

Cząstki identyczne

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 Boltzmanna).

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 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?

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, następuje 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, następuje 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, następuje 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, następuje 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, następuje 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, następuje 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, następuje 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.

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.

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.

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.

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.

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.

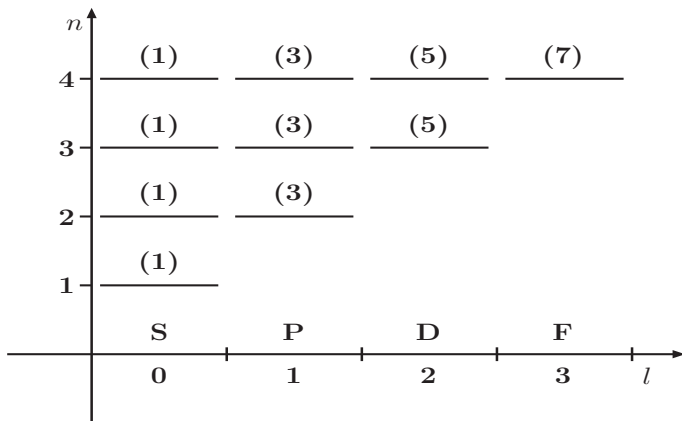
Dla uproszczenia założymy, że elektrony nie oddziałują między sobą, ale poruszają się w pewnym średnim potencjale pochodzącym od jądra i od chmury elektronowej.

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.

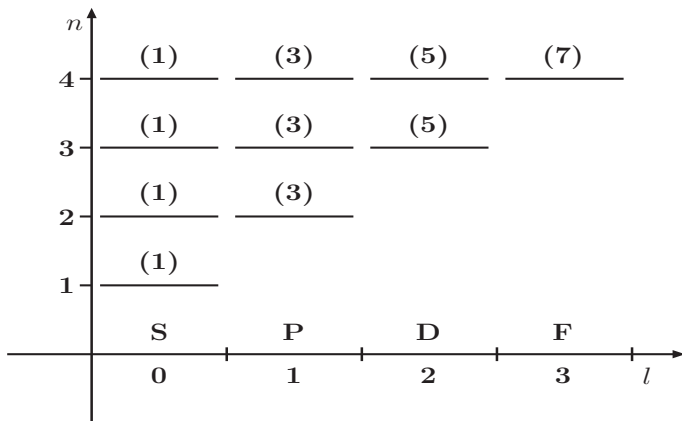
Jest to podejście często stosowane w fizyce teoretycznej.
Prawdziwy hamiltonian zastępujemy hamiltonianem efektywnym,
wybrany tak, żeby dawał wyniki możliwie bliskie do prawdziwych
w zakresie, który nas interesuje.

Schemat poziomów energetycznych elektronu



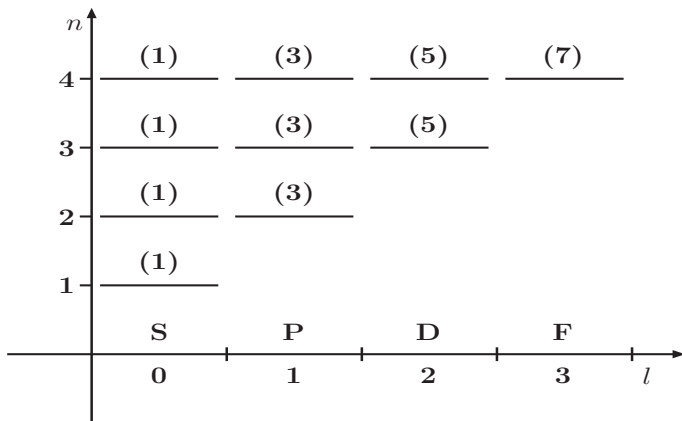
Energia zależy tylko od liczby kwantowej n .

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 $4D$.

