoria jest bardzo skomplikowana, więc ograniczymy się do prostego modelu.

Przykładem zastosowania zakazu Pauliego jest układ okresowy pierwiastków, czyli tzw. tablica Mendelejewa.

Dokładna teoria jest bardzo skomplikowana, więc ograniczymy się do prostego modelu.

W dokładnym hamiltonianie występuje energia oddziaływania elektronów z jądrem i energia oddziaływania między elektronami.

Zakaz Pauliego a układ okresowy pierwiastków

Przykładem zastosowania zakazu Pauliego jest układ okresowy pierwiastków, czyli tzw. tablica Mendelejewa.

Dokładna teoria jest bardzo skomplikowana, więc ograniczymy się do prostego modelu.

W dokładnym hamiltonianie występuje energia oddziaływania elektronów z jądrem i energia oddziaływania między elektronami.

Dla uproszczenia założymy, że elektrony nie oddziałują między sobą, ale poruszają się w pewnym średnim potencjale pochodzącym od jądra i od chmury elektronowej.

Przykładem zastosowania zakazu Pauliego jest układ okresowy pierwiastków, czyli tzw. tablica Mendelejewa.

Dokładna teoria jest bardzo skomplikowana, więc ograniczymy się do prostego modelu.

W dokładnym hamiltonianie występuje energia oddziaływania elektronów z jądrem i energia oddziaływania między elektronami.

Dla uproszczenia założymy, że elektrony nie oddziałują między sobą, ale poruszają się w pewnym średnim potencjale pochodzącym od jądra i od chmury elektronowej.

Założymy, że w pierwszym przybliżeniu potencjał ten jest podobny do potencjału kulombowskiego w atomie wodoru i jonach wodoropodobnych.

Zakaz Pauliego a układ okresowy pierwiastków

Przykładem zastosowania zakazu Pauliego jest układ okresowy pierwiastków, czyli tzw. tablica Mendelejewa.

Dokładna teoria jest bardzo skomplikowana, więc ograniczymy się do prostego modelu.

W dokładnym hamiltonianie występuje energia oddziaływania elektronów z jądrem i energia oddziaływania między elektronami.

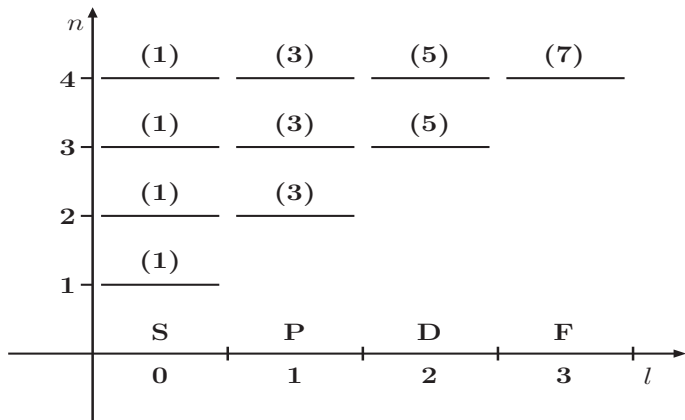
Dla uproszczenia założymy, że elektrony nie oddziałują między sobą, ale poruszają się w pewnym średnim potencjale pochodzącym od jądra i od chmury elektronowej.

Założymy, że w pierwszym przybliżeniu potencjał ten jest podobny do potencjału kulombowskiego w atomie wodoru i jonach wodoropodobnych.

Jest to podejście często stosowane w fizyce teoretycznej.
Prawdziwy hamiltonian zastępujemy hamiltonianem efektywnym,
wybrany tak, żeby dawał wyniki możliwie bliskie do prawdziwych
w zakresie, który nas interesuje.

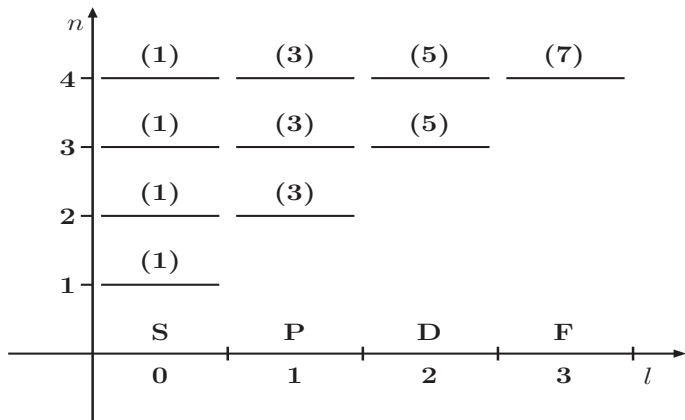
Jest to podejście często stosowane w fizyce teoretycznej.
Prawdziwy hamiltonian zastępujemy hamiltonianem efektywnym,
wybrany tak, żeby dawał wyniki możliwie bliskie do prawdziwych
w zakresie, który nas interesuje.

Schemat poziomów energetycznych elektronu



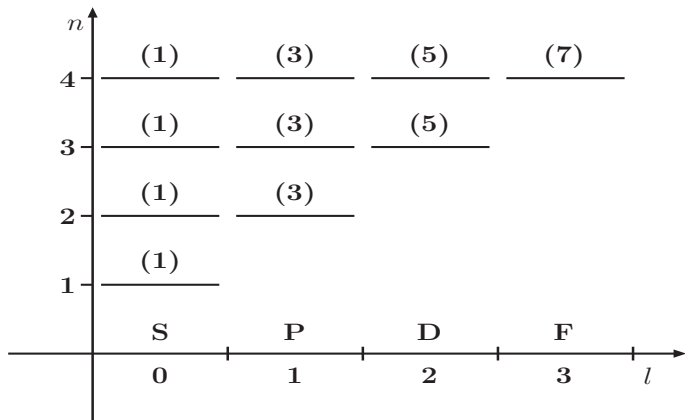
Energia zależy tylko od liczby kwantowej n .

