

The study of isospin-symmetry-violation effects resulting from the strong interaction within a framework rooted in the nuclear density functional theory

The main goal of the thesis is to study the isospin-symmetry-breaking (ISB) character of the effective nuclear force by looking at theoretical calculations of properties, structure and decays of atomic nuclei. The calculations are performed in the framework of density functional theory and other methods going beyond mean-field approximation.

The starting point for constructing the nucleon-nucleon interaction is the effective isoscalar Skyrme force based on a contact potential of Dirac- δ type. New ISB terms include isovector and isotensor terms contributing to charge symmetry breaking and charge independence breaking, respectively. These are class-II and class-III contact forces according to the Henley-Miller classification. The above-mentioned terms are considered in leading- (LO) and next-to-leading (NLO) order of the effective theory. The Skyrme force enriched in this way is then used for deriving energy density functional (EDF) which is finally implemented in the numerical solver HFODD. The theory introduces two and six low-energy coupling constants in the LO and NLO variants, respectively.

The adjustable parameters of the model are fitted to differences of the experimental binding energies of $N \approx Z$ nuclei, namely mirror and triplet displacement energies (MDE and TDE). The calculations are performed for isospin doublets and triplets in a wide range of masses (from $A = 6$ to 75). Three different parametrizations of isoscalar Skyrme force are employed, i.e. SV_T , SkM^* and $SLy4$. After the ISB terms are introduced to the interaction, the Nolen-Schiffer anomaly in MDE is removed for both isospin doublets and triplets and the staggering of TDE values is reproduced correctly. The accuracy of the calculations is increased by extending the formalism by including NLO terms.

Next, the investigation of the physical content of the newly-added terms is conducted. The coefficients of the isobaric multiplet mass equation are calculated with ISB EDF and then compared with those obtained with *ab initio* calculations involving AV18 potential. It turns out that the electromagnetic contribution is almost the same in both models, what leads us to the conclusion that the ISB terms added as a contact interaction most likely model the strong nuclear force.

Finally, the calculations invoking beyond-mean-field methods, i.e. projection techniques and configuration mixing (NCCI) are performed. Differences of excitation energies between states in mirror nuclei (MED) are studied. The results obtained for $A = 45$ show that the NCCI approach is capable of reproducing the experimental values of MED for low and medium spins. However, the role of ISB terms is still to be verified. Further, the β decay in isospin doublets is studied. It is shown, that the ISB terms play an important role in calculations of isospin corrections to the Fermi matrix element δ_C and, in turn, are essential for precise determination of the V_{ud} element of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa quark mixing matrix.

Pawel Baczko

Streszczenie pracy doktorskiej

Naruszenie symetrii izospinowej przez oddziaływanie silne w podejściu opartym na teorii funkcjonału gęstości

Celem niniejszej pracy było zbadanie naruszenia symetrii izospinowej (ISB) przez efektywne oddziaływanie jądrowe. Przedstawiono w niej wyniki rachunków dotyczących własności, struktury i rozpadów jąder atomowych, które wykonano, wykorzystując formalizm teorii funkcjonału gęstości oraz metody wychodzące poza przybliżenie pola średniego.

Punktem wyjścia przy definiowaniu oddziaływania nukleon-nukleon użytego w tej pracy była efektywna, izoskalarna siła Skyrme'a oparta na kontaktowym potencjale typu delta Diraca. Oddziaływanie to wzbogacono o nowe człony o charakterze ISB, posilkując się przy tym klasyfikacją Henley'a-Millera. Uwzględniono człon izowektorowy, który wprowadza do modelu oddziaływanie naruszające symetrię ładunkową oraz wkład izotensorowy, naruszający niezależność ładunkową. Człony te dodano zarówno w wiodącym (LO), jak i w kolejnym rzędzie (NLO) rozwinięcia teorii efektywnej. Dla tak zmodyfikowanej siły Skyrme'a wyprowadzono funkcjonał gęstości energii, który zaimplementowano w kodzie numerycznym HFODD. Stałe sprzężenia członów o charakterze ISB zdefiniowano poprzez dwa wolne parametry w rozwinięciu LO oraz sześć wolnych parametrów w rozwinięciu NLO.

Parametry modelu zostały dopasowane do różnic eksperymentalnych energii wiązania jąder zwierciadlanych (MDE) i jąder w trypletach izospinowych (TDE). Obliczenia wykonano dla dubletów i trypletów izospinowych w szerokim zakresie mas (od $A = 6$ do 75) dla trzech różnych parametryzacji izoskalarnej części oddziaływania Skyrme'a: SV_T , SkM^* i $SLy4$. Dzięki wykorzystaniu oddziaływania ISB z dopasowanymi stałymi sprzężenia usunięto anomalie Nolen-Schiffa dla MDE zarówno dla dubletów, jak i trypletów izospinowych oraz odtworzono oscylujący charakter wielkości TDE. Pokazano, że dokładność obliczeń MDE i TDE poprawia się przy uwzględnieniu członów ISB w rozwinięciu NLO.

Następnym krokiem było zbadanie fizycznego charakteru nowo dodanych członów. W tym celu wyznaczono współczynniki izobarycznej formuły masowej i zestawiono je z wynikami obliczeń *ab initio* z użyciem potencjału AV18. Porównanie to pokazało, że wkłady elektromagnetyczne do tych współczynników są jednakowe w obu modelach, a człony kontaktowe ISB wprowadzone do oddziaływania Skyrme'a z dużym prawdopodobieństwem modelują oddziaływanie silne.

W ostatniej części pracy zaprezentowano rachunki wykorzystujące formalizmy wychodzące poza przybliżenie pola średniego: metody rzutowe oraz mieszanie konfiguracji (NCCI). Pierwszym zagadnieniem, które badano były różnice energii wzbudzenia w jądrach zwierciadlanych (MED). Wyniki otrzymane dla dubletu izospinowego $A = 45$ pokazują, że obliczenia NCCI są w stanie odtworzyć eksperymentalne wartości MED dla niskich i średnich spinów z zadowalającą dokładnością. Rola członów ISB w tym opisie wymaga jednak dalszych badań. Kolejnym tematem były rozpady β jąder w dubletach izospinowych. Sprawdzono, że oddziaływanie kontaktowe o charakterze ISB jest istotne przy precyzyjnym wyznaczaniu poprawek δ_C dla przejść Fermiego, a w konsekwencji przy obliczaniu elementu V_{ud} macierzy Cabibbo-Kobayashi-Maskawy.

Paweł Bęczyński