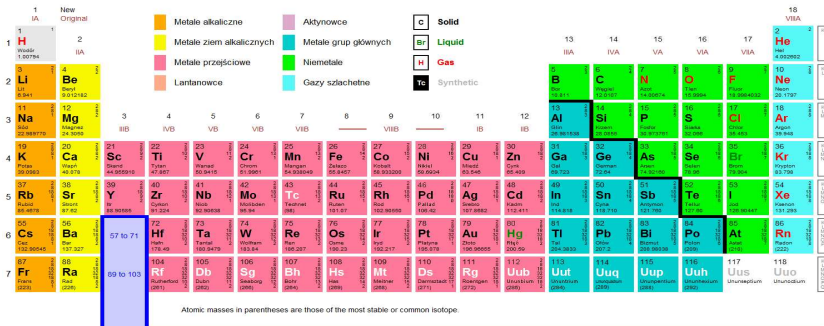
Musimy jeszcze uwzględnić spin elektronu. Każdy ze stanów przedstawionych na schemacie występuje w dwóch wersjach: ze spinem skierowanym do góry i ze spinem skierowanym w dół.

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



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.

Zakaz Pauliego a układ okresowy

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

Układ Okresowy Pierwiastków

1 IA		New Original																		18 VIIIA	
1		2																		2	
H		He																		He	
1s ¹		1s ²																		1s ²	
1s		2s																		2s	
Li		Be																		2p	
2s ¹		2s ²																		2s 2p	
3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13	
Na		Mg		Al		Si		P		S		Cl		Ar		K		Ca		Ga	
3s ¹		3s ²		3s ² 3p ¹		3s ² 3p ²		3s ² 3p ³		3s ² 3p ⁴		3s ² 3p ⁵		3s ² 3p ⁶		4s ¹		4s ²		4s ² 4p ¹	
19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29	
K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu	
4s ¹		4s ²		3d ¹ 4s ²		3d ² 4s ²		3d ³ 4s ²		3d ⁴ 4s ²		3d ⁵ 4s ²		3d ⁶ 4s ²		3d ⁷ 4s ²		3d ⁸ 4s ²		3d ¹⁰ 4s ¹	
37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47	
Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag	
5s ¹		5s ²		4d ¹ 5s ²		4d ² 5s ²		4d ³ 5s ²		4d ⁴ 5s ²		4d ⁵ 5s ²		4d ⁶ 5s ²		4d ⁷ 5s ²		4d ⁸ 5s ²		4d ¹⁰ 5s ¹	
55		56		57 to 71		72		73		74		75		76		77		78		79	
Cs		Ba		Lanthanoids		Hf		Ta		W		Re		Os		Pt		Au		Hg	
6s ¹		6s ²		5d ¹ 6s ²		5d ² 6s ²		5d ³ 6s ²		5d ⁴ 6s ²		5d ⁵ 6s ²		5d ⁶ 6s ²		5d ⁷ 6s ²		5d ⁸ 6s ²		5d ¹⁰ 6s ¹	
87		88		89 to 103		104		105		106		107		108		109		110		111	
Fr		Ra		Actinoids		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg	
7s ¹		7s ²		6d ¹ 7s ²		6d ² 7s ²		6d ³ 7s ²		6d ⁴ 7s ²		6d ⁵ 7s ²		6d ⁶ 7s ²		6d ⁷ 7s ²		6d ⁸ 7s ²		6d ¹⁰ 7s ¹	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s ¹		8s ²		7d ¹ 8s ²		7d ² 8s ²		7d ³ 8s ²		7d ⁴ 8s ²		7d ⁵ 8s ²		7d ⁶ 8s ²		7d ⁷ 8s ²		7d ⁸ 8s ²		7d ¹⁰ 8s ¹	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s		8s		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s ¹		8s ²		7d ¹ 8s ²		7d ² 8s ²		7d ³ 8s ²		7d ⁴ 8s ²		7d ⁵ 8s ²		7d ⁶ 8s ²		7d ⁷ 8s ²		7d ⁸ 8s ²		7d ¹⁰ 8s ¹	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s		8s		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s ¹		8s ²		7d ¹ 8s ²		7d ² 8s ²		7d ³ 8s ²		7d ⁴ 8s ²		7d ⁵ 8s ²		7d ⁶ 8s ²		7d ⁷ 8s ²		7d ⁸ 8s ²		7d ¹⁰ 8s ¹	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s		8s		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s ¹		8s ²		7d ¹ 8s ²		7d ² 8s ²		7d ³ 8s ²		7d ⁴ 8s ²		7d ⁵ 8s ²		7d ⁶ 8s ²		7d ⁷ 8s ²		7d ⁸ 8s ²		7d ¹⁰ 8s ¹	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	
8s		8s		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d		7d	
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129	
Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu		Uu	

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 IUPAC equivalents of those numbers.