Schemat poziomów energetycznych elektronu



Energia zależy tylko od liczby kwantowej n . Dla danej pary liczb kwantowych $n = 1, 2, 3, \dots$ i $l = 0, 1, \dots, n - 1$, występuje $2l + 1$ krotna degeneracja, bo $m = -l, -l + 1, \dots, l$.

Schemat poziomów energetycznych elektronu



Energia zależy tylko od liczby kwantowej n . Dla danej pary liczb kwantowych $n = 1, 2, 3, \dots$ i $l = 0, 1, \dots, n - 1$, występuje $2l + 1$ krotna degeneracja, bo $m = -l, -l + 1, \dots, l$.

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l .

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l . Np. stan $l = 2$ z $n = 4$ oznacza się jako stan $4D$.

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l . Np. stan $l = 2$ z $n = 4$ oznacza się jako stan $4D$.

Musimy jeszcze uwzględnić spin elektronu.

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l . Np. stan $l = 2$ z $n = 4$ oznacza się jako stan $4D$.

Musimy jeszcze uwzględnić spin elektronu. Każdy ze stanów przedstawionych na schemacie występuje w dwóch wersjach: ze spinem skierowanym do góry i ze spinem skierowanym w dół.

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l . Np. stan $l = 2$ z $n = 4$ oznacza się jako stan $4D$.

Musimy jeszcze uwzględnić spin elektronu. Każdy ze stanów przedstawionych na schemacie występuje w dwóch wersjach: ze spinem skierowanym do góry i ze spinem skierowanym w dół.

W stanie z $n = 1$ mogą być dwa elektrony \Rightarrow w pierwszym wierszu tablicy Mendelejewa są dwa atomy: wodór i hel.

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l . Np. stan $l = 2$ z $n = 4$ oznacza się jako stan $4D$.

Musimy jeszcze uwzględnić spin elektronu. Każdy ze stanów przedstawionych na schemacie występuje w dwóch wersjach: ze spinem skierowanym do góry i ze spinem skierowanym w dół.

W stanie z $n = 1$ mogą być dwa elektrony \Rightarrow w pierwszym wierszu tablicy Mendelejewa są dwa atomy: wodór i hel. Dla helu wypełniona jest powłoka $1S$.

Schemat poziomów energetycznych elektronu

W spektroskopii atomowej stany, dla których $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, nazywa się odpowiednio stanami S, P, D, F, \dots

Liczbę n dopisujemy przed literą definiującą wartość l . Np. stan $l = 2$ z $n = 4$ oznacza się jako stan $4D$.

Musimy jeszcze uwzględnić spin elektronu. Każdy ze stanów przedstawionych na schemacie występuje w dwóch wersjach: ze spinem skierowanym do góry i ze spinem skierowanym w dół.

W stanie z $n = 1$ mogą być dwa elektrony \Rightarrow w pierwszym wierszu tablicy Mendelejewa są dwa atomy: wodór i hel. Dla helu wypełniona jest powłoka $1S$.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W stanie z $n = 1$ mogą być dwa elektrony \Rightarrow w pierwszym wierszu są dwa atomy: wodór i hel.

Układ Okresowy Pierwiastków

The periodic table is color-coded by groups: Alkali metals (yellow), Alkaline earth metals (orange), Transition metals (green), Post-transition metals (pink), Lanthanides (light blue), Actinides (dark blue), Noble gases (light green), and Halogens (dark green). States are indicated by icons: Solid (black), Liquid (green), Gas (red), and Synthetic (black).

Legend:

- Metale alkaliczne (Yellow)
- Metale ziem alkalicznych (Orange)
- Metale grup głównych (Green)
- Metale przejściowe (Pink)
- Lantanowce (Light Blue)
- Aktynowce (Dark Blue)
- Niemetale (Dark Green)
- Gazy szlachetne (Light Green)
- Solid (Black icon)
- Liquid (Green icon)
- Gas (Red icon)
- Synthetic (Black icon)

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1954 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|--|---|---|--|--|---|--|--|--|---|--|--|---|---|--|--|--|---|---|--|--|--|--|---|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|--|--|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|---|--|--|--|---|--|--|--|--|---|--|--|---|---|---|--|---|---|--|--|---|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|---|--|--|---|---|--|---|---|---|--|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|---|--|---|--|--|---|--|--|--|---|--|
| 1 1A 1 H Hydrogen 1.00784 | 2 2A 2 He Helium 4.002602 | | | | | | | | | | | 13 3A 13 Al Aluminum 26.9815386 | 14 4A 14 Si Silicon 28.0855836 | 15 5A 15 P Phosphorus 30.973761998 | 16 6A 16 S Sulfur 32.06 | 17 7A 17 Cl Chlorine 35.453 | 18 8A 18 Ar Argon 39.948 | 19 9A 19 K Potassium 39.0983 | 20 10A 20 Ca Calcium 40.078 | 21 11 21 Sc Scandium 44.955912 | 22 2 22 Ti Titanium 47.867 | 23 3 23 V Vanadium 50.9415 | 24 4 24 Cr Chromium 51.9961 | 25 5 25 Mn Manganese 54.938045 | 26 6 26 Fe Iron 55.845 | 27 7 27 Co Cobalt 58.933200 | 28 8 28 Ni Nickel 58.6934 | 29 9 29 Cu Copper 63.546 | 30 10 30 Zn Zinc 65.38 | 31 11 31 Ga Gallium 69.723 | 32 12 32 Ge Germanium 72.64 | 33 13 33 As Arsenic 74.9216 | 34 14 34 Se Selenium 78.96 | 35 15 35 Br Bromine 79.904 | 36 16 36 Kr Krypton 83.798 | 37 17 37 Rb Rubidium 85.4678 | 38 18 38 Sr Strontium 87.62 | 39 19 39 Y Yttrium 88.90584 | 40 20 40 Zr Zirconium 91.224 | 41 21 41 Nb Niobium 92.90638 | 42 22 42 Mo Molybdenum 95.94 | 43 23 43 Tc Technetium (98) | 44 24 44 Ru Ruthenium 101.07 | 45 25 45 Rh Rhodium 102.90550 | 46 26 46 Pd Palladium 106.42 | 47 27 47 Ag Silver 107.8682 | 48 28 48 Cd Cadmium 112.411 | 49 29 49 In Indium 114.818 | 50 30 50 Sn Tin 118.710 | 51 31 51 Sb Antimony 121.757 | 52 32 52 Te Tellurium 127.60 | 53 33 53 I Iodine 126.90509 | 54 34 54 Xe Xenon 131.29 | 55 35 55 Cs Cesium 132.90545 | 56 36 56 Ba Barium 137.327 | 57 to 71 37 57 to 71 Lanthanides and Actinides | 72 38 72 Hf Hafnium 178.49 | 73 39 73 Ta Tantalum 180.9479 | 74 40 74 W Tungsten 183.84 | 75 41 75 Re Rhenium 186.207 | 76 42 76 Os Osmium 190.23 | 77 43 77 Ir Iridium 192.222 | 78 44 78 Pt Platinum 195.078 | 79 45 79 Au Gold 196.96657 | 80 46 80 Hg Mercury 200.59 | 81 47 81 Tl Thallium 204.3871 | 82 48 82 Pb Lead 207.2 | 83 49 83 Bi Bismuth 208.9804 | 84 50 84 Po Polonium (209) | 85 51 85 At Astatine (210) | 86 52 86 Rn Radon (222) | 87 53 87 Fr Francium (223) | 88 54 88 Ra Radium (226) | 89 to 103 55 89 to 103 Lanthanides and Actinides | 104 56 104 Rf Rutherfordium (261) | 105 57 105 Db Dubnium (262) | 106 58 106 Sg Seaborgium (263) | 107 59 107 Bh Bohrium (264) | 108 60 108 Hs Hassium (265) | 109 61 109 Mt Meitnerium (266) | 110 62 110 Ds Darmstadtium (271) | 111 63 111 Rg Roentgenium (272) | 112 64 112 Uub Ununbium (277) | 113 65 113 Uut Ununtrium (284) | 114 66 114 Uuq Ununquadium (289) | 115 67 115 Uup Ununpentium (294) | 116 68 116 Uuh Ununhexium (299) | 117 69 117 Uus Ununseptium (304) | 118 70 118 Uuo Ununoctium (300) | 119 71 119 Lr Lawrencium (260) | 120 72 120 Rf Rutherfordium (261) | 121 73 121 Db Dubnium (262) | 122 74 122 Sg Seaborgium (263) | 123 75 123 Bh Bohrium (264) | 124 76 124 Hs Hassium (265) | 125 77 125 Mt Meitnerium (266) | 126 78 126 Ds Darmstadtium (271) | 127 79 127 Rg Roentgenium (272) | 128 80 128 Cn Copernicium (285) | 129 81 129 Nh Nihonium (286) | 130 82 130 Fl Flerovium (289) | 131 83 131 Mc Moscovium (290) | 132 84 132 Lv Livermorium (293) | 133 85 133 Ts Tennessine (294) | 134 86 134 Og Oganesson (294) | 135 87 135 Uta Ununtrium (284) | 136 88 136 Uuq Ununquadium (289) | 137 89 137 Uup Ununpentium (294) | 138 90 138 Uuh Ununhexium (299) | 139 91 139 Uus Ununseptium (304) | 140 92 140 Uuo Ununoctium (300) | 141 93 141 Lr Lawrencium (260) | 142 94 142 Rf Rutherfordium (261) | 143 95 143 Db Dubnium (262) | 144 96 144 Sg Seaborgium (263) | 145 97 145 Bh Bohrium (264) | 146 98 146 Hs Hassium (265) | 147 99 147 Mt Meitnerium (266) | 148 100 148 Ds Darmstadtium (271) | 149 101 149 Rg Roentgenium (272) | 150 102 150 Cn Copernicium (285) | 151 103 151 Nh Nihonium (286) | 152 104 152 Fl Flerovium (289) | 153 105 153 Mc Moscovium (290) | 154 106 154 Lv Livermorium (293) | 155 107 155 Ts Tennessine (294) | 156 108 156 Og Oganesson (294) |
|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|--|---|---|--|--|---|--|--|--|---|--|--|---|---|--|--|--|---|---|--|--|--|--|---|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|--|--|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|---|--|--|--|---|--|--|--|--|---|--|--|---|---|---|--|---|---|--|--|---|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|---|--|--|---|---|--|---|---|---|--|---|--|--|--|---|--|---|--|---|---|--|---|---|--|---|--|--|---|--|--|--|---|--|

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W stanie z $n = 2$ może być osiem elektronów \Rightarrow w drugim wierszu jest osiem atomów.

Układ Okresowy Pierwiastków

Legenda:

- Metale alkaliczne (Yellow)
- Metale ziem alkalicznych (Orange)
- Metale przejściowe (Red)
- Lantanowce (Light Blue)
- Aktynowce (Purple)
- Metale grup głównych (Green)
- Niemetale (Light Green)
- Gazy szlachetne (Cyan)
- Solid (Black)
- Liquid (Blue)
- Gas (Red)
- Synthetic (Dark Grey)

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Dla atomu neonu wypełniona jest druga powłoka elektronowa, która zawiera dwa elektrony 2S i sześć elektronów 2P.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W stanie z $n = 2$ może być osiem elektronów \Rightarrow w drugim wierszu jest osiem atomów.

Układ Okresowy Pierwiastków

The periodic table is color-coded by groups and subgroups:

- Metale alkaliczne** (Alkali metals): Yellow
- Metale ziem alkalicznych** (Alkaline earth metals): Orange
- Metale przejściowe** (Transition metals): Red
- Lantanowce** (Lanthanides): Light blue
- Aktynowce** (Actinides): Purple
- Metale grup głównych** (Main group metals): Green
- Niemetale** (Nonmetals): Cyan
- Gazy szlachetne** (Noble gases): Light blue
- Solid** (Solids): White box
- Liquid** (Liquids): Yellow box
- Gas** (Gases): Red box
- Synthetic** (Synthetic elements): Black box

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the IUPAC equivalents of those numbers.

Dla atomu neonu wypełniona jest druga powłoka elektronowa, która zawiera dwa elektrony 2S i sześć elektronów 2P.