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

Legend: Solid (grey), Liquid (blue), Gas (red), Synthetic (black).

Category Legend: Alkali metals (yellow), Alkaline earth metals (orange), Transition metals (green), Lanthanoids (purple), Actinoids (pink), Metalloids (light blue), Nonmetals (light green), Noble gases (light purple), Solid (grey), Liquid (blue), Gas (red), Synthetic (black).

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: Alkali metals (yellow), Alkaline earth metals (orange), Transition metals (pink), Lanthanides (light blue), Actinides (purple), Main group metals (green), Metalloids (light green), Nonmetals (light blue), and Noble gases (cyan). State indicators are shown in boxes: Solid (white), Liquid (blue), Gas (red), and Synthetic (black).

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

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.

1 IA New Original	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA						
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Helium 4.002602											3 B Boron 10.811	4 C Carbon 12.011	5 N Nitrogen 14.007	6 O Oxygen 15.999	7 F Fluorine 18.998	8 Ne Neon 20.180						
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											9 Al Aluminum 26.982	10 Si Silicon 28.086	11 P Phosphorus 30.974	12 S Sulfur 32.06	13 Cl Chlorine 35.45	14 Ar Argon 39.948						
5 Na Sodium 22.990	6 Mg Magnesium 24.305	7 Sc Scandium 44.956	8 Ti Titanium 47.88	9 V Vanadium 50.942	10 Cr Chromium 52.00	11 Mn Manganese 54.938	12 Fe Iron 55.845	13 Co Cobalt 58.933	14 Ni Nickel 58.693	15 Cu Copper 63.546	16 Zn Zinc 65.38	17 Ga Gallium 69.723	18 Ge Germanium 72.64	19 As Arsenic 74.922	20 Se Selenium 78.96	21 Br Bromine 79.904	22 Kr Krypton 83.798						
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798						
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.36	47 Ag Silver 107.868	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 126.905	54 Xe Xenon 131.29						
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57 to 71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.387	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)						
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 to 103 Actinides	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub Ununbium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uuh Ununhexium (288)	116 Uuo Ununhexium (289)	117 Uus Ununseptium (289)	118 Uuo Ununoctium (289)						
117 Ts Tennessine (289)	118 Og Oganesson (289)																	119 Nh Nihonium (285)	120 Fl Flerovium (287)	121 Mc Moscovium (288)	122 Lv Livermorium (293)	123 Nh Nihonium (285)	124 Og Oganesson (289)
125 Nh Nihonium (285)	126 Fl Flerovium (287)	127 Mc Moscovium (288)	128 Lv Livermorium (293)	129 Ts Tennessine (289)	130 Og Oganesson (289)	131 Nh Nihonium (285)	132 Fl Flerovium (287)	133 Mc Moscovium (288)	134 Lv Livermorium (293)	135 Ts Tennessine (289)	136 Og Oganesson (289)	137 Nh Nihonium (285)	138 Fl Flerovium (287)	139 Mc Moscovium (288)	140 Lv Livermorium (293)	141 Ts Tennessine (289)	142 Og Oganesson (289)						

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 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), Group 11 (purple), Group 12 (blue), Main group elements (green), Halogens (light green), Noble gases (cyan), and Synthetic elements (black). A legend identifies states: Solid (white), Liquid (blue), Gas (red), and Synthetic (black). Group labels include IA, IIA, IIIA, IVA, VA, VIA, VIIA, VIIIA, and IBA. Element symbols, atomic numbers, and names are provided for each element. Atomic masses in parentheses indicate 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.

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

<http://www.ck12.org/periodic-table-of-elements>

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 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), Lanthanides (light orange), Halogens (purple), Noble gases (light blue), Actinides (light purple), Main group metals (green), Nonmetals (light green), and Gaseous diatomic elements (cyan). A blue box highlights the fourth row, which contains 18 elements: K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr.

Legend:

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

Note: The subgroups 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.