W trzecim wierszu pojawia się pierwsza trudność. Spodziewamy się osiemnastu atomów, a jest ich osiem tak, jak w wierszu drugim.

W trzecim wierszu pojawia się pierwsza trudność. Spodziewamy się osiemnastu atomów, a jest ich osiem tak, jak w wierszu drugim. Okazuje się że poziomy energetyczne dla hamiltonianu efektywnego, który różni się od potencjału kulombowskiego, zależą również od l .

W trzecim wierszu pojawia się pierwsza trudność. Spodziewamy się osiemnastu atomów, a jest ich osiem tak, jak w wierszu drugim.

Okazuje się że poziomy energetyczne dla hamiltonianu efektywnego, który różni się od potencjału kulombowskiego, zależą również od l .

Dane pomiarowe wskazują, że energia stanów $3D$ jest na tyle wysoka, że powłoka zamyka się bez nich i ostatni w trzecim wierszu atom argonu ma w zewnętrznej powłoce elektrony $3S$ i $3P$.

W trzecim wierszu pojawia się pierwsza trudność. Spodziewamy się osiemnastu atomów, a jest ich osiem tak, jak w wierszu drugim.

Okazuje się że poziomy energetyczne dla hamiltonianu efektywnego, który różni się od potencjału kulombowskiego, zależą również od l .

Dane pomiarowe wskazują, że energia stanów $3D$ jest na tyle wysoka, że powłoka zamyka się bez nich i ostatni w trzecim wierszu atom argonu ma w zewnętrznej powłoce elektrony $3S$ i $3P$.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W wierszu czwartym jest osiemnaście atomów.

Układ Okresowy Pierwiastków

The periodic table is color-coded by groups: Alkali metals (orange), Alkaline earth metals (yellow), Transition metals (pink), Lanthanoids (light orange), s-block (yellow), p-block (green), d-block (cyan), f-block (orange), and noble gases (light blue). States are indicated by icons: Solid (c), Liquid (Br), Gas (H), and Synthetic (Tc). Subgroups are labeled with Roman numerals (IA-VIIA, IBS-IBS, IVA-VIA, IBA-IBB, IBSA-IBSB).

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1934 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Source: <http://www.chemicalelements.com/elements/periodic.html>

Zewnętrzna powłoka atomu kryptonu, który kończy ten wiersz tabeli, zawiera dwa elektrony 4S, sześć elektronów 4P i dziesięć elektronów 3D. Energie poziomów 4D i 4F przesunęły się do góry.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W wierszu czwarty jest osiemnaście atomów.

Układ Okresowy Pierwiastków

The periodic table is color-coded by groups: Alkali metals (orange), Alkaline earth metals (yellow), Transition metals (pink), Lanthanides (light orange), s-block (light blue), p-block (green), d-block (cyan), f-block (dark blue), and noble gases (light green). It also indicates physical states: Solid (white), Liquid (blue), Gas (red), and Synthetic (black).

Legend:

- Metale alkaliczne (Orange)
- Metale ziem alkalicznych (Yellow)
- Metale przejściowe (Pink)
- Lantanowce (Light Orange)
- Aktynowce (Light Blue)
- Metale grup głównych (Cyan)
- Niemetale (Green)
- Gazy szlachetne (Light Green)
- Solid (White)
- Liquid (Blue)
- Gas (Red)
- Synthetic (Black)

Subgroups:

- 1 IA: New Original
- 2 IIA
- 13 IIIA
- 14 IVA
- 15 VA
- 16 VIA
- 17 VIIA
- 18 VIIIA