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

<http://www.ck12.org/periodic-table-of-elements>

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

1 IA		New Original										13 IIA										14 IVA										15 VA										16 VIA										17 VIIA										18 VIIIA	
1 H Hydrogen (1.00784)	2 He Helium (4.002602)																																																														
3 Li Lithium (6.941)	4 Be Beryllium (9.012182)																																																														
11 Na Sodium (22.98976928)	12 Mg Magnesium (24.304)																																																														
19 K Potassium (39.0983)	20 Ca Calcium (40.078)	21 Sc Scandium (44.955912)	22 Ti Titanium (47.88)	23 V Vanadium (50.9415)	24 Cr Chromium (51.9961)	25 Mn Manganese (54.938045)	26 Fe Iron (55.845)	27 Co Cobalt (58.933200)	28 Ni Nickel (58.6934)	29 Cu Copper (63.546)	30 Zn Zinc (65.38)	31 Ga Gallium (69.723)	32 Ge Germanium (72.630)	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 (98.90625)	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 (126.90547)	54 Xe Xenon (131.29)	55 Cs Cesium (132.90545196)	56 Ba Barium (137.327)	57 to 71										81 Tl Thallium (204.38)	82 Pb Lead (207.2)	83 Bi Bismuth (208.9804)	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (209)	86 Rn Radon (222)										
63 Eu Europium (151.964)	64 Gd Gadolinium (157.25)	65 Tb Terbium (158.92534)	66 Dy Dysprosium (162.500)	67 Ho Holmium (164.93032)	68 Er Erbium (167.259)	69 Tm Thulium (168.93421)	70 Yb Ytterbium (173.04)	71 Lu Lutetium (174.967)	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 to 103										104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub Ununbium (285)	113 Uut Ununtrium (288)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuq Ununhexium (289)	117 Uuh Ununheptium (289)	118 Uuo Ununoctium (289)	119 Uue Ununennium (289)	120 Uuo Unbinilium (289)																										
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium (232.0381)	91 Pa Protactinium (231.03688)	92 U Uranium (238.02891)	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)																																																	

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 IA New Original	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA	
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Helium 4.002602											13 B Boron 10.811	14 C Carbon 12.011	15 N Nitrogen 14.007	16 O Oxygen 15.999	17 F Fluorine 18.998	18 Ne Neon 20.1797	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01224											13 Al Aluminum 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948	
5 Na Sodium 22.98976928	6 Mg Magnesium 24.304	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9 VIIB	10	11 IB	12	13 Ga Gallium 69.723	14 Ge Germanium 72.64	15 As Arsenic 74.9216	16 Se Selenium 78.96	17 Br Bromine 79.904	18 Kr Krypton 83.798	
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938044	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 83.798	
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 101.07	46 Pd Palladium 106.90509	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 126.905	54 Xe Xenon 131.29	
55 Cs Cesium 132.90545196	56 Ba Barium 137.327	57 to 71 Lanthanoids		72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.9804	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89 to 103 Actinoids		104 Rf Rutherfordium 261	105 Db Dubnium 262	106 Sg Seaborgium 266	107 Bh Bohrium 264	108 Hs Hassium 277	109 Mt Meitnerium 268	110 Ds Darmstadtium 271	111 Rg Roentgenium 272	112 Uub Ununbium 285	113 Uut Ununtrium 284	114 Uuq Ununquadium 289	115 Uup Ununpentium 288	116 Uuh Ununhexium 289	117 Uus Ununseptium 289	118 Uuo Ununoctium 289
Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.																		
http://www.chemicalelements.com/																		
87 La Lanthanum 138.90547	88 Ce Cerium 140.12	89 Pr Praseodymium 140.90766	90 Nd Neodymium 144.24	91 Pm Promethium 144.9126	92 Sm Samarium 150.36	93 Eu Europium 151.964	94 Gd Gadolinium 157.25	95 Tb Terbium 158.92534	96 Dy Dysprosium 162.50014	97 Ho Holmium 164.93032	98 Er Erbium 167.258	99 Tm Thulium 168.93421	100 Yb Ytterbium 173.04	101 Lu Lutetium 174.967	102 No Nobelium 259	103 Lr Lawrencium 260		
89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium 237.04817	94 Pu Plutonium 244	95 Am Americium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkelium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 252	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendelevium 258	102 No Nobelium 259	103 Lr Lawrencium 260				

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 IUPAC equivalents of those numbers.

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

Zakaz Pauliego a układ okresowy

Układ Okresowy Pierwiastków

1 IA 1 H Hydrogen 1.00794	2 IIA 2 He Helium 4.002602											13 IIIA 13 B Bor 10.811	14 IVA 14 C Węgiel 12.011	15 VA 15 N Azot 14.0064	16 VIA 16 O Tlen 15.999	17 VIIA 17 F Fluor 18.9984	18 VIIIA 18 Ne Neon 20.1797												
3 11 Na Sód 22.98976928	4 12 Mg Magnez 24.304											19 IIA 19 K Potas 39.0983	20 IIA 20 Ca Wapń 40.078											31 IIIA 31 Ga Gallium 69.723	32 IIIA 32 Ge Cynk 72.64	33 IVA 33 As Arsen 74.9216	34 VA 34 Se Selen 78.96	35 VIA 35 Br Brom 79.904	36 VIIA 36 Kr Krypton 83.798
4 19 K Potas 39.0983	20 IIA 20 Ca Wapń 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Tytan 47.88	23 V Wan 50.9415	24 Cr Chrom 51.9961	25 Mn Mangan 54.938044	26 Fe Żelazo 55.845	27 Co Kobalt 58.933195	28 Ni Nikiel 58.6934	29 Cu Miedź 63.546	30 Zn Cynk 65.38	31 IIIA 31 Ga Gallium 69.723	32 IIIA 32 Ge Cynk 72.64	33 IVA 33 As Arsen 74.9216	34 VA 34 Se Selen 78.96	35 VIA 35 Br Brom 79.904	36 VIIA 36 Kr Krypton 83.798												
5 37 Rb Rubid 85.4678	38 IIA 38 Sr Stront 87.62	39 Y Yttr 88.90584	40 Zr Cyzk 91.224	41 Nb Nikiel 92.90638	42 Mo Molibden 95.94	43 Tc Technet 98	44 Ru Ruten 101.07	45 Rh Reni 102.90550	46 Pd Pallad 106.3675	47 Ag Srebro 107.8682	48 Cd Cadm 112.411	49 In Ind 114.818	50 Sn Cynk 118.710	51 Sb Antym 121.757	52 Te Tellur 127.6	53 I Jod 126.9054	54 Xe Ksen 131.29												
6 55 Cs Cezj 132.90545196	56 IIA 56 Ba Baryt 137.327	71 Lantanowce										72 Hf Hafn 178.49	73 Ta Tantal 180.9479	74 W Wolfram 183.84	75 Re Ren 186.207	76 Os Osm 190.23	77 Ir Irid 192.222	78 Pt Pallad 195.078	79 Au Złoto 196.966569	80 Hg Rtęć 200.59	81 Tl Tl 204.384	82 Pb Ołów 207.2	83 Bi Bismut 208.9804	84 Po Polon 209	85 At Astat 210	86 Rn Radon 222			
7 87 Fr Francj 223	88 IIA 88 Ra Radium 226	103 Actynowce										104 Rf Rutherford 261	105 Db Dubnium 262	106 Sg Seaborg 266	107 Bh Bohrium 264	108 Hs Hassium 277	109 Mt Meitnerium 268	110 Ds Darmstadtium 271	111 Rg Roentgenium 272	112 Uub Ununbium 285	113 Uut Ununtrium 284	114 Uuq Ununquadium 289	115 Uup Ununpentium 288	116 Uuh Ununhexium 289	117 Uus Ununseptium 289	118 Uuo Ununoctium 289			

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

Note: The superscript 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.

Legend:
Metale alkaliczne (yellow)
Metale ziem alkalicznych (orange)
Metale przejściowe (pink)
Lantanowce (purple)
Aktynowce (purple)
Metale grup głównych (green)
Niemetale (light green)
Gazy szlachetne (cyan)
Solid (white)
Liquid (blue)
Gas (red)
Synthetic (black)