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1934 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 H Hydrogen 1.00784 | 2 He Helium 4.002602 | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 Ar Argon 39.948 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 Li Lithium 6.941 | 4 Be Beryllium 9.012182 | | | | | | | | | | | | | | | | | 19 K Potassium 39.0983 | 20 Ca Calcium 40.078 | | | | | | | | | | | | | | | | | 36 Kr Krypton 83.796 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 Na Sodium 22.98976928 | 12 Mg Magnesium 24.304 | 13 Al Aluminum 26.9815385 | 14 Si Silicon 28.0855 | 15 P Phosphorus 30.973761998 | 16 S Sulfur 32.06 | 17 Cl Chlorine 35.45 | 18 Ar Argon 39.948 | 19 K Potassium 39.0983 | 20 Ca Calcium 40.078 | 21 Sc Scandium 44.955912 | 22 Ti Titanium 47.867 | 23 V Vanadium 50.9415 | 24 Cr Chromium 51.9961 | 25 Mn Manganese 54.938045 | 26 Fe Iron 55.845 | 27 Co Cobalt 58.933195 | 28 Ni Nickel 58.6934 | 29 Cu Copper 63.546 | 30 Zn Zinc 65.38 | 31 Ga Gallium 69.723 | 32 Ge Germanium 72.64 | 33 As Arsenic 74.9216 | 34 Se Selenium 78.96 | 35 Br Bromine 79.904 | 36 Kr Krypton 83.796 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 Rb Rubidium 85.4678 | 38 Sr Strontium 87.62 | 39 Y Yttrium 88.90584 | 40 Zr Zirconium 91.224 | 41 Nb Niobium 92.90638 | 42 Mo Molybdenum 95.94 | 43 Tc Technetium [98] | 44 Ru Ruthenium 101.07 | 45 Rh Rhodium 102.90550 | 46 Pd Palladium 106.42 | 47 Ag Silver 107.8682 | 48 Cd Cadmium 112.411 | 49 In Indium 114.818 | 50 Sn Tin 118.710 | 51 Sb Antimony 121.757 | 52 Te Tellurium 127.6 | 53 I Iodine 126.90545 | 54 Xe Xenon 131.29 | 55 Cs Cesium 132.90545 | 56 Ba Barium 137.327 | 57 La Lanthanum 138.90547 | 58 Ce Cerium 140.12 | 59 Pr Praseodymium 140.90766 | 60 Nd Neodymium 144.242 | 61 Pm Promethium [145] | 62 Sm Samarium 150.36 | 63 Eu Europium 151.964 | 64 Gd Gadolinium 157.25 | 65 Tb Terbium 158.92534 | 66 Dy Dysprosium 162.50032 | 67 Ho Holmium 164.93032 | 68 Er Erbium 167.259 | 69 Tm Thulium 168.93042 | 70 Yb Ytterbium 173.04 | 71 Lu Lutetium 174.967 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 Cs Cesium 132.90545 | 66 Ba Barium 137.327 | 67 La Lanthanum 138.90547 | 68 Ce Cerium 140.12 | 69 Pr Praseodymium 140.90766 | 70 Nd Neodymium 144.242 | 71 Pm Promethium [145] | 72 Sm Samarium 150.36 | 73 Eu Europium 151.964 | 74 Gd Gadolinium 157.25 | 75 Tb Terbium 158.92534 | 76 Dy Dysprosium 162.50032 | 77 Ho Holmium 164.93032 | 78 Er Erbium 167.259 | 79 Tm Thulium 168.93042 | 80 Yb Ytterbium 173.04 | 81 Lu Lutetium 174.967 | 82 Hf Hafnium 178.49 | 83 Ta Tantalum 180.94788 | 84 W Tungsten 183.84 | 85 Re Rhenium 186.207 | 86 Os Osmium 190.23 | 87 Ir Iridium 192.222 | 88 Pt Platinum 195.078 | 89 Au Gold 196.966569 | 90 Hg Mercury 200.59 | 91 Tl Thallium 204.3833 | 92 Pb Lead 207.2 | 93 Bi Bismuth 208.980386 | 94 Po Polonium [209] | 95 At Astatine [210] | 96 Rn Radon [222] | 97 Fr Francium [223] | 98 Ra Radium [226] | 99 Ac Actinium [227] | 100 Th Thorium 232.0377 | 101 Pa Protactinium 231.036888 | 102 U Uranium 238.02891 | 103 Np Neptunium 237.048173 | 104 Pu Plutonium 244.06422 | 105 Am Americium [243] | 106 Cm Curium [247] | 107 Bk Berkelium [247] | 108 Cf Californium [251] | 109 Es Einsteinium [252] | 110 Fm Fermium [257] | 111 Md Mendelevium [258] | 112 No Nobelium [259] | 113 Lr Lawrencium [260] | 114 Fl Flerovium [285] | 115 Mc Moscovium [285] | 116 Lv Livermorium [286] | 117 Ts Tennessine [287] | 118 Og Oganesson [289] |
| 107 La Lanthanum 138.90547 | 108 Ce Cerium 140.12 | 109 Pr Praseodymium 140.90766 | 110 Nd Neodymium 144.242 | 111 Pm Promethium [145] | 112 Sm Samarium 150.36 | 113 Eu Europium 151.964 | 114 Gd Gadolinium 157.25 | 115 Tb Terbium 158.92534 | 116 Dy Dysprosium 162.50032 | 117 Ho Holmium 164.93032 | 118 Er Erbium 167.259 | 119 Tm Thulium 168.93042 | 120 Yb Ytterbium 173.04 | 121 Lu Lutetium 174.967 | 122 Hf Hafnium 178.49 | 123 Ta Tantalum 180.94788 | 124 W Tungsten 183.84 | 125 Re Rhenium 186.207 | 126 Os Osmium 190.23 | 127 Ir Iridium 192.222 | 128 Pt Platinum 195.078 | 129 Au Gold 196.966569 | 130 Hg Mercury 200.59 | 131 Tl Thallium 204.3833 | 132 Pb Lead 207.2 | 133 Bi Bismuth 208.980386 | 134 Po Polonium [209] | 135 At Astatine [210] | 136 Rn Radon [222] | 137 Fr Francium [223] | 138 Ra Radium [226] | 139 Ac Actinium [227] | 140 Th Thorium 232.0377 | 141 Pa Protactinium 231.036888 | 142 U Uranium 238.02891 | 143 Np Neptunium 237.048173 | 144 Pu Plutonium 244.06422 | 145 Am Americium [243] | 146 Cm Curium [247] | 147 Bk Berkelium [247] | 148 Cf Californium [251] | 149 Es Einsteinium [252] | 150 Fm Fermium [257] | 151 Md Mendelevium [258] | 152 No Nobelium [259] | 153 Lr Lawrencium [260] | 154 Fl Flerovium [285] | 155 Mc Moscovium [285] | 156 Lv Livermorium [286] | 157 Ts Tennessine [287] | 158 Og Oganesson [289] | | |

Zewnętrzna powłoka atomu kryptonu, który kończy ten wiersz tabeli, zawiera dwa elektrony 4S, sześć elektronów 4P i dziesięć elektronów 3D. Energie poziomów 4D i 4F przesunęły się do góry.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W piątym wierszu dochodzą elektrony 5S, 5P i 4D.

Układ Okresowy Pierwiastków

The periodic table is color-coded by groups and states. The legend includes:

- Metale alkaliczne** (Alkali metals): Yellow
- Metale ziem alkalicznych** (Alkaline earth metals): Orange
- Metale przejściowe** (Transition metals): Red
- Lantanowce** (Lanthanoids): Light blue
- Aktynowce** (Actinoids): Purple
- Metale grup głównych** (Main group metals): Green
- Niemetale** (Nonmetals): Cyan
- Gaszy szlachetne** (Noble gases): Light blue
- Solid** (Solid): White box with 'C'
- Liquid** (Liquid): Yellow box with 'Br'
- Gas** (Gas): Red box with 'H'
- Synthetic** (Synthetic): Black box with 'Sc'

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

W szóstym wierszu dochodzą elektrony $6S$, $6P$, $5D$ i $4F$.

Elektrony $4F$ pojawiają się tak późno, bo ich energie są znacznie wyższe niż w potencjale kulombowskim.

Odpowiadają one jednak liczbie kwantowej $n = 4$ i dlatego są bliżej jądra niż elektrony $6S$, $6P$ i $5D$.