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

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18											
IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIB	VIB	VB	IB	IB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIA	VIIA											
1 H Hydrogen 1.00784	2 He Helium 4.002602											3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182	5 B Bor 10.811	6 C Węgiel 12.0107	7 N Azot 14.00642	8 O Tlen 15.999	9 F Fluor 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797									
3 Na Sód 22.98976928	4 Mg Magnez 24.304											11 K Potas 39.0983	12 Ca Wapń 40.078	13 Sc Skand 44.955912	14 Ti Tytan 47.88	15 V Wanad 50.9415	16 Cr Chrom 51.9961	17 Mn Mangan 54.938044	18 Co Cobalt 58.933195	19 Ni Nikiel 58.6934	20 Cu Miedź 63.546	21 Zn Cynk 65.38	22 Ga Gallium 69.723	23 Ge Cynk 72.630	24 As Arsen 74.9216	25 Se Selen 78.96	26 Br Brom 79.904	27 Kr Krypton 83.798
19 K Potas 39.0983	20 Ca Wapń 40.078	21 Sc Skand 44.955912	22 Ti Tytan 47.88	23 V Wanad 50.9415	24 Cr Chrom 51.9961	25 Mn Mangan 54.938044	26 Fe Żelazo 55.845	27 Co Cobalt 58.933195	28 Ni Nikiel 58.6934	29 Cu Miedź 63.546	30 Zn Cynk 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Cynk 72.630	33 As Arsen 74.9216	34 Se Selen 78.96	35 Br Brom 79.904	36 Kr Krypton 83.798											
37 Rb Rubid 85.4678	38 Sr Stront 87.62	39 Y Cytan 88.90584	40 Zr Cyzur 91.224	41 Nb Nyb 92.90638	42 Mo Molibden 95.94	43 Tc Technet 98	44 Ru Ruben 101.07	45 Rh Ruten 101.07	46 Pd Pallad 106.3675	47 Ag Srebro 107.8682	48 Cd Cadm 112.411	49 In Ind 114.818	50 Sn Cynk 118.710	51 Sb Antym 121.757	52 Te Telur 127.6	53 I Jod 126.90549	54 Xe Ksen 131.29											
55 Cs Cezj 132.90545196	56 Ba Baryt 137.327	57 to 71 Lantanowce		72 Hf Hafn 178.49	73 Ta Tantal 180.9479	74 W Wolfram 183.84	75 Re Ren 186.207	76 Os Osm 190.23	77 Ir Irid 192.222	78 Pt Platyn 195.078	79 Au Złoto 196.966569	80 Hg Rtęć 200.59	81 Tl Tl 204.3833	82 Pb Ołów 207.2	83 Bi Bism 208.980399	84 Po Polon 209	85 At Astat 210	86 Rn Radon 222										
87 Fr Francj 223	88 Ra Radium 226	89 to 103 Aktynowce		104 Rf Rutherford 261	105 Db Dubnium 262	106 Sg Seaborgium 266	107 Bh Bohrium 264	108 Hs Hassium 277	109 Mt Meitnerium 268	110 Ds Darmstadtium 271	111 Rg Roentgenium 272	112 Uub Ununbium 285	113 Uut Ununtrium 284	114 Uuq Ununquadium 289	115 Uup Ununpentium 288	116 Uuh Ununhexium 289	117 Uus Ununseptium 289	118 Uuo Ununoctium 289										

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

Note: The superscript 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.

Legend:
Metale alkaliczne (Yellow)
Metale ziem alkalicznych (Light Green)
Metale przejściowe (Pink)
Lantanowce (Light Blue)
Aktynowce (Light Purple)
Metale grup głównych (Light Green)
Niemetale (Light Green)
Gazy szlachetne (Light Blue)
Solid (White)
Liquid (Light Blue)
Gas (Light Green)
Synthetic (Black)

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

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

Układ Okresowy Pierwiastków

Metale alkaliczne
Metale ziem alkalicznych
Metale przejściowe
Lantanowce
Aktywnce
Metale grup głównych
Niemetale
Gazy szlachetne
Solid
Liquid
Gas
Synthetic

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 Lanthanide equivalents of those numbers.

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 aktynowce.

Układ Okresowy Pierwiastków

Legend:

- Metale alkaliczne
- Metale ziem alkalicznych
- Metale przejściowe
- Lantanowce
- Aktynowce
- Metale grup głównych
- Niemetale
- Gazy szlachetne
- Solid
- Liquid
- Gas
- Synthetic

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 IUPAC equivalents of those numbers.

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.]