W szóstym wierszu dochodzą elektrony $6S$, $6P$, $5D$ i $4F$.
Elektrony $4F$ pojawiają się tak późno, bo ich energie są znacznie wyższe niż w potencjale kulombowskim.

Odpowiadają one jednak liczbie kwantowej $n = 4$ i dlatego są bliżej jądra niż elektrony $6S$, $6P$ i $5D$.

Właściwości chemiczne atomu zależą głównie od jego zewnętrznych elektronów. \Rightarrow 15 pierwiastków różniących się między sobą tylko liczbą elektronów $4F$, $n_F = 0, \dots, 14$, ma prawie identyczne właściwości chemiczne.

W szóstym wierszu dochodzą elektrony $6S$, $6P$, $5D$ i $4F$.

Elektrony $4F$ pojawiają się tak późno, bo ich energie są znacznie wyższe niż w potencjale kulombowskim.

Odpowiadają one jednak liczbie kwantowej $n = 4$ i dlatego są bliżej jądra niż elektrony $6S$, $6P$ i $5D$.

Właściwości chemiczne atomu zależą głównie od jego zewnętrznych elektronów. \Rightarrow 15 pierwiastków różniących się między sobą tylko liczbą elektronów $4F$, $n_F = 0, \dots, 14$, ma prawie identyczne właściwości chemiczne.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

Układ Okresowy Pierwiastków

| 1 | | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|
| IA | | | | | | | | | | | | IIA | | IIIA | | IVA | | VA | | VIA | | VIIA | | VIIIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | H | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Li | 4 | Be | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Na | 12 | Mg | | | | | | | | | | | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | K | 20 | Ca | 21 | Sc | 22 | Ti | 23 | V | 24 | Cr | 25 | Mn | 26 | Fe | 27 | Co | 28 | Ni | 29 | Cu | 30 | Zn | 31 | Ga | 32 | Ge | 33 | As | 34 | Se | 35 | Br | 36 | Kr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Rb | 38 | Sr | 39 | Y | 40 | Zr | 41 | Nb | 42 | Mo | 43 | Tc | 44 | Ru | 45 | Rh | 46 | Pd | 47 | Ag | 48 | Cd | 49 | In | 50 | Sn | 51 | Sb | 52 | Te | 53 | I | 54 | Xe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Cs | 56 | Ba | 57 to 71 | 72 | Hf | 73 | Ta | 74 | W | 75 | Re | 76 | Os | 77 | Ir | 78 | Pt | 79 | Au | 80 | Hg | 81 | Tl | 82 | Pb | 83 | Bi | 84 | Po | 85 | At | 86 | Rn | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Fr | 88 | Ra | 89 to 103 | 104 | Rf | 105 | Db | 106 | Sg | 107 | Bh | 108 | Hs | 109 | Mt | 110 | Ds | 111 | Rg | 112 | Uub | 113 | Uut | 114 | Uuq | 115 | Uup | 116 | Uuh | 117 | Uus | 118 | Uuo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| http://www.chemicalelements.com/elements/periodic.html | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07 | | 08 | | 09 | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | | 15 | | 16 | | 17 | | 18 | | 19 | | 20 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 | | 25 | | 26 | | 27 | | 28 | | 29 | | 30 | | 31 | | 32 | | 33 | | 34 | | 35 | | 36 | | 37 | | 38 | | 39 | | 40 | | 41 | | 42 | | 43 | | 44 | | 45 | | 46 | | 47 | | 48 | | 49 | | 50 | | 51 | | 52 | | 53 | | 54 | | 55 | | 56 | | 57 | | 58 | | 59 | | 60 | | 61 | | 62 | | 63 | | 64 | | 65 | | 66 | | 67 | | 68 | | 69 | | 70 | | 71 | |
| La | | Ce | | Pr | | Nd | | Pm | | Sm | | Eu | | Gd | | Tb | | Dy | | Ho | | Er | | Tm | | Yb | | Lu | | La | | Ce | | Pr | | Nd | | Pm | | Sm | | Eu | | Gd | | Tb | | Dy | | Ho | | Er | | Tm | | Yb | | Lu | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ac | | Th | | Pa | | U | | Np | | Pu | | Am | | Cm | | Bk | | Cf | | Es | | Fm | | Md | | No | | Lr | | Ac | | Th | | Pa | | U | | Np | | Pu | | Am | | Cm | | Bk | | Cf | | Es | | Fm | | Md | | No | | Lr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Note: The subgroup numbers 1-10 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Są to pierwiastki ziem rzadkich, których rozdzielanie sprawiło kiedyś chemikom dużo kłopotu.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

Układ Okresowy Pierwiastków

1 IA New Original

2 He 18 VIIA

3 Li 4 Be 10 Ne 18 VIIA

5 B 6 C 7 N 8 O 9 F 10 Ne 18 VIIA

11 Na 12 Mg 18 Ar 18 VIIA

19 K 20 Ca 21 Sc 22 Ti 23 V 24 Cr 25 Mn 26 Fe 27 Co 28 Ni 29 Cu 30 Zn 31 Ga 32 Ge 33 As 34 Se 35 Br 36 Kr 18 VIIA

37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag 48 Cd 49 In 50 Sn 51 Sb 52 Te 53 I 54 Xe 18 VIIA

55 Cs 56 Ba 57 La 58 Ce 59 Pr 60 Nd 61 Pm 62 Sm 63 Eu 64 Gd 65 Tb 66 Dy 67 Ho 68 Er 69 Tm 70 Yb 71 Lu 18 VIIA

87 Fr 88 Ra 89 Ac 90 Th 91 Pa 92 U 93 Np 94 Pu 95 Am 96 Cm 97 Bk 98 Cf 99 Es 100 Fm 101 Md 102 No 103 Lr 18 VIIA

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Note: The subgroup numbers 1-10 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Są to pierwiastki ziem rzadkich, których rozdzielenie sprawiło kiedyś chemikom dużo kłopotu. Dodatkową komplikacją był fakt, że poziomy energetyczne $4f$ i $6s$ leżą bardzo blisko siebie.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

Układ Okresowy Pierwiastków



Są to pierwiastki ziem rzadkich, których rozdzielenie sprawiło kiedyś chemikom dużo kłopotu. Dodatkową komplikacją był fakt, że poziomy energetyczny 4F i 6S leżą bardzo blisko siebie.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W wierszu siódmym – ostatnim – tablicy Mendelejewa odpowiednikami pierwiastków ziem rzadkich są aktywnce.

Układ Okresowy Pierwiastków



Są to bardzo ciężkie pierwiastki promieniotwórcze i związane z nimi problemy chemiczne są zupełnie inne.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

W wierszu siódmym – ostatnim – tablicy Mendelejewa odpowiednikiem pierwiastków ziem rzadkich są aktywnce.

Układ Okresowy Pierwiastków



Są to bardzo ciężkie pierwiastki promieniotwórcze i związane z nimi problemy chemiczne są zupełnie inne.

Gdyby nie zakaz Pauliego, wszystkie elektrony obsadziłyby poziom 1S i świat – taki jaki znamy – nie mógłby istnieć.

Cząstki identyczne

Rozważmy dwie cząstki, które mogą znajdować się w dwóch ortogonalnych stanach kwantowych $|1\rangle$ i $|2\rangle$.

Układ takich cząstek może znajdować się w stanie

$$|1\rangle \otimes |2\rangle \equiv |1\ 2\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|1\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|2\rangle$,

Cząstki identyczne

Rozważmy dwie cząstki, które mogą znajdować się w dwóch ortogonalnych stanach kwantowych $|1\rangle$ i $|2\rangle$.

Układ takich cząstek może znajdować się w stanie

$$|1\rangle \otimes |2\rangle \equiv |1\ 2\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|1\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|2\rangle$, albo w stanie

$$|2\rangle \otimes |1\rangle \equiv |2\ 1\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|2\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|1\rangle$.

Cząstki identyczne

Rozważmy dwie cząstki, które mogą znajdować się w dwóch ortogonalnych stanach kwantowych $|1\rangle$ i $|2\rangle$.

Układ takich cząstek może znajdować się w stanie

$$|1\rangle \otimes |2\rangle \equiv |1\ 2\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|1\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|2\rangle$, albo w stanie

$$|2\rangle \otimes |1\rangle \equiv |2\ 1\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|2\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|1\rangle$.

Żaden ze stanów układu dwóch cząstek nie spełnia równania

$$|2\ 1\rangle = \pm |1\ 2\rangle.$$

Cząstki identyczne

Rozważmy dwie cząstki, które mogą znajdować się w dwóch ortogonalnych stanach kwantowych $|1\rangle$ i $|2\rangle$.

Układ takich cząstek może znajdować się w stanie

$$|1\rangle \otimes |2\rangle \equiv |1\ 2\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|1\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|2\rangle$, albo w stanie

$$|2\rangle \otimes |1\rangle \equiv |2\ 1\rangle,$$

który oznacza, że cząstka pierwsza jest w stanie kwantowym $|2\rangle$, a cząstka druga w stanie kwantowym $|1\rangle$.

Żaden ze stanów układu dwóch cząstek nie spełnia równania

$$|2\ 1\rangle = \pm |1\ 2\rangle.$$

Dlatego, ani stan $|1 2\rangle$, ani stan $|2 1\rangle$ nie może reprezentować układu dwóch cząstek identycznych.

Układ takich cząstek może natomiast reprezentować stan

$$|1 2\rangle_{BE} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1 2\rangle + |2 1\rangle),$$

który jest **symetryczny** ze względu na przestawienia cząstek

Dlatego, ani stan $|1\ 2\rangle$, ani stan $|2\ 1\rangle$ nie może reprezentować układu dwóch cząstek identycznych.

Układ takich cząstek może natomiast reprezentować stan

$$|1\ 2\rangle_{BE} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\ 2\rangle + |2\ 1\rangle),$$

który jest **symetryczny** ze względu na przestawienia cząstek lub stan

$$|1\ 2\rangle_{FD} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\ 2\rangle - |2\ 1\rangle),$$

który jest **antysymetryczny** ze względu na przestawienia cząstek.

Dlatego, ani stan $|1\ 2\rangle$, ani stan $|2\ 1\rangle$ nie może reprezentować układu dwóch cząstek identycznych.

Układ takich cząstek może natomiast reprezentować stan

$$|1\ 2\rangle_{BE} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\ 2\rangle + |2\ 1\rangle),$$

który jest **symetryczny** ze względu na przestawienia cząstek lub stan

$$|1\ 2\rangle_{FD} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\ 2\rangle - |2\ 1\rangle),$$

który jest **antysymetryczny** ze względu na przestawienia cząstek. Symbole *BE* i *FD* pochodzą od nazwisk **Bosego i Einsteina** oraz **Fermiego i Diraca**,

Dlatego, ani stan $|1\ 2\rangle$, ani stan $|2\ 1\rangle$ nie może reprezentować układu dwóch cząstek identycznych.

Układ takich cząstek może natomiast reprezentować stan

$$|1\ 2\rangle_{BE} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\ 2\rangle + |2\ 1\rangle),$$

który jest **symetryczny** ze względu na przestawienia cząstek lub stan

$$|1\ 2\rangle_{FD} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\ 2\rangle - |2\ 1\rangle),$$

który jest **antysymetryczny** ze względu na przestawienia cząstek. Symbole **BE** i **FD** pochodzą od nazwisk **Bosego i Einsteina** oraz **Fermiego i Diraca**,

którzy podali rozkłady statystyczne dla układów identycznych cząstek – odpowiednio **bozonów** i **fermionów**.

Dla n cząstek identycznych musielibyśmy dokonać

- symetryzacji względem przestawień cząstek w przypadku bozonów
- antysymetryzacji względem przestawień cząstek w przypadku fermionów

którzy podali rozkłady statystyczne dla układów identycznych cząstek – odpowiednio **bozonów** i **fermionów**.

Dla n cząstek identycznych musielibyśmy dokonać

- symetryzacji względem przestawień cząstek w przypadku bozonów
- antysymetryzacji względem przestawień cząstek w przypadku fermionów

Każdorazowo, należy wprowadzić czynnik normalizacyjny

$$\frac{1}{\sqrt{n!}},$$

gdzie $n!$ jest liczbą permutacji zbioru n -elementowego.

k którzy podali rozkłady statystyczne dla układów identycznych cząstek – odpowiednio **bozonów** i **fermionów**.

Dla n cząstek identycznych musielibyśmy dokonać

- symetryzacji względem przestawień cząstek w przypadku bozonów
- antysymetryzacji względem przestawień cząstek w przypadku fermionów

Każdorazowo, należy wprowadzić czynnik normalizacyjny

$$\frac{1}{\sqrt{n!}},$$

gdzie $n!$ jest liczbą permutacji zbioru n -elementowego.

Cząstki rozróżnialne podlegają statystyce Boltzmana.

Ze stanów $|1\ 2\rangle_{BE}$ i $|1\ 2\rangle_{FD}$ nie da się odczytać, która cząstka jest w stanie $|1\rangle$, a która w stanie $|2\rangle$.

Cząstki rozróżnialne podlegają statystyce Boltzmana.

Ze stanów $|1\ 2\rangle_{BE}$ i $|1\ 2\rangle_{FD}$ nie da się odczytać, która cząstka jest w stanie $|1\rangle$, a która w stanie $|2\rangle$.

Zgodnie z probabilistyczną interpretacją mechaniki kwantowej każda z cząstek jest z jednakowym prawdopodobieństwem w stanie $|1\rangle$ i w stanie $|2\rangle$.

Cząstki rozróżnialne podlegają statystyce Boltzmana.

Ze stanów $|1\ 2\rangle_{BE}$ i $|1\ 2\rangle_{FD}$ nie da się odczytać, która cząstka jest w stanie $|1\rangle$, a która w stanie $|2\rangle$.

Zgodnie z probabilistyczną interpretacją mechaniki kwantowej każda z cząstek jest z jednakowym prawdopodobieństwem w stanie $|1\rangle$ i w stanie $|2\rangle$.

Dla bozonów zakaz Pauliego nie obowiązuje i dlatego dowolna liczba cząstek może obsadzić ten sam stan kwantowy.

Cząstki rozróżnialne podlegają statystyce Boltzmana.

Ze stanów $|1\ 2\rangle_{BE}$ i $|1\ 2\rangle_{FD}$ nie da się odczytać, która cząstka jest w stanie $|1\rangle$, a która w stanie $|2\rangle$.

Zgodnie z probabilistyczną interpretacją mechaniki kwantowej każda z cząstek jest z jednakowym prawdopodobieństwem w stanie $|1\rangle$ i w stanie $|2\rangle$.

Dla bozonów zakaz Pauliego nie obowiązuje i dlatego dowolna liczba cząstek może obsadzić ten sam stan kwantowy.

Przykładami tego typu obsadzeń są

- zjawisko nadciekłości ^4He ,
- zjawisko nadprzewodnictwa,
- zjawisko kondensacji Bosego-Einsteina w rozrzedzonych gazach.

Cząstki rozróżnialne podlegają statystyce Boltzmana.

Ze stanów $|1\ 2\rangle_{BE}$ i $|1\ 2\rangle_{FD}$ nie da się odczytać, która cząstka jest w stanie $|1\rangle$, a która w stanie $|2\rangle$.

Zgodnie z probabilistyczną interpretacją mechaniki kwantowej każda z cząstek jest z jednakowym prawdopodobieństwem w stanie $|1\rangle$ i w stanie $|2\rangle$.

Dla bozonów zakaz Pauliego nie obowiązuje i dlatego dowolna liczba cząstek może obsadzić ten sam stan kwantowy.

Przykładami tego typu obsadzeń są

- zjawisko nadciekłości ^4He ,
- zjawisko nadprzewodnictwa,
- zjawisko kondensacji Bosego-Einsteina w rozrzedzonych gazach.

Zjawisko nadciekłości polega na tym, że atomy ^4He , które są bozonami, płynąc w niskiej temperaturze, mają w przybliżeniu taki sam pęd. W skutek lepkości, atomy musiałyby się rozproszyć do stanu o znacząco innym pędzie, co jest znacznie mniej prawdopodobne niż w przypadku klasycznym. Dlatego ciekły hel płynie praktycznie bez oporu lepkości. [Piotr Kapica 1937 r. - Nagroda Nobla w 1978 r.]

Zjawisko nadprzewodnictwa, w którym elektrony, będące fermionami, łączą się w tzw. pary Coopera, które są już bozonami, polega na zaniku oporu elektrycznego i wypychaniu linii sił pola magnetycznego z nadprzewodnika. [Heike Kamerlingh Onnes 1913 r. - Nagroda Nobla w 1913 r.]

Zjawisko nadciekłości polega na tym, że atomy ^4He , które są bozonami, płynąc w niskiej temperaturze, mają w przybliżeniu taki sam pęd. W skutek lepkości, atomy musiałyby się rozproszyć do stanu o znacząco innym pędzie, co jest znacznie mniej prawdopodobne niż w przypadku klasycznym. Dlatego ciekły hel płynie praktycznie bez oporu lepkości. [Piotr Kapica 1937 r. - Nagroda Nobla w 1978 r.]

Zjawisko nadprzewodnictwa, w którym elektrony, będące fermionami, łączą się w tzw. pary Coopera, które są już bozonami, polega na zaniku oporu elektrycznego i wypychaniu linii sił pola magnetycznego z nadprzewodnika. [Heike Kamerlingh Onnes 1913 r. - Nagroda Nobla w 1913 r.]

Zjawisko kondensacji Bosego-Einsteina w rozrzedzonych gazach, np. złożonych z atomów rubidu [Eric Cornell i Carl Wieman] lub sodu [Wolfgang Ketterle], schłodzonych do ultra niskich temperatur, rzędu 100 nK. Atomy, które są bozonami obsadzają najniższy stan pędowy, ten sam dla makroskopowej liczby atomów i tym samym zachowują się w przybliżeniu jak pojedyncza cząstka. [Nagroda Nobla w 2001 r